DOI:10.12441/spyswjs.20251124001 [文章编号] 1673-1689(2026)05-0082-12

复配小麦粉组成对冷冻馒头复蒸品质的影响及作用机制

储相宾 李文泽 李诗然 杨庆可 王慧敏 王 浩 于 鲲*

(安徽科技学院食品科学与工程学院,安徽 滁州 239000)

摘要:【目的】探讨复配小麦粉组成对冷冻馒头复蒸后品质的影响及作用机制。【方法】采用不同配比的小麦复配粉制作馒头并进行冷冻处理,测定复蒸后不同馒头的比容、质构、麦谷蛋白大聚体(GMP)质量、游离巯基质量摩尔浓度、蛋白质相对分子质量等指标。【结果】小麦复配粉的蛋白质质量分数可显著影响面团的热机械性能及馒头的冻藏稳定性。其中,蛋白质质量分数较高的MF1所制面团具有较高的吸水率、面团形成时间与稳定时间,形成的面筋网络结构更完整,GMP质量更高、SDS可萃取蛋白质质量分数更低,能更好地维持冻藏过程中馒头的比容与质构特性。随着冻藏时间的延长,馒头的面筋网络结构出现明显解聚,GMP质量均呈下降趋势,降幅为1.67%~15.12%;游离巯基质量摩尔浓度上升,增幅为2.44%~37.68%;SDS可萃取蛋白质质量分数增加,增幅为9.56%~48.84%;馒头宏观品质表现为比容下降、质构劣变、气孔分布不均等。皮尔逊相关性分析揭示了在冻藏不同阶段,馒头宏观品质指标与蛋白质结构参数、面团流变学特性的内在联系。【结论】冷冻馒头复蒸后的品质劣变与小麦组分差异密切有关。在所使用的复配小麦粉体系中,面筋蛋白质量分数、完整的GMP结构与冷冻馒头复蒸后质构特性显著相关。维持面筋网络结构的完整性是缓解冷冻馒头复蒸品质劣变的关键,该研究为冻藏面制品的品质改良提供了理论依据。

关键词:馒头;冻藏;复配粉;复蒸;面筋网络

Effect of Compound Wheat Flour Composition on the Re-steaming Quality of Frozen Steamed Bread and Its Underly Mechanism

*CHU Xiangbin LI Wenze LI Shiran YANG Qingke WANG Huimin WANG Hao YU Kun**

(College of Food Science and Engineering, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to decipher the mechanism through which wheat flour components influenced the deterioration of frozen streamed bread after re-steaming. [**Method**] The composite wheat flour samples with different formulations were used to prepare steamed bread, which was then frozen. The specific volume, texture, glutenin macropolymer (GMP) mass, free sulfhydryl molality, and relative molecular mass of proteins were measured after re-steaming of frozen steamed bread. [**Result**] The protein mass fraction in the composite wheat flour significantly influenced the thermomechanical properties of dough and the frozen storage stability of steamed bread. The MF1 formulation, with higher protein mass fraction, produced dough with greater water absorption, development time, and stability. Its gluten network structure is more intact, exhibited higher GMP mass and lower mass fraction of SDS-extractable proteins, which better preserved the specific volume and

基金项目:安徽科技学院引进人才项目(SPYJ202102);安徽省高等学校科学研究项目(自然科学)(2022AH051647);第四批凤翔人才团队项目。

通信作者:于鲲(1989—),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事面制品品质及功能特性研究。E-mail: yukun@ahstu.edu.cn

收稿日期:2025-11-24 **修回日期:**2026-01-19

textural properties of steamed bread during frozen storage. As the frozen storage time prolonged, the gluten network underwent significant depolymerization, as manifested by the decreases of 1.67%~15.12% in GMP mass, increases of 2.44%~37.68% in free sulfhydryl molality, and increases of 9.56%~48.84% in mass fraction of SDS-extractable proteins. Correspondingly, the streamed breed exhibited decreased specific volume, deteriorated texture, and uneven pore distribution. Pearson correlation analysis revealed the intrinsic relationships between macroscopic quality indicators, protein structural parameters, and dough rheological properties at different frozen storage stages. [**Conclusion**] The deterioration of frozen steamed bread after re-steaming is related to the differences in wheat flour components. In the composite wheat flour systems used, gluten protein mass fraction and complete GMP structure are significantly associated with textural properties of frozen steamed bread after re-steaming. Maintaining the integrity of the gluten network structure plays an important role in slowing down the quality deterioration of frozen streamed bread after re-steaming. This study provides a theoretical basis for improving frozen wheat flour-based products.

Keywords: steamed bread; frozen storage; composite wheat flour; re-steaming; gluten network

馒头是我国北方地区的传统主食，由于其常温保质期较短，难以满足规模化、商业化生产的需求。冷冻保鲜技术的应用突破了馒头保质期短的瓶颈，推动馒头制品的产业化发展[1]。但馒头在冻藏过程中易出现品质劣变问题，复蒸后的口感、风味难以达到新鲜馒头水平，这已成为制约冷冻馒头产业发展的关键问题之一[2]。

目前，国内外学者对冷冻面制品的品质保持已开展大量研究，且研究多集中在面团制备工艺与冻藏参数的优化等方面[3-4]。现有研究多聚焦于生面团的冻藏稳定性变化，针对熟制馒头冻藏后复蒸过程中的品质劣变机制仍缺乏系统、深入的探讨。已有研究表明，冻藏过程中的冰晶再结晶会破坏面筋网络结构，淀粉老化与水分迁移的协同作用是造成冷冻馒头复蒸后品质劣化的主要原因[5]。此外，蛋白质二级结构的不可逆改变、游离巯基氧化等一系列生化反应也会影响冷冻馒头的品质劣变进程[6]。现有研究虽已涉及冷冻馒头复蒸后的品质保持问题，但有关不同小麦粉组成对馒头冻藏稳定性及复蒸品质的影响仍较为匮乏。小麦粉组成对馒头品质具有显著影响，尤其在经过不同冻藏周期复蒸后可能引发更为复杂的品质变化[7]。因此，系统探究复配小麦粉组成对冷冻馒头复蒸品质的影响及作用机制，对提升产品品质与推动产业标准化具有重要的理论价值与现实意义[8]。

已有研究表明，小麦粉蛋白质质量分数与面筋结构特性是决定馒头抗冻性的主要因素[9-10]。作者通过分析不同复配粉所制面团的热机械性能，以及冷冻馒头复蒸后的宏观品质与微观结果指标，开展多指标间的相关性分析，探究小麦粉组成影响冷冻馒头品质稳定性的核心机制，旨在明确小麦粉组分变化与冷冻馒头复蒸品质劣变之间的关系，阐明冻藏及复蒸过程中面筋网络结构的动态演变规律，为改善冷冻馒头冻藏品质奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

前20粉小麦面粉、后20粉小麦面粉：安徽省凤宝集团有限公司；酵母：安琪酵母股份有限公司；磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、硫酸、磷酸钠、甘氨酸、乙二胺四乙酸、尿素：均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司；十二烷基硫酸钠：分析纯，上海麦克林生化科技股份有限公司；DTT：分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

