

乳酸菌发酵改性对全籽粒玉米粉加工特性的影响

刘 骥¹ 张红妍¹ 赵起圆¹ 任 健¹ 董 强²

(1. 齐齐哈尔大学食品与生物工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006;

2. 齐齐哈市检验检测中心, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要:[目的]以乳酸菌发酵改性膨化玉米全粉为研究对象,探讨其对面团加工特性的影响。[方法]以发酵温度、发酵时间和乳酸菌接种量为关键影响因素,先进行单因素试验,再通过响应面法优化发酵工艺参数;随后将改性与未改性膨化玉米全粉按不同比例复配,探究其对面团质构特性与蒸煮损失率的影响。[结果]最优发酵工艺为乳酸菌悬液浓度 3×10^7 CFU/mL、发酵时间 18 h、发酵温度 39 °C;该条件下,改性与未改性玉米全粉按质量比 6:4 复配,面团的硬度最低(7.63 N),蒸煮损失率最小。[结论]乳酸菌发酵可有效改善膨化玉米全粉的加工特性,优化其面团质构与蒸煮特性。

关键词:全籽粒玉米粉;乳酸菌发酵;玉米面条;加工特性;发酵改性

Effects of lactic acid bacteria fermentation modification on the processing properties of whole grain corn flour

LIU Ji¹ ZHANG Hongyan¹ ZHAO Qiyuan¹ REN Jian¹ DONG Qiang²

(1. School of Food and Biological Engineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China;

2. Qiqihar Testing and Inspection Center, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

Abstract: [Objective] This experiment aims to modify extruded whole corn flour through lactic acid bacteria fermentation to investigate its impact on the processing properties of dough. [Methods] Single-factor experiments are conducted using fermentation temperature, fermentation time, and inoculation amount of lactic acid bacteria as key variables. Response surface methodology is employed to optimize the fermentation conditions. After optimization, the modified extruded whole corn flour is blended with unmodified extruded whole corn flour in varying proportions, and its effects on the texture properties of the dough and cooking loss are investigated. [Results] Under the conditions of a lactic acid bacteria suspension concentration of 3×10^7 CFU/mL, a fermentation time of 18 h, and a fermentation temperature of 39 °C, the texture and cooking properties of the dough reach their optimal state when modified whole corn flour and unmodified whole corn flour are blended at a ratio of 6:4. At this point, the hardness of the fermented whole corn flour dough is minimized, measuring only 7.63 N. [Conclusion] Lactic acid bacteria fermentation can effectively enhance the processing properties of extruded whole corn flour and optimize its dough texture and cooking properties..

Keywords: whole corn flour; lactic acid bacteria fermentation; corn noodle; processing property; fermentation modification

玉米(*Zea mays* L.)是世界三大主要粮食作物之一,在人类膳食和畜牧饲料体系中占有重要地位^[1]。与水稻和小麦相比,玉米不仅产量高、适应性强,还富含淀粉、蛋白质、脂质、酚类物质、类胡萝卜素等多种生物活性成分^[2]。在食品加工过程中,玉米粉由于含有较高比例的不

溶性膳食纤维以及结构致密的蛋白质基质,常表现出保水性差、黏弹性不足、加工适应性较弱等问题,限制了其在面条、面包及其他主食类制品中的应用^[3]。

在面条加工中,玉米粉由于缺乏面筋蛋白,导致其在加工过程中形成的面团缺乏良好的延展性和黏弹性,使

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:32572630);黑龙江省博士后科研启动金

通信作者:董强(1975—),男,齐齐哈尔市检验检测中心高级工程师。E-mail:1652742290@qq.com

收稿日期:2025-10-29 **改回日期:**2025-12-30

引用格式:刘骥,张红妍,赵起圆,等.乳酸菌发酵改性对全籽粒玉米粉加工特性的影响[J].食品与机械,2026,42(1):145-152.

Citation:LIU Ji, ZHANG Hongyan, ZHAO Qiyuan, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation modification on the processing properties of whole grain corn flour[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 145-152.

直接由玉米粉制备的面条存在显著缺陷:在成型阶段难以成条,容易断裂;在烹饪过程中蒸煮损失较大,表现为断条率高、浑汤严重和口感欠佳^[4]。以上不足极大限制了玉米粉在面条等面制品中的应用。吴凤凤等^[5]研究表明,适量添加谷氨酰胺转氨酶可改善玉米面团的流变学性质,能有效降低新鲜与冷冻面团的糊化参数,优化其黏弹性,并显著增强面团的持水性与低温稳定性。任元元等^[6]研究发现,酵母发酵后的面团比未发酵面团品质特性更好,生产的空心面品质更佳。其中,较为常见的方法是在玉米面条制备过程中添加品质改良剂,以改善面团的黏结性与筋度,从而有效提升玉米面条的成条性和蒸煮品质^[7]。

近年来,微生物改性技术因其绿色环保、操作温和及改善效果显著而备受关注^[8]。乳酸菌发酵作为一种典型的微生物改性方法,在发酵过程中分泌多种有机酸、胞外酶及代谢产物,对谷物中的淀粉、蛋白质和膳食纤维产生降解作用。一方面,乳酸菌代谢产生的乳酸及其他有机酸可降低体系 pH,促进蛋白质结构松弛并提升溶解度^[9]。另一方面,乳酸菌分泌的多种酶类能够部分降解淀粉颗粒和细胞壁结构,从而改善淀粉的溶胀性、糊化特性和面团形成能力^[10]。这些变化不仅能显著改善玉米粉的加工适应性,还能够赋予产品更优良的质构特性和风味品质。Khan 等^[11]研究表明,采用酵母与乳酸菌共发酵膨化糙米,比单独发酵能更有效地提升其抗氧化物质含量与能力。郝越^[12]研究发现,采用植物乳杆菌对蜡质玉米进行发酵,能有效改善其加工性能,并以优化工艺生产出了品质更稳定、生产周期更短的黏豆包。

