

## 乳酸菌冻干粉剂发酵全麦酸面包工艺优化及储藏特性分析

田梦洋, 田霞, 王志伟, 周中凯

### Process Optimization and Storage Characteristics Analysis of Lactic Acid Bacteria Lyophilized Powder Fermented Whole Wheat Sourdough Bread

TIAN Mengyang, TIAN Xia, WANG Zhiwei, and ZHOU Zhongkai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022080230>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 乳酸菌发酵酸面团对青麦仁面包品质的影响

Effect of Sourdough Fermented by *Lactobacillus* on the Quality of Green Wheat Kernel Bread

食品工业科技. 2021, 42(1): 61-67,74 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030018>

#### 酸面团在馒头发酵中的应用研究进展

Research Progress on the Application of Sourdough in Steamed Bread Fermentation

食品工业科技. 2021, 42(15): 389-395 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070217>

#### 一株酸面团源乳酸菌的益生特性及其对刺五加叶总皂苷的影响

The Probiotic Properties of a Strain of Sourdough-derived Lactic Acid Bacteria and Its Effect on the Total Saponins of *Acanthopanax senticosus* Leaves

食品工业科技. 2021, 42(14): 121-126 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120035>

#### 产乳化活性多糖乳酸菌的筛选及其发酵荞麦酸面团、面包的特性

Screening of Lactic Acid Bacteria Producing Emulsifying Active Exopolysaccharide and Properties of Its Fermented Buckwheat Sourdough and Bread

食品工业科技. 2019, 40(13): 71-77 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.13.012>

#### 酶制剂对全麦面包品质作用分析

Analysis on the Effect of Enzymes on the Quality of Whole Wheat Bread

食品工业科技. 2021, 42(1): 363-367,372 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019120153>

#### 葡萄糖氧化酶对全麦面团及全麦馒头品质改良的影响

Effect of Glucose Oxidase on Quality of Whole Wheat Dough and Whole Wheat Steamed Bread

食品工业科技. 2019, 40(14): 78-82,88 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.14.013>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

田梦洋, 田霞, 王志伟, 等. 乳酸菌冻干粉剂发酵全麦酸面包工艺优化及储藏特性分析 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 172–184.  
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080230

TIAN Mengyang, TIAN Xia, WANG Zhiwei, et al. Process Optimization and Storage Characteristics Analysis of Lactic Acid Bacteria Lyophilized Powder Fermented Whole Wheat Sourdough Bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 172–184.  
(in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080230

· 工艺技术 ·

# 乳酸菌冻干粉剂发酵全麦酸面包工艺优化及储藏特性分析

田梦洋, 田 霞, 王志伟\*, 周中凯\*

(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

**摘要:** 目的: 为了利用植物乳杆菌冻干粉剂发酵制作全麦酸面团面包 (Whole wheat sourdough bread, WWSB), 并优化其加工工艺以及分析其储藏特性。方法: 在单因素实验基础上, 选择全麦酸面团 (Whole wheat sourdough, WWSD) 添加量以及全麦酸面团发酵时间为影响因素, 面包最终的 pH、总酸度值 (Total acidity, TTA)、比容、硬度、感官得分作为响应值, 使用中心组合试验设计方法, 对全麦酸面包的工艺配方进行优化。并在此基础上以普通小麦面包 (Wheat bread, WB) 和普通全麦面包 (Whole wheat bread, WWB) 为空白组及对照组, 均于 4 ℃ 进行为期一周的储藏, 分别于第 0、1、3、5、7 d 时取样, 分析三种面包的全质构特性以及水分迁移情况。结果: 全麦酸面包的最佳工艺配方: 全麦酸面团添加量 18%, 全麦酸面团发酵时间 16 h, 此时的全麦酸面包 pH4.82、TTA 5.62 mL、比容 3.47 mL/g、硬度 5.59 N、感官得分 83。在此加工条件下三种面包的储藏特性指标如下: WWSB 在整个储藏期间的硬度增长速率在前期和后期 (35.75% 和 21.57%) 均小于 WWB (39.98% 和 25.36%) 及 WB (43.81% 和 28.22%); WWSB 的弛豫时间  $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 、 $T_{23}$  下降速率均小于 WWB 和 WB, 尤其是半结合水  $T_{22}$  的下降速率。结论: 优化后的全麦酸面包配方条件合理, 且储藏期间可以较好地抑制水分丧失以及延长面包保质期。

关键词: 酸面团, 酸面包, 全麦, 工艺, 品质特性, 储藏

中图分类号: TS213.2

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)12-0172-13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080230

本文网刊:



## Process Optimization and Storage Characteristics Analysis of Lactic Acid Bacteria Lyophilized Powder Fermented Whole Wheat Sourdough Bread

TIAN Mengyang, TIAN Xia, WANG Zhiwei\*, ZHOU Zhongkai\*

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Objective: In order to make whole wheat sourdough bread (WWSB) using *Lactobacillus plantarum* lyophilized powder fermentation, and to analyze its processing and storage characteristics. Method: Based on the previous single-factor experiments, the whole wheat sourdough (WWSD) addition and the fermentation time of whole wheat sourdough were selected as the influencing factors, and the final pH, total acidity (TTA), specific volume, hardness and sensory score of the bread were used as the response values to optimize the process formulation of whole wheat sourdough using the Central composite design method. On this basis, wheat bread (WB) and whole wheat bread (WWB) were used as the blank group and the control group, both were stored at 4 ℃ for one week, and samples were taken at day 0, 1, 3, 5 and 7 to analyze the whole texture characteristics and water migration of the three breads. Results: The best process recipe for whole wheat

收稿日期: 2022-08-23

基金项目: 天津市自然科学基金 (20JCZDJC00040)。

作者简介: 田梦洋 (1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事农产品加工方面的研究, E-mail: t1999my@163.com。

\* 通信作者: 王志伟 (1979-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事粮油科学方面的研究, E-mail: wangzw@ust.edu.cn。

周中凯 (1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事谷物科学与营养方面的研究, E-mail: zkzhou@ust.edu.cn。

sourdough bread was 18% whole wheat sourdough addition and 16 h whole wheat sourdough fermentation time, at which time the whole wheat sourdough bread had pH 4.82, TTA 5.62 mL, specific volume 3.47 mL/g, hardness 5.59 N, and sensory score 83. The storage characteristics of the three breads under this processing condition were as follows: The hardness growth rate of WWSB (35.75% and 21.57%) throughout the storage period was less than that of WWB (39.98% and 25.36%) and WB (43.81% and 28.22%) in the early and late stages, the relaxation time  $T_{21}$ ,  $T_{22}$ , and  $T_{23}$  of WWSB decreased at a rate less than that of WWB and WB, especially the decrease rate of semi-bound water  $T_{22}$ . Conclusion: The optimized recipe of whole wheat sourdough bread had reasonable conditions and could better inhibit moisture loss and extend the shelf life of the bread during storage.

**Key words:** sourdough; sourdough bread; whole wheat; processes; quality characteristics; storage

酸面团(Sourdough)是以一定的谷物为原料,添加一定量的水在具有活性微生物(例乳酸菌和酵母菌)的发酵下混合形成的面团<sup>[1]</sup>。酸面团可以通过自然发酵得到,或者人为定向添加某些乳酸菌直接发酵得到<sup>[2]</sup>。将发酵好的酸面团作为发酵剂加入到主面团中制作的面包叫做酸面包(Sourdough Bread)。酸面团发酵技术最早起源于欧洲,通过自然发酵不断向发酵剂中补足面粉和水进行喂养获得酸面团发酵剂<sup>[2]</sup>,但是不能有效避免发酵中有害微生物的污染,且发酵周期较长。因此,目前主要通过定向添加乳酸菌来发酵,这也有效避免了即发活性干酵母加工的面包风味单一、老化较快等问题。

近些年来,酸面团发酵剂的应用也已经逐渐变成海内外学者的主要研究内容。其中乳酸菌、酵母菌协同发酵产生的有机酸、酶等物质,可以改善面包的品质和风味,并且可以延长面包保质期<sup>[3-4]</sup>, Mantzourani 等<sup>[5]</sup>研究发现采用酸面团加工的面包,其中的矿物质利用率得到明显提高,并且感官品质和保质期也得到改善及延长; Torrieri 等<sup>[6]</sup>研究发现,筛选出的产胞外多糖(Exopoly Saccharides, EPS)的乳酸菌发酵面包,在储藏期间面包内部有更高的水分含量和更好的机械性能; 徐丹和万晶晶<sup>[7-8]</sup>研究发现发酵过程中酸面团会产生 EPS,可以抑制支链淀粉重结晶,进而降低面包老化值; 乳酸菌酸面团可以提高面团持气性,也可以有效提高面团的粘弹性以及面团体系的稳定。

全麦保留了麸皮、胚芽等成分的原料,口感更粗糙,麦香味也更浓郁,且保留了大量维生素,营养价值也较高。但是全麦面包的口感、食用品质、质地结构等都不如普通小麦面包。因此可以将酸面团发酵应用到全麦面包加工中,以缓解高膳食纤维对面包品质及发酵特性等影响,进而改善面包的口感、风味、货架期、体积等<sup>[9-10]</sup>。

乳酸菌在发酵过程中产生大量的有机酸,这些酸类物质对面包中淀粉以及蛋白质等都会产生重要的影响,如改变面筋、淀粉的组成结构、激发内源酶活性、改善面团体系等。面团中的酵母菌主要是提升面团产气进而增大面包体积。因此,酸化程度是酸面团发酵以及酸面包加工中的重要指标。本实验选择全麦酸面团发酵时间以及酸面团添加量作为变量,

