

西北酵头发酵绿豆粉对绿豆面包品质的影响

关伟超, 张炜佳, 董立军, 李曼, 张喜玲, 顾辰琦, 胡秀发, 王小明, 郝晓亮, 郑婵敏, 张宇光, 杨庆余

Effect of Northwest Fermentation Agents on the Quality of Mung Bean Bread by Fermenting Mung Bean Powder

GUAN Weichao, ZHANG Weijia, DONG Lijun, LI Man, ZHANG Xiling, GU Chenqi, HU Xiufa, WANG Xiaoming, HAO Xiaoliang, ZHENG Chanmin, ZHANG Yuguang, and YANG Qingyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010232>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

挤压改性绿豆粉对小麦粉加工及其面条品质特性的影响

Effects of Mung Bean Flour Modified by Extrusion on Characteristics of Flour Processing and Quality of Noodles

食品工业科技. 2019, 40(20): 36-41 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.20.006>

菊粉对绿豆蛋白低脂植物酸奶品质的影响

Effects of Inulin on the Quality of Mung Bean Protein Low-fat Plant Yogurt

食品工业科技. 2022, 43(21): 123-128 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022020205>

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>

贮藏方式对绿豆球蛋白结构与溶解性的影响

Effects of Storage Methods on the Structure and Solubility of Mung Bean Globulin

食品工业科技. 2021, 42(24): 16-23 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030264>

高水分挤压温度对绿豆蛋白结构的影响

Effect of Extrusion Temperature on the Structure of High-moisture Extruded Mung Bean Protein

食品工业科技. 2022, 43(20): 130-136 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022020139>

焙烤对绿豆蛋白结构和功能性质的影响

Effects of Baking on the Structure and Functional Properties of Mung Bean Protein

食品工业科技. 2021, 42(4): 44-49 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050283>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

关伟超, 张炜佳, 董立军, 等. 西北酵头发酵绿豆粉对绿豆面包品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 141-149. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010232

GUAN Weichao, ZHANG Weijia, DONG Lijun, et al. Effect of Northwest Fermentation Agents on the Quality of Mung Bean Bread by Fermenting Mung Bean Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 141-149. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010232

· 生物工程 ·

西北酵头发酵绿豆粉对绿豆面包品质的影响

关伟超¹, 张炜佳², 董立军³, 李 曼², 张喜玲², 顾辰琦², 胡秀发², 王晓明², 郝晓亮⁴,
郑婵敏¹, 张宇光^{6,*}, 杨庆余^{2,5,*}

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866;

2. 沈阳师范大学粮食学院, 辽宁沈阳 110034;

3. 北京御食园食品股份有限公司, 北京 101407;

4. 辽宁科技大学化学工程学院, 辽宁鞍山 114051;

5. 沈阳师范大学特色食品研究与技术创新东戴河研究院, 辽宁东戴河 125208;

6. 辽宁省粮食和物资储备事务服务中心, 辽宁沈阳 110032)

摘要: 为改善绿豆面包的烘焙特性及营养品质, 利用西北酵头发酵绿豆粉制作绿豆酸面团, 再联合酵母作为复合发酵剂制作绿豆面包。通过对西北酵头微生物组成进行分析, 明确其微生物菌群构成; 利用傅立叶变换红外光谱仪和流变仪分析绿豆面包面团中面筋蛋白二级结构和粘弹性的变化; 采用质构仪联合感官评定对绿豆面包的感官品质进行评价。结果表明, 经西北酵头发酵的绿豆酸面团中植酸含量在发酵进行 6 h 时降低了 44.71%, pH、总酸度 (Total Titration Acidity, TTA) 分别为 6.29 和 11.03 mL。与白面包对照组相比, 添加了绿豆酸面团的面包, 其面团的弹性模量与粘性模量均有下降, 面团的可塑性增强, 蛋白质二级结构中的 α -螺旋和 β -折叠的含量增加, 面团的稳定性提高。抗氧化活性结果显示, 绿豆面包对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH) 自由基和 2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸) 二铵盐 (ABTS⁺) 自由基的清除能力也均有显著 ($P < 0.05$) 提高。因此, 使用西北酵头制作绿豆酸面团, 再采用酵母进行复合发酵, 可以改善绿豆面包的烘焙品质和提高面包的抗氧化活性。实验结果对功能性杂豆面包的开发具有指导意义。

关键词: 绿豆, 酸面团, 动态流变学, 蛋白质二级结构, 抗氧化性, 面包, 品质

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)22-0141-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010232



本文网刊:

Effect of Northwest Fermentation Agents on the Quality of Mung Bean Bread by Fermenting Mung Bean Powder

GUAN Weichao¹, ZHANG Weijia², DONG Lijun³, LI Man², ZHANG Xiling², GU Chenqi², HU Xiufu²,
WANG Xiaoming², HAO Xiaoliang⁴, ZHENG Chanmin¹, ZHANG Yuguang^{6,*}, YANG Qingyu^{2,5,*}

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. College of Grain Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China;

3. Beijing Yu Shi Yuan Food Co., Ltd., Beijing 101407, China;

4. School of Chemical Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

5. Dongdaihe Institute of Characteristic Food Research and Technological Innovation, Shenyang Normal University,

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划乡村产业共性关键技术研发与集成应用项目 (2021YFD1600600); 辽宁省揭榜挂帅科技攻关项目 (022020641-JH1/109); 2023 年度辽宁省教育厅基本科研项目重点攻关项目 (JYTZD2023185); 辽宁省科技特派团项目 (1685513630741); 辽宁 (东戴河) 带土移植转化中心科技项目。

作者简介: 关伟超 (1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: guanweichao7@163.com。

* **通信作者:** 张宇光 (1982-), 男, 硕士, 辽宁省粮食和物资储备事务服务中心, E-mail: zhangyg_1982@126.com。

杨庆余 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 植物源食品开发与综合利用, E-mail: yangqy0311@163.com。

Dongdaihe 125208, China;

6.Liaoning Food and Materials Reserve Affairs Service Center, Shenyang 110032, China)

Abstract: In order to improve the baking characteristics and nutritional quality of mung bean bread, mung bean sourdough was made by fermenting mung bean flour using Northwest leavening head, and then combined with yeast as a compound leavening agent to make mung bean bread. The microbial composition of the Northwest leavening head was analyzed to clarify the composition of its microflora, the Fourier transform infrared spectrometer and rheometer were used to analyze the changing pattern of the secondary structure and viscoelasticity of gluten proteins in the dough of the mung bean bread, and the texture meter was used in combination with the sensory assessment to evaluate the sensory quality of the mung bean bread. The results showed that the phytic acid content of the mung bean sourdough fermented in the Northwest fermentation head was reduced by 44.71% at 6 h of fermentation, and the pH and total titration acidity (TTA) were 6.29 and 11.03 mL, respectively. Compared with the control group, the bread with added mung bean sourdough showed a decrease in the modulus of elasticity and viscous modulus of the dough, an increase in the plasticity of the dough, the content of α -helices and β -folds in the secondary structure of proteins, and the stability of the dough. The antioxidant results showed that the scavenging ability of mung bean bread for both DPPH and ABTS⁺ free radicals also significantly increased ($P<0.05$). Therefore, the use of Northwest leavening head to make mung bean sourdough followed by complex fermentation with yeast can improve the baking quality and enhance the antioxidant activity of mung bean bread. The experimental results would have guiding significance for the development of functional mixed bean bread.

