

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.01.008

李逸, 田晓红, 谭斌, 等. 全麦冷冻面团研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(1): 59-65.

LI Y, TIAN X H, TAN B, et al. Research progress on whole wheat frozen dough[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(1): 59-65.

# 全麦冷冻面团研究进展

李逸<sup>1,2</sup>, 田晓红<sup>1</sup>, 谭斌<sup>1,3</sup>✉, 刘明<sup>1</sup>, 姜平<sup>1</sup>, 康子悦<sup>1</sup>, 刘艳香<sup>1</sup>

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮油加工研究所, 北京 100037;

2. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001;

3. 中原食品实验室, 河南 漯河 462300)

**摘要:** 冷冻面团是全麦食品的一种良好载体, 可简化生产操作, 降低加工难度, 加快全麦食品的工业化生产。综述了全麦食品中的膳食纤维对面团及冷冻面团品质的影响, 在冷冻和冷藏过程中全麦冷冻面团的发酵特性和流变学特性的变化, 以及食品改良剂对全麦冷冻面团的品质改善等研究。通过分析全麦冷冻面团中面筋蛋白、淀粉、发酵特性、流变学特性等在冷冻和冷藏过程中劣变原因, 为改善全麦冷冻面团的品质提供理论基础和实践参考。

**关键词:** 全麦; 膳食纤维; 冷冻; 面团; 发酵特性

中图分类号: TS213.2; S-1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)01-0059-07

## Research Progress on Whole Wheat Frozen Dough

LI Yi<sup>1,2</sup>, TIAN Xiao-hong<sup>1</sup>, TAN Bin<sup>1,3</sup>✉, LIU Ming<sup>1</sup>, JIANG Ping<sup>1</sup>, KANG Zi-yue<sup>1</sup>, LIU Yan-xiang<sup>1</sup>

(1. Institute of Cereal and Oil Science and Technology, Academy of National Food and Strategic

Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. College of Grain, Oil and Food Science,

Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;

3. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe, Henan 462300, China)

**Abstract:** Frozen dough is a good carrier for whole wheat food, which simplifies production operations, reduces processing difficulties, and steps up the industrial production of whole wheat food. This paper reviewed the effects of dietary fiber on the quality of dough and frozen dough, the changes of fermentation characteristics and Rheology characteristics of whole wheat frozen dough in the process of freezing and cold storage, and the research on the quality improvement of whole wheat frozen dough by food improvers. By analyzing the deterioration reasons of gluten protein, starch, fermentation properties, Rheology properties, etc. in the whole wheat frozen dough during freezing and cold storage, the theoretical basis and practical reference for improving the quality of whole wheat frozen dough were provided.

**Key words:** whole wheat; dietary fiber; freezing; dough; fermentation characteristics

收稿日期: 2023-11-18

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD2100203)

Supported by: National Key Research and Development Project of the 14th five-year plan, China (No.2021YFD2100203)

作者简介: 李逸, 男, 1997 年出生, 在读硕士生, 研究方向为方便主食品加工。E-mail: 15516329902@163.com

通讯作者: 谭斌, 男, 1972 年出生, 博士, 首席研究员, 研究方向为健康谷物(全谷物)食品的营养与加工。E-mail: tb@ags.ac.cn

小麦是我国主要的粮食作物之一<sup>[1]</sup>，其加工方式决定了制品的营养价值。全麦粉中不仅富含麦麸膳食纤维，还含有大量的生物活性成分，包括生育酚、植物甾醇、酚酸、黄酮、多酚等，具有很好的抗氧化活性。经常食用全麦食品具有调整膳食结构、促进肠道蠕动、预防肥胖和便秘的作用<sup>[2-3]</sup>。然而，全麦食品在加工过程中，膳食纤维会与面筋蛋白竞争性吸水，破坏面筋蛋白网络结构，使得面团发酵能力降低，面制品硬度增加、弹性减弱，使得很多普通家庭人员做出来的全麦食品感官品质比较差，限制了全麦食品的食用和推广。

