于章龙,刘瑞,蔡岳,等.麸皮稳定化对'运黑161'全麦粉特性影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(1):133-140.
Yu Z L, Liu R, Cai Y, et al. Effect of bran stabilization on the characteristics of 'Yunhei161' whole wheat flour[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(1):133-140.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202406013

麸皮稳定化对'运黑161'全麦粉特性影响

于章龙[1],刘瑞[2*],蔡岳[1],宋昱[1],孙元琳[2],关硕[2]

(1.山西农业大学 棉花研究所,山西 运城 044000;2.运城学院 生命科学系,山西 运城 044000)

摘　要:[目的]黑小麦麸皮是黑小麦制粉过程中的副产物,含有丰富的膳食纤维、色素、矿物质等营养成分,但麸皮的添加往往导致产品品质降低,所以其利用率较低。本研究旨在研究不同稳定化处理'运黑161'麸皮后回添制备全麦粉的稳定性及加工特性,以提高黑小麦全麦粉稳定性及综合利用效率。[方法]以'运黑161'为原料,对其麸皮进行微波、高压蒸汽、常压蒸汽及电解水4种方法的预处理后,回添制备全麦粉,测定全麦粉的脂肪酶活动度、脂肪氧化酶活性、脂肪酸值以及流变学特性。[结果]经4种稳定化处理后全麦粉的蛋白质、脂肪含量和脂肪酶活动度及脂肪氧化酶活性均显著降低($P<0.05$),且微波处理组蛋白质和脂肪含量最低,分别为11.53%和1.93%,高压蒸汽处理组脂肪氧化酶活性以及脂肪酸值最低,分别为10.89 U/g,21.98 mg/g;高压蒸汽处理组发酵高度、总体积、面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数均最大,分别为15 mm、1767 mL、3.77 min、7.20 min和75;常压蒸汽处理组稠度最小值、最低黏度、最终黏度以及回生值最大,分别为0.81 Nm、1.80 Nm、3.45 Nm和1.65 Nm,且形成时间、稳定时间和粉质质量指数与高压蒸汽处理差异不显著($P>0.05$)。[结论]经高压蒸汽处理黑小麦麸皮回添制备的'运黑161'全麦粉加工特性得到较大改善,对商业化生产具有较强指导意义。

关键词:黑小麦;麸皮;稳定化;流变学特性
中图分类号:TS211　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)01-0133-08

Effect of bran stabilization on the characteristics of 'Yunhei161' whole wheat flour

Yu Zhanglong[1], Liu Rui[2*], Cai Yue[1], Song Yu[1], Sun Yuanlin[2], Guan Shuo[2]

(*1.Institute of Cotton Research, Shanxi Agricultural University, Yuncheng 044000, China; 2.Department of Life Science, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China*)

Abstract: [Objective] Black wheat bran, a by-product of the milling process of black wheat, is rich in dietary fiber, pigment, minerals, and other nutrients. However, the addition of bran often reduces product quality, leading to low utilization efficiency. This study aimed to investigate the stability and processing characteristics of whole wheat flour prepared by re-adding the bran of 'Yunhei 161' after different stabilization treatments, in order to improve the stability and comprehensive utilization efficiency of black wheat whole wheat flour. [Methods] 'Yunhei 161' was used as the raw material. The bran was pretreated by four methods: microwave, high-pressure steam, atmospheric pressure steam and electrolyzed water. Then, whole wheat flour was prepared by re-adding the bran. The lipase activity, lipoxygenase activity, acid value and rheological properties of the whole wheat flour were determined. [Results] The results showed that the protein and fat content, as well as lipase and fat oxidase activities, were significantly reduced in whole wheat flour subjected to the four stabilization treatments compared to the control group ($P<0.05$). Among the treatments, microwave-treated samples exhibited the lowest protein and fat content, which were 11.53% and 1.93%, respectively. High pressure steam treatment resulted in the lowest fat oxidase activity and fatty acid value, which

收稿日期:2024-06-06　　**修回日期**:2024-08-28
基金项目:山西省高等学校科技创新项目(2022L089);山西省基础研究计划项目(20210302124069);山西省现代农业产业技术体系建设专项资金(2024CYJSTX10-22);校育种工程项目(YZGC003)
作者简介:于章龙(ORCID:0009-0008-1554-1404),副研究员,研究方向:特色农产品加工利用,E-mail:y_zl1230@163.com
*通信作者:刘瑞,副教授,E-mail:lrui5188@163.com

were 10.89 U/g and 21.98 mg/g, respectively. This treatment also achieved the highest fermentation height (15 mm), total volume (1767 mL), dough formation time (3.77 min), stability time (7.20 min), and powder quality index (75). In contrast, atmospheric steam treatment yielded the largest minimum consistency (0.81 Nm), minimum viscosity (1.80 Nm), final viscosity (3.45 Nm), and recovery value (1.65 Nm). Additionally, the dough formation time, stability time, and powder quality index under atmospheric steam treatment were comparable to those of high pressure steam treatment ($P>0.05$). [Conclusion] Comprehensive analysis indicated that high-pressure steam treatment significantly enhanced the processing characteristics of 'Yunhei161' whole wheat flour, providing valuable guidance for commercial production.

