管涵洋, 郭政利, 曾婧, 等. 冷冻干燥戊糖片球菌酸面团的制备及其对高粱馒头品质的改善作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 223−232. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030232

GUAN Hanyang, GUO Zhengli, ZENG Jing, et al. Preparation of Freeze-dried *Pediococcus pentosaceus* Sourdough and Its Effect on the Quality Improvement of Sorghum Steamed Bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 223−232. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030232

· 工艺技术 ·

冷冻干燥戊糖片球菌酸面团的制备及其对高粱馒头品质的改善作用

管涵洋[1], 郭政利[2,+], 曾　婧[3], 刘永新[1], 代　蕾[1], 孙庆杰[1], 李　杨[1,*]

（1.青岛农业大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266109;
2.莱西市市场监督管理局, 山东青岛 266699;
3.国家粮食和物资储备局湖北局物资检验所, 湖北武汉 430050）

摘　要: 为探究戊糖片球菌冻干酸面团的制备工艺及其对杂粮馒头品质的影响，本研究以脱脂乳粉为冻干保护剂，制备了戊糖片球菌冻干酸面团，探究了不同脱脂乳粉添加量的冻干保护效果，并进一步探究了冻干酸面团改善高粱馒头质构品质的效果。结果表明，脱脂乳粉含量 10% 的冻干酸面团中戊糖片球菌的存活率为 28.5%，显著低于脱脂乳粉含量 15% 和 20% 的冻干酸面团，但其却表现出最好的面团发酵力、馒头比容（2.58 mL/g）和感官评分。深入分析其大分子结构发现，脱脂乳粉含量 10% 的冻干酸面团发酵的面团中面筋蛋白二级结构中 *β*-折叠显著降低，*α*-螺旋显著增加，淀粉的糊化温度显著升高、热焓值显著降低。将脱脂乳粉含量 10% 的戊糖片球菌冻干酸面团应用于高粱馒头制备，其显著改善了面团的质构特性，并提高了高粱馒头总体感官得分。本研究为戊糖片球菌冻干酸面团的商业化生产及其在杂粮馒头中的应用提供了借鉴。

关键词: 冻干酸面团, 戊糖片球菌, 比容, 感官评价, 杂粮馒头

中图分类号: TS201.1　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0223−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030232

本文网刊:

Preparation of Freeze-dried *Pediococcus pentosaceus* Sourdough and Its Effect on the Quality Improvement of Sorghum Steamed Bread

GUAN Hanyang[1], GUO Zhengli[2,+], ZENG Jing[3], LIU Yongxin[1], DAI Lei[1], SUN Qingjie[1], LI Yang[1,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;
2.Laixi Administration for Market Regulation, Qingdao 266699, China;
3.Materials Inspection Institute of Hubei Bureau of National Food and Strategic Reserves Administration, Wuhan 430050, China）

Abstract: To investigate the preparation of freeze-dried *Pediococcus pentosaceus* sourdough and its effects on the quality of multigrain steamed bread, this study utilized skim milk powder as a cryoprotectant to prepare freeze-dried *P. pentosaceus* sourdough. The cryoprotective effects of different skim milk powder concentrations were evaluated, and the ability of the freeze-dried sourdough to improve the textural quality of sorghum steamed bread was further explored. Results indicated that the survival rate of *P. pentosaceus* in freeze-dried sourdough with 10% skim milk powder was 28.5%, significantly lower than those with 15% and 20% skim milk powder. However, this group exhibited the highest dough fermentation capacity, a specific volume of steamed bread (2.58 mL/g), and sensory scores. An in-depth analysis of macromolecular structures revealed that sourdough fermented with 10% skim milk powder showed a significant decrease in *β*-sheet content

收稿日期: 2025−03−17　　+并列第一作者

基金项目: 国家自然科学基金（32201985）; 山东省自然科学基金（ZR2020QC240）; 青岛农业大学人才引进项目（663-1120083）。

作者简介: 管涵洋（2001−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 粮油深精加工, E-mail: 18306537315@163.com。

郭政利（1988−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: guozhengli668@163.com。

*** 通信作者:** 李杨（1989−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 发酵面制品与发酵果蔬制品品质提升, E-mail: liyangstrel@163.com。

and an increase in α-helix content in gluten protein secondary structures, alongside a notable rise in starch gelatinization temperature and a reduction in enthalpy. Applying the 10% skim milk powder freeze-dried *P. pentosaceus* sourdough in sorghum steamed bread preparation significantly improved the dough's textural properties. It enhanced the overall sensory score of the steamed bread. This study provides insights into the commercial production of freeze-dried *P. pentosaceus* sourdough and its application in multigrain steamed bread.

Key words: freeze-dried sourdough; *Pediococcus pentosaceus*; specific volume; sensory evaluation; multigrain steamed bread

馒头是我国特色的传统主食，也是典型的蒸制发酵面制品，在我国饮食文化中占有重要的地位[1]。酸面团（又称老面、酵子等）是我国传统的面制品发酵剂[2]，其中含有多种乳酸菌和酵母[3−4]，但因发酵时间长、品质不稳定等缺点逐渐被活性干酵母所取代。然而，由于老面馒头是乳酸菌和酵母复合发酵，其在提高馒头风味品质[5] 和延长保质期[6] 等方面优于纯酵母馒头，更受国人青睐。因此，酸面团的标准化和规模化生产成为提高馒头品质、保持其特色风味的重要途径。

酸面团是一个包含多种微生物的微生态系统，酵母菌和乳酸菌是其中的优势菌群，不同地区酸面团的微生物种类和数量存在差异[3]。由于其中微生物的复杂性及不稳定性，传统酸面团难以直接作为商品化发酵剂应用于发酵面食生产。因此，以单一菌株或特定菌株混合发酵制备的酸面团是目前商品化酸面团的主要形式[7−9]。酸面团有三种主要产品状态：液态、半固态和固态，其中固态形式的酸面团更方便贮藏和使用[10]，生产过程需要进行干燥操作。真空冷冻干燥技术是保持微生物活性的有效干燥方式。因此，采用该技术进行酸面团干燥有利于其中微生物活性的保持，降低发酵性能损失。戊糖片球菌是传统酸面团中天然存在的“本土”菌种，对发酵面制品的品质和安全发挥重要的作用[6,11−12]，是制备酸面团的优良菌种，但有关其在酸面团制备方面的研究仍相对缺乏。目前，以单菌种制备酸面团的乳酸菌多以植物乳杆菌为主[10,13−14]，戊糖片球菌酸面团报道较少，且未见其冻干酸面团的制备研究。此外，脱脂乳粉是常见的微生物冻干保护剂[15]，但其在制备冻干酸面团中的保护效果尚未见报道。

随着人们对营养健康需求的提高，杂粮因富含微量元素、维生素以及膳食纤维等营养物质日益受到关注，杂粮馒头等形式的杂粮主食受到消费者青睐，然而，馒头中添加杂粮往往会严重影响馒头的质地品质，而采用酸面团发酵则是有效的改善手段[16]。高粱中含有丰富的微量元素、维生素、多酚及膳食纤维，具有抗氧化和调节肠道菌群等功效[17−19]，目前虽已有在馒头中添加高粱粉制作高粱馒头的研究[20−21]，但高粱馒头尚存在明显的品质缺陷：表皮易出现凹陷、表面粗糙不光滑、比容偏小，这些问题严重影响其接受度和食用品质。

本文以脱脂乳粉作为冻干保护剂制备戊糖片球菌冻干酸面团，研究脱脂乳粉的添加量对冻干酸面团活菌数、发酵力和馒头品质的影响，并分析了发酵面团中蛋白质和淀粉的结构变化，进而将制备的冻干酸面团应用于高粱馒头制作，并探究其改善杂粮馒头比容的机理，以期为酸面团的商业化应用和杂粮主食化提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

