

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.06.012

王锦惠, 王钰, 方加军, 等. 乳酸菌发酵芋泥的制备及其对面包品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(6): 99-107.

WANG J H, WANG Y, FANG J J, et al. Preparation of taro paste fermented with *Lactobacillus* and its effect on bread quality[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(6): 99-107.

乳酸菌发酵芋泥的制备及其对面包品质的影响

王锦惠¹, 王钰¹, 方加军², 熊河生², 涂瑾¹, 肖建辉¹✉

(1. 江西农业大学 食品科学与工程学院, 江西 南昌 330045;

2. 江西省红芽芋工程技术研究中心, 江西 南昌 334000)

摘要: 为拓宽芋泥资源的应用, 提升其营养价值, 以芋泥为发酵基质, 经 TR22 型植物乳杆菌发酵后, 将其添加进面团制作面包。在考察发酵过程中芋泥基质营养成分变化的基础上, 测试不同添加量 (0%、5%、10%、15%, w/w) 的发酵芋泥对面团粉质特性、流变特性及面包品质的影响。结果表明, 经乳酸菌发酵的芋泥, 其乳酸菌菌落总数最高可达 8.39×10^6 CFU/mL, 乳酸和乙酸分别达到 5.21 mg/g 和 4.96 mg/g, 胞外多糖由 1.43 g/kg 增长为 2.38 g/kg, 氨基酸含量也有不同程度提高。发酵芋泥的添加可以增强面团的吸水性、弹性和柔软性, 在一定程度上会增大面包比容和持气性, 使其组织状态变得柔软, 瓤芯气孔个数减少。综上可知, 添加乳酸菌发酵的芋泥可提升面包品质, 为发酵芋泥在面包产品中的应用提供了理论依据。

关键词: 乳酸菌; 发酵芋泥; 面团; 面包; 质构性状

中图分类号: TS215 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)06-0099-09

网络首发时间: 2024-11-07 10:53:21

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20241106.1724.018>

Preparation of Taro Paste Fermented with *Lactobacillus* and Its Effect on Bread Quality

WANG Jin-hui¹, WANG Yu¹, FANG Jia-jun², XIONG He-sheng², TU Jin¹, XIAO Jian-hui¹✉

(1. School of Food Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China; 2. Jiangxi Red Bud Taro Engineering Technology Research Center, Nanchang, Jiangxi 334000, China)

Abstract: In order to broaden the use of taro paste resources and improve its nutritional value, taro paste was used as a fermentation substrate and fermented by *Lactobacillus plantarum* type TR22, followed by adding it to the dough to make bread. Based on the changes in the nutrient composition of the substrate during the fermentation process, the effects of different additions (0%, 5%, 10% and 15%, w/w) of taro paste on the flour properties, rheological properties and bread quality were investigated. The results showed that taro

收稿日期: 2024-04-20

基金项目: 江西省现代农业产业技术体系建设专项 (JXARS-19-4)

Supported by: Earmarked Fund for Jiangxi Agriculture Research System (No. JXARS-19-4)

第一作者: 王锦惠, 女, 1999 年出生, 在读硕士生, 研究方向为粮油加工, E-mail: 1433361279@qq.com

通信作者: 肖建辉, 男, 1983 年出生, 博士, 教授, 研究方向为农产品精深加工, E-mail: xiaojh666666@126.com

paste fermented by *Lactobacillus* fermentation had up to 8.39×10^6 CFU/mL of *Lactobacillus* colonies, 5.21 mg/g of lactic acid and 4.96 mg/g of acetic acid, respectively, and extracellular polysaccharides increased from 1.43 to 2.38 g/kg, with varying degrees of increase in amino acid content. The addition of fermented taro paste enhanced the water absorption, elasticity and softness of the dough, and to some extent increased the specific volume and air holding capacity of the bread, resulting in a softer state of organization and a reduction in the number of air holes in the core capsule. In conclusion, the addition of *Lactobacillus* fermented taro paste can improve the quality of bread, providing a theoretical basis for the use of fermented taro paste in bread products.

Key words: lactic acid bacteria; fermented taro paste; dough; bread; textural properties

芋头 (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) 又称为芋艿, 是世界第 5 大块茎类作物, 富含淀粉等多种营养成分, 品质独特, 特别是以芋头作为原料制作而成的芋泥, 食用便捷, 深受广大消费者青睐, 尤其是红芽芋泥质地绵软、口感细腻, 而荔浦芋泥具有醇厚的香味, 两者复配制作的芋泥, 具有广阔的市场前景。由于芋泥含有大量膳食纤维, 会阻止面筋水合, 也导致了目前芋泥几乎不会作为原料加入到面制品中, 而多用于面包馅料^[1]。因此, 拓宽芋泥资源的应用方式, 实现其从馅料到原料主体的转变, 将是一种新的尝试。

研究发现, 乳酸菌自身可以产生乳酸、乙酸等有机酸, 这些酸类物质不仅可以与发酵过程中产生的醇、酮等进行反应产生风味物质^[2]。还能改善面团内部面筋结构, 提升面包的整体形态。如张怡芸等^[3]研究发现添加乳酸菌发酵液可以加快面团发酵速度, 显著改善面团的面筋网络结构, 使得面包具有更好的组织状态。邵童等^[4]以大豆作为原料, 探究不同乳酸菌发酵豆乳对面团发酵特性的影响, 结果表明添加发酵豆乳可以改善面团内淀粉酶活性, 刺激面筋蛋白降解, 提高面包面团的延展性和蓬松度。钟京等^[5]在高纤维面包中添加乳酸菌发酵的麸皮, 发现能提高面包面团产气能力并改善面团持气性。近年来, 关于不同乳酸菌发酵基质对面包品质影响的研究备受学者关注, 研究重点大多集中于谷物、豆类或无面筋体系的探索^[6], 关于薯类基质相关的研究鲜见报道。