Keywords: Black wheat, bran, stabilization, rheological properties

黑小麦麸皮是黑小麦加工过程中产生的副产物,富含花青素、膳食纤维、蛋白质、维生素、多酚、矿物质等营养成分。当前,黑小麦麸皮主要作为动物饲料使用,而作为健康饮食成分来源,它具有减肥、降脂、抗氧化、抗癌等多种功效,且受到越来越多的研究和关注[1-4]。但由于其口感差、质地坚硬,含有诸如植酸等抗营养物质,其中生物酶活性较高、脂肪酸等物质含量丰富,极易造成全麦粉及其制品货架期短,稳定性差,因此直接添加到食品具有明显的缺陷,在一定程度上制约了全麦粉及其制品的应用与发展[5-6]。

目前较有代表性的稳定化方法有加热钝化法,包括干热法和湿热法,挤压膨化、酶法、微波、化学处理法和辐射处理等[7]。白雪等[8]以湿热、微波及热风干燥处理新鲜燕麦麸皮,发现湿热处理燕麦麸皮具有较高的贮藏稳定性。Thanonkaew等[9]研究表明热风干燥对米糠的稳定化效果优于烘烤和蒸煮处理。王婷婷等[10]研究发现不同水分含量麦麸对挤压稳定化后回填制备的全麦挂面醛类和酯类特征风味化合物影响明显。酶解和固态发酵可促使麦麸可溶性阿拉伯木聚糖、总酚和β-葡聚糖含量含量显著提高,高压蒸汽和固态发酵处理可使麸皮中脂肪酸值和过氧化值显著降低,超声处理对小麦麸皮蛋白具有显著解聚作用[11-13]。

作者前期就直接粉碎法和回添法2种制粉方式对'运黑161'全麦粉加工特性进行了研究[14],但没有涉及麸皮稳定化处理,因此本研究为提升黑小麦全麦粉的口感及稳定性,对'运黑161'麸皮进行微波、高压蒸汽、常压蒸汽以及电解水4种不同方式处理后,回添制备全麦粉,通过研究不同稳定化处理对全麦粉脂肪酶活性、脂肪氧化酶活性、脂肪酸值以及流变学特性的影响,综合评价'运黑161'全麦粉稳定性及加工特性,以期为'运黑161'全麦粉加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

'运黑161'黑小麦:山西农业大学棉花研究所;磷酸二氢钠、邻苯二酚、四硼酸钠、硼酸、吐温20、酚酞、氢氧化钾均为国产分析纯;纯度≥99%亚油酸:美国Sigma公司。

Y18磨粉机、Y38粉质仪,土耳其YUCEBAS公司;YK-98超微粉碎机,山东省青州市益康中药机械配件厂;YXQ-50S11高压灭菌锅,上海博讯有限公司;Mixolab2混合实验仪、F4流变发酵仪,法国肖邦技术公司。

1.2 方法

1.2.1 磨粉

利用Y18型磨粉机将清理除杂后的'运黑161'黑小麦籽粒磨粉,收集其皮磨面粉及心磨面粉并混匀,麸皮单独回收,出粉率为69.6%,各样品于4 ℃冷藏备用。

1.2.2 麸皮稳定化处理

以未处理麸皮为对照,4种稳定化处理方式如下:

微波:将麸皮置于直径10 cm的玻璃圆盘中,物料厚度3 cm,实测微波功率为420 W,微波3 min后室温冷却。

常压蒸汽:将麸皮平铺在纱布上并置于不锈钢蒸屉上,物料厚度3 cm,水沸腾后将蒸屉放入蒸锅中,常压蒸汽5 min后室温冷却。

高压蒸汽:将麸皮置于无纺布袋中,物料厚度3 cm,平铺于高压灭菌锅中,121 ℃高压蒸汽5 min后室温冷却。

电解水:利用有效氯浓度为29.5 mg/L、pH为6.18自制微酸性电解水(料液比为1∶3)浸泡麸皮5 min后,40 ℃干燥后备用。

1.2.3 全麦粉制备

经不同稳定化处理后的麸皮超微粉碎后,过

80目筛,按照出粉率比例回添至小麦粉中制得全麦粉。全麦粉样品于4 ℃冷藏备用,待测。

1.2.4　全麦粉基本理化指标测定

水分、灰分、蛋白质、脂肪含量测定参考《食品安全国家标准 食品中水分的测定:GB 5009.3-2016》《食品安全国家标准 食品中灰分的测定:GB 5009.4-2016》《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5-2016》《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定:GB 5009.6-2016》。