使用植物乳杆菌冻干粉剂发酵全麦面团生产全麦酸面包,采用一次发酵法进行加工,并采用中心组合试验设计进行优化,筛选出最佳添加量和发酵时间,进而对面包储藏特性进行比较分析,研制一款便捷、品质优良的全麦酸面包。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

全麦粉、小麦高筋面包 新乡梁润全谷物食品有限公司; 植物乳杆菌冻干粉剂(食品级, 活菌数 $\geq 1.0 \times 10^{10}$  cfu/g) 山东中科嘉亿生物工程有限公司; 即发活性干酵母 安琪酵母股份有限公司; 食用盐、白砂糖、黄油 均为市售。

FA1004 分析天平 上海恒平公司; 海氏 HM740 型和面机 中国海氏公司; SP-16S 型醒发箱、PT2531 型烤箱、BVM6630 面包体积测定仪 上海埃尔默公司; RTC-3002D 型质构分析仪 日本莱欧泰公司; HWS-1000 型恒温恒湿培养箱 厦门海铂特公司; 202A-1B 型电热恒温干燥箱 上海汇盛公司; Micro-MR-25 型低场核磁共振 上海纽迈电子科技有限公司; 恒温磁力搅拌器 绍兴上虞艾科仪器设备有限公司; pH 计 浙江纳德科学仪器有限公司; HLN-31 切片机 上海善友机械公司; DoughLAB 全自动粉质分析仪 伊伊西科技有限公司; 干燥皿 成都典锐实验仪器有限公司; 冰箱 广州傲雪制冷设备有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 植物乳杆菌全麦酸面团的制备 称取相等质量的全麦面粉和纯净水(w/w), 以其中面团的总质量为基准, 加入 1% 的植物乳杆菌冻干粉制剂, 搅拌均匀, 密封, 置于 37 °C 恒温恒湿培养箱中进行培养, 使最终面团中的总活菌数 $\geq 1.0 \times 10^8$  cfu/g<sup>[11]</sup>。

1.2.2 全麦酸面包的加工 面包加工使用一次发酵法<sup>[12]</sup>, 不同面包配方见表 1, (按照总粉的质量为 100%, 其他用量的添加分别按照与总粉的比列进行添加)。加工流程图如图 1 所示。

加工要点: 根据表 1 面包的加工配方, 首先称取等质量的全麦粉和纯净水(1:1)置于灭菌小烧杯中, 植物乳杆菌冻干粉剂按照全麦粉基质 1% 质量分数进行称取, 称量过程应避免杂质混入。将植物乳杆菌冻干粉剂与纯净水混合后, 使用一次性搅拌棒搅拌均

表1 三种面包加工配方  
Table 1 Three recipes for bread processing

面包品种	WB(%)	WWB(%)	WWSB(%)
小麦面包粉	100	70	70
食用盐	1	1	1
白砂糖	8	8	8
酵母	1.6	1.6	1.6
纯净水	60	60	60
黄油	5	5	5
全麦粉	0	30	12
全麦酸面团	0	0	18

注: WB(小麦面包)、WWB(全麦面包)、WWSB(全麦酸面包); 全麦酸面团(WWSB)添加量按照其中的全麦干粉质量为基准。

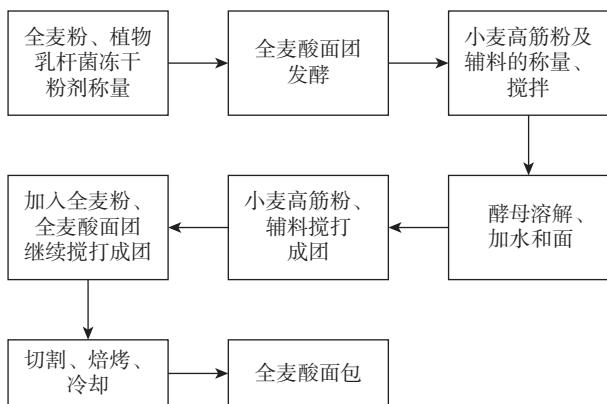


图1 全麦酸面包加工流程图

Fig.1 Flow chart of whole wheat sourdough bread processing

匀,缓缓加入全麦粉中进行混合搅拌、保鲜膜封口,置于37℃、85%湿度的培养箱发酵至pH≈4。称取小麦高筋粉及其余辅料,除干酵母外都倒入和面机中混合均匀。称取一定质量的纯净水将干酵母进行搅拌溶解,并缓慢倒入和面机中,先慢搅5 min,再快搅3 min,直至面团面筋形成。将全麦粉和称取的发酵后的全麦酸面团放入和面机中继续进行搅打,直到面团可以形成面筋薄膜。将搅打成团后的面团置于面板上松弛15 min,然后翻面整理排气、分割为100 g/个、整形后放入容器内。将整形好的面团置于37℃、85%湿度的醒发箱内醒发90 min左右,直至面团发酵到2倍大。烤箱提前预热,将发酵后的面团在上火170℃、下火210℃焙烤20 min左右。焙烤后立即脱模取出面包,防止面包底部由于热蒸汽出现软塌现象,室温冷却2 h后进行包装,得到全麦酸面包成品。

1.2.3 单因素实验 根据预实验的结果,小麦高筋面包粉与全麦粉的添加比为7:3。查阅资料,确定在本实验中全麦酸面团发酵时间和全麦酸面团添加量是全麦酸面包主要的影响因素。

1.2.3.1 全麦酸面团发酵不同的时间对全麦酸面包品质的影响 在其他辅料添加量不变的情况下,控制全麦酸面团的添加量15%不变(按照其中的干粉质量为基准),分别将发酵0、5、10、15、20、25、30 h

的全麦酸面团添加到主面团中,以面包的pH、总酸度值(TTA)、比容、硬度和感官得分为评价的指标。

1.2.3.2 全麦酸面团不同添加量对全麦酸面包品质的影响 控制全麦酸面团发酵时间15 h不变,向全麦主面团中分别添加5%、10%、15%、20%、25%、30%的全麦酸面团(按照其中干粉的质量为基准),以最终面包的pH、TTA、比容、硬度和感官评分为评价的指标。

1.2.4 响应面试验设计 以中心组合试验设计优化全麦酸面团面包的加工工艺,分别以面包的pH、TTA、比容、硬度和感官得分为响应值,选取全麦酸面团添加量及全麦酸面团发酵时间两个因素为自变量,分别以-1、0、1代表两个自变量的水平。因素水平见表2。

表2 中心组合变量及水平试验设计  
Table 2 Central combination variable and horizontal design

因素	水平		
	-1	0	1
A: WWSB发酵时间(h)	5	10	15
B: WWSB添加量(%)	10	15	20

注: WWSB(全麦酸面团)。

### 1.2.5 指标的测定方法

1.2.5.1 面包比容的测定 面包焙烤后于室温冷却后采用BVM6630体积测定仪测定面包比容,比容(mL/g)=体积(mL)/质量(g)<sup>[12]</sup>,每个面包样品重复三次取平均值。

1.2.5.2 面包pH和TTA测定 分别取冷却之后的面包瓢芯部分10 g,各加入90 mL的蒸馏水,磁力搅拌20 min后测定pH;用0.1 mol/L NaOH滴定,边滴定边搅拌至pH 8.6,记录消耗的NaOH体积,即为总酸度值(TTA)<sup>[13-14]</sup>。每个样品均重复三次实验取均值。

1.2.5.3 面包质构特性的测定 试验中使用RTC-3002D型质构仪在Texture Profile Analysis(TPA)模式测定面包全质构。冷却2 h的面包取面包瓢芯部位切分为2 cm×2 cm×2 cm正方体块状,每组中选取均匀并且差异较小的中间六块进行质构测定。质构仪参数设定<sup>[15]</sup>:探头型号为P/100,测试前速率为1.0 mm/s,测试速率为3.0 mm/s,测试后速率为3.0 mm/s,压缩水平为50%,感应力5 g,两次压缩间距时间为3 s,每组样品测试6次,结果取平均值。测试指标为面包的硬度值。

1.2.5.4 感官评定 参照GB/T14611-2008《面包烘焙品质评分标准》略加修改,得到关于全麦酸面包的感官评分要求。挑选10名经过训练的评价员(男女各5名)对面包外观、结构、风味及整体可接受度进行感官评定,满分值100,最终结果取平均值,评分标准如表3所示。

表 3 全麦酸面包感官评价表  
Table 3 Sensory evaluation of whole wheat sourdough bread

项目	指标	得分标准	满分
外观 (40分)	体积形状	面包外观饱满完整, 大小均匀: 10.1~15分; 体积太大, 表面较粗糙, 裂口, 不对称, 体积太小, 其他: 1~10分	15
	表皮颜色	面包表皮呈现自然棕黄色, 色泽均匀: 9.1~15分; 色泽不均一, 太浅太深, 有斑点, 有焦糊, 颜色发暗, 其他: 1~9分	15
	外表质地	面包质地柔软光滑: 5.1~10分; 质地、表皮发硬或太软, 太脆, 其他: 1~5分	10
结构 (25分)	弹韧性	手指按压回弹性良好且较大: 7.1~10分; 按压回弹较慢, 回弹很慢或没有回弹, 其他: 1~7分	10
	组织结构	纵切面气孔均匀细密, 纹理清晰: 9.1~15分; 纵切面气孔不均匀, 粗糙, 纹理不清晰, 有断裂及掉渣, 纵切面太紧或太松, 其他: 1~9分	15
风味 (25分)	气味	香气纯正, 有淡淡小麦香味, 无异味: 6.1~10分; 面包香气平淡, 较浓酸味, 有明显的异味, 其他: 1~6分	10
	味道	麦香味均匀, 酸味均匀: 9.1~15分; 酸味太重或太淡, 其他怪味: 1~9分	15
整体接受度 (10分)	可接受性	面包质地、结构、风味整体比较均匀, 无异味, 干裂等: 6.1~10分; 面包质地、结构或者风味有欠缺, 总体一般或较差: 1~6分	10
总分			100