试验拟探究乳酸菌发酵改性全籽粒玉米粉的加工特性,为提升玉米粉在面条等面制品中的应用提供依据,同时也为玉米资源的高值化利用与主食多样化开发开辟新的路径。

1 材料与方法

1.1 试验原料、试剂与设备

全籽粒玉米粉:市售;
保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus*)、嗜热链球菌(*Streptococcus thermophilus*):北京六宸生物科技有限公司;

溴酚蓝:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;
磷酸盐缓冲液:分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;
Tris-Gly 缓冲液:分析纯,哈尔滨市呼兰区三金碱厂;
盐酸胍、Ellman's 试剂、巯基乙醇、三氯乙酸、Boxbio 试剂盒和尿素:分析纯,南宁东恒华道生物科技有限公司;
氢氧化钠、糖化酶、葡萄糖、牛肉浸膏、蛋白胨、酵母粉、硫酸锰、硫酸镁、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、碳酸钙、吐温 80 和柠檬酸氢二铵等:分析纯,天津市天力化学试剂有限公司;
双螺杆挤压膨化机:SHJ20 型,山东济南希朗机械有

限公司;

立式压力蒸汽灭菌锅:01J2003-04 型,上海东亚压力容器制造有限公司;

高效粉碎机:30B 型,南京科益设备有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:GZX-GF101-2-BS 型,上海跃进医疗器械有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-6 型,常州荣华仪器制造有限公司;

pH 计:PB-10 型,北京赛多利斯仪器系统有限公司;

低速大容量台式离心机:JIDI-5D 型,广州吉迪仪器有限公司;

分析天平:BSA2245-CW 型,北京赛多利斯仪器系统有限公司;

多管涡旋振荡器:VX-III 型,北京踏锦科技有限公司;

隔水式电热恒温培养箱:PYX-DHS 型,上海跃进医疗器械厂;

质构仪:Brookfield CT3 型,上海宝圣实业发展有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 膨化玉米全粉样品的制备 将玉米除杂后粉碎,过 80 目筛,挤压膨化:物料水分含量 20%、套筒温度 120 °C、螺杆转速 486 r/min、物料投速 270 r/min。将膨化后的玉米全粉烘干、粉碎,获得挤压膨化玉米全粉。

1.2.2 乳酸菌菌液的制备 将保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌按体积比 1:1 混匀。按表 1 配制乳酸菌液体培养基(MRS medium),调节 pH 后分装,121 °C 高压蒸汽灭菌 20 min 后备用。

表 1 MRS 液体培养基成分

Table 1 Components of MRS broth

| 化合物 | 单位 | 数据 | 化合物 | 单位 | 数据 |
|-----|----|------|---|----|-------|
| 葡萄糖 | g | 20 | 硫酸镁 | g | 0.58 |
| 牛肉膏 | g | 10 | 磷酸氢二钾 | g | 2 |
| 蛋白胨 | g | 10 | CH ₃ COONa·3H ₂ O | g | 5 |
| 酵母粉 | g | 5 | (NH ₄) ₂ HC ₆ H ₅ O ₇ | g | 2 |
| 硫酸锰 | g | 0.25 | 去离子水 | mL | 1 000 |

1.2.3 复合改性玉米全粉样品的制备 取 100 g 膨化玉米全粉,加入 190 mL 水和 10 mL 乳酸菌菌悬液,37 °C 发酵 24 h,冲洗、烘干、粉碎、研磨、过筛,获得改性玉米全粉。

1.2.4 质构特性测定 参照李少辉等^[13]的方法。称取 10 g 样品制成体积为 1 cm³ 的面团,采用 100 N,选用直径 75 mm 圆盘挤压探头,测前速度 0.25 mm/s,测试速度 0.25 mm/s,测后速度 1 mm/s,两次下压停留间隔时间 6 s,形变 60%。

1.2.5 单因素试验

(1) 发酵温度对面团硬度的影响:取膨化玉米全粉

100 g,加入190 mL无菌蒸馏水和10 mL乳酸菌悬液,发酵温度分别为33,35,37,39,41 °C,静置培养48 h。

(2) 发酵时间对面团硬度的影响:取膨化玉米全粉100 g,加入190 mL无菌蒸馏水和10 mL乳酸菌悬液,发酵时间分别为12,18,24,36,48 h,发酵温度为37 °C。

(3) 乳酸菌悬液浓度对面团硬度的影响:将乳酸菌悬液分别稀释10,100,1 000,10 000倍,取膨化玉米全粉100 g,加入190 mL无菌蒸馏水和10 mL不同浓度的乳酸菌悬液,发酵温度为37 °C,静置培养48 h。

1.2.6 响应面试试验 在单因素试验的基础上,选择发酵温度、发酵时间和乳酸菌悬液浓度进行三因素三水平

响应面试试验,优化乳酸菌发酵改性条件。

1.2.7 改性玉米粉添加量的确定 将玉米全粉、改性玉米全粉按比例混合,总质量100 g。混合比例:改性玉米全粉添加量分别为10%,20%,30%,40%,50%,60%,70%,80%,90%;测定不同改性玉米全粉添加量下面团的质构特性和面条蒸煮特性。

1.2.8 感官评价 由10名专业人员组成玉米面条品质评估团队,参考SB/T10137—1993及冯文翰等^[14~15]的方法并适当修改。面条评分总分100分,按表2对熟制面条的色泽、外观外形、适口性、弹性、黏性和食味进行评分,剔除评价偏离度最大的结果后,取所有人员评分后的平均值。

