高铭, 王成祥, 张美娜, 等. 不同乳酸菌发酵剂对馒头消化特性及感官品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 183−192. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110337
GAO Ming, WANG Chengxiang, ZHANG Meina, et al. Effect of Different Lactic Acid Bacteria Starter Cultures on the Quality of Sourdough and Steamed Bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 183−192. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110337

·生物工程·

不同乳酸菌发酵剂对馒头消化特性及感官品质的影响

高　铭[1], 王成祥[2], 张美娜[2], 曾雪莹[1], 刘士伟[1], 刘园园[1], 马喜山[1], 孙锋锋[2], 柳　嘉[1], 段盛林[1,*]
（1.中国食品发酵工业研究院有限公司, 北京 100015;
2.河北同福健康产业有限公司, 河北石家庄 051430）

摘　要: 为研究不同的乳酸菌发酵对馒头的消化特性及感官品质的影响，采用植物乳杆菌、发酵乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、罗伊氏乳杆菌 4 种乳酸菌发酵剂分别发酵制备酸面团，然后加入商业酵母继续发酵并制备馒头。考察了酸面团的发酵时间、有机酸含量和对 α-淀粉酶的抑制率，同时对馒头的淀粉体外消化率，体外模拟发酵产物以及感官品质进行了比较分析。结果表明，植物乳杆菌和发酵乳杆菌面团 pH 降至 4 的时间较短，发酵效率更高；发酵乳杆菌酸面团乙酸含量最高，鼠李糖乳杆菌酸面团的乳酸含量最多；4 种酸面团均对 α-淀粉酶有抑制作用，其中发酵乳杆菌酸面团的抑制率是其他酸面团的 2 倍以上，约为 15.13%。通过体外淀粉消化试验发现，罗伊氏乳杆菌馒头的淀粉消化率比白馒头更高，而其他乳杆菌馒头的消化率则明显更低；发酵乳杆菌馒头的快消化淀粉占比 13.51%，仅为白馒头的 0.40 倍；抗性淀粉占比为 64.29%，约为白馒头的 1.70 倍。通过体外模拟发酵试验发现，植物乳杆菌馒头更有助于提高肠道短链脂肪酸（short chain fatty acids，SCFAs）的含量；而发酵乳杆菌对肠道益生菌的增殖效果最佳。感官品质分析显示，发酵乳杆菌和罗伊氏乳杆菌对馒头比容及质构的改善相较于其他菌更为显著；鼠李糖乳杆菌、罗伊氏乳杆菌、发酵乳杆菌发酵馒头的整体感官评价优于白馒头，其中发酵乳杆菌对馒头的结构有明显改善，且电子鼻显示其风味更独特；电子舌结果显示鼠李糖乳杆菌馒头的咸鲜味更有特点。综合而言，发酵乳杆菌对馒头消化特性及感官品质的改善效果最全面。

关键词: 乳酸菌, 酸面团, 馒头, 淀粉体外消化, 体外模拟发酵, 感官评价
中图分类号: TS210.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)08−0183−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110337
本文网刊:

Effect of Different Lactic Acid Bacteria Starter Cultures on the Quality of Sourdough and Steamed Bread

GAO Ming[1], WANG Chengxiang[2], ZHANG Meina[2], ZENG Xueying[1], LIU Shiwei[1], LIU Yuanyuan[1], MA Xishan[1], SUN Fengfeng[2], LIU Jia[1], DUAN Shenglin[1,*]
（1.China National Research Institute of Food and Fermentation Industries Co., Ltd., Beijing 100015, China;
2.Hebei Tongfu Health Industry Co., Ltd., Shijiazhuang 051430, China）

Abstract: In order to investigate the effect of fermentation with different lactic acid bacteria (LAB) on the digestibility and sensory characteristics of steamed bread, four LAB starter cultures, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus fermentum*, *Lactobacillus rhamnosus*, and *Lactobacillus reuteri* were respectively employed for sourdough preparation. Commercial yeast was subsequently added for further fermentation and steamed bread production. The fermentation time, organic acid content, and inhibition rate of α-amylase in sourdough were investigated. Additionally, a comparative analysis was performed on the *in vitro* starch digestibility, simulated *in vitro* fermentation products, and sensory attributes of the steamed

收稿日期: 2024−11−26
基金项目: 国家重点研发计划（2022YFF1100504-01）。
作者简介: 高铭（1992−）, 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 功能食品研发, E-mail: 339077388@qq.com。
*** 通信作者:** 段盛林（1968−）, 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向: 功能食品研发与健康管理研究, E-mail: dslbeijing@163.com。

bread. The results showed that the sourdough fermented by *L. plantarum* and *L. fermentum* took a shorter time to reach pH 4, thereby exhibited a higher fermentation efficiency. The *L. fermentum* sourdough contained the highest acetic acid content, and the *L. rhamnosus* sourdough contained the highest lactic acid content. All the 4 sourdoughs showed an inhibitory effect on α-amylase activity. The inhibition rate of *L. fermentum* sourdough was more than 2 times than that of other sourdoughs, reaching approximately 15.13%. *In vitro* starch digestion test indicated that the starch digestibility of *L. reuteri* steamed bread was higher than that of white steamed bread, whereas the digestibility of steamed bread fermented by other LAB was significantly lower. The proportion of rapidly digestible starch in *L. fermentum* steamed bread was 13.51%, which was 0.40 times that of white steamed bread. The proportion of resistant starch was 64.29%, which was about 1.70 times that of white steamed bread. *In vitro* fermentation test showed that *L. plantarum* steamed bread was more effective in increasing the amount of intestinal short-chain fatty acids (SCFAs) compared to others. *L. fermentum* showed the best effect on the proliferation of intestinal probiotics. Sensory characteristic analysis revealed that *L. fermentum* and *L. reuteri* improved the specific volume and texture of steamed bread more significantly than other cultures. The overall sensory evaluation of steamed bread fermented with *L. rhamnosus*, *L. reuteri*, and *L. fermentum* was superior to that of white steamed bread, with *L. fermentum* demonstrating a significant enhancement in the structure of the steamed bread and the electronic nose showed that its flavor was more unique. Additionally, the result of electronic tongue indicated that *L. rhamnosus* steamed bread had a more distinctive salty and umami taste. In summary, *Lactobacillus fermentum* demonstrates the most comprehensive improvement effects on both the digestive characteristics and sensory qualities of steamed bread.

Key words: lactic acid bacteria; sourdough; steamed bread; starch digestion *in vitro*; simulation fermentation *in vitro*; sensory evaluation

馒头是深受我国人们喜爱的传统主食。近年来，随着国家经济的快速发展和消费升级的趋势，人们的健康饮食理念不断提高，越来越多的消费者将健康营养作为购买食品的主要考虑因素之一。风味多元、营养均衡的馒头更加受到消费者喜爱。其中，使用酸面团制备的老面馒头因具有一定的健康功效且风味独特，得到了广泛关注。

酸面团根据具体的发酵工艺可分为三种类型：Ⅰ型采用传统自然发酵法，通过面粉与水的混合实现微生物（乳酸菌、酵母菌等）的自然富集与发酵，例如老面；Ⅱ型利用乳酸菌或乳酸菌复配酵母菌对原料进行发酵；Ⅲ型则是在Ⅱ型基础上经干燥处理制得的。通过酸面团发酵，不仅可以改善面制品的组织结构、营养成分和感官特性，还能增加部分生物活性物质的含量，延缓淀粉水解，延长产品的保质期限，提高矿物质的生物利用率[1−2]。