Key words: mung bean; sourdough; dynamic rheology; protein secondary structure; oxidation resistance; bread; quality

面包产品因其食用便捷,味道香甜已逐渐成为家庭早餐以及日常快餐的主要选择。2023年中国烘焙食品行业市场规模为3069.9亿元,同比增长7.6%^[1]。目前,市售的传统面包多以小麦粉为原料,缺乏人体必需氨基酸之一的赖氨酸^[2],并且不利于餐后血糖的稳定。随着大健康理念的深入,具有健康益处的杂粮类面包越来越多的受到消费者的青睐。

绿豆富含亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸和缬氨酸等必需氨基酸^[3],可以弥补小麦粉中赖氨酸不足的缺点,提高蛋白质的生物利用率。绿豆中蛋白质、淀粉、膳食纤维等营养成分含量也较为丰富^[4],其中直链淀粉约占总淀粉含量的16%~47%,具有升糖指数低的营养优势^[5],膳食纤维含量可高达12.62%^[6]。此外,绿豆中富含多种生物活性物质,如黄酮类、多糖类及多肽类等,具有较好的抗氧化等活性功能^[7]。但绿豆中存在胰蛋白酶抑制剂、单宁、植酸等抗营养因子,绿豆缺少麸质也严重影响了绿豆面包的发酵特性^[8]。因此,如何降低绿豆中抗营养因子带来的负面效应,改善高绿豆含量面包的发酵特性,提高绿豆面包的烘焙品质和营养品质,是本实验需要探究并解决的问题。

研究表明,酸面团中富含的乳酸菌、酵母菌和霉菌等,具有增加面包风味、改善面包质构、降低抗营养因子等功能^[9-10]。本实验以西北酵头为发酵剂、绿豆粉为发酵基质制作绿豆酸面团,再联合酵母发酵制作绿豆面包。探究西北酵头的微生物菌群组成,分析西北酵头发酵绿豆粉对面团中植酸含量的影响;比较并分析绿豆酸面团的添加对绿豆面包面团流变特性和蛋白质结构特性的影响,同时对面包的营养及感官品质进行评估,旨在开发利用绿豆,提高绿豆面包的烘焙特性和营养价值,为发酵植物基酸面团技术

的开发以及功能性的杂豆面包产品的研发提供一定的理论参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

绿豆粉 建平县朱碌科镇怀志杂粮有限公司;面包粉 广东金禾面粉有限公司;黄油 恒天然商贸(上海)有限公司;氢氧化钠、盐酸、乙醇 分析纯,天津瑞金特化学品有限公司;三氯化铁、植酸钠、三氯乙酸、硫酸钠、ABTS 分析纯,上海源叶生物科技有限公司;磺基水杨酸、DPPH 分析纯,上海瑞永生物科技有限公司;西北酵头 甘肃张掖市高台县采集。

HS-SD 和面机 珠海宁欧商贸有限公司;OMJ-PV16 醒发箱 河北欧美佳食品机械公司;OMJ-3/6 烤箱 河北欧美佳食品机械公司;CT3-4500 质构仪 美国博勒飞公司;UV-1200S 分光光度计 翱艺仪器(上海)有限公司;DHR-1 流变仪 美国TA 仪器有限公司;TENSOR 型傅里叶红外光谱仪 德国布鲁克公司;TM-EXJ2204H 电子天平 南京汤姆斯衡器有限公司;ZNCL-S-100 磁力搅拌器 巩义市予华仪器有限责任公司。

1.2 实验方法

1.2.1 酸面团及面包的制作 前期预实验结果表明,绿豆面包中谷朊粉的最优添加量为绿豆粉添加量的10%。

绿豆酸面团及绿豆面包的制作主要包括以下步骤:

绿豆酸面团制作:西北酵头与温水(30±2℃)按1:10(m:m)比例混合浸泡,之后置于室温下(25±2℃)浸泡12h,过滤后获得菌液。将菌液与绿豆粉按1:1(m:m)的比例混合,将其置于温度32℃、湿

度 75% 的醒发箱中发酵 6 h。

面包面团制作:按照表 1 配方将获得的酸面团与小麦粉、水、谷朊粉、干酵母、白砂糖与盐混合,分别按照低速 2 min—高速 8 min—低速 1 min 的模式搅拌均匀;加入黄油后,重复上述搅拌模式,搅拌均匀后取出面团,并准确分割成 70 g/个的面团,揉圆整形。

表 1 面包的制作配方
Table 1 Formulations of bread

面包 类型	添加量(g)							
	小麦粉	绿豆酸 面团	绿豆粉	谷朊粉	水	干酵母	白砂糖	黄油
CS	200	0	0	0	110	1.5	5	5
W-10	180	0	20	2	110	1.5	5	5
W-30	140	0	60	6	110	1.5	5	5
S-10	180	40	0	2	90	1.5	5	5
S-30	140	120	0	6	50	1.5	5	5

注:CS:纯小麦面包对照组;W-10:添加10%未处理绿豆粉的面包;W-30:添加30%未处理绿豆粉的面包;S-10:添加10%绿豆酸面团的面包;S-30:添加30%绿豆酸面团的面包。

面包烘烤:发酵温度 32 ℃,发酵湿度 75%,在醒发箱内醒发 45 min,烤箱上火温度 200 ℃,下火温度 190 ℃,烘烤 20 min。

1.2.2 绿豆酸面团中微生物组成的分析 使用 DNA 提取试剂盒从西北酵头中提取总基因组 DNA,PCR 扩增后经琼脂糖凝胶电泳检测,符合测试条件后送至上海美吉生物医药科技有限公司进行测序。通过与数据库的模板序列比对,分析西北酵头的微生物组成。