表2 玉米面条感官评定标准

Table 2 Sensory evaluation criteria of corn noodles

| 评定项目 | 评分标准 |
|-----------|--|
| 色泽(20分) | 整体色泽为亮黄色(15~20分);整体色泽较暗,与玉米粉颜色接近(8~14分);整体色泽暗,亮度较差(1~7分) |
| 外观外形(20分) | 表面光滑平整(15~20分);表面光滑度适中(8~14分);表面毛糙不平整、变形等(1~7分) |
| 适口性(20分) | 适口性好(17~20分);偏硬或偏软(12~16分);太硬或太软(1~12分) |
| 弹性(15分) | 有嚼劲、弹力十足(11~15分);嚼劲一般(6~10分);咬劲差(1~5分) |
| 黏性(15分) | 不黏牙爽口(11~15分);少量黏牙爽口(6~10分);黏牙不爽口(1~5分) |
| 食味(10分) | 玉米特殊香味十足(7~10分);无其他杂味(4~6分);异味感强烈(1~3分) |

1.3 数据处理与分析

所有试验均重复3次,结果以平均值±标准差表示。采用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析(ANOVA),显著性差异采用Duncan多重比较法($P<0.05$)判定。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 发酵温度对面团硬度的影响 由图1可知,随着发酵温度的升高,面团硬度呈先减小后增加趋势,当发酵温度为37 °C时,面团硬度最小,因为发酵能够改变淀粉的结晶度,更高的结晶度不仅能提高淀粉的热响应和糊化焓,

也有助于形成更稳定的凝胶网络结构,从而在食品加工中具有更好的结构保持性和热稳定性^[16]。李利民等^[17]研究表明,乳酸菌发酵能够增加淀粉的非结晶区,因此面团硬度减小。发酵温度过高,乳酸菌活性受到影响,膨化玉米全粉发酵不完全,面团硬度增加。赵依迪^[18]利用乳酸菌发酵降低了米粉的灰分、可溶性糖和脂肪含量,提高了蛋白质、淀粉所占比例。胡畔等^[19]以植物乳杆菌和米根霉作为复合发酵剂进行固态发酵,发酵样品的硬度参数并未有显著改变,但其弹性、咀嚼性、黏性、胶着性、黏聚性及回复性等均呈增加趋势。

2.1.2 发酵时间对面团硬度的影响 由图2可知,发酵时间为12~18 h时,面团硬度呈下降趋势,该阶段为乳酸菌的指数生长期,菌种代谢旺盛,发酵18 h时面团硬度最小。发酵时间为18~24 h时,面团硬度呈上升趋势。发酵时间为24~48 h时,乳酸菌发酵进入平稳期,面团硬度未发生显著变化,表明适宜的发酵时间能够影响面团硬度。步李卿^[20]研究表明,发酵时间过长,发酵体系中营养物质的降低以及代谢产物的抑制,导致乳酸菌衰亡。

2.1.3 乳酸菌悬液浓度对面团硬度的影响 乳酸菌悬液浓度会影响乳酸菌发酵效果。乳酸菌悬液浓度过高,营养物质消耗加剧,发酵效果降低;浓度过低,菌株生长缓慢,发酵周期延长^[21]。由图3可知,面团硬度随着乳酸菌悬液浓度的增加呈先减小后增加趋势,当乳酸菌悬液浓度为 3×10^7 CFU/mL时,面团硬度最低;发酵过程中,膨化玉米全粉的支链淀粉被水解为直链淀粉^[22]。

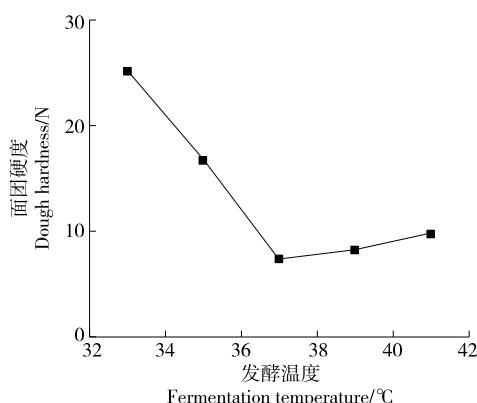


图1 发酵温度对膨化玉米全粉面团硬度的影响

Figure 1 Effects of fermentation temperatures on hardness of extruded corn whole power dough

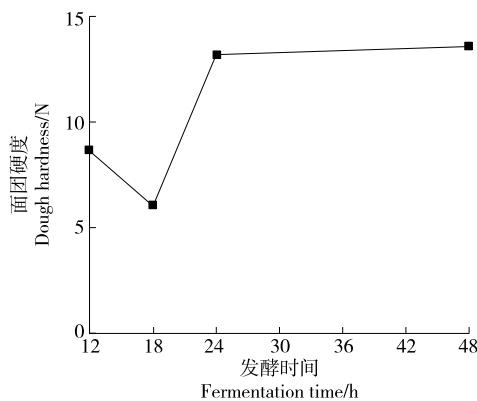


图 2 发酵时间对膨化玉米全粉面团硬度的影响

Figure 2 Effects of fermentation time on hardness of extruded corn whole power dough

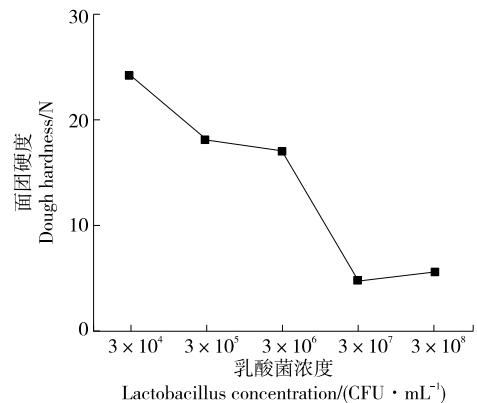


图 3 乳酸菌悬液浓度对膨化玉米全粉面团硬度的影响
Figure 3 Effects of lactic acid bacteria suspension concentration on hardness of extruded corn whole power dough