酸面团面制品在制备过程中主要参与发酵的微生物是酵母菌和乳酸菌，其中酵母菌的发酵作用主要是产生气体，使面团蓬松，而乳酸菌则通过发酵产生了有机酸、胞外多糖、酶类等多种代谢产物[3−4]。有机酸可抑制 α-淀粉酶活性，促使淀粉结构重组并提升抗性淀粉含量，从而有效稳定餐后血糖波动[5−6]；同时，发酵产生的醇类、醛类、酯类及氨基类等风味物质能显著提升产品的风味层次与味觉丰富度[7]。乳酸菌发酵过程还能优化蛋白与淀粉的溶解特性，延缓面团老化进程，增强保水能力与粘弹性[8]。此外，酸面团制备的馒头或酸面包中存在无活性的乳酸菌及其代谢物（后生元），可调节肠道菌群平衡，对维护肠道健康具有积极意义[9−10]。与仅依赖酵母发酵的普通馒头相比，乳酸菌发酵剂在改善面团功能特性、优化产品感官品质及强化健康功效方面具有不可替代的核心作用。

酸面团中乳酸菌种类繁多，目前已在传统酸面团中鉴定出 80 余种乳酸菌[4,11]。其中，植物乳杆菌可显著改善面制品整体品质，在国内外应用最为广泛[12−15]；鼠李糖乳杆菌能有效分解谷物膳食纤维，改善产品功能特性[16]；发酵乳杆菌、罗伊氏乳杆菌则对产品的质构优化和风味提升具有积极作用[17−19]。尽管已有相关研究探讨了单一或复配乳酸菌发酵对酸面团面制品品质及风味的影响，但在同一发酵工艺条件下，不同乳酸菌发酵对馒头品质、消化特性以及其他健康功效的影响的对比研究存在空白，乳酸菌中对面制品品质改良、淀粉酶消化特性改善以及维护肠道健康等方面的优势菌还未明确。因此本文选取上述 4 种乳酸菌分别发酵酸面团并制备馒头，探究 4 种乳酸菌发酵对馒头品质的影响，为馒头的工业化、标准化生产及商业化发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小麦粉　益海嘉里香满园美味富强小麦粉；食用碱　北京古松经贸有限公司；高活性酵母（低糖型）　安琪酵母（亦峰）有限公司；罗伊氏乳杆菌 GL-104（活力 1500 亿 CFU/g）、发酵乳杆菌 TFS331（活力 1500 亿 CFU/g）　锦乔生物科技有限公司；植物乳杆菌 Lp90（活力 10000 亿 CFU/g）、鼠李糖乳杆菌 LRa05（活力 6000 亿 CFU/g）　微康益生菌（苏州）股份有限公司；唾液淀粉酶（5 U/mg）、胃蛋白酶（250 U/mg）、胰酶（4×USP）、淀粉葡萄糖苷酶（120 U/mg）、α-淀粉酶（10.2 U/mg）　美国 Sigma-aldrich 公司；3 号胆盐　上海麦克林生化科技股份有限公司；可溶性淀粉、3,5-二硝基水杨酸（DNS）试剂、淀粉含量检测试剂盒（BC0705）、黏蛋白、L-半胱氨酸　北

京索莱宝科技有限公司；F00-1-1 葡萄糖测定试剂盒　南京建成生物工程研究所；磷酸盐（PBS）试剂　上海源叶生物科技有限公司；蛋白胨、酵母提取物　奥博星生物技术有限公司；乙醚　色谱纯，国药集团化学试剂有限公司；其他化学试剂均为分析纯，北京化工厂。

TS-5000Z 型电子舌　日本 Insent 公司；FOX 4000 型电子鼻　法国 Alpha M.O.S 公司；20 mL 顶空瓶　上海安谱实验科技股份有限公司；刺入式 pH 检测计　东莞万创电子制品有限公司；ARB120 型电子天平　美国 OHAUS 公司；SEC-P 型恒温培养箱　江苏三麦食品机械有限公司；HM740 型和面机　Hauswirt 厨师机；TA.XTplus 型质构仪　英国 Stable Micro Systems 公司；GC-2010 型气相色谱仪、LC-20A 型高效液相色谱仪　日本岛津公司；LG-1.0 型冻干机　沈阳航天新阳速冻设备制造有限公司；L18-P510 型高速破壁调理机　九阳股份有限公司；HC-3018R 型离心机　安徽中科中佳科学仪器有限公司；CFX Connect Real-Time PCR 系统　美国 BIO-RAD 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　酸面团的制备及其 pH 测定　将 500 g 面粉、260 g 水、菌粉（按照每克面粉对应 0.3 亿 CFU 活力折算）混合均匀，使用和面机将面团揉制光滑，于 37 ℃，湿度 90% 的条件下发酵至 pH4[20−21]，分别制备植物乳杆菌酸面团、发酵乳杆菌酸面团、罗伊氏乳杆菌酸面团及鼠李糖乳杆菌酸面团。面团 pH 通过刺入式 pH 计进行测试。

1.2.2　有机酸的测定　冻干样品制备：使用冻干机制备 4 种酸面团的冻干粉，将 100 g 酸面团置于−50 ℃速冻仓预冻 4 h 后，在冷阱温度<−40 ℃，真空压力为 50 Pa 的真空条件下进行冻干，结束后将样品进行粉碎，过 60 目筛，得到酸面团冻干粉。参照 Rizzello 等[22] 的方法，取 10 g 酸面团冻干粉，溶解于 40 mL 蒸馏水中，在 20 ℃、250 W 下超声提取 2 h，混合物在 4 ℃、10000×g 下离心 10 min，而后取 2 mL 上清液在 4 ℃、10000×g 下离心 30 min，最后取上清液置于液相瓶中待测。在 25 ℃、0.8 mL/min 的流速下，使用 C_{18} 柱（5 μm×4.6 mm×250 mm）通过超高效液相色谱法测定酸面团中的乳酸和乙酸含量。0.1% 磷酸作为流动相，注射量为 10 μL。使用紫外检测器（214 nm）进行检测。

1.2.3　α-淀粉酶抑制试验　参考 1.2.1 酸面团的制备方法，制备不加菌粉且不经过发酵的白面团。取白面团和 4 种乳酸菌面团上锅蒸 25 min，蒸熟后经冻干、打粉（冻干工艺参考 1.2.2），分别为空白组和样品组。参照吴小霞[21] 的方法进行操作，其中空白背景组和样品背景组不添加 α-淀粉酶酶液；酶标仪测定 540 nm 处吸光度值以 A 表示，α-淀粉酶抑制率的计算公式如下：

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_{样品}-A_{样品背景}}{A_{空白}-A_{空白背景}}\right)\times 100$$

式中：$A_{样品}$、$A_{样品背景}$、$A_{空白}$、$A_{空白背景}$分别表示样品组、样品背景组、空白组、空白背景组在 540 nm 处的吸光度值。

1.2.4　馒头的制作　参考传统老面馒头配方制备植物乳杆菌馒头（ZR）、发酵乳杆菌馒头（FR）、罗伊氏乳杆菌馒头（LR）、鼠李糖乳杆菌馒头（SR），添加小麦粉 500 g、酸面团 200 g、酵母 1 g、碱 1.6 g、水 248 g，混合均匀，使用和面机将面团揉制光滑；参考传统白馒头配方制备白馒头（BMT），添加面粉 624 g、酵母 1 g、水 324 g，混合均匀，使用和面机将面团揉制光滑。揉制好的面团均在 37 ℃ 90% 的温度湿度条件下醒发 1 h，然后上锅蒸 25 min，4 种乳酸菌馒头及白馒头制备完成。