1.2.3 酸面团的 pH、总酸度和植酸的测定

1.2.3.1 酸面团的 pH 和总酸度的测定 pH 及总酸度的测定根据 Katina 等^[11]的方法略作修改。准确称取 10.0 g 酸面团,置于 90 mL 蒸馏水中,800 r/min 条件下搅拌均匀后测定其 pH。用 0.1 mol/L NaOH 标准溶液滴定,滴定过程中不断搅拌溶液以保证溶液均匀,至 pH=8.6,消耗的 NaOH 体积即为总酸度。

1.2.3.2 酸面团植酸的测定 试样分解液的制备:植酸的测定根据 T/CI 003-2022^[12]方法。称取试样 10.0 g,加入 10.0 mL 的 Na₂SO₄-HCl 提取液(将 100.0 g Na₂SO₄溶于浓度为 1.2% 的 HCl 溶液中,定容至 1000 mL),振荡提取 2 h 后离心 30 min(4000 r/min),收集所有上清液,用 Na₂SO₄-HCl 提取液定容至 50.0 mL,经快速滤纸过滤后于 4 ℃ 温度下保存。取上清液 2.0 mL 于 10.0 mL 玻璃试管中,加入 15% 三氯乙酸 2.0 mL,混匀,4 ℃ 静置 2 h 后离心 10 min(2500 r/min),取全部上清液,用 0.7 mol/L NaOH 调节 pH 为 6.0~6.5,加水定容至 25.0 mL,制得试样分解液。

植酸标准曲线的绘制:准确吸取 0.1 mg/mL 植酸钠溶液,配制成 6 份不同浓度的待测液,每份待测液体积均为 5.0 mL,分别含植酸 0、0.004、0.01、0.1、0.2、0.5 mg 的系列溶液,向 6 份待测溶液中分别加

入 4.0 mL 反应溶液(1.5 g 三氯化铁和 15.0 g 磺酸水杨酸加水溶解并定容至 500mL,使用前稀释 15 倍),混匀,静置 20 min 后吸取上清液于 1 cm 比色皿中,于 500 nm 处测定吸光度。以吸光度为纵坐标,植酸的质量为横坐标,绘制标准曲线并计算回归方程。

试样中植酸含量的测定:吸取 5.0 mL 试样分解液于 10.0 mL 离心管中,加入 4.0 mL 反应溶液,混匀,离心 10 min(2500 r/min)后取上清液作为测定液;不加样品溶液为空白溶液。在 500 nm 波长下测定吸光度,试样中植酸含量按公式(1)计算:

$$X = \frac{m_2 \times 25 \times 1000}{m_1 \times 5 \times V \times 1000} \times 50 \quad \text{式 (1)}$$

式中: X 为试样中的植酸含量(g/kg); m₂ 为 5.0 mL 供试液中的植酸质量(mg); 25 为洗脱液定容体积(mL); m₁ 为试样质量(g); 5 为测定用的试液体积(mL); V 为供净化的提取液体积(mL); 50 为提取液定容体积。

1.2.4 面团流变性的测定 面团的动态流变学根据 Lei 等^[13]的方法进行测定,并略作修改。将面团置于平板(直径 40 mm,间隙 1 mm)上,在 25 ℃ 条件下对面团进行振荡频率扫描测试。用硅油密封覆盖样品表面防止水分流失,上样后平衡松弛 1 min 后,进行频率扫描(0.1~10 Hz)测试,应变为 0.5%。选择记录面团的弹性模量(G')、粘性模量(G'')。

1.2.5 面团中蛋白质结构的测定 酸面团对面筋蛋白二级结构的影响采用傅立叶变换红外光谱仪(FT-IR)进行测定,并参照 Bock 等^[14]的方法。FT-IR 光谱扫描范围为 400~4000 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹,扫描次数为 16。

1.2.6 面包比容的测定 比容测定方法参考 GB/T 14611-2008^[15]方法稍作修改,面包烘焙完成后,室温放置 1 h,分别称量面包的质量和体积,并按公式(3)计算比容。每个样品进行三次平行实验。

$$\text{面包比容} = \frac{\text{体积(mL)}}{\text{质量(g)}} \quad \text{式 (2)}$$

1.2.7 面包质构特性的测定 根据 Sheikholeslami 等^[16]的方法稍作修改,室温放置 1 h 的面包,从中间截取 2 cm×2 cm 的方块,用质构仪对其进行测试,参数设定为探头 TA36,前速率 3 mm/s,测试速率 1 mm/s,后速率 3 mm/s,压缩程度 50%。每个样品进行三次平行实验。

1.2.8 面包自由基清除率的测定

1.2.8.1 待测样液的制备 根据王蓉等^[17]的方法稍作修改。准确称取冻干面包粉 2.0 g 于离心管中,加入 10.0 mL 80% 丙酮溶液,密封后水平放置在 25 ℃ 的水浴振荡器中,以 200 r/min 提取 1 h 后,6000 r/min 离心 5 min,取上清液备用。分两次加入 10.0 mL 和 6.0 mL 80% 丙酮溶液,重复上述步骤。合并 3 次所得上清液,用去离子水定容至 50 mL。

1.2.8.2 DPPH 自由基清除能力测定 DPPH 自由基清除率的测定参照 Xu 等^[18]的方法并略作修改。取 1.0 mL 提取液,加入 2.0 mL 0.2 mmol/L DPPH 溶液,室温下避光静置 15 min,以 50% 乙醇为空白样进行调零,于 517 nm 下测定吸光度值。DPPH 自由基清除率计算公式为:

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中: A_1 为样品组的吸光度值; A_0 为空白组的吸光度值。

1.2.8.3 ABTS⁺自由基清除能力测定 ABTS⁺自由基清除率参照卫春会等^[19]的方法并略作修改。取 0.2 mL 样品溶液与 4.0 mL 7 mmol/L ABTS 溶液混合,37 °C 下水浴 10 min,以 50% 乙醇为空白样进行调零,在 734 nm 下测定吸光度值。ABTS⁺自由基清除率计算公式为:

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

式中: A_1 为样品组的吸光度值; A_0 为空白组的吸光度值。

1.2.9 面包的感官评价 采用九分嗜好评分法^[20],按照表 2 的评分标准对烘焙 2~3 h 后的面包进行感官评分,对面包的形态、色泽、风味、口感以及整体可接受度进行评分,小组成员由 10 名女性和 10 名男性组成,年龄在 21~35 岁之间。

