杨克胜, 位凤鲁, 朱英瑞, 等. 水溶性酵母 β-葡聚糖对预发酵冷冻豆沙包生坯品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 383−390. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050303

YANG Kesheng, WEI Fenglu, ZHU Yingrui, et al. Effect of Water-soluble Yeast β-Glucan on Quality of Pre-fermented Frozen Red Bean Baozi Dough[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 383−390. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050303

· 贮运保鲜 ·

水溶性酵母 β-葡聚糖对预发酵冷冻豆沙包生坯品质的影响

杨克胜[1,2,3], 位凤鲁[1,3], 朱英瑞[3], 郑　毓[3], 于文峰[3], 张　彦[1], 胡新平[1,2,3,*]

（1.酵母功能湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443003;
2.农业微生物资源发掘与利用全国重点实验室, 湖北宜昌 443003;
3.安琪酵母股份有限公司, 湖北宜昌 443003）

摘　要: 为改善预发酵冷冻豆沙包生坯（Pre-Fermented Frozen Red Bean Baozi Dough，PF-FRBBD）在冻融循环中的品质，本研究以水溶性酵母 β-葡聚糖（water-soluble yeast β-D-glucan，WSYG）为添加物，探究不同 WSYG 添加量对 PF-FRBBD 在冻融循环中的产气能力、酵母活菌数、水分分布、微观结构及热特性的影响。结果表明：与未冻融样品相比，经历 6 次冻融循环后的 PF-FRBBD，120 min 内总产气量减少 36.6%，酵母活菌数下降 96.3%，失水率与水分活度显著上升（$P<0.05$），强结合水比例降低，且微观结构变得粗糙多孔。冻融 6 次后，相较于未添加 WSYG 的空白组，0.5% WSYG 组 PF-FRBBD 的产气总量与酵母活菌数分别提高 17.2% 和 66.7%，失水率与水分活度显著降低（$P<0.05$），且能维持完整的面筋网络；0.5% WSYG 组熟制包子的比容及感官评分分别为 1.67±0.02 mL/g、63.5±1.6 分，较对照组分别提升 9.9% 和 29.3%。综上，水溶性酵母 β-葡聚糖可有效改善预发酵冷冻豆沙包生坯在冻融循环中的品质，其最佳添加量为 0.5%。

关键词: 水溶性酵母 β-葡聚糖, 预发酵冷冻豆沙包生坯, 冻融循环, 微观结构

中图分类号: TS205.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0383−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050303

本文网刊:

Effect of Water-soluble Yeast β-Glucan on Quality of Pre-fermented Frozen Red Bean Baozi Dough

YANG Kesheng[1,2,3], WEI Fenglu[1,3], ZHU Yingrui[3], ZHENG Yu[3], YU Wenfeng[3], ZHANG Yan[1], HU Xinping[1,2,3,*]

（1.Hubei Provincial Key Laboratory of Yeast Function, Yichang 443003, China;
2.National Key Laboratory of Agricultural Microbial Resource Exploration and Utilization, Yichang 443003, China;
3.Angel Yeast Co., Ltd., Yichang 443003, China）

Abstract: In this study, to mitigate quality deterioration in pre-fermented frozen red bean Baozi dough (PF-FRBBD) during freeze-thaw cycles, water-soluble yeast β-D-glucan (WSYG) was employed as an additive to investigate the effects of varying WSYG concentrations on gas production capacity, viable yeast count, moisture distribution, microstructure, and thermal properties of PF-FRBBD subjected to freeze-thaw cycles. Results revealed that, compared with non-frozen-thawed samples, PF-FRBBD subjected to 6 freeze-thaw cycles exhibited a 36.6% reduction in total gas production within 120 min and a 96.3% decrease in viable yeast count. Concomitantly, the water loss rate and water activity increased significantly ($P<0.05$), while the proportion of strongly bound water decreased, resulting in a rough and porous microstructure. After 6

收稿日期: 2025−05−29

基金项目: 湖北省自然科学基金项目（2024AFD201）。

作者简介: 杨克胜（1995−）, 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 烘焙与健康食品配料研究开发, E-mail: yangks@angelyeast.com。

*** 通信作者:** 胡新平（1979−）, 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 烘焙与健康食品配料研究开发, E-mail: huxp@angelyeast.com。

freeze-thaw cycles, compared to the untreated samples, the PF-FRBBD supplemented with 0.5% WSYG showed a 17.2% increase in total gas production and a 66.7% increase in viable yeast count, with significant reductions in water loss rate and water activity (P<0.05), while maintaining an intact gluten network. In the 0.5% WSYG group, the specific volume and sensory score of steamed Baozi were determined as 1.67±0.02 mL/g and 63.5±1.6 points, respectively, reflecting a rise of 9.9% and 29.3% from untreated samples. The research findings affirm that water-soluble yeast β-D-glucan can effectively improve the quality of pre-fermented frozen red bean Baozi dough during freeze-thaw cycles, with the optimal addition level identified as 0.5%.

Key words: water-soluble yeast β-D-glucan; pre-fermented frozen red bean Baozi dough; freeze-thaw cycles; microstructure

酵母 β-葡聚糖是一种从酵母细胞壁中提取的天然多糖，其结构以 β-(1,3)-糖苷键为主链，包含 β-(1,6)-糖苷键形成的支链。该物质具有多种生物活性，包括抗菌抗炎、抗氧化、调节血糖和增强免疫等[1−2]。经国家卫健委认证，酵母 β-葡聚糖已被列入新资源食品名录，可作为营养强化剂在多个领域应用。在医药、化妆品及食品工业中，其应用范围持续扩大。研究证实，酵母 β-葡聚糖在食品加工中不仅可发挥增稠和乳化功能，还能有效改善食品的质构、感官及保质期[3−5]。但受其三股螺旋结构及分子量（300~6000 kDa）的限制，其水溶性较差，这在很大程度上制约了其在食品工业中的广泛应用[1−2]。针对这一问题，研究人员常采用物理、化学或生物技术对其进行结构修饰。经物理或化学处理，β-葡聚糖的三股螺旋结构可转变为单链构象，促使亲水基团充分暴露，进而增强其水合能力，显著提升溶解性能。生物方法则主要通过断裂糖苷键降低分子量，同时保持其基本骨架的完整性，从而得到可溶性 β-葡聚糖[1−3]。

