

3 种乳酸菌发酵米浆对发糕品质的影响比较研究

范洪臣^{1*}, 茜 琳¹, 丁警驰¹, 韩 双², 唐 慧¹, 陈凤莲¹

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150028; 2. 黑龙江职业学院食品药品学院, 哈尔滨 150000)

摘 要: 目的 以清酒乳杆菌清酒亚种、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、发酵黏液乳杆菌为发酵菌种, 研究 3 株不同乳酸菌发酵米浆对米发糕品质的影响。**方法** 米发糕由发酵的大米磨成米浆, 再经酵母发酵, 加热汽蒸而成。以米浆的密度、黏度、持水率、流变特性为测定指标, 测定乳酸菌发酵米对米浆性质的影响; 以米发糕的质构、感官、比容为测定指标, 测定乳酸菌发酵对米发糕品质的影响。**结果** 乳酸菌发酵原料大米相比其自然发酵和未发酵大米制作的米浆, 米浆的密度与酸度最低、米浆的持水性与黏度最高, 具有良好的流变学特性; 不同乳酸菌菌种由于产酸与酶量不同, 对米浆性质影响也不同, 3 株乳酸菌中发酵黏液乳杆菌发酵黏液乳杆菌制作的米浆密度小、黏度大、pH 低、发酵能力强、流变特性中稠度系数大; 米浆性质对米发糕的品质有直接影响, 乳酸菌发酵相比于其他方法对米浆性质影响大, 制得的米发糕品质最好, 如比容较大、弹性较大、内部气孔均匀致密; 不同乳酸菌发酵米浆性质不同导致米发糕品质也不同, 3 株乳酸菌中发酵黏液乳杆菌制作的米发糕的比容最大、硬度最大(1409.43 gf)、咀嚼性最大(718.81 gf)、黏聚性与回复性最优。**结论** 发酵黏液乳杆菌发酵米发糕感官评分最高, 类干酪乳酪杆菌类干酪亚种与清酒乳杆菌清酒亚种发酵米糕的性质次之。发酵黏液乳杆菌发酵黏液乳杆菌发酵米制作米浆与米发糕品质较好, 为米发糕的制作提供新的菌种选择。

关键词: 乳酸菌发酵; 米浆; 米发糕; 感官特性; 发酵液

Comparative study on the effects of 3 kinds of lactic acid bacteria fermented rice slurry on the quality of rice cake

FAN Hong-Chen^{1*}, XI Lin¹, DING Jing-Chi¹, HAN Shuang², TANG Hui¹, CHEN Feng-Lian¹

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;
2. College of Food and Drug, Heilongjiang Polytechnic, Harbin 150000, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of 3 different strains of lactic acid bacteria fermented rice slurry on the quality of rice cake, using *Lactobacillus sakei* subsp. *sakei*, *Lacticaseibacillus paracasei* subsp. *paracasei* and *Limosilactobacillus fermentum* as fermentation strains. **Methods** Rice cake was made by grinding fermented rice into rice slurry, fermenting with yeast, heating and steaming. The effect of lactic acid bacteria fermentation on the quality of rice slurry was determined by taking the density, viscosity, water holding capacity, and rheological properties of rice slurry as the test indexes; the effect of lactic acid bacteria fermentation on the quality of rice cake was determined by taking the texture, sensory and specific volume of rice cake as the test indexes. **Results** Compared with natural

基金项目: 2022 年中央引导地方科技发展专项、高校协同创新成果建设项目(LJGXCG2022-088)、2022 年市科技计划自筹经费项目(2022ZCZJCG011)

Fund: Supported by the 2022 Central Guiding Local Science and Technology Development Special Project, the University Collaborative Innovation Achievement Construction Project (LJGXCG2022-088), and the 2022 Municipal Science and Technology Plan Self funded Project (2022ZCZJCG011)