表 2 面包感官评价标准
Table 2 Sensory evaluation criteria of bread

项目	评分标准	分数(分)
形态	外型圆润饱满,表皮平滑光洁,组织细腻松软	6~9
	外型比较圆润饱满,表皮平滑无斑点,组织较细腻松软	5
	外型不够圆润饱满,表皮粗糙有斑点,组织粗糙结实	1~4
色泽	内外色泽均匀,无杂色	6~9
	内外色泽较均匀,无丝样光泽	5
	内外色泽不均匀颜色灰暗	1~4
风味	面包有谷物香气,无异味	6~9
	面包无谷物香气,无异味	5
	面包无谷物香气,有异味	1~4
口感	口感柔和,粘弹性适中,不粘牙	6~9
	口感较硬,不粘牙	5
	口感硬,粘弹性过大或过小,粘牙	1~4
整体可接受度	可接受度高	6~9
	可接受度一般,但不反感	5
	较难接受	1~4

1.3 数据处理

每组实验均重复进行 3 次。通过 SPSS 16.0 进行数据处理,采用 ANOVA 对数据进行差异显著性分析($P < 0.05$),利用 Origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 绿豆酸面团中微生物的组成

为了解西北酵头中微生物群落的组成,利用高通量测序技术对样品中的微生物构成进行分析。图 1 为西北酵头在物种水平上占群落丰度。由图 1

可知,西北酵头所含菌种在细菌类的优势菌种为乳酸菌,占比 55.57%,其中优势菌株为植物乳杆菌、短乳杆菌、面包乳杆菌和戊糖片球菌。真菌类的优势菌种为酿酒酵母,其占比为 91.21%,其次为矮小假丝酵母占比 4.0%。与山东、宁夏、新疆等地区酸面团乳酸菌构成相比,西北酵头中的优势菌种为植物乳杆菌,其他地区的优势菌种多为旧金山乳杆菌、干酪乳杆菌和戊糖乳杆菌^[21-23]。根据之前研究发现,植物乳杆菌在代谢过程中会产生有机酸和分泌多种酶与多糖,短乳杆菌可以代谢产生醛类、酚类,酿酒酵母在代谢过程中会产生异戊醇,矮小假丝酵母可以水解面粉中的低聚糖为果糖,这些微生物的代谢产物可能对绿豆面包的品质、营养特性和风味产生较大影响,进而提高产品的整体感官可接受度^[24-27]。



图 1 在物种水平上占群落丰度的百分比
Fig.1 Percent of community abundance on species level

2.2 酸面团发酵过程中 pH 和 TTA 的变化

图 2 为绿豆酸面团发酵过程中 pH 和 TTA 的变化。由图 2 可知,随着发酵时间的延长,酸面团的 pH 呈下降趋势,面团的 TTA 逐渐增加,在发酵 6 h 后 pH 下降最为明显,TTA 最高。可能是在发酵初始阶段微生物的繁殖过程代谢产物少,对酸面团的 pH 影响较小。随着发酵的进行,酸面团中的优势菌种植物乳杆菌在代谢过程中产生 L-苹果酸、乙酸、乳酸等有机酸,有机酸使面团的 TTA 值升高,氢离子浓度上升,pH 下降。

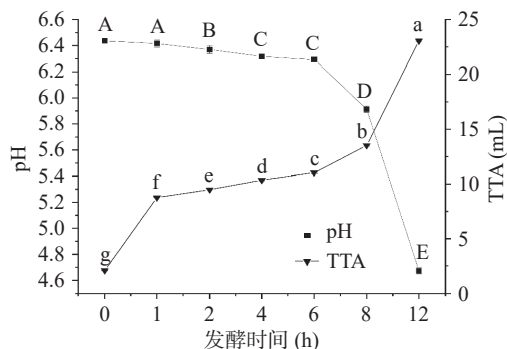


图 2 绿豆酸面团发酵过程中 pH 和 TTA 的变化
Fig.2 Changes in pH, TTA of mung bean sourdough during fermentation

注:同类型不同字母表示同一指标不同发酵时间数据差异显著($P < 0.05$)。

2.3 酸面团发酵过程中植酸含量的变化

图 3 是绿豆酸面团中植酸的变化情况。由图 3 可知, 随着发酵时间的延长, 酸面团中植酸含量逐渐降低, 在发酵 2~6 h 时下降最为明显, 由 1.7 g/kg 下降到 0.95 g/kg, 发酵 6 h 后, 植酸含量趋于平缓。在发酵初期, 由于酸面团中的植物乳杆菌含有植酸酶, 植酸酶可使植酸分解为磷酸盐和肌醇磷酸酯, 进而使植酸的含量降低。耿浩等^[28]的研究也发现, 发酵过程中 pH 的逐渐降低, 有利于植酸酶活性的提高, 促进植酸分解。但植酸酶的最适 pH 介于 6.5~7.5 之间, 从图 2 结果中可以看出, 随着发酵的继续进行, 面团中的 pH 会继续降低, 因此植酸酶的活性因 pH 的影响降低, 从而影响对植酸的分解, 即使继续进行发酵, 植酸含量不会出现明显降低的现象。

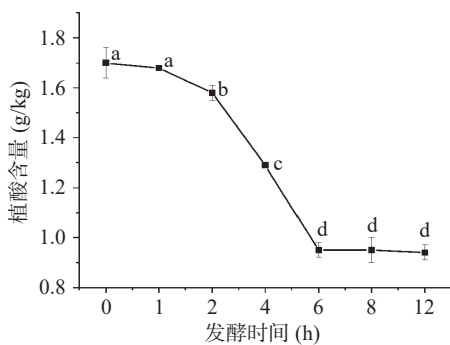


图 3 绿豆酸面团中植酸的变化

Fig.3 Changes in phytic acid in mung bean acid dough
注: 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.4 酸面团动态流变学分析

图 4 为面团的流变学特性分析结果。与对照组 CS 相比, 随着绿豆添加量的增加, 绿豆面包面团的

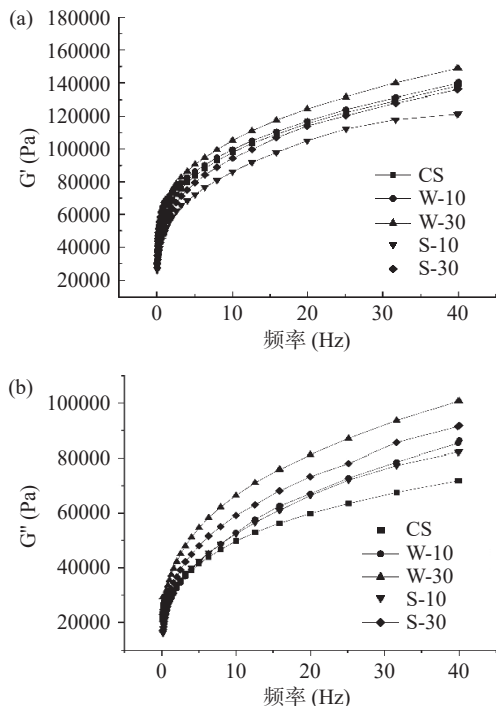


图 4 面团的弹性模量(a)、粘性模量(b)