凯氏定氮仪：K9860型，济南海能未来技术集团股份有限公司；马弗炉：Sx2-5-12型，上海博讯实业有限公司；和面机：HMJ-D3826型，佛山小熊电器股份有限公司；烘箱：DGG-92408型，上海森信实验仪器有限公司；离心机：GTR318E型，湖南可成仪器设备有限公司；恒温水浴培养箱：DK-S24型，上海三发科学仪器有限公司；高

效液相色谱仪：LC-20AT 型，日本岛津企业管理有限公司；色度计：NH300 型，广东三恩驰仪表有限公司；质构仪：CT-3 型，美国 Brookfield 公司；混合实验仪：Mixolab 型，法国肖邦技术公司。

1.3 方法

1.3.1 面粉的复配

采用同一批小麦在同一制粉路线上收集前路心磨粉（前 20 粉）与后路心磨粉（后 20 粉），根据国家标准中馒头粉湿面筋质量分数范围进行复配，制备 5 种湿面筋质量分数的小麦复配粉。具体复配质量比为：梯度 1 复配粉（MF1）为质量分数 10% 的前 20 粉+质量分数 90% 的后 20 粉；梯度 2 复配粉（MF2）为质量分数 15% 的前 20 粉+质量分数 85% 的后 20 粉；梯度 3 复配粉（MF3）为质量分数 20% 的前 20 粉+质量分数 80% 的后 20 粉；梯度 4 复配粉（MF4）为质量分数 25% 的前 20 粉+质量分数 75% 的后 20 粉；梯度 5 复配粉（MF5）为质量分数 30% 的前 20 粉+质量分数 70% 的后 20 粉。5 种复配粉的蛋白质质量分数依次为 13.67%、13.46%、13.31%、13.08%、13.03%，灰分质量分数依次为 0.95%、0.89%、0.87%、0.86%、0.82%，水分质量分数依次为 11.08%、11.30%、11.42%、11.51%、11.81%，湿面筋质量分数依次为 30.0%、29.2%、28.3%、27.5%、26.7%。

1.3.2 复配粉的热机械性能测定

参照赵婧如等[11]的方法对小麦复配粉进行热机械性能测定，测定过程使用 Mixolab 混合实验仪进行分析。

1.3.3 馒头制作及冻藏试验

馒头制作参照高青阳等[12]的方法并稍加修改。5 种小麦复配粉各称取 1 500 g，分别与 12 g 酵母混匀，加入 750 g 去离子水，混合 10 min 制成面团。将面团于 38 ℃、相对湿度 85% 的条件下醒发 60 min，随后分割为 50 g/个的馒头胚，揉圆后于相同条件下继续醒发 10 min。醒发完成后，沸水蒸制 25 min，停火 5 min 后取出，自然冷却 1 h。将冷却后的馒头装入自封袋，于−40 ℃速冻 4 h，再转移至−18 ℃冻藏。分别于冻藏 0、1、3、5、7、14、21、28、35、49、63、77、91、105 d 取样分析。

1.3.4 比容和高径比测定

参照沈东强等[13]的方法测定馒头的比容和高径比。采用油菜籽替代法测定馒头的比容，使用游标卡尺测定馒头的高度和直径。所有测量均重复 3 次。

1.3.5 色泽测定

采用色差仪测定馒头样品的色泽，记录 L^*、a^*、b^* 值。

1.3.6 气孔测定

参照 Liu 等[14]的方法，通过图像分析馒头的孔隙率。拍摄馒头横截面的彩色图像，利用 ImageJ 软件对馒头内部纹理结构进行分析。为进一步量化孔隙率、气孔密度及平均气孔面积，将彩色图像转换为二值化图像，并选择特定区域评估整个横截面的孔隙分布特征。

1.3.7 质构测定

采用质构仪对复蒸后的馒头质构特性进行分析[15]。使用切片机将冷却 1 h 后的馒头切成 10 mm 厚的馒头片，测定馒头芯的质构特性，选择质构仪分析（TPA）模式，采用 P/36R 柱形探头进行测试。质构仪参数设定为：触发模式 Auto、触发力 5.0 g、测前速度 3.0 mm/s、测中速度 1.0 mm/s、测后速度 1.0 mm/s、压缩变形率 50%、感应力 10 g、2 次压缩间隔 2 s。每个样本均平行测定 5 次。

1.3.8 GMP 质量测定

参照 Don 等[16]的方法测定复蒸后馒头的 GMP 质量变化。准确称取 1.5 g 馒头冻干粉（100 目），于 30 mL 15 g/L 的 SDS 溶液中溶解。37 ℃水浴中振荡 60 min，4 000 r/min 离心 5 min，弃去上清液。为减少非蛋白质成分的干扰，用 SDS 溶液重复洗涤沉淀 3 次，将淀粉层表面的胶状物刮出后收集，称量沉淀物质量。

1.3.9 蛋白质相对分子质量测定

采用 SDS-PAGE 凝胶电泳法测定馒头中蛋白质的相对分子质量[17]。电泳条件为：采用 5 g/dL 的浓缩胶和 12 g/dL 的分离胶，上样量 20 μL。在非还原条件下，准确称取含有 6 mg 蛋白质的样品，溶于 1 mL 0.05 mol/L 的 Tris-HCl 缓冲液（含 20 g/L SDS、1 g/L 溴酚蓝、10 g/L 甘油，pH 6.8）中，混合均匀后置于沸水中加热 5 min，待样品充分冷却后进样。在还原条件下，在含有样品的缓冲液中加入体积

分数50%的β-巯基乙醇。进样量为10 μL，电压为60 V。电泳结束后用2.5 g/L的考马斯亮蓝R-250染色，再用体积分数10%的乙酸脱色，利用凝胶成像系统获取图像。

1.3.10 SDS可萃取蛋白质质量分数测定

SDS可萃取蛋白质质量分数的测定参照Peng等[18]的方法。冻干样品（含10 mg蛋白质）加入5 mL 0.05 mol/L磷酸钠缓冲液（含20 g/L SDS，pH 6.8）中，振荡提取1 h。样品在还原条件下使用含10 g/L DTT的相同缓冲液提取，10 000 r/min离心10 min，取上清液过0.45 μm滤膜。采用TSK G4000-SWXL色谱柱（7.8 mm×30 cm×8 μm），相对分子质量分离范围为20 000~7 000 000。流动相为0.05 mol/L磷酸钠缓冲液（含2 g/L SDS，pH 6.8），流量0.7 mL/min，紫外检测器波长214 nm。在非还原条件下，将10 g/L的DTT加入含有样品的缓冲液中，其他过程与还原条件下相同。SDS可萃取蛋白质质量分数按式（1）计算。

$$Y=\frac{A_1}{A_r}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

Y——SDS可萃取蛋白质质量分数，%；

A_1——非还原条件下提取蛋白质的峰面积；

A_r——还原条件下提取蛋白质的峰面积。

1.3.11 游离巯基质量摩尔浓度测定

游离巯基质量摩尔浓度的测定参照Gong[19]等的方法。将含有20 mg蛋白质的样品溶解在10 mL Tris-甘氨酸缓冲液（0.09 mol/L甘氨酸、0.004 mol/L乙二胺四乙酸、8 mol/L尿素、0.086 mol/L Tris-HCl，pH 8.0）中振荡1 h后，10 000 r/min离心10 min。然后将80 μL Ellman试剂（4 mg/mL DTNB）与4 mL上清液避光反应10 min，使用分光光度计测定样品在412 nm的吸光度。以缓冲液为空白对照，游离巯基质量摩尔浓度按式（2）计算。

$$X=\frac{73.53\times A_{412}\times D}{C\times l} \quad (2)$$

式中：

X——游离巯基质量摩尔浓度，μmol/g；

A_{412}——样品的吸光度；

73.53——换算系数，μmol·cm/L；

l——比色皿光程长度，cm；

D——稀释因子；

C——样品质量浓度，g/L。

1.4 统计分析

所有试验均设置3个平行，结果以平均值±标准差表示。数据采用Microsoft Excel 2021处理，柱状图、点线图等由Origin 2018绘制。通过SPSS 26.0单因素方差分析（ANOVA）进行显著性分析，$P<0.05$表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 复配小麦粉的面团热机械性能变化结果