乳酸菌悬液浓度 $<3\times 10^7$ CFU/mL 时, 乳酸菌对玉米淀粉的水解作用较弱, 面团硬度下降不明显。Zhang 等^[23]研究发现, 随着发酵菌悬液浓度的升高, 鲜食玉米的黏性、弹性、硬度和内聚性先上升后下降。其原因在于乳酸菌在发酵过程中生成了多种有机酸, 这些有机酸与乳酸菌协同作用, 导致包裹淀粉颗粒的蛋白质发生变性。变性后释放出的细小淀粉颗粒与乳酸菌所产生的亲水性胞外多糖相互作用, 从而共同增加了鲜食玉米的黏性和弹性等质构特性。邹奇波等^[24]研究发现, 混菌发酵全麦酸面团产胞外多糖(EPS)能力最强, 将其添加到全麦面包中, 可显著提升面包的比容与弹性, 同时降低面包芯硬度, 从而明显改善面包的质构特性。

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面模型的建立 根据单因素试验结果, 以乳酸菌悬液浓度、发酵时间、发酵温度为因子, 膨化玉米全粉面团硬度为指标进行响应面试验, 试验因素水平见表 3, 试验设计及结果见表 4。

表 3 响应面试验因素水平

Table 3 Factors and levels of response surface design

| 水平 | A 乳酸菌悬液浓度/(CFU·mL⁻¹) | B 发酵时间/h | C 发酵温度/℃ |
|----|----------------------|----------|----------|
| -1 | 3×10^6 | 12 | 37 |
| 0 | 3×10^7 | 18 | 39 |
| 1 | 3×10^8 | 24 | 41 |

表 4 响应面试验设计及结果

Table 4 Design and results of response surface test

| 试验号 | A | B | C | 面团硬度/N |
|-----|----|----|----|--------|
| 1 | 1 | 0 | -1 | 11.37 |
| 2 | 0 | -1 | -1 | 10.65 |
| 3 | 0 | 1 | -1 | 12.26 |
| 4 | -1 | 0 | -1 | 10.68 |
| 5 | 1 | 1 | 0 | 12.76 |
| 6 | 1 | -1 | 0 | 11.23 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 8.66 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 8.82 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 7.89 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 7.63 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 9.08 |
| 12 | -1 | 1 | 0 | 10.08 |
| 13 | -1 | -1 | 0 | 12.52 |
| 14 | 1 | 0 | 1 | 12.23 |
| 15 | 0 | -1 | 1 | 11.72 |
| 16 | 0 | 1 | 1 | 10.59 |
| 17 | -1 | 0 | 1 | 10.63 |

2.2.2 拟合响应面模型 采用 Design-Expert 13.0.15 软件进行多元回归拟合、方差分析及显著性检验, 得到二次回归方程:

$$Y = 8.42 + 0.46A - 0.0537B + 0.0263C + 0.9925AB + 0.2275AC - 0.685BC + 1.58A^2 + 1.65B^2 + 1.23C^2. \quad (1)$$

由表 5 可知, A^2 、 B^2 、 C^2 均为极显著 ($P < 0.01$), 表明乳酸菌浓度、发酵时间和发酵温度对响应值均存在强烈的二次效应。即三者与响应值之间存在明显的非线性抛物线关系。响应值随各因素的变化可能出现最小值, 说明存在最优工艺。AB 的 $P < 0.01$, 极显著, 乳酸菌浓度与发酵时间之间存在强烈的交互作用, 即改变其中一因素会显著影响另一因素对响应值的作用效果。BC 的 $P < 0.05$, 显著, 发酵时间与发酵温度之间也存在明显交互作用。AC 不显著, 说明两者交互作用较弱。

2.2.3 交互作用分析 由图 4 可知, 各因素交互作用对面团硬度的影响具有显著差异。AB 表现为典型的椭圆形

表5 二次回归模型方差分析[†]
Table 5 ANOVA for the quadratic regression model

| 来源 | 平方和 | 自由度 | 均方和 | F值 | P值 | 显著性 |
|-------|-------|-----|-------|-------|---------|-----|
| 模型 | 39.43 | 9 | 4.38 | 14.27 | 0.001 0 | ** |
| A | 1.69 | 1 | 1.69 | 5.51 | 0.051 2 | |
| B | 0.02 | 1 | 0.02 | 0.08 | 0.791 7 | |
| C | 0.01 | 1 | 0.01 | 0.02 | 0.897 2 | |
| AB | 3.94 | 1 | 3.94 | 12.83 | 0.008 9 | ** |
| AC | 0.21 | 1 | 0.21 | 0.67 | 0.438 6 | |
| BC | 1.88 | 1 | 1.88 | 6.11 | 0.042 7 | * |
| A^2 | 10.47 | 1 | 10.47 | 34.10 | 0.000 6 | ** |
| B^2 | 11.53 | 1 | 11.53 | 37.54 | 0.000 5 | ** |
| C^2 | 6.42 | 1 | 6.42 | 20.90 | 0.002 6 | ** |
| 残差 | 2.15 | 7 | 0.31 | | | |
| 失拟项 | 0.59 | 3 | 0.20 | 0.51 | 0.698 8 | |
| 纯误差 | 1.56 | 4 | 0.39 | | | |
| 总和 | 41.58 | 16 | | | | |

† *表示差异显著($P<0.05$), **表示差异极显著($P<0.01$);
 $R^2=0.948\ 3$, $R_{\text{Adj}}^2=0.881\ 8$ 。