基于此, 本研究将芋泥进行乳酸菌发酵, 并将其添加到面团中制作面包, 探究乳酸菌发酵芋

泥内部产物变化及发酵活力, 测定面团粉质特性和流变特性变化, 对面包的质构特性和发酵结果进行分析, 以期实现芋泥从面包辅料到面制品主体原料的突破。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

荔浦芋: 广西北流寻味君农业有限公司; 红芽芋: 江西省江天农业科技有限公司; 白砂糖、盐, 市售食品级; TR22 型植物乳杆菌: 镇江市天益生物科技有限公司; 黄油: 中粮集团有限公司; 酵母: 安琪酵母股份有限公司; 高筋面粉: 江苏新良面粉有限责任公司; 德氏乳杆菌培养基(MRS 培养基): 苏州百思生物技术有限公司; 乳酸、乙酸、葡萄糖、麦芽糖、果糖、蔗糖等标准样品: 美国 Sigma 公司, 所使用的化学品均为分析级。

1.2 仪器与设备

HVS-1000 型超净工作台: 苏州安泰仪器设备有限公司; FE-20x 型 pH 计: 梅特勒(上海)公司; BRF-18C 型发酵箱: 广州展卓商用设备制造有限公司; YCD-1D 型烤箱: 广州荣麦烘焙食品机械制造有限公司; Waters 1525 型高效液相色谱仪: 美国沃特世公司; DHR-2 型流变仪: 美国 TA 仪器有限公司; TEE32 型物性测定仪: 英国 Stable Micro System 公司; Farinograph-E 型粉质仪: 德国布拉本德公司。

1.3 乳酸菌发酵芋泥的制备

选择优质、无病虫害、个大均匀的荔浦芋和红芽芋, 洗去表面的泥沙等杂质, 去皮切片, 隔水蒸煮 45 min 熟化, 按照荔浦芋与红芽芋添加量

比值为 3 : 1, 打浆机制成芋泥, 加入 10.0% 的蔗糖混合均匀。取 1.0% TR22 型植物乳杆菌直接加入, 37 °C 恒温培养箱中培养 12 h, 制得发酵芋泥备用。

1.3.1 发酵过程中菌落总数、pH 值和可滴定酸的测定

取 10.00 g 不同发酵时长的芋泥在 90.0 mL 无菌生理盐水中混匀, 进行梯度稀释。将 100.0 μ L 适宜浓度稀释液涂布于 MRS 固体平板上。37 °C 培养 24 h, 观察平板菌落的生长情况并进行记数。

参考 Katina 等^[7]的方法, 将 10.00 g 不同时长发酵芋泥和 90.00 mL 去离子水混合搅拌 30 min, 静止 10 min 测样品 pH。可滴定酸 (Total titratable acid, TTA) 为 0.10 mol/L NaOH 溶液滴定样品, 当 pH=8.60 时, 消耗的滴定体积 (mL)。

1.3.2 乳酸和乙酸测定

参照 Tang 等^[8]的方法, 称取 1.00 g 发酵芋泥冻干粉, 加入 4.00 mL 去离子水, 在 4 °C 下高速匀浆 30 s。将稀释液在 4 °C 下 8 000 \times g 离心 10 min。取适量上清液过 0.45 μ m 滤膜, 用于高效液相色谱法测定样品中乳酸和乙酸的含量。色谱条件为: Ecosil C18 柱、柱温 30 °C、紫外 (UV) 检测器 (波长为 210 nm)、流动相 (甲醇: 95%, v/v)、流动相 pH 用磷酸调至 3.0, 流动相流速为 0.80 mL/min、进样量为 10.00 μ L。

1.3.3 胞外多糖、单糖、二糖测定

胞外多糖 (Exopolysaccharides, EPS) 含量测定参照 Tang 等^[8]的方法。将 1.00 g 发酵芋泥冻干粉与离子水 (1 : 2) 稀释, 在 4 °C 下以 8 000 g 离心 20 min。在 4 °C 下, 加入 4% (w/v) 的三氯乙酸沉淀蛋白质, 时长约 12 h, 然后通过离心 (4 °C, 8 000 g, 30 min) 去除沉淀的蛋白质。向上清液中加入三倍体积的冰乙醇 (95%, v/v) 并离心 (4 °C, 8 000 g, 30 min)。将沉淀复溶于 1.0 mL 去离子水中, 每 8 h 换一次水, 在 4 °C 下透析 48 h。根据苯酚硫酸法测定透析后的 EPS 溶液中多糖的含量, 加入现配的 6% 苯酚溶液 0.50 mL 震荡 2 min, 再加入 2.50 mL 浓硫酸 (98%, v/v) 震荡 5 min, 将反应后的混合液置于室温冷却 30 min。样品在 490 nm 波长测定其吸