5种复配小麦粉所制面团的热机械性能见表1。不同复配粉面团的吸水率、稳定时间与形成时间均存在显著差异。其中，MF1样品面团的稳定时间最长；MF5样品的C值、峰值黏度、最小黏度、最终黏度均最低。MF1样品面团的热机械性能最优，主要归因于其蛋白质质量分数最高。小麦籽粒蛋白质主要富集于胚乳和糊粉层，且MF1样品中后路粉（后20粉）质量分数最高，即面粉中面筋蛋白质量分数更高。通常面筋蛋白质量分数越高，面团的稳定时间和形成时间越长[20-21]。除蛋白质外，淀粉也会影响面团的热机械性能。后路粉中通常含有更高比例的破碎淀粉，具有较强的吸水性，可形成结构更稳定的面团体系。同时，复配粉面团的吸水率随着后路粉质量分数的降低而下降，该变化规律与已有研究结论相符[22]。MF5样品的面团热机械性能最弱，C值最低表明其蛋白质网络结构强度较差。该样品前路粉质量分数较高、面筋蛋白质量分数较低，导致其在机械力和温度作用下蛋白质网络结构弱化程度较高，表现为较高的面筋弱化度，最终导致C值较低。同时，MF5样品各糊化黏度值均最低，与淀粉糊化速度的变化趋势一致，说明在面团形成过程中淀粉糊化进程受到明显抑制，这可能与该复配粉吸水能力较弱有关。综上，蛋白质质量分数是影响面团热机械性能的关键因素，同时，淀粉组成、破损程度及糊化特性也会产生协同调控作用，面团热机械性能的优劣是蛋白质与淀粉共同作用的结果。

表 1　不同小麦复配粉的面团热机械性能变化

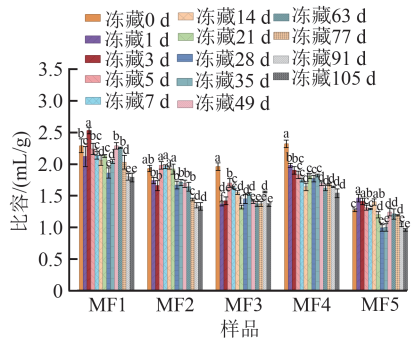
Table 1　Changes in the thermomechanical properties of dough prepared with different composite wheat flour samples

复配粉	吸水率/%	稳定时间/min	*C* 值/(N·m)	峰值黏度/(N·m)	最小黏度/(N·m)	最终黏度/(N·m)	形成时间/min	淀粉糊化速度/min^{-1}
MF1	60.53±0.46^{a}	6.70±0.10^{a}	0.78±0.02^{b}	1.48±0.01^{b}	1.28±0.01^{a}	2.20±0.03^{b}	4.11±0.23^{a}	0.46±0.02^{a}
MF2	59.93±0.12^{ab}	6.50±0.10^{b}	0.79±0.22^{a}	1.48±0.02^{b}	1.28±0.03^{a}	2.20±0.04^{b}	4.21±0.23^{a}	0.47±0.03^{a}
MF3	60.07±0.06^{ab}	6.40±0.10^{b}	0.78±0.03^{b}	1.51±0.02^{a}	1.30±0.04^{a}	2.30±0.03^{a}	4.09±0.23^{a}	0.47±0.03^{a}
MF4	60.00±0.00^{ab}	6.13±0.15^{c}	0.78±0.01^{b}	1.52±0.02^{a}	1.32±0.02^{a}	2.31±0.01^{a}	3.92±0.08^{a}	0.46±0.04^{a}
MF5	59.60±0.52^{b}	5.60±0.00^{d}	0.74±0.02^{c}	1.38±0.01^{c}	1.08±0.01^{b}	1.85±0.04^{c}	3.47±0.14^{b}	0.42±0.00^{b}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）；*C* 值为随着加热程度增加的蛋白质网络强度。

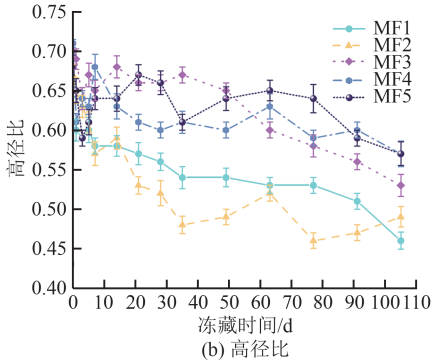
2.2　冷冻馒头复蒸后的比容和高径比变化结果

由图 1(a)可以看出，MF5 所制馒头复蒸后的比容显著低于 MF1，而 MF4 所制馒头在整个冻藏期间内不仅比容较高，整体稳定性也较佳。随着冻藏时间的延长，各组冷冻馒头复蒸后的高径比均逐渐降低，其中 MF5 所制馒头下降趋势最为显著，见图 1(b)。比容是评价馒头蓬松度与质构品质的重要指标之一，MF5 所制馒头的比容最低，表明其面筋网络结构强度较弱、持气性能较差；而 MF1 与 MF4 所制馒头在冻藏过程中可维持较高且稳定的比容，表明馒头冻藏过程中比容的大小和稳定性与复配粉中蛋白质质量分数密切相关，同时淀粉特性也发挥着重要的调控作用。不同复配粉所制馒头的比容差异与其所形成的面筋网络结构有关。冻藏过程中形成的冰晶、淀粉老化和回生等会破坏面筋网络的连续性与弹性，造成网络结构受损，进而导致馒头比容下降[23]。相同冻藏条件下，不同复配粉馒头比容的下降速率存在明显差异，表明复配粉的组成差异会改变面筋网络结构强度，最终影响馒头的抗冻性能。对比不同复配粉馒头比容的下降规律可知，MF1 所制馒头在冻藏 91 d 时比容降至最低并趋于稳定，MF2、MF3、MF4、MF5 所制馒头分别在 63、49、49、28 d 比容较低并趋于平缓。MF5 所制馒头高径比的显著下降，进一步证实了该组馒头持气能力弱、面筋网络更易在冻藏过程中劣变[24]。



不同字母表示同一样品的比容在不同冻藏时间下差异显著(P<0.05)。

(a) 比容



(b) 高径比

图 1　不同复配粉对冷冻馒头复蒸后比容和高径比的影响

Fig. 1　Effects of different composite wheat flour samples on the specific volume and height-to-diameter ratio of frozen steamed bread after re-steaming