*通信作者: 范洪臣, 博士, 讲师, 主要研究方向为传统食品发酵。E-mail: fanhongchen@hrbcu.edu.cn

*Corresponding author: FAN Hong-Chen, Ph.D, Lecturer, College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China. E-mail: fanhongchen@hrbcu.edu.cn

fermentation and unfermented rice, the raw material rice fermented by lactic acid bacteria had the lowest density and acidity, the highest water holding capacity and viscosity, and good rheological properties; different strains of lactic acid bacteria have different effects on the properties of rice slurry due to their different acid production and enzyme levels. Among the 3 kinds of strains of lactic acid bacteria, the rice slurry produced by fermenting *Limosilactobacillus fermentum* had low density, high viscosity, low pH, strong fermentation ability, and high consistency coefficient in rheological properties; the properties of rice slurry had a direct impact on the quality of rice cake. Compared with other methods, lactic acid bacteria fermentation had a greater impact on the properties of rice slurry, and the rice cake produced had the best quality, such as larger specific volume, greater elasticity, uniform and dense internal pores; the quality of rice cake was also different due to different properties of fermented rice slurry by different lactic acid bacteria. Among the 3 kinds of strains of lactic acid bacteria, the rice cake made by *Limosilactobacillus fermentum* had the largest specific volume, the largest hardness (1409.43 gf), the largest chew ability (718.81 gf), and the best cohesiveness and resilience. **Conclusion** The sensory score of rice cake fermented by *Limosilactobacillus fermentum* is the highest, followed by the quality of rice cake fermented by *Lacticaseibacillus paracasei* subsp. *paracasei* and *Lactobacillus sakei* subsp. *sakei*. The quality of rice slurry and rice cake fermented by *Limosilactobacillus fermentum* is better, which provides a new strain selection for the production of rice cake.

KEY WORDS: lactic acid bacteria fermentation; rice slurry; rice cake; sensory characteristics; fermentation broth

0 引言

米发糕是我国传统发酵大米制品,具有表面光滑、内呈蜂窝状、特殊发酵风味和易被消化吸收的优点^[1-2],因此深受人们喜爱。传统米发糕制作工艺大多采用湿法磨浆,原料大米在磨浆之前通常采用自然浸泡,自然发酵同时也开始,米粒充分浸润,使磨浆过程中产生的损伤淀粉含量少,发酵过程中乳酸菌产生小分子糖、有机酸、酶等代谢产物^[3-4],有利于米发糕的产品品质;但自然发酵受环境因素、季节因素、地域因素影响较大,容易污染杂菌^[5-6],导致产品品质不易控制,难以满足大规模工业化生产。为解决上述问题,研究人员利用乳酸菌发酵谷物原料,研究表明乳酸菌发酵能增加比容^[7-8]、改善质构^[9-10]、延缓老化^[11],从而能更好控制发酵程度,保证产品稳定性。

目前,乳酸菌发酵在发酵米发糕的原料大米中研究较少,米粉和米线研究较多,且发现乳酸菌发酵原料大米对米粉与米线品质有较大的提升。闵伟红^[12]研究发现,乳酸菌浸泡发酵大米,生产出拉伸性和口感更好的米粉;王东坤等^[5]将发酵黏液乳杆菌和植物乳杆菌接种到大米中发酵,制作出的米线质构特性和蒸煮品质较自然发酵有所提高,植物乳杆菌发酵米粉品质优于发酵黏液乳杆菌;ZHU等^[13]利用发酵黏液乳杆菌、植物乳杆菌、罗伊氏乳杆菌单独对大米强化发酵制作米线,植物乳杆菌和发酵黏液乳杆菌发酵米制作的米粉硬度、咀嚼性及弹性显著增加;王登宇等^[14]将清酒乳杆菌清酒亚种发酵粳米与糯米混合米,制作出凝胶稳定性好的年糕。

这些研究中大多数采用单一乳酸菌或者多种乳酸菌混合发酵,取得了较好的效果,但乳酸菌种之间乃至株之

间性能如产酸、酶、多糖有很大区别。李芸^[10]发现产酶发酵黏液乳杆菌发酵大米,能改变淀粉的结构,改善米粉的咀嚼性和回复性;CIZEIKIENE 等^[15]研究发现产木聚糖酶的嗜热乳酸菌发酵全麦面团能制作出感官评分较高的面包。因此,不同乳酸菌发酵原料大米制作的米发糕品质可能不同,但研究者在这方面研究较为少见,可尝试利用不同乳酸菌发酵原料大米,对比米发糕的品质差异,筛选出更适合发酵米发糕的乳酸菌。

本研究从谷物发酵液中筛选出清酒乳杆菌清酒亚种、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、发酵黏液乳杆菌作为发酵剂发酵粳米制作米发糕,并对米浆的密度、黏度、持水性、流变特性、发酵能力、pH 与米发糕的质构特性、感官特性、比容特性进行测定,比较不同乳酸菌发酵制作米发糕差异性,以期获得品质较好的米发糕,筛选出适合制作米发糕的乳酸菌。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