1.2.5　脂肪酶活动度测定

脂肪酶活动度测定参考《粮油检验 粮食、油料的脂肪酶活动度的测定:GB/T 5523-2008》。

1.2.6　脂肪氧化酶活性测定

参考刘小娇等[15]方法并稍作修改,各处理均称取2.5 g全麦粉于烧杯中,加入0.05 mol/L pH 7.0的磷酸缓冲液20 mL,冰浴条件下搅拌10 min。10 000 r/min,4 ℃下离心10 min,过滤上清液,滤液为粗酶提取液。以硼酸-硼砂缓冲液为对照,于234 nm下调零,在石英比色皿中依次加入200 μL 0.004 mmol/L的亚油酸底物和3 mL pH 8.0硼酸-硼砂缓冲液,并迅速加入50 μL粗酶液混匀。在234 nm波长下扫描,该方法采用3.25 mL反应体系,记录2 min内OD值的变化。

$$\text{脂肪氧化酶活性/(U/g)}=\frac{\Delta OD_{234\text{nm}}\times V_2}{\Delta t\times V_1}\times\frac{V_0}{m}$$

式中:t为反应时间,min;V_1为粗酶液的添加量,mL;V_2为反应体系总体积,mL;V_0为粗酶提取液总体积,mL;m为样品质量,g;$\Delta OD_{234\text{nm}}$为234 nm下Δt时间内光密度值的变化。

1.2.7　脂肪酸值测定

脂肪酸值测定参考《粮油检验 谷物碾磨制品脂肪酸值的测定:GB/T 15684-2015》。

1.2.8　发酵特性测定

参考艾志录等[16]方法并稍作修改。各称取全麦粉300 g,加入100 mL蒸馏水揉混成面团,称取350 g面团置于发酵篮中,砝码配重2 kg,测定时间3 h,温度28.5 ℃。测定面团发酵最大高度、面团释放CO_2的最大高度等相关指标。

1.2.9　流变学特性测定

流变学特性测定参考《小麦粉面团流变学特性测试,混合试验仪法:GB/T 37511-2019》。

1.2.10　粉质特性测定

参考《小麦粉面团流变学特性测试,粉质仪法:GB/T 14614-2019》测定。

1.3　数据处理

每项指标均为3次独立重复实验,取平均值。使用SPSS 25.0作Duncan方差分析,使用Origin 8.5作图。

2　结果与分析

2.1　不同稳定化处理对全麦粉基本营养成分的影响

不同稳定化处理对全麦粉基本理化指标的影响如表1所示。微波、高压蒸汽、常压蒸汽3种处理方式下全麦粉的水分含量显著低于对照组($P<0.05$),其中微波处理的水分含量最低,为8.18%。电解水处理组与对照无显著性差异($P>0.05$),由于微波、常压蒸汽、高压蒸汽3种处理方式都是在高温条件下进行,导致样品水分含量减少,而常压蒸汽和高压蒸汽在处理过程中有部分水蒸汽的渗入,导致2种处理方式下全麦粉的水分含量高于微波组($P<0.05$)。全麦粉经稳定化处理后灰分无显著性差异($P>0.05$),脂肪、蛋白质含量均显著低于对照组($P<0.05$),主要是因为受高温高压影响,脂肪与蛋白质聚合形成复合体。

表1　不同稳定化处理对全麦粉基本营养成分的影响

Table 1　Effects of different stabilization treatments on the basic nutrients of whole wheat flour　%

样品 Sample	水分 Moisture	灰分 Ash	蛋白质(干基) Protein (dry base)	脂肪(干基) Fat (dry base)
对照 CK	9.65±0.21a	1.54±0.04a	14.62±0.06a	2.49±0.09a
微波 Microwave	8.18±0.12d	1.53±0.01ab	11.53±0.41d	1.93±0.05cd
高压蒸汽 High pressure steam	9.48±0.15b	1.50±0.02ab	12.53±0.18c	2.06±0.07c
常压蒸汽 Atmospheric pressure steam	9.16±0.03c	1.49±0.02ab	12.50±0.5c	2.09±0.05c
电解水 Electrolyzed water	9.57±0.16a	1.51±0.02ab	14.38±0.15b	2.34±0.07b

注:同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$),表2~表4同。

Note: Different letters in the same column indicated significant differences ($P<0.05$), the same as Table 2 to Table 4.

2.2 不同稳定化处理对全麦粉脂肪酶及脂肪氧化酶活性的影响

酶的高级结构在高温处理中遭到破坏,导致酶变性失活;另外高温条件下,酶催化反应和微生物生长的环境被严重破坏,这两者是谷物中酶活性变化的主要原因。如图1~图2所示,经稳定化处理后全麦粉的脂肪酶活动度以及脂肪氧化酶活性均显著低于对照组($P<0.05$),说明麸皮经微波、高压蒸汽、常压蒸汽、电解水稳定化处理后均有良好的灭酶效果,其中微波处理后全麦粉的脂肪酶活动度最低,但与其它处理组并没有显著差异($P>0.05$);高压蒸汽处理后全麦粉的脂肪氧化酶活性最低,且显著低于其它处理组($P<0.05$)。高压蒸汽处理使得全麦粉中脂肪氧化酶等活性基本全部丧失,是因为在湿热条件下酶更容易变性失活,而在干燥环境中蛋白质较为稳定。