冷冻面团是全麦食品的一种良好载体，由专业技术人员在食品加工车间生产的冷冻面团或冷冻食品，消费者只需要经过简单的烹饪即可享用到健康美味的全麦食品。由于冷冻面团技术能够缩短生产周期、简化生产操作，降低加工难度，现已应用于中央厨房、超市、面包房等连锁经营场所<sup>[4]</sup>。但是在冷冻过程中，冰晶的形成对酵母的活性、面团的产气能力、面筋蛋白的结构、膳食纤维的结构均发生了一定程度的改变，引起产品硬度增加、弹性降低、比容下降、货架期缩短等问题<sup>[5]</sup>。现有研究表明，添加抗冻剂、乳化剂、基因改造酵母、超声辅助冷冻技术等能够改善全麦冷冻面团的品质<sup>[6-7]</sup>。本文主要总结了麦麸膳食纤维对冷冻面团品质的影响以及改善冷冻面团品质的方式，以期为全麦冷冻面团的研究与改良提供参考。

## 1 膳食纤维

### 1.1 麦麸膳食纤维结构与功能

膳食纤维是全麦粉区别于精致小麦粉的最重要组分之一，在全麦粉中占 9% 以上。根据水溶性可以将其分为可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 和不可溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fibre, IDF)。膳食纤维约占麦麸质量的 35%~50%。主要分布在小麦果皮、种皮和管状细胞等。其中 IDF 约占全部膳食纤维的 90%，是影响全麦制品加工品质的主要因素。其颗粒大，颜色深，口感粗糙、水溶性差，使得全麦制品外观和口感不佳。

2009 年，食品法典委员会 (CAC) 在经过近二十年的研究后提出，膳食纤维是指具有 10 个或更多单体单元的碳水化合物聚合物，其基本结构如图 1<sup>[8]</sup>所示，R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub> 可能是氢、乙酰基、阿拉伯呋喃糖或者 4-O-甲基-D-葡萄糖醛酸。由于人体缺少分解膳食纤维所需的酶，膳食纤维不能在人体的胃和肠道内被消化，但是膳食纤维具有强吸水作用，能够增加粪便体积，促进肠道蠕动<sup>[9]</sup>。膳食纤维对胆固醇和葡萄糖有着较强的吸附作用，可以抑制人体对胆固醇和葡萄糖的吸收，起到预防高血脂、高血压和糖尿病等慢性疾病的作用。

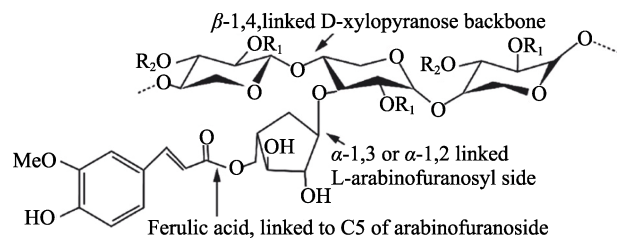


图 1 麦麸膳食纤维基本结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the basic structure of wheat bran dietary fiber

### 1.2 膳食纤维对面团的影响

面筋蛋白和淀粉组成的面团是影响面制品品质的重要因素。在面粉加水搅拌形成面团过程中，麦谷蛋白通过分子间的二硫键和非共价键形成网状结构，对面团的弹性和强度起到重要作用。麦醇溶蛋白嵌入到麦谷蛋白形成的网络结构中，它的半胱氨酸残基形成分子内的二硫键，使面团具有粘性和延展性。麸皮中膳食纤维具有很好的吸水性，在面团形成过程中与面筋蛋白竞争性吸水，随着麦麸膳食纤维的添加，降低了面筋蛋白与水的充分作用，阻碍面筋网络的形成<sup>[10]</sup>；此外，麦麸中还存在着一些活性物质如还原型谷胱甘肽 (GSH)，GSH 的存在破坏了蛋白质间的二硫键，在和面搅拌过程中，加快了面筋蛋白的解离作用，阻碍了面筋蛋白的进一步交联，面筋网络结构的稳定性变弱<sup>[11]</sup>，此时面筋网络不能充分形成，面团的持气能力下降，造成面团品质下降，使得终产品的比容小、硬度大。安兆鹏<sup>[12]</sup>等发现随着麸皮添加量的增多，游离巯基含量有所升高，总巯基和二硫键含量均呈现下降趋势，表明麸皮膳食