五得利八星雪花面粉　五得利集团新乡面粉有限公司；馒头　青岛市大润发超市；高活性干酵母　安琪酵母股份有限公司；MRS 肉汤　青岛高科技工业园海博生物技术有限公司；0.1% 蛋白胨水　青岛高科技工业园海博生物技术有限公司；琼脂粉　北京索莱宝科技有限公司；氯化钠　国药集团化学试剂有限公司；脱脂乳粉　三元乳业有限公司；戊糖片球菌 LWQ1　实验室前期筛选自酸面团的乳酸菌。

SW-CJ-1FD 超净紫外操作台　苏州净化设备有限公司；LRH-70F 生化培养箱　上海—恒科学仪器有限公司；Pilot 3-6E 真空冷冻干燥机　北京博医康实验仪器有限公司；GR 60DF 灭菌锅　厦门致微仪器有限公司；TA.XTC-18 质构仪　上海保圣实业发展有限公司；Nicolet iS 10 傅立叶变换红外光谱仪　Thermo 公司；NMI20-040V-I 低场核磁分析仪　苏州纽迈分析仪器股份有限公司；CF-6000S 发酵箱　中山卡士电器有限公司；DW-86L416G 超低温冰箱　海尔智家股份有限公司；pH30 高精度 pH 测试笔 CLEAN LEAU　昆山联凌电智能科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　戊糖片球菌的活化和菌泥的制备　将戊糖片球菌 LWQ1（Q1）的种子液以 2% 的接种量接种至 2 mL 的 MRS 肉汤，37 ℃ 下培养 24 h，转接活化 1 次后，8000 r/min 离心 2 min 得到菌泥，使用 0.1% 无菌蛋白胨水溶液清洗 2 次后重悬于等量蛋白胨溶液中，于 4 ℃ 备用。

1.2.2　冻干酸面团及馒头面团的制备　在超净工作台中，将 100 g 面粉、2 mL 含 Q1 菌泥的蛋白胨溶液和 100 mL 无菌水充分混匀后，放在 34 ℃、湿度 85% 的发酵箱中发酵 14 h 得到酸面团。分别添加 0%、10%、15%、20% 的脱脂乳粉并混合均匀，以 1 cm 厚度进行冻干。冻干后将冻干酸面团粉碎、过筛（100 目），密封包装，4 ℃ 储存备用。不同脱脂乳粉添

加量的 Q1 冻干酸面团表示为 Q1S（0%）、10TQ1S（10%）、15TQ1S（15%）、20TQ1S（20%）。

1.2.3　戊糖片球菌存活率的测定　分别取适量的新鲜 Q1 酸面团和冻干后的 Q1 酸面团粉，在 MRS 培养基上采用倾注法计数，37 ℃ 倒置培养 48±2 h，进行菌落计数，按下列公式计算 Q1 的存活率。

$$存活率(\%)=\frac{冻干后酸面团乳酸菌活菌数(CFU)}{冻干前酸面团乳酸菌活菌数(CFU)}\times 100$$

1.2.4　面团发酵力的测定　参照苏珊等[22] 的方法稍作修改，将 50 g 冻干酸面团粉、1 g 酵母、150 g 面粉和 100 mL 水混合，揉至成型，取 100 g 面团搓圆，放入 500 mL 量筒中，用木棒压实至没有缝隙，记录量筒内的面团顶部对应的刻度，置于 37 ℃ 培养箱中，2 h 内每隔 30 min 读取并记录。公式如下：

$$发酵力=\frac{面团体积(mL)-面团初始体积(mL)}{面团初始体积(mL)}$$

将 15TQ1S 和 20TQ1S 中的活菌数调整至与 10TQ1S 活菌数一致，分别记为Δ15TQ1S 和Δ20TQ1S，添加量按照如下公式计算，并以面粉补齐至 50 g。

$$\Delta iTQ1S质量(g)=\frac{10TQ1S乳酸菌活菌数(CFU/g)\times 50\ g}{iTQ1S乳酸菌活菌数(CFU/g)}$$

式中，iTQ1S 质量表示不同脱脂乳粉添加量的冻干酸面团的质量，i 为不同脱脂乳粉添加量。

1.2.5　馒头的制备

1.2.5.1　小麦馒头的制备　将面粉、酵母、水和 Q1 冻干酸面团粉按照表 1 配方混合均匀，揉至成团，在 37 ℃、湿度 85% 的培养箱中发酵 2 h 后切成 70 g/份的小面团，将小面团揉搓定型后，室温下二次醒发 30 min，水开后上锅蒸制 30 min，得到馒头。

表 1　小麦馒头配方

Table 1　Formula of wheat steamed bread

样品	面粉(g)	干酵母(g)	水(mL)	Q1冻干酸面团粉(g)
酵母对照馒头	200	1	100	−
Q1冻干酸面团馒头	150	1	100	50

注：−表示无无添加；表2同。

1.2.5.2　杂粮馒头的制备　将面粉、高粱粉（占总混合粉 10%）[21]、酵母、水和 Q1 冻干酸面团粉、食用碱按照表 2 配方混合均匀，揉至成团，在 37 ℃、湿度 85% 的培养箱中发酵 2 h，取出切成 70 g/份的小面团，将小面团揉搓定型后，室温下二次醒发 30 min，其中乳酸高粱馒头需用乳酸调整 pH 与 10TQ1S 高粱馒头 pH 一致后进行二次醒发，水开后上锅蒸制 30 min，得到高粱馒头。

表 2　高粱馒头配方

Table 2　Formula of sorghum steamed bread

样品	面粉（g）	高粱粉（g）	干酵母（g）	水（mL）	Q1冻干酸面团粉(g)	食用碱（g）
高粱馒头	180	20	1	100	−	−
乳酸高粱馒头	180	20	1	100	−	−
乳酸高粱馒头（碱）	180	20	1	100	−	0.44
10TQ1S高粱馒头	130	20	1	100	50	−
10TQ1S高粱馒头（碱）	130	20	1	100	50	0.44

1.2.6　面团和馒头 pH 测定　按照上述 1.2.5 的方法得到二次醒发后的面团，使用 CLEAN LEAU pH30 高精度测试笔对面团内部的 pH 进行测定并记录。将面团蒸制得到馒头后，使用相同方式测定馒头芯的 pH。

1.2.7　馒头比容、高径比的测定　参照 GB/T 21118-2007《小麦粉馒头》[23] 中体积置换法测定馒头比容，使用游标卡尺测定馒头的高度（mm）与直径（mm），每个样品做 3 次平行，取平均值。

高径比及比容计算公式如下：

$$高径比=\frac{高度(mm)}{直径(mm)}$$

$$比容(mL/g)=\frac{馒头的体积(mL)}{馒头的质量(g)}$$

1.2.8　馒头质构特性的测定　馒头冷却 1 h 后，将馒头芯切成 2 cm×2 cm×2 cm 的正方体备用[24]。使用质构仪柱形挤压探头 TA/36 对馒头的硬度、弹性、咀嚼性等性质进行质构分析，每个样品重复 3 次，取平均值。质构仪参数如下：测前速度 3.0 mm/s，测中速度 1.0 mm/s，测后速度 1.0 mm/s，间隔时间 3.0 s，触发力 5.0 g。

1.2.9　面团蛋白质二级结构的测定　参考 Jia 等[25] 的方法，使用带有衰减全反射（ATR）附件和 Hg-Cd-Te（MCT）检测器的傅里叶变换红外光谱仪，以 32 次扫描测量、4 cm^{-1} 分辨率和 400~4000 cm^{-1} 的扫描范围对不同样品的红外光谱进行记录。光谱中 1600~1700 cm^{-1} 所对应的酰胺 I 带被用来表征面筋蛋白二级结构，使用 Omnic（版本 8.2.0）和 Peak Fit（版本 4.12）软件对酰胺 I 带进行傅里叶去卷积、基线校准、绘制二阶导数曲线并进行分峰拟合，从而确定样品中各二级结构的含量。