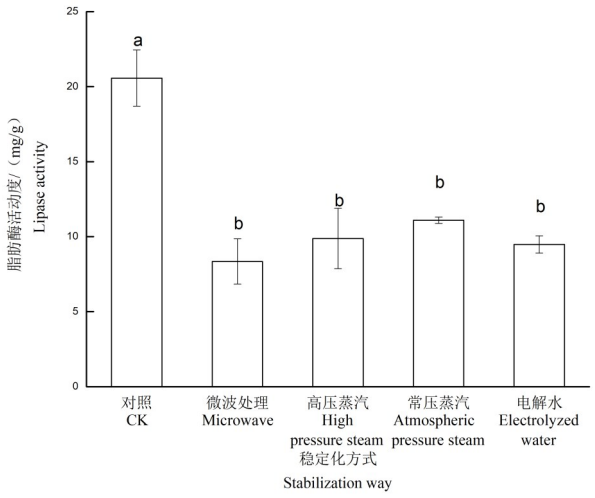


图1 不同稳定化处理对全麦粉脂肪酶活动度的影响

Fig.1 Effects of different stabilization treatments on the lipase activity of whole wheat powder

2.3 不同稳定化处理对全麦粉脂肪酸值的影响

脂肪酸值可反映粮食的品质劣变程度[17],不同稳定化处理对全麦粉脂肪酸值的影响如图3所示,对照组的脂肪酸值为43.5 mg/100 g,经稳定化处理后,全麦粉的脂肪酸值为22.2~31.08 r/min,与对照组相比均有显著性差异($P<0.05$),但均满足全麦粉行业标准LS/T3244-2015对脂肪酸值的限定(≤116 mg/100 g)。因为本研究是对处理后的全麦粉直接进行测定,所以各处理组以及对照组脂肪酸值均满足行业标准,但处理组可以起到

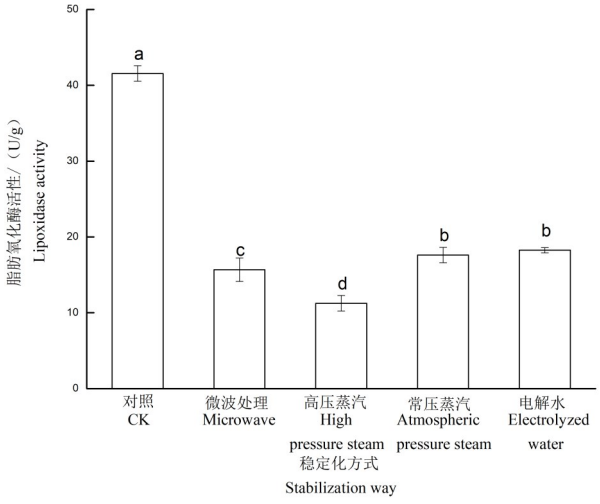


图2 不同稳定化处理对全麦粉脂肪氧化酶活性的影响

Fig.2 Effects of different stabilization treatments on the lipoxidase activity of whole wheat flour

更好的降低作用,其中微波、高压蒸汽处理全麦粉的脂肪酸值显著低于电解水处理组。综合比较,稳定化处理麸皮不仅可以降低全麦粉的脂肪酶及脂肪氧化酶活性,也能有效地降低脂肪酸值。由此可见,稳定化处理麸皮对延长全麦制品的货架期有一定的积极作用。

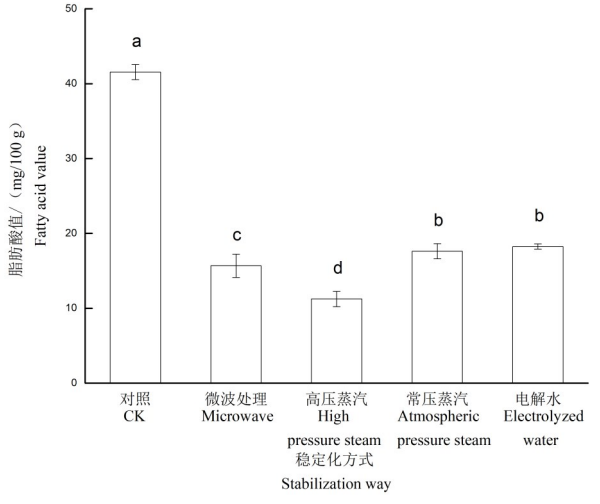


图3 不同稳定化处理对全麦粉脂肪酸值的影响

Fig.3 Effects of different stabilization treatments on the fatty acid value of whole wheat powder

2.4 不同稳定化处理对全麦粉发酵特性的影响

不同稳定化处理对全麦粉发酵特性的影响如表2所示,经稳定化处理后全麦粉面团发酵最大高度均显著高于对照组($P<0.05$),除微波处理组外,其它3个处理组面团释放二氧化碳的最大高