粳米(食品级,黑龙江五常金禾米业有限公司);绵白糖(食品级,沈阳永生堂贸易有限公司);酵母粉(食品级,安琪酵母股份有限公司);清酒乳杆菌清酒亚种 HSD-F-L A.S01 (*Lactobacillus sakei* subsp. *sakei* HSD-F-LA.S01)、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种 HSD-F-LA.P01 (*Lacticaseibacillus paracasei* subsp. *paracasei* HSD-F-LA.P01)、发酵黏液乳杆菌 HSD-F-LA.Lf01 (*Limosilactobacillus fermentum* HSD-F-LA.Lf01)(哈尔滨商业大学食品工程学院分离保藏);MRS 培养基(北京奥博星生物技术有限责任公司)。

YXQ-70A 立式压力蒸汽灭菌器(上海博讯实业有限公司);DHP-9162 电热恒温培养箱(上海一恒科学仪器有限公司);

司); TA-new plus 质构仪(上海腾拔仪器科技有限公司); AE523 分析天平(精度 0.01 mg, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司); DL-CJ-1ND1L 超净工作台(北京市东联哈尔仪器制造厂); TM-767 小太阳豆浆机(中山市海盘电器有限公司); C22-F61 电磁炉(杭州九阳生活电器有限公司); DV2TLV 黏度计(美国 Brookfield 公司); TG18.5 离心机(上海卢湘仪离心机仪器有限公司); MCR102 流变仪(奥地利安通帕公司); pH-20 pH 计(杭州杰源仪器科技有限公司); HSC-19T 恒温磁力搅拌器(宁波群安实验仪器有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 菌株活化

参照王登宇等^[14]的方法活化乳酸菌。将-80℃保藏的乳酸菌划线活化, 挑取单菌落于 5 mL MRS 液体培养基中培养过夜, 再按 1%的接种量接入 MRS 液体培养基中, 37℃恒温密闭培养 18 h, 待用。

1.2.2 大米发酵

接种发酵: 大米用自来水冲洗后放入灭菌三角瓶中, 按米水比例 1:1.5 (g:mL)加入无菌水, 分别接入 3 种乳酸菌后恒温发酵培养, 发酵具体参数见表 1。

自然发酵: 与接种发酵相比不接入菌种, 其他相同。

1.2.3 乳酸菌大米发酵液产酸与产酶特性测定

(1)产酸能力测定

取大米发酵液, 用 pH 计测定发酵液 pH。

(2)产淀粉酶活力测定

淀粉酶活力参照李路遥^[16]的方法, 绘制麦芽糖标准曲线求得回归方程 $Y=0.4323X-0.0396$, X 为麦芽糖质量浓度, Y 为吸光度 OD_{540} , $r^2=0.9993$, 标准曲线的线性良好。

(3)产蛋白酶活力测定

蛋白酶活力参照 GB/T 23527—2009《蛋白酶制剂》中方法测定, 绘制酪氨酸标准曲线求得回归方程 $Z=0.0101E+0.0226$, E 为酪氨酸质量浓度, Z 为吸光度 OD_{680} , $r^2=0.9998$, 标准曲线的线性良好。

1.2.4 米浆与米发糕的制备

(1)米浆的制备

参照唐慧等^[17]的方法制作米浆。表 1 参数是前期通过工艺优化实验得出乳酸菌发酵米制作发糕的最优工艺参数。图 1 是乳酸菌发酵米制作米发糕的工艺流程。取发酵结束的米倒出, 含有乳酸菌发酵液, 并对米进行淘洗, 称量出 500 g 湿米、绵白糖、酵母粉、室温水, 后一同放入磨浆机, 磨浆 2 min, 将米浆从磨浆杯倒入烧杯, 烧杯覆盖保鲜膜于恒温培养箱发酵, 得到发酵后需测定的米浆样品。

(2)米发糕的制备

参照 1.2.4 (1)制作米浆工艺与表 1 工艺参数, 将酵母发酵结束的米浆放入模具(铝合金蛋塔模具, 上口内径 70 mm, 底内径 39 mm, 高 23 mm)中, 于电磁炉上蒸制 15 min, 蒸制结束后取出室温放置 1 h, 米发糕制作完成, 作为测量样品。