Fig.4 Elastic modulus (a) and viscous modulus(b) of dough

G' 和 G'' 都呈上升趋势, 即弹性模量及粘性模量都显著增加。说明添加绿豆粉破坏了面团的粘弹性平衡^[29], G' 始终高于 G'' 说明物质具有固体弹性物质的流变特性^[30]。绿豆添加量越高, 面团的粘弹性越大, 可能是绿豆中的直链淀粉以及面筋蛋白等成分更容易吸水, 直链淀粉与水结合, 导致面团中用于润滑的水分减少, 使面团的整体硬度增加。类似的现象在曹伟超^[31]的研究得到过证实, 当面筋部分吸水后, 没有完全水合的面粉颗粒会让面团呈现“僵硬”的状态。此外, 与未添加绿豆酸面团的面包相比, 添加了绿豆酸面团的面包其弹性(G')和粘性(G'')均呈降低趋势。主要的原因是酸面团的存在使面团环境整体为酸性, 酸性条件下存在大量正电荷, 蛋白质的溶解度随之增加, 面筋蛋白暴露出更多疏水基团, 分子间的斥力增加, 面筋的强度降低, 面团的弹性模量及粘性模量均呈现出下降趋势^[32]。从弹性模量和粘性模量的结果可以看出加入绿豆酸面团提高了面团的可塑性。

2.5 绿豆面包面团中蛋白质结构变化分析

绿豆面包面团中蛋白质的二级结构变化结果见表 3。由表 3 可以看出, 含有酸面团的面包面团, 其蛋白质的 β -折叠和 α -螺旋构象含量增加, 无规则卷曲和 β -转角构象含量降低。蛋白质二级结构的 β -折叠和 α -螺旋构象比无规则卷曲和 β -转角结构更加稳定有序^[31], 这表明加入酸面团制得的绿豆面包面团, 其蛋白质的分子构象更加趋于稳定。其中的一个原因是经过发酵的酸面团中含有发酵过程中产生的胞外多糖, 具有保护蛋白质二级结构的特性, 能够减少不稳定的蛋白质二级结构, 如 β -转角的含量。同时, 酸面团中的微生物在发酵过程中分泌的胞外水解酶可以促进面团中蛋白质络合物的形成^[33], 从而有利于蛋白质结构的稳定。由于绿豆粉中膳食纤维含量较高, 而产酶菌株接种后能以蛋白质、淀粉作为营养物质, 产生大量纤维素酶、半纤维素酶、木聚糖酶等, 可以提高含有酸面团的面团中可溶性糖类的含量。而未添加酸面团的面团中高分子量的不溶性膳食纤维吸收水分后可形成高粘性凝胶, 阻碍面筋网络结构的形成, 破坏面筋蛋白二级结构的稳定性^[34]。与此同时, 酸面团面包面团中, 不溶性膳食纤维被分解, 面筋蛋白周围的自由水含量增加, 促进了蛋白质分子的聚集, 从而 β -折叠和 α -螺旋构象增加, 无规则卷曲结构

表 3 蛋白质二级结构的变化(%)

Table 3 Changes in protein secondary structure (%)

样品	α -螺旋	β -折叠	β -转角	无规则卷曲
CS	17.43±0.49 ^a	37.47±0.90 ^a	26.26±0.46 ^a	18.84±0.56 ^d
W-10	14.08±0.18 ^c	35.46±0.09 ^b	21.42±1.00 ^c	29.04±0.86 ^b
W-30	14.04±1.37 ^c	34.35±0.12 ^c	23.34±0.38 ^b	28.27±1.08 ^{ab}
S-10	15.57±0.17 ^b	36.85±0.30 ^a	23.01±1.03 ^b	24.58±0.81 ^c
S-30	14.23±0.26 ^c	34.39±0.24 ^c	24.22±0.42 ^b	27.16±0.29 ^b

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

降低^[14]。

与小麦面包面团相比, 绿豆面包面团中的 β -折叠和 α -螺旋结构降低, 这是因为小麦蛋白的二级结构主要以 β -折叠为主, 其占比在 40% 左右, α -螺旋结构约占 16%^[35]。绿豆蛋白的二级结构中 β -折叠约占 33%, α -螺旋为 11% 左右^[36], 所以随着绿豆粉添加比例的增加, 绿豆面包面团中两种结构都呈下降趋势。

2.6 面包的比容分析

面包的比容是考察面包蓬松度的一个重要指标, 不同绿豆添加量对绿豆面包比容的影响见图 5。在绿豆面包中, 随着绿豆粉添加量的增加, 面包的比容呈下降趋势, 而添加绿豆酸面团后, 面包的比容均增加。这是由于绿豆中不含有维持面团结构稳定的麦醇溶蛋白和麦谷蛋白, 添加谷朊粉可以对维持面团结构稳定起到改善作用, 但其无法与绿豆淀粉形成稳定的交联结构。在酸面团发酵过程中, 西北酵头中的植物乳杆菌和短乳杆菌会代谢产生有机酸、胞外多糖、酶类和二氧化碳等代谢产物。胞外多糖有助于面筋形成致密的网络结构, 增加面团的持气能力, 发酵过程中产生的有机酸有利于面筋、淀粉、阿拉伯木聚糖等形成复合物^[31,37]。因此添加了绿豆酸面团的面包比容更高, 组织更细腻, 更柔软。

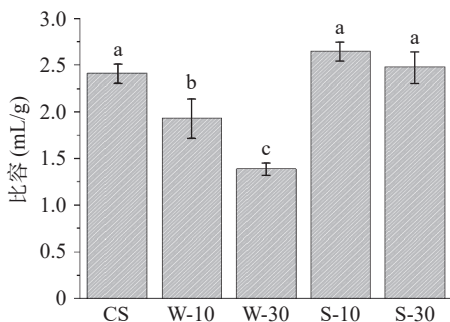


图 5 面包的比容

Fig.5 Specific volume of bread

注: 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.7 面包的质构特性分析

不同绿豆粉添加量的绿豆面包质构结果见表 4。与对照组相比, 随着绿豆粉添加量的增加, 面包的硬度、咀嚼性明显呈上升趋势, 而添加了绿豆酸面团的面包, 二者均明显降低。而在弹性和内聚性角度来看, 绿豆粉和酸面团的添加对其影响不显著($P > 0.05$)。弹性越大表明面包的内部组织越稳定, 面包的抗形变能力越强^[31]。咀嚼性指的是样品经完全嚼碎后所消耗的能量, 反映了面包对咀嚼的持续抵抗性^[38]。内聚性代表面包内部结构在外力作用下抵抗破坏并紧密连接、使之保持完整的能力, 内聚性越大面包越不易掉渣^[31]。在添加了绿豆酸面团的面包中, 硬度和咀嚼值变小, 表明面包化口性好、易于吞咽。添加绿豆酸面团的面包其硬度和咀嚼性更趋近于传统的小麦面包, 主要是因为西北酵头中的优势菌株发