1.2.10　面团的淀粉热力学分析　参照黄鸿杰[26] 的方法并作适当修改，将面团进行冻干后磨粉过筛（120 目）备用，称取该粉末 3~5 mg 于铝坩埚中压制边缘使其密封。使用差示热量扫描仪（DSC）进行测定，测定时的样品质量以去除水分含量后的样品中的固形物计。扫描温度为 25~125 ℃，升温速率为 10 ℃/min。

1.2.11　感官评价　馒头的感官评定由具有感官评定经验的 10 名食品专业评价员（男女各 5 名）组成。对不同组馒头从表面色泽、外观形状、组织结构、气味、口味、回弹性、黏性和咀嚼性 8 个方面进行感官评价，总分为 100，评分标准见表 3。

表 3 馒头的感官评价标准

Table 3 Sensory evaluation of steamed bread

项目	评分标准
表面色泽(10分)	乳白色、白色(8~10分)
	黄色、浅黄色(6~7分)
	表面色泽灰暗(2~5分)
外观形状(15分)	外观饱满、挺立、表面光滑(10~15分)
	有轻微塌陷、收缩、表面微皱(4~9分)
	萎缩严重(0~3分)
组织结构(15分)	气孔分布均匀且细小(12~15分)
	气孔分布过于细密但均匀(8~11分)
	结构较粗糙,存在大气孔(5~7分)
	表皮与边缘有分离现象(1~4分)
气味(10分)	具有淡淡麦香气味,无异味(7~10分)
	味道平淡(4~6分)
	略带有异味(0~4分)
口味(10分)	有淡淡的发酵香味或奶香(6~10分)
	口味稍甜(3~5分)
	略带咸味(0~2分)
回弹性(15分)	复原性高、回复性好、能压缩1/2以上(10~15分)
	手指按压回弹性弱或不回弹(5~9分)
	不易按压,较硬(2~4分)
黏性(15分)	爽口不黏牙(10~15分)
	稍微黏牙(5~9分)
	明显黏牙(0~4分)
咀嚼性(10分)	咀嚼适口、易下咽(7~10分)
	软硬适中(3~6分)
	咀嚼干硬、下咽困难(0~2分)

注:本研究所采用的感官评分量表,其最低分已明确定义为对应属性可被感知的最差品质状态,故部分项目未设置表示“不适用”的0分档。

1.3 数据处理

所有的试验均设置 3 个平行,结果以平均值±标准差(mean±SD)表示。数据在 Microsoft Excel 2021 版中进行计算。柱状图、点线图等图由 Origin 2018 绘制。通过 SPSS 26.0 单因素方差(ANOVA)分析显著性差异,不同字母表示组间存在显著性差异(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 脱脂乳粉添加量对冻干酸面团中戊糖片球菌 LWQ1 存活率的影响

通常选择蛋白质、糖、多元醇等物质一种或多种组合[18] 保护活菌免受冷冻干燥过程中超低温和极度干燥的破坏。本研究以 10%、15% 和 20% 添加量的脱脂乳粉作为单一保护剂制备冻干酸面团,存活率结果如图 1 所示。Q1 菌泥直接冻干损失 97% 的活菌,而 Q1 酸面团直接冻干损失 94.8% 的活菌,这说明酸面团中的淀粉、蛋白质或者空间结构可以起到微弱的保护作用。杨新宇[7] 研究表明不同 DY 值(Dough Yield,面团重量×100/面粉重量)的酸面团冻干后植物乳植杆菌和旧金山乳杆菌的存活率在 3%~7% 之间,本研究结果与之一致,但低于张维清等[10] 制备的冷冻干燥酸面团中植物乳植杆菌的存活率,推测可能是不同菌株对低温和干燥的耐受程度不同。

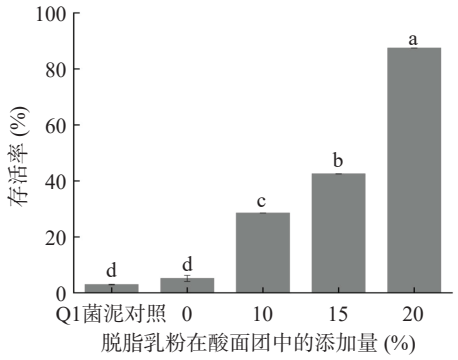


图 1 脱脂乳粉添加量对 Q1 存活率的影响

Fig.1 Effect of skim milk powder addition on survival rate of Q1

注:Q1 菌泥对照表示直接用 Q1 离心收集的菌泥进行冻干;0 表示 Q1 制备酸面团后不添加脱脂乳粉进行冻干;不同字母表示数据存在显著性差异(P<0.05)。

在实际生产中,为提高冻干微生物的存活率,需额外添加冻干保护剂。脱脂乳粉可通过包裹或化学键结合等方式作用于菌体细胞表面或者细胞内部蛋白质周围形成保护层,保护细胞免受损伤[27],保护效果与添加量有关。本研究发现,脱脂乳粉的添加能显著提高冻干酸面团中 Q1 的存活率(P<0.05),且随着添加量的增加,存活率逐渐上升,添加 20% 脱脂乳粉的冻干酸面团中 Q1 的存活率达到 87%(图 1)。

2.2 Q1 冻干酸面团对面团发酵力的影响

面团的发酵力与面团体积呈正比,决定发酵面制品的质量。如图 2A 所示,10TQ1S 和 15TQ1S 在 2 h 内的发酵力显著高于仅添加酵母菌的对照组(P<0.05),且在前 0.5 h 的发酵速度也比对照组快。面筋网络的形成与 CO_2 的产生是面团体积膨胀的前提[28],酸面团在发酵过程中,面团体系 pH 下降,有利于提高蛋白酶活性以部分降解面筋蛋白[29],同时,较高的质子浓度形成了静电排斥作用[30],减弱面筋网络的强度,使面团得以延展膨胀[31]。然而,20TQ1S 在 2 h 内的发酵力与对照无差异,这说明不同脱脂乳粉添加量的 Q1 冻干酸面团对酵母面团发酵力的影响不同。所有面团在 1.5 h 后的发酵速度均有所降低,这可能是因为随着发酵时间增加,酸性物质积累促进蛋白酶活性增加,破坏面筋网络[29] 导致面团中部分 CO_2 逸出,从而面团体积增加速度逐渐变慢。

由于不同脱脂乳粉添加量的 Q1 冻干酸面团中 Q1 活菌数不同,为探究相同活菌数的不同冻干酸面团的发酵力大小,将 15TQ1S 和 20TQ1S 中 Q1 活菌数调整至与 10TQ1S 一致(标记为Δ15TQ1S 和Δ20TQ1S),结果如图 2B 所示。10TQ1S 的发酵力显著高于Δ15TQ1S 和Δ20TQ1S,说明乳酸菌活菌数并不是影响面团发酵力的唯一因素;Δ20TQ1S 的发酵力显著(P<0.05)高于 20TQ1S,说明添加过量的脱脂乳粉会降低面团体积,可能是因为蛋白质和淀粉链之间的相互作用形成了更高强度的蛋白质-淀粉凝