度、产气量和持气量均显著高于对照组($P<0.05$),这是因为经稳定化处理的麸皮持水力降低,使全麦粉中淀粉糊化受到抑制,从而使面团发酵体积增大[18]。从4种稳定化处理方式对面团的发酵特性影响来看,微波处理和电解水处理组的效果不明显,常压蒸汽处理组面团释放二氧化碳的最大高度最大,高压蒸汽处理组的发酵高度和总体积最大。

表2　不同稳定化处理对全麦粉发酵特性的影响

Table 2　Effects of different stabilization treatments on the fermentation properties of whole wheat powder

项目 Item	对照 Contrast	微波 Microwave	高压蒸汽 High pressure steam	常压蒸汽 Atmospheric steam	电解水 Electrolysed water
Hm/mm	7.50±0.28c	9.10±0.14ab	15.00±1.41a	10.45±0.21b	10.25±0.07b
H'm/mm	56.00±1.41d	46.90±1.27e	100.70±1.06b	146.90±0.14a	70.25±0.35c
T_1/min	157.50±2.12b	117.00±8.49c	15.50±6.36d	13.00±4.24d	178.00±2.83a
T'_1/min	177.00±1.41a	142.50±3.54b	73.00±4.24d	93.50±4.95c	76.50±2.12d
产气量/mL Gas production	1 274.00±72.12c	1031.50±28.99d	1767.00±26.87a	1526.50±4.95b	1622.00±31.11b
持气率/% Gas retention	53.00±4.24b	29.60±0.85c	52.45±3.46b	48.85±1.20b	60.50±0.71a
持气量/mL Gas holding capacity	675.22±12.35b	305.32±9.66c	926.79±20.86a	745.69±11.71b	981.31±26.18a

注:Hm是面团发酵的最大高度,H'm是面团释放二氧化碳的最大高度,T_1和T'_1分别对应的是达到Hm和H'm的时间,面团产生的气体保持在面团内的能力称为持气率。

Note: Hm: the maximum height at which the dough ferments; H′m: the maximum height at which the dough releases carbon dioxide; T_1 and T'_1 correspond to the time it takes to reach Hm and H′m, respectively, and the ability of the gas produced by the dough to remain inside the dough is called gas retention.

2.5　不同稳定化处理对全麦粉流变学特性的影响

不同稳定化处理对全麦粉流变学特性的影响如表3所示,与对照组相比,除微波处理组外,其他组经稳定化处理后全麦粉的各项指标基本均显著大于对照组样品。其中常压蒸汽处理组全麦粉的稠度最小值C2、最低黏度C4、最终黏度C5以及回生值C5-C4最大,电解水处理组的峰值黏度C3、糊化特性C3-C2及热稳定性C3-C4最大。稠度最小值C2体现了面团的弱化程度,C2值越小表示蛋白质弱化程度越大[19],C3是面团在糊化过程中的最大扭矩[20],全麦粉中的麸皮经稳定化处理后可明显改善面团的弱化度以及面团的耐机械力。

表3　不同稳定化处理对全麦粉流变特性的影响

Table 3　Effects of different stabilization treatments on the rheological properties of whole wheat powder

项目/Nm Item	对照 Contrast	微波 Microwave	高压蒸汽 High pressure steam	常压蒸汽 Atmospheric steam	电解水 Electrolysed water
C2	0.36±0.06d	0.50±0.05c	0.70±0.03b	0.81±0.04a	0.43±0.02cd
C3	1.46±0.07d	1.53±0.03d	1.83±0.02c	2.06±0.03b	2.47±1.10a
C4	1.23±0.09b	1.24±0.02b	1.49±0.03b	1.80±0.04a	1.37±0.25b
C5	2.22±0.09d	2.34±0.07d	2.91±0.07b	3.45±0.17a	2.66±1.15c
C3−C2	1.10±0.00c	1.03±0.01c	1.13±0.02c	1.25±1.51b	2.07±0.01a
C3−C4	0.24±0.01c	0.31±0.00c	0.34±0.05b	0.26±0.01c	1.09±1.29a
C5−C4	0.99±0.00d	1.12±0.04d	1.41±0.10b	1.65±0.13a	1.29±0.90c

注:C2为稠度最小值;C3为峰值黏度;C4为最低黏度;C5为最终黏度;C3−C2为糊化特性;C3−C4为热稳定性;C5−C4为回生值。

Note: C2: the minimum consistency; C3: the peak viscosity; C4: the lowest viscosity; C5: the final viscosity; C3−C2 was gelatinizing property. C3−C4 was thermally stable. C5−C4 were regenerative values.