酵产生了适量的有机酸, 多糖有利于面筋网络的稳定^[39], 改善了绿豆粉对面包发酵特性和质构特性的不利影响。

表 4 面包的质构特性
Table 4 Texture properties of bread

样品	硬度	弹性	内聚性	咀嚼性
CS	334.33±20.65 ^d	10.81±0.77 ^a	0.71±0.09 ^a	26.06±3.51 ^c
W-10	780.5±21.98 ^b	10.03±0.59 ^{ab}	0.63±0.02 ^{ab}	46.08±1.12 ^b
W-30	1280.17±32.87 ^a	9.22±0.42 ^b	0.55±0.04 ^b	62.86±6.44 ^a
S-10	292.33±10.79 ^e	9.29±0.59 ^b	0.67±0.02 ^a	17.93±1.59 ^d
S-30	582.67±10.73 ^c	9.8±0.47 ^{ab}	0.58±0.01 ^b	30.35±3.52 ^c

注: 同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.8 绿豆面包抗氧化性分析

表 5 为酸面团对绿豆面包体外抗氧化能力的影响, 结果表明, 与对照组相比, 随着绿豆添加量的增加, 绿豆面包的抗氧化性显著升高($P < 0.05$), 而添加了绿豆酸面团的面包其抗氧化性更强。这是由于绿豆中含有黄酮类、多酚类、多糖类和可溶性膳食纤维类等抗氧化物质^[37], 绿豆粉添加提高了面包中的抗氧化性成分。在添加绿豆酸面团的面包中, 植物乳杆菌的存在导致发酵过程中面包呈弱酸性, 有利于黄酮类物质和多酚的富集, 进而抗氧化性更强^[40-42]。此外, 酸面团中的微生物在发酵过程中会产生蛋白酶、纤维素酶和果胶酶等酶类, 这些酶让结合态的多酚类化合物水解为游离态, 让面包中的多酚含量增加^[43]。

表 5 酸面团的添加对面包体外抗氧化能力的影响
Table 5 Effects of adding sourdough on the antioxidant capacity of bread *in vitro*

样品	ABTS ⁺ 自由基清除能力	DPPH自由基清除能力
CS	3.43±0.41 ^e	1.94±0.60 ^e
W-10	7.03±0.92 ^d	4.94±0.04 ^b
W-30	14.28±0.97 ^b	9.08±0.01 ^a
S-10	9.11±0.53 ^c	5.32±0.06 ^b
S-30	15.57±0.10 ^a	9.15±0.01 ^a

注: 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.9 面包感官评价

图 6 和图 7 分别是不同面包的横截面图和感官评定结果。由图 6 可知, 纯小麦粉制作的面包外观颜色均匀, 表面颜色金黄, 松软且富有弹性; 内部气孔组织均匀, 切开后无掉渣现象。添加了绿豆粉的面包, 颜色变深, 面包内部气孔变小, 口感变硬, 切开后有断裂和掉渣的情况。添加了绿豆酸面团的面包, 面包的体积明显变大, 口感相对松软, 气孔明显, 硬度适中, 外观上更接近小麦面包。

图 7 表明, 纯小麦粉制作的面包综合感官评定结果最优, 绿豆的添加会降低评价结果。添加绿豆酸面团的面包感官评价的结果高于未处理的绿豆面包, 整体得分均较高。当绿豆粉的添加量在 10% 时, 对面包颜色的影响不明显。但当添加量达到

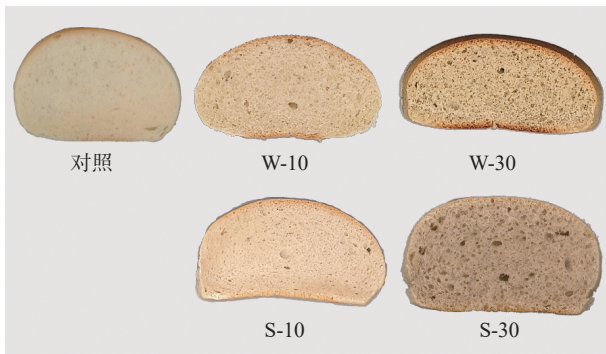


图 6 面包横截面外观

Fig.6 Cross-sectional appearance of bread

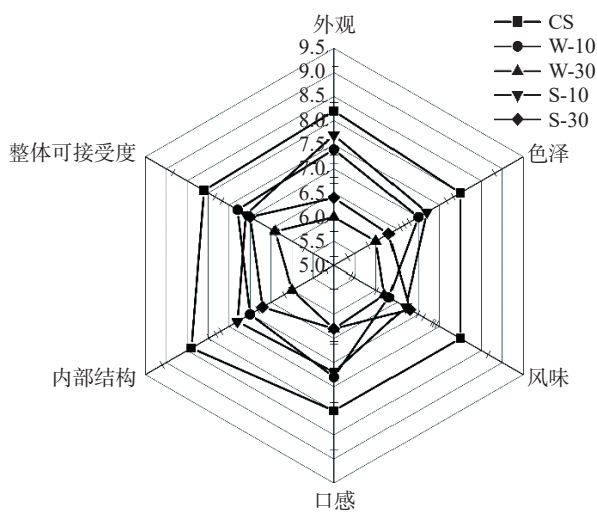


图 7 面包的感官评定

Fig.7 Sensory evaluation of bread

30% 时, 面包色泽变化较大, 口感变硬, 绿豆味道明显。当面包中添加了酸面团后, 面包质地更柔软, 口感和风味的可接受程度明显提高, 这主要是因为西北酵头中的优势菌种植物乳杆菌在代谢过程中会产生有机酸酶与多糖等, 这些代谢产物使面团中的蛋白质二级结构更稳定, 丰富产品口味, 赋予产品更好的感官^[30]。