2.3　冷冻馒头复蒸后色泽变化结果

冻藏期间 5 种复配粉所制馒头复蒸后的色泽变化见图 2。其中，MF1 所制馒头复蒸后的 L^* 值最低，这与该配方中后路粉质量分数最高有关，各组馒头 L^* 值的差异与复配粉的灰分质量分数存在显著相关性。随着冻藏时间的延长，各组馒头复蒸后的 L^* 值呈逐渐下降趋势。这可能是由于冻藏期间馒头中面筋网络结构受损，导致馒头表皮结构的致密性发生改变，进而影响馒头的亮度。Arias 等[25]研究表明，成熟面团所制面包的 L^* 值随着冷冻时间的延长显著降低，与本研究结果一致。

2.4　冷冻馒头复蒸后质构变化结果

馒头的质构品质主要由硬度、弹性、咀嚼性、内聚性等指标综合评价。其中，硬度与弹性是评价馒头食用品质的核心指标。咀嚼性由弹性、硬度和凝聚力共同决定，用于表征将馒头咀嚼至可

吞咽状态时所需的总功。不同复配粉所制馒头复蒸后的质构存在显著差异，见图3。MF5所制馒头的硬度、弹性、咀嚼性及内聚性均显著高于其他4组。随着冻藏时间的延长，各组馒头复蒸后均呈现硬度、咀嚼性上升，弹性、内聚性下降的变化规律。馒头质构特性与面筋蛋白的聚合程度密切相关，结合比容结果可知，MF5所制馒头的比容最低，面筋蛋白聚合度更高。已有研究表明，面筋蛋

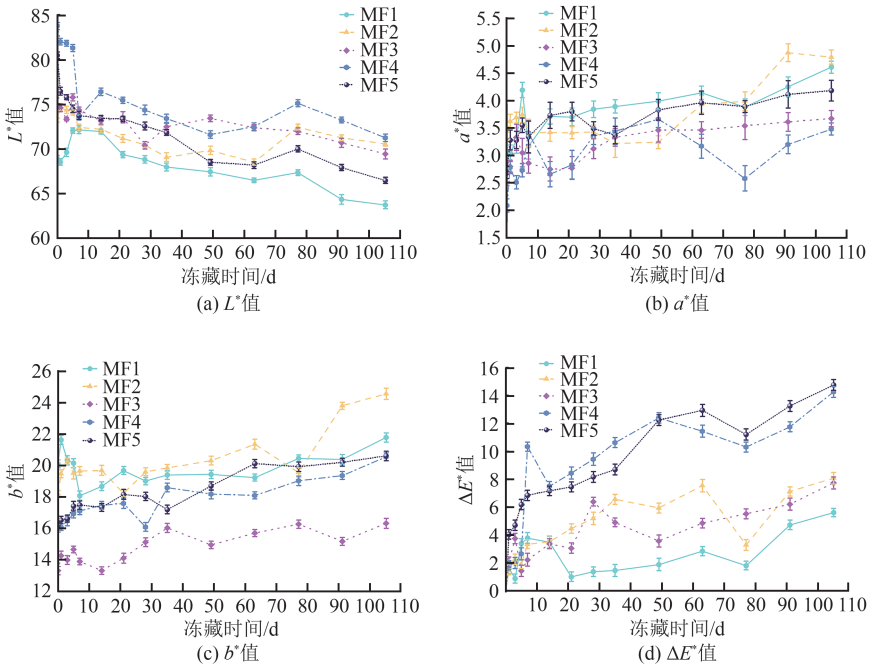


图2　不同复配粉对冷冻馒头复蒸后色泽的影响

Fig. 2　Effects of different composite wheat flour samples on the color parameters of frozen steamed bread after re-steaming

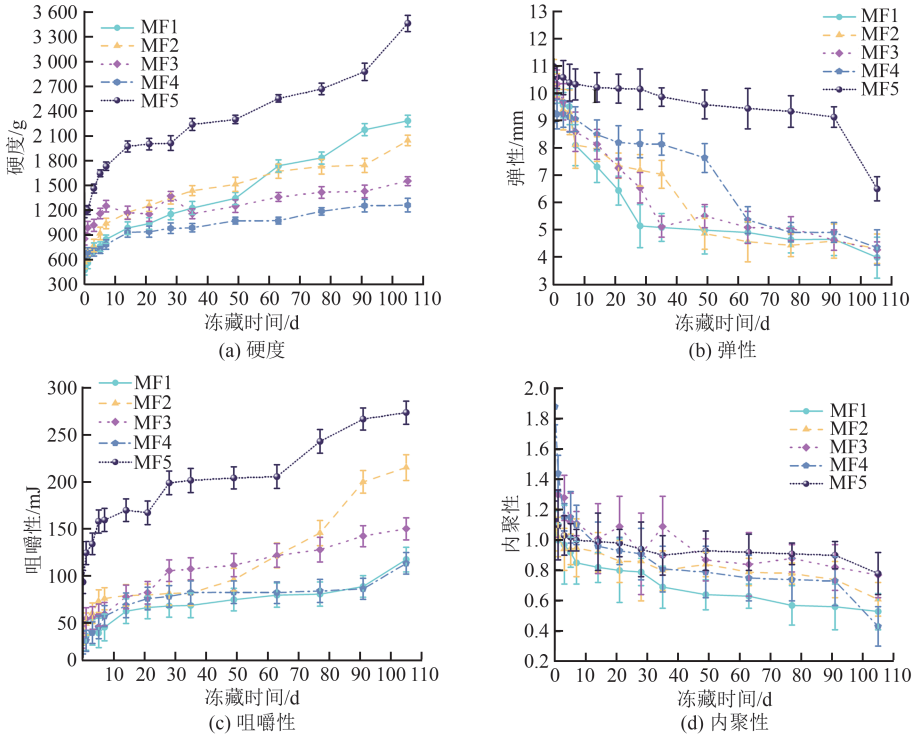


图3　不同复配粉对冷冻馒头复蒸后质构特性的影响

Fig. 3　Effects of different composite wheat flour samples on the textural properties of frozen steamed bread after re-steaming

白聚合度越高，馒头的比容往往越低，从而导致其硬度、弹性、咀嚼性与内聚性相应升高[26]。随着冻藏时间的延长，馒头质构的变化规律可能与冻藏过程中冰晶对面筋网络结构的破坏及面团持气性下降有关。此外，在冻藏与复蒸过程中的淀粉分子由无序状态向有序状态转变，降低了淀粉的持水性，进一步增加了馒头的硬度[27]。在复蒸过程中，馒头的面筋网络进一步受损导致其收缩聚集，使其质地更加紧实，硬度和咀嚼性随之增加，该结果与冻藏后馒头比容降低的现象一致。面筋网络聚合程度越高，对淀粉颗粒的包裹作用越强，馒头内部气室越少，整体组织越致密，因而硬度与咀嚼性增大，而弹性和内聚性则相应降低[28]。这些质构指标的变化，共同反映了冻藏对馒头结构的破坏作用。

