

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.05.007

姜钰璐, 邓利玲, 陈圆圆, 等. 基于葡萄糖氧化酶作用的黑小麦粉面团理化性质及加工性能研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(5): 51-59.
JIANG Y L, DENG L L, CHEN Y Y, et al. Physicochemical properties and processing performance of black wheat flour dough based on glucose oxidase action[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(5): 51-59.

基于葡萄糖氧化酶作用的黑小麦粉 面团理化性质及加工性能研究

姜钰璐¹, 邓利玲², 陈圆圆¹, 刘丁与¹, 张诗沛¹, 周斌³, 钟耕^{1,4}✉

- (1. 西南大学 食品科学学院, 重庆 400715;
2. 重庆高等医药专科学校, 重庆 401331;
3. 重庆市粮油质量监督检验站, 重庆 400040;
4. 川渝共建特色食品重庆市重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 为改善黑小麦粉面团理化特性及加工性能, 探究葡萄糖氧化酶 (GOD) 添加量对黑小麦粉糊化、热机械学面团拉伸、流变学等特性及微观结构的影响, 并从蛋白质组分变化角度加以解释。结果表明: 适量添加 GOD 能显著降低黑小麦粉面团中游离巯基的含量, 同时增加二硫键的含量, 从而加深蛋白质交联程度, 对黑小麦粉面团理化特性有显著改善作用。当 GOD 添加量为 0.8% 时, 面团结构和性质改善效果最佳, 且此时麦醇溶蛋白与麦谷蛋白比值 (0.81) 接近最适比 (1.0)。此研究为开发黑小麦食品、提高其食用品质提供了一定参考。

关键词: 黑小麦粉; 面团; 葡萄糖氧化酶; 理化特性; 加工性能

中图分类号: TS210.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)05-0051-09

网络首发时间: 2024-08-28 13:04:42

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20240827.1506.012>

Physicochemical Properties and Processing Performance of Black Wheat Flour Dough Based on Glucose Oxidase Action

JIANG Yu-lu¹, DENG Li-ling², CHEN Yuan-yuan¹, LIU Ding-yu¹,
ZHANG Shi-pei¹, ZHOU Bin³, ZHONG Geng^{1,4}✉

- (1. School of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Higher Medical College, Chongqing 401331, China; 3. Chongqing Cereals and Oils Quality Supervision and Inspection Station, Chongqing 400040, China; 4. Chongqing Key Laboratory of Specialty Foods, Sichuan-Chongqing Co-construction, Chongqing 400716, China)

Abstract: To improve the physicochemical properties and processing performance of black wheat flour dough, the effects of adding Glucose oxidase (GOD) on the gelatinization, thermomechanics dough tensile, rheology properties, and microstructure of black wheat flour were investigated using a rapid viscosity

收稿日期: 2024-02-29

基金项目: 重庆市攻关科技计划 (CYY-2023-17)

Supported by: Chongqing Tackling Science and Technology Program (No. CYY-2023-17)

作者简介: 姜钰璐, 女, 2001 年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品加工, E-mail: 2587615971@qq.com

通信作者: 钟耕, 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 研究方向为粮食工程、油脂与植物蛋白, E-mail: zhongdg@126.com

analyzer, a texture analyzer, and a scanning electron microscope, among other methods. The effects were also explained in terms of changes in protein fractions. The results showed that the moderate addition of GOD could significantly reduce the content of free sulfhydryl groups and increase the content of disulfide bonds in the dough of black wheat flour, thereby enhancing the degree of protein cross-linking and significantly improving the physicochemical properties of black wheat flour dough. The best improvement in dough structure and properties was achieved when the GOD addition was 0.8%, at which point the ratio of wheat alcohol-soluble protein to wheat gluten (0.81) was close to the optimal ratio (1.0). This study has provided a certain reference for the development of black wheat-based foods and the improvement of their edible quality.

Key words: black wheat flour; dough; glucose oxidase; physicochemical properties; processing performance

葡萄糖氧化酶 (Glucose oxidase, GOD) 是一种源自真菌的面粉品质改良酶制剂, 在有氧条件下, 利用氧气作为外部电子受体, 特异性催化 β -D-葡萄糖氧化为葡萄糖酸和过氧化氢, 过氧化氢可氧化面筋蛋白中的游离巯基基团, 产生二硫化物交联即二硫键, 起到增强面筋筋力的作用。黑小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是科研单位采用不同的育种手段而培育出来的特用型的优质小麦新品种。黑色作物产品含有黑色素, 因具有高营养、高滋补、高免疫之功能而身价倍增。其含有较丰富的蛋白质、氨基酸、不饱和脂肪酸、矿物质、花青素等, 对人体降血脂、防治动脉粥样硬化、生长发育缓慢等具有重要意义^[1]。黑小麦在生产应用与产品开发方面展现出巨大的潜力, 与未来食品消费需求的发展趋势紧密契合。因为目前国内外对于黑小麦的研究主要集中在育种栽培和籽粒营养价值这两个方面, 而已有研究^[2-4]对于其产后加工和产品研发的探索尚显不足, 所以有必要加强对黑小麦产后加工和产品研发的深入研究, 以充分发挥其巨大的应用潜力。研究表明, 黑小麦面筋蛋白的流变学特性以及强度相对较低, 同时含有大量膳食纤维, 这些因素共同导致黑小麦粉在形成面团时难以达到理想的黏弹性, 从而限制了黑小麦加工产品的多样化开发^[2]。