表 1 米发糕制作工艺参数
Table 1 Processing parameters of rice cake

菌种	乳酸菌发酵 时间/h	乳酸菌发酵 温度/℃	乳酸菌菌液 添加量/%	水添加量/mL	绵白糖 添加量/g	酵母 添加量/%	酵母发酵 时间/h	酵母发酵 温度/℃
UF	-	-	-	275	50.0	0.4	2	35
Q	23	26	1.4	270	49.0	0.4	2	35
Q-NF	23	26	0.0	270	49.0	0.4	2	35
G28	24	28	1.4	275	50.0	0.4	2	35
G28-NF	24	28	0.0	275	50.0	0.4	2	35
G4	24	30	2.0	265	50.0	0.4	2	35
G4-NF	24	30	0.0	265	50.0	0.4	2	35

注: UF 代表未发酵, -表示未浸泡发酵; Q: 清酒乳杆菌清酒亚种最优发酵条件, Q-NF: 与 Q 同条件无清酒乳杆菌清酒亚种自然发酵; G28: 类干酪乳酪杆菌类干酪亚种最优发酵条件, G28-NF: 与 G28 同条件无类干酪乳酪杆菌类干酪亚种自然发酵; G4 代表发酵黏液乳杆菌发酵, G4-NF: 同条件无发酵黏液乳杆菌自然发酵。

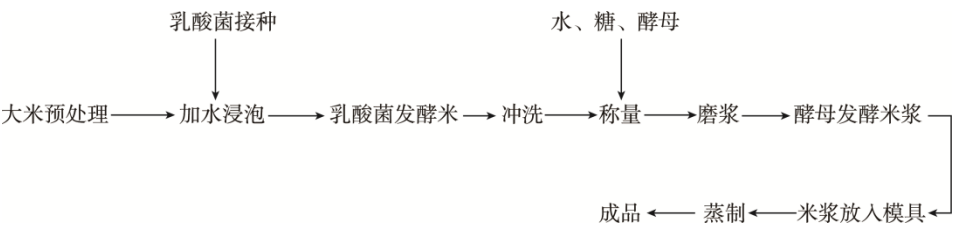


图 1 米发糕制作工艺流程图
Fig.1 Process flow chart of rice cake

1.2.5 米发糕米浆性质的测定

(1)米浆密度测定

铝盒装满水称重后置空, 装满米浆后称量质量, 根据公式(1)计算米浆密度^[18]:

米浆密度/(g/mL)= $\frac{(M_2 - M_0)}{(M_1 - M_0)} \times \rho_{\text{水}}$ (1)

式(1)中: M_2 , 装满米浆质量, g; M_1 , 装满水质量, g; M_0 , 铝盒质量, g; $\rho_{\text{水}}$ 蒸馏水密度, 1 g/mL。

(2)米浆黏度测定

取少量米浆, 使用黏度计测量黏度, 使用 4 号转子, 转速 50 r/min, 启动后 1 min 开始读数, 记录米浆黏度值^[19]。

(3)米浆持水率测定

称量米浆 15 g 于离心管, 6000 r/min 离心 10 min 后弃上清液, 称量沉淀质量, 根据公式(2)计算米浆持水率^[20]:

持水率/%= $\frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100\%$ (2)

式(2)中: W_0 , 离心管重量, g; W_1 , 初始样品重量+离心管重量, g; W_2 , 离心后样品重量+离心管重量, g。

(4)米浆流变特性测定

取适量米浆放在旋转流变仪的基板上进行测量, 具体测试条件为^[21]: 平板直径 50 mm、25℃、夹缝距离 1 mm, 米浆 5 min 内剪切速率 0.1~100 s⁻¹。

(5)米浆 pH 测定

取 10 g 米浆, 放入 250 mL 烧杯中, 再加入 90 mL 无二氧化碳蒸馏水, 将烧杯放在磁力搅拌器上搅拌 10 min 后测定 pH^[21]。

(6)米浆发酵能力测定

取磨完的 120 g 米浆放入 500 mL 量筒, 35℃发酵 2 h, 发酵结束米浆高度与初始高度差, 即为米浆发酵能力^[21]。

1.2.6 米发糕品质特性的测定

(1)米发糕质构特性测定

采用 P/36R 探头对样品进行全质构分析, 参数设定^[17]: 测前速度 5 mm/s, 测定速度 2 mm/s, 测定后速度 5 mm/s, 应变位移 60%, 引力 5 g。

(2)米发糕比容特性测定

采用小米代替法测定米发糕的比容^[17]。将蒸制完成的米发糕在室温下冷却 1 h, 测定发酵米发糕的质量和体积, 按照公式(3)计算米发糕的比容:

$S = \frac{V}{W}$ (3)