1.2.6 小麦面包、全麦面包和全麦酸面包储藏期间的全质构分析 将按照表 1 加工好的三种面包冷却后, 分别用自封袋密封并于 4 ℃ 冰箱储存, 并分别于第 0、1、3、5、7 d 取样, 对三种面包的全质构特性进行测定, 测定前先将面包在室温下解冻 30 min, 测定方法同上。测试指标为面包的硬度、弹性、咀嚼性、胶粘性、内聚性、回复性和胶粘性<sup>[16]</sup>。每组实验均重复 6 次取均值。

1.2.7 小麦面包、全麦面包、全麦酸面包储藏期间内部水分迁移分析 使用 MicroMR-25 低场核磁共振仪器(Carr-Purcell-Meiboom-Gil CPMG 脉冲序列), 对 4 ℃ 储存 0 d 和 7 d 的三种面包中水分的分布状态及水分的迁移速率进行测定分析。称取 3 g 左右面包芯切分成长宽高 2 cm 左右大小的立方体, 使用保鲜膜将其包裹好后置于核磁检测管中, 测定样品的自旋-自旋弛豫时间  $T_2$ 。测试条件设置: TD 采样点数=16504、TW(ms) 重复采样等待时间=2000.00、NS 重复扫描次数=16、SW(kHz) 接收机宽带=100、PRG 前置放大增益=2<sup>[16]</sup>。每组实验重复 3 次, 取平均值。

### 1.3 数据处理

采用 Excel2010、Design Expert12.0、SPSS19.0、Origin2018 对数据进行处理、差异显著性分析及绘制图表, 所有试验的数据均重复 3 次后取平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果分析

2.1.1 全麦酸面团发酵不同的时间对全麦酸面包品质的影响 全麦酸面团发酵时间对全麦酸面包的品质影响见图 2。由图 2A 可得, 随着 WWSB 发酵时间的不断增加, WWSB 的 pH 呈现不断下降的趋势, 且在 15 h 开始下降速率增大, 在 15 h 时, WWSB 的 pH 为 4.66, 总酸度值(TTA)为 5.52 mL, 并于 30 h

时 pH 达到 3.61; 总酸度值(TTA)与 pH 的变化呈现相反的变化趋势, 随着 WWSB 发酵时间的增加, 呈现不断上升的变化趋势, 且一直都处于较快的增加速率, 这可能是由于在发酵前期, 植物乳杆菌处于生长的对数期, 此时面团中的活菌数目不断增加, 所以产酸总量也不断的积累, 总酸度值(TTA)一直保持较高的速率增长, 这表明在面团发酵中的植物乳杆菌仍然在进行新陈代谢活动, 所以也在不断产酸。研究发现, 一般的混合酸面包面团的 pH 为 4.6~4.8, TTA 为 4~7 mL<sup>[8]</sup>, 发酵过酸的面团会使面包产品质地下降变硬, 轻微酸化适度的面团对面包的比容质地有良好的改善。如果面包的 pH 不断降低, TTA 不断增加, 会导致面包中的面筋蛋白, 淀粉等大分子物质会发生一定成度的水解, 导致面包的结构被弱化, 品质下降。图 2B 可以看出, 随着发酵时间的增加 WWSB 的比容和硬度变化同样呈现相反的变化趋势, WWSB 的比容随着发酵时间增加呈现先上升后下降变化趋势, WWSB 的硬度随着发酵时间增加呈现下降后上升的变化趋势; 在发酵 15 h 时, 面包的比容达到最大为 3.87 mL/g, 面包的硬度最小为 5.26 N, 并且在发酵的 0~15 h 之间, 面包的比容呈现不断增加的趋势, 15 h 之后面包比容开始下降, 硬度也开始增大。这主要是由于此时的面包酸化程度达到了适中, 其中的乳酸菌代谢产物也促进了酵母菌的生长代谢及产气, 此时的面筋网络结构可以得到很好的软化作用, 有利于减少全麦粉对面筋体系的破坏作用, 因此面包内部持气性更好<sup>[17]</sup>。图 2C 可以看出, 随着发酵时间的增加, WWSB 的感官得分呈现先上升后下降的变化趋势, 并且在 15 h 时达到最大值 80.5 分, 在 15 h 之后感官得分呈现逐渐下降的趋势, 主要由于此时的面包 pH 不断降低, 总酸度值(TTA)不断累积, 导致面包的口感发酸发涩, 因此感官评分也呈现下降的趋势。综上所述, 选择 WWSB 发酵时间为 5~15 h。

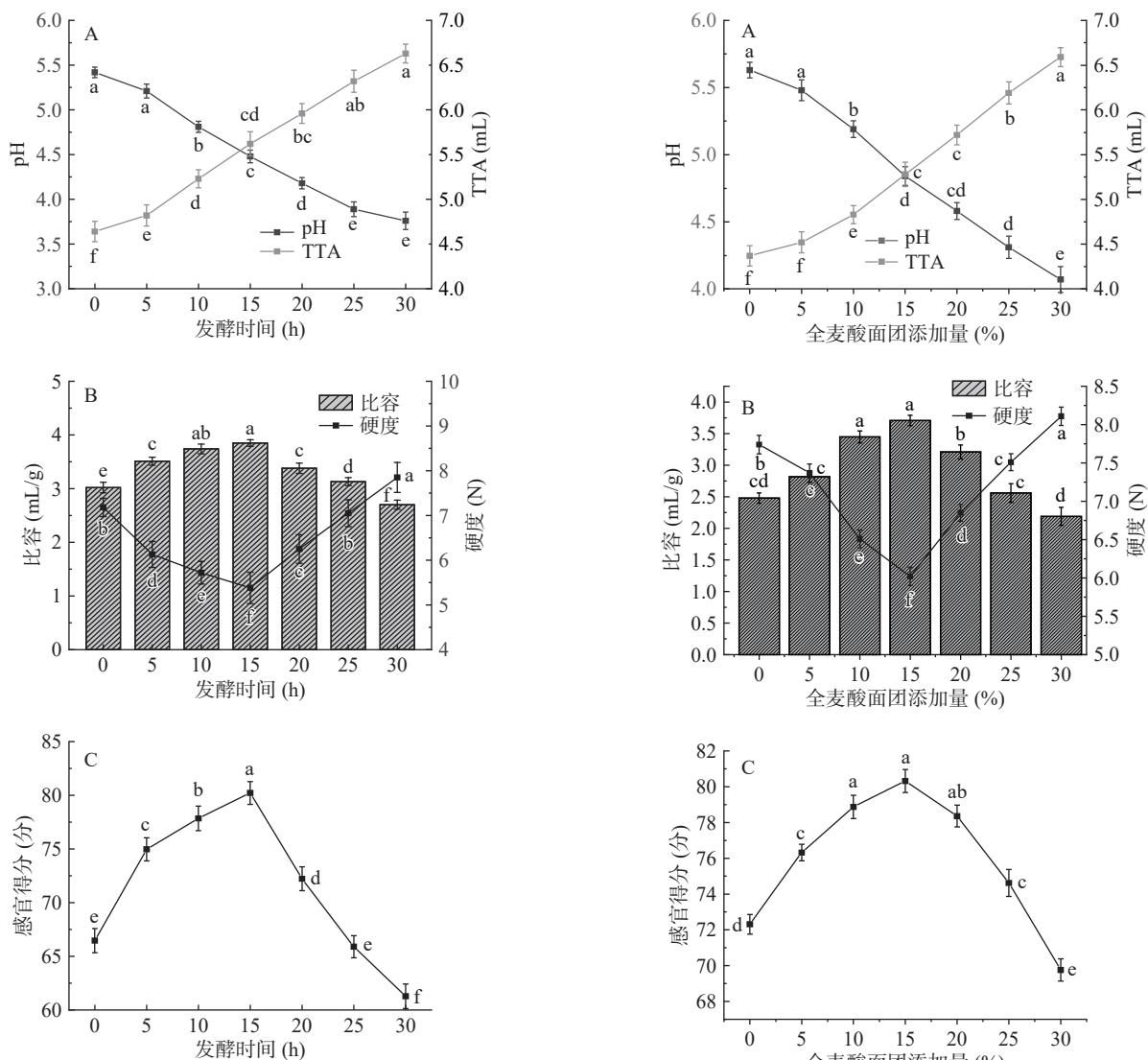


图 2 全麦酸面团发酵时间对全麦酸面包品质特性的影响

Fig.2 Effect of fermentation time of whole wheat sourdough on quality characteristics of whole wheat sourdough bread

注: 不同字母表示存在显著性差异( $P<0.05$ ), 相同字母表示差异性不显著( $P>0.05$ ); 图 3 同。

2.1.2 全麦酸面团不同添加量对全麦酸面包品质的影响 全麦酸面团添加量对全麦酸面包品质影响见图 3。由图 3A 可知, 随着 WWSD 添加量的增加, 面包的 pH 呈现不断下降趋势, 相反, TTA 呈现不断上升的变化趋势, 主要是由于添加量的增多, 其中的活性乳酸菌含量增多, 产生的乳酸、乙酸等有机酸含量也会不断增加, 因此导致 WWSB 的 pH 不断降低, 当添加量大于 20% 时, WWSB 的 pH 迅速降低, 由 4.62 到 4.11。Adisa 等<sup>[18-19]</sup>研究发现当酸面团中的 pH 不断下降的过程中, 会产生更高含量的有机酸, 它们可以激活谷物内源性蛋白酶, 对面筋蛋白等起到一定的软化作用, 增强面筋的弹性, 进而面包的比容也可以得到提升。图 3B 可以看出, 添加量在 5%~15% 之间时, 面包的比容不断增加, 并且在 15% 添加量时比容达到最大 3.69 mL/g, 于 20% 添加量之后开始逐渐下降, 超过 20% 添加量时, 比容下降速率明显增