已有研究探讨了 GOD 对小麦粉^[5]、芽麦全粉^[6]、荞麦粉^[7]等面团特性的影响, 并证实其能改善面筋蛋白、提升面团理化性质及加工产品品质, 但关于 GOD 对黑小麦粉面团面筋蛋白强度及面团

理化性质的改善效果的研究报道仍较为稀少。因此, 本文聚焦于研究 GOD 对黑小麦粉面团物理特性, 如糊化特性、热机械学特性、动态流变学特性和拉伸特性的影响, 并从化学性质如蛋白质二级结构的角度、巯基与二硫键、蛋白质组分变化、麦谷蛋白大聚体含量变化以及微观结构给予解释, 旨在深入探索 GOD 对黑小麦粉面团特性的潜在改善作用, 为黑小麦资源的增值利用和开发相关食品、提高其食用品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黑小麦粉: 优麦鲜 (重庆) 面业有限公司, 符合 GB/T 1355—2021《小麦粉》, 粗细度过 90 目筛。GOD (600 U/g, 食品级): 山东隆科特酶制剂有限公司; 蛋白定量测试盒: 南京建成生物工程研究所。

1.2 仪器与设备

RVA-Tec Master 快速粘度分析仪: 瑞典波通仪器公司; Mixolab 混合实验仪: 法国肖邦公司; DHR-1 流变仪: 美国 TA 公司; TA.xt plus 质构仪: 英国 Stable Micro Systems 公司; Phenom 台式扫描电镜: 荷兰 Phenom 公司; Spectrum 100 傅里叶变换红外光谱仪: 美国 Perkin Elmer 股份有限公司; CHA-B 水浴恒温振荡器: 常州亚特实验仪器有限公司; QL-861 涡旋混合器: 海门市齐林贝尔仪器制造有限公司; MC 759 紫外可见分光光度计: 上海菁华科技仪器有限公司; 5804 R 离心机:

德国 Eppendorf 公司; SY-10 真空冷冻干燥机: 北京松源华兴科技发展有限公司; FA 214 电子分析天平: 上海豪晟科学仪器有限公司; K 9860 全自动凯氏定氮仪: 山东海能未来技术集团股份有限公司; DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱: 上海齐欣科学仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 混合粉及面团的制备

在黑小麦粉中, 添加不同浓度的 GOD, 以黑小麦粉质量分数计 0%、0.2%、0.5%、0.8%、1.1%、1.4%。按照实验仪测定的最佳吸水率, 向每个 100 g 混合粉样品中加入 40 °C 的温水。经过 10 min 的搅拌和面后, 将面团用保鲜膜包裹并静置 30 min 备用。

1.3.2 混合粉糊化特性测定

参考 GB/T 24853—2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定快速粘度仪法》, 为了测定混合粉的成糊特性, 将 3.49 g 的混合粉和 25 mL 的水转移至干燥且清洁的样品筒中。随后, 迅速进行搅拌以实现均匀分散, 最后再利用快速粘度分析仪对混合物的成糊特性进行精确测定。

1.3.3 面团热机械学特性测定

参考 MOZA 等^[8]的方法并适当修改。和面转速保持 80 r/min, 调整混合粉重量和加水量使目标扭矩 C 1 值保持在 (1.10±0.05) N·m, 面团重量默认 75 g, 水分基准默认湿基 14%, 水箱温度为 30 °C。

1.3.4 面团动态流变学特性测定

参考 LI 等^[9]的方法并适当修改。采用 PP 25 圆形检测探头, 间距设置 2 mm, 取 1.3.1 制备的面团中心样品约 3 g 进行测定。设定平衡时间 5 min 以消除残存应力, 温度 25 °C, 应变振幅 0.1%, 每数量级点数取 5, 在 0.1~20 Hz 扫描频率范围进行频率扫描。

1.3.5 面团拉伸特性测定

参考 Zia-ud-Din 等^[10]的方法并适当修改。取 1.3.1 制备的面团样品约 30 g, 置于质构仪面团制备槽, 压制形成 60 mm×2 mm 面团条, 将面团条置于质构仪测试区域内, 用 A/KIE 探头立

即测定。

1.3.6 傅里叶变换红外光谱测定

参考杨明柳等^[11]的方法并适当修改。将 1.3.1 面团样品真空冷冻干燥, 研磨过 200 目筛以备用, 取约 100 mg 冻干样品粉末置于傅里叶变换红外光谱仪平台, 采用反射扫描模式, 用空气做背景扫描。

1.3.7 巯基与二硫键的测定

将 1.3.1 面团样品真空冷冻干燥, 研磨过 200 目筛以备用。取 150 mg 冻干样品粉末, 参考 YANG 等^[12]的方法测定巯基与二硫键的含量。

1.3.8 扫描电子显微镜观察

参考 LI 等^[9]的方法并适当修改。将 1.3.1 制备的面团切成长约 20 mm, 宽约 3 mm, 高约 3 mm 的长方体样品, 放入-40 °C 冰箱 12 h, 取出立即真空冷冻干燥 (-70 °C) 12 h 以上, 直至冷冻干燥完全。扫描电镜观察舱电压设定 10 kv, 放大倍数 2 000 倍。