冷冻生坯技术是指在面包和面点生产过程中，运用冷冻原理处理半成品或成品，其在包子规模化及产业化生产等方面具有显著优势[6]。预发酵冷冻豆沙包生坯技术将预发酵工艺与速冻技术有机结合，能实现终端产品仅需短暂解冻即可获得新鲜包子的目标，满足了现代食品工业对效率与品质的双重需求[6−8]。然而，在长期冻藏及成品运输过程中，预发酵生坯包子面临诸多核心问题，包括水分子重排导致的持水能力下降、酵母活性衰减引发的产气不足、冻融循环中冰晶生长造成的面筋网络损伤等，最终导致表皮开裂、内部塌陷等品质劣变[7−12]。为解决上述问题，研究聚焦于利用酶制剂、胶体、乳化剂及多糖等食品改良剂以提高冷冻面团的冻藏稳定性[13]。酶制剂、食品胶体及乳化剂主要通过强化面筋蛋白网络结构以抑制冰晶的机械损伤；而微生物多糖、大豆多糖、燕麦 β-葡聚糖等多糖类物质则通过水合作用束缚自由水、延缓淀粉老化，在不同程度上改善面团的流变特性与持水性能[13−15]。其中，酵母 β-葡聚糖作为酵母细胞壁的主要功能成分，凭借其独特的 β-1,3/1,6-糖苷键结构，在冷藏面团体系中已展现出优异的保湿性与冰晶调控能力[3,5,16]。源自真菌及细菌的葡聚糖可通过分子链上的羟基吸附水分子形成稳定水合层，减少冻融过程中自由水的迁移，同时通过在冰晶表面的吸附作用抑制重结晶现象，从而有助于维持面筋网络完整性[5,16−17]。相关研究表明，其在提升益生菌存活率、改善面团柔软度及优化成品感官特性方面具有显著潜力[18−20]。

尽管现有研究已初步揭示了多糖类改良剂对冷冻生坯包子的品质改良作用，但针对水溶性酵母 β-葡聚糖在预发酵冷冻豆沙包生坯中的应用研究仍显不足。本研究采用冻融循环处理方法，探究水溶性酵母 β-葡聚糖在预发酵冷冻豆沙包生坯中的应用效果，分析其对冷冻豆沙包生坯面团的水分状态、微观结构、发酵特性及最终包子成品品质的影响规律，旨在为开发天然冷冻面团改良剂提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

五得利六星粉（水分含量为 13.6%±0.15%，灰分含量为 0.41%±0.05%，粗蛋白含量为 11.75%±0.11%，湿面筋含量为 25.76%±0.25%） 五得利面粉集团有限公司；百钻泡打粉、半干酵母、细砂糖、水溶性酵母 β-葡聚糖 SG90（重均分子量分布：高分子量组分 Mw 为 8050 kDa（4.58%），中分子量组分 Mw 为 898 kDa（29.91%），低分子量组分 Mw 为 33.2 kDa（65.51%），β-葡聚糖含量为 91.28%±0.31%，蛋白质含量为 1.33%±0.08%，脂肪含量为 0.45%±0.05%，水分含量为 5.02%±0.22%，总灰分含量为 1.85%±0.18%） 湖北安琪酵母股份有限公司。

SP-12-4 集成型和面机 德国 DIOSNA 公司；HC-130 压面机 浙江和超机电；SDC-36-2D 醒发箱 上海 SKIPIO 电子有限公司；KS-960 快特励蒸柜 快特励食品机械（漳州）有限公司；JB1-10F 极速冷冻柜 昆山金博特制冷设备有限公司；MD-25W568 医用低温保存箱 美的集团股份有限公司；Risograph 酵母活性测定仪 南京铭奥仪器设备有限公司；BVM6600 食品体积仪 珀金埃尔默仪器有限公司；TECMASTER 稠度仪 德国布拉本德技术公司；ALVEOLAB 568 吹泡仪 法国肖邦技术公司；LGJ-40G 真空冷冻干燥机 北京四环福瑞科仪科技发展有限公司；NM120-O15V 低场核磁共振分析仪 苏州纽迈分析仪器股份有限公司；SU8600 扫描电镜 北京日立科学仪器有限公司；Q2000 差示扫描量热

仪　美国 TA 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　预发酵冷冻豆沙包生坯制作　将 1000 g 五得利六星粉、15 g 百钻泡打粉、15 g 半干酵母、50 g 细砂糖倒入和面机，180 r/min 搅拌 2 min 混合均匀，加入 520 mL 水（水温 10 ℃），180 r/min 搅拌 5 min 后 200 r/min 搅拌 3 min；和好的面团压面 15 次至面团光滑，按照面皮 40 g/个，包馅 25 g/个成型后于 36 ℃、85% RH 下发酵 30 min，然后放置于−40 ℃ 的速冻机中至包子中心温度−18 ℃ 以下，使用 BOPA/PE 复合膜包装，−18 ℃ 冻藏。

1.2.2　冻融循环　根据王秋玉[10] 的方法稍作修改。将于−18 ℃ 冰箱中保存 7 d 的预发酵冷冻豆沙包生坯（Pre-Fermented Frozen Red Bean Baozi Dough，PF-FRBBD）取出，置于 30 ℃ 恒温水浴中解冻至面团中心温度为 5 ℃，随后于−40 ℃ 速冻至中心温度−18 ℃ 以下，记为 F1，单次冻融周期由解冻-再冻结过程构成。F0 指未经历冻融循环的预发酵冷冻豆沙包生坯；KB 为未加入 WSYG 的空白组。

1.2.3　面团吹泡特性的测定　参照小麦粉面团流变特性测定方法[21]，使用 ALVEOLAB 568 吹泡仪测定水溶性酵母 β-葡聚糖（water-soluble yeast β-D-glucan，WSYG）加入面粉后面团的吹泡特性。主要检测指标包括：表示面团韧性的最大压力 P 值、表示面团延展性的破裂点横坐标 L 值、表示面团烘焙力的形变能量 W 值、表示面团弹性的弹性系数 Ie 值，以及面团搅拌稳定时间 Tol。