图 3 全麦酸面团添加量对全麦酸面包品质特性的影响

Fig.3 Effect of the amount of whole wheat sourdough on the quality and characteristics of whole wheat sourdough bread

大。面包硬度在 5%~15% 添加量时不断下降, 20% 添加量时开始逐渐上升, 并且在高于 20% 添加量时迅速增加, 这主要也与面包的酸度有关, 混合面团的发酵 pH 此时低于最适发酵的 4.6~4.8 的范围, 面团中酸度过高, 过度的酸化会对面包品质产生不利影响<sup>[20]</sup>, 其中的酵母菌生长不利, 或者是其中的乳酸菌和酵母菌由协同变为相互竞争的作用关系, 导致面包的品质开始下降。图 3C 可以看出, 随着添加量的增加, 感官得分先上升后下降, 在未添加酸面团时比较低, 主要是因为面包出现掉渣, 口感粗糙, 味道较淡。在添加量 15% 时达到最高值 79.57 分, 于 20% 之后感官得分迅速下降, 整体感官得分在 10%~20% 添加量之间处于较高值, 这主要由于在其中酵母菌乳酸菌的共同发酵作用下, 对全麦粉中的膳食纤维有一定降解作用, 因此膳食纤维等大分子物质对面团中面筋的网络结构破坏性有效降低<sup>[21-22]</sup>, Aburas 等<sup>[23]</sup>研究发现高膳食纤维的食品在加工中不利于被酶解, 因此这些膳食纤维物质会导致面团结构的不稳定, 持气

性差, 所以会对面包品质产生不利的影响。所以, 在添加量 10%~20% 之间时的面包 pH 和 TTA 都在较合适的范围内, 且面包比容也适宜, 硬度也小, 所以感官上也带给大家较为适宜的感受。综上所述, 选择 WWSD 的添加量为 10%~20%。

## 2.2 响应面优化试验结果分析

2.2.1 响应面回归模型的建立与分析 以全麦酸面团添加量和发酵时间 2 个因素设计中心组合试验, 根据试验安排设计如表 4 的 13 个组合。

表 4 响应面试验设计结果  
Table 4 Response surface test design results

实验号	因素		响应值					
	A: 发酵时间(h)	B: WWSD添加量(%)	pH	TTA (mL)	比容 (mL/g)	硬度 (N)	感官得分	综合评分
1	5	10	5.69	2.3	2.776	4.882	76.2	33.58
2	15	10	5.19	4.2	3.174	5.661	79.92	39.12
3	5	20	5.31	3.9	2.775	3.187	77.46	37.34
4	15	20	5.06	5.6	3.389	5.872	79.32	31.41
5	5	15	5.54	2.9	3.125	3.226	78.5	44.96
6	15	15	5.13	5	3.225	5.409	79.1	32.95
7	10	10	5.31	4.5	3.773	4.764	78.74	48.07
8	10	20	5.11	5.3	4.652	2.076	80.2	67.84
9	10	15	5.17	5.4	4.347	3.062	84.1	67.59
10	10	15	5.16	5.1	4.261	2.571	83.4	67.95
11	10	15	5.14	5.2	4.167	2.507	83.15	68.34
12	10	15	5.15	4.9	4.545	3.149	82	63.79
13	10	15	5.12	4.7	4.761	3.109	83.7	66.28

采用 Design Expert12.0 对表 4 的数据进行处理分析, 得到全麦酸面团发酵不同时间和全麦酸面团不同添加量下的面包 pH( $Y_1$ )、TTA( $Y_2$ )、比容( $Y_3$ )、硬度( $Y_4$ )和感官评分( $Y_5$ )的回归方程。

$$Y_1=5.16-0.1933A-0.1183B+0.0625AB+0.1462A^2+0.0212B^2$$

$$Y_2=5.03+0.9500A+0.6333B-0.0500AB-1.01A^2-0.0586B^2$$

$$Y_3=4.41+0.1852A+0.1822B+0.0538AB-1.21A^2-0.1762B^2$$

$$Y_4=2.88+0.9412A-0.6987B+0.4765AB+1.45A^2+0.5661B^2$$

$$Y_5=83.89+1.36A+0.1683B-0.4650AB-2.04A^2-3.21B^2$$

如表 5(pH)、表 6(TTA)、表 7(硬度)、表 8(比容)及表 9(感官评分)的模型均  $P<0.01$ , 均为极显著。失拟项  $P$  值分别为 0.0627、0.4716、0.0508、0.3426 及 0.8694, 均  $>0.05$ , 不显著。表明该模型可以较好地反映全麦酸面包与全麦酸面团发酵时间及全麦酸面团添加量的关系。模型确定系数分别为  $R^2=0.9809$ 、 $0.9563$ 、 $0.9164$ 、 $0.9233$  和  $0.9864$ , 表明该模型实验误差较小, 具有统计学意义, 拟合度较好, 可以用来对全麦酸面包后续的加工进行优化。在表 5 中根据一次项  $P$  值可以看出, 一次项 A、B 对该酸面包的 pH 影响为极显著( $P<0.01$ )水平, 根据一次项

表 5 pH 的方差分析

Table 5 Analysis of variance for pH

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.4021	5	0.0804	71.97	<0.0001	**
A	0.2243	1	0.2243	200.73	<0.0001	**
B	0.0840	1	0.0840	75.20	<0.0001	**
AB	0.0156	1	0.0156	13.89	0.0073	**
$A^2$	0.0590	1	0.0590	52.84	0.0002	**
$B^2$	0.0012	1	0.0012	1.11	0.0467	*
残差	0.0078	7	0.0011			
失拟项	0.0063	3	0.0021	5.71	0.0627	
纯误差	0.0015	4	0.0004			
总离差	0.4099	12				
$R^2$	0.9809					
$R^2_{adj}$	0.9673					

注: \*\*表示具有极显著影响( $P<0.01$ ), \*表示具有显著影响( $P<0.05$ ); 表 6~表 9 同。

表 6 TTA 的方差分析

Table 6 Analysis of variance for TTA

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	11.28	5	2.26	30.61	<0.0001	**
A	5.41	1	5.41	73.50	<0.0001	**
B	2.41	1	2.41	32.66	<0.0001	**
AB	0.0100	1	0.0100	0.1357	0.4735	*
$A^2$	2.81	1	2.81	38.14	0.0005	**
$B^2$	0.0095	1	0.0095	0.1288	0.432	*
残差	0.5157	7	0.0737			
失拟项	0.2237	3	0.0746	1.02	0.4716	
纯误差	0.2920	4	0.0730			
总离差	11.79	12				
$R^2$	0.9563					
$R^2_{adj}$	0.9250					

表 7 硬度的方差分析

Table 7 Analysis of variance for hardness

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	18.06	5	3.61	10.92	0.0033	**
A	4.25	1	4.25	12.82	0.0089	**
B	2.51	1	2.51	6.50	0.0381	*
AB	0.4262	1	0.4262	1.29	0.4048	*
$A^2$	0.43	1	0.43	19.45	0.0031	**
$B^2$	1.13	1	1.13	3.41	0.047	*
残差	2.32	7	0.3307			
失拟项	1.92	3	0.6409	6.53	0.0508	
纯误差	0.3925	4	0.0981			
总离差	20.38	12				
$R^2$	0.9164					
$R^2_{adj}$	0.9052					

$F$  值大小, 可以得出 2 个影响因素对全麦酸面包的 pH 影响大小为: 发酵时间>添加量, 因素 AB、 $A^2$  及  $B^2$  对全麦酸面包 pH 影响分别为极显著( $P<0.01$ )、极显著( $P<0.01$ )和显著( $P<0.05$ )。同理, 表 6 中一次项 A 和 B 对全麦酸面包的 TTA 影响均极显著( $P<0.01$ ), 根据一次项  $F$  值大小, 可以得出 2 因素对全麦

表8 比容的方差分析

Table 8 Analysis of variance of the specific volume

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	5.80	5	1.16	16.86	0.0009	**
A	0.2067	1	0.2057	2.99	0.0274	*
B	0.1991	1	0.1991	2.89	0.0327	*
AB	0.0116	1	0.0116	0.1680	0.0091	**
$A^2$	4.07	1	4.07	59.10	0.0001	**
$B^2$	0.0858	1	0.0858	1.25	0.0301	*
残差	0.4851	7	0.0688			
失拟项	0.2550	3	0.0850	1.50	0.3426	
纯误差	0.2265	4	0.0566			
总离差	0.28	12				
$R^2$	0.9233					
$R^2_{adj}$	0.8686					

表9 感官评分的方差分析

Table 9 Analysis of variance of sensory scores

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	74.85	5	14.97	101.37	<0.0001	**
A	11.18	1	11.18	75.70	<0.0001	**
B	0.1700	1	0.1700	1.15	0.0489	*
AB	0.8649	1	0.8649	5.86	0.0461	*
$A^2$	11.44	1	11.44	77.48	<0.0001	**
$B^2$	28.38	1	28.38	192.16	<0.0001	**
残差	1.03	7	0.1477			
失拟项	0.1537	3	0.0512	0.2329	0.8694	
纯误差	0.8800	4	0.2200			
总离差	75.88	12				
$R^2$	0.9864					
$R^2_{adj}$	0.9766					