2.5 冷冻馒头复蒸后气孔分布结果

馒头内部组织结构可通过孔隙率（孔隙总面积/总面积）、气孔数目、平均气孔面积（孔隙总面积/气孔数目）等参数进行评估。5 种复配粉制备的馒头经冻藏复蒸后的气孔变化见图 4。5 组馒头在冷冻前（0 d）的孔隙率、气孔数目与平均气孔面积无显著差异；随着冻藏时间的延长，各组样品气孔结构参数的差异逐渐扩大，其中 MF1 所制馒头的孔隙率、气孔数目及平均气孔面积稳定性最佳。冻藏处理可以显著降低馒头的孔隙率，孔隙率下降代表馒头内部气孔密度增加，推测该现象与冻藏过程中面筋网络结构发生聚集收缩密切相关[29]。冻藏后馒头气孔数目减少，而平均气孔面积增大，气孔数目的减少幅度大于气孔面积的增大幅度，表明冻藏胁迫造成馒头内部气孔大量闭合、均匀性下降，气孔结构劣变现象明显[30]。综上，冻藏过程通过破坏面筋网络结构稳定性以及淀粉分子中直链淀粉回生形成的重结晶，引发馒头内部气孔结构发生劣变。

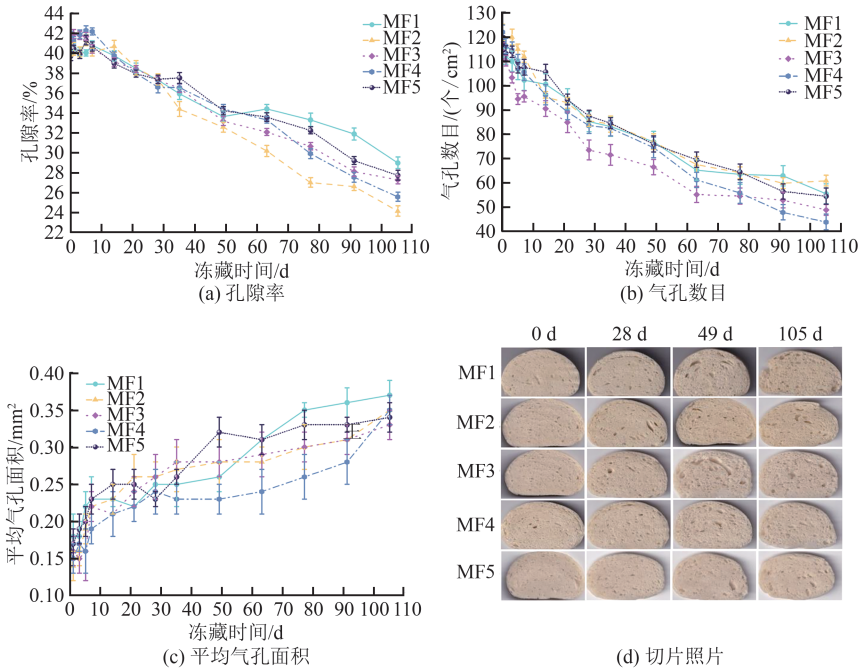
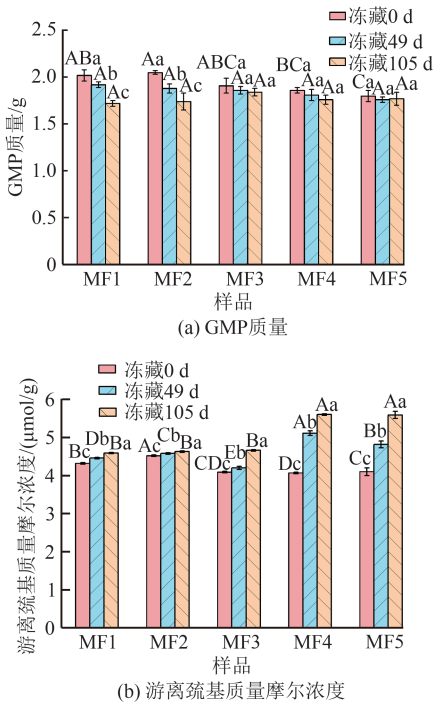


图 4 不同复配粉对冷冻馒头复蒸后气孔分布的影响

Fig. 4 Effects of different composite wheat flour samples on the pore distribution of frozen steamed bread after re-steaming

2.6 冷冻馒头复蒸后 GMP 和游离巯基结果

由图 5（a）可知，在冻藏 0 d 时，不同复配粉所制馒头的 GMP 质量存在显著差异，其中 MF2 所制馒头的 GMP 质量最高，与 MF1、MF3 无显著差异。随着冻藏时间的延长，各组样品的 GMP 质量均下降，且 MF1、MF2 所制馒头的降幅最为显著。由图 5（b）可知，在冻藏初期，MF1、MF2 所制馒头的游离巯基质量摩尔浓度显著高于其他 3 组；在冻藏后期，低蛋白质质量分数的 MF3、MF4、MF5 所制馒头的游离巯基质量摩尔浓度显著升高。GMP 是



(a) GMP质量

(b) 游离巯基质量摩尔浓度

不同大写字母表示相同冻藏时间不同样品差异显著(P<0.05)；
不同小写字母表示同一样品不同冻藏时间差异显著(P<0.05)。

图5 不同复配粉对冷冻馒头复蒸后GMP和游离巯基的影响

Fig. 5 Effects of different composite wheat flour samples on GMP and free sulfhydryl of frozen steamed bread after re-steaming

由麦谷蛋白亚基组成的高相对分子质量聚集体，是评价面筋蛋白质量与面制品品质的重要指标。冻藏0 d时，MF1所制馒头的GMP质量较高，表明其面筋蛋白强度较高、网络结构致密，这与其较高的蛋白质质量分数结果相符[31]。在冻藏过程中，各组样品的GMP质量均出现不同程度下降，这可能与冻藏过程中发生的面筋蛋白解聚有关。有研究表明，蛋白质质量分数越高，GMP在冻藏期间的下降趋势越明显[32]。GMP质量的降低证实了冻藏对馒头面筋网络结构具有破坏作用。此外，冻藏后游离巯基质量摩尔浓度上升，表明冷冻导致蛋白质结构稳定性下降。在冻藏后期，蛋白质质量分数较低样品的游离巯基质量摩尔浓度显著上升，说明在冻藏过程中面筋网络结构遭到破坏，致使原本包埋于蛋白质结构内部的巯基暴露。这一结果与宏观指标（如比容、高径比及质构特性）在冻藏期间的变化趋势一致，从蛋白质结构层面揭示了冷冻馒头复蒸品质劣变的分子机制。