1.3.9 麦谷蛋白、麦醇溶蛋白及麦谷蛋白大聚体的测定

1.3.9.1 麦谷蛋白、麦醇溶蛋白含量测定 参考张令文^[13]、张毅^[14]的方法并稍作修改, 将 1.3.1 面团样品真空冷冻干燥, 研磨过 200 目筛以备用。根据溶解性的不同依次提取蛋白质。

将各蛋白质提取液置于-20 °C 保存, 采用蛋白定量试剂盒测定各蛋白质含量。

1.3.9.2 麦谷蛋白大聚体的测定 取 500 mg 冻干样品粉末于 50 mL 离心管, 加入 10 mL 1.5% 十二烷基硫酸钠, 25 °C 磁力搅拌 1 h, 8 500 r/min 离心 20 min, 弃去上清液, 沉淀重复提取 2 次, 小心刮下沉淀上层凝胶, 采用全自动凯氏定氮仪测定麦谷蛋白大聚体含量。

1.4 数据处理

确保实验结果的准确性和可靠性, 每个实验至少重复 3 次, 数据以平均值 ± 标准差形式表示, 利用 SPSS 22.0 和 Origin 2018 软件进行数据处理和作图, 此外, 采用 Waller-Duncan 检验法显著性分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 黑小麦粉初始理化指标

经检测黑小麦粉主要成分为：水分（13.40±0.05）%、湿面筋（23.07±0.16）%、灰分（1.06±0.01）%（干基计，后同）、脂肪（2.61±0.23）%、蛋白质（13.07±0.14）%、淀粉（58.52±0.52）%、花青素（2.17±0.11）mg/100 g、多酚（21.18±0.19）mg/g、膳食纤维（6.42±0.29）%、戊聚糖（1.33±0.00）%。

2.2 GOD 对黑小麦粉成糊特性的影响

由表 1 可知，随着 GOD 添加量的增加，黑小麦粉的最终粘度呈现上升趋势，并在 GOD 添加量达到 1.4% 时达到最大值。相较于未添加 GOD 的黑小麦粉，其最终粘度增加了 11.16%。这一结果表明，GOD 的添加能够显著提升黑小麦粉的峰值粘度和最终粘度，这与黎芳等^[5]的研究结果相

一致。衰减值作为反映淀粉耐剪切性的指标，其数值越高，意味着淀粉的耐剪切性越弱^[15]。适量添加 GOD 可以使黑小麦粉淀粉体系的峰值粘度和最终粘度增大，同时使峰值时间和糊化温度升高，从而提升黑小麦粉淀粉的糊化稳定性，但 GOD 的加入会减弱黑小麦粉淀粉颗粒的耐剪切性。

粘度的增加可能与 GOD 的氧化作用有关，该作用促进了蛋白质之间的交联聚集。这种交联聚集可能使原本游离于面筋蛋白结构之外的可糊化淀粉总量增加^[16]。这一机制可能是导致黑小麦粉粘度上升的重要因素之一。另外，还可能是在 GOD 作用下，产生的过氧化氢致水溶性戊聚糖氧化凝胶化，形成可溶性戊聚糖凝胶，从而增加面团粘度^[17]。但过量的 GOD 反而会使面团粘度下降^[18]。

表 1 GOD 对黑小麦粉糊化特性的影响

Table 1 Effect of GOD on the pasting properties of black wheat flour

GOD 添加量/%	峰值粘度/cp	衰减值/cp	最终粘度/cp	峰值时间/min	糊化温度/°C
0.0	2 514.50±16.26 ^c	1 082.00±7.07 ^d	3 758.00±0.00 ^d	5.47±0.00 ^a	84.00±0.07 ^d
0.2	2 614.50±37.48 ^{ab}	1 164.50±40.31 ^c	3 869.50±70.00 ^{cd}	5.57±0.05 ^a	85.60±0.07 ^{bc}
0.5	2 661.00±11.31 ^a	1 314.00±15.56 ^b	4 061.50±13.44 ^{ab}	5.57±0.05 ^a	86.40±0.07 ^{ab}
0.8	2 616.00±31.11 ^{ab}	1 387.00±7.07 ^a	3 981.50±33.23 ^{bc}	5.57±0.05 ^a	86.83±0.67 ^a
1.1	2 540.50±2.12 ^c	1 336.00±22.63 ^{ab}	3 890.00±91.92 ^{cd}	5.50±0.05 ^a	86.88±0.53 ^a
1.4	2 579.50±40.31 ^{bc}	1 312.00±43.84 ^b	4 177.50±57.28 ^a	5.50±0.05 ^a	85.18±0.53 ^c

注：同一列中不同字母表示显著性差异（ $P < 0.05$ ），后表同。

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

2.3 GOD 对黑小麦粉面团热机械学特性的影响

面团形成时间越长，表明面团稳定性越好；面团稳定时间越长，表明面团筋力越强^[5]，蛋白质弱化度是衡量面筋强度的重要指标，其数值越低，表示面筋强度越高^[18]，面团在搅拌过程中的耐受力也越强。由表 2 可知，随着 GOD 添加量的增加，黑小麦粉面团的形成时间与稳定时间呈现出先增后减的趋势，并在 GOD 添加量为 0.8% 时达到最大值。这表明适量添加 GOD 能够提升黑小麦粉面团的稳定性及面筋强度，从而强化面筋蛋白结构。这与孔晓雪等^[19]的研究结果相一致。随着 GOD 添加量的增加，黑小麦粉面团的峰值扭矩与最大粘度值也呈现出先升后降的趋势，并在 GOD 添加量为 0.8% 时达到最大值。与