1.2.5　馒头淀粉体外消化

1.2.5.1　淀粉含量计算　4 种乳酸菌馒头经冻干成冻干粉样品后，根据淀粉含量检测试剂盒提供的操作方法及试剂进行淀粉含量的检测。

1.2.5.2　淀粉体外模拟消化试验　参考 Brodkorb 等[23] 和 Ding 等[24] 的方法配制模拟口腔液、胃液、小肠液。根据 1.2.5.1 的测试结果，分别称取含 200 mg 淀粉的 BMT、ZR、FR、LR、SR 样品按 1∶1（W/W）加入模拟口腔液混匀，于 200 r/min、37 ℃ 条件下模拟口腔消化 2 min。而后将混合好的样品转移至溶出试验仪中并加入 10 mL 的模拟胃液，在 200 r/min、37 ℃ 条件下模拟胃消化阶段 1 h，随后加入 NaOH 将消化液调至 pH7.0 终止胃消化，并加入 20 mg 淀粉葡萄糖苷酶与 10 mL 模拟肠液充分混匀，于模拟肠消化阶段的 0、20、40、60、90、120、150、180 min 时间点吸取样品 500 μL 到 10 mL 离心管中，加入 4.5 mL 无水乙醇灭酶。将灭酶后的样品于 5000 r/min 离心 5 min 取上清液，用葡萄糖试剂盒测定样品中葡萄糖浓度，测三次平行，取平均值。消化时间为 t 时的淀粉水解率计算公式如下：

$$\text{水解率}(\%)=\frac{G_t\times 0.9}{TS}\times 100$$

式中：0.9 为淀粉与葡萄糖的质量转换系数；G_t 是模拟肠道消化时间为 t 时产生的葡萄糖的量（mg）；TS 为样品中总淀粉的含量（mg）。

1.2.5.3　快消化淀粉、慢消化淀粉、抗性淀粉含量计算　根据消化时间，整个消化过程可分为三个阶段：0~20 min 消化水解的淀粉属于快消化淀粉（rapidly digestible starch, RDS），20~120 min 内消化水解的是慢消化淀粉（slowly digestible starch, SDS），而 120 min 内都未被水解的是抗性淀粉（resistant starch, RS）[25]。参考 Wang 等[26] 的方法，计算馒头中的 RDS、SDS 及 RS 的比例：

$$RDS(\%) = \frac{G_{20\ min} \times 0.9}{TS} \times 100$$

$$SDS(\%) = \frac{(G_{120\ min} - G_{20\ min}) \times 0.9}{TS} \times 100$$

$$RS(\%) = \frac{(TS - G_{120min} \times 0.9)}{TS} \times 100$$

式中：0.9 为淀粉与葡萄糖的质量转换系数，$G_{20\ min}$、$G_{120\ min}$ 分别是模拟肠道消化时间为 20 min 和 120 min 时产生的葡萄糖的量(mg)，TS 为样品中总淀粉的含量(mg)。

1.2.6 馒头体外模拟发酵试验

1.2.6.1 体外模拟发酵试验 参考 Tedeschi 等[27]、Ding 等[24] 及 Chen 等[28] 的方法，具体试验步骤：新鲜的粪便样本由 4 名健康志愿者(没有消化系统疾病，近 3 个月内没有服用抗生素和益生元补充剂)提供。将收集到的粪便样品与 pH7.0 无菌 PBS 缓冲液以 1∶9(w/v)混合稀释，均质 10 min，粪便混合液 1000 r/min，离心 10 min 去除杂质，留取上层浑浊液为粪便发酵液备用；配制 1 L 发酵培养基，准确称量以下成分：NaCl 0.1 g，K_2HPO_4 0.04 g，KH_2PO_4 0.04 g，$MgSO_4$ 0.01 g，$CaCl_2$ 0.01 g，$NaHCO_3$ 2 g，蛋白胨 2.5 g，酵母提取物 4 g，葡萄糖 0.4 g，黏蛋白 2 g，胆盐 0.5 g，Cysteine HCl 0.46 g，Tween-80 2 mL，混合后调至 pH7.0(0.5 mol/L HCl)，121 ℃ 高压湿热灭菌 15 min，冷却后备用；在厌氧培养箱中，将馒头冻干粉配制为 10%(V/V)的溶液，在 10 mL 无菌离心管中加入 4 mL 发酵培养基，0.5 mL 粪便发酵液和 0.5 mL 的不同样品液，混匀后密封，并转移至 37 ℃ 的厌氧恒温培养箱中发酵，以等体积的蒸馏水代替样品组设为空白对照组。在发酵的 0、6、12、24 和 48 h 时收集 4 管以上发酵液，12000 r/min 离心 10 min，发酵上清液和发酵沉淀分开保存于-80 ℃ 冰箱，用于后续 SCFAs 分析和菌群数量分析。

1.2.6.2 体外模拟发酵上清液 SCFAs 含量测定 样品处理：将发酵上清液从−80 ℃ 冰箱取出解冻，充分涡旋后，取 800 μL 发酵上清液并加入 50% 硫酸溶液 200 μL，立即加入 1 mL 乙醚，振荡涡旋 10 s 后，冰上静置 10 min，4 ℃、12000 r/min 离心 10 min，离心结束后轻轻加入无水 $CaCl_2$ 吸水后，吸取上层有机相转移到进样瓶中，过膜(尼龙膜 0.22 μm)，待上机测定。

标准品处理：将系列短链脂肪酸标准品用乙醚配制为 4 种不同浓度梯度的标准品溶液，过膜(尼龙膜 0.22 μm)，待上机测定。

气相检测：采用 CD-2560 色谱柱，测定乙酸、丙酸、丁酸和异戊酸的峰面积，作浓度关于峰面积的标准曲线。具体气相检测参数如下：检测器为氢火焰检测器(Flame ionization detector, FD)，载气为 N_2，流速 30 mL/min，分流比 1∶10，空气流速 400 mL/min，H_2 流速为 40 mL/min。检测器温度 250 ℃，进样口温度 250 ℃，色谱柱初始温度 130 ℃(5 min)，升温至 240 ℃(4 ℃/min)保持 20 min。进样量 1 μL，重复 3 次，作不同浓度 SCFAs 关于峰面积的标准曲线。同样的方法检测样品峰面积，代入标准曲线得到样品中不同 SCFAs 的浓度。

丁酸：y=674663x−9751.3，R^2=0.9991；异戊酸：y=10000000x−2859.9，R^2=0.9993；乙酸：y=301748x−302.63，R^2=0.999；丙酸：y=10000000x−2025.7，R^2=0.9995。

1.2.6.3 发酵沉淀菌群数量测定 采用实时荧光定量绝对定量法测定样品发酵沉淀中乳酸杆菌属(*Lactobacillus*)、双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)、阿克曼氏菌属(*Akkermansia mucinipila*)等有益菌数量。采用上述菌种和总菌的相对应特异性扩增引物，构建各菌种的质粒标准品作为扩增模板，利用特异性引物进行实时荧光绝对定量 PCR(qPCR)，该反应采用实时荧光定量 RT-PCR 系统进行测定，实时荧光定量 PCR 反应体系为 20 μL，其中 SYBR qPCR Master mix 10 μL，10 μmol/L 上下游引物各 0.4 μL，DNA 模板 2 μL，去离子水补足至 20 μL。反应程序：94 ℃ 预变性 2 min；95 ℃ 10 s，60 ℃ 30 s，40 个循环。利用 Cq 值计算拷贝数，结果用 lg(copies·mL^{-1})表示，菌种引物序列见表 1。

表 1 肠道菌群菌属引物序列

Table 1 Sequence of primers for intestinal microbiota

项目	引物名称	引物序列5'-3'
总菌	Uni-F	ACTCCTACGGGAGGCAGCAG
	Uni-R	ATTACCGCGGCTGCTGG
双歧杆菌属	gBifi-F	GTGGAATGTGTAGATATCGGGAAGA
	gBifi-R	ATCCAGCRTCCACCGTTTAC
乳酸菌属	gLac-F	GAGGCAGCAGTAGGGAATCTTC
	gLac-R	GGCCAGTTACTACCTCTATCCTTCTTC
阿克曼氏菌	sAkk-F	CAGCACGTGAAGGTGGGGAC
	sAkk-R	CCTT GCGGTTGGCTTCAGAT