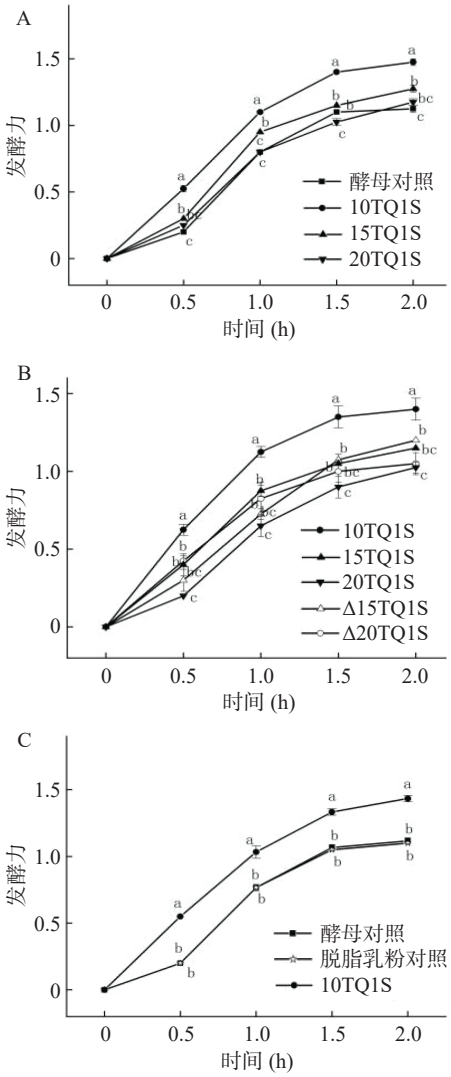


图 2　不同 Q1 冻干酸面团粉的发酵力

Fig.2　Fermenting power of freeze-dried acid dough powder with different Q1 grades

注：A：不同脱脂乳粉添加量 Q1 冻干酸面团发酵力；B：调整活菌数后 Q1 冻干酸面团发酵力；C：脱脂乳粉对照发酵力；对照组为仅添加酵母的面团；同一时间标注不同字母说明差异具有显著性（P<0.05）。

胶[32]，抑制面团的膨胀；但Δ15TQ1S 在前 1.5 h 的发酵力低于 15TQ1S，推测适量的脱脂乳粉可以起到调节面筋网络增大发酵力的作用。

为验证脱脂乳粉在面团发酵过程中的作用，添加与 10TQ1S 相同量的脱脂乳粉进行发酵力测定，结果如图 2C 所示。10TQ1S 的发酵力显著（P<0.05）高于酵母对照和添加脱脂乳粉组，说明单独使用脱脂乳粉并未提高面团发酵力，进一步说明一定活菌数的戊糖片球菌和适量的脱脂乳粉协同作用是促进发酵力提高的原因。

2.3　Q1 冻干酸面团发酵对面团和馒头 pH 的影响

不同 Q1 冻干酸面团因初始含菌量、脱脂乳粉含量不同，发酵得到的面团和馒头的 pH 也不同。如图 3 所示，二次醒发后，加入 Q1 冻干酸面团的面团 pH 均小于酵母发酵面团，15TQ1S 和 20TQ1S 发酵面团的 pH 相近，显著（P<0.05）高于 10TQ1S 的 pH，可能是过量的脱脂乳粉（氮源）延缓了 Q1 的产酸和发酵[33]。10TQ1S 发酵面团的 pH 最低，与其发酵力最大的结果相一致。

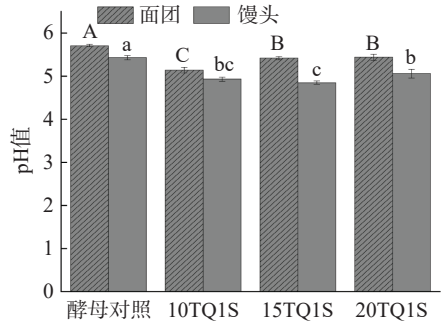


图 3　不同 Q1 冻干酸面团粉发酵面团和馒头的 pH

Fig.3　pH of different Q1 freeze-dried acid dough, fermented dough and steamed buns

注：不同大写字母表示面团的 pH 存在显著性差异（P<0.05）；不同小写字母表示馒头的 pH 存在显著性差异（P<0.05）。

Q1 冻干酸面团制备馒头后测得的 pH 比二次醒发后面团的 pH 低，可能是因为蒸制过程中水分减少或乳酸菌进一步发酵使体系 pH 降低。

2.4　Q1 冻干酸面团对馒头比容以及高径比的影响

馒头的比容是衡量馒头质构品质的重要指标之一，由图 4 可知，添加 Q1 冻干酸面团后馒头的比容出现两种不同的表现。10TQ1S 制备的馒头比容为 2.58 mL/g，显著（P<0.05）高于酵母发酵馒头，增加了 10.3%；高径比各组间无显著性差异，均在 0.61~0.63 之间。Xing 等[34] 发现的一株戊糖片球菌可以显著增加馒头比容，从 2.19 mL/g 增加到 2.41 mL/g，比对照增加 10%，本研究结果与之一致。10TQ1S 馒头比容结果与面团发酵力结果一致（图 2A），可能是乳酸菌代谢产生的酸性物质适当减弱面筋蛋白强度，使面团膨胀增大发酵力，进一步增加馒头比容。

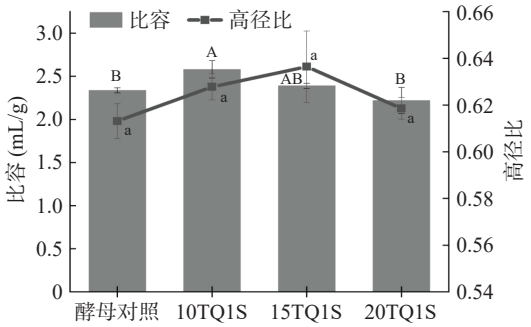


图 4　Q1 冻干酸面团粉制备的馒头比容和高径比

Fig.4　Q1 Specific volume and height-to-diameter ratio of steamed buns prepared from freeze-dried acid flour

注：不同大写字母表示比容存在显著性差异（P<0.05）；不同小写字母表示高径比存在显著性差异（P<0.05）。

20TQ1S 制备的馒头比容下降，可能与乳酸菌发酵有关，由 pH 结果可知，面团和馒头的 pH 随着 Q1 冻干酸面团活菌数的增加而增加（图 3），初始发

表 4 不同 Q1 冻干酸面团粉对小麦馒头质构的影响

Table 4 Effects of different Q1 freeze-dried acid dough on the texture of wheat steamed buns

样品	硬度(gf)	弹性	咀嚼性(gf)	回复性	内聚性
酵母对照	288.84±32.75^{c}	0.8789±0.0096^{a}	212.31±21.78^{c}	0.0997±0.0030^{a}	0.8373±0.0169^{a}
10TQ1S	469.93±71.36^{b}	0.8766±0.0092^{a}	335.65±49.41^{a}	0.0944±0.0027^{ab}	0.8155±0.0124^{a}
15TQ1S	574.40±79.68^{ab}	0.8699±0.0296^{a}	386.33±69.38^{b}	0.0847±0.0037^{cd}	0.7681±0.0259^{b}
20TQ1S	602.62±51.76^{ab}	0.8834±0.0109^{a}	424.32±39.70^{b}	0.0898±0.0019^{bc}	0.7966±0.0047^{ab}
市售馒头	678.00±49.05^{a}	0.7564±0.0151^{b}	392.55±26.34^{b}	0.0802±0.0029^{d}	0.7662±0.0194^{b}

注: 同列不同字母表示数据存在显著性差异(P<0.05), 表5~表7同。

酵剂活菌数过高反而影响面团的发酵和代谢酸性物质的产生。此外, 添加的脱脂乳粉和淀粉之间的氢键和静电相互作用导致面团产生紧密的结构, 并可能干扰亲水胶体网络, 使面筋结构恶化, 从而降低持气性和膨胀性, 进一步降低比容[32]。

2.5 Q1 冻干酸面团对小麦馒头质构的影响

馒头的质构特性包括硬度、弹性、咀嚼性、回复性及内聚性等参数。硬度和弹性大多都作为馒头质量的评判标准, 咀嚼性来自弹性、硬度和内聚性, 反映了咀嚼食物至吞咽状态所需的能量[35], 通常咀嚼性和硬度呈正相关[36]。