等高线与“谷底一回升”型响应曲面,表明二者交互作用显著。在低至中等乳酸菌菌悬液浓度及中等发酵时间(约18 h)下,面团硬度显著降低;随着乳酸菌菌悬液浓度的进一步升高并伴随发酵时间延长,过度酸化与酶促水

解作用叠加,导致蛋白—淀粉网络在贮藏阶段发生回生及结构致密化,从而引起硬度回升。相比之下,AC的响应变化幅度较小,等高线趋于同心圆状,说明二者交互作用不显著。低硬度区域主要集中于中等乳酸菌菌悬液浓度(约 $3\times 10^7\text{ CFU/mL}$)、中等发酵时间(约18 h)以及中一偏高发酵温度(约39 °C)所构成的区间内;一旦超出该范围,尤其是在高乳酸菌菌悬液浓度与长时间发酵条件下,易偏离软化最优区间,导致硬度上升。因此,将发酵参数控制于中等乳酸菌浓度、适中时间及中一偏高温度范围内,有助于维持体系的适度改性,实现结构均衡与硬度稳定。BC的响应面呈现倾斜椭圆形态,沿发酵时间方向形成下行坡谷,表明二者存在负向协同效应。在中一偏高发酵温度区(约39 °C),将发酵时间控制在中等水平,可使酸化与酶解过程趋于平衡,形成“适度酸化—适度水解”的稳定窗口。在此条件下,玉米颗粒表层结构得以充分溶胀并部分降解,蛋白—淀粉网络结构相对疏松均匀,从而显著降低面团硬度。反之,若发酵温度偏低或发酵时间过短,微生物活性不足、反应不充分,体系难以达到理想改性状态,软化效果明显受限。

综上,乳酸菌发酵改性的最佳工艺条件为乳酸菌菌悬液浓度 $3\times 10^7\text{ CFU/mL}$,发酵时间18 h,发酵温度39 °C,此时面团硬度最小,为7.63 N。

2.3 玉米全粉添加量对面团品质特性的影响

由图5可知,随着玉米全粉添加量的增加,面团的弹

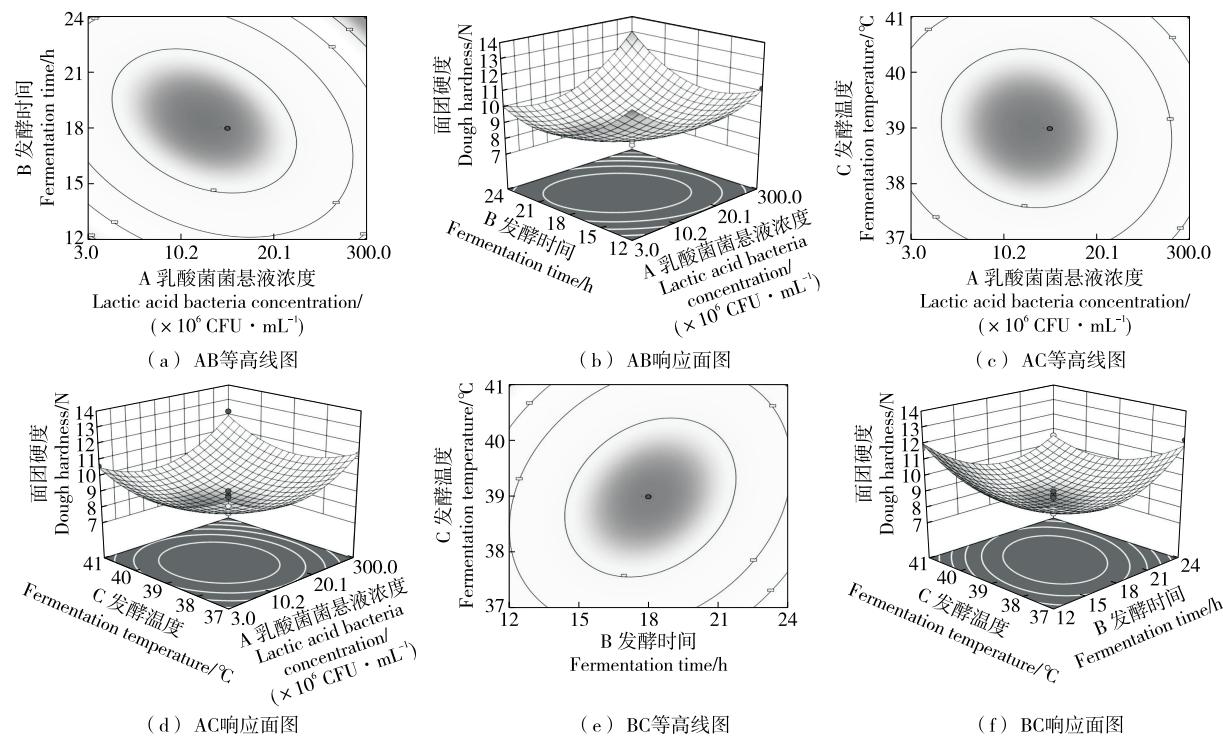
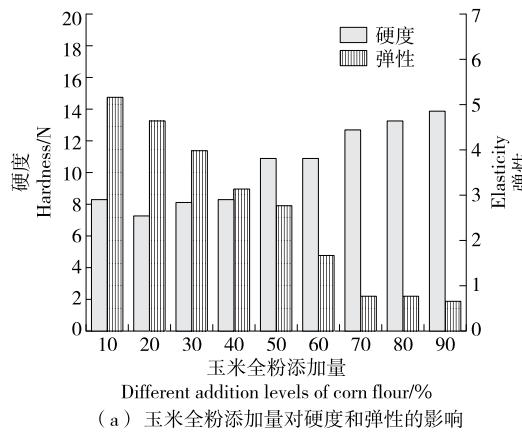