酸面包的 TTA 影响大小为: 发酵时间>添加量, AB、 $A^2$  及  $B^2$  对全麦酸面包 TTA 的影响分别为显著 ( $P<0.05$ )、极显著 ( $P<0.01$ ) 和显著 ( $P<0.05$ ); 表 7 中一次项 A 和 B 对全麦酸面包的硬度影响分别为极显著 ( $P<0.01$ ) 和显著 ( $P<0.05$ ), 根据一次项 F 值大小, 2 因素对全麦酸面包的硬度影响大小为: 发酵时间>添加量, AB、 $A^2$  及  $B^2$  对全麦酸面包的硬度影响分别为显著 ( $P<0.05$ )、极显著 ( $P<0.01$ ) 和显著 ( $P<0.05$ ); 表 8 中一次项 A 和 B 对全麦酸面包的比容影响均为显著 ( $P<0.05$ ) 水平, 根据一次项 F 值大小, 2 因素对全麦酸面包的比容影响大小为: 发酵时间>添加量, AB、 $A^2$  及  $B^2$  对全麦酸面包比容的影响分别为极显著 ( $P<0.01$ )、极显著 ( $P<0.01$ ) 和显著 ( $P<0.05$ ); 表 9 中一次项 A 和 B 对全麦酸面包的感官得分影响分别为极显著 ( $P<0.01$ ) 和显著 ( $P<0.05$ ), 根据一次项 F 值大小, 2 因素对全麦酸面包的感官得分影响大小为: 发酵时间>添加量, AB、 $A^2$  及  $B^2$  对全麦酸面包的感官得分影响为显著 ( $P<0.05$ )、极显著 ( $P<0.01$ ) 和极显著 ( $P<0.01$ )。

2.2.2 感官面结果分析 图 4A~图 4E 为全麦酸面团添加量和发酵时间对全麦酸面包的综合评价影响的响应面图。响应面图的陡峭程度反映各因素对

响应值结果的影响大小, 其中的等高线可以反映各因素之间的交互作用的高低<sup>[12]</sup>。图 4A 和图 4B 分别为 WWSD 的添加量和发酵时间对 WWSB 的 pH 和 TTA 的影响结果图, 分别呈现向上、向下开口的曲面, 两者都存在极值, 且其等高线呈现的椭圆弧度都比较大, 即 WWSD 的添加量和发酵时间的交互作用对全麦酸面包的 pH 及 TTA 影响都比较显著, 且与表 5 和表 6 中的方差分析结果也显示, WWSD 添加量和发酵时间的交互作用对 pH 和 TTA 的影响分别为极显著水平 ( $P<0.01$ ) 以及显著水平 ( $P<0.05$ ), 两者分析结果一致。随着 WWSD 的发酵时间增加以及添加量的增多, WWSB 的 pH 和 TTA 分别呈现逐渐下降和上升的变化趋势, 且 WWSB 的 pH 最低达到了 4.68, TTA 最高为 6.11 mL; 随着发酵时间及添加量的增加, pH 的下降逐渐趋于平缓, 这与 Olojede 等<sup>[10]</sup>研究发现一致, 在发酵中后期全麦酸面团 pH 的下降速率逐渐减小, 主要由于此时的植物乳杆菌逐渐进入稳定期, 其中的活菌数目也逐渐趋于稳定。

图 4C 和图 4D 分别是 WWSD 添加量和发酵时间对 WWSB 的硬度和比容的影响结果图, 其分别呈现向上、向下开口的曲面图, 表示两者都存在着极值, 由图 4C 中可以看出, 当 WWSD 的添加量控制不变时, 随着发酵时间的不断增加, WWSB 的硬度是先下降然后逐渐上升的变化趋势, 当发酵时间一定时, 随着添加量的不断增加, 呈现缓慢下降随后缓慢上升的趋势; 图 4D 中, 随着发酵时间延长及添加量的增加, WWSB 的比容呈现逐渐上升进而不断下降的变化趋势。两者的等高线都呈现出弧度较大的椭圆形, 即 WWSD 添加量和发酵时间的交互作用对面包硬度和比容的影响都较为显著; 且在图 4D 中的等高线的椭圆弧度更大, 响应曲面也更陡峭, 说明 WWSD 添加量和发酵时间交互作用对面包比容的影响更大, 由表 7 和表 8 中的方差分析可以得出两因素交互作用对面包的硬度和比容分别为显著水平 ( $P<0.05$ ) 和极显著水平 ( $P<0.01$ ), 两者的分析结果一致。

图 4E 为 WWSD 发酵时间和添加量之间的交互作用对 WWSB 的感官评分的影响。感官评分的结果可以较为直观地反映产品整体的品质优良以及好坏, 也可以直接地反映消费者对产品的接受程度以及喜爱程度大小。分析可得, 其响应面图呈现向下开口的曲面, 存在极值, 随着 WWSD 添加量增大呈现先上升后下降的变化趋势, 同理, 随着 WWSD 发酵时间的延长, 感官得分也呈现相同的变化趋势。其等高线呈现出略大的弧度, 表明添加量和发酵时间 2 个因素对面包感官得分的影响较为显著; 由表 9 的方差分析得出, 两因素交互作用对 WWSB 的影响为显著水平 ( $P<0.05$ ), 两者分析结果一致。

2.2.3 试验综合评价结果及方差分析 在酸面包加

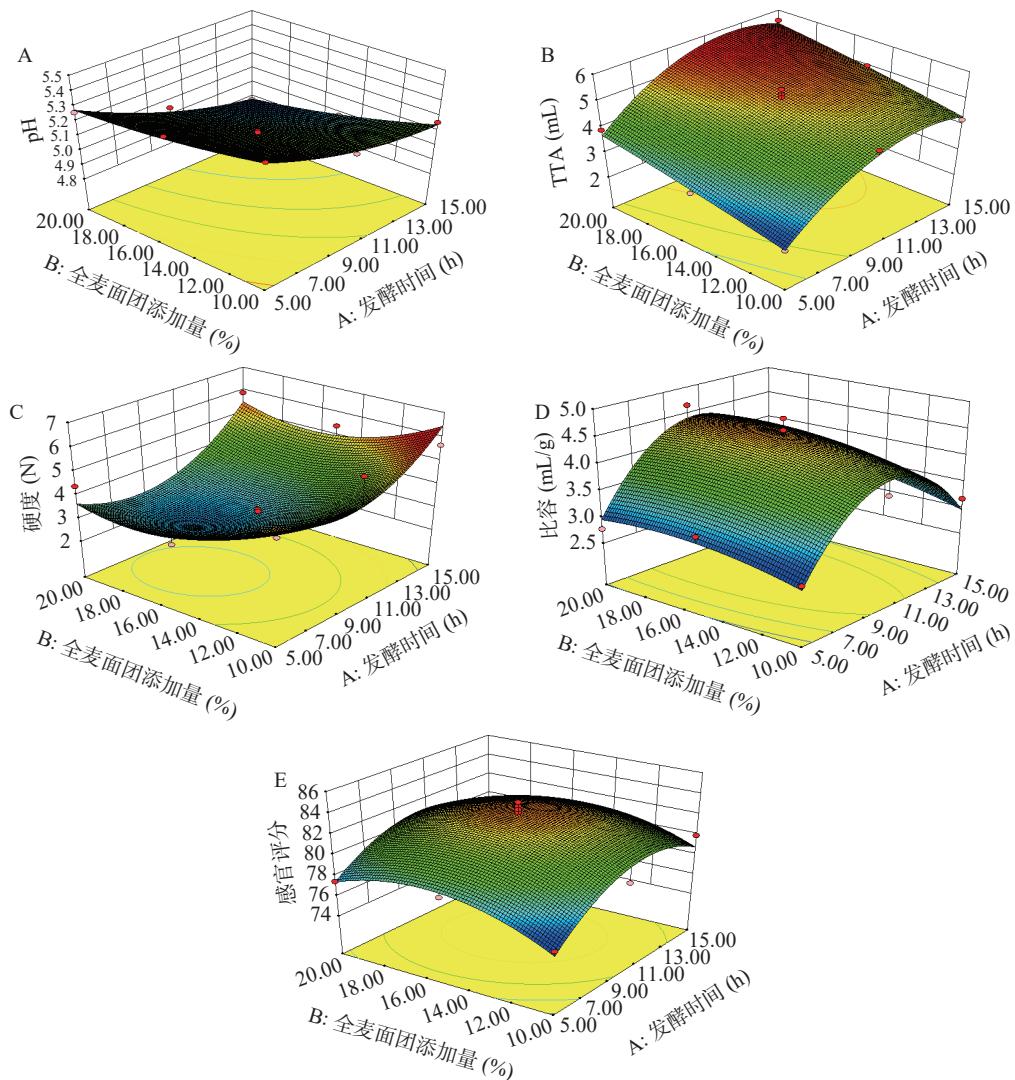


图 4 全麦酸面团发酵时间、添加量对全麦酸面包各项指标的响应面分析

Fig.4 Response surface analysis of fermentation time and addition amount of whole wheat sourdough on various indicators of whole wheat sourdough bread

工中, 面包的 pH 适宜范围为 4.7~5.4, 总酸度 TTA 适宜范围为 5~7 mL, 面包比容越大越好, 相反, 硬度越小越好, 相同条件下的面包感官得分越高越好, 此时面包的综合品质也会更好。根据全麦酸面团发酵时间和添加量对全麦酸面包不同响应值贡献率大小的差异性, 首先对各指标进行归一化处理, 再通过 CRITIC 软件分析得到权重系数分别为: pH 24.83%、TTA 21.62%、比容 20.08%、硬度 18.14%、感官得分 15.33%, 根据得到的权重系数对响应面试验结果进行综合评分, 结果如表 4 综合评分所示。