由表 4 可知, 添加了 Q1 冻干酸面团的馒头硬度和咀嚼性均显著增加, 并且随着脱脂乳粉添加量的增大而增大, 但三组间无显著性差异。这可能是因为 Q1 冻干酸面团中额外添加了脱脂乳粉, 形成的高强度的蛋白质-淀粉凝胶使样品具有更高的硬度值[32]。在质构测定中, 发现 Q1 冻干酸面团馒头的硬度随脱脂乳粉添加量的增加逐渐增加, 但仍低于市售馒头; 咀嚼性除 10TQ1S制备的馒头显著低于市售馒头, 其余 2 组与市售馒头无显著性差异(P<0.05)。Zheng 等[37] 制备的所有馒头硬度均大于 985 gf, 由此可见各组馒头的硬度仍在可接受范围。添加 10TQ1S 后, 其内聚性和回复性与酵母对照馒头并无显著性差异, 但随脱脂乳粉添加量的增加内聚性开始下降。

2.6 面团的蛋白质二级结构解析

在蛋白质二级结构中, 1600~1640 cm^{-1} 是 β-折叠的典型区域, 1640~1650 cm^{-1} 是无规则卷曲的典型区域, 1650~1660 cm^{-1} 是 α-螺旋的典型区域, 1660~1700 cm^{-1} 是 β-转角的典型区域[38]。在面筋蛋白的二级结构中, β-折叠凭借更强的氢键协同效应成为稳定性最高的构象形式, 这种强化后的分子间作用力更有利于蛋白质聚集体形成。相较而言, α-螺旋结构通过有序的螺旋排列保持着优越的构象稳态, 其规则的空间排布赋予其更高的结构完整性。所以, 较高比例的 α-螺旋和 β-折叠有助于形成更加有序的蛋白质结构并提高蛋白质的聚合能力[39]。

由表 5 所示, 在四种面团中, 酵母对照的 β-折叠占比最高, 为 35.59%, 显著(P<0.05)高于 10TQ1S 和 20TQ1S, 但与 15TQ1S 之间没有显著性差异。Q1 冻干酸面团发酵的面团中 α-螺旋比例显著高于酵母对照组, 其中以 10TQ1S 面团的 α-螺旋比例最大。β-折叠的形成是以降低 β-转角结构来实现的[40], 麻嵩淼等[11]发现, 戊糖片球菌 PE5 联合酵母发酵可增加醇溶蛋白二硫键含量和 β-折叠结构相对含量, 使面团的微观结构变得更加松散。但本研究发现, 10TQ1S 和 20TQ1S 的 β-折叠比例降低后增加了 α-螺旋和 β-转角的比例, 可能与脱脂乳粉的加入有关。10TQ1S 和 20TQ1S 中 α-螺旋和 β-转角比例的差异可能影响其面团中面筋网络结构, 从而表现出不同的面团发酵力和馒头比容。

表 5 各组面团的蛋白质二级结构

Table 5 Secondary structure of proteins in each group of dough

样品	β-折叠(%)	无规则卷曲(%)	α-螺旋(%)	β-转角(%)
酵母对照	35.59±1.26^{a}	18.51±2.1^{a}	16.88±0.9^{b}	29.02±0.96^{b}
10TQ1S	32.59±0.14^{b}	17.81±0.92^{a}	18.76±0.33^{a}	30.84±1.1^{ab}
15TQ1S	34.3±0.21^{ab}	18.4±0.03^{a}	18.36±0.33^{a}	28.93±0.49^{b}
20TQ1S	32.62±0.56^{b}	18.31±0.15^{a}	18.21±0.27^{a}	31.28±0.07^{a}

2.7 面团的淀粉热力学分析

淀粉的重结晶晶体在融化过程中会出现吸热峰, 峰面积越大, 融化该晶体所需要的热量越多, 融化焓值越大, 结晶含量越高, 老化度越大[41]。如表 6 所示, 与酵母对照相比, Q1 冻干酸面团发酵的面团的起始温度、峰值温度和终点温度都显著增加(P<0.05), 说明淀粉的耐热性增加、延缓了淀粉的糊化。Q1 冻干酸面团的加入降低了面团的焓值, 说明面筋蛋白与淀粉颗粒之间的结合更加紧密[42]; 此外, 酸化会增加淀粉酶活性, 将支链淀粉和直链淀粉分解为可融化糊精, 表现出较低的糊化趋势[43−44]。杨新宇[7] 发现, 馒头中添加酸面团发酵剂能够延缓支链淀粉的结晶速率, 延缓老化, 与本研究结果一致, 说明 Q1 冻干酸面团可以延缓面团老化。

表 6 面团的 DSC 热力学分析

Table 6 DSC thermodynamic analysis of dough

样品	起始温度(℃)	峰值温度(℃)	终点温度(℃)	焓值(J/g)
酵母对照	56.95±0.71^{b}	62.06±0.08^{b}	68.15±0.4^{b}	4.93±0.1^{a}
10TQ1S	59.13±0.43^{a}	63.89±0.34^{a}	69.05±0.33^{a}	4.12±0.65^{b}
15TQ1S	59.22±0.07^{a}	63.94±0.08^{a}	69.19±0.16^{a}	4.43±0.11^{b}
20TQ1S	59.47±0.3^{a}	64.34±0.24^{a}	69.62±0.52^{a}	4.38±0.65^{b}

2.8 Q1 冻干酸面团在馒头中的应用

将酸面团 10TQ1S 用于高粱馒头的制备, 测定

高径比和比容，结果如表 6 所示。高粱粉替代部分小麦粉后，稀释了面筋蛋白含量，所以高粱馒头比容显著下降。虽然小麦馒头制备中使用 10TQ1S 能显著提高馒头比容（P<0.05），但将 10TQ1S 应用于高粱馒头中增加比容效果不显著。邢倩等[5] 研究发现，异型乳酸发酵的魏斯氏菌因产生 CO_2 会提高馒头比容，但 Q1 是同型乳酸发酵不会额外产生 CO_2。不过，Xi 等[45] 发现加碱可以提高酸面团馒头的比容。本研究中，酸面团发酵后产乳酸，加碱后因产生 CO_2 显著增加了高粱馒头的比容，这说明 10TQ1S 可以利用额外的 CO_2 增加比容。

为进一步探究高粱馒头比容与体系酸性 pH 的关系，制备了用乳酸调 pH 的高粱馒头和乳酸调整后加碱的高粱馒头。如图 5 所示，10TQ1S 高粱馒头和乳酸高粱馒头的比容一致，说明戊糖片球菌可能是通过降低 pH[19] 引起面筋网络变化来提高高粱馒头比容，与 Verdonck 等[46] 的结果一致。此外，在高径比结果中，乳酸高粱馒头的高径比数值最大，但加碱后的高径比显著低于其余各组馒头，可推测乳酸的加入有利于维持高径比，但酸碱中和后体系的变化会降低馒头的高径比。因此，基于以上结果可知，杂粮馒头可在乳酸菌和酵母菌联合发酵产酸的基础上，通过加碱以增大杂粮馒头比容。

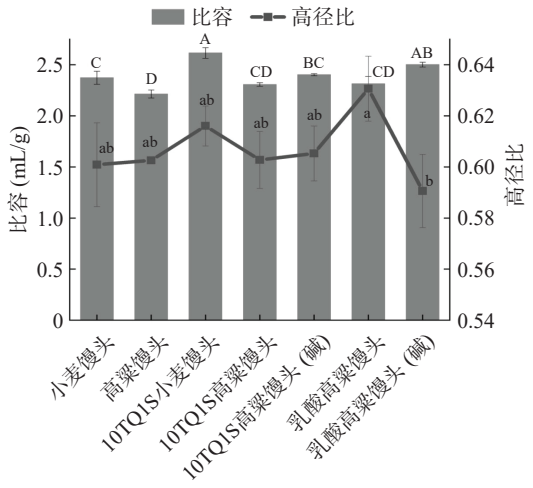


图 5　不同发酵方式的高粱馒头比容和高径比

Fig.5　Specific volume and height-to-diameter ratio of sorghum steamed bread prepared with different fermentation methods