2.7 冷冻馒头复蒸后SDS可萃取蛋白质结果

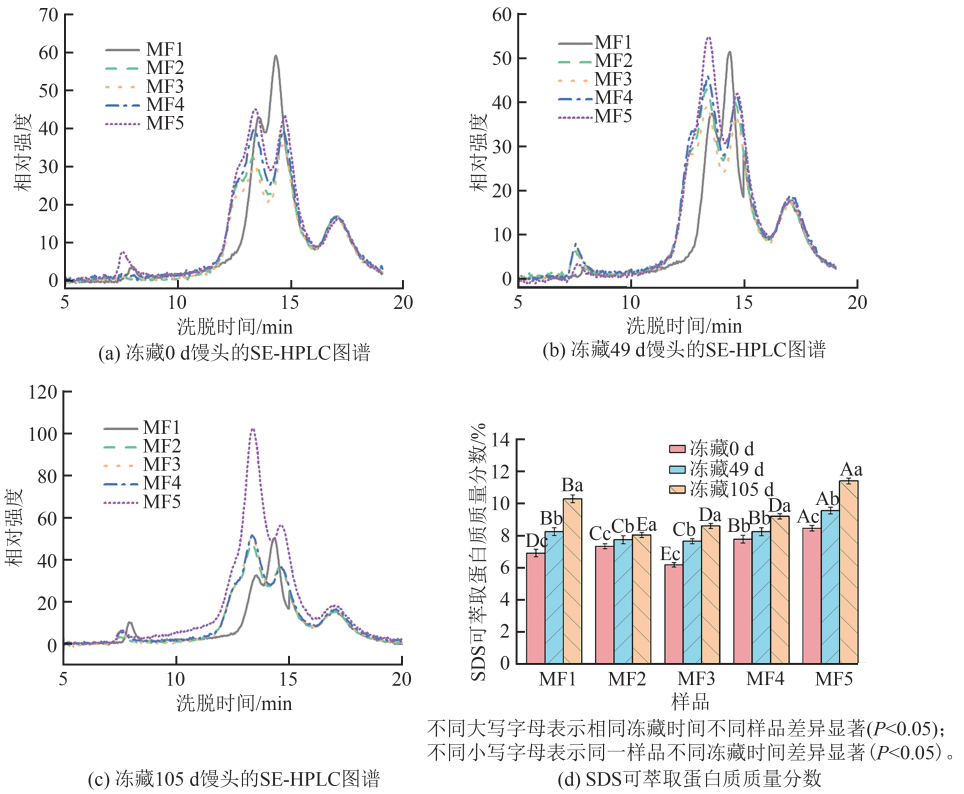
不同复配粉制备的馒头经冻藏复蒸后，其SDS可萃取蛋白质质量分数存在显著差异，见图6。冻藏0 d时，MF5样品的SDS可萃取蛋白质质量分数最高，MF3样品最低。随着冻藏时间的延长，所有馒头的SDS可萃取蛋白质质量分数均呈上升趋势，但不同样品的增幅存在明显差异。SDS可萃取蛋白质质量分数是评价蛋白质交联程度的关键指标之一[33]。冻藏0 d时，MF5样品的SDS可萃取蛋白质质量分数最高，表明其蛋白质交联程度较低，与其蛋白质质量分数较低的结果一致；相比之下，蛋白质质量分数较高的MF1样品的SDS可萃取蛋白质量分数较低，表明其中大部分蛋白质发生了较高程度的交联[34]。随着冻藏时间的延长，所有组别馒头的SDS可萃取蛋白质质量分数均呈上升趋势，进一步证实冻藏胁迫会加剧面筋网络结构的解聚。不同复配粉所制馒头在冻藏期间SDS可萃取蛋白质质量分数的增幅存在差异，反映出各组面筋蛋白初始交联结构的完整性与冻藏稳定性存在差异，最终导致各组馒头在冻藏过程中的品质保持能力存在差异[35]。

2.8 冷冻馒头复蒸后蛋白质相对分子质量分布结果

在非还原条件下，不同复配粉所制馒头经冻藏复蒸后，其蛋白质条带强度存在明显差异，见图7。其中，MF1样品的条带强度相对较弱，MF5样品的条带最明显。随着冻藏时间的延长，所有样品的蛋白质条带均呈逐渐增强的变化趋势。MF1样品的条带信号相对较弱，表明其蛋白质交联程度较强，形成了大分子聚集体，导致SDS可萃取蛋白质质量分数较低，最终表现为电泳条带信号较弱。相比之下，MF5样品的蛋白质条带较明显，与其蛋白质交联程度较低、SDS可萃取蛋白质质量分数较高直接相关。综上，冻藏处理会显著降低面筋蛋白的交联程度，促使小分子可萃取蛋白质占比增大，揭示了冷冻处理对面筋网络结构的解聚作用[36]。这些结果表明，冻藏过程会促使面筋网络结构发生解聚，表现为SDS可萃取蛋白质质量分数增加、电泳条带增强。

2.9 相关性分析结果

作者通过皮尔逊相关性分析，系统探究了冻藏复蒸馒头各参数与品质特性之间的内在联系，见图8。冻藏0 d时，馒头比容与面团吸水率、形



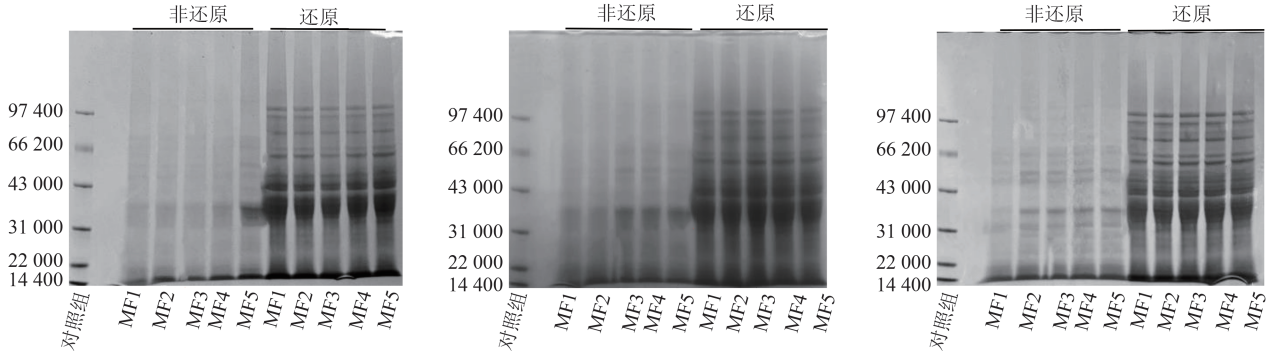
(a) 冻藏0 d馒头的SE-HPLC图谱　(b) 冻藏49 d馒头的SE-HPLC图谱

(c) 冻藏105 d馒头的SE-HPLC图谱　(d) SDS可萃取蛋白质质量分数

不同大写字母表示相同冻藏时间不同样品差异显著(P<0.05)；不同小写字母表示同一样品不同冻藏时间差异显著(P<0.05)。

图 6　不同复配粉对冷冻馒头复蒸后 SDS 可萃取蛋白质的影响

Fig. 6　Effects of different composite wheat flour samples on SDS-extractable proteins in frozen steamed bread after re-steaming