光度, 并使用不同浓度葡萄糖溶液制作标准曲线^[7]。

单糖和二糖含量的测定参照 Vallabha 等^[9]的方法。取冻干后的发酵芋泥粉 4.0 g 用 12.00 mL 去离子水在 4 °C 下, 200 r/min 恒温振荡提取 1 h。然后离心 (4 °C, 8 000 g, 5 min), 取上清液置于 100 °C 水浴加热 5 min, 冷却至室温后离心 (10 000 g, 30 min) 取上清液过滤膜 (0.22 μ m) 用于高效液相色谱仪 (High performance liquid chromatography, HPLC) 测定样品中的单糖和二糖含量。色谱条件为: XBridge BEH Amide 柱的尺寸排阻高效液相色谱 (Size exclusion high performance liquid chromatography, SE-HPLC) 液相系统, 柱温 30 °C, 示差检测器, 流动相 (乙腈: 70%, v/v), 流速 0.80 mL/min, 进样量为 10.00 μ L。

1.3.4 游离氨基酸含量测定

游离氨基酸含量的测定参考武盟等^[10]的方法。将 2.00 g 冻干发酵芋泥与 25.00 mL 5% 三氯乙酸混合, 30 min 超声波提取, 10 000 g 离心 10 min 后使用两层滤纸过滤, 上清液 10 000 g 离心 10 min 后用邻苯二醛进行柱前衍生, 然后使用 HPLC 进行游离氨基酸分析^[11]。色谱条件为: ODS Hypersil 色谱柱、柱温 40 °C、紫外检测器 (波长为 338 nm)、流动相 (甲醇: 乙腈: 醋酸钠=1 : 2 : 2 (v: v: v))、流速为 1.00 mL/min、进样量为 10.00 μ L。

1.4 乳酸菌发酵芋泥面包的制备

面包面团配方以小麦粉 100 g 为基准, 将芋泥以质量分数 5%、10%、15% 的添加量来替代小麦粉, 同时添加糖 10%、盐 1%、黄油 5%、酵母 2% 制作面团。测定芋泥面团含水量, 使得面包配方加水量保持一致, 均为 60%。将未添加芋泥及发酵芋泥样品为空白组, 添加芋泥样品为对照组, 添加发酵芋泥样品为实验组。使用和面机和面 20 min 取出, 室温下松弛 10 min。将每个面团分割 30.00 g/个, 在醒发箱内 (32 °C、相对湿度 82%) 醒发 1.5 h, 烤箱上/下火温度为 200/190 °C, 烘焙 7 min 制得面包, 冷却至室温后进行测试。

1.4.1 面包面团的粉质特性测定

参考 GB/T 14614—2019 粮油检验小麦粉面

团流变学特性测试粉质仪^[12]。

1.4.2 面包面团的流变特性测定

使用带有 40 mm 平行板探头的流变仪进行测定, 取 5.00 g 面团按压成面片, 流变仪两平板间的距离为 1 mm, 测试温度设置为 25 °C, 压片至 1 mm 后进行刮样并涂抹硅油减少水分挥发, 待平衡 3 min 后进行频率扫描。频率扫描测定: 应变振幅为 0.5%, 温度为 25 °C, 频率设定为 0.1%~10%。测定面团的储能模量 G' 、损耗模量 G'' 。

1.4.3 面包比容和损失率测定

面包比容参考张凤婕等^[13]的方法, 用小米替换法进行测定。

通过计算烘烤前的面团和烘烤后的面包的重量来测定烘焙损失率, 计算公式 (1) 如下:

$$\text{面包损失率} = \frac{(\text{烘烤前面团的质量} - \text{烘烤后面包的质量})}{\text{烘烤前面团的质量}} \quad \text{式(1)}$$

1.4.4 面包质构测定

面包室温冷却 2 h, 取中间 2 片切成 2.00 cm×2.00 cm×1.50 cm 的立方体, 采用 P50 探头进行全质构测试 (Texture profile analysis, TPA) 测试, 测前、后速度 3.00 mm/s, 测定速度 2.0 mm/s, 压缩比例 50%。

1.4.5 面包芯气孔成像分析

面包切成 5.00 mm 厚的薄片, 通过图像扫描仪得到面包图像, 用 Image J 进行分析。图像分辨率: 300 dpi, 取图区域: 3.00 cm×3.00 cm。气孔稠密度 (Cell density, CD) 表示单位面积发酵芋泥面包所含有的瓢芯气孔个数。

$$\text{气孔稠密度} = \frac{\text{气孔数量}}{\text{面包瓢芯组织总面积}} \quad \text{式(2)}$$

气孔表面积分率 (Area fraction, AF) 表示为面包瓢芯气孔总面积与扫描面包瓢芯总面积的百分比, 可间接反映面包产生 CO₂ 的能力以及持气稳定性。

$$\text{气孔表面积分率} = \frac{\text{面包瓢芯气孔总面积}}{\text{面包瓢芯组织总面积}} \times 100\% \quad \text{式(3)}$$

1.5 数据处理

所有测试指标均进行 3 次平行测试。使用

Excel 2021 进行数据处理, SPSS Statistics 25 进行统计分析, 并采用 Origin 2022 进行作图, 实验显著性水平 $P < 0.05$, 数据差异显著。