未添加 GOD 的对照组相比，这两个指标分别增加了 7.93% 和 4.84%。这再次验证了 GOD 的添加能够增大黑小麦粉面团的粘度，与上述表 1 GOD 对黑小麦粉粘度的影响结果一致。综合来看，GOD 的加入对黑小麦粉面团的热机械学特性有着显著的提升作用，尤其在 GOD 添加量为 0.8% 时，这种提升效果最为明显。

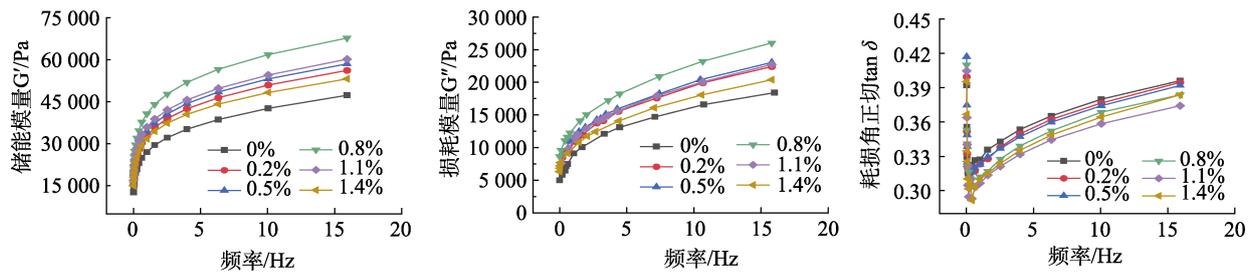
2.4 GOD 对黑小麦粉面团动态流变学特性的影响

由图 1a 和图 1b 可知，对于不同 GOD 添加量的黑小麦粉面团，其储能模量（ G' ）和损耗模量（ G'' ）均随着扫描频率的增加而增大。值得注意的是，在所有测试的频率范围内，面团的 G' 始终高于 G'' ，这显示了面团的主导性质为弹性，并呈现出典型的黏弹性特征。

表 2 GOD 对黑小麦粉面团热机械学特性的影响

Table 2 Effect of GOD on thermo-mechanical properties of black wheat dough

GOD 添加量/%	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	峰值扭矩/N·m	蛋白质弱化度/N·m	回生值/N·m	最大粘度值/N·m
0.0	62.50±0.03 ^a	1.18±0.01 ^d	9.50±0.00 ^c	3.53±0.20 ^b	0.65±0.02 ^a	1.04±0.01 ^d	3.10±0.20 ^a
0.2	62.50±0.02 ^a	1.28±0.08 ^d	10.65±0.07 ^c	3.63±0.03 ^{ab}	0.59±0.00 ^b	1.05±0.01 ^d	3.14±0.03 ^a
0.5	62.45±0.04 ^a	8.86±0.32 ^b	11.75±0.35 ^b	3.76±0.10 ^{ab}	0.54±0.00 ^d	1.14±0.02 ^{ab}	3.21±0.11 ^a
0.8	62.35±0.07 ^a	9.64±0.05 ^a	12.30±0.14 ^a	3.81±0.02 ^a	0.53±0.00 ^d	1.16±0.03 ^a	3.25±0.02 ^a
1.1	62.35±0.04 ^a	7.49±0.02 ^c	10.40±0.00 ^c	3.73±0.02 ^{ab}	0.55±0.00 ^{cd}	1.12±0.01 ^{bc}	3.17±0.01 ^a
1.4	62.30±0.07 ^a	7.37±0.05 ^c	10.00±0.00 ^d	3.68±0.01 ^{ab}	0.57±0.01 ^{bc}	1.09±0.00 ^c	3.15±0.01 ^a



注: a-储能模量 (G'); b-损耗模量 (G''); c-损耗角正切值 ($\tan \delta$)。

Note: a - energy storage modulus (G'); b - loss modulus (G''); c - dissipation angle tangent ($\tan \delta$).

图 1 GOD 对黑小麦粉面团储能模量 (G')、损耗模量 (G'')、损耗角正切值 ($\tan \delta$) 的影响Fig.1 The influence of GOD on storage modulus (G'), loss modulus (G'') and loss tangent ($\tan \delta$) of black wheat dough

损耗角正切 ($\tan \delta$) 是衡量面团黏弹性的重要参数。较小的 $\tan \delta$ 值意味着面团中高聚物的数量更多或分子聚合度更大, 从而增强了面团的强度和综合黏弹性^[20]。根据图 1c, 可以看到 $\tan \delta < 1$, 并且随着频率的增加, 所有面团样品的 $\tan \delta$ 都呈现出先迅速减小后缓慢增加的趋势。这可能是由于在面团形成的初期阶段, 黑小麦粉中的纤维阻碍了面筋网络结构的形成, 导致面团稳定性降低, 更容易受到外力的影响而发生流动, 因此面团的黏性较小。而在同一扫描频率下, 与未添加 GOD 的面团相比, 添加了 GOD 的面团其 $\tan \delta$ 值有所降低, 并且在 GOD 添加量为 1.1% 时达到最低值。