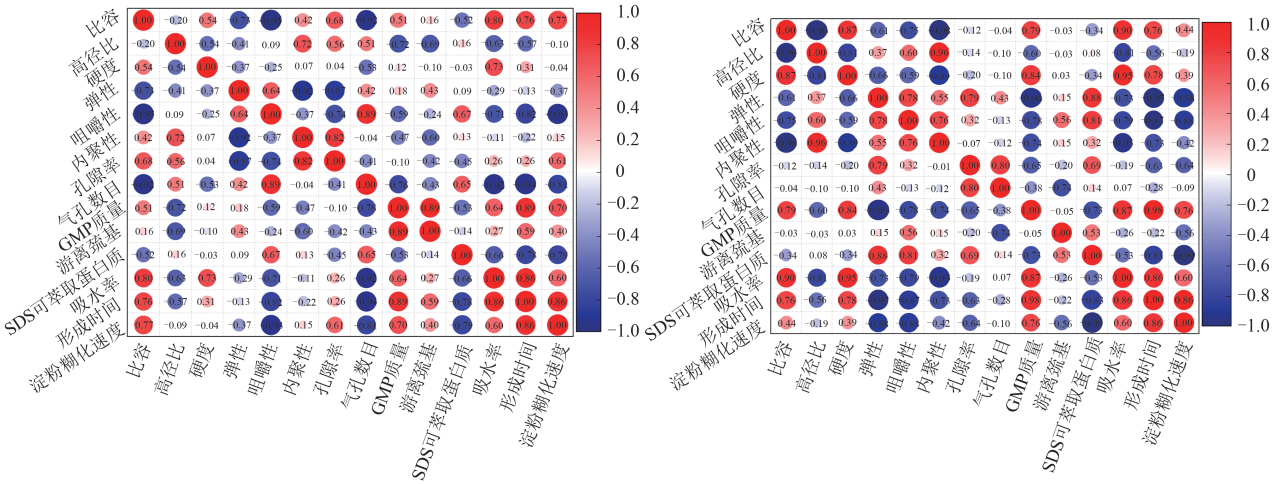


(a) 冻藏0 d馒头的SDS-PAGE结果　(b) 冻藏49 d馒头的SDS-PAGE结果　(c) 冻藏105 d馒头的SDS-PAGE结果

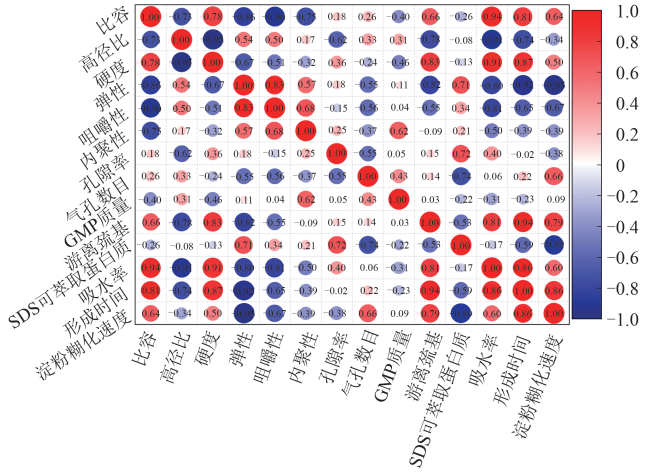
图 7　不同复配粉对复蒸后冷冻馒头中蛋白质相对分子质量的影响

Fig. 7　Effects of different composite wheat flour samples on the relative molecular mass of proteins in frozen steamed bread after re-steaming

成时间、淀粉糊化速度呈显著正相关，与弹性、咀嚼性、气孔数目呈显著负相关；在质构指标中，馒头弹性与孔隙率呈显著负相关。进一步分析面团网络结构参数可知，GMP 质量与高径比、气孔数目呈显著负相关，与游离巯基、面团形成时间、淀粉糊化速度呈显著正相关。上述相关性规律，一方面源于不同复配粉中蛋白质质量分数存在差异，另一方面取决于面团发酵过程中面筋网络结构的完整性与稳定性[37]。同时，SDS 可萃取蛋白质质量分数与面团吸水率、形成时间及淀粉糊化速度呈显著负相关，说明面团网络结构越完整，SDS 可萃取蛋白质质量分数越低。随着冻藏时间的延长，馒头比容与高径比、硬度、内聚性、GMP 质量、吸水率的相关性增强。这一结果表明，冻藏胁迫可以从宏观质构特性和微观蛋白质结构 2 个维度共同调控馒头品质[38]。



(a) 冻藏0 d馒头各项指标间的相关性分析　　(b) 冻藏49 d馒头各项指标间的相关性分析



(c) 冻藏105 d馒头各项指标间的相关性分析

图 8　不同复配粉所制馒头各项指标间的相关性分析

Fig. 8　Correlation analysis of various indicators of steamed bread prepared with different composite wheat flour samples

3　结论

本研究证实了复配粉的蛋白质质量分数和面筋质量是影响冷冻馒头复蒸后品质稳定性的关键因素。高蛋白质质量分数的MF1所制面团热机械性能更优，有较长的稳定时间与较高的吸水率；在冻藏过程中可有效维持面筋网络结构的稳定性，且GMP质量较高、SDS可萃取蛋白质质量分数较低，宏观上表现为冻藏期间比容与气孔结构更为稳定。冻藏胁迫会诱发馒头品质发生劣变，其面筋网络结构在冻藏过程中发生解聚，表现为GMP质量下降、SDS可萃取蛋白质质量分数与游离巯基质量摩尔浓度上升，进而引起馒头宏观结构劣化，主要表现为馒头比容降低、硬度与咀嚼性上升、弹性与内聚性下降；同时内部气孔结构趋于致密、平均气孔面积增大、气孔数目减少。不同复配粉所制馒头在冻藏过程中的品质稳定性存在明显差异。其中，MF1具有高蛋白质质量分数与结构稳定的面筋网络结构，其冻藏品质劣变程度最轻；而低蛋白质质量分数的MF5面筋蛋白交联程度较弱、网络结构稳定性较差，冻藏过程中品质劣变最为显著，表现为比容最小、质构变化最大、蛋白质解聚程度最高。本研究完善了现有冷冻面制品品质劣变机制中面筋蛋白组分的相关研究，证实了通过原料配比调控冷冻馒头品质的可行性，为改善冷冻馒头品质及开发具有抗冻稳定性的面制品提供了理论依据。后续研究可进一步探究复配粉中淀粉结构特性与面筋蛋白的协同作用机制，明确蛋白质交联程度与冻藏稳定性的协同关系。

参考文献

[1] 郭海云，周涛，李研东，等. 冷冻面团在馒头加工中的应用[J]. 食品安全导刊，2022(19)：169-171.
Guo H Y，Zhou T，Li Y D，et al. Application of frozen dough in steamed bread processing[J]. China Food Safety Magazine，2022(19)：169-171.(in Chinese)

[2] Yang Z X，Jin Y M，Xu X M. Mechanism of frozen dough deterioration and the behavior of different wheat starch types during storage[J]. Journal of Cereal Science，2024，116：103843.

[3] 王宏伟，聂溱乐，乔靖玥，等. 酶制剂对冷冻面团加工特性及馒头品质的影响[J]. 食品工业科技，2025，46(14)：299-309.
Wang H W，Nie Q Y，Qiao J Y，et al. Effects of enzyme addition on the processing characteristics of frozen dough and the quality of the steamed bread[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(14)：299-309.(in Chinese)

[4] 陆启玉，雷万学. 烩面的速冻和冷藏条件的研究[J]. 郑州工程学院学报，2002(2)：14-18.
Lu Q Y，Lei W X. Study on the frozen and cold storage conditions of noodles braised meat[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Technology，2002(2)：14-18.(in Chinese)

[5] Guo X N，Yang S，Zhu K X. Influences of alkali on the quality and protein polymerization of buckwheat Chinese steamed bread[J]. Food Chemistry，2019，283：52-58.

[6] Gong Y Y，Xu S Y，He T，et al. Effect of quick-freezing temperature on starch retrogradation and ice crystals properties of steamed oat roll[J]. Journal of Cereal Science，2020，96：103109.

[7] Li Y，Qiu X，Yao Y F，et al. Effects of whole wheat flour on frozen dough and steamed bread during freeze-thaw cycles[J]. LWT-Food Science and Technology，2024，197：115938.