注：不同大写字母表示比容存在显著性差异（P<0.05）；不同小写字母表示高径比存在显著性差异（P<0.05）。

2.9　Q1 冻干酸面团对高粱馒头质构特性的影响

由表 7 所示，相比于小麦馒头，添加了高粱粉的馒头的硬度和咀嚼性显著（P<0.05）增加。有研究表明，添加人参不溶性膳食纤维到面包中会增加硬度和咀嚼性[47]，这可能是因为膳食纤维增厚了馒头中的气室壁，从而加强了面筋骨架[48]。

与小麦馒头结果一致，10TQ1S 均显著（P<0.05）增大了高粱馒头的硬度和咀嚼性，分别由 861.56 gf 和 565.09 gf增大到 1305.76 gf 和 880.05 gf。对比 10TQ1S 高粱馒头和 10TQ1S 高粱馒头（碱）、乳酸高粱馒头和乳酸高粱馒头（碱），发现加碱调整 pH 至 5.7 后，馒头的硬度和咀嚼性均有所下降，其中 10TQ1S 高粱馒头和 10TQ1S 高粱馒头（碱）结果有显著性差异，说明酸性物质（或 pH）对硬度和咀嚼性影响较大。相比于硬度和咀嚼性，高粱和 10TQ1S 对馒头弹性、回复性和内聚性的影响较小，总体趋势表现为弹性增加（除加碱馒头外）、回复性下降、内聚性下降。

2.10　Q1 冻干酸面团对高粱馒头感官评分的影响

由表 8 小麦馒头批次结果可知，10TQ1S 制备的馒头综合得分和咀嚼性得分最高，分别为 83.5 和 9.2，显著（P<0.05）高于酵母对照馒头。虽然质构结果中 10TQ1S 制备的馒头的硬度和咀嚼性均高于对照酵母馒头（表 4），但感官评定中其咀嚼性评分最高，说明感官评价员对于馒头的硬度和咀嚼性有一定要求。10TQ1S 制作的馒头气味和口味的感官评分略高于对照酵母馒头，但两者间无显著性差异，可能是酸面团中的乳酸菌代谢产生有机酸或芳香族物质，一定程度上改变了风味[4,49]；此外，10TQ1S 和对照酵母制备的馒头在气味和口味上显著（P<0.05）高于 15TQ1S 和 20TQ1S 制备的馒头，由 pH 结果（图 3）推测，可能是因为 10TQ1S 发酵速度快，产生的风味物质丰富。以上说明，以适量脱脂乳粉（如 10%）作为保护剂制备 Q1 冻干酸面团，发酵馒头的感官评分最高。

如表 8 小麦馒头和高粱馒头批次的感官评分结果可知，按照总分从大到小排序，依次为 10TQ1S>小麦馒头>10TQ1S 高粱馒头>乳酸高粱馒头>10TQ1S 高粱馒头（碱）>高粱馒头>乳酸高粱馒头（碱），由此可

表 7　不同组馒头的质构特性

Table 7　Texture characteristics of steamed bread in different groups

样品	硬度（gf）	弹性	咀嚼性（gf）	回复性	内聚性
小麦馒头	305.9±17.58^{e}	0.8707±0.037^{ab}	248.9±24.69^{e}	0.0954±0.0026^{a}	0.8129±0.0248^{a}
高粱馒头	861.56±53.9^{c}	0.8722±0.0164^{ab}	565.09±47.43^{c}	0.0817±0.0035^{bc}	0.7259±0.0216^{b}
10TQ1S小麦馒头	437.65±32.53^{d}	0.8903±0.011^{ab}	378.55±54.43^{d}	0.0877±0.0053^{ab}	0.7466±0.0254^{b}
10TQ1S高粱馒头	1305.76±33.27^{a}	0.8771±0.0175^{ab}	880.05±24.21^{a}	0.0809±0.0029^{bc}	0.7371±0.0282^{b}
10TQ1S高粱馒头（碱）	1023.12±54.84^{b}	0.8627±0.0069^{ab}	739.5±66.07^{b}	0.0758±0.0044^{bc}	0.7231±0.0238^{b}
乳酸高粱馒头	816.38±78.79^{c}	0.9049±0.0203^{a}	547.24±33.67^{c}	0.0882±0.0016^{ab}	0.7579±0.0102^{ab}
乳酸高粱馒头（碱）	767.3±32.53^{c}	0.8488±0.0061^{b}	505.74±28.75^{c}	0.0879±0.0012^{ab}	0.7528±0.027^{b}

表 8 不同发酵剂制备的馒头/高粱馒头感官评分

Table 8 Sensory evaluation scores of steamed bread/sorghum steamed bread prepared with different starters

批次	样品	表面色泽	外观形状	组织结构	气味	口味	回弹性	黏性	咀嚼性	总分
小麦馒头	酵母对照	8.2±1.5^{a}	12.3±1.9^{a}	10.4±2.5a	8.3±0.8^{ab}	7.3±1.0^{ab}	11.7±1.6^{a}	11.8±1.2^{ab}	8.0±0.6^{b}	78.0±3.9^{b}
	10TQ1S	8.9±0.8^{a}	13.5±1.4^{a}	11.0±2.4^{a}	9.0±0.9^{a}	8.2±1.2^{a}	12.9±2.3^{a}	12.8±1.7^{a}	9.2±0.9^{a}	85.3±4.5^{a}
	15TQ1S	8.1±0.8^{a}	11.0±2.0^{a}	11.0±2.4^{a}	7.0±1.2^{b}	6.1±1.6^{b}	12.4±2.5^{a}	11.3±2.2^{ab}	7.7±0.8^{b}	75.5±6.9^{b}
	20TQ1S	8.2±0.7^{a}	12.5±1.0^{a}	11.2±2.3^{a}	6.9±1.9^{b}	6.1±2.0^{b}	11.8±2.6^{a}	10.3±3.3^{b}	7.2±0.9^{b}	74.2±8.4^{b}
小麦馒头和高粱馒头	小麦馒头	8.2±0.9^{A}	12.2±2.1^{A}	8.9±1.8^{C}	8.2±0.9^{A}	7.5±1.2^{A}	12.1±2.1^{A}	10.6±1.4^{B}	7.8±0.7^{A}	75.5±4.5^{B}
	高粱馒头	5.2±0.7^{B}	12.7±1.1^{A}	11.2±1.9^{B}	8.1±1.3^{A}	5.4±1.2^{B}	8.7±1.6^{D}	13.3±1.2^{A}	3.9±1.4^{B}	68.5±4.3^{CD}
	10TQ1S	8.5±0.8^{A}	13.2±1.5^{A}	13.1±0.9^{A}	8.1±0.7^{A}	7.9±1.0^{A}	12.5±1.3^{A}	12.3±1.2^{AB}	8.1±0.7^{A}	83.7±2.5^{A}
	10TQ1S高粱馒头	5.3±0.9^{B}	13.0±1.0^{A}	13.2±0.7^{A}	8.0±1.1^{AB}	5.1±1.4^{B}	10.9±1.8^{ABC}	13.6±0.7^{A}	4.3±1.2^{B}	73.4±2.8^{BC}
	10TQ1S高粱馒头(碱)	5.4±0.7^{B}	12.2±1.2^{A}	11.2±1.8^{B}	8.1±0.7^{A}	5.1±1.0^{B}	11.3±1.5^{AB}	10.9±1.5^{B}	4.9±1.5^{B}	69.1±5.2^{CD}
	乳酸高粱馒头	5.1±0.9^{B}	13.1±1.0^{A}	13.2±1.2^{A}	7.0±0.8^{BC}	5.8±0.9^{B}	9.3±1.1^{CD}	12.2±1.7^{AB}	4.1±1.3^{B}	69.8±4.7^{CD}
	乳酸高粱馒头(碱)	5.2±1.1^{B}	13.0±1.2^{A}	11.2±1.7^{B}	6.9±0.5^{C}	5.4±1.0^{B}	9.9±0.9^{BCD}	10.6±2.5^{B}	4.9±1.3^{B}	67.1±4.5^{D}