纤维抑制了二硫键的形成, 面筋蛋白的稳定性与麸皮添加量呈负相关。吴远宁<sup>[13]</sup>等在研究冷冻全麦馒头中发现, 随着全麦粉的增加, 湿面筋含量呈下降趋势, 并且麸皮膳食纤维与面筋蛋白与水作用呈现竞争机制, 阻碍了面筋网络的充分形成。目前大多数研究认为, 麦麸膳食纤维对面筋网络的破坏作用和面筋蛋白的稀释作用是全麦产品品质低下的主要原因。但是现有的研究表明这不是唯一的影响因素, 麦麸膳食纤维含有大量的亲水基团, 使其具有较强的亲水能力, 在面筋网络结构形成的过程中与面筋蛋白争夺水分, 使面筋结构发育不完整<sup>[14]</sup>, 也是影响全麦产品品质的原因之一。

### 1.3 膳食纤维对冷冻面团的影响

根据已有研究发现, 针对全麦冷冻面团的研究报道较少, 现阶段对冷冻小麦粉面团的研究结论较为明确, 通过研究面团的物理化学性质变化, 探讨面团在冻藏过程中的变化机制。水占面团质量的 30%~50%, 对面筋网络的形成起重要作用, 水在低温条件下结冰, 它是引起面制品品质劣变的原因。一方面, 低温条件是冰形成条件, 但是冰晶颗粒的大小受冷冻速率的影响, 在快速冷冻条件下, 形成的冰晶体积越小, 自由水含量越低, 对面团的机械破坏作用越小, 淀粉的结晶度和回生效应不明显, 面团的面筋网络更加稳定, 面团的黏弹性变化, 面制品的品质与新鲜制品相似。

淀粉是面制品的最主要成分, 淀粉糊在冷冻过程中其分子状态发生转变并伴随着能量的变化, 淀粉糊的黏度变化能够预测产品的品质变化<sup>[15-16]</sup>。膳食纤维对淀粉悬浮液的糊化特性有显著影响, 膳食纤维添加量与淀粉糊的峰值粘度和最终粘度呈负相关<sup>[17]</sup>。小麦纤维具有大量的亲水基团, 具有吸水膨胀的特性, 降低了淀粉与水分子之间的相互作用, 抑制淀粉糊化, 使体系更加稳定。谢新华<sup>[18]</sup>等研究发现随着小麦纤维添加量的增加, 小麦淀粉的老化焓明显降低, 抑制了小麦淀粉的老化。艾羽涵<sup>[19]</sup>等发现在冷冻面团中加入麦麸粉后, 添加麦麸粉实验组淀粉的峰值黏度、终值黏度和回生值均高于空白对照组, 分子间  $\beta$ -

折叠、反向平行  $\beta$ -折叠和  $\beta$ -折叠比例均低于空白对照组, 麦麸能够在冻藏过程中抑制面筋蛋白二级结构的变化。在冻藏过程中, 麦麸冷冻面团自旋-自旋弛豫时间 T21 略高于空白对照组, T22 低于空白对照组, 麦麸的添加能够适当降低冷藏条件下面团中水分的流动, 提高冷冻麦麸面团的稳定性。Jiang<sup>[20]</sup>等研究富含膳食纤维的组分对冷冻面团在冻藏过程中的质构、热特性、水分分布和面筋特性的影响时发现, 魔芋粉(含较多可溶性膳食纤维)能够显著改变晶核类型、降低冰晶生产速率, 使冰晶生产速率从 0.017 7 降低到 0.004 8, 降低水分流失率 15%~27%, 限制水分在冻藏过程中的流动性, 抑制冷冻面团在储存过程中的劣变。许可<sup>[21]</sup>等研究表明不同冻冻面团随着冷藏时间的延长, 面团的可冻结含水量、强结合水和自由水含量均有明显增加, 弱结合水和自由水的横向弛豫时间均向右偏移; 面团的硬度增加、凝聚性减弱, 使得面团品质下降。