1.2.7 馒头的感官品质

1.2.7.1 馒头比容和质构的分析 比容：将制成的馒头置于室温冷却 1 h，采用小米置换法[29] 测定馒头的体积，比容(mL/g)=体积/质量。

质构：馒头置于室温冷却 1 h 后将馒头的顶部和底部去掉，取馒头的中间部位，切成一个厚度为 2 cm、切面直径约为 4±0.3 cm 的均匀薄片。用质构仪测量馒头的质构特性，测试使用 TPA 模式[30]，SMS P/36R 的探头。参数设置为：测试前的速度 1 mm/s，测试速度 1 mm/s，测试后的速度 5 mm/s，压缩时间 5 s，探头的触发力 5 g。在测试时，馒头片放置时应保持馒头的中心与探头的中心在同一垂直线上，以免使探头受力不均而影响实验结果的正确性。随后通过软件分析出馒头的质构特性参数值，包括：硬度、弹性、内聚性、黏性、咀嚼性及回复性。

1.2.7.2 电子舌测试 取 100 g 馒头，加 300 g 水，用

高速破壁调理机打成均匀浆液，用小型冷冻离心机在 3000 r/min 转速下离心 10 min，取上清液，用 Insent 电子舌检测样品的酸味、甜味、苦味、咸味、鲜味、涩味、苦回味、涩回味及丰富度。

1.2.7.3　电子鼻　Alpha M.O.S 电子鼻包含 18 个传感器，可采集样品的 18 种气味响应值。采集时间 120 s，数据采集延迟 1080 s，进样量 5000 μL，进样速度 1000 μL/s。自动进样仪参数：孵化器 150 s；孵化温度 80 ℃；注射器温度 90 ℃。每个样品做 4 组平行。

1.2.7.4　感官评价　培训并筛选出 10 名具有食品专业知识及良好感官敏锐性的评价员组成评审组，参考 GB/T 35991-2018《粮油检验 小麦粉馒头加工品质评价》及谢水琪等[31] 针对乳酸菌发酵馒头的感官评价方法，依据色泽、口感、外观、气味等方面对馒头进行评价，评分细则如表 2 所示，总评分取 10 位评价员的平均值。

表 2　馒头感官评价评分标准

Table 2　Criteria for sensory evaluation of steamed bread

项目	评价标准	评分(分)
外观	表面光滑对称	12.0~15.0
	中等	8.0~11.0
	表皮粗糙和硬皮质形状不对称	4.0~7.0
色泽	棕色、黄棕色、浅白色	8.0~10.0
	中等	6.0~7.0
	发黄、发灰、发暗	4.0~5.0
结构	纵剖面气孔小、均匀	12.0~15.0
	中等	8.0~11.0
	气孔大而不均匀	4.0~7.0
口感	咀嚼爽口不黏牙	12.0~15.0
	中等	8.0~11.0
	咀嚼不爽口、发黏	4.0~7.0
气味	清香无异味	8.0~10.0
	中等	6.0~7.0
	有异味	4.0~5.0
回弹性	用手指按复原性好	12.0~15.0
	中等	8.0~11.0
	复原性差	4.0~7.0
比容	比容大于或等于2.30 mL/g	20
	比容小于2.30 mL/g	<20，每少0.1扣1分

1.3　数据处理

实验重复 3~4 次；电子鼻数据通过 Alpha Soft 12.45 版数据处理软件对数据进行主成分分析，采用 Origin 2022 软件进行绘图，通过 SPSS（IBM Statistics 22.0）软件进行显著性分析，$P<0.05$ 表示显著性差异。

2　结果与分析

2.1　酸面团有机酸含量及对 α-淀粉酶抑制作用

如表 3 所示，不同乳酸菌的产酸效率存在明显差异。其中，植物乳杆菌和发酵乳杆菌的产酸效率较强，能使面团 pH 迅速降至 4；而鼠李糖乳杆菌的产酸效率最低。

表 3　酸面团发酵时间、有机酸含量及 α-淀粉酶抑制率

Table 3　Fermentation time, organic acid content and α-amylase inhibition rate of sour dough

指标	植物乳杆菌面团	发酵乳杆菌面团	罗伊氏乳杆菌面团	鼠李糖乳杆菌面团
发酵时间(h)	6.5	6.5	8.5	11
乳酸含量(mg/g)	7.11±0.09^{c}	6.24±0.01^{b}	5.54±0.11^{a}	7.45±0.05^{d}
乙酸含量(mg/g)	–	1.12±0.06^{c}	0.62±0.02^{b}	0.40±0.00^{a}
α-淀粉酶抑制率(%)	6.13±0.71^{a}	15.13±2.32^{b}	7.09±1.67^{a}	7.30±5.91^{a}

注：同行不同字母表示差异显著（$P<0.05$），“–”代表未检出。

乳酸菌发酵酸面团产生的有机酸主要包括乳酸和乙酸。当 pH 为 4 时，酸面团中乳酸含量普遍高于乙酸，具体含量因菌种类型而异：兼性异型发酵菌（鼠李糖乳杆菌、植物乳杆菌）主要生成乳酸，而专性异型发酵菌（发酵乳杆菌、罗伊氏乳杆菌）产生了更多的乙酸[32]。4 种乳酸菌产生的乳酸、乙酸含量存在显著差异，其中鼠李糖乳杆菌产生的乳酸最多，发酵乳杆菌产生的乙酸最多。

此时，与未发酵的白面团相比，四种酸面团均体现出了对 α-淀粉酶的明显抑制作用；其中，发酵乳杆菌面团的抑制率高达 15.13%，是其他酸面团抑制率的 2 倍以上。当酸面团酸化至 pH<4.5 时，部分淀粉分子发生重排并形成更致密的堆积结构，酸面团中直链淀粉含量、抗性淀粉含量和聚合度显著提高，导致 α-淀粉酶活性被抑制[21,33]。将酸面团应用于后续的馒头制备有助于降低馒头的淀粉消化率[21]。

综上所述，不同的单一乳酸菌发酵对酸面团性质（酸化效率、有机酸含量及对 α-淀粉酶的抑制作用）的影响存在差异。分析不同乳酸菌的发酵特性，对酸面团的应用优化具有重要的指导意义。

2.2　馒头的淀粉消化特性

通过淀粉体外消化试验模拟了馒头在体内的淀粉消化情况，整体水解率的变化如图 1 所示，所有样品的水解率均随消化时间的延长而逐渐升高。馒头淀粉中快消化淀粉、慢消化淀粉及抗性淀粉的占比如表 4 所示。

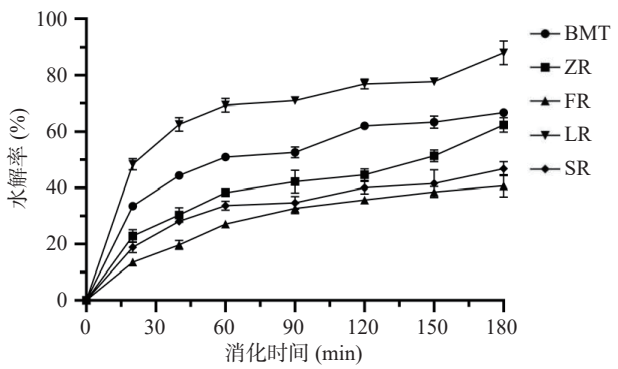


图 1　馒头在体外 3 h 模拟淀粉消化中水解率的变化

Fig.1　Changes of starch digestibility and hydrolysis rate of steamed bread *in vitro* within 3 h

表 4 馒头快消化、慢消化及抗性淀粉含量
Table 4 Contents and proportion of RDS, SDS and RS in steamed bread