1.2.4　预发酵冷冻豆沙包生坯比容测定　将预发酵冷冻豆沙包生坯从−18 ℃ 冰箱取出，在 36 ℃、85% RH 下解冻 20 min，沸水蒸制 15 min。蒸熟的包子在室温下冷却 30 min 后，使用 BVM 6600 食品体积测定仪对包子比容进行测定，设置仪器检测时间 60 s、旋转速度 360°/s、起始角度 10°、结束角度 175°、结束位置 90°、采样率 500 samples/s、激光距离选择 Large 模式，调用仪器内置 Specific volume 函数自动计算包子比容。

1.2.5　预发酵冷冻豆沙包生坯感官评价　包子感官评价标准参照王秋玉[10] 的方法并稍作修改，从颜色、形态、质地、内部结构、口感、气味方面对包子进行评价，评分细则见表 1 所示，总评分取 10 位评价员的平均值。

1.2.6　预发酵冷冻豆沙包生坯产气量测定　从冰箱中取 PF-FRBBD，置于活力罐中，设定温度 30 ℃，使用酵母活性测定仪 Risograph，检测 2 h 内的产气量。

1.2.7　预发酵冷冻豆沙包生坯酵母菌活细胞数　取 10 g 面团，在超净工作台内加入 90 mL 无菌生理盐水（0.85%，w/v），使用涡旋仪涡旋 2 min，吸取 100 μL 悬浮液进行 10 倍等梯度稀释，吸取 100 μL 稀释液进行平板涂布。使用 YPD 培养基（氯霉素终浓度 0.1 g/L）对酵母菌进行分离培养，接种好的 YPD 固体培养基在 30 ℃ 条件下培养 48 h，然后统计菌落数。

表 1　包子感官评价评分标准

Table 1　Criteria for sensory evaluation of Baozi

项目	评价标准	评分（分）
颜色	乳白色有光泽	10~7
	非乳白色或光泽不足	6~4
	发暗或无光泽	3~0
形态	圆形饱满且花纹清晰	20~16
	较饱满、花纹较清晰	15~12
	欠饱满、花纹不清晰	11~8
	形态差	7~0
质地	按压弹性柔软	20~16
	弹性较好、柔软度尚可	15~12
	弹性一般、柔软度一般	11~8
	质地差	7~0
内部结构	气孔细小均匀	20~16
	气孔较细小均匀	15~12
	气孔大小不均	11~8
	气孔粗大不均或无气孔	7~0
口感	细腻滑润不黏牙	20~16
	较细腻滑润、稍黏牙	15~12
	欠细腻、黏牙度一般	11~8
	粗糙、严重黏牙	7~0
气味	有品种特有香味，无异味	10~7
	香味较淡或有轻微异味	6~4
	无香味或有明显异味	3~0

1.2.8　预发酵冷冻豆沙包生坯失水率及水分活度测定　按照下面公式测定冻融前后即蒸型冷冻生坯包子失水率。

$$失水率(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

式中：m_1 为冻融前包子重量，g；m_2 为冻融后包子重量，g。

1.2.9　预发酵冷冻豆沙包生坯水分分布测定　参照 Xin 等[22] 的研究方法，对 PF-FRBBD 的水分分布进行测定。先从 1.2.1 所述的 PF-FRBBD 中取 4 g 面团样品，将其包裹于聚四氟乙烯材料中，待样品温度回升至 25 ℃ 后，将其置于内径为 15 mm 的玻璃管内。然后利用低场核磁共振（LF-NMR）分析仪对水分分布进行测定。通过 CPMG 脉冲序列获取横向弛豫曲线，LF-NMR 分析仪的系统参数设定如下：回波时间（TE）=0.6 ms，采样点数（TD）=90024，间隔时间（TW）=1000 ms，回波数（NECH）=1500，切片数（NS）=2。

1.2.10　预发酵冷冻豆沙包生坯微观结构　使用 SEM 观察 PF-FRBBD 的微观结构。将 PF-FRBBD 冷冻干燥，切割，喷金 90 s，最后用扫描电镜在 2 kV 的加速电压下观察，图像以 1000 倍放大率进行扫描拍摄。

1.2.11　预发酵冷冻豆沙包生坯热特性分析　参考

Gaikwad 等[23] 的方法并稍作修改，样品解冻后，称取 10±1 mg 面团内部样品，放入密封的坩埚中，并立即密封在铝坩埚内，样品从 20 ℃ 加热到 120 ℃，升温速率为 5 ℃/min。空坩埚作为参照，载气为氮气。采用分析软件分析热力学参数。

1.3 数据处理

所有实验进行 3 次重复，使用 Origin 2022 软件进行绘图，使用 Minitab 软件进行数据处理与分析。所有数据的显著性均采用 Duncan 多重比较法（$P<0.05$）进行检验，结果以“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 水溶性酵母 β-葡聚糖对面团吹泡特性影响

吹泡特性可以反映面团的三维延展性与持气能力，由图 1 可知，随着 WSYG 添加量的增加，P 值显著降低（$P<0.05$），L 值显著增加（$P<0.05$），当 WSYG 添加量为 2% 时，面团 L 值达到 96.1±1.0 mm，较空白组提高 26.4%，这表明 WSYG 可有效改善面团的延展性。弹性系数 Ie 值随 WSYG 添加量逐渐增加，当 WSYG 添加量为 0.5% 时，Ie 值从空白的 51.5±0.21 增加至 52.1±0.25。WSYG 添加后可以显著增加 W 值，但不同添加量下面团的 W 值之间无显著性变化，这说明 WSYG 主要影响面团的流变特性而非整体筋力。值得注意的是，当添加量超过 0.5% 时，面团搅拌稳定时间 Tol 显著降低（$P<0.05$），这与酵母 β-葡聚糖的亲水特性加速面筋水合过程相关[24]。酵母 β-葡聚糖是一种具有线性多糖结构的微生物多糖，其与面筋网络中的麦谷蛋白可发生竞争性结合，削弱大分子蛋白的交联强度，从而降低韧性，同时通过氢键作用增强醇溶蛋白的延展特性，提升面团持气性，但过高添加量会对面团产生负面作用[24−25]。