膳食纤维主要影响的全麦制品口感和质感, 在加工中往往作为不利因素来看待。由于膳食纤维具有强吸水性, 与面筋蛋白形成竞争性吸水, 面筋网状结构不能充分形成, 面团品质发生劣变。

## 2 全麦面团的流变学特性

全麦面团是一种黏弹性体, 面制品的品质与面团的流变学特性有关。损耗角正切值 ( $\tan\delta$ ) 是面团弹性模量 ( $G'$ ) 与粘性模量 ( $G''$ ) 的比值, 是衡量蛋白质品质的重要指标之一, 其值越大说明蛋白劣变程度越高<sup>[21-22]</sup>。Bea<sup>[23]</sup>等发现精致小麦粉、全麦粉和含 50%全麦粉的冷冻面团经过冻藏后, 随着全麦粉含量的增加, 冷冻面团的拉伸特性和最大拉伸阻力呈下降趋势, 烘焙后面包的比容也呈下降趋势, 是因为随着全麦粉含量的增加, 面筋蛋白含量被稀释, 面团的拉伸特性随之降低, 面团的比容也减小。Adams<sup>[24]</sup>等发现在精制面粉中添加小麦纤维可增强面团的流变学特性, 经冻藏后, 纤维冷冻面团的弹性和  $\tan\delta$  的下降幅度要明显小于精粉面团。通过添加小麦纤维减少了冷冻和冷藏对面团流变学性能的负面影

响, 面团中的纤维成分在冷冻存储期间与水分子结合, 限制水分子流动性和抑制冰晶的生长, 降低冰晶颗粒对面团的破坏作用, 能够更好的维持产品的品质。

### 3 全麦冷冻面团的发酵特性

酵母对发酵面制品的品质具有重要作用, 酵母的活性与面团的醒发时间、体积、硬度和孔隙率有密切关系<sup>[22,25]</sup>。冷藏过程中, 冰晶的形成会破坏酵母细胞的完整性, 造成机械损伤, 会引起部分酵母细胞的死亡, 使得酵母的产气能力降低, 面团内部孔隙率降低<sup>[26]</sup>。在低温条件下, 酵母细胞活力不断降低, 产气能力降低, 引起面制品的最大发酵高度 (Hm) 和最终发酵高度 (h) 降低。郭璐楠<sup>[27]</sup>研究发现经过冻藏的酵母细胞会产生不同程度的变形, 细胞表面产生褶皱, 细胞膜丧失生理功能。虽然冷冻处理对酵母细胞具有一定的破坏作用, 但是通过筛选培养适合低温环境下的菌株<sup>[28]</sup>、改善冻结方式、添加抗冻剂<sup>[29-30]</sup>等可以尽可能维持酵母细胞的生物活性, 使面制品的品质下降得到有效改善。此外, 面筋网络结构的持气力也与发酵特性有关, 面筋网络结构的稳定能够有效维持发酵时所产生的气体, 加热时气体膨胀, 面制品更加蓬松、柔软, 面包、馒头的空隙更加均匀。王崇崇<sup>[31]</sup>等研究发现随着麸皮膳食纤维添加量处于 5%~15% 时, 冷冻面团发酵能力增加, CO<sub>2</sub> 的生成量增加, 面团的持气能力减弱, 面团过早发生漏气现象, 表明面团的发酵时间缩短, 馒头的比容也随着麦麸膳食纤维增加而减小。Pei<sup>[32]</sup>等研究发现精制面粉、50%全麦粉、100%全麦粉制备的冷冻面团经过 4 周的冻藏后, 与白面包相比, 观察到全麦面包的体积更小, 面包屑质地更坚实, 此现象的产生是由于随着全麦粉含量的增加, 面团的延展性减弱, 发酵过程中产生的气体大多散失, 发酵后的面团体积较小, 内部结构致密, 烘焙完成的面包比容减小, 硬度增加。但是经过 8 周的冻藏, 全麦面包的比容减小比要低于白面包, 可能是由于麦麸膳食纤维对水起到了束缚作用, 减少了大颗粒冰晶的数量, 酵母细胞破损少。