综合得分方程为:  $Y=57.48-3.13A+1.60B+1.79AB-17.76A^2-8.27B^2$ , 全麦酸面团发酵时间  $P<0.001$ , 表现为极显著; 回归方程中一次项绝对值的大小反映对各个响应因素的影响大小, 正负表示影响的方向, 因此, 全麦酸面团的发酵时间对酸面包影响性大于添加量。全麦酸面团添加量  $P=0.0428$  表现为显著 ( $P<0.05$ ), 模型的确定系数  $R^2$  为 0.9167, 表明拟合度良好; 二次项  $A^2$  和  $B^2$  分别表现为极显著 ( $P<0.01$ ) 和显著 ( $P<0.05$ ),  $AB$  交互项表现为显著 ( $P<0.05$ ), 拟合

表 10 综合得分方差分析

Table 10 Analysis of variance for comprehensive scores

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	87.49	5	37.50	15.42	0.0012	*
A	58.59	1	58.59	2.68	<0.0001	**
B	15.46	1	15.17	0.7060	0.0428	*
AB	12.82	1	12.86	0.5854	0.0492	*
$A^2$	870.76	1	70.44	39.77	0.0004	**
$B^2$	188.71	1	88.38	8.62	0.0218	*
残差	135.25	7	21.89			
失拟项	135.80	3	45.27	10.37	0.0534	
纯误差	17.46	4	4.36			
总离差	184.74	12				
$R^2$	0.9167					
$R^2_{adj}$	0.8573					

度良好,  $R^2_{adj}$  为 0.8573 有 85.73% 解释该模型, 失拟项表现为不显著 ( $P>0.05$ ) (表 10)。图 5 为全麦酸面团不同添加量和发酵时间对全麦酸面包的综合得分响应面曲线图, 其开口向下, 存在极值。综上, 可以用综合得分反映两因素对响应值的影响。

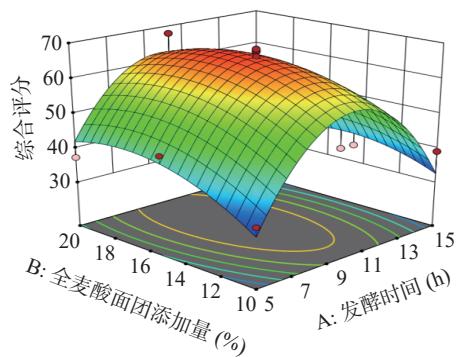


图5 全麦酸面团发酵时间、添加量对综合得分的响应面分析

Fig.5 Response surface analysis of fermentation time and addition amount of whole wheat sourdough on comprehensive scores

2.2.4 优化验证试验 根据上述软件得到的最佳工艺:全麦酸面团发酵时间 15.50 h、添加量 17.68%,此模型下得到的各指标理论值为: pH4.472、TTA 5.849 mL、比容 3.326 mL/g、硬度 5.774 N、感官得分为 82.9、

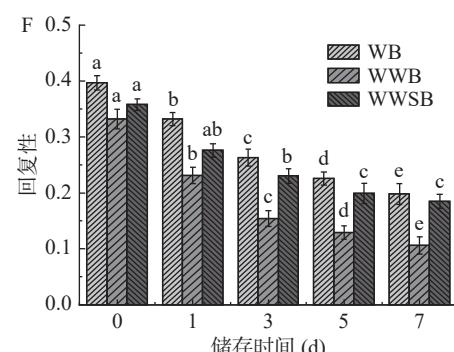
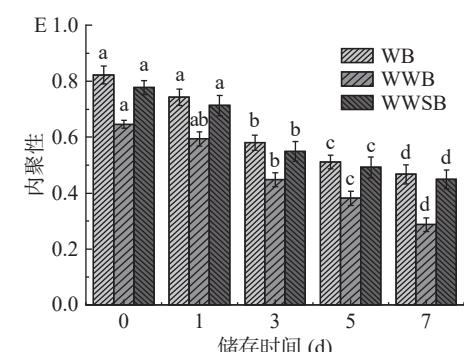
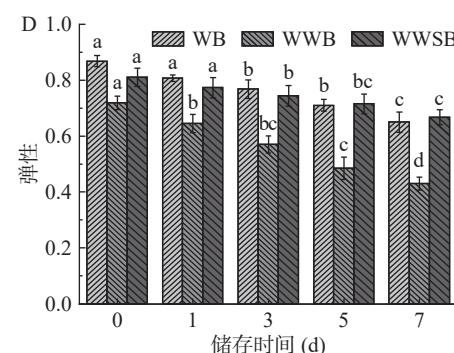
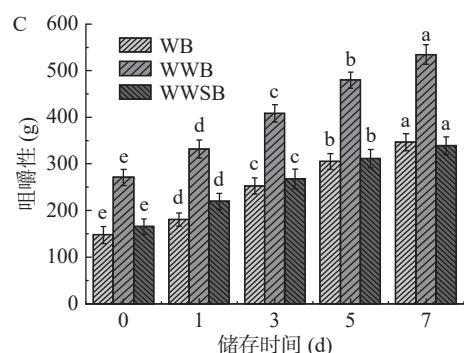
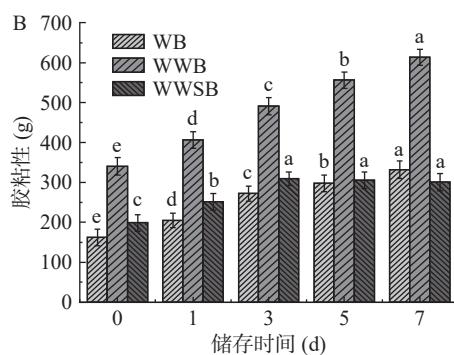
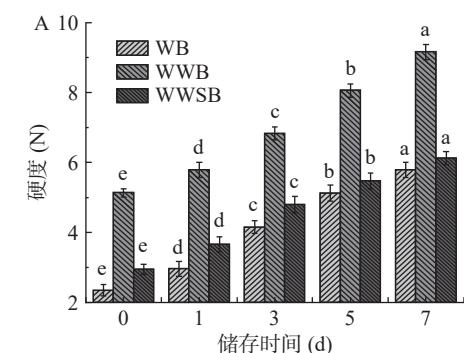


图6 三种面包储藏期间全质构分析

Fig.6 Total texture analysis of three kinds of bread during storage

注:图中相同样品不同字母表示存在显著性差异( $P<0.05$ )。

综合评分为 63.47。为了便于面包加工的可操作性,将工艺参数修正为:全麦酸面团发酵时间 16 h,全麦酸面团添加量 18%。在此条件下进行 3 次重复试验验证,得到的全麦酸面包最终结果为: pH4.82、TTA 5.62 mL、比容 3.47 mL/g、硬度 5.59 N, 感官得分为 83 分,此条件下综合评分为 66.98。最终试验结果与理论预测值相差性比较小,表明该工艺具有一定的可行性。

### 2.3 储藏期间三种面包全质构特性分析

图 6A~图 6E 为小麦面包、全麦面包及全麦酸面包在 4 ℃ 储藏一周时间的全质构分析图。经过研究发现,面包的硬度、胶粘性以及咀嚼性与面包品质呈现负相关的变化趋势,其指标越大,表示面包的口感、品质越差;相反,面包的弹性、内聚性以及回复性与面包的品质呈现正相关变化趋势,其数值越大表示面包的品质、口感也更好<sup>[8]</sup>。面包在储藏期间会出现水分迁移蒸发、淀粉的重结晶以及面筋蛋白的柔软度降低等现象,这些现象都称之为面包的老化。面包

表 11 储藏期间面包硬度的回归方程

Table 11 Regression equation of bread hardness during storage

样品	线性回归方程	$R^2$
WB	$y=49.826x+247.96$	0.9913
WWB	$y=57.029x+516.21$	0.9874
WWSB	$y=44.785x+316.97$	0.9747

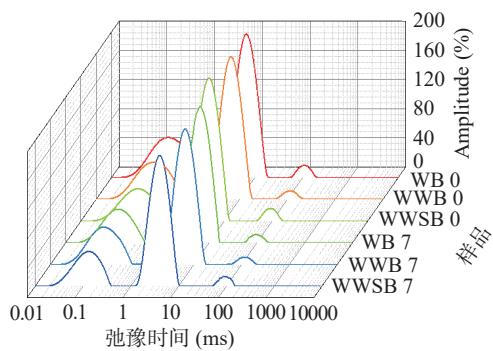
的硬度变化值在面包的储藏期间可以用来直接反映出面包整体的新鲜程度。从图 6A 可以得出, 随着储藏时间的延长, 三种面包的硬度都呈现不断增加的现象, 表 11 中对面包的硬度变化进行线性回归分析, 得出三种面包的硬度变化速率依次为全麦酸面包 (Whole wheat sourdough bread, WWSB) < 小麦面包 (Wheat bread, WB) < 全麦面包 (Whole wheat bread, WWB)。在储藏的 0~3、3~7 d 中全麦酸面包的硬度增加速率分别是 35.75% 和 21.57%, 均小于小麦面包 (43.81% 和 28.22%) 和全麦面包 (39.98% 和 25.36%)。这与 Daisuke 等<sup>[19]</sup>的研究结果一致, 其研究发现, 植物乳杆菌等可以一定程度水解淀粉, 因此储藏期间面包硬度增长小于小麦面包和全麦面包也可能与此原因有关。Cizekiene 等<sup>[24]</sup>发现添加酸面团后的面包由于面团中的淀粉酶和蛋白酶等组分被激活, 可以显著降低面包在储藏期间的老化度, 保持面包较好的品质特性。Joo 等<sup>[25]</sup>、Arendt 等<sup>[26]</sup>通过在小麦面包中添加酸面团后, 在乳酸菌和酵母菌的共同作用下及产生的代谢产物改善了面团的流变学特性, 使得面包的持气性能得到良好的提升, 比容也有效增大。因此可以得出, 面包在添加一定量的酸面团后对最终面包的质构特性可以起到良好的改善作用。同理, 面包的胶粘性和咀嚼性与面包的硬度呈现相同的变化趋势, 随着全麦酸面包储存时间的延长, 胶粘性和咀嚼性也不断增加, 在储藏 0~3 d 内, 胶粘性和咀嚼性都有较大幅度的增大, 全麦酸面包的增长值略大于小麦面包, 储藏 3~7 d 时, 全麦酸面包的胶粘性和咀嚼性值的增加逐渐减小, 且在第 7 d 时都略小于小麦面包, 整个储藏期间, 全麦面包的胶粘性和咀嚼性值最大且增加速率也不断增大(图 6B、图 6C)。