[8] 郭平平，刘玉兰，马宇翔. 油莎豆脱皮脱脂粉对生鲜面条复配粉及面条品质的影响[J]. 粮食与油脂，2025，38(5)：18-24.
Guo P P，Liu Y L，Ma Y X. The effect of hulled and defatted *Cyperus esculentus* powder on the quality of fresh noodles compound powder and noodles[J]. Cereals & Oils，2025，38(5)：18-24.(in Chinese)

[9] 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.(in Chinese)

[10] 李彤，韩四海，李佩艳，等. 大豆卵磷脂对面包水分分布、老化特性及感官评价的改善[J]. 食品与发酵工业，2026，52(8)：46-53.
Li T，Han S H，Li P Y，et al. Improvement of moisture distribution，aging characteristics，and sensory evaluation of bread by soy lecithin[J]. Food and Fermentation Industries，2026，52(8)：46-53.(in Chinese)

[11] 赵婧如，佘珍云，侯丹婷，等. 猕猴桃淀粉部分替代小麦粉对饼干品质属性和贮藏特性的影响[J]. 食品科学，2025，46(24)：115-124.
Zhao J R，She Z Y，Hou D T，et al. Effect of partial substitution of wheat flour with kiwifruit starch on the quality and storage properties of biscuits[J]. Food Science，2025，46(24)：115-124.(in Chinese)

[12] 高青阳，温纪平，敖天芳. 脱皮加工对小麦粉及馒头品质的影响研究[J]. 粮食与油脂，2025，38(11)：16-23.
Gao Q Y，Wen J P，Ao T F. Study on the effect of peeling processing on the quality of wheat flour and steamed bread[J]. Cereals & Oils，2025，38(11)：16-23.(in Chinese)

[13] 沈东强，王兴奔，赵雯静，等. 冷冻面团对面团特性及冷冻生坯馒头品质的影响[J]. 美食研究，2025，42(1)：38-43.
Shen D Q，Wang X B，Zhao W J，et al. Effect of frozen dough on dough properties and quality of frozen dough steamed bread[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture，2025，42(1)：38-43.(in Chinese)

[14] Liu S J，Sun H N，Ma M M，et al. Effects of dietary fibres，polyphenols and proteins on the estimated glycaemic index，physicochemical，textural and microstructural properties of steamed bread[J]. International Journal of Food Science & Technology，2024，59(6)：4041-4052.

[15] Zhu T W，Zhang X，Li B，et al. Effect of interesterified blend-based fast-frozen special fat on the physical properties and microstructure of frozen dough[J]. Food Chemistry，2019，272：76-83.

[16] Don C，Lichtendonk W，Plijter J J，et al. Glutenin macropolymer：a gel formed by glutenin particles[J]. Journal of Cereal Science，2003，37(1)：1-7.

[17] Hong T T，Xu D，Jin Y M，et al. Gluten protein transformations during bread processing：molecular and microstructural analysis[J]. LWT-Food Science and Technology，2025，217：117341.

[18] Peng J，Zhu K X，Guo X N，et al. NaCl mediated physicochemical and structural changes of textured wheat gluten[J]. LWT-Food Science and Technology，2021，140：110704.

[19] Gong Y，Sui W J，Wang H T，et al. In-depth understanding of the effects of different molecular weight pullulan interacting with protein and starch on dough structure and application properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，268：131556.

[20] 洪婷婷. 玉米醇溶蛋白对面团及面条品质的影响研究[D]. 无锡：江南大学，2024：15.

[21] 郭家宝，赵彦坤，高振贤，等. 小麦制粉系统各粉路面粉品质特性差异性分析[J]. 食品工业科技，2022，43(23)：267-275.
Guo J B，Zhao Y K，Gao Z X，et al. Analysis on the difference of quality characteristics of different flour flow of wheat milling system[J]. Science and Technology of Food Industry，2022，43(23)：267-275.(in Chinese)

[22] 刘磊，齐学文，周裔彬，等. 新麦26不同粉路小麦粉及其面包品质的分析[J]. 粮油食品科技，2014，22(2)：12-15.
Liu L，Qi X W，Zhou Y B，et al. Analysis on flour and bread quality of new wheat No.26 yielded from different milling sections[J]. Science and Technology of Cereals，Oils and Foods，2014，22(2)：12-15.(in Chinese)

[23] 杨梦晴，饶菁菁，陈龙娇，等. 盐地碱蓬对冷冻面团冻藏稳定性及面包品质的影响[J]. 食品与发酵工业，2026，52(8)：217-226.
Yang M Q，Rao J J，Chen L J，et al. Effects of *Suaeda salsa* on the frozen storage stability of frozen dough and bread quality [J]. Food and Fermentation Industries，2026，52(8)：217-226.(in Chinese)

[24] Zhao W，Weng J，Zhang X，et al. The impact of magnetic field-assisted freeze-thaw treatment on the quality of foxtail millet sourdough and steamed bread[J]. Food Chemistry，2024，450：139219.

[25] Arias A C，Bobadilla C A F，Domínguez C M Z. Cryoprotectants for frozen dough：a review [J]. Food Biophysics，2024，19(1)：18-28.

[26] Zhao B B，Fu S J，Li H，et al. Effect of storage conditions on the quality of frozen steamed bread[J]. International Journal of Food Science & Technology，2021，57：695-704.

[27] Xu K，Chi C D，She Z Y，et al. Understanding how starch constituent in frozen dough following freezing-thawing treatment affected quality of steamed bread[J]. Food Chemistry，2022，366：130614.

[28] Bruneel C，Pareyt B，Brijs K，et al. The impact of the protein network on the pasting and cooking properties of dry Pasta products[J]. Food Chemistry，2010，120(2)：371-378.

[29] 马豪. 龙柏叶抗冻蛋白对冻藏小麦淀粉理化特性的影响[D]. 郑州：河南工业大学，2022：60.

[30] Li J，Sun L，Li B L，et al. Evaluation on the water state of frozen dough and quality of steamed bread with proper amount of sanxan added during freeze-thawed cycles[J]. Journal of Cereal Science，2022，108：103564.

[31] 卢露. 冷冻生坯馒头品质劣变及改良研究[D]. 无锡：江南大学，2021：29.

[32] Jekle M，Becker T. Wheat dough microstructure：the relation between visual structure and mechanical behavior [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2015，55(3)：369-382.

[33] Hayta M，Schofield J D. Heat and additive induced biochemical transitions in gluten from good and poor breadmaking quality wheats [J]. Journal of Cereal Science，2004，40(3)：245-256.

[34] Qian X J，Gu Y J，Sun B H，et al. Improvement in quality of fast-frozen steamed bread by different gluten content and glutenin/gliadin ratio and its mechanism[J]. LWT-Food Science and Technology，2022，153：112562.

[35] Wieser H. Chemistry of gluten proteins [J]. Food Microbiology，2007，24(2)：115-119.

[36] Belitz H D，Grosch W，Schieberle P. Cereals and cereal products[M]. Berlin：Springer，2004：673-746.

[37] 黎钧铸，黄文晶，沈汪洋，等. 卡拉胶/α-淀粉酶复合冻融稳定性对馒头的影响[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(11)：82-89.
Li J Z，Hua W J，Shen W Y，et al. Effects of freeze-thaw stability of carrageenan/α-amylase complexon steamed bread [J]. Journal of Food Science and Technology，2022，41(11)：82-89.(in Chinese)

[38] 黄伟志. 冷冻面团馒头制作及其品质改良研究[D]. 佛山：佛山科学技术学院，2018：72.