图4 各因素交互作用的等高线图及响应面图

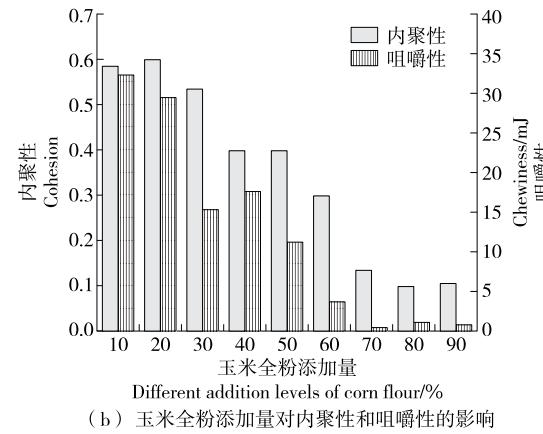
Figure 4 Contour maps and response surfaces of the interaction between factors

性、内聚性和咀嚼性逐渐下降,硬度逐渐升高,由该面团制成的面条出现粗糙干硬,难以咀嚼,松散易碎,缺乏韧性等情况。玉米全粉添加量为 40%,改性玉米粉添加量为 60%时,面团硬度约为 8 N,弹性约为 3.5。原玉雪等^[25]研究发



(a) 玉米全粉添加量对硬度和弹性的影响

现,经发酵后玉米全粉所制面团的黏附性、内聚性、弹性、胶黏性和咀嚼性均有所提升,而硬度下降,与试验结果一致。Sun 等^[26]发现,乳酸菌发酵能改善面团特性并增强产品的风味。



(b) 玉米全粉添加量对内聚性和咀嚼性的影响

图 5 玉米全粉添加量对面团质构特性的影响

Figure 5 Effects of amounts of corn whole power on texture properties of corn dough

2.4 玉米全粉添加量对面条蒸煮特性的影响

由图 6 可知,随着玉米全粉添加量的增加,面团的吸水率和蒸煮损失率逐渐升高,当玉米全粉添加量为 40%~50% 时,面团的蒸煮损失变化趋势最大,因为在改性玉米面团中加入玉米全粉,面筋蛋白被稀释,面筋网络削弱,导致面团内部结构被破坏^[27]。此外,玉米全粉吸水膨胀度低,此时淀粉颗粒不能被充分包裹,玉米面团的蒸煮损失率升高。杨芝^[28]研究发现,与添加未处理玉米粉面条相比,添加微波改性玉米粉的面条蒸煮损失率显著降低;与添加未处理玉米粉的面条相比,添加微波干热处理和湿热处理玉米粉的面条的干物质吸水率均稍有降低。李佳豪^[29]研究表明,添加发酵改性燕麦粉可显著提升馒头的比容与高径比,并有效改善其质地和风味,馒头弹性和内聚性增强,硬度显著降低;同时,挥发性风味物质的种类与含量均有所增加,内部气孔结构更为均匀致密。

2.5 感官评定

由表 6 可知,随着改性玉米全粉添加量的增加,玉米面条的感官总评分整体呈上升趋势,说明乳酸菌发酵改性在改善玉米面条品质方面具有显著效果。改性玉米全粉添加量为 60% 时,玉米面条在色泽、适口性、弹性、黏性和食味等方面表现突出,表明此时的面条在整体质构和口感上更接近理想状态,进一步验证了改性玉米全粉 60% 添加比例的优势。

改性玉米全粉添加量为 70% 时,总评分出现一定幅度的下降。这是由于过多的改性玉米全粉导致面团网络结构不均匀,面条在弹性和适口性上仍保持较好水平,但部分指标如黏性和食味出现波动,从而影响了综合感官表现。武思奇等^[30]研究表明,经乳酸菌与纤维素酶复合改性后的玉米粉能有效提升戚风蛋糕的弹性模量、黏性

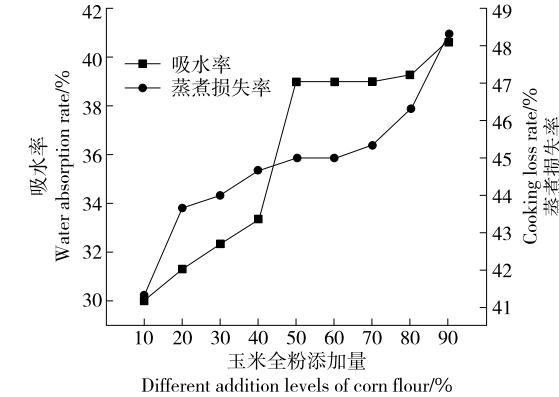


图 6 玉米全粉添加量对面条蒸煮特性的影响

Figure 6 Effects of amounts of corn whole power on cooking properties of corn noodles

模量和表观黏度,并使其感官评分升高,表明复合改性玉米全粉在戚风蛋糕烘焙中表现出了良好的效果。韩翠萍等^[31]研究发现,采用植物乳杆菌、酿酒酵母及其复配发酵玉米粉,可将自然发酵所需时间从 13 d 大幅缩短至 18~72 h,且所得产品品质与加工性能更优良。

综上,改性玉米全粉在 60% 左右的添加比例能够在面条的外观、质构和风味三方面实现较为理想的平衡,改善了玉米面条的感官品质,提升了改性玉米粉在玉米面条加工中的价值。

3 结论

乳酸菌发酵膨化玉米全粉的最优工艺条件为:乳酸菌悬液浓度 3×10^7 CFU/mL、发酵时间 18 h、发酵温度 39 °C,此条件下改性玉米粉的物理结构与功能特性得到

表6 改性玉米全粉添加量对玉米面条感官评分的影响[†]