2.6　不同稳定化处理对全麦粉粉质特性的影响

由表4可见,与对照组相比,微波处理后全麦粉的吸水率大于对照组但差异不显著,其余稳定化处理组全麦粉的吸水率均小于对照组,特别是高压蒸汽和常压蒸汽处理组均显著低于对照组,可能是在微波过程中由于温度过高导致戊聚糖释放,从而使吸水率升高[21],而高压蒸汽和常压蒸汽由于其在处理过程中可以提供一定的水分,且蒸汽处理会使麸皮中的淀粉糊化,一定程度上降低了麸皮的持水能力[13,22]。形成时间和稳定时间反

表4 不同稳定化处理对全麦粉粉质特性的影响

Table 4 Effects of different stabilization treatments on the powder characteristics of whole wheat powder

项目 Item	对照 Contrast	微波 Microwave	高压蒸汽 High pressure steam	常压蒸汽 Atmospheric steam	电解水 Electrolysed water
吸水率/% Water adsorption	72.65±0.64a	74.20±1.13a	68.45±0.49b	61.40±1.84c	72.60±0.00a
形成时间/min Dough formation time	3.70±0.17a	3.25±0.07a	3.77±0.10a	3.13±0.16a	3.57±0.04a
稳定时间/min Stability time	6.52±0.73b	6.65±0.10ab	7.20±0.28a	6.85±0.35a	5.50±0.42c
弱化度/FU Weakening degree	85.00±4.24a	63.00±1.41d	80.50±2.12b	74.00±2.83c	83.50±0.71b
粉质质量指数 Powder quality index	57.00±0.00c	62.50±0.71b	75.00±1.24a	73.50±0.71a	48.50±2.12d

映了面团面筋特性和稳定性[23]。不同稳定化处理方式对全麦粉的形成时间无显著性差异($P>0.05$),说明稳定化处理对全麦粉面团的形成速度无显著影响。经高压蒸汽和常压蒸汽处理后全麦粉的稳定时间显著大于对照组($P<0.05$),电解水处理后全麦粉的稳定时间最短,说明该方式不利于面团的稳定。弱化度和粉质质量指数反映了面粉品质,弱化度低、粉质质量指数高表明面粉品质好[24]。全麦粉经稳定化处理后弱化度显著低于对照组($P<0.05$),粉质质量指数除电解水处理组外,其余均显著大于对照组($P<0.05$),特别是高压蒸汽处理组最高。

3 讨论

潘碧晖等[25]研究了高温高压蒸汽处理对米糠理化和营养特性的影响,结果表明高温高压处理可显著降低蛋白质含量,与本研究中不同稳定化处理后全麦粉蛋白质含量均显著低于对照组($P<0.05$)结果一致。另外,Ciardullo等[26]和Jia等[27]研究表明,受高温高压影响,脂肪与蛋白质聚合形成复合体,进而导致样品中的蛋白质、脂肪含量较低,也与本研究结果一致。而由于微酸电解水中主要氯合物是次氯酸[28-29],次氯酸的强氧化性在一定程度上会破坏全麦粉脂肪、蛋白质等大分子物质,从而导致该处理组全麦粉脂肪、蛋白质含量显著低于对照组($P<0.05$)。微波与高压蒸汽处理对脂肪酶活性、脂肪氧化酶活性和脂肪酸值影响较为明显,此研究结果与潘碧晖等[25]研究结果一致。主要是因为高温高压和微波处理可破坏脂肪酶结构,或者导致麸皮中的生育酚和磷脂类物质在油滴界面形成一层胶囊状的硬化膜,直链淀粉和油脂形成复合物等,进而阻止油脂分解和氧化,从而降低了脂肪酸值[30-32]。此外,研究表明,麸皮经高温辐照后可能改变了酶蛋白质构象,使得小麦麸皮中的极性分子产生高速的取向运动而使分子间产生剧烈摩擦[33],进而导致脂肪酶和脂肪氧化酶变性失活。

不同稳定化处理方式对面团发酵特性、流变学特性和粉质特性均有不同程度影响,也使得面团流变学特性中的热稳定性C3-C4以及回生值C5-C4均大于对照组,这可能是麸皮经稳定化处理回添之后,脂肪酶以及脂肪氧化酶活性的降低造成了热糊化稳定性的上升,与Chen等[34]研究结果一致。而高压蒸汽处理组全麦粉的粉质质量指数最高,可能是在热处理以及一定压力的环境下麸皮的细胞壁被破坏,使得其非淀粉多糖溶出,有助于面团形成具有一定支撑性的三维网络实体,在一定程度上改善了面筋网络[35-36]。

4 结论

研究表明,微波、高压蒸汽、常压蒸汽、电解水4种麸皮稳定化处理均降低了全麦粉的水分,蛋白质和脂肪含量,其中微波处理组最低,分别为8.18%、11.53%和1.93%;经4种稳定化处理的全麦粉,脂肪酶活动度以及脂肪氧化酶活性均显著低于对照组($P<0.05$),其中微波处理组全麦粉脂肪酶活动度最低,为8.35 mg/g;高压蒸汽处理组全麦粉脂肪氧化酶活性及脂肪酸值最低,分别为10.89 U/g,21.98 mg/g。常压蒸汽处理组面团释放二氧化碳最大高度最大,为146.9 mm。高压蒸汽处理组发酵高度、总体积最大,分别为15 mm和1767 mL,同时高压蒸汽处理组面团形成时间、

稳定时间和粉质质量指数最大,分别为3.77 min、7.20 min和75。

综上,4种稳定化处理方式中高压蒸汽处理组全麦粉各项指标较好,表明高温高压在麸皮稳定化方面更有应用前景。但随着高压蒸汽处理时间增加,脂肪酶、脂肪氧化酶、脂肪酸值以及流变学特性的变化规律尚未明确,因此高压蒸汽处理不同时间梯度对全麦粉的影响有待深入研究,以期更精准评价高压蒸汽处理对全麦粉的影响。

参 考 文 献

[1]严欢, 杨中, 韩加. 小麦麸皮多酚对肥胖大鼠的减肥降脂作用[J]. 食品科学, 2023, 44(23): 151-158.
Yan H, Yang Z, Han J. Antiobesity and lipid-lowering effects of wheat bran polyphenols in obese rats[J]. Food Science, 2023, 44(23): 151-158.