注: 小麦馒头批次(酵母对照至20TQ1S)以不同小写字母表示数据存在显著性差异(P<0.05); 小麦馒头和高粱馒头批次[小麦馒头至乳酸高粱馒头(碱)]以不同大写字母表示数据存在显著性差异(P<0.05)。

见, 高粱粉的加入会降低馒头的感官评价总分, 这与高粱中含有大量的膳食纤维有关; 其中, 以表面色泽与咀嚼性感官评分的差异最显著(P<0.05), 在表面色泽中小麦馒头为 8.2~8.5 分, 而高粱馒头仅为 5.1~5.4 分; 咀嚼性中小麦馒头为 7.8~8.1 分, 而高粱馒头仅为 3.9~4.9 分。然而, 小麦馒头和 10TQ1S 高粱馒头的感官评价总分(分别为 75.5 分和 73.4 分)没有显著性差异, 并与高粱馒头(68.5 分)对比, 说明 10TQ1S 发酵后提高了高粱馒头的感官评价总分。高粱馒头除外观形状和气味外, 其他各项指标均与小麦馒头有显著性差异(P<0.05), 10TQ1S 的使用不同程度减缓了添加高粱带来的不利影响。虽然 10TQ1S发酵后加碱能提高馒头的比容, 但总体的感官评分要低于不加碱的 10TQ1S 高粱馒头。

10TQ1S 高粱馒头和乳酸高粱馒头、10TQ1S 高粱馒头(碱)和乳酸高粱馒头(碱)之间的感官评分没有显著性差异, 说明 10TQ1S 对高粱馒头感官评价各指标的影响主要源自于酸性物质的作用。值得注意的是, 加入高粱和 10TQ1S 后组织结构的评分均显著(P<0.05)增加, 但两者表现不同: 高粱馒头表现为横截面缩小伴随气孔分布均匀且细小, 10TQ1S 馒头表现为横截面增大伴随气孔分布均匀且细小。综合分析感官评价, 10TQ1S 可以显著提高高粱馒头的感官评分。

3 结论

本文制备了以脱脂乳粉作为冻干保护剂的戊糖片球菌 Q1 冻干酸面团, 并研究了其对面团、小麦粉馒头及高粱馒头品质的影响及潜在机理。结果表明, 高添加量的脱脂乳粉(15%、20%)能提高 Q1 菌株的存活率, 但面团发酵力和馒头比容有所下降; 而添加 10% 脱脂乳粉的冻干酸面团虽 Q1 存活率相对较低, 却有着最优的面团发酵性能、馒头比容以及感官评分, 深入分析蛋白质和淀粉结构, 发现其 β-折叠显著下降、α-螺旋显著升高, 可延缓淀粉糊化和支链淀粉结晶。将该冻干酸面团应用于高粱馒头制备, 可以显著改善高粱馒头的感官品质, 得到了与小麦馒头无显著性差异的比容和感官评分。这些研究发现为以脱脂乳粉作为冻干保护剂制备冻干酸面团提供了参考, 并为改善杂粮馒头品质提供了可行手段。

© 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] YUE Chonghui, TANG Yu, QI Weiwei, et al. Influences of Na_2CO_3, $NaHCO_3$, K_2CO_3 on the rheological, water distribution, and microstructural properties of 5% long-chain inulin dough and quality of steamed bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 176: 114501.

[2] 陈绍军. 馒头及酵面食品起源问题的再认识[J]. 农业考古, 1995(3): 218−220. [CHEN Shaojun. Reunderstanding of the origin of steamed bread and leavened noodles[J]. Agricultural Archaeology, 1995(3): 218−220.]

[3] LIU Tongjie, LI Yun, CHEN Jiancai, et al. Prevalence and diversity of lactic acid bacteria in Chinese traditional sourdough revealed by culture dependent and pyrosequencing approaches[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 68: 91−97.

[4] LIU Tongjie, LI Yang, SADIQ F A, et al. Predominant yeasts in Chinese traditional sourdough and their influence on aroma formation in Chinese steamed bread[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 404−411.

[5] 邢倩, 刘敏, 柯胜, 等. 2 种乳酸菌发酵酸面团对馒头品质与风味的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 200−209. [XING Qian, LIU Min, KE Sheng, et al. Effects of two kinds of lactic acid bacteria fermented sourdough on the quality and flavor of steamed bread[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(2): 200−209.]

[6] WU Xueying, LIU Yongxin, GUO Zhengli, et al. Antifungal activities of *Pediococcus pentosaceus* LWQ1 and *Lactiplantibacillus plantarum* LWQ17 isolated from sourdough and their efficacies on preventing spoilage of Chinese steamed bread[J]. Food Control, 2025, 168: 110940.

[7] 杨新宇. 冻干乳酸菌酸面团发酵剂的制备及在馒头中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013. [YANG Xinyu. Studies on