## 4 全麦冷冻面团改良探究

目前全麦冷冻面团的改良研究主要是通过加工工艺和食品添加剂来改善面团的品质。冷冻速度和冻藏温度将影响冷冻面团的品质。采用快速冻结方式形成的冰晶颗粒细小, 对面团的组织结构破坏性小, 以维持面团品质; 冻藏条件的变化可能会引起水分的迁移与冰的重结晶, 从而造成面团品质的劣化<sup>[33]</sup>。食品添加剂一般作为抗冻剂和乳化剂, 增强面筋的网络结构, 减少水分的迁移和重结晶作用, 从而维持面团的品质。常用的改良剂有海藻酸丙二醇酯、面筋蛋白、 $\gamma$ -聚谷氨酸等。

### 4.1 海藻酸丙二醇酯

海藻酸丙二醇酯 (PGA) 是由天然海藻提取的海藻酸加工而成, 由于其酯化基团和葡萄糖醛酸基团的存在, 使得 PGA 具有双亲性的特点, 是一种潜在的可改善面包质地和稳定气泡的添加剂。PGA 分子含有大量亲水性的羟基, 可与蛋白质、碳水化合物等大分子结合, 具有增稠、稳定等功能<sup>[34]</sup>。目前已有研究表明, PGA 用于面包生产, 改善了面团流变学特性和面团品质<sup>[35]</sup>。臧梁<sup>[36]</sup>等发现通过添加 PGA 改善了全麦冷冻面团的冻藏稳定性和烘焙特性。经过 5 周冻藏后, PGA 组与对照组相比, 面包比容分别下降了 14.153% 和 19.872%, 硬度分别升高了 36.386% 和 64.186%, 气孔表面积分率下降了 2.300% 和 3.497%。添加 PGA 延缓了冻藏期蛋白质  $\beta$ -转角相对含量下降和  $\beta$ -折叠含量上升。

### 4.2 谷朊粉

谷朊粉, 又称活性面筋, 主要成分是麦谷蛋白和醇溶蛋白, 占 80% 左右。在全麦面团中, 麸皮对面筋蛋白有着稀释作用, 添加谷朊粉不仅可以提高面团和面包产量, 改善面包质地, 同时还能提高蛋白质水平, 从而提高产品的营养价值<sup>[37]</sup>。Giannou<sup>[38]</sup>等分别在面粉与全麦面粉中添加不同量的活性面筋, 经过冻藏后发现, 全麦面粉实验组的面团质量损失率要小于面粉组, 面包的体积均有所增加, 差式热量扫描 (DSC) 热分析表明, 活性面筋的加入提高了面团样品的冰点, 减少了

因热冲击造成的品质损失,通过高效液相色谱(HPLC)测定低分子糖含量表明,添加活性面筋可以显著提高面团的稳定性和强度。

### 4.3 $\gamma$ -聚谷氨酸

$\gamma$ -聚谷氨酸( $\gamma$ -PGA)是通过微生物的发酵作用产生的水溶性多聚氨基酸,有非常好的水溶性,可以改善食品的风味,在消化道内被分解成谷氨酸,作为营养物质被人体吸收<sup>[39]</sup>,相较于蔗糖、葡萄糖等常用抗冻剂, $\gamma$ -PGA还可以延长食品的货架期<sup>[40]</sup>。在含碳水化合物较多的食品体系中加入 $\gamma$ -PGA,面筋的流变学特性会得到改变,面制品的持水能力得到增强<sup>[41]</sup>。相较于其他防冻剂,如无机盐、糖类、蛋白质等, $\gamma$ -聚谷氨酸没有异味,对食品风味影响较小,还可以缓解全谷物食品中的氨基酸、奎宁、肽和咖啡因等苦味物质的涩味,起到掩蔽作用<sup>[42]</sup>。 $\gamma$ -聚谷氨酸的抗冻性与具有其较强的保水性有关,它可以促进大分子聚合物之间形成大量氢键,起到固定水、无机盐的作用,使得食品体系有更好的保水性。 $\gamma$ -聚谷氨酸在冷冻面团中能够保护面筋网络结构的稳定,减弱冻藏对面筋蛋白的破坏,提升馒头的品质<sup>[43]</sup>。王家宝<sup>[44]</sup>等发现添加 $\gamma$ -聚谷氨酸全麦面团的酵母存活率、发酵高度均有所提升,全麦面包的比容、硬度均有所改善,面包的回生特性被很好的抑制。