式(3)中: S , 米发糕的比容, mL/g; V , 米发糕的体积, mL; W , 米发糕的质量, g。

(3)米发糕感官特性测定

选择 10 名食品专业人员组成感官评价小组(年龄 20~40 周岁, 男女比例 1:1)对产品进行感官评价。分别从米发糕的形态、色泽、气味、口感、组织 5 个方面进行评分, 具体评价标准见表 2。

表 2 米发糕感官评分表
Table 2 Sensory score table of rice cake

类别	评价标准	评分
形态(20 分)	表面光滑, 不塌陷	16~20
	表面稍光滑, 轻微塌陷	10~15
	表面大面积塌陷	0~9
色泽(20 分)	颜色均匀洁白, 色泽透亮	16~20
	颜色较均匀, 色泽较透亮	10~15
	颜色基本均匀, 色泽稍透亮	0~9
气味(20 分)	柔和的发酵味, 无异味	16~20
	发酵香味稍淡, 无异味	10~15
	无发酵香味, 无异味	0~9
口感(20 分)	有嚼劲与弹性, 不黏牙	16~20
	较有嚼劲与弹性, 稍黏牙	10~15
	无嚼劲与弹性, 黏牙	0~9
组织(20 分)	横截面气孔均匀且致密	16~20
	横截面气孔稍均匀, 较致密	10~15
	横截面气孔不均匀, 不致密	0~9

1.3 数据处理

所有实验均设定 3 次平行实验, 采用 Excel 2019、SPSS 26.0、Origin21.0 软件对实验数据进行分析处理, 采用 Tukey 多重比较法进行显著性检验, 同列字母不同, 表示差异显著($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同乳酸菌产酸和酶活性

表 3 可知, 3 株乳酸菌的产酸能力从高到低为发酵黏液乳杆菌、清酒乳杆菌清酒亚种、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种, 3 株乳酸菌产淀粉酶活性能力从高到低为发酵黏液乳杆菌、清酒乳杆菌清酒亚种、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种, 蛋白酶活性由高到低为类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、发酵黏液乳杆菌、清酒乳杆菌清酒亚种。与自然发酵相比, 乳酸菌强化发酵米发酵液体系的 pH 均较低, 可能原因是乳酸菌发酵利用米蛋白等营养物质^[22], 代谢产生较多乳酸使 pH 较低。乳酸菌发酵米产生的酸对米具有一定破坏作用, 使乳酸菌发酵产生的淀粉酶和蛋白酶进入到淀粉颗粒内部, 乳酸菌能对米淀粉与蛋白进行分解, 乳酸菌能更好利用蛋白进行繁殖与增长, 被米蛋白包裹的淀粉释放出来, 直链淀粉糊化后形成三维凝胶网络结构支撑米发糕。乳酸菌产酸与产酶能力过强, 米蛋白含量降低, 米淀粉含量相对升高, 米发糕刚性结构过强, 米发糕内部致密的气孔结构缺失, 米发糕品质变差。

表 3 不同乳酸菌发酵对发酵液的酸度值、淀粉酶与蛋白酶活性的影响

Table 3 Effects of different lactic acid bacteria fermentation on the acidity value, amylase production and protease activity of fermentation broth

样品	pH	淀粉酶活性 (U/g)	蛋白酶活性 (U/g)
Q-NF	5.94±0.02 ^f	0.34±0.02 ^c	1.52±0.17 ^f
Q	4.55±0.01 ^c	0.38±0.03 ^c	2.82±0.18 ^c
G28-NF	5.31±0.01 ^e	0.34±0.01 ^f	2.71±0.11 ^d
G28	4.99±0.01 ^d	0.35±0.01 ^d	3.30±0.10 ^a
G4-NF	4.33±0.01 ^b	0.41±0.04 ^b	2.42±0.12 ^c
G4	4.00±0.01 ^a	0.43±0.02 ^a	2.91±0.15 ^b

注：同列不同的字母上标表示差异性显著($P<0.05$)，下同。

2.2 乳酸菌发酵对米浆性质的影响

2.2.1 乳酸菌发酵对米浆密度、黏度、持水性的影响

米浆密度是能反映米发糕品质的一个重要指标，它体现的是大米在打浆过程中产生气泡、酵母发酵过程中产气以及米浆在磨制和发酵过程中自身的持气能力^[23]，能影响米发糕的比容与质构特性。米浆密度小，米浆持气能力强，米发糕蓬松度高；米浆密度大，米浆持气能力弱，米发糕蓬松度低，造成米发糕体积偏小，影响米发糕的品质^[24]。由表 4 可知：米浆密度从高到低为未发酵米浆密度、自然发酵米浆密度、乳酸菌发酵米浆密度。3 株乳酸菌发酵的米浆密度从高到低为清酒乳杆菌清酒亚种、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、发酵黏液乳杆菌。