样品	快消化淀粉(%)	慢消化淀粉(%)	抗性淀粉(%)
BMT	33.54±1.38^{c}	29.26±0.54^{b}	37.20±1.36^{b}
LR	48.34±4.08^{d}	28.44±1.78^{b}	23.22±3.51^{a}
SR	18.91±3.89^{b}	21.49±2.49^{a}	59.90±4.31^{cd}
ZR	22.72±4.51^{b}	22.38±0.23^{a}	55.41±4.91^{c}
FR	13.51±1.05^{a}	22.20±1.38^{a}	64.29±2.29^{d}

注: 同列不同字母表示差异显著(P<0.05), 表5~表7同。

罗伊氏乳杆菌馒头在 0~180 min 的整体淀粉水解率高于白馒头及其他乳酸菌馒头, 其快消化淀粉含量最高, 占比高达 48.34%, 约为白馒头的 1.4 倍; 抗性淀粉含量最少, 仅占比 23.22%, 显著低于白馒头。这说明罗伊氏乳杆菌的发酵过程能有效提升馒头的淀粉消化率。目前, 已有研究表明酸面团的应用能够有效降低面制品的淀粉消化率[6], 但关于酸面团可能提升馒头淀粉消化率的现象尚未见文献报道。本研究表明, 罗伊氏乳杆菌对馒头淀粉消化特性的影响与其它乳酸菌存在明显区别, 在实际酸面团应用中需充分考虑所用乳酸菌的菌株特性。

植物乳杆菌、发酵乳杆菌及鼠李糖乳杆菌馒头的整体水解率均低于白馒头, 且快、慢消化淀粉率显著较低, 抗性淀粉率显著较高。植物乳杆菌馒头与鼠李糖乳杆菌馒头的整体淀粉水解情况相似, 两者的快、慢消化淀粉率及抗性淀粉率无明显差异。发酵乳杆菌馒头的快消化淀粉含量显著低于其他馒头, 仅约为白馒头的 0.40 倍; 其抗性淀粉占比最高, 为 64.29%, 约为白馒头的 1.70 倍, 且显著高于植物乳杆菌。植物乳杆菌作为目前国内外应用最为广泛的酸面团发酵剂, 不仅有助于降低老面馒头的淀粉消化率, 还是国外最常用的低 GI 酸面包发酵剂[20−21]。本研究结果表明, 在抑制馒头淀粉消化率方面, 鼠李糖乳杆菌与植物乳杆菌效果相当, 而发酵乳杆菌馒头对淀粉消化的抑制效果最好。由于抗性淀粉含量的增加会提高 α-淀粉酶抑制率, 且发酵乳杆菌酸面团的 α-淀粉酶抑制率显著高于其他乳酸菌, 因此推测这可能是发酵乳杆菌在发酵过程中能更有效地产生抗性淀粉的原因。

2.3 馒头对体外模拟肠道健康的影响

2.3.1 结肠发酵上清液短链脂肪酸(SCFAs)含量分析 人体肠道内 SCFAs 的增加有助于改善肠道健康[34], 通过体外发酵试验模拟了乳酸菌馒头与白馒头摄入后对人体肠道中 SCFAs 的影响情况。由图 2 可知, 在体外发酵过程中, 肠道微生物利用馒头样品主要产生的短链脂肪酸是乙酸, 而产生的丙酸、丁酸和异丁酸的含量较低且低于空白组(NC)。随着发酵时间的延长, 样品组的乙酸含量逐渐增加。所有样品在发酵 12 h 后, 乙酸含量均显著高于空白组(P<0.05), 其中, 植物乳杆菌馒头从发酵 12 h 起乙酸含量显著高于其他馒头样品(P<0.05), 当发酵至 24 h 时, 植物乳杆菌馒头产生的乙酸达到 2.83 μg/mL, 而后随着时间延长乙酸含量未见显著变化。可见, 植物乳杆菌馒头更有助于提升肠道中 SCFAs 的含量, 且其乙酸含量在发酵至 24 h 时达到最高, 随后保持相对稳定。

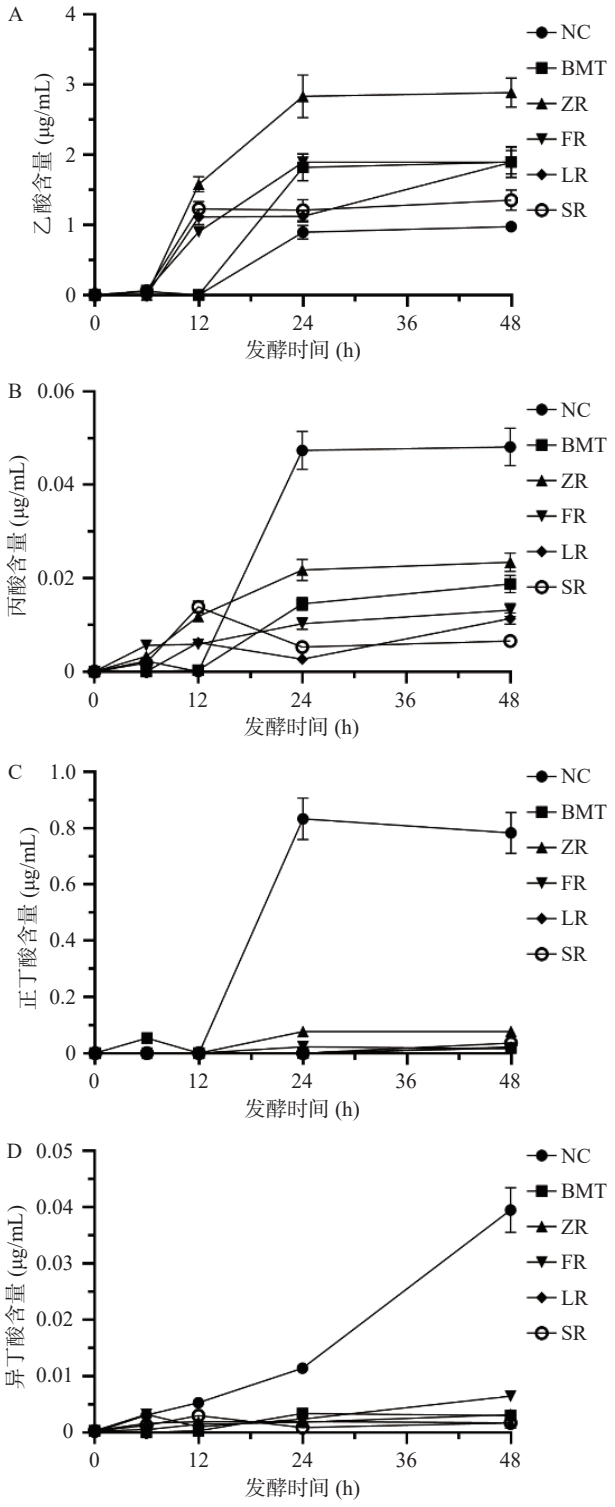


图 2 发酵上清液中短链脂肪酸乙酸(A)、丙酸(B)、正丁酸(C)、异丁酸(D)的浓度

Fig.2 Concentration of short chain fatty acids acetic acid (A), propionic acid (B), butyric acid (C), isobutyric acid (D) in fermentation supernatant

2.3.2　发酵沉淀菌群数量分析　如图 3 所示，qPCR 的结果显示了样品模拟结肠体外发酵 48 h 后对总肠道菌数及三类常见益生菌（双歧杆菌属、乳酸菌属、阿克曼氏菌）数量的影响。与空白对照组（NC）相比，馒头样品未提升阿克曼氏菌及肠道总菌数，但对双歧杆菌（bif）和乳酸菌（lac）的生长具有明显的促进作用，说明馒头样品对肠道益生菌的改善作用具有选择性。相较于白馒头，发酵乳杆菌馒头能显著促进 bif 的生长；同时，发酵乳杆菌馒头和罗伊氏乳杆菌馒头均对 lac 具有更好的增殖作用，其中发酵乳杆菌馒头的效果更佳。由此可见，与白馒头相比，发酵乳杆菌馒头与罗伊氏乳杆菌馒头对肠道益生菌增殖具有明显优势，其中发酵乳杆菌馒头效果更突出。