面包的弹性变化在整个储藏期间不断下降, 在 0~3 d 内小麦面包弹性略大于全麦酸面包, 3~7 d 内, 全麦酸面包的弹性下降略小于小麦面包, 全麦面包弹性一致处于较快下降速率(图 6D), 主要由于单一全

麦面包中大量膳食纤维的存在, 会对面筋蛋白造成一定的破坏, 因此造成面包粘弹性受到影响, 面包品质变差, 弹性不断减小。添加全麦酸面团后, 由于其中乳酸菌和酵母菌的作用<sup>[27]</sup>, 对面筋蛋白和淀粉组分等具有一定降解作用下, 在其中蛋白酶和淀粉酶等多种酶的作用, 对面团起到一定的软化, 进而对产品的品质有一定的改良作用。面包的内聚性和回复性随着储藏时间延长都呈现不断下降的变化趋势, 小麦面包的内聚性和回复性值始终都略高于全麦酸面包(图 6E、图 6F), 这主要是由于全麦酸面包中的添加全麦粉后膳食纤维的存在, 且其不含有面筋, 对面包弹性、比容有一定的影响, 所以对面包的粘弹性及回复性也产生一定的影响。

## 2.4 储藏期间三种面包水分迁移变化分析

图 7 为三种面包在储藏第 0 d 和第 7 d 时的  $T_2$  弛豫时间曲线, 反映了储藏期间面包内部水分的分布状态。在图 7 曲线中的 3 个峰分别表示面包中三种水分的存在状态, 对应的弛豫时间越小, 则水分子的移动性就会越弱; 峰面积表示分别对应的水分的含量大小<sup>[28]</sup>。其中的  $T_{21}(<1 \text{ ms})$  表示面包分子中极性基团与水以氢键键合的那部分水, 称为结合水;  $T_{22}(1 \sim 20 \text{ ms})$  表示与面筋网络及淀粉颗粒相连, 但是没有被其包裹, 也会与其他物质以氢键等作用力相连, 是一种弱结合水, 也是整个体系中最主要的那部分水;  $T_{23}(100 \text{ ms 左右})$ , 表示面包中流动性最强的那部分水, 未被面筋网络结构束缚的水, 也是最主要损失的水分, 因此一般称为自由水<sup>[28-29]</sup>。由表 12 可

图 7 储藏 0 d 和 7 d 时面包横向弛豫时间  $T_2$  分布Fig.7 Distribution of transverse relaxation time  $T_2$  of bread at 0 and 7 days of storage表 12 三种面包在储藏第 0 d 和第 7 d 横向弛豫时间( $T_2$ )及峰面积( $A_2$ )的分布Table 12 Distribution of transverse relaxation time ( $T_2$ ) and peak area ( $A_2$ ) of three kinds of bread on day 0 and day 7 of storage

储存天数(d)	样品	弛豫时间 $T_{21}$ (ms)	弛豫时间 $T_{22}$ (ms)	弛豫时间 $T_{23}$ (ms)	面积占比 $A_{21}$ (%)	面积占比 $A_{22}$ (%)	面积占比 $A_{23}$ (%)
0	WB	0.667±0.065 <sup>a</sup>	6.896±0.205 <sup>a</sup>	113.994±4.211 <sup>a</sup>	24.542±0.568 <sup>ab</sup>	74.744±0.689 <sup>a</sup>	0.454±0.178 <sup>c</sup>
	WWB	0.579±0.013 <sup>ab</sup>	6.464±0.189 <sup>a</sup>	109.907±6.065 <sup>bc</sup>	26.446±0.324 <sup>a</sup>	73.323±0.873 <sup>a</sup>	0.173±0.151 <sup>c</sup>
	WWSB	0.546±0.044 <sup>b</sup>	5.785±0.171 <sup>b</sup>	98.694±5.729 <sup>c</sup>	26.928±0.423 <sup>a</sup>	72.113±0.824 <sup>ab</sup>	0.231±0.271 <sup>c</sup>
7	WB	0.257±0.17 <sup>d</sup>	4.465±0.212 <sup>d</sup>	96.033±8.968 <sup>d</sup>	22.077±0.482 <sup>b</sup>	68.698±0.795 <sup>c</sup>	8.542±0.174 <sup>a</sup>
	WWB	0.318±0.014 <sup>c</sup>	4.501±0.309 <sup>cd</sup>	96.719±4.922 <sup>d</sup>	23.879±0.531 <sup>b</sup>	68.954±0.695 <sup>bc</sup>	6.823±0.219 <sup>b</sup>
	WWSB	0.356±0.015 <sup>c</sup>	4.633±0.213 <sup>c</sup>	90.322±5.376 <sup>e</sup>	24.268±0.372 <sup>b</sup>	69.751±0.793 <sup>b</sup>	6.199±0.195 <sup>b</sup>

注: 同一列不同字母表示存在显著性差异( $P<0.05$ )。

知,在面包中65%以上的水分都以弱结合水的状态存在,20%左右的水分是面包中与蛋白质、淀粉等大分子物质紧密结合的水。由图7和表12也可以得出,随着储藏时间的延长,  $T_{21}$  和  $T_{22}$  的峰向左平移,且对应的弛豫时间及峰面积也减小,表明面包中的水分总量在不断减少,结合水中的多分子层水不断向单分子层的水进行转化,主要由于面包内部的水分不断向面包表皮进行迁移,在此迁移过程中不断的进行转化<sup>[17]</sup>。

图8A~图8C分别为  $T_{21}$ 、 $T_{22}$  和  $T_{23}$  的横向弛豫时间,随着储藏时间的延长,三种水分的弛豫时间都呈现不断下降的趋势,且在0~3 d内的下降速率高于3~7 d的下降速率,主要是由于储藏初期时,面包内部的水分活性比较高,水分子的运动性也比较强,所以造成在初期时面包的水分流失比较大,质子的移动性变差,弛豫时间相对也会减小,且以半结合水和自由水的丧失为主;储藏后期,水分子运动性不断降

低且水分的流失也逐渐趋于平衡。这与马子琳等<sup>[29]</sup>在馒头储藏期间的测定趋势一致。全麦酸面包的弛豫时间低于小麦面包和全麦面包,且下降的幅度也比小麦面包和全麦面包低,表明在整个储藏期间,全麦酸面包中的水分子运动性都低于小麦面包和全麦面包,添加全麦酸面团之后可以增强面包的保水性。而且弛豫时间  $T_{22}$  的波动幅度最小,面包中的水分主要就是以半结合水的状态存在,这说明添加全麦酸面团的面包半结合水更加稳定,不易丧失。Gobbetti等<sup>[30~31]</sup>研究发现,由于酸面团发酵过程中的淀粉等大分子物质水解产生了较多的小分子糊精,这些物质可以影响淀粉和蛋白质之间的相互作用以及水分子的结合,进而对其中的部分自由水起到一定抑制作用,因此对面包老化有一定积极作用。所以添加全麦酸面团后可以一定程度上增强面包的持水力,且在储藏期可以有效抑制水分的丧失,可以一定程度上抑制面包的老化。

### 3 结论

采用食品级植物乳杆菌冻干粉对全麦面粉进行发酵,将全麦酸面团(WWSD)作为发酵剂并且在酵母菌的协同作用下对面团发酵、焙烤加工全麦酸面包。通过中心组合试验设计对全麦酸面包的最佳工艺条件进行探讨。结果显示,当全麦酸面团(WWSD)的添加量为18%,发酵时间为16 h时,添加到主面团中焙烤的全麦酸面包的品质特性最好。面包的比容增大,咀嚼性、硬度等比全麦面包都显著降低,全麦酸面包在口感、风味、质构等方面都明显得到了改善。

对普通小麦面包(WB)、普通全麦面包(WWB)和全麦酸面包(WWSB)在储藏特性上进行分析比较。结果显示,WWSB有可以效降低储藏期间的硬度及其水分迁移和丧失,其硬度增长速率在储藏前期和后期均小于WB和WWB,胶粘性和咀嚼性的增长为WWB>WWSB>WB,且储藏后期的WWSB胶粘性和咀嚼性逐渐小于WB;面包的弹性不断减小,内聚性和回复性与弹性呈现相同的变化趋势,变化趋势为WB>WWSB>WWB;WWSB可以较好地抑制弛豫时间  $T_{22}$  的下降及较好地抑制半结合水分的丧失。由此可知,根据最佳工艺条件制作的全麦酸面包,在食用品质和储藏特性有明显改善,全麦酸面包在发酵焙烤中不添加额外添加剂等物质,满足人们对健康的全麦食品的追求,为生产一款便捷,品质优良的全麦酸面包提供理论应用基础。