2.2 预发酵冷冻豆沙包生坯熟制后食用品质

冷冻对包子感官评价及比容具有十分重要的影响，包子在未进行冷冻处理时，包子感官评价总得分为 97.6±1.8 分，比容为 2.35±0.04 mL/g，速冻后包子感官评价总得分及比容显著降低，分别为 82.4±1.9 分、2.01±0.02 mL/g。为模拟真实运输场景中的反复解冻现象，本研究针对预发酵冷冻豆沙包生坯开展冻融循环实验，测定了包子比容及感官评价得分的变化。由图 2a 可知，随着冻融次数的增加，包子感官评价总得分逐渐降低，当冻融次数达到 6 次时，包子感官评价总得分趋于稳定，此时，空白组包子感官评价总得分为 49.1±1.3 分，而 0.5% WSYG 组包子感官评价总得分最高，达到 63.5±1.6 分，较空白组提升 29.3%。在未冻融时，随着 WSYG 添加量的增加，包子感官评价总得分先增加后降低，0.5% WSYG 组总分最高，其在质地和内部结构等方面感官评分显著高于空白组（附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版）。

由图 2b 可知，随着冻融次数的增加，包子比容逐渐降低，当冻融循环处理 6 次时，空白组包子比容为 1.52±0.01 mL/g，较未冻融时比容下降 24.4%；适当添加 WSYG 可显著缓解这一劣变，其中冻融循环 6 次后，0.5% WSYG 组包子比容最高，达到 1.67±0.02 mL/g，较空白组包子比容提升 9.9%，但当 WSYG 添加量为 2% 时将导致豆沙包比容降低。这说明，冻融循环显著破坏包子品质，但适量添加 WSYG 可以降低冻融带来的负面效果。WSYG 通过亲水性延缓水分迁移，抑制冻融过程中冰晶对面筋

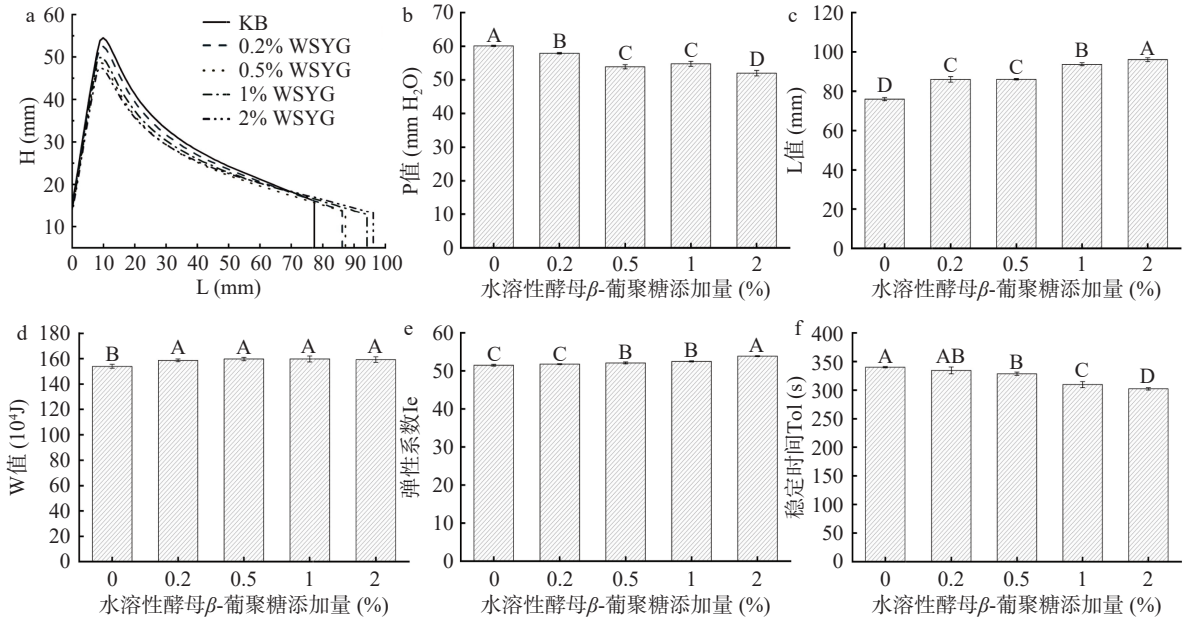


图 1 WSYG 对面团吹泡特性影响

Fig.1 Effects of WSYG on dough blowing characteristics

注：a 图表示吹泡曲线图，b、c、d、e、f 图分别表示不同处理组对面团 P、L、W、Ie 及 Tol 的影响，不同大写字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。

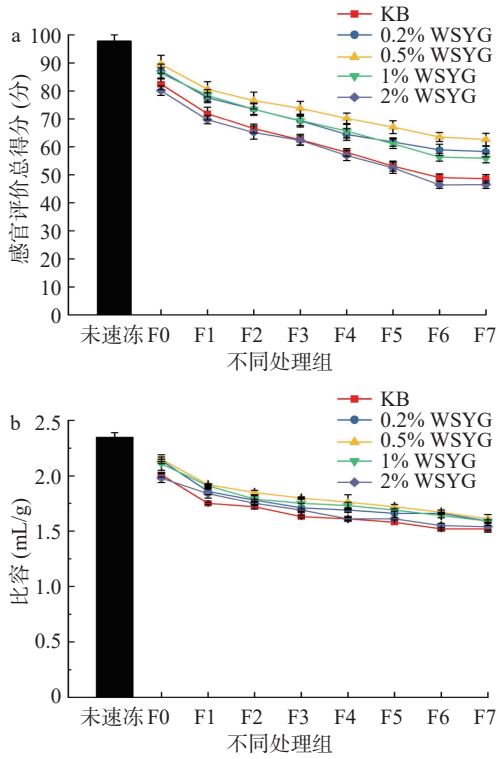


图 2　预发酵冷冻豆沙包感官评价总得分及比容

Fig.2　Sensory profile evaluation and specific volume of PF-FRBB

注：a 为豆沙包感官评价总得分的变化；b 为豆沙包比容的变化。

网络的机械损伤，从而提升面团持气性，但过量添加时，WSYG 与面筋蛋白和淀粉竞争性结合水分，导致面筋网络结构松散、持气能力下降[2]。有研究指出，可溶性酵母 β-葡聚糖可提升面包网络结构稳定性，使其表面更为光滑，具有更低的抗变形性，进而提升其产品品质[19]。