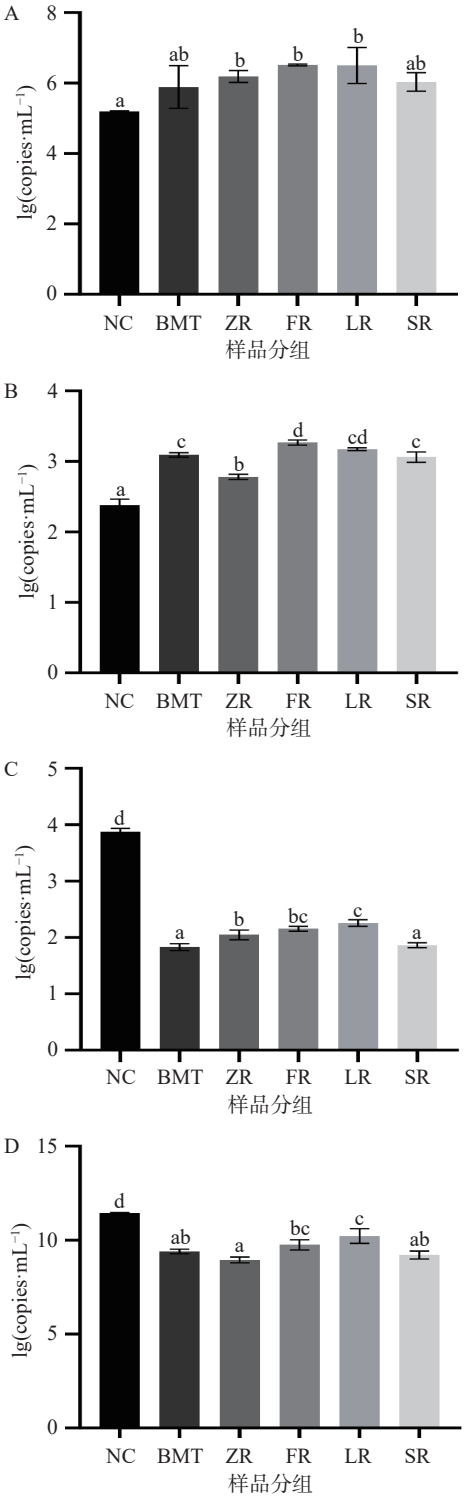


图 3　体外发酵各组双歧杆菌属（A）、乳酸菌属（B）、阿克曼氏菌（C）、总菌数量（D）

Fig.3　Number of *Bifidobacterium*(A), *Lactobacillus*(B), *Akkermansiamucinipila*(C) and all bacteria (D) in the *in vitro* fermentation system

注：不同小写字母表示具有显著性差异，$P<0.05$。

2.4　馒头的感官品质

2.4.1　馒头的比容及质构特性　比容和质构是评价馒头基本品质的重要指标，其中，比容越大代表馒头质量越好。由表 5 可知，与白馒头相比，经乳酸菌发酵后馒头的比容均显著提高，其中发酵乳杆菌馒头的比容最大，达到了 3 mL/g，其次是罗伊氏乳杆菌馒头。

馒头的比容取决于面团中二氧化碳含量及面团自身的流变学特性[35]。乳酸菌在发酵过程中分解大分子蛋白和纤维素，提高面团的延展性，使得面筋网络结构更加紧密并利于二氧化碳的积累[36]。发酵乳杆菌与罗伊氏乳杆菌同属于专性异型发酵菌，在生长过程中通过消耗葡萄糖产生 CO_2 使面团体积膨大，比容相对较大；而植物乳杆菌和鼠李糖乳杆菌属于兼性异型发酵菌，几乎不产生 CO_2[32]，因此比容相对较小，但仍大于白馒头。

在馒头的质构指标中，黏性反映了样品的粘着作用，内聚性表示测试样品经过第一次压缩变形后所表现出来的对第二次压缩的相对抵抗能力；弹性是指样品经过第一次压缩后能够再恢复原样的程度，回复性则表示样品在第一次压缩过程中回弹的能力。由表 5 可知，经乳酸菌发酵的馒头硬度均显著低于白馒头，说明其口感比白馒头更蓬松，其中发酵乳杆菌馒头与罗伊氏乳杆菌馒头的硬度最低。发酵乳杆菌馒头的弹性、黏性、咀嚼性及回复性均优于白馒头，罗伊氏乳杆菌馒头的黏性、咀嚼性及回复性显著改善，鼠李糖乳杆菌馒头的黏性和咀嚼性显著优化，植物乳杆菌馒头的回复性较白馒头明显增强。进一步分析发现，发酵乳杆菌馒头与罗伊氏乳杆菌馒头的硬度、黏性、咀嚼性无明显差异，但明显优于另外 2 种乳杆菌馒头；同时，发酵乳杆菌馒头的回复性也明显优于其他三种乳酸菌馒头。由此可见，乳酸菌发酵显著改善了馒头的大部分质构特性。其中，发酵乳杆菌馒头除内聚性外，其余指标均显著优化；罗伊氏乳杆菌馒头则显著改善了除弹性、内聚性之外的其他指标。

2.4.2　电子舌评价　电子舌通过模仿人的味觉感知原理，对样品的味道进行客观评定，其数据越大说明味道越重，除了酸、咸味外，其他味道的数据低于 0 可视为无味。

由表 6 的电子舌结果可知，所有馒头样品均体现出了明显的鲜味与咸味，且乳酸菌馒头的味道强于白馒头；白馒头表现出微甜味，乳酸菌馒头则无甜味；

表 5 馒头的比容和质构分析

Table 5 Specific volume and texture properties of steamed bread

组别	比容(mL/g)	硬度(N)	弹性(%)	内聚性(%)	黏性	咀嚼性	回复性(%)
BMT	2.13±0.03^{a}	92.37±5.57^{c}	92.07±5.57^{a}	83.77±11.97^{a}	7779.9±2845.85^{c}	71.89±30.15^{c}	33.11±1.75^{a}
ZR	2.50±0.05^{c}	63.69±18.49^{b}	95.39±1.21^{a}	83.14±15.99^{a}	5343.75±2503.09^{bc}	51.02±24.46^{bc}	37.91±3.69^{b}
FR	3.00±0.05^{e}	26.61±4.58^{a}	97.98±2.24^{b}	84.69±16.00^{a}	2265.45±802.78^{a}	22.20±7.91^{a}	45.45±7.14^{c}
LR	2.825±0.13^{d}	31.20±8.10^{a}	95.77±5.08^{ab}	83.38±15.70^{a}	2621.56±1112.06^{a}	25.20±11.76^{ab}	38.35±4.76^{b}
SR	2.41±0.06^{b}	49.37±6.37^{b}	95.75±2.35^{ab}	81.40±15.00^{a}	4034.42±1229.22^{b}	38.68±12.59^{ab}	36.11±4.26^{ab}