综上所述, 绿豆粉的添加主要影响面包的颜色, 且随着添加量的升高, 颜色逐渐变深, 硬度和蓬松度变差。而西北酵头发酵的酸面团有助于绿豆面包发酵特性和风味的改善。

3 结论

本研究表明, 利用富含乳酸菌和酿酒酵母的西北酵头发酵绿豆粉制得酸面团, 能够有效改善绿豆面包的发酵特性、营养及感官特性。植物乳杆菌、短乳杆菌以及酿酒酵母等在代谢过程中会产生乳酸、乙酸等有机酸, 会分泌多种酶与多糖以及酚类物质, 改善面包的组织结构和风味, 并且提高面包的营养品质。绿豆粉的加入不利于面包的色泽和发酵特性, 而添加了酸面团的面包, 其口味和发酵特性得到较好的改善。在组织结构上, 受绿豆粉本身结构组成影响, 绿豆面包中蛋白质 α -螺旋和 β -折叠结构较少,

质构和发酵特性较差。但酸面团添加后, 由于发酵过程中产生的胞外多糖和多种酶的作用, 促进了面团蛋白质二级结构的稳定和网络结构的形成, 提高了面团的质地和比容, 有利于面团发酵特性的改善。营养及感官评价结果表明, 利用西北酵头发酵绿豆粉, 发酵过程中富集了黄酮、多酚等物质的, 提高了绿豆面包对 ABTS⁺和 DPPH 自由基的清除能力, 并且丰富了绿豆面包的风味, 提高了消费者对其的可接受程度。尽管西北酵头发酵制得的绿豆面包, 其营养成分优于传统的小麦面包, 但由于自身蛋白质组成等原因, 绿豆面包对于消费者来说, 其感官品质仍有待改进, 未来课题组将继续进一步探究。本研究对具有功能性杂豆主食产品的开发具有指导意义。

© The Author(s) 2024. 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] 观研报告网. 中国烘焙食品行业现状深度研究与投资前景分析报告(2023-2030年)[R/OL]. (2023-11-27). <http://www.china-baogao.com/baogao/202311/676056.html>. [Insight and info. report on the current situation and investment prospects analysis of China's baking food industry (2023-2030). [R/OL]. (2023-11-27).]
- [2] 张娅妮, 解修超, 王昌钊, 等. 大球盖菇固态发酵对小麦营养成分影响的研究[J]. 食品科技, 2023, 48(8): 121-126. [ZHANG Yani, XIE Xiuchao, WANG Changzhao, et al. Nutrient composition of wheat by solid fermentation of *Stropharia rugoso-annulata*[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(8): 121-126.]
- [3] XIE Jianhua, DU Mengxia, SHEN Mingyue, et al. Physicochemical properties, antioxidant activities and angiotensin-I converting enzyme inhibitory of protein hydrolysates from Mung bean (*Vigna radiate*) [J]. Food Chemistry, 2019, 270: 243-250.
- [4] 曹菲, 汪磊, 陈洁, 等. 不同热处理对绿豆组分及功能特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 83-90. [CAO Fei, WANG Lei, CHEN Jie, et al. Effects of different heat treatments on the composition and functional properties of mung beans[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2023, 44(3): 83-90.]
- [5] 周淑蓝, 叶发银, 赵国华. 绿豆淀粉的性质、改性及其应用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 450-461. [ZHOU Shulan, YE Fayin, ZHAO Guohua. The properties, modification and application of mung bean (*Vigna radiata* L. Wilczek) starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 450-461.]
- [6] 艾燕, 张翼飞, 贾瑞坤, 等. 黑龙江省七份黑绿豆地方品种品质性状的鉴定与评价[J]. 黑龙江农业科学, 2023(9): 13-18. [AI Yan, ZHANG Yifei, JIA Ruikun, et al. Identification and evaluation of quality traits of seven local black mung bean cultivars in Heilongjiang province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023(9): 13-18.]
- [7] 黄梦迪, 吴会琴, 王娜, 等. 不同品种绿豆理化特性和抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(6): 32-37. [HUANG Mengdi, WU Huiqin, WANG Na, et al. Study on physicochemical properties and antioxidant activity of different varieties of mung bean[J]. Food Research and Development, 2020, 41(6): 32-37.]