2 结果与分析

2.1 乳酸菌发酵芋泥的制备及其发酵过程的研究

2.1.1 菌落总数和 pH 值、TTA 的变化

如图 1 所示, 前 6 h 是乳酸菌的延迟期, 菌落总数增长缓慢。在 6 h 至 10 h 为乳酸菌的对数生长期, 在发酵 10 h~16 h 内乳酸菌进入稳定生长期, 最高菌落数可达 8.39×10^6 CFU/mL, 16 h 后菌落数不再增长, 出现下降趋势。这可能是在发酵后期, pH 逐渐降低, 酸度不断累积, 低于微生物的承受范围导致菌体死亡。另一方面发酵过程中会消耗大量的营养物质, 发酵 16 h 后的发酵环境已不利于菌体的生长, 菌体逐渐衰亡。

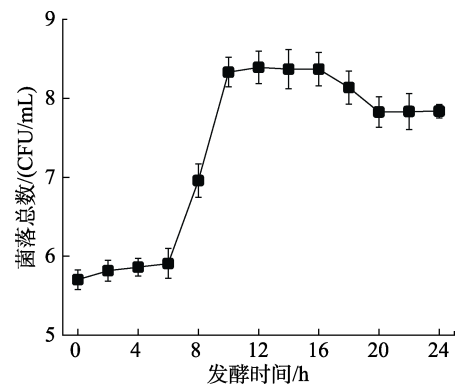


图 1 发酵过程中菌落总数的变化

Fig.1 Changes of cell count of LAB during fermentation

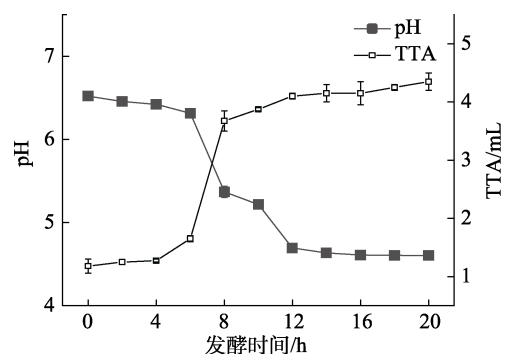


图 2 发酵过程中 pH、TTA 的变化

Fig.2 Changes of pH and TTA during fermentation

由图 2 可知, 乳酸菌发酵芋泥 pH 和 TTA 为负相关。在 10 h 内乳酸菌将发酵芋泥迅速酸化, 这是由于此时的乳酸菌大量繁殖, 产酸能力较强

引起的。发酵芋泥从初始 pH 值 6.50 经过 12 h 发酵后, 降至 4.60~4.70, 这和菌落总数的增加趋势是一致的。在发酵后期 pH 保持稳定波动。与之相反的是, 发酵芋泥的 TTA 值与发酵时间呈正相关变化趋势, 初始 TTA 值 1.2 mL 发酵 20 h 时增加到 4.40 mL, 其上升是由于乳酸菌在不断进行新陈代谢与产酸作用^[14], 这也可以刺激其内部酶活性, 加快形成氨基酸和糖类物质, 利于面包面团的优化。

2.1.2 乳酸乙酸的变化

表 1 可以看出, 发酵芋泥在发酵结束后的乳酸、乙酸含量显著性增加, 这与 pH 值测定结果相同。有机酸起到降低面团 pH 值并激活发酵体系中的酶等作用, 进而影响各项特性^[14]。如有机酸会将淀粉颗粒酸解, 软化面筋, 增强面团的吸水性, 提高面团的弹性和柔软性; 有机酸的增加还能抑制致病菌的生长繁殖, 延长面包的货架期。未经发酵的芋泥乳酸及乙酸值极低, 在经乳酸菌发酵结束后, 乳酸大幅度增加至 5.21 mg/g、乙酸增加至 4.96 mg/g, 由此证明发酵芋泥可以同时促进乳酸及乙酸的积累, 这与周一鸣等^[15]研究结果一致。植物乳杆菌属于兼性异型发酵菌株, 其利用内部的己糖和戊糖发酵产生乳酸, 后进行戊糖磷酸反应产生乙酸^[16]。发酵熵 (Fermentation quotient, FQ) 为乳酸与乙酸的含量比, 在未发酵前乳酸产量略高于乙酸, 在发酵结束 FQ 下降, 说明乳酸和乙酸的含量差距缩小, 乙酸的增加使其可以赋予面包更丰富的风味。

表 1 发酵过程中有机酸含量的变化

Table 1 Changes of organic acid during fermentation

样品	乳酸/(mg/g)	乙酸/(mg/g)	FQ
未发酵芋泥	0.05±0.00 ^b	0.03±0.01 ^b	1.59±0.25 ^a
发酵芋泥	5.21±0.10 ^a	4.96±0.11 ^a	1.05±0.03 ^b

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下表同。

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

2.1.3 糖代谢的变化

芋泥糖代谢情况见表 2, 未经发酵芋泥中可溶性糖仅含蔗糖和麦芽糖, 且蔗糖含量占可发酵糖总量的 37.92%, 由此推断, 蔗糖是发酵过程中主要能量来源。在发酵后期, 蔗糖分解伴有麦芽

糖与果糖的生成, 乳酸菌对蔗糖的利用率显著, 可达 86.10%。发酵后芋泥 EPS 增长到 2.38 g/kg, 乳酸菌以蔗糖作为供体, 通过葡萄糖基转移酶合成葡聚糖, 进而增加 EPS 含量, 大量糖类和低酸环境使得乳酸菌更倾向于合成 EPS 来增强自我生存能力^[17], EPS 有强大的乳化能力, 可以很好地改善面团内部组织架构, 使得面包组织状态细密均匀。

表 2 发酵过程中糖代谢变化

Table 2 Changes of sugar metabolism during fermentation

样品	可发酵糖/%			EPS/(g/kg)
	蔗糖	麦芽糖	果糖	
未发酵芋泥	37.92±1.76 ^a	1.47±0.05 ^b	-	1.43±0.06 ^a
发酵芋泥	5.28±0.42 ^b	2.38±0.11 ^a	1.15±0.08 ^a	2.38±0.09 ^a

注: -表示未测出。

Note: - indicates not measured.