[2]Martín-Diana A B, García-Casas M J, Martínez-Villaluenga C, et al. Wheat and oat brans as sources of polyphenol compounds for development of antioxidant nutraceutical ingredients[J]. Foods, 2021, 10(1): 115.

[3]张修威,袁婷婷,牛猛,等.小麦麦麸阿拉伯木聚糖的体外降脂作用研究[J].华中农业大学学报,2021,40(5):179-186.
Zhang X W, Yuan T T, Niu M, et al. Effects of wheat bran arabinoxylan on lipid reduction *in vitro*[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 179-186.

[4]李建科, 孟永宏, 刘柳, 等. 我国食品工业副产物资源化利用现状[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(6): 1-13.
Li J K, Meng Y H, Liu L, et al. Utilization of food industry by-products in China[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(6): 1-13.

[5]刘倩倩, 丁长河. 布拉迪酵母发酵对麦麸活性成分的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(7): 41-46.
Liu Q Q, Ding C H. Effect of *Saccharomyces boulardii* fermentation on active ingredients of wheat bran[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(7): 41-46.

[6]杨磊.重组全麦面粉的稳定化研究[D].无锡:江南大学,2013.
Yang L. Study on the stability of reconsitituted whole wheat flour[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.

[7]崔富贵,李安平,谢碧霞,等.不同处理方法对米糠品质稳定性的影响[J].食品工业科技,2012,33(5):141-144,158.
Cui F G, Li A P, Xie B X, et al. Effect of different treatment methods on the quality stability of rice bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, (5): 141-144, 158.

[8]白雪,刘瑞瑞,张美莉.预处理燕麦麸皮贮藏期预测模型的建立[J].中国食品学报,2022,22(8):234-243.
Bai X, Liu R R, Zhang M L. Establishment of prediction model for storage period of pretreated oat bran[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(8): 234-243.

[9]Thanonkaew A, Wongyai S, McClements D J, et al. Effect of stabilization of rice bran by domestic heating on mechanical extraction yield, quality, and antioxidant properties of cold-pressed rice bran oil (*Oryza saltiva* L.)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 48(2): 231-236.

[10]王婷婷,许柠,汪丽萍,等.麸胚水分含量对挤压稳定化回填法制备全麦挂面特征风味化合物的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 65-74.
Wang T T, Xu N, Wang L P, et al. Effect of wheat bran and embryo moisture content on the preparation of characteristic flavor compounds of whole wheat noodles by extrusion stabilization backfilling method[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2022, 43(1): 65-74.

[11]许英一, 张微, 王宇, 等. 超声对小麦麸皮蛋白结构和功能性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 53-61.
Xu Y Y, Zhang W, Wang Y, et al. Effect of ultrasonic on the structure and functional properties of wheat bran protein[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(10): 53-61.

[12]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.

[13]孟续. 预处理方式对黑小麦麸皮及对面团品质的影响研究[D]. 无锡:江南大学,2023.
Meng X. Study on the effect of pretreatment on triticale bran and its effect on the quality of dough[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.

[14]关硕, 刘瑞, 于章龙, 等. 不同制粉方式对运黑161全麦粉加工特性的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(11): 2229-2238.
Guan S, Liu R, Yu Z L, et al. Effects of milling methods on processing quality of Yunhei 161 whole wheat powder[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(11): 2229-2238.

[15]刘小娇, 白婷, 王姗姗, 等. 不同处理对青稞脂肪氧化酶活性及品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 39-44.
Liu X J, Bai T, Wang S S, et al. Effects of different treatments on the activity of lipoxygenase and quality of highland barley[J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 39-44.

[16]艾志录,聂文静,邢小龙,等.不同地区传统老酵头对面团发酵特性及馒头品质的影响[J].食品与发酵工业,2018,44(10):71-78.
Ai Z L, Nie W J, Xing X L, et al. Effects of Chinese traditional starters from different regions on fermentation characteristics of dough and quality of steamed bread[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(10): 71-78.

[17]Peiretti P G, Gai F, Tassone S. Fatty acid profile and nutritive value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) seeds and plants at different growth stages[J]. Animal Feed Science and Technology, 2013, 183(1-2): 56-61.

[18]Lee Y Y, Ma F Y, Byars J A, et al. Influences of hydrothermal and pressure treatments on compositional and hydration properties of wheat bran and dough mixing properties of whole wheat meal[J]. Cereal Chemistry, 2021, 98(3):

673-682.