这进一步证明了适量添加 GOD 可以增强黑小麦粉面团的黏弹性。

2.5 GOD 对黑小麦粉面团拉伸特性的影响

制作面制品时的成型率由延展度、拉伸比共同决定^[21]。如表 3 所示, 随着 GOD 的添加, 黑小麦粉面团的拉伸能量、拉伸阻力和拉伸比均呈现出增大的趋势。然而, 当 GOD 的添加量超过 0.8% 时, 以上指标均出现不同程度的下降。说明过量添加 GOD 使黑小麦面团的品质下降^[22]。瞿旭^[23]研究结果也表明, 适量 GOD 使面团拉伸阻力提高和延展性降低, 面团变得更紧密、硬实。

表 3 GOD 对黑小麦粉面团拉伸特性的影响

Table 3 Effect of GOD on tensile properties of black wheat dough

GOD 添加量/%	拉伸能量/(g·mm)	拉伸阻力/g	延展度/mm	拉伸比/(g/mm)
0	685.96±67.35 ^a	41.56±4.89 ^b	19.24±0.48 ^{ab}	2.16±0.30 ^b
0.2	694.20±59.93 ^a	44.89±2.15 ^b	18.16±0.82 ^{ab}	2.47±0.01 ^{ab}
0.5	760.25±48.40 ^a	46.26±3.17 ^{ab}	17.65±1.05 ^b	2.63±0.29 ^{ab}
0.8	796.32±39.42 ^a	52.75±1.79 ^a	18.04±0.60 ^{ab}	2.93±0.19 ^a
1.1	758.67±88.32 ^a	47.56±0.17 ^{ab}	19.26±0.68 ^{ab}	2.47±0.08 ^{ab}
1.4	713.98±37.57 ^a	45.07±2.67 ^b	19.77±1.37 ^a	2.29±0.29 ^b

2.6 GOD 对黑小麦粉面团蛋白质二级结构的影响

蛋白质二级结构变化在一定程度上决定了蛋白质的加工性能^[11]。根据图 2 所示,与添加 0%GOD 的黑小麦粉面团相比,添加了不同量 GOD 的面团在红外光谱吸收峰的位置上并没有明显的差异,也没有旧峰消失或新峰产生。此表明添加 GOD 并不会改变黑小麦粉面团蛋白质的二级结构。然而,峰的强度却发生了一定的变化,这暗示着 GOD 对黑小麦粉面团蛋白质的空间结构产生了一定的影响。 α -螺旋为蛋白质中最稳定的二级结构之一,赋予了蛋白质弹性。 β -折叠是蛋白中最主要的二级结构,GOD 通过氧化作用促使面筋蛋白分子交联聚集,有利于 α -螺旋和 β -折叠结构的稳定,同时 α -螺旋和 β -折叠相对含量的增加赋予面团良好弹性,增强蛋白质结构稳定性。

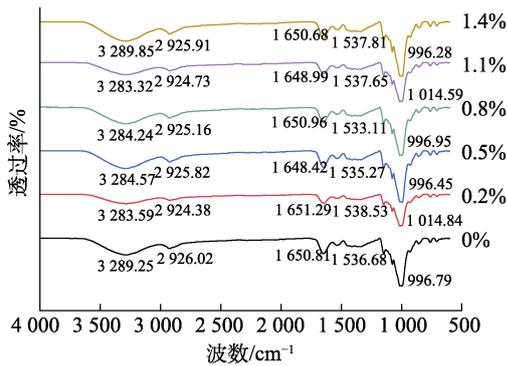


图 2 不同 GOD 添加量的黑小麦粉面团红外光谱图
Fig.2 Infrared spectrum of black wheat dough with different amount addition of GOD

图 3 显示,当 GOD 添加量为 0.8%、1.1%、1.4%时,与未添加 GOD 相比, β -转角相对含量依次减少了 30.28%、28.75%、3.32%, α -螺旋相对含量依次增加了 126.08%、124.60%、18.98%, β -折叠相对含量依次增加了 18.78%、17.22%、26.19%,而无规则卷曲相对含量则降为 0。 α -螺旋与 β -折叠为有序结构, β -转角与无规则卷曲为无序结构,面筋蛋白的有序结构需大量氢键维持其构型^[24]。当 GOD 添加量为 0.8%时有序结构高达 68.31%,适量添加 GOD 使黑小麦粉面团蛋白质氢键增加,有序结构占比增加,蛋白弹性和结构稳定性提高,适量添加 GOD 可以增加黑小麦粉面团中蛋白质的氢键数量,从而提高有序结构

的占比。这种变化有助于增强蛋白质的弹性和结构稳定性。因此,适量添加 GOD 对改善黑小麦粉面团的物理性质具有积极作用,使面团硬度、嚼劲和弹性增加,有利于面团品质的提升。