### 参考文献

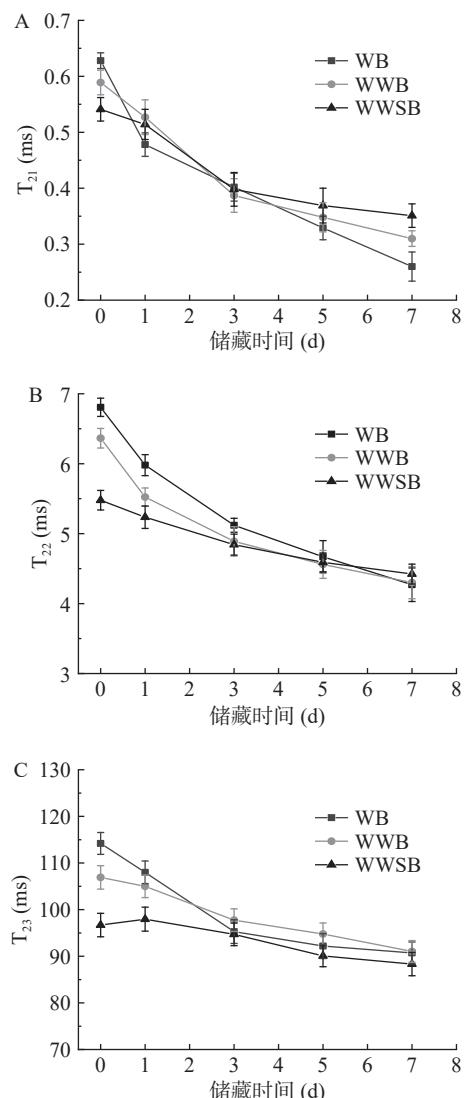


图8 储藏期间三种面包中不同水分弛豫时间  $T_{21}$ (A)、 $T_{22}$ (B)、 $T_{23}$ (C)

Fig.8 Different water relaxation times  $T_{21}$  (A),  $T_{22}$  (B),  $T_{23}$  (C) in three kinds of bread during storage period

[1] 钟京,王凤,刘娜,等.乳酸菌发酵麸皮酸面团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. Effects of lactic acid bacteria fermented bran sour dough on rheological fermentation and baking characteristics of high fiber bread dough[J]. Food Industry, 2013, 34(9): 49~54,57. ]

[2] 孙玉清,田文静,邓志峰,等.酸面团发酵剂在发酵面食品加工中的研究进展[J].中国食物与营养,2021,27(11): 24~28.

- [ SUN Y Q, TIAN W J, DENG Z W, et al. Research progress of sourdough starter in fermented noodle food processing[J]. *Food and Nutrition in China*, 2021, 27(11): 24–28. ]
- [ 3 ] 孙银凤, 徐岩, 黄卫宁, 等. 不同发酵基质的酸面团对酵母面团体系面包烘焙及老化特性的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(13): 37–42. [ SUN Y F, XU Y, HUANG W N, et al. Effect of different fermentation substrates of sourdough on the baking and aging characteristics of yeast dough system bread[J]. *Food Science*, 2015, 36(13): 37–42. ]
- [ 4 ] ZHANG Y, GUO L, XU D, et al. Effects of dextran with different molecular weights on the quality of wheat sourdough breads [J]. *Food Chemistry*, 2018, 256: 373–379.
- [ 5 ] MANTZOURANI I, PLESSAS S, ODATZIDOU M, et al. Effect of a novel *Lactobacillus paracasei* starter on sourdough bread quality[J]. *Food Chemistry*, 2018, 271: 259–265.
- [ 6 ] TORRIERI E, PEPE O, VENTORINO V, et al. Effect of sourdough at different concentrations on quality and shelf life of bread [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 56(2): 508–516.
- [ 7 ] 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 san Francisco* on the quality of sourdough bread and the improvement of bread flavor[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019. ]
- [ 8 ] 万晶晶. 乳酸菌发酵影响燕麦酸面团面包烘焙特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011. [ WAN J J. Study on the influence of lactic acid bacteria fermentation on the baking characteristics of oat sourdough bread[J]. Wuxi: Jiangnan University, 2011. ]
- [ 9 ] 赵苑, 郭斐, 董笑晨, 等. 全谷物食品行业概况和发展趋势[J]. 粮食流通技术, 2018(15): 8–12. [ ZHAO P, GUO F, DONG X C, et al. Whole grain food industry overview and trends[J]. *Grain Distribution Technology*, 2018(15): 8–12. ]
- [ 10 ] OLOJEDE A O, SANNI A I, BANWO K. Effect of legume addition on the physicochemical and sensorial attributes of sorghum-based sourdough bread[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 118(6): 108769.
- [ 11 ] 曹伟超, 张宾乐, OMEDI J O, 等. 功能性乳酸菌发酵黑豆麦麸酸面团面包的营养及烘焙特性[J]. *食品科学*, 2022, 43(2): 142–150. [ CAO W C, ZHANG B L, OMEDI J O, et al. Nutritional and baking properties of functional lactic acid bacteria fermented black bean and wheat bran sourdough bread[J]. *Food Science*, 2022, 43(2): 142–150. ]
- [ 12 ] 石媛, 赵闪闪, 常露荧, 等. 酸面团面包的研制与品质优化[J]. 农业科技与装备, 2019(5): 44–46. [ SHI Y, ZHAO S S, CHANG L Y, et al. Development and quality optimization of sourdough bread[J]. *Agricultural Technology and Equipment*, 2019(5): 44–46. ]
- [ 13 ] 徐小娟. 营养面包的开发及其品质提升的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. [ XU X J. Research on the development of nutritious bread and its quality improvement[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. ]
- [ 14 ] ALIREZA S. The secrets of sourdough: A review of miraculous potentials of sourdough in bread shelf life[J]. *Biotechnology*, 2008, 7(3): 413–417.
- [ 15 ] PLESSAS S, ALEXOPOULOS A, MANTZOURANI I, et al. Application of novel starter cultures for sourdough bread production[J]. *Anaerobe*, 2011, 17(6): 486–489.
- [ 16 ] 苏东海, 苏东民, 丁雁鑫. NMR 技术研究木聚糖酶对馒头老化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(18): 101–105. [ SU D H, SU D M, DING Y X. NMR technique to study the effect of xylose on the aging characteristics of steamed buns[J]. *Food Industry Technology*, 2014, 35(18): 101–105. ]
- [ 17 ] 刘彦. 高抗氧化荞麦面包面团发酵流变与烘焙学特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013. [ LIU Y. Fermentation rheology and bakery characteristics of high antioxidant buckwheat bread dough[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013. ]
- [ 18 ] ADISA A M, IFESAN B, ENUJIUGHUA V N, et al. Microbiological and probiotic assessment of yeast isolated from wholegrain millet sourdoughs[J]. *Journal of Advances in Microbiology*, 2020, 1–10.
- [ 19 ] DAISUKE, INOMATA, HIROAKI, et al. Evaluation of bread-making quality of dough by the supplemented with sourdough fermented by *Leuconostoc citreum* YMC08 strain, isolated from domestic extra strong wheat variety "Yumechikara"[J]. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 2019, 66(11): 420–426.
- [ 20 ] 陈佳芳. 不同添加量产胞外多糖荞麦酸面团对面包烘焙和老化特性的影响[J]. *现代面粉工业*, 2017, 31(5): 97–100, 122.
- [ 21 ] CHEN J W. Effects of different extracellular polysaccharide on baking and aging characteristics of buckwheat sour dough[J]. *Modern Flour Industry*, 2017, 31(5): 97–100, 122. ]
- [ 22 ] 王富. 不同发酵基质的酸面团对酵母面团体系面包烘焙及老化特性的影响[J]. *食品安全导刊*, 2018(6): 37–42. [ WANG F. Effect of different fermentation substrates of sourdough on the baking and aging characteristics of yeast dough system bread[J]. *Food Safety Guide*, 2018(6): 37–42. ]
- [ 23 ] ABURAS H, ISPIRLI H, TAYLAN O, et al. Structural and physicochemical characterisation and antioxidant activity of an  $\alpha$ -D-glucan produced by sourdough isolate *Weissella cibaria* MED17[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 161: 648–655.
- [ 24 ] CIZEIKIENE D, JAGELAVICIUTE J, STANKEVICIUS M, et al. Thermophilic lactic acid bacteria affect the characteristics of sourdough and whole-grain wheat bread[J]. *Food Bioscience*, 2020, 38(2): 100791.
- [ 25 ] JOO A, JING H A, WHA C, et al. Suitability of pitaya fruit fermented by sourdough LAB strains for bread making: Its impact on dough physicochemical, rheo-fermentation properties and antioxidant, antifungal and quality performance of bread[J]. *Helijon*, 2021, 7(11): e08290.
- [ 26 ] ARENDT E K, RYAN L, BELLO F D. Impact of sourdough on the texture of bread[J]. *Food Microbiology*, 2007, 24(2): 165–1743.
- [ 27 ] BELLO F D, CLARKE C I, RYAN L A M, et al. Improvement of the quality and shelf life of wheat bread by fermentation with the antifungal strain *Lactobacillus plantarum* FST 1.7[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 45(3): 309–318.
- [ 28 ] 田晓会. 酵母发酵及老面发酵馒头品质及营养特性比较研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017. [ TIAN X H. Comparative study on the quality and nutritional characteristics of yeast fermentation and old面 fermentation steamed buns[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017. ]

- study on the quality and nutritional characteristics of yeast-fermented and old-fermented steamed buns[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017. ]
- [ 29 ] 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): 10. [ MA Z L, CAO W C, ZHANG B L, et al. Biochemical propertoes of red bean and lentil sour dough fermented by tanninase-producing lactic acid bacteria and its effect on *in vitro* digestion of steamed buns[J]. Food Industry Technology, 2020, 41(19): 10. ]
- [ 30 ] GOBBETTI M . The sourdough microflora: Interactions of lactic acid bacteria and yeasts[J]. Trends in Food Science & Technology, 1998, 9(7): 267-274.
- [ 31 ] 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.