[19]张纷，赵亮，靖卓，等.藜麦-小麦混合粉面团特性及藜麦馒头加工工艺[J].食品科学,2019，40(14)：323-332.
Zhang F，Zhao L，Jing Z，et al. Dough characteristics of quinoa-wheat composite flour and optimization of mantou processing[J]. Food Science，2019，40(14)：323-332.

[20]赵萍，周伟，张生堂，等.混合实验仪在评价面团流变学特性中的应用与研究[J].食品工业科技，2015，36(1)：97-100,109.
Zhao P，Zhou W，Zhang S T，et al. Application and research of the evaluation of dough rheological properties with the Mixolab[J]. Science and Technology of Food Industry，2015，36(1)：97-100,109.

[21]杨媚.热处理对全谷燕麦β-葡聚糖和戊聚糖结构及体外发酵的影响[D].郑州：郑州轻工业学院，2018.
Yang M. Effects of thermal processing on the structural characteristics and in vitro fermentation of whole grain oats β-glucan and arabinoxylan [J]. Zhengzhou：Zhengzhou University of Light Industry，2018.

[22]Ma Y S，Xu D，Sang S Y，et al. Effect of superheated steam treatment on the structural and digestible properties of wheat flour[J]. Food Hydrocolloids，2021，112：106362.

[23]Li Q M，Li Y，Zou J H，et al. Influence of adding Chinese yam (*Dioscorea opposita thunb.*) flour on dough rheology，gluten structure，baking performance，and antioxidant properties of bread[J]. Foods，2020，9(3)：256.

[24]Tomić J，Torbica A，Belović M. Effect of non-gluten proteins and transglutaminase on dough rheological properties and quality of bread based on millet (*Panicum miliaceum*) flour[J]. Lwt，2020，118：108852.

[25]潘碧晖，魏振承，邓媛元，等.高温高压蒸汽处理对米糠理化和营养特性的影响[J].现代食品科技，2022，38(9)：143-152.
Pan B H，Wei Z C，Deng Y Y，et al. Effects of high-temperature and high-pressure steam on physicochemical and nutritional properties of rice bran [J]. Modern Food Science and Technology，2022，38(9)：143-152.

[26]Ciardullo K，Donner E，Thompson M R，et al. Influence of extrusion mixing on preparing lipid complexed pea starch for functional foods[J]. Starch-Stärke，2019，71(7-8)：107-114.

[27]Jia F，Wang J S，Chen Y，et al. Effect of oil contents on gluten network during the extrusion processing [J]. Czech Journal of Food Sciences，2019，37(4)：226-231.

[28]Issa-Zacharia A，Kamitani Y，Miwa N，et al. Application of slightly acidic electrolyzed water as a potential non-thermal food sanitizer for decontamination of fresh ready-to-eat vegetables and sprouts [J]. Food Control，2011，22(3-4)：601-607.

[29]刘瑞，于章龙，宋昱，等.电解水在黑小麦发芽中的应用研究[J].现代食品科技，2016，32(6)：265-270，297.
Liu R，Yu Z L，Song Y，et al. Application of electrolyzed water in black wheat sprout production [J]. Modern Food Science and Technology，2016，32(6)：265-270，297.

[30]胡国洲，胡鹏，陈光静，等.食品中酶的微波钝化技术研究进展[J].食品与发酵工业，2013，39(3)：141-146.
Hu G Z，Hu P，Chen G J，et al. Research progress on microwave inactivation of enzyme in food [J]. Food and Fermentation Industries，2013，39(3)：141-146.

[31]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.

[32]Park E Y，Fuerst E P，Baik B K. Effect of bran hydration with enzymes on functional properties of flour-bran blends [J]. Cereal Chemistry，2019,96：273-282.

[33]肖志刚，刘璐，王丽爽，等.小麦麸皮的品质改良及含麸皮面包焙烤品质的研究[J].现代食品科技，2019，35(11)：66-75.
Xiao Z G，Liu L，Wang L S，et al. Quality improvement of wheat bran and baking properties of bread incorporated with wheat bran[J]. Modern Food Science and Technology，2019，35(11)：66-75.

[34]Liu Y F，Chen J，Luo S J，et al. Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology [J]. Carbohydrate Polymers，2017，175：265-272.

[35]王红娜，曹欣然，黄莲燕，等.膳食纤维与阿魏酸复配对面团和面筋蛋白性质的影响[J].食品科学，2019，40(12)：62-69.
Wang H N，Cao X R，Huang L Y，et al. Effects of dietary fiber and ferulic acid on properties of dough and gluten [J]. Food Science，2019，40(12)：62-69.

[36]张彬，谢明勇，殷军艺，等.响应面分析法优化超声提取茶多糖工艺的研究[J].食品科学，2008(9)：234-238.
Zhang B，Xie M Y，Yin J Y，et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction conditions of tea polysaccharides by using response surface methodology [J]. Food Science，2008(9)：234-238.

(编辑:韩志强)