2.1.4 游离氨基酸含量的变化

游离氨基酸是乳酸菌发酵分解蛋白和代谢糖类等能源物质, 产生的一种对最终产品的风味、营养与感官品质都具有重要影响^[18]的代谢产物。如表 3 所示, 乳酸菌发酵使发酵芋泥的氨基酸整

表 3 发酵过程游离氨基酸变化

Table 3 Changes of free amino acid content during fermentation

氨基酸	未发酵芋泥	发酵芋泥
Asp (天冬氨酸)	69.00±1.20 ^b	97.00±4.50 ^a
Thr (苏氨酸) *	31.00±1.10 ^b	48.00±1.60 ^a
Scr (丝氨酸)	61.00±0.40 ^b	96.00±3.40 ^a
Glu (谷氨酸)	70.00±2.60 ^a	78.00±5.50 ^a
Gly (甘氨酸)	3.00±0.20 ^b	6.00±0.50 ^a
Ala (丙氨酸)	22.00±1.60 ^b	39.00±1.45 ^a
Cys (缬氨酸) *	59.00±2.70 ^b	84.00±4.16 ^a
Val (蛋氨酸) *	14.00±0.08 ^b	23.00±1.51 ^a
Ile (异亮氨酸) *	38.00±2.12 ^b	57.00±2.84 ^a
Leu (亮氨酸) *	51.00±2.10 ^b	75.00±3.39 ^a
Tyr (酪氨酸)	42.00±1.79 ^b	58.00±1.12 ^a
Phe (苯丙氨酸) *	44.00±2.60 ^b	63.00±4.20 ^a
Lys (赖氨酸) *	39.00±1.90 ^b	54.00±3.90 ^a
His (组氨酸)	24.00±0.51 ^b	34.00±1.87 ^a
Arg (精氨酸)	176.00±2.80 ^b	225.00±5.97 ^a
Pro (脯氨酸)	9.00±0.24 ^b	15.00±1.10 ^a
必需氨基酸	300	438

注: 同行不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), *代表为必需氨基酸。

Note: Different letters of peers indicated significant differences ($P<0.05$), * represented essential amino acids.

体含量有不同程度的提升,必需氨基酸含量相比发酵前提升了 46%。其原因可能是酸性环境下蔗糖降解促进了有机酸的产生,进而激活芋泥中内源性蛋白酶的活性,促进多肽分解为游离氨基酸。作为风味物质的前体物质,游离氨基酸的增加可以优化面包整体风味和口感。

2.2 发酵芋泥对面包品质的影响

2.2.1 面团粉质特性和流变特性

粉质特性可以反映不同添加量芋泥及发酵芋泥对面团加工性质。如表 4 所示,未发酵芋泥的增加使面团的吸水率与稳定时间显著升高。吸水率和形成时间从空白组的 62.0%、10.06 min 增加至 65.40%、18.90 min,原因是芋泥中蛋白质和膳食纤维较多,膳食纤维较面筋蛋白亲水性更强,会优先进行吸水膨胀直至水合完全后,水分子和面筋蛋白才开始进行相互作用,导致面团形成时间延长^[19]。

由于乳酸菌的加入产生 EPS,可以增大面团

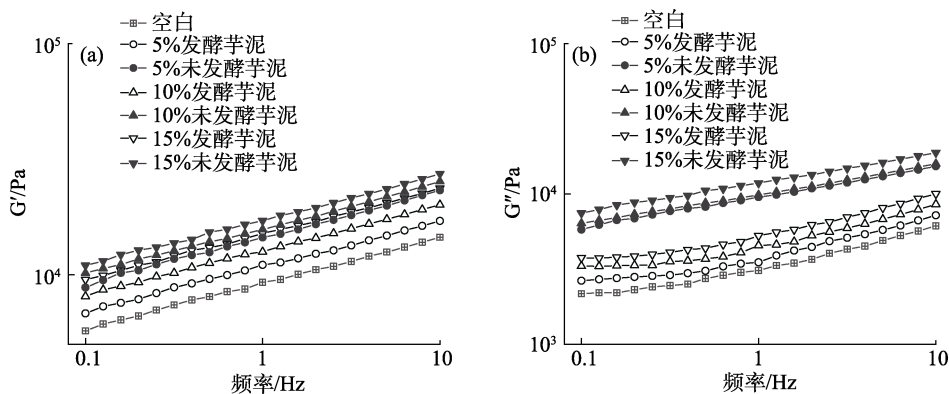
吸水率,而酸化作用弱化面筋蛋白结构,减少纤维与面筋之间的吸水竞争,降低吸水率,二者相互作用使得添加 5%和 10%发酵芋泥组的吸水率和空白组相比无显著性差异。弱化度代表面团内部面筋的耐破坏程度。未发酵芋泥弱化度高于空白组和发酵芋泥组,说明添加未发酵芋泥可导致面团面筋弱,面团成品内部容易坍塌。