Table 6 Effects of modified corn flour addition on the sensory evaluation of corn noodles

| 改性玉米全粉添加量/% | 色泽 | 外观外形 | 适口性 | 弹性 | 黏性 | 食味 |
|-------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 10 | 14.8±0.5 ^c | 14.3±0.6 ^c | 16.0±0.3 ^c | 10.5±0.3 ^e | 11.8±0.5 ^c | 6.8±0.2 ^c |
| 20 | 15.3±0.4 ^{bcd} | 15.3±0.8 ^d | 15.1±0.7 ^d | 12.8±0.2 ^{cd} | 11.5±0.5 ^c | 6.5±0.5 ^c |
| 30 | 15.8±0.6 ^{bcd} | 16.0±0.6 ^c | 15.8±0.4 ^{cd} | 13.0±0.2 ^c | 11.5±0.3 ^c | 6.8±0.7 ^c |
| 40 | 17.3±0.5 ^b | 15.8±0.5 ^c | 17.8±0.2 ^a | 13.0±0.5 ^c | 11.8±0.7 ^c | 7.8±0.5 ^b |
| 50 | 17.0±0.4 ^b | 15.5±0.7 ^{cd} | 17.0±0.5 ^b | 13.5±0.5 ^b | 12.3±0.3 ^b | 7.8±0.3 ^b |
| 60 | 18.0±0.6 ^a | 18.0±0.5 ^a | 17.8±0.5 ^a | 14.4±0.5 ^a | 13.4±0.5 ^a | 9.0±0.7 ^a |
| 70 | 16.8±0.5 ^b | 15.5±0.5 ^{cd} | 17.0±0.3 ^b | 13.8±0.7 ^a | 11.3±0.2 ^c | 6.0±0.2 ^d |
| 80 | 15.3±0.6 ^{bcd} | 16.3±0.3 ^c | 16.1±0.2 ^c | 13.3±0.4 ^b | 12.0±0.3 ^{bc} | 6.8±0.4 ^c |
| 90 | 14.5±0.5 ^c | 17.2±0.3 ^b | 14.1±0.5 ^e | 12.1±0.7 ^d | 13.2±0.7 ^a | 5.6±0.2 ^e |

† 同列字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

显著改善。将改性玉米粉与未改性玉米粉按6:4比例复配时,面团硬度和蒸煮损失率达到最优平衡,验证了乳酸菌发酵对膨化玉米全粉的良好改性作用。然而,该研究主要侧重于工艺优化和宏观物性评价,对发酵改性的分子机制阐释不足,对改性粉的营养特性、贮藏稳定性及其在更广泛食品体系中的应用效果尚未进行探讨。未来研究将聚焦于利用现代分析技术解析改性机理,并评估其在多元化主食产品中的综合应用性能。

参考文献

- [1] 焦子昂. 黑龙江省玉米产业发展状况分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021: 1-7.
- JIAO Z A. Analysis of corn industry development status in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021: 1-7.
- [2] 赵海波, 孙纯锐, 邱洪伟, 等. 蛋白质对淀粉的影响及其复合体系应用研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 191-197.
- ZHAO H B, SUN C R, QIU H W, et al. Research progress on the influence of protein on physicochemical properties, microstructures and digestive properties of starch and its application[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 191-197.
- [3] 刘安琪, 常世敏, 李京芳, 等. 改性谷物麸皮品质特性及其在面制品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 222-229.
- LIU A Q, CHANG S M, LI J F, et al. Progress on quality characteristics of modified grain bran and its application in flour products[J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 222-229.
- [4] 吴卓昊, 宋春丽, 董强, 等. 三种改性方式对全谷物玉米粉营养成分及加工特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(18): 186-193.
- WU Z H, SONG C L, DONG Q, et al. Effects of three modification methods on nutritional components and processing properties of prepared whole-grain corn flour[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(18): 186-193.
- [5] 吴凤凤, 黄晓倩, 王乃娟, 等. 谷氨酰胺转氨酶对新鲜及冷冻玉米面团品质特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(2): 68-75.
- WU F F, HUANG X Q, WANG N J, et al. Effects of transglutaminase on quality characteristics of fresh and frozen
- corn dough[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(2): 68-75.
- [6] 任元元, 李宇航, 孟资宽, 等. 酿酒酵母菌发酵对空心面品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7): 264-269.
- REN Y Y, LI Y H, MENG Z K, et al. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* fermentation on the quality of hollow noodles[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(7): 264-269.
- [7] 衣宁, 宋斌, 王一然, 等. 酵母菌与乳酸菌协同发酵对玉米面糊理化性质及其发糕品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 77-84.
- YI N, SONG B, WANG Y R, et al. Effect of co-fermentation with yeast and lactic acid bacteria on physicochemical properties of cornmeal batter and steamed sponge cake quality [J]. Food Science, 2024, 45(15): 77-84.
- [8] CUAMATZIN-GARCÍA L, RODRÍGUEZ-RUGARCÍA P, EL-KASSIS E G, et al. Traditional fermented foods and beverages from around the world and their health benefits[J]. Microorganisms, 2022, 10(6): 1 151.
- [9] 陈亚蓝, 陈顺心, 侯贺丽, 等. 微生物固态发酵芡实工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(11): 152-159.
- CHEN Y L, CHEN S X, HOU H L, et al. Process optimization for microbial solid-state fermentation of *Euryale ferox* and antioxidant activity analysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 152-159.
- [10] KRISTANTI D, RATNAWATI L. Physicochemical and functional properties of fermented adlay (*Coiix lacryma-jobi*-L) flour[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1 024(1): 012026.
- [11] ALIKHAN S, ZHANG M W, LIU L, et al. Co-culture submerged fermentation by *Lactobacillus* and Yeast more effectively improved the profiles and bioaccessibility of phenolics in extruded brown rice than single-culture fermentation[J]. Food Chemistry, 2020, 326: 126985.
- [12] 郝越. 乳酸菌发酵改性蜡质玉米及其应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021: 45.
- HAO Y. Lactic acid bacteria fermented modified waxy corn and its application[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2021: 45.