## 5 结语

目前,我国的速冻食品行业快速发展,但是速冻产品仍然存在酵母的发酵能力减弱、面团持气能力下降、淀粉回升明显、流变学特性变差等情况,冷冻馒头和面包的硬度变大、体积变小、弹性减弱等问题,储藏一段时间后劣变现象更加明显。全麦面团纤维的存在使得全麦冷冻面团的储藏品质更加具有不确定性,有的研究认为膳食纤维会增加对其水的吸收作用,导致面筋的网络结构稳定性减弱;也有的认为膳食纤维能够增加面团中的可冻结含水量,抑制冰的重结晶,以此维持面团的品质。目前的关注集中在膳食纤维对全麦面团的影响上,而对全麦冷冻面团研究较少,需要进一步明晰膳食纤维对冷冻面团品质影响的机制。根据已有研究,为了保持全麦冷冻面团的

品质,采用低温短时冻结和冻藏环境的稳定,面团具有更好的品质,制作的面制品才能更加美味。

### 参考文献:

- [1] 方宇辉,韩留鹏,华夏,等.小麦抗寒性研究进展[J].河南农业科学,2022,51(4):1-10.  
FANG Y H, HAN L P, HUA X, et al. Research progress on cold resistance of wheat[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(4): 1-10.
- [2] GÓMEZ M, GUTKOSKI L C, BRAVO N Á. Understanding whole-wheat flour and its effect in breads: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(6): 3241-3265.
- [3] LIU J, YU L L, WU Y B. Bioactive components and health beneficial properties of whole wheat foods[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(46): 12904-12915.
- [4] OMEDI J O, HUANG W N, ZHANG B L, et al. Advances in present-day frozen dough technology and its improver and novel biotech ingredients development trends-A review[J]. Cereal Chemistry, 2019, 96(1): 34-56.
- [5] GUO X N A, WU S H, ZHU K X. Effect of superheated steam treatment on quality characteristics of whole wheat flour and storage stability of semi-dried whole wheat noodle[J]. Food Chemistry, 2020, 322: 126738.
- [6] LUO W H, SUN D W, ZHU Z W, et al. Improving freeze tolerance of yeast and dough properties for enhancing frozen dough quality-A review of effective methods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 72: 25-33.
- [7] 李琦,曾凡坤,华蓉,等.麦麸膳食纤维理化特性、制备方法及应用研究进展[J].食品工业科技,2020,41(17):352-357.  
LI Q, ZENG F K, HUA R, et al. Research progress on the physicochemical properties, preparation methods and application of wheat bran dietary fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 352-357.
- [8] 姚慧慧,王燕,赵传文.小麦麸皮膳食纤维及其在食品中的应用研究进展[J].粮食与油脂,2018,31(10):10-12.  
YAO H H, WANG Y, ZHAO C W. Research progress on wheat bran dietary fiber and its application in food[J]. Cereals & Oils, 2018, 31(10): 10-12.
- [9] HEMDANE S, LANGENAECEN N A, JACOBS P J, et al. Study of the role of bran water binding and the steric hindrance by bran in straight dough bread making[J]. Food Chemistry, 2018, 253: 262-268.
- [10] 李金河,张霞,王琦,等.谷胱甘肽对小麦粉面筋聚集特性的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2020,41(4):32-37.  
LI J H, ZHANG X, WANG Q, et al. Effect of glutathione on gluten aggregation properties of wheat flour[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2020, 41(4):