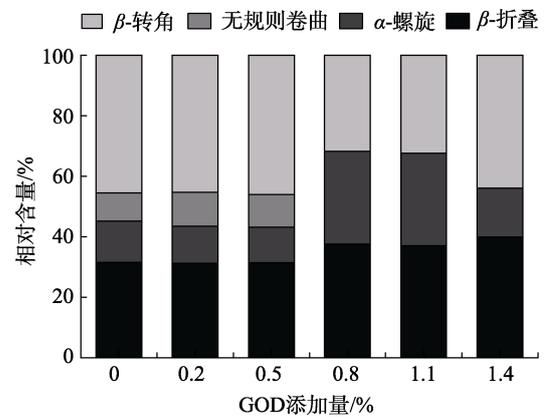


图 3 GOD 对黑小麦粉面团蛋白质二级结构的影响
Fig.3 Effect of GOD on protein secondary structure of black wheat dough

2.7 GOD 对黑小麦粉面团巯基与二硫键的影响

游离巯基与二硫键的含量是评估面筋蛋白交联程度的关键指标。根据图 4 可知,在 GOD 添加量为 0.8%时,游离巯基含量达到最低值,为 3.14 $\mu\text{mol/g}$,与未添加 GOD 的对照组 (3.83 $\mu\text{mol/g}$) 相比,减少了 18.02%。结果表明,添加 GOD 可以有效地降低黑小麦粉面团中的游离巯基含量,并相应地增加二硫键的含量,从而促进了面筋蛋白的交联程度,与孔晓雪等^[19]研究结论类似。这种变化对于改善面团的物理性质和加工性能具有积极的影响。

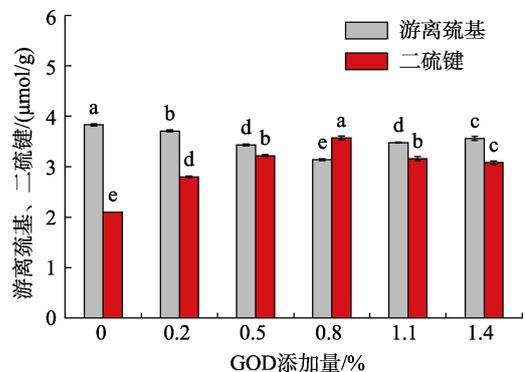


图 4 GOD 对黑小麦粉面团巯基与二硫键含量的影响
Fig.4 Effect of GOD on the content of sulfhydryl and disulfide bonds in black wheat dough

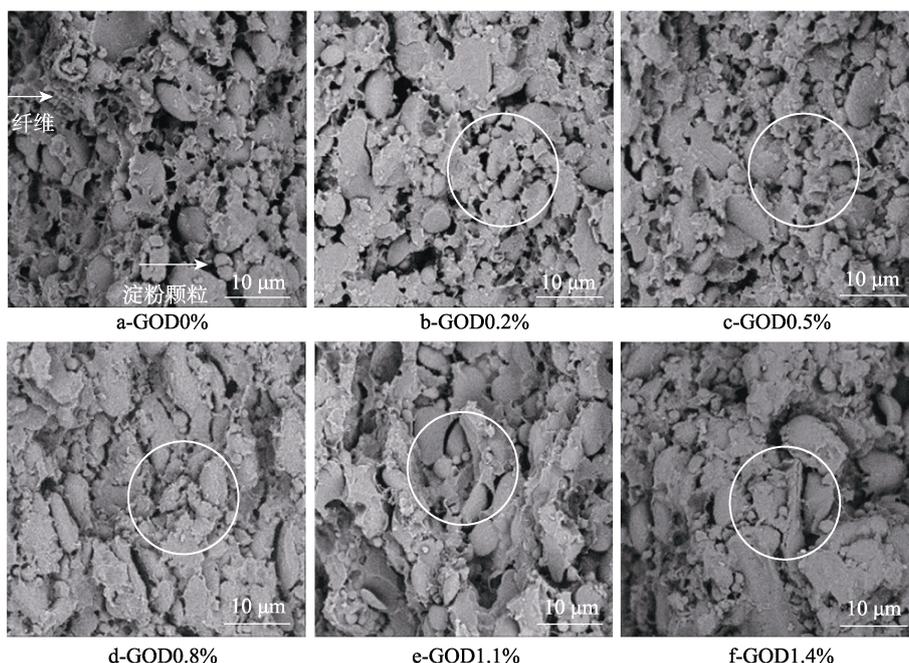
2.8 GOD 对黑小麦粉面团微观结构的影响

如图 5 所示,对于添加量 0% GOD 的黑小麦

粉面团 (图 5a), 由于其中存在较多阻碍面积网络结构形成的纤维。而使面筋蛋白的微观结构显得相对疏松, 且难以形成连续的成片筋膜。此外, 淀粉颗粒与面筋蛋白之间的结合度也较低^[15]。由图 5b~5d 可知, 随着 GOD 添加量的增加, 面筋结构逐渐变得更加紧密。孔洞数量减少, 面筋膜变得连续且均匀。同时, 淀粉颗粒和纤维被紧密地包裹在面筋网络结构中^[12]。这说明适量的 GOD 添加有助于改善面筋的微观结构。由图 5e~

5f 可知, 当 GOD 添加量过多时, 会导致蛋白质过度交联聚集, 使得部分淀粉颗粒被迫暴露在外。此外, 过量的 GOD 还会产生大量的过氧化氢气体, 这会破坏面团的稳定结构, 不利于面筋网络结构的整体强度和紧密性。

综上所述, 当 GOD 的添加量为 0.8% 时, 黑小麦粉面团的微观结构最为完整和紧密。这表明适量的 GOD 添加对于优化面筋的微观结构和提高面团的品质具有积极的作用。



注: 图中箭头指示和圈出范围中不规则网状结构为纤维、圆团状为淀粉颗粒。

Note: The arrows and circle in the figure indicate the irregular network structure is fiber, and the round group is starch particles.