preparation of freeze-dired lactic acid bacteria sourdough starters and their effects on chinese steam bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.]
[8] 李彦慧, 张子仪, 张杉杉, 等. 协同发酵对小麦淀粉结构和理化性质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(15): 112−119. [LI Yanhui, ZHANG Ziyi, ZHANG Shanshan, et al. Effect of cooperative fermentation on the structure and physicochemical properties of wheat starch[J]. Food Science, 2025, 46(15): 112−119.]
[9] ROSSANA S, ALESSANDRA M, CLOTILDE Z, et al. Persistence and effect of a multistrain starter culture on antioxidant and rheological properties of novel wheat sourdoughs and bread[J]. Foods, 2020, 9(9): 1258.
[10] 张维清, 王博, 刘玉春, 等. 冷冻干燥植物乳杆菌全麦酸面团的制备及其对全麦面包品质影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2024(23): 106−113. [ZHANG Weiqing, WANG Bo, LIU Yuchun, et al. Preparation of freeze-dried whole-wheat sourdough fermented by *Lactobacillus plantarum* and its effect on the quality of whole-wheat bread[J]. Food and Fermentation Industries, 2024(23): 106−113.]
[11] 麻嵩淼, 王旭, 金浏丽, 等. 戊糖片球菌 PE5 与酵母联合发酵对玉米馒头面团中醇溶蛋白结构的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 136−143. [MA Songmiao, WANG Xu, JIN Liuli, et al. The effect of co-fermentation of *Pediococcus pentosaceus* PE5 and yeast on the structure of prolamins in corn-wheat dough[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 136−143.]
[12] ZHOU Weitao, JI Shengxin, FANG Junling, et al. Effects of the coculture of *Pediococcus pentosaceus* and *Saccharomyces cerevisiae* with different leavening ability on the quality and volatile organic compounds of Chinese steamed bread[J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104216.
[13] LIU Aiping, SU Shan, SUN Yifan, LI Qin, et al. Enhancing the highland barley-wheat dough network structure and bread quality using freeze-dried sourdough powder with inulin as a protectant [J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 191: 115599.
[14] 魏春菊, 卢钏燚, 赵涛, 等. 植物乳杆菌发酵杂粮面团的添加对杂粮馒头品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(11): 69−78. [WEI Chunju, LU Chuanyi, ZHAO Tao, et al. Effect of addition of *Lactobacillus plantarum* fermented multigrain dough on quality of multigrain steamed bun[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(11): 69−78.]
[15] 刘开文, 马雯, 金刚. 真空冷冻干燥提高乳酸菌存活率及延长贮藏期的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 325−333. [LIU Kaiwen, MA Wen, JIN Gang. Research progress on improving the survival rate and extending the storage period of lactic acid bacteria through vacuum freeze-drying[J]. Food Science, 2024, 45(2): 325−333.]
[16] SHANG Jiacui, XIE Shuiqi, YANG Shuo, et al. Steamed multigrain bread prepared from dough fermented with lactic acid bacteria and its effect on type 2 diabetes[J]. Foods, 2023, 12(12): 2319.
[17] LIU Mengqi, LI Shouren, CAO Shixi, et al. Let food be your medicine–dietary fiber[J]. Food & Function, 2024, 15(15): 7733−7756.
[18] 寇兴凯, 徐同成, 宗爱珍, 等. 高粱营养及其制品研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2015(12): 45−48. [KOU Xingkai, XU Tongcheng, ZONG Aizhen, et al. Advance of sorghum nutrition and its product[J]. Cereal & Feed Industry, 2015(12): 45−48.]
[19] 路飞, 吴玥曈, 郑家荣, 等. 杂粮馒头的营养价值及加工技术研究进展[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(3): 230−237. [LU Fei, WU Yuetong, ZHENG Jiarong, et al. Research progress on the nutritional value and processing technology of multigrain steamed buns[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2021, 39(3): 230−237.]
[20] WU Gangcheng, SHEN Yingbin, QI Yajing, et al. Improvement of *in vitro* and cellular antioxidant properties of Chinese steamed bread through sorghum addition[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 91: 77−83.
[21] 朱俊玲, 杨婉琳, 柳青山. 高粱馒头生产工艺的研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 43−49. [ZHU Junling, YANG Wanlin, LIU Qingshan. The process optimization of the sorghum steamed bread[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Nature Science Edition), 2019, 39(3): 43−49.]
[22] 苏珊, 徐瑞霞, 张顺, 等. 乳酸菌发酵豆渣酸面团对馒头面团特性和馒头品质的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(11): 2218−2228. [SU Shan, XU Ruixia, ZHANG Shun, et al. Effects of lactic acid bacteria fermented soybean dregs sourdough on steamed bread dough characteristics and steamed bread quality[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(11): 2218−2228.]
[23] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21118-2007《小麦粉馒头》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. [Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 21118-2007 "Steamed Buns Made from Wheat Flour"[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.]
[24] YU Yafang, WANG Li, QIAN Haifeng, et al. Contribution of spontaneously-fermented sourdoughs with pear and navel orange for the bread-making[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 336−343.
[25] JIA Ruobing, ZHANG Mengli, YANG Tianbao, et ai, Evolution of the morphological, structural, and molecular properties of gluten protein in dough with different hydration levels during mixing[J]. Food Chemistry: X, 2022, 15: 100448.
[26] 黄鸿杰. 水胶体对馒头品质的影响及其相关机制的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019. [HUANG Hongjie. Study on the influence of hydrocolloids on the quality of steamed buns and its related mechanisms[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019.]
[27] 刘俊杰, 陈宁宁, 徐玉娟, 等. 凝结芽孢杆菌 BC30 冻干保护剂的筛选及其对菌粉消化耐受性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 154−164. [LIU Junjie, CHEN Ningning, XU Yujuan, et al. Screening of cryoprotectants of *Bacillus coagulans* BC30 and their effect on the digestive tolerance of bacteria powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 154−164.]
[28] 涂金金, 高淑娟, 苏煜娴, 等. 面筋蛋白在发酵面团加工中的作用机制及研究进展[J]. 中国粮油学报, 2024(4): 210−222. [TU Jinjin, GAO Shujuan, SU Yuxian, et al. Mechanism and research progress of gluten protein in fermented dough processing[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024(4): 210−222.]
[29] SHA Huiying, WANG Qianqian, and LI Zhijian. Comparison of the effect of exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria from sourdough on dough characteristics and steamed bread quality [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2023, 58 (1): 378−386.
[30] CHARMAINE I. C, TILMAN J. S, PETER D, et al. Wheat sourdough fermentation: Effects of time and acidification on fundamental rheological properties[J]. Cereal Chemistry, 2004, 81(3): 409−417.

[31] TANG Xiaojuan, LIU Ruoshi, HUANG Weining, et al. Impact of in situ formed exopolysaccharides on dough performance and quality of Chinese steamed bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96: 519−525.
[32] ZHAO Fangfang, LI Yang, LI Caiming, et al. Insight into the regulations of rice protein on the gluten-free bread matrix properties[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107796.
[33] 杨加怀. 植物乳杆菌 299 高密度培养及冷冻干燥保护的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015. [YANG Jiahuai. Study on high-density cultivation and lyophilization protection of *Lactobacillus plantarum* 299[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.]
[34] XING Xiaolong, SUO Biao, YANG Yong, et al. Application of Lactobacillus as adjunct cultures in wheat dough fermentation[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(4): 842−847.
[35] PRZEMYSŁAW Ł K, KATARZYNA W, ŁUKASZ M, et al. Wheat bread enriched with raspberry and strawberry oilcakes: Effects on proximate composition, texture and water properties[J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(11): 2591−2600.
[36] AZEEM M, MU T H, ZHANG M. Influence of particle size distribution on nutritional composition, microstructural and antioxidant properties of orange and purple - fleshed sweet potato flour[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): e15283.
[37] ZHENG Qi, WANG Xiaojie, YI Li, et al. Effect of dried honey powder on the quality and flavor of Chinese steamed buns premicrofermented with *Pediococcus pentosaceus*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 197: 115925.
[38] ZHU Xiangwei, YUAN Peipei, ZHANG Ting, et al. Effect of carboxymethyl chitosan on the storage stability of frozen dough: State of water, protein structures and quality attributes[J]. Food Research International, 2022, 151: 110863.
[39] HU Xiaohui, CHENG Li, HONG Yan, et al. Impact of celluloses and pectins restrictions on gluten development and water distribution in potato-wheat flour dough[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 206: 534−542.
[40] SUI Wenjie, XIE Xuan Xie, LIU Rui, et al. Effect of wheat bran modification by steam explosion on structural characteristics and rheological properties of wheat flour dough[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 571−580.
[41] LI Wenwen, LI Caiming, GU Zhengbiao, et al. Relationship between structure and retrogradation properties of corn starch treated with 1, 4-*α*-glucan branching enzyme[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 868−875.
[42] 沙慧莹. 热带醋杆菌对面糊发酵及馒头制作品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023. [SHA Huiying. Study on the influence of *Acetobacter tropicalis* on batter fermentation and the quality of steamed buns during production[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.]
[43] CORSETTI A, GOBBETTI M, DE MARCO B, et al. Combined effect of sourdough lactic acid bacteria and additives on bread firmness and staling[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(7): 3044−3051.
[44] SHENG Xialu, MA Zhen, LI Xiaoping, et al. Effect of water migration on the thermal-vacuum packaged steamed buns under room temperature storage[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 72: 117−123.
[45] XI Jinzhong, XU Dan, WU Fengfeng, et al. Effect of Na_2CO_3 on quality and volatile compounds of steamed bread fermented with yeast or sourdough[J]. Food Chemistry, 2020.324.
[46] VERDONCK C, HECKE Z V, DE BONDT Y, et al. Mechanistic insights into the impact of acetic acid, lactic acid, and succinic acid on the dough rheology, the breadmaking process, and the specific volume of wholemeal sourdough-type bread[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 162: 110884.
[47] JIANG Guihun, FENG Xiaoyu, WU Zhaogen, et al. Development of wheat bread added with insoluble dietary fiber from ginseng residue and effects on physiochemical properties, *in vitro* adsorption capacities and starch digestibility[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111855.
[48] LIU Sijing, SUN Hongnan, MA Mengmei, 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 and Technology, 2024, 59: 4041−4052.
[49] FU Yuanzhe, SUN Min, FENG Tao, et al. Impact of leavening agents on flavor profiles and microbial communities in steamed bread: a comparative analysis of traditional chinese sourdough and commercial yeast[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(48): 18973−18985.