频率扫描结果如图 3 所示,所有面团样品 G' 和 G'' 存在频率依赖关系,且 G' 大于 G'' ,表明面团样品的类固体行为占主导地位。 G' 值越大,面团弹性越强, G'' 值越大,面团粘性越强。面团 G' 、 G'' 与添加发酵和未发酵芋泥量呈正相关。随着发酵芋泥加入,面团粘弹性出现显著下降,其中粘性下降趋势明显。结合面团的粉质实验结果,发酵芋泥的增加会在一定程度上弱化芋泥中淀粉分子与面团中面筋蛋白的交联能力,但维持面团的粘弹性不发生明显变化,这与 Chochkov 等^[20]研究一致。

表 4 面团粉质特性的影响

Table 4 Changes of farinograph characteristics of dough

组别	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	弱化度/FU
空白	62.00±0.32 ^d	10.06±0.24 ^b	19.15±0.21 ^b	35.50±1.15 ^a
5%未发酵芋泥	63.50±0.56 ^b	10.47±0.53 ^b	22.83±0.74 ^a	62.67±4.04 ^c
10%未发酵芋泥	65.37±0.23 ^a	12.73±1.09 ^b	22.87±0.27 ^a	63.67±1.02 ^c
15%未发酵芋泥	65.40±0.52 ^a	18.90±0.61 ^a	22.67±0.61 ^a	63.00±3.25 ^c
5%发酵芋泥	62.37±0.33 ^d	2.43±0.15 ^c	18.37±0.50 ^b	44.33±3.26 ^b
10%发酵芋泥	62.23±0.19 ^d	2.37±0.25 ^c	16.07±1.30 ^c	58.33±3.15 ^c
15%发酵芋泥	62.70±0.45 ^c	2.33±0.06 ^c	14.53±1.60 ^c	60.67±3.42 ^c



注: (a) 储能模量 G' ; (b) 损耗模量 G'' 。

Note: (a) storage modulus G' ; (b) loss modulus G'' .

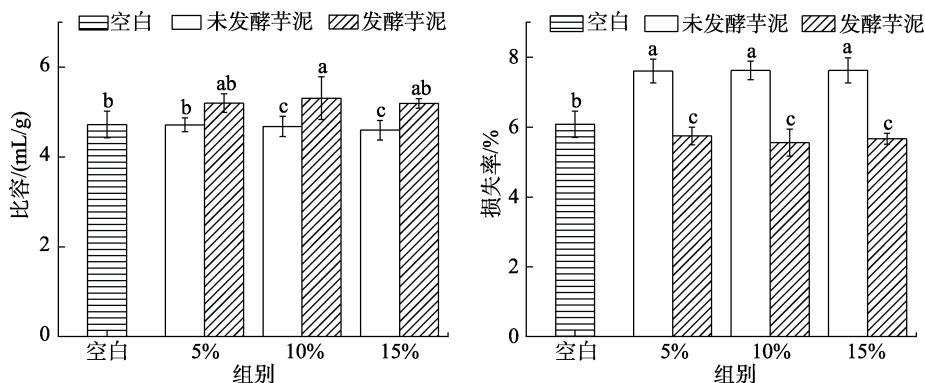
图 3 面团流变特性的变化

Fig.3 Changes of the rheological properties of dough

2.2.2 面包比容和损失率

影响比容因素有面团流变特性和 CO_2 的量等, 芋泥中淀粉、膳食纤维含量丰富, 会减少体系中的面筋含量, 影响面包的稳定性, 减弱持气效果。如图 4 所示, 在未发酵芋泥的添加量超过 10% 后, 面包比容较空白组显著减小。加入发酵芋泥后, 面包比容呈先升后降的趋势, 并在 10%

添加量达到最大值。发酵芋泥内部的乳酸菌发酵使得 CO_2 积累, 提高面团产气能力, 面团内部 pH 值相对适宜, 面筋结构软化使面团弹性增强, 面包比容也随之增大。强酸环境下, 面筋蛋白、淀粉等主要结构形成物会发生过度水解使面团产气过量, 导致面包结构弱化, 最终面包比容下降、损失率升高。



注: 不同字母表示组别之间的差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicated significant differences between groups ($P < 0.05$).

图 4 面包比容及损失率的变化
 Fig.4 Changes of specific volume and loss rate of bread

2.2.3 面包质构

面包硬度增大表明面包干瘪、缺少弹性; 黏着性变强表明面包内部更加黏着紧密, 不利于醒发; 咀嚼性增强表明入口所要施加的力更大, 面包缺少绵软的口感, 以上都是对面包品质的不利影响。如表 5 所示, 与空白组相比, 添加未发酵芋泥的面包的硬度、黏着性有不同程度的升高。这是由于芋泥中存在大量淀粉和纤维, 面筋结构较差。而添加发酵芋泥的面包硬度、黏着性、咀嚼性都显示出不同程度的下降趋势。添加量 10% 的发酵芋泥面包硬度较空白组降低 28.74%、黏着

性降低 26.16%、咀嚼性降低 38.58%。添加量超过 10% 后测定指标的数值均有所增加, 证明发酵芋泥添加量为 10% 是最优组, 推测过量发酵芋泥会对面包整体结构起反作用。

2.2.4 面包瓤芯结构特性

不同面包瓤芯结构如表 6 所示。CD 值与芋泥面包发酵时间、原料成分、和面搅拌过程及面筋蛋白与芋泥淀粉分子相互作用等方面有关, CD 值相对越大, 代表面包瓤芯组织结构越细腻。不同面包瓤芯结构如表 6 和图 5 所示, 随着未发酵芋泥的添加, CD 值有不同程度的降低, 这证明芋