图 5 GOD 对黑小麦粉面团微观结构的影响 (2 000 X)

Fig.5 Effect of GOD on microstructure of black wheat dough (2 000 X)

2.9 GOD 对黑小麦粉面团麦谷蛋白、麦醇溶蛋白及麦谷蛋白大聚体的影响

黑小麦粉面团面筋蛋白中麦醇溶蛋白主要负责赋予面筋蛋白延展性^[13], 使得面团在受到外力时能够延展而不断裂。而麦谷蛋白则主要贡献于面筋蛋白的弹性, 使得面团在受力后能够迅速恢复到原始状态。这两种蛋白的协同作用使得面筋具有良好的加工性能和口感; 其中将分子量超过 100 kDa 的聚合物称为麦谷蛋白大聚体 (Glutenin macropolymer, GMP)^[19], GMP 是具有弹性和刚性的紧密纤维状网络结构, 是面制品具有弹性和硬度的原因, 且 GMP 含量与面团强度、面制品咀嚼性、弹性及硬度呈显著正相关^[21]。由表 4 可

知, GOD 的加入显著降低了麦醇溶蛋白和麦谷蛋白的含量, GMP 含量随 GOD 添加量的增加呈先

表 4 GOD 对黑小麦粉面团麦谷蛋白、麦醇溶蛋白及麦谷蛋白大聚体的影响

Table 4 Effect of GOD on glutenin, gliadin, and glutenin macropolymer of black wheat dough

GOD 添加量/%	麦醇溶蛋白含量/%	麦谷蛋白含量/%	麦醇溶蛋白: 麦谷蛋白	麦谷蛋白大聚体含量/%
0	3.92±0.01 ^a	5.18±0.42 ^a	0.76±0.01 ^{bc}	2.71±0.02 ^c
0.2	3.71±0.06 ^b	4.94±0.54 ^b	0.75±0.03 ^c	2.72±0.03 ^{dc}
0.5	3.66±0.03 ^b	4.85±0.69 ^b	0.75±0.02 ^c	2.75±0.01 ^{cd}
0.8	3.64±0.01 ^b	4.52±0.62 ^c	0.81±0.01 ^a	2.86±0.04 ^a
1.1	3.46±0.01 ^c	4.46±0.27 ^c	0.78±0.01 ^b	2.82±0.01 ^b
1.4	3.39±0.01 ^c	4.38±0.25 ^c	0.77±0.01 ^b	2.77±0.06 ^c

增后减的趋势，这与孔晓雪等^[19]研究结果一致。当 GOD 添加量为 0.8% 时，麦醇溶蛋白：麦谷蛋白为 0.81，最接近最适比（1.0），因此当 GOD 添加量为 0.8% 时，黑小麦粉面团能形成较好面筋网络结构，具有较好黏弹性。

3 结论

本研究发现，GOD 能有效促进黑小麦粉面团中二硫键的交联，显著改善其理化特性。适量添加 GOD 能显著降低黑小麦粉面团中游离巯基的含量，同时增加二硫键的含量，从而加深蛋白质的交联程度。这种变化使得面筋网络的孔洞减少，淀粉颗粒与纤维被更紧密地包裹在面筋网络结构中，进一步完善了面筋蛋白的网络结构。然而，值得注意的是，GOD 的加入会降低黑小麦粉面团的延伸性。此外，当 GOD 添加量过多时，会导致蛋白质过度交联聚集，使得部分淀粉颗粒暴露在外，进而使得面团的综合黏弹性和稳定性开始下降。

因此，对于黑小麦粉面团来说，控制 GOD 的添加量至关重要。本研究表明，当 GOD 的添加量为 0.8% 时，其对黑小麦粉面团理化特性的改善效果最为显著。这一发现为开发黑小麦食品、提高其食用品质提供了重要参考，同时为后续研究 GOD 对黑小麦面团品质的影响提供了指导。未来，我们还可以进一步探索黑小麦健康功能食品的开发以及黑小麦食品品质的改良。