综上，以冻融循环 6 次作为丧失食用价值的临界冻融次数，后续重点研究冻融循环 6 次下不同 WSYG 添加量对预发酵冷冻豆沙包生坯的品质影响。

2.3　预发酵冷冻豆沙包生坯面团品质

2.3.1　预发酵冷冻豆沙包生坯产气特性　预发酵冷冻豆沙包生坯(PF-FRBBD)采用醒发后速冻工艺，蒸制前需进行解冻[7]。在解冻过程中，酵母菌被激活并恢复产气功能，产气能力直接影响成品质量。因此，冻融过程中的产气性能监测具有重要研究价值。由表 2 可知，在未冻融状态下，随着 WSYG 添加量的增加，PF-FRBBD 的产气量先增加后降低，与空白组相比，相同发酵时间下 PF-FRBBD 的产气量显著上升(P<0.05)，当添加 1% WSYG 时，120 min 内 PF-FRBBD 的产气量为 169.38±2.00 mL，而空白仅为 156.16±1.40 mL。这表明，适量添加 WSYG 可有效提升 PF-FRBBD 的产气性能。这是由于酵母 β-葡聚糖的亲水性多糖链通过氢键结合游离水，从而减少冰晶形成对酵母细胞膜的机械损伤，提高了冻融循环中的酵母存活率，进而提高 PF-FRBBD 解冻时的产气量[16]。经过 6 次冻融循环后，120 min 内空白组总产气量较初始值下降 36.6%，仅为 98.94±1.93 mL，而添加 0.5%~2% 的 WSYG 的试验组，120 min 内产气量较空白组提高 17.2%~20.0%(P<0.05)，这表明添加 WSYG 可提高预发酵冷冻豆沙包生坯的冻融稳定性。

表 2　WSYG 对 PF-FRBBD 产气量的影响

Table 2　Effect of WSYG on gas production of PF-FRBBD

组别	产气量(mL)			
	30 min	60 min	90 min	120 min
F0_KB	33.05±0.54^{B}	72.24±1.28^{B}	114.27±2.97^{C}	156.16±1.40^{C}
F0_0.2% WSYG	33.05±0.83^{B}	75.40±0.38^{A}	120.06±0.82^{B}	166.16±2.29^{B}
F0_0.5% WSYG	34.43±0.20^{A}	76.69±1.28^{A}	120.98±0.95^{AB}	167.58±2.77^{AB}
F0_1.0% WSYG	34.31±0.62^{A}	76.22±0.38^{A}	123.59±1.51^{A}	169.38±2.00^{AB}
F0_2.0% WSYG	34.20±1.03^{AB}	75.62±0.58^{A}	122.94±1.98^{AB}	165.30±1.80^{B}
F6_KB	11.86±0.41^{C}	40.63±1.25^{C}	72.23±1.40^{C}	98.94±1.93^{C}
F6_0.2% WSYG	12.07±0.79^{C}	40.09±0.56^{B}	76.35±0.97^{B}	107.49±1.74^{B}
F6_0.5% WSYG	13.30±0.30^{B}	43.81±0.90^{A}	84.06±1.17^{A}	116.00±3.73^{A}
F6_1.0% WSYG	13.69±0.72^{AB}	44.77±0.53^{A}	85.96±1.31^{A}	118.76±2.46^{A}
F6_2.0% WSYG	14.60±0.48^{A}	44.57±0.78^{A}	85.69±1.50^{A}	117.04±1.42^{A}

注：结果用平均值±标准偏差表示，同列不同大写字母表示相同冻融次数下，不同WSYG添加量组间差异显著(P<0.05)；表3同。

2.3.2　预发酵冷冻豆沙包生坯中酵母菌活菌数　图 3 展示了不同 WSYG 添加量对 PF-FRBBD 中酵母菌活菌数影响，由图可知，冻融处理可显著降低面团中酵母活菌数，而适量添加 WSYG 可显著增加冻融后面团中的酵母活菌数。在未冻融时，随着 WSYG 添加量的增加，酵母活菌数逐渐增高，0.5%~1% WSYG 组显著高于其他组(P<0.05)，这是由于在短期冷冻中 WSYG 可抑制冰晶形成，同时增强淀粉-面筋蛋白网络稳定性，减少冰晶对酵母细胞膜的损伤[17]。在冻融 6 次后，空白组酵母活菌数从 2.41×10^{7} cfu/g 显著降低至 0.89×10^{6} cfu/g，降幅达 96.3%，而添加 0.5% WSYG 的 PF-FRBBD 中酵母活菌数较空白组显著升高 66.7%，达到 1.48×10^{6} cfu/g，但是当 WSYG 添加量增加至 2% 时，PF-FRBBD 中酵母活菌数低于

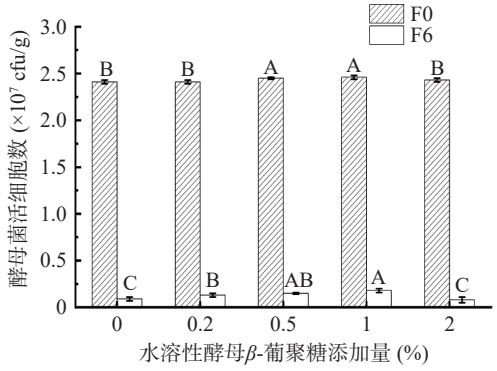


图 3　WSYG 对 PF-FRBBD 中酵母菌活菌数的影响

Fig.3　Effect of WSYG on Viable yeast cell count in PF-FRBBD

注：在相同冻融次数下，不同大写字母表示不同 WSYG 添加量组之间差异显著(P<0.05)。

表 3 WSYG 对 PF-FRBBD 失水率、水分活度及水分分布的影响

Table 3 Effects of WSYG on water loss rate, water activity, and moisture distribution in PF-FRBBD