表 5 面包的质构特性

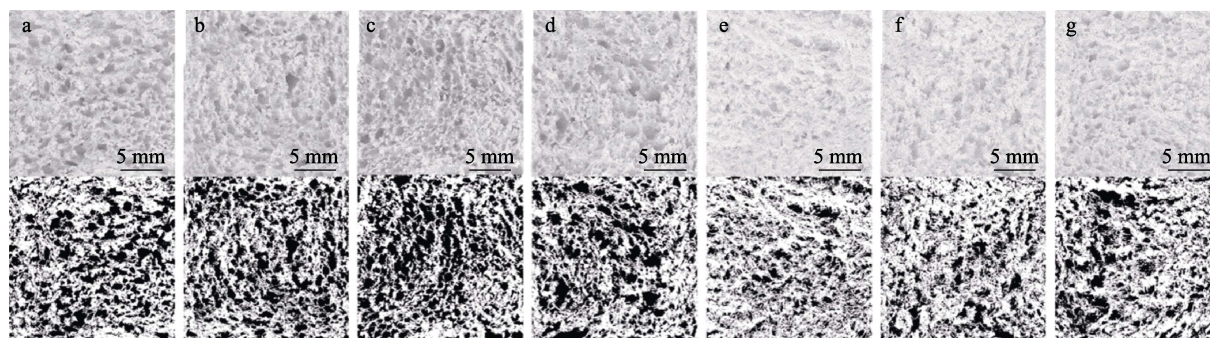
Table 5 Changes of specific volume and loss rate of bread

组别	硬度/g	黏着性	咀嚼性
空白组	195.61±14.23 ^c	145.92±4.08 ^b	133.55±2.42 ^b
5%未发酵芋泥	198.07±6.73 ^c	146.38±4.63 ^b	133.68±3.83 ^b
10%未发酵芋泥	218.12±8.87 ^b	154.19±2.58 ^b	135.29±5.32 ^b
15%未发酵芋泥	237.32±13.57 ^a	165.54±3.95 ^a	147.14±6.70 ^a
5%发酵芋泥	153.05±12.35 ^d	104.27±7.98 ^d	85.27±7.55 ^d
10%发酵芋泥	139.39±11.35 ^d	107.75±8.92 ^d	82.02±4.29 ^d
15%发酵芋泥	181.58±9.21 ^c	130.71±5.25 ^c	110.60±7.59 ^c

表 6 不同芋泥面包瓤芯结构成像分析结果

Table 6 The results of image analysis of different taro paste bread crumb structure

面包	CD/(cell/cm ²)	AF/%
空白	74.31±5.60 ^c	33.69±1.31 ^a
5%未发酵芋泥	45.21±2.71 ^b	31.46±1.11 ^a
10%未发酵芋泥	51.83±1.99 ^b	32.63±1.92 ^a
15%未发酵芋泥	32.04±4.18 ^a	32.43±1.42 ^a
5%发酵芋泥	71.84±0.49 ^c	42.93±1.39 ^b
10%发酵芋泥	74.08±3.25 ^c	46.04±0.43 ^c
15%发酵芋泥	73.66±4.23 ^c	46.38±1.21 ^c



注：a 为空白组，b~d 为添加未发酵芋泥组（依次为 5%、10%、15%添加量），e~g 为添加乳酸菌发酵芋泥组（依次为 5%、10%、15%添加量）。

Note: a is the blank group, b~d is the group with unfermented taro paste (in order of 5%, 10% and 15% addition), e~g is the group with lactobacilli fermented taro paste (in order of 5%, 10% and 15% addition).

图 5 不同芋泥面包芯成像分析

Fig.5 Analysis pictures of different taro paste bread

泥会对面包瓤芯结构有一定破坏。发酵芋泥的添加对面包瓤芯没有显著负面影响。空白组及发酵芋泥组的面包芯气孔呈较规则的长圆形孔隙，整体呈现致密均一的组织状态。与之相反的是加入芋泥的面包瓤芯气孔呈现不规则破裂空洞。

3 结论

芋泥经 TR22 型植物乳杆菌发酵 10 h 时迅速酸化，酸化程度高。与未发酵芋泥相比，发酵后的芋泥中乳酸、乙酸、糖代谢产物和游离氨基酸数量均显著性增大。将发酵芋泥加入面团中，可以使面团吸水性增强，面团弹性和柔软性得到提高，面筋蛋白交联能力得到弱化。此外，在面包中添加发酵芋泥有利于增加面包的比容大小，降低烘焙损失率，改善面包质地硬度、减少内部芯囊气孔个数。因此，添加发酵芋泥可以进一步优化面筋蛋白的构建能力，增加面团延长性，给予面包更多的营养物质，其中添加 10% 发酵芋泥对面包的优化效果最显著。

参考文献：

- [1] 张书静, 王展, 沈汪洋, 等. 膳食纤维对面团和面筋蛋白影响的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(12): 7-9.
ZHANG S J, WANG Z, SHEN W Y, et al. Research progress on the effect of dietary fiber on dough and gluten protein[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(12): 7-9.
- [2] 纪琳媛. 乳酸菌发酵剂在发酵面团中的应用[J]. 现代食品, 2016(17): 11-14.
JI L Y. Application of lactic acid bacteria starter in fermented

dough[J]. Modern Food, 2016(17): 11-14.