表 6 馒头的电子舌味觉值

Table 6 Specific volume and texture properties of steamed bread

CH	酸	苦	涩	后苦	后涩	鲜	丰富度	咸味	甜味
参比	0^{f}	0^{a}	0^{f}	0^{a}	0^{b}	0^{a}	0^{e}	0^{a}	0^{c}
SR	−41.85±0.09^{a}	1.45±0.32^{c}	−7.36±0.09^{b}	0.16±0.12^{ab}	−0.54±0.09^{a}	12.84±0.03^{f}	−1.32±0.03^{b}	9.62±0.04^{f}	−0.38±0.28^{bc}
ZR	−34.4±0.02^{e}	1.35±0.23^{c}	−5.41±0.04^{e}	0.04±0.06^{a}	−0.44±0.08^{a}	8.59±0.06^{c}	−1.04±0.05^{c}	5.47±0.06^{c}	−1.43±0.17^{a}
FR	−36.52±0.08^{c}	1.03±0.17^{c}	−6.41±0.03^{c}	0.22±0.05^{b}	−0.44±0.05^{a}	9.31±0.06^{d}	−1.14±0.04^{c}	7.01±0.09^{d}	−1.47±0.12^{a}
LR	−41.61±0.04^{b}	−0.03±0.09^{a}	−7.79±0.08^{a}	0.67±0.17^{c}	−0.07±0.08^{b}	11.59±0.14^{e}	−1.41±0.04^{a}	8.69±0.1^{e}	−0.82±0.12^{b}
BMT	−34.68±0.04^{d}	0.37±0.07^{b}	−6.16±0.08^{d}	0.4±0.14b^{c}	0.07±0.06^{b}	7.78±0.09^{b}	−1.01±0.05^{d}	3.86±0.06^{b}	2.55±0.01^{d}

乳酸菌馒头的酸味强度低于或与白馒头相近，已知白馒头不发酸，可见乳酸菌馒头酸味不明显；其他味道强度较弱或低于 0，可忽略。

对比 4 种乳酸菌发酵馒头的鲜味和咸味，强度排序均为 SR>LR>FR>ZR，可见鼠李糖乳杆菌的咸鲜味更为突出。

2.4.3 电子鼻评价 电子鼻通过模仿人的嗅觉感知原理，对样品的风味进行客观评定。通过电子鼻的主成分分析可模拟分析不同样品间的风味差异。如图 4 所示可知，白馒头与罗伊氏乳杆菌馒头的数据更接近，说明罗伊氏乳杆菌馒头的风味可能最接近白馒头，其老面风味最弱；植物乳杆菌与鼠李糖乳杆菌馒头的数据接近，说明两者风味可能更接近；而发酵乳杆菌的数据与其他馒头都相距较远，说明发酵乳杆菌馒头较其他馒头而言风味可能更独特。

2.4.4 感官评价 由表 7 可知，与白馒头相比，4 种乳酸菌馒头在外观、色泽、口感、气味方面未表现出显著差异。发酵乳杆菌馒头的回弹性较白馒头有显著提升，发酵乳杆菌馒头与罗伊氏乳杆菌馒头的结构

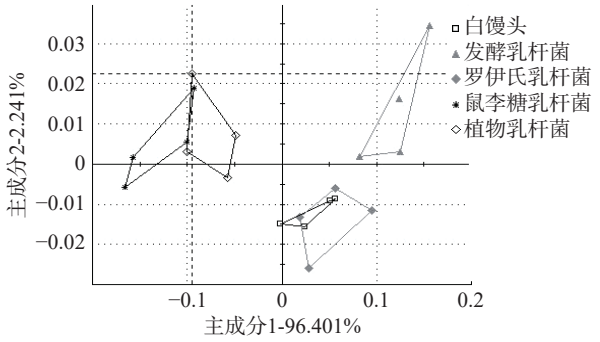


图 4 馒头电子鼻主成分分析图

Fig.4 Principal component analysis spot of electronic nose response curve of steamed bread

优于白馒头。进一步对比发现，发酵乳杆菌馒头的结构与植物乳杆菌馒头、鼠李糖乳杆菌馒头存在显著性差异，可能由于发酵乳杆菌馒头的比容较大，结构更为松软因此结构更佳。除植物乳杆菌馒头外，其他乳酸菌馒头的感官总评分均显著高于白馒头，其中发酵乳杆菌馒头总分最高。

表 7 馒头感官评分

Table 7 Results of sensory evaluation of steamed bread

种类	外观	色泽	结构	口感	气味	回弹性	比容	总评分
BMT	13.05±2.77^{a}	7.9±1.40^{a}	11.40±2.71^{a}	12.10±2.75^{a}	8.20±1.74^{a}	11.90±1.89^{a}	18	82.55±4.80^{a}
ZR	13.40±2.56^{a}	8.45±2.12^{a}	11.80±2.33^{ab}	11.10±2.75^{a}	8.80±2.15^{a}	12.40±2.04^{ab}	20	85.95±4.43^{ab}
FR	12.65±2.45^{a}	8.55±1.70^{a}	13.30±2.54^{c}	11.25±2.06^{a}	8.75±1.75^{a}	13.00±2.19^{b}	20	87.50±4.45^{b}
SR	13.55±2.39^{a}	8.75±2.06^{a}	11.80±2.65^{ab}	11.65±2.10^{a}	8.05±2.39^{a}	12.70±2.20^{ab}	20	86.5±4.72^{b}
LR	12.60±1.33^{a}	8.10±1.66^{a}	12.70±2.20^{bc}	12.00±2.00^{a}	8.20±1.96^{a}	12.60±2.40^{ab}	20	86.2±4.61^{b}

3 结论

通过对比传统酸面团中 4 种常见乳酸菌单独发酵酸面团时对其酸化能力、α-淀粉酶抑制率和对馒头体外淀粉消化、体外模拟发酵以及感官品质的影响发现，不同种类乳酸菌的发酵特性确有不同。在淀粉消化特性方面，经罗伊氏乳杆菌发酵的馒头更有助于淀粉的快速消化，而其他菌种发酵更有助于降低馒头的淀粉消化速率，其中发酵乳杆菌的优势最为显著。在对肠道菌群的影响方面，植物乳杆菌可能更有助于增加肠道内短链脂肪酸的含量；发酵乳杆菌、罗

伊氏乳杆菌则可能有助于提升益生菌的活性，其中发酵乳杆菌的效果更佳。在感官品质上，罗伊氏乳杆菌与发酵乳杆菌对于优化馒头的比容、质构更有优势，其中发酵乳杆菌的优势更突出；发酵乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、罗伊氏乳杆菌均可显著提升馒头的整体感官评分，其中鼠李糖乳杆菌馒头的咸鲜味更强，发酵乳杆菌对馒头气味和结构的改善更显著。综合而言，不同的乳酸菌对馒头的淀粉消化特性、肠道菌群及感官品质均体现出了不同程度的影响；其中，发酵乳杆菌体现出了更为全面的改善效果。本研究结果有助于了解单一乳酸菌发酵剂对酸面团及馒头所带来的不同影响，为发酵技术在粮食制品中的工业化应用提供理论基础。

© 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］ 宋佳锟. 乳酸菌发酵对于老面性质及馒头品质的影响[D]. 无锡：江南大学, 2015. ［SONG Jiakun. The influence of lactic acid bacteria fermentation on the sourdough property and quality of steamed bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.］

［2］ 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 Yiming, OUYANG Boya, XIANG Qian, et al. Effect of sourdough fermented by different lactic acid bacteria on bread quality and flavor[J]. Food Science, 2022, 43(2): 176−183.］

［3］ 郦金龙, 师雨梦, 滕超, 等. 老面中乳酸菌产酸性能优化及对馒头品质的影响[J]. 中国食品学报，2018, 18(5)：106−114. ［LI Jinlong, SHI Yumeng, TENG Chao, et al. Improving acidic ability of lactic acid bacteria from sourdough and its effect on steamed bread quality[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(5): 106−114.］

［4］ LAU S W, CHONG A Q, CHIN N L, et al. Sourdough microbiome comparison and benefits[J]. Microorganisms, 2021, 9(7): 1355.

［5］ LI Shaohui, LIU Songyan, WU Hanmei, et al. Insights into the starch and proteins molecular structure changes of foxtail millet sourdough: Effect of fermentation from grains of cereal to premeal[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 272: 132729.