参考文献：

- [1] 章灏, 王立, 李言. 黑小麦麸皮中多酚类物质的纯化工艺优化及成分分析[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(1): 28-35+12.
ZHANG H, WANG L, LI Y. Optimization of purification process and composition analysis of polyphenols in black wheat bran[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(1): 28-35+12.
- [2] DHUA S, KSHITIZ K, YOGESH K, et al. Composition, characteristics and health promising prospects of black wheat: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 780-794.
- [3] 陈权权. 黑小麦制粉工艺探究与分析[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
CHEN Q Q. Investigation and analysis of black wheat milling process[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.
- [4] GROSSMANN I, CLEMENS D, MARIO J, et al. Compositional changes and baking performance of rye dough as affected by microbial transglutaminase and xylanase[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(28): 5751-5758.
- [5] 黎芳, 刘佳, 王冉冉, 等. 葡萄糖氧化酶对全麦面团及全麦馒头品质改良的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 78-82.
LI F, LIU J, WANG R R, et al. Effect of glucose oxidase on quality improvement of whole wheat dough and whole wheat buns[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(14): 78-82.
- [6] MATHIEU M, VAN A H, MEEUS Y, et al. Enhancing the rheological performance of wheat flour dough with glucose oxidase, transglutaminase or supplementary gluten[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(12): 2188-2198.
- [7] 孙笛静, 杨琪, 修琳, 等. 醒面工艺的优化及红豆蛋白对荞麦面条品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(6): 21-25.
SUN D J, YANG Q, XIU L, et al. Optimization of the waking process and the effect of red bean protein on the quality of buckwheat noodles[J]. Grain and Oil, 2023, 36(6): 21-25.
- [8] MOZA J, HARDEEP S G, MIXOLAB. Retrogradation and digestibility behavior of chapatti made from hullless barley flours[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 383-389.
- [9] LI X Y, HU H H, XU F, et al. Effects of aleurone-rich fraction on the hydration and rheological properties attributes of wheat dough[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(5): 1777-1786.
- [10] ZIA-UD-DIN, MABOOD I Q, MUHAMMAD A, et al. Measurement of physicochemical and dough pasting properties of fresh potato instant noodles as influenced by addition of emulsifiers[J]. Measurement: Food, 2023, 11.
- [11] 杨明柳, 周迎芹, 方旭波, 等. 谷氨酰胺转氨酶对鳕鱼鱼糜凝胶的品质影响[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 37-44.
YANG M L, ZHOU Y Q, FANG X B, et al. Effect of glutamine aminotransferase on the quality of surimi gel of Mandarin fish[J]. Food Science, 2021, 42(12): 37-44.
- [12] YANG Y L, GUAN E Q, LI M M, et al. Effect of transglutaminase on the quality and protein characteristics of aleurone-riched fine dried noodles[J]. LWT, 2022, 154: 112584.
- [13] 张令文, 王雪菲, 琚星, 等. 麦谷蛋白/麦醇溶蛋白对挂糊油炸猪肉片外壳食用品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 14-19.
ZHANG L W, WANG X F, JU X, et al. Effect of wheat gluten/wheat alcohol soluble protein on the edible quality of fried pork slices with battered shell[J]. Food Industry Science and Technology, 2020, 41(9): 14-19.
- [14] 张毅. 制面过程小麦面团特性及面筋网络结构影响机理的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
ZHANG Y. Study on the influence mechanism of wheat dough properties and gluten network structure during pasta making process[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.

- [15] 官孝瑶, 谢勇, 陈朝军, 等. 不同脱乙酰度魔芋葡甘露聚糖对面团特性和面包品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 221-228.
 GUAN X Y, XIE Y, CHEN Z J, et al. Effects of different degrees of deacetylation of konjac glucomannan on dough properties and bread quality[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(9): 221-228.
- [16] 王佳玉, 陈凤莲, 吴迪, 等. 谷氨酰胺转氨酶对全麦面团特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(4): 51-57.
 WANG J Y, CHEN F L, WU D, et al. Effect of glutamine aminotransferase on the properties and microstructure of whole wheat dough[J]. Food Science, 2021, 42(4): 51-57.
- [17] GUO W T, YANG X F, JI Y S, et al. Effects of transglutaminase and glucose oxidase on the properties of frozen dough: Water distribution, rheological properties, and microstructure[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 111.
- [18] 郑万琴, 谢勇, 覃小丽, 等. 不同粒径薯渣纤维对小麦面团流变特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 62-67.
 ZHENG W Q, XIE Y, QIN X L, et al. Effects of potato pomace fiber of different particle sizes on rheological properties of wheat dough[J]. Food Science, 2020, 41(16): 62-67.
- [19] 孔晓雪, 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.
 KONG X X, LI Y H, LI Y, et al. Effects of glucose oxidase and glutamine transaminase on the processing quality of fermented wheat bran dough[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(9): 85-90.
- [20] 李勇, 周文化, 李彦, 等. 板栗-小麦混合粉的流变学和热力学特性[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 1-5.
 LI Y, ZHOU W H, LI Y, et al. Rheological and thermodynamic characterization of chestnut-wheat flour blends[J]. China Journal of Cereals and Oils, 2020, 35(2): 1-5.
- [21] 韩畅, 林江涛, 岳清华, 等. 苦荞麸皮粉添加量对面团性质及馒头品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 140-145.
 HAN C, LIN J T, YUE Q H, et al. Effects of buckwheat bran flour on dough properties and steamed bread quality[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(7): 140-145.
- [22] 张帅. 魔芋胶和沙蒿胶对小麦面团特性的影响及其作用机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
 ZHANG S. Research on the effects of konjac gum and sartorius gum on wheat dough properties and their mechanism of action [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [23] 瞿旭. 戊聚糖酶和葡萄糖氧化酶协同提升芽麦全粉加工品质研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
 QU X. Research on the synergistic enhancement of processing quality of malted wheat whole flour by pentokinase and glucose oxidase[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [24] 帅天罡. 重庆小面专用面粉品质特点研究及保鲜湿即食重庆小面的研制[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
 SHUAI T G. Research on the quality characteristics of special flour for Chongqing small noodles and the development of preserved wet ready-to-eat Chongqing small noodles[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。