组别	失水率(%)	水分活度	A_{21}(%)	A_{22}(%)	A_{23}(%)
F0_KB	3.93±0.44^{AB}	0.91±0.02^{A}	22.10±0.40^{C}	76.27±1.15^{A}	1.07±0.02^{A}
F0_0.2% WSYG	4.10±0.39^{A}	0.88±0.01^{B}	22.29±0.26^{BC}	76.12±1.63^{A}	0.75±0.00^{C}
F0_0.5% WSYG	3.55±0.21^{B}	0.85±0.01^{C}	22.75±0.17^{AB}	75.15±1.80^{A}	0.84±0.01^{B}
F0_1.0% WSYG	3.55±0.16^{B}	0.83±0.01^{C}	23.22±0.44^{A}	75.45±0.92^{A}	0.76±0.01^{C}
F0_2.0% WSYG	3.54±0.26^{B}	0.80±0.01^{D}	23.01±0.45^{A}	75.72±0.50^{A}	0.71±0.01^{D}
F6_KB	13.18±0.27^{A}	0.94±0.03^{A}	20.08±0.36^{B}	78.59±1.38^{A}	1.33±0.04^{A}
F6_0.2% WSYG	10.77±0.62^{B}	0.91±0.01^{B}	20.23±0.28^{B}	77.65±1.66^{A}	1.22±0.01^{B}
F6_0.5% WSYG	9.80±0.44^{C}	0.89±0.00^{B}	21.04±0.19^{A}	76.88±1.91^{AB}	1.13±0.01^{C}
F6_1.0% WSYG	8.35±0.19^{D}	0.85±0.01^{C}	21.04±0.41^{A}	75.09±0.94^{B}	1.15±0.04^{C}
F6_2.0% WSYG	8.44±0.36^{D}	0.81±0.01^{D}	20.50±0.41^{AB}	76.70±0.52^{AB}	1.25±0.01^{B}

空白组，仅为 0.81×10^{6} cfu/g，这是由于长期冷冻导致 WSYG 与淀粉分子竞争性结合水分，加剧面团结构破坏，导致酵母菌破裂。

2.3.3 预发酵冷冻豆沙包生坯水分迁移及失水率 表 3 显示了 WSYG 对 PF-FRBBD 中水分特性的影响，由表 3 可知，经冻融处理后，PF-FRBBD 的失水率显著升高，经 6 次冻融处理后，空白组失水率由 3.93%±0.44% 增加至 13.18%±0.27%，添加 WSYG 后可以减缓冻融引起失水率上升效应。经冻融处理后，空白组的水分活度升高至 0.94±0.03，此现象与冷冻过程中冰晶形成引发的相分离及水分子再分布密切相关；与之相比，添加 WSYG 的各组样品，其水分活度增幅受到明显抑制。此外，相较于空白组，在相同冻融处理下，随着 WSYG 添加量的增加，PF-FRBBD 失水率及水分活度逐渐降低。这是由于 WSYG 可通过其亲水基团与水分子形成氢键，束缚面团中自由水使其不易流失，进而降低面团中水分活度[17]。

A_{21}、A_{22} 和 A_{23} 分别代表强结合水、弱结合水和自由水的比例。由表 3 可知，在相同冻融次数下，添加 WSYG 后，A_{21} 先增加后降低，表明 PF-FRBBD 中强结合水含量先升高后降低；与此同时，A_{23} 减少，说明 PF-FRBBD 中自由水含量下降，这说明添加适量的 WSYG 能够有效维持冷冻面团中的水分状态，减少自由水的流失[26]。与未冻融样品相比，冻融 6 次的 PF-FRBBD 内的强结合水比例减少、自由水比例增加，这是因为冰晶破坏了面筋网络的完整性，导致面筋蛋白断裂释放出游离水，增加了水分流动性[27]。WSYG 通过影响面团醒发程度及其对游离水的结合来影响面团的水分分布以及面团组分的持水能力，这与刘思凡[28] 的研究结果一致。

2.3.4 预发酵冷冻豆沙包生坯微观结构 在普通小麦面团中，麦谷蛋白与醇溶蛋白通过共价键形成连续网络结构，并将淀粉颗粒紧密镶嵌其中，冷冻及冻融循环会破坏该结构。图 4 显示了 WSYG 对 PF-FRBBD 微观结构的影响，由图可知，空白组在经历 6 次冻融循环后，面团中面筋网络结构形成孔洞，淀粉颗粒出现外露及破损现象，这与陈赫帆[26] 的报道一致。相较于空白组，添加 WSYG 的 PF-FRBBD 横截面显示出更高的平滑度，这是由于 WSYG 可与面筋蛋白的氢键结合，形成了连续膜状结构覆盖淀粉及蛋白表面，该膜层可有效减缓冰晶对面筋基质的直接破坏[2,29]。冻融 6 次后，空白组面筋变得松散，而 0.5% WSYG 组仍维持致密的网络结构，但是当 WSYG 添加量增加至 1% 时，面团中出现丝状结构且空洞增多。不溶性酵母 β-葡聚糖会破坏面条面团中的蛋白-淀粉网络结构，但是添加适量改性的可溶性 β-葡聚糖可显著改善冻融循环后面团内部结构[19]。

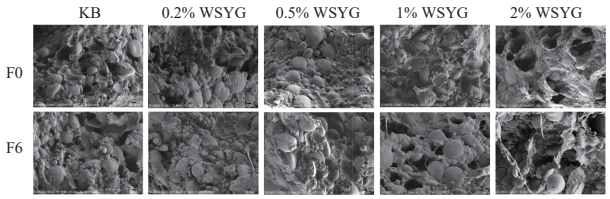


图 4 WSYG 对 PF-FRBBD 微观结构的影响(1000×)

Fig.4 Effect of WSYG on PF-FRBBD microstructure (1000×)