- [8] 姜宇婷. 绿豆发芽过程中组分及营养变化研究进展[J]. 现代农业科技, 2020, (14): 209,214. [JIANG Yuting, Research progress on changes in components and nutrients during the germination process of mung beans[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020, (14): 209,214.]
- [9] 苏珊, 王玉婷, 吴洁, 等. 酸面团中的优势微生物及其相互作用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7): 316-323. [SU Shan, WANG Yuting, WU Jie, et al. Research progress on dominant microorganisms and their interactions in sourdough[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(7): 316-323.]
- [10] 曹伟超, 张宾乐, OJOBI O J, 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 Weichao, ZHANG Binle, OJOBI O J, et al. Nutritional and baking characteristics of black bean-wheat bran sourdough bread fermented by functional lactic acid bacteria[J]. Food Science, 2022, 43(2): 142-150.]
- [11] 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, 2006, 39(5): 479-491.
- [12] 中国国际科技促进会标准化工作委员会. T/CI 003-2022 低植酸小麦籽粒中植酸含量指标和测定方法[S]. 北京: 中国国际科技促进会. 2022. [Standardization Working Committee of China International for the Promotion of International Science and Technology. T/CI 003-2022 Index and determination method of phytic acid content in low phytic acid wheat variety[S]. Beijing: China International Association for Promotion of Science and Technology, 2022.]
- [13] LEI Yanan, XIE Dongdong, LI Xing. Effect of sucrose levels on dynamic rheology properties of dough during fermentation process[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(3): 1326-1335.
- [14] BOCK J E, DAMODARAN S. Bran-induced changes in water structure and gluten conformation in model gluten dough studied by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(2): 146-155.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 14611-2008 粮油检验 小麦粉面包烘焙品质试验 直接发酵法[S]. 中国标准出版社. 2008: 12. [China National Standardization Administration. GB/T 14611-2008 Inspection of grain and oils-Bread-baking test of wheat flour-Straight dough method[S]. China Standards Press 2008: 12.]
- [16] SHEIKHOESLAMI Z, MAHFOUZI M, KARIMI M, et al. Modification of dough characteristics and baking quality based on whole wheat flour by enzymes and emulsifiers supplementation[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 139(1): 110794.
- [17] 王蓉, 朱晓倩, 范志红. 家庭压力烹调对绿豆抗氧化能力的影响[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(8): 105-110. [WANG Rong, ZHU Xiaoqian, FAN Zhihong. Effect of domestic pressure cooking on antioxidant capacity of mung beans[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(8): 105-110.]
- [18] XU B J, YUAN S H, CHANG S K C. Comparative analyses of phenolic composition, antioxidant capacity, and color of cool season legumes and other selected food legumes[J]. Journal of Food Science, 2010, 72(2): 167-177.
- [19] 卫春会, 黄亮, 姚亚林, 等. 山葡萄酒发酵过程中活性物质、抗氧化能力及有机酸的变化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 9-14. [WEI Chunhui, HUANG Liang, YAO Yalin, et al. Changes of active substances, antioxidant capacity and organic acids during the fermentation of *Vitis amurensis* wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6): 9-14.]
- [20] TOLVE R, SIMONATO B, RAINERO G, et al. Wheat bread fortification by grape pomace powder: Nutritional, technological, antioxidant, and sensory properties[J]. Foods, 2021, 10(1): 75.
- [21] 于静, 许倩, 李芬, 等. 新疆7地区饅用酸面团微生物多样性分析[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(2): 183-189. [YU Jing, XU Qian, LI Fen, et al. Microbial diversity analysis of Nang dough from seven regions in Xinjiang[J]. Food Research and Development, 2023, 44(2): 183-189.]
- [22] 吴庆, 卜晓苑, 辛世华, 等. 传统酸面团菌群结构及其风味物质分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(4): 42-50. [WU Qing, BU Xiaoyuan, XIN Shihua, et al. Analysis of microbial community structure and flavor substances in traditional sourdough[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(4): 42-50.]
- [23] 郭淑文, 石晶红. 基于高通量测序分析内蒙古地区传统酸面团中细菌菌群的多样性[J]. 中国酿造, 2022, 41(12): 86-90. [GUO Shuwen, SHI Jinghong. Analysis of bacterial flora diversity in traditional sourdough collected from Inner Mongolia by high-throughput sequencing[J]. China Brewing, 2022, 41(12): 86-90.]
- [24] 俞曼玲, 黄晶晶, 韩金志, 等. 植物乳杆菌发酵豆薯的营养及挥发性成分变化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(17): 61-67. [YU Manling, HUANG Jingjing, HAN Jinzhi, et al. Changes of nutrients and volatile components of Jicama during fermentation by *Lactobacillus plantarum*[J]. Food Research and Development, 2023, 44(17): 61-67.]
- [25] ZHANG X R, LI X Y, ZHAO Y R, et al. Effect of *Levilactobacillus brevis* as a starter on the flavor quality of radish paocai[J]. Food Research International, 2023, 168: 112780.
- [26] 马世源, 李子健, 罗惠波, 等. 酿酒酵母对浓香型白酒酒醅微生物群落结构及功能的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 71-82. [MA Shiyuan, LI Zijian, LUO Huibo, et al. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* on microbial community structure and function of nong-flavour fermented grains[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(2): 71-82.]
- [27] WANG X Y, HUANGFU X Y, ZHAO M Y, et al. Chinese traditional sourdough steamed bread made by retarded sponge-dough method: Microbial dynamics, metabolites changes and bread quality during continuous propagation[J]. Food Research International, 2023, 163: 112145.
- [28] 耿浩, 温纪平, 张智, 等. 植物乳杆菌发酵对小麦糊粉层营养组分的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 45(2): 1-13. [GENG Hao, WEN Jiping, ZHANG Zhi, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the nutrient composition of wheat aleurone layer[J]. Food Research and Development, 2023, 45(2): 1-13.]
- [29] WANG Y Q, SORVALI P, LAITILA A, et al. Dextran produced in situ as a tool to improve the quality of wheat-faba bean composite bread[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 396-405.
- [30] ORISSA C M, LIDWINE G, RICHARD M N, et al. Rheological and textural properties of gluten-free doughs and breads based on fermented cassava, sweet potato and sorghum mixed flours[J]. LWT, 2019, 101: 575-582.
- [31] 曹伟超. 含麦麸黑豆酸面团发酵面包的营养与烘焙特性[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [CAO Weichao. The nutritional and baking characteristics of wheat bran containing black bean sourdough bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [32] 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 Meng, CAO Weichao, CHENG Xin,

- 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.]
- [33] 张宾乐. 红豆酸面团乳酸菌发酵及其提高冷冻面团烘焙品质机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [ZHANG Binle. Red bean sourdough fermented by lactic acid bacteria and its mechanism studies on improving frozen dough baking properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [34] WANG C C, YANG Z, GUO X N, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the quality of steamed bread and gluten aggregation properties[J]. *Food Chemistry*, 2021, 364: 130444.
- [35] 苏靖, 石晶红, 王金帅, 等. 基于红外光谱分析河套春小麦储藏期蛋白质二级结构变化[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(11): 24–27,35. [SU Jing, SHI Jinghong, WANG Jinshuai, et al. Changes in secondary structure of Hetao spring wheat protein under storage analyzed by fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Cereals & Oils*, 2021, 34(11): 24–27,35.]
- [36] HOSSAIN B F, CHAY S Y, MUHAMMAD K, et al. Structural and rheological changes of texturized mung bean protein induced by feed moisture during extrusion[J]. *Food Chemistry*, 2021, 344: 128643.
- [37] TANG X J, ZHANG B L, HUANG W N, et al. Hydration, water distribution and microstructure of gluten during freeze thaw process: Role of a high molecular weight dextran produced by *Weissella confusa* QS813-ScienceDirect[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 377–384.
- [38] 徐小青. 面筋蛋白对馒头品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020. [XU Xiaoqing. Effects of gluten on the quality of chinese steamed bread[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.]
- [39] 沈鑫, 杨海莺, 应欣, 等. 不同酵母对酸面团发酵剂及面包品质和风味的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(22): 257–266. [SHEN Xin, YANG Haiying, YING Xin, et al. Effects of different yeasts on sourdough starter and bread quality and flavor[J]. *Food Science*, 2023, 44(22): 257–266.]
- [40] PAVASUTTI V, SINTHUVANICH C, TAYANA N, et al. Mung bean seed coat water extract restores insulin sensitivity via up-regulation of antioxidant defense system and downregulation of inflammation in insulin-resistant HepG2 cells[J]. *NFS Journal*, 2023, 32: 100145.
- [41] NEFFE-SKOCIŃSKA K, KARBOWIAK M, KRUK M, et al. Polyphenol and antioxidant properties of food obtained by the activity of acetic acid bacteria (AAB) – A systematic review[J]. *Journal of Functional Foods*, 2023, 107: 105691.
- [42] 聂攀, 丁信文, 吴艳, 等. 植物乳杆菌发酵对全谷物黑大麦多酚富集的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(8): 186–196. [NIE Pan, DING Xinwen, WU Yan, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* fermentation on enrichment of polyphenols in whole grain black barley[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(8): 186–196.]
- [43] XU L, ZHU L L, DAI Y Q, et al. Impact of yeast fermentation on nutritional and biological properties of defatted adlay (*Coix lachryma-jobi* L.) [J]. *LWT*, 2021, 137: 110396.