- [13] 李少辉, 生庆海, 赵巍, 等. 不同粒径小米粉对面团流变特性及馒头质构特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(16): 98-106.
LI S H, SHENG Q H, ZHAO W, et al. Effect of foxtail millet flours with different particle sizes on rheological properties of dough and texture characteristics of steamed bread[J]. Food Science, 2022, 43(16): 98-106.
- [14] 冯文翰, 严军辉, 张影全, 等. 生鲜面条水分状态与产品质量特性关系研究[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(6): 764-773.
FENG W H, YAN J H, ZHANG Y Q, et al. Study on the relationship between water state and product quality characteristics of fresh noodles[J]. Journal of Triticeae Crops, 2025, 45(6): 764-773.
- [15] 闫文芳, 李文钊, 代任任, 等. 改性蛋清粉对面条品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(22): 70-76.
YAN W F, LI W Z, DAI R R, et al. Effect of modified egg white powder on noodle quality[J]. Food Science, 2021, 42 (22): 70-76.
- [16] YAN X D, MCCLEMENTS D J, LUO S J, et al. A review of the effects of fermentation on the structure, properties, and application of cereal starch in foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 65(12): 2 323-2 342.
- [17] 李利民, 赵贵婷, 尚加英, 等. 发酵对淀粉及淀粉基食品品质改善研究进展[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(5): 215-222.
LI L M, ZHAO G T, SHANG J Y, et al. Research progress on the improvement of starch and starch-based food quality by fermentation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(5): 215-222.
- [18] 赵依迪. 植物乳杆菌 HH-LP56 发酵改性玉米粉质构特性的机理研究及应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024: 34-41.
ZHAO Y D. Study on mechanism and application of fermentation modified corn meal by *Lactobacillus plantarum* HH-LP56[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024: 34-41.
- [19] 胡畔, 杨萍, 郭天时. 植物乳杆菌与米根霉混合固态发酵改善玉米粉理化加工特性[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(7): 161-166.
HU P, YANG P, GUO T S. Change in physicochemical and processing properties of maize flour after solid fermentation with *Lactobacillus plantarum* and *Rhizopus oryzae*[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(7): 161-166.
- [20] 步李卿. 乳酸菌发酵玉米工艺条件优化及其对营养价值和发酵品质影响的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2021: 13.
BU L Q. Optimization of fermentation conditions of corn by lactic acid bacteria and its effect on nutritional value and fermentation quality[D]. Yantai: Yantai University, 2021: 13.
- [21] SHAO D L, ZHANG J G, SHAO T T, et al. Modification of structure, pasting, and *in vitro* digestion properties of glutinous rice starch by different lactic acid bacteria fermentation[J]. Foods, 2025, 14(3): 367.
- [22] 马蕾, 梁建芬. 不同发酵处理对玉米粉加工特性及淀粉粒结构的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 303-311.
MA L, LIANG J F. Effects of different fermentation treatments on the processing characteristics of maize flour and starch granules structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(14): 303-311.
- [23] ZHANG K Y, LIU S B, LIANG S N, et al. Exopolysaccharides of lactic acid bacteria: structure, biological activity, structure-activity relationship, and application in the food industry: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128733.
- [24] 邹奇波, 程新, 陈诚, 等. 混菌发酵酸面团对全麦面包风味与烘焙特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 32-39.
ZOU Q B, CHENG X, CHEN C, et al. Effects on flavor and baking characteristics of whole wheat bread by fermented sourdough with the mixed culture[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 32-39.
- [25] 原玉雪, 韩赫, 王志鹏, 等. 玉米破碎度与发酵条件对玉米全粉发酵及产品加工特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(21): 42-48.
YUAN Y X, HAN H, WANG Z P, et al. Effects of crushing degrees and fermentation conditions on fermentation and processing characteristics of corn flour[J]. Food Research and Development, 2024, 45(21): 42-48.
- [26] SUN L, SUN X Y, DU Y F, et al. Effect of the starch structure fermented by *Lactobacillus plantarum* LB-1 and yeast on rheological and thermomechanical characteristics of dough[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130877.
- [27] 张淑仪, 许祥, 张林华, 等. 高直链玉米淀粉添加对挤压荞麦面条结构、蒸煮品质及消化特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 116-124.
ZHANG S Y, XU X, ZHANG L H, et al. Effect of high amylose corn starch on the structure, cooking quality and starch digestibility of extruded buckwheat noodles[J]. Food Science, 2023, 44(6): 116-124.
- [28] 杨芝. 微波改性玉米粉及玉米面条品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022: 36-37.
YANG Z. Study on the quality of microwave modified corn flour and corn noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022: 36-37.
- [29] 李佳豪. 乳酸菌发酵改性燕麦粉对面团特性及馒头品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024: 42.
LI J H. Study on the effect of modified oat flour fermented by lactic acid bacteria on dough characteristics and steamed bread quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024: 42.
- [30] 武思奇, 原玉雪, 宋春丽, 等. 复合改性玉米全粉面糊流变学特性及对戚风蛋糕品质影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51 (11): 299-306.
WU S Q, YUAN Y X, SONG C L, et al. Rheological properties of compound modified corn flour batter and its influence on the quality of the prepared chiffon cake[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(11): 299-306.
- [31] 韩翠萍, 段佳玉, 曹晨, 等. 发酵方式对玉米粉品质和风味特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 171-176.
HAN C P, DUAN J Y, CAO C, et al. Effect of fermentation method on quality and flavor characteristics of maize flour[J]. Food Science, 2023, 44(4): 171-176.