- 32-37.
- [11] 安兆鹏, 王然, 赵文哲, 等. 小麦麸皮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.  
AN Z P, WANG R, ZHAO W Z, et al. Effects of wheat bran on dough and gluten characteristics[J]. Food Research and Development, 2018, 39(9): 11-17.
- [12] 吴远宁, 叶文俊, 沈汪洋, 等. 不同全麦粉替代率对冷冻馒头品质的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(3): 782-789.  
WU Y N, YE W J, SHEN W Y, et al. Effects of different whole wheat flour substitution rates on the qualities of frozen steamed bread[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(3): 782-789.
- [13] 马森, 汪桢, 王晓曦. 麦麸膳食纤维对面团特性影响的研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 124-131.  
MA S, WANG Z, WANG X X, et al. Research progress on the effect of wheat bran dietary fiber on dough properties[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2020, 41(1): 124-131.
- [14] KOGA S, BÖCKER U, MOLDESTAD A, et al. Influence of temperature during grain filling on gluten viscoelastic properties and gluten protein composition[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(1): 122-130.
- [15] LI M, SUN Q J, HAN C W, et al. Comparative study of the quality characteristics of fresh noodles with regular salt and alkali and the underlying mechanisms[J]. Food Chemistry, 2018, 246: 335-342.
- [16] 雷梦续. 麦麸膳食纤维对面条品质影响规律的研究[D]. 河南工业大学, 2021.  
LEI M X. Study on the effects of wheat bran dietary fiber on noodle quality[D]. Henan University of Technology, 2021.
- [17] 谢新华, 曹芳芳, 仵心军, 等. 小麦纤维对小麦淀粉热力学及流变学特性的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(2): 20-24.  
XIE X H, CAO F F, WU X J, et al. Research on effect of wheat fiber on thermodynamic and rheological properties of wheat starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(2): 20-24.
- [18] 艾羽函, 姬成宇, 张剑, 等. 麦麸粉对冷冻发酵面团中蛋白特性和淀粉特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(5): 809-817.  
AI Y Z, JI C Y, ZHANG J, et al. Effect of wheat bran powder on gluten protein and starch properties in frozen fermentation dough[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(5): 809-817.
- [19] JIANG Y L, ZHAO Y M, ZHU Y F, et al. Effect of dietary fiber-rich fractions on texture, thermal, water distribution, and gluten properties of frozen dough during storage[J]. Food Chemistry, 2019, 297:124902.
- [20] 许可, 邱国栋, 李星科, 等. 冻藏时间对面团水分物态变化及品质特性的影响[J]. 轻工学报, 2021, 36(1): 9-16.  
XU K, QIU G D, LI X K, et al. Effect of frozen storage time on water transformation and quality characteristics of dough[J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(1): 9-16.
- [21] KUMAR P K, PARHI A, SABLANI S S. Development of high-fiber and sugar-free frozen pancakes: Influence of state and phase transitions on the instrumental textural quality of pancakes during storage[J]. LWT, 2021, 146: 111454.
- [22] BAE W, LEE B, HOU G G, et al. Physicochemical characterization of whole-grain wheat flour in a frozen dough system for bake off technology[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(3): 520-525.
- [23] ADAMS V, RAGAE S, GOFF H D, et al. Properties of Arabinoxylans in frozen dough enriched with wheat Fiber[J]. Cereal Chemistry, 2017, 94(2): 242-250.
- [24] 刘科文, 关二旗, 李萌萌, 等. 秋葵多糖对冷冻面团贮藏稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022: 1-7.  
LIU K W, GUAN E Q, LI M M, et al. Effects of okra polysaccharide on storage stability of frozen dough[J]. Food and Fermentation Industries, 2022: 1-7.
- [25] AKBARIAN M, DEHKORDI M S M, GHASEMKHANI N, et al. Hydrocolloids and cryoprotectant used in frozen dough and effect of freezing on yeast survival and dough structure: A review[J]. International Journal of Life Sciences, 2015, 9(3): 1-7.
- [26] 郭璐楠. 面团冻藏过程中酵母稳定性变化及其对面团品质的影响[D]. 江南大学, 2021.  
GUO L N. Change in yeast stability its and in effect on dough quality during frozen storage[D]. Jiang Nan University, 2021.
- [27] 江正强, 王怡斯, 李里特. 低糖面团用耐冷冻酵母的筛选及其性质[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(6): 15-19.  
WANG Z Q, WANG Y S, LI L T, et al. Screening and characterization of freeze-tolerant Yeast[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(6): 15-19.
- [28] 李晓军, 徐鹏, 栾静, 等. 耐高渗酿酒酵母的代谢流分析[J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(3): 356-360.  
LI X J, XU P, LUAN J, et al. The metabolic flux analysis of the osmotolerant saccharomyces cerevisiae[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2009, 28(3): 356-360.
- [29] 刘玫, 马豪, 郑学玲, 等. 植物抗冻蛋白特性及其在冷冻面团中应用研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 115-122.  
LIU M, MA H, ZHENG X L, et al. Research progress on characteristics of antifreeze proteins from plants and its application in frozen dough[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(4): 115-122.
- [30] 王崇崇, 马森, 王晓曦, 等. 小麦麸皮膳食纤维对冷冻面团及馒头品质的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(5): 45-49.  
WANG C C, MA S, WANG X X, et al. Study on the effect of wheat bran dietary fiber on the quality of frozen dough and steamed bread[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(5): 45-49.
- [31] BAE W, LEE B, HOU G, et al. Physicochemical characterization