［6］ ALKAY Z, FALAH F, CANKURT H, et al. Exploring the nutritional impact of sourdough fermentation: Its mechanisms and functional potential[J]. Foods, 2024, 13(11): 1732.

［7］ 马森, 王晓, 钱晓洁, 等. 老面馒头风味物质和营养特性研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2024, 45(4)：134−142. ［MA Sen, WANG Xiao, QIAN Xiaojie, et al. Review on flavor substances and nutritional characteristics of sourdough steamed bread[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 45(4): 134−142.］

［8］ 蒋光阳, 田永强. 乳酸菌产胞外多糖的发酵条件优化及其抗氧化活性研究[J]. 中国酿造，2023, 42(4)：187−195. ［JIANG Guangyang, TIAN Yongqiang. Optimization of fermentation condition of lactic acid bacteria with high-yield exopolysaccharides and its antioxidant activity[J]. China Brewing, 2023, 42(4): 187−195.］

［9］ 耿浩. 植物乳杆菌发酵小麦糊粉层粉对面包品质的影响[D]. 郑州：河南工业大学, 2024. ［GENG Hao. Effect of *Lactobacillus* plantarum fermented wheat aleurone layer on quality of bread[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.］

［10］ PÉREZ-ALVARADO O, ZEPEDA-HERNÁNDEZ A, GARCIA-AMEZQUITA L E, et al. Role of lactic acid bacteria and yeasts in sourdough fermentation during breadmaking: Evaluation of postbiotic-like components and health benefits[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 969460.

［11］ 周小理, 段梦杰, 崔琳琳, 等. 苦荞酸面团外源乳酸菌发酵特性及其冷冻面团面包品质变化[J]. 食品科学，2023, 44(12)：141−149. ［ZHOU Xiaoli, DUAN Mengjie, CUI Linlin, et al. Fermentation characteristics of Tartary buckwheat sourdough by exogenous lactic acid bacteria and quality change of frozen dough bread[J]. Food Science, 2023, 44(12): 141−149.］

［12］ 杨海莺, 卢玉, 张春强, 等. 传统食品源乳酸菌对酸面团面包风味的影响[J]. 粮油食品科技，2024, 32(2)：65−73. ［YANG Haiying, LU Yu, ZHANG Chunqiang, et al. Effect of lactic acid bacteria in traditional foods on the flavor of sourdough bread[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2): 65−73.］

［13］ YILMAZ B, BANGAR S P, ECHEGARAY N, et al. The impacts of lactiplantibacillus plantarum on the functional properties of fermented foods: A review of current knowledge[J]. Microorganisms, 2022, 10(4): 826.

［14］ LILJEBERG H G M, LÖNNER C H, BJÖRCK I M E. Sourdough fermentation or addition of organic acids or corresponding salts to bread improves nutritional properties of starch in healthy humans[J]. The Journal of Nutrition, 1995, 125(6): 1503−1511.

［15］ 王榕, 朱天园, 赵闪闪, 等. 酸面团在馒头发酵中的应用研究进展[J]. 食品工业科技，2021, 42(15)：389−395. ［WANG Rong, ZHU Tianyuan, ZHAO Shanshan, et al. Research progress on the application of sourdough in steamed bread fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(15): 389−395.］

［16］ ZHAO Lili, WU Jiayi, LIU Yihang, et al. Effect of *Lactobacillus rhamnosus* GG fermentation on the structural and functional properties of dietary fiber in bamboo shoot and its application in bread[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(9): e14231.

［17］ 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 Tong, WANG Xingben, WU Ran, 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.］

［18］ 孙磊. 植物乳杆菌 LB-1/酵母菌协同发酵对面团组分行为及全麦面包品质提升作用研究[D]. 南京：南京财经大学, 2021. ［SUN Lei. Study on the behavior of dough components and the improvement of whole wheat bread quality by co-fermentation of *Lactobacillus* plantarum LB-1 and yeast[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance & Economics, 2021.］

［19］ 何晓赟, 闫博文, 赵建新, 等. 乳酸菌发酵对馒头香气特征的影响[J]. 现代食品科技，2017, 33(1)：179−184,190. ［HE Xiaoyun, YAN Bowen, ZHAO Jianxin, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation on the odor characteristics of steamed bread[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(1): 179−184, 190.］

［20］ NOVOTNI D, ĆURIĆ D, BITUH M, et al. Glycemic index and phenolics of partially-baked frozen bread with sourdough[J].

International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2011, 62(1): 26−33.
[21] 吴小霞. 乳酸菌对老面馒头品质的影响及其淀粉消化特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019. [WU Xiaoxia. The effects of *Lactobacillus* on the quality of the sourdough steamed bread and its starch digestibility[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019.]
[22] RIZZELLO C G, CALASSO M, CAMPANELLA D, et al. Use of sourdough fermentation and mixture of wheat, chickpea, lentil and bean flours for enhancing the nutritional, texture and sensory characteristics of white bread[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 180: 78−87.
[23] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion[J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991−1014.
[24] DING Qiao, NIE Shaoping, HU Jielun, et al. *In vitro* and *in vivo* gastrointestinal digestion and fermentation of the polysaccharide from *Ganoderma atrum*[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 646−655.
[25] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(Suppl 2): S33-S50.
[26] WANG Xiao, YANG Zhaotian, SHEN Suxia, et al. Inhibitory effects of chlorophylls and its derivative on starch digestion *in vitro*[J]. Food Chemistry, 2023, 413: 135377.
[27] TEDESCHI C, CLEMENT V, ROUVET M, et al. Dissolution tests as a tool for predicting bioaccessibility of nutrients during digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(4): 1228−1235.
[28] CHEN Guijie, XIE Minhao, WAN Peng, et al. Digestion under saliva, simulated gastric and small intestinal conditions and fermentation *in vitro* by human intestinal microbiota of polysaccharides from Fuzhuan brick tea[J]. Food Chemistry, 2018, 244: 331−339.
[29] 韩畅. 苦荞麸皮粉对面团特性的影响及其馒头品质改良研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022. [HAN Chang. Effects of Tartary buckwheat bran flour on dough properties and quality improvement of steamed bread[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.]
[30] 孙彩玲, 田纪春, 张永祥. TPA 质构分析模式在食品研究中的应用[J]. 实验科学与技术, 2007, 5(2): 1−4. [SUN Cailing, TIAN Jichun, ZHANG Yongxiang. Application of TPA test mode in the study of food[J]. Experiment Science and Technology, 2007, 5(2): 1−4.]
[31] 谢水琪, 张晓桐, 靳奇文, 等. 乳酸菌发酵剂对杂粮面团及馒头品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 189−194. [XIE Shuiqi, ZHANG Xiaotong, JIN Qiwen, et al. Effect of lactic acid bacteria starter cultures on the quality of multigrain dough and steamed bread[J]. Food Science, 2023, 44(2): 189−194.]
[32] GAGLIO R, ALFONZO A, POLIZZOTTO N, et al. Performances of different metabolic *Lactobacillus* groups during the fermentation of pizza doughs processed from *Semolina*[J]. Fermentation, 2018, 4(3): 61.
[33] GÄNZLE M G. Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation[J]. Food Microbiology, 2014, 37: 2−10.
[34] RIZZELLO C G, NIONELLI L, CODA R, et al. Effect of sourdough fermentation on stabilisation, and chemical and nutritional characteristics of wheat germ[J]. Food Chemistry, 2010, 119(3): 1079−1089.
[35] ZHU Yue, XIONG Wenfei, WANG Lifeng, et al. Insight into the effect of gluten-starch ratio on the properties of Chinese steamed bread (Mantou)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 1821−1827.
[36] CEBALLOS-GONZÁLEZ C, BOLÍVAR-MONSALVE J, RAMÍREZ-TORO C, et al. Effect of lactic acid fermentation on quinoa dough to prepare gluten-free breads with high nutritional and sensory quality[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(3): e13551.