2.3.5 预发酵冷冻豆沙包生坯热特性分析 采用 DSC 分析冻融循环后面团中淀粉的老化程度。由图 5 可知，空白组在冻融循环后初始糊化温度由 57.26 ℃ 升至 58.56 ℃，糊化焓值由 7.73 J/g 增至 9.81 J/g，冻融处理改变了淀粉结晶区的双螺旋结构，增加了淀粉分子结构的有序性，导致淀粉颗粒较难糊化，糊化温度后移[29]。有序化的淀粉结构需要更多的能量解开和熔融淀粉双螺旋结构，表现为淀粉糊化焓的升高，这与陶晗[30] 的研究结果一致。然而，随着 WSYG 添加量增加，初始糊化温度和糊化焓值均逐渐下降，在 WSYG 添加量为 2% 时，F6 组的初始糊化温度较空白组降低 2.02 ℃，糊化焓值降幅达 44.6%，显著抑制了冻融引起的初始糊化温度及糊化焓值上升幅度。有研究报道，添加 β-葡聚糖降低了面团中面筋的变性峰值温度和焓变[31]。WSYG 分子富含羟基，可通过氢键作用与淀粉链结合，形成空间位阻效应，抑制淀粉分子在冻融过程中的有序重排，通过改变淀粉结晶区的结构特征以阻止淀粉老化[32]。

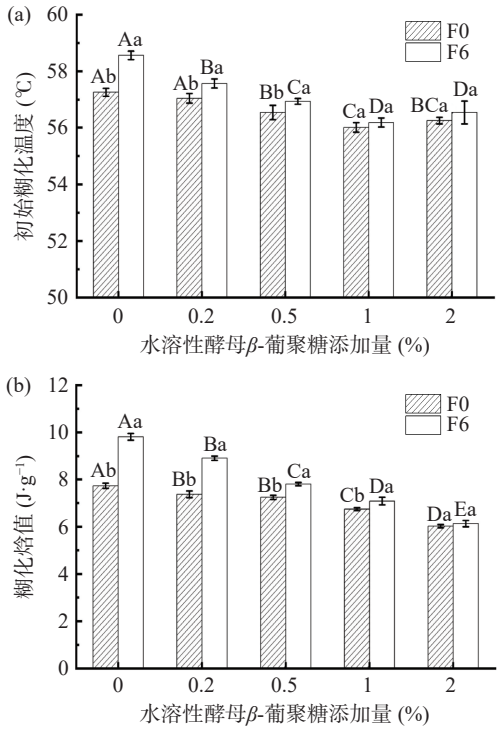


图 5　WSYG 对 PF-FRBBD 热特性的影响

Fig.5　Effect of WSYG on thermal properties in PF-FRBBD

注：(a)为初始糊化温度的变化；(b)为糊化焓值的变化；在相同冻融次数下，不同大写字母表示不同 WSYG 添加量组之间差异显著(P<0.05)；在相同 WSYG 添加量下，不同小写字母表示不同冻融次数之间差异显著(P<0.05)。

3　讨论与结论

冻融循环显著破坏预发酵冷冻豆沙包生坯(PF-FRBBD)的品质，具体表征为酵母活菌数下降 96.3%、产气总量降低 36.6%、糊化焓值增加 26.9%，面筋网络呈现孔洞化特征，且熟制后产品的感官评分及比容均显著降低。这与 [7−9,30] 揭示的冻融循环及冷冻处理破坏小麦淀粉完整性、损伤面筋网络结构的规律一致，与王秋玉[10] 证实的冻融循环导致预发酵冷冻豆沙包生坯面筋损伤及品质劣变的结论相呼应。

水溶性酵母 β-葡聚糖(WSYG)可有效缓解上述负面效应，其中 0.5% WSYG 组效果最优：未冻融面团弹性系数提升至 52.1±0.25；冻融 6 次后，相较于未添加 WSYG 的空白组，0.5% WSYG 组 PF-FRBBD 的产气总量与酵母活菌数分别提高 17.2% 和 66.7%，失水率与水分活度显著降低(P<0.05)，且能减少强结合水流失；同时，WSYG 可通过维系面筋网络完整性减轻冻融对面团组织的损伤，进而改善熟制品品质—0.5% WSYG 组熟制包子的比容及感官评分分别为 1.67±0.02 mL/g、63.5±1.6 分，较对照组分别提升 9.9% 和 29.3%，明确证实其作为天然抗冻保护剂在冷冻面团体系中的有效性。此结果与 Hamed 等[15] 发现的 β-葡聚糖减少冷冻面团可冻结水、维持面筋网络的规律一致，亦与 Suwannarong 等[3] 证实的酿酒酵母 β-葡聚糖通过高持水性延缓面包品质劣变的结果相符。

综上所述，本研究证实 WSYG 在冻融循环后对预发酵冷冻豆沙包生坯品质的提升效应，具体体现为提高面团弹性、维持酵母活力与产气性能、减少水分流失，且能有效保护面筋网络结构完整性；同时确定 0.5% 为其最适添加量，补充了 WSYG 在含馅预发酵冷冻生坯包点中的应用证据，可为 WSYG 在冷冻面团体系中的开发与应用提供理论依据。后续研究可进一步聚焦 WSYG 的分子特性与抗冻功能的构效关系，探究其与乳化剂、酶制剂等其他食品配料的协同抗冻作用，以拓展其在冷冻面食工业中的应用范围。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 邹延, 苑鹏, 周芳, 等. 酵母 β-葡聚糖改性增溶技术及其应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(10): 376−385. [ZOU Yan, YUAN Peng, ZHOU Fang, et al. Research progress on modification and solubilization techniques of yeast β-glucan and its application[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(10): 376−385.]

[2] 张漫莉. 酵母 β-葡聚糖溶解性与乳化性改善及应用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. [ZHANG Manli. Study on improvement of solubility and emulsifying properties of yeast β-glucan and its application[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.]

[3] SUWANNARONG S, WONGSAGONSUP R, SUPHANTHARIKA M. Effect of spent brewer's yeast β-D-glucan on properties of wheat flour dough and bread during chilled storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156: 381−393.

[4] 刘博, 周永凤, 黄鑫, 等. 水不溶酵母多糖对小麦粉粉质、面团流变特性及其面包品质的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(7): 107−114. [LIU Bo, ZHOU Yongfeng, HUANG Xin, et al. Effects of water-insoluble yeast polysaccharides on flour quality, dough rheological properties and bread quality[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(7): 107−114.]

[5] DONG Wenjing, LI Yichen, XUE Shurong, et al. Yeast polysaccharides: The environmentally friendly polysaccharides with broad application potentials[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(5): e70003.