- [3] 张怡芸, 王兴奔, 韩文, 等. 乳酸菌发酵液对面团发酵特性及面包品质的影响[J]. 美食研究, 2024, 41(1): 95-100.
ZHANG Y Y, WANG X B, HAN W, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation broth on dough fermentation characteristics and bread quality[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2024, 41(1): 95-100.
- [4] 邵童, 王兴奔, 吴冉, 等. 不同乳酸菌发酵豆乳对面团发酵特性及馒头品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 171-178.
SHAO T, WANG X B, WU R, et al. Effect of soymilk fermented by different lactic acid bacteria on dough fermentation characteristics and steamed bun quality[J]. Food Science, 2023, 44(24): 171-178.
- [5] 钟京, 王凤, 刘娜, 等. 乳酸菌发酵麸皮酸面面对高纤维面包面团流变发酵学及烘焙特性的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(9): 49-54+57.
ZHONG J, WANG F, LIU N, et al. Effect of bran fermented by *Lactobacillus* on the rheofermentation and baking properties of high-fiber bread dough[J]. Science and Technology of Food industry, 2013, 34(9): 49-54+57.
- [6] 王立, 虞桢芳, 钱海峰, 等. 天然酵母面包研究现状及发展趋势[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 201-208.
WANG L, YU Y F, QIAN H F, et al. Study on sourdough bread[J]. Food & Machinery, 2016, 32(9): 201-208.
- [7] KATINA K, SALMENKALLIO-MARTTILA M, PARTANEN R, et al. Effects of sourdough and enzymes on staling of high-fibre wheat bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2005, 39(5): 479-491.
- [8] TANG, XIAO J, LIU, et al. Impact of in situ formed exopolysaccharides on dough performance and quality of Chinese steamed bread[J]. Lwt - Food Science & Technology, 2018, 96: 519-525.
- [9] VALLABHA V S, TAPAL A, SUKHDEO S V, et al. Effect of arginine: lysine ratio in free amino acid and protein form on

- L-NAME induced hypertension in hypercholesterolemic Wistar rats[J]. RSC Advances, 2016, 6: 73 388-73 398.
- [10] 武盟, 曹伟超, 程新, 等. 高产 α -半乳糖苷酶乳酸菌发酵对鹰嘴豆酸面团生化特性及其面包烘焙品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 146-153.
- WU M, CAO W C, CHENG X, et al. Effect of fermentation with high-yield α -galactosidase-producing lactic acid bacteria on biochemical properties and bread making characteristics of chickpea sourdough[J]. Food Science, 2021, 42(10): 146-153.
- [11] 徐丹. 旧金山乳杆菌对酸面团面包品质影响机理及面包风味改良的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- XU D. Study on the mechanism of *Lactobacillus sanfranciscensis* on sourdough bread quality and improvement of its bread flavor[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [12] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化委员会. 粮油检验小麦粉面团流变学特性测试粉质仪法: GB/T 14614—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Inspection of grain and oils-Doughs rheological properties determination of wheat flour Farinograph test: GB/T 14614—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [13] 张凤婕, 张天语, 曹燕飞, 等. 响应面法优化甘薯泥馒头加工工艺[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(1): 40-45.
- ZHANG F J, ZHANG T Y, CAO Y F, et al. Optimization of processing technology of sweet potato puree steamed bread by response surface method[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(1): 40-45.
- [14] ÄNZLE M G. Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation[J]. Food Microbiology, 2014, 37: 2-10.
- [15] 周一鸣, 欧阳博雅, 向茜, 等. 不同乳酸菌发酵酸面团对面包品质及风味的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 176-183.
- ZHOU Y M, OUYANG B Y, XIANG X, et al. Effect of sourdough fermented by different lactic acid bacteria on bread quality and flavor[J]. Food Science, 2022, 43(2): 176-183.
- [16] 李云龙, 欧阳博雅, 周一鸣, 等. 植物乳杆菌 ST-III 发酵苦荞面团中蛋白质降解变化的研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(8): 111-119.
- LI Y L, OUYANG B Y, ZHOU Y M, et al. Changes of protein degradation in tartary buckwheat dough fermented by *Lactobacillus plantarum* ST-III[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(8): 111-119.
- [17] 郭小雨, 张涛. 富集 γ -氨基丁酸鹰嘴豆酸面团的工艺及其流变特性[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(15): 215-220.
- GUO X Y, ZHANG T. Process of enriching γ -aminobutyric acid chickpea sourdough and its rheological properties[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(15): 215-220.
- [18] 马子琳, 曹伟超, 张宾乐, 等. 产单宁酶乳酸菌发酵红豆、扁豆酸面团的生化特性及其对馒头体外消化的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(19): 85-93.
- MA Z L, CAO W C, ZHANG B L, et al. Biochemical characteristics of tannase-producing LAB fermented red beans and lentils sourdough and its effects on in vitro digestibility of steamed bread[J]. Science and Technology of Food industry, 2020, 41(19): 85-93.
- [19] MOHEBBI Z, HOMAYOUNI A, AZIZI M H, et al. Effects of beta-glucan and resistant starch on wheat dough and prebiotic bread properties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 55(1): 101-110.
- [20] CHOCHKOV R M, SAVOVA-STOYANOVA D, PAPAGEORGIOU M, et al. Effects of teff-based sourdoughs on dough rheology and gluten-free bread quality[J]. Foods, 2022, 11(7): 1-12. 