- of whole-grain wheat flour in a frozen dough system for bake off technology[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(3): 520-525.
- [32] NILSEN-NYGAARD J, HATTREM M N, DRAGET K I. Propylene glycol alginate (PGA) gelled foams: A systematic study of surface activity and gelling properties as a function of degree of esterification[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 57: 80-91.
- [33] 陈丽, 张影全, 魏益民, 等. 冻藏对非发酵面团水分状态及冰晶形态的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(2): 77-87.  
CHEN L, ZHANG Y Q, WEI Y M, et al. Effects of frozen storage on water state and ice crystal form of non-fermented dough[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(2): 77-87.
- [34] 刘海燕. 海藻酸丙二醇酯在发酵风味乳中的应用[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(3): 30.  
LIU H Y. Application of alginic acid propylene glycol ester in fermented flavor milk[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(3): 30.
- [35] PERESSINI D, PIN M, SENSIDONI A. Rheology and breadmaking performance of rice-buckwheat batters supplemented with hydrocolloids[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(3): 340-349.
- [36] 臧梁, 傅宝尚, 姜鹏飞, 等. 海藻酸丙二醇酯对全麦冷冻面团冻藏稳定性和烘焙特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2022: 1-13.  
ZANG L, FU B S, JIANG P F, et al. Effect of propylene glycol alginate on storage stability and baking properties of frozen whole wheat flour dough[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022: 1-13.
- [37] DAY L, AUGUSTIN M A, BATEY I L, et al. Wheat-gluten uses and industry needs[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(2): 82-90.
- [38] GÓMEZ M, GUTKOSKI L C, BRAVO N Á. Understanding whole-wheat flour and its effect in breads: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(6): 3241-3265.
- [39] HU Z Z, SHA X M, YE Y H, et al. Effects of  $\gamma$ -polyglutamic acid on the gelling properties and non-covalent interactions of fish gelatin[J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 51(3): 511-520.
- [40] BHAT A R, IRORERE V U, BARTLETT T, et al. *Bacillus subtilis* natto: a non-toxic source of poly-gamma-glutamic acid that could be used as a cryoprotectant for probiotic bacteria[J]. *AMB Express*, 2013, 3(1): 36.
- [41] XIE X, WU X, SHEN Y, et al. Effect of poly- $\gamma$ -glutamic acid on hydration and structure of wheat gluten[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(10): 3214-3219.
- [42] ZHANG C, WU D, JIA J, et al. Fishmeal wastewater as a low-cost nitrogen source for  $\gamma$ -polyglutamic acid production using *Bacillus subtilis*[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10(4): 789-795.
- [43] 谢新华, 毋修远, 仵军红, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对冻藏面团及馒头品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(22): 22-27.  
XIE X H, WU X Y, WU J H, et al. Effect of poly- $\gamma$ -glutamic acid on quality of frozen dough and steamed bread[J]. *Food Science*, 2020, 41(22): 22-27.
- [44] 王家宝, 何松, 苏子良, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对全麦冷冻面团烘焙特性的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(2): 9-13.  
WANG J, HE S, SU Z L, et al. Effect of poly- $\gamma$ -glutamic acid on baking properties of whole wheat frozen dough[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(2): 9-13. 