[6] 俞学锋, 杨子忠, 冷建新, 等. 冷冻面团加工技术与中国传统食品现代化[J]. 粮食加工, 2007, 32(1): 18−20. [YU Xuefeng, YANG Zizhong, LENG Jianxin, et al. Frozen dough processing technology and modernization of chinese traditional food[J]. Grain Processing, 2007, 32(1): 18−20.]

[7] LU Lu, ZHU Kexue. Physicochemical and fermentation properties of pre-fermented frozen dough: Comparative study of frozen storage and freeze–thaw cycles[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108253.

[8] WANG Qiuyu, ZHANG Haifeng, ZHU Wenzheng, et al. Physicochemical properties and nutritional quality of pre-fermented red bean steamed buns as affected by freeze-thaw cycling[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 748−763.

[9] TAO Han, ZHANG Bao, WU Fengfeng, et al. Effect of multi-

ple freezing/thawing-modified wheat starch on dough properties and bread quality using a reconstitution system[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 132−137.
[10] 王秋玉. 冻融循环对预发酵冷冻生坯豆沙包品质劣变规律研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. [WANG Qiuyu. Study on quality deterioration of pre-fermented frozen dough for bean paste buns during freeze-thaw cycles[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]
[11] AYATI S V, HAMDAMI N, LE-BAIL A. Frozen Sangak dough and bread properties: Impact of pre-fermentation and freezing rate[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(4): 782−791.
[12] JIANG Zhaojing, GUO Xiaona, ZHU Kexue. Revealing the influence mechanism of pre-fermentation degree and storage temperature fluctuations on frozen steamed bread dough quality[J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141915.
[13] 刘思宇, 舒琴, 芦红云等. 不同改良剂对冷冻面团及其蒸制包子品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 173−182. [LIU Siyu, SHU Qin, LU Hongyun, et al. Effects of different improvers on quality of frozen dough and steamed buns[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 173−182.]
[14] 张金鹏, 王立, 李言. 冷冻生坯面制品品质劣变及改良剂的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(4): 202−209. [ZHANG Jinpeng, WANG Li, LI Yan. Research progress on quality deterioration and improvers of frozen dough products[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(4): 202−209.]
[15] HAMED A, RAGAEE S, ABDEL-AAL E M. Effect of β-glucan–rich barley flour fraction on rheology and quality of frozen yeasted dough[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(12).
[16] ZHANG Honghong, FAN Haoran, XU Xueming, et al. Deterioration mechanisms and quality improvement methods in frozen dough: An updated review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 143: 104251.
[17] TANG Xiaojuan, ZHANG Binle, HUANG Weining, et al. Hydration, water distribution and microstructure of gluten during freeze thaw process: Role of a high molecular weight dextran produced by *Weissella confusa* QS813[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 377−384.
[18] Da SILVA GUEDES J, PIMENTEL T C, DINIZ-SILVA H T, et al. Protective effects of *β*-glucan extracted from spent brewer yeast during freeze-drying, storage and exposure to simulated gastrointestinal conditions of probiotic lactobacilli[J]. Lwt, 2019, 116: 108496.
[19] PEREZ-QUIRCE S, CABALLERO P A, VELA A J, et al. Impact of yeast and fungi (1 → 3)(1 → 6)-*β*-glucan concentrates on viscoelastic behavior and bread making performance of gluten-free rice-based doughs[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 382−390.
[20] UNGUREANU-IUGA M, AVRĂMIA I. Pasta fortified with *β*-glucan Isolated from brewer's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) by-product[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 115: 103818.
[21] 国家粮食局. 小麦粉面团流变特性测定 吹泡仪法: GB/T 14614.4-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005. [State Administration of Grain. Determination of rheological properties of wheat flour dough-alveograph method: GB/T 14614.4-2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.]
[22] XIN Chen, NIE Linjie, CHEN Hongliang, et al. Effect of degree of substitution of carboxymethyl cellulose sodium on the state of water, rheological and baking performance of frozen bread dough[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 8−14.
[23] GAIKWAD S, ARYA S S. Influence of frozen storage on quality of multigrain dough, par baked and ready to eat thalipeeth with additives[J]. Lwt, 2018, 96: 350−356.
[24] MARUKHNENKO S, GERASIMOV A, IVANOVA V, et al. *Saccharomyces cerevisiae* yeasts *β*-glucan influence on wheat dough rheological properties[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 203: 04010.
[25] PAN Lihua, LUO Shuizhong, LIU Fei, et al. Comparison of rheological properties of dough and antistaling characteristics of Chinese steamed bread containing *β*-glucan from yeast or oat[J]. Cereal Chemistry, 2018, 95(1): 149−157.
[26] 陈赫帆. 预醒发冷冻生坯馒头熟制工艺优化及冻藏机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024. [CHEN Hefan. Optimization of cooking process and freezing mechanism of pre-proofed frozen dough for steamed buns[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.]
[27] 申震. 预醒发冷冻生坯酒酿包子的品质调控研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [SHEN Zhen. study on quality control of pre-proofed frozen dough for fermented rice wine buns[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]
[28] 刘思凡. 冷冻生坯馒头醒发耐性及品质改良研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [LIU Sifan. Study on proofing tolerance and quality improvement of frozen dough for steamed buns[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]
[29] RASHEED M, FAN Xiangqi, GUO Boli, et al. Unveiling the dynamic interactions of gluten–starch–water in frozen dough: An in-depth review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(2): e370120.
[30] 陶晗. 小麦淀粉在冻藏过程中品质劣变机理及其对面团品质影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [TAO Han. Study on quality deterioration mechanism of wheat starch during frozen storage and its effect on dough quality[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
[31] LI Zhen, GAO Wenqian, LIANG Jingjing, et al. Mechanism underlying the weakening effect of *β*-glucan on the gluten system [J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136002.
[32] KITTISUBAN P, RITTHIRUANGDEJ P, SUPHANTHARIKA M. Optimization of hydroxypropylmethylcellulose, yeast *β*-glucan, and whey protein levels based on physical properties of gluten-free rice bread using response surface methodology[J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 57(2): 738−748.