米浆黏度是影响磨浆过程中气泡移动与融合和磨浆后米浆气体吸入量以及保留酵母发酵产气的一个重要因素。HUNTER 等^[25]认为面糊体系中的气泡在不稳定的情况下，会出现自发的聚集与歧化，可能会出现面糊体系不稳定的现象。较大黏度可以有效减缓米浆的流动，进而能减缓米浆中气泡的迁移和扩散，能提高米浆的稳定性，能够有效提升米发糕的品质。米浆的黏度越大，米浆的持气能力越强，米发糕的比容越大。由表 4 可知：米浆黏度从低到高为未发酵米浆黏度、自然发酵米浆黏度、乳酸菌发酵米浆黏度。3 株乳酸菌发酵米浆黏度从低到高为清酒乳杆菌清酒亚种、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、发酵黏液乳杆菌。

持水率是米浆体系结合水能力的强弱，持水率越大，米浆持水性越强，米浆中水分的流动性相对较弱，米浆中的气泡融合机率较小^[26]，米发糕品质相对较稳定。由表 4 可知：米浆持水率从高到低为乳酸菌发酵米浆持水率、自然发酵米浆持水率、未发酵米浆持水率。3 株乳酸菌发酵米浆持水率从高到低为发酵黏液乳杆菌、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、清酒乳杆菌清酒亚种。

乳酸菌发酵过程中产生淀粉酶和蛋白酶，两种酶与米中的物质相互作用，使大米粉颗粒变小^[27]，米粉颗粒在米浆体系中沉降速率较低，粉体颗粒对米浆体系空隙破坏作用较小，米浆体系较稳定，米浆的密度较小。乳酸菌发

酵过程中产生蛋白酶，蛋白酶对米蛋白的分解与利用，使被米蛋白包裹的米淀粉释放出来，米浆体系中直链淀粉含量增加^[28]，米浆体系的黏度增大，持水性增加。

表 4 不同乳酸菌发酵对米浆密度、黏度与持水性的影响

Table 4 Effects of different lactic acid bacteria fermentation on density, viscosity, and water release rate of rice slurry

样品	密度/(g/mL)	黏度/cP	持水率/%
UF	0.96±0.01 ^a	1440.00±365 ^g	71.17±5.96 ^g
Q-NF	0.91±0.02 ^b	2769.00±254 ^f	82.72±3.48 ^f
Q	0.77±0.03 ^c	4540.00±198 ^c	84.62±9.22 ^c
G28-NF	0.89±0.01 ^c	4215.67±176 ^c	84.16±2.44 ^c
G28	0.73±0.03 ^f	4813.33±357 ^b	85.28±6.48 ^b
G4-NF	0.81±0.01 ^d	4382.67±631 ^d	84.31±8.35 ^d
G4	0.70±0.02 ^g	4951.00±280 ^a	86.45±3.45 ^a

2.2.2 乳酸菌发酵对米浆流变特性的影响

良好的流变特性表明米浆的持气能力越高。由图 2 可知：所有米浆样品都显示出剪切变稀和假塑性，随着剪切速率的增加，表观黏度逐渐降低。采用幂律模型对流变曲线进行拟合结果见表 5， $R^2\geq 0.98$ 说明拟合度较好。米浆具有此特性可能是较低剪切速率时，米浆体系中存在气泡与其内部的链状大分子相互缠绕结合，混合体系米浆黏度系数 K 较大；随剪切速率的不断增加，剪切力的作用使得分子链散乱，使其沿着剪切力方向与气泡的结合变形，缠绕现象减少而黏度下降^[29]。乳酸菌发酵产生酸和酶能水解米中支链淀粉，使其脱支与断链^[30]，直链淀粉含量增加，淀粉结构的无序化程度增加，米浆体系内相互缠绕增强，米浆黏度提高。与清酒乳杆菌清酒亚种和类干酪乳酪杆菌类干酪亚种相比，发酵黏液乳杆菌增强米浆的无序化程度最强。

所有米浆体系的流动特征指数 $n<1$ ，表现出典型的假塑性流体，流体特征指数 n 偏离 1 越远，流体越偏离牛顿理想状态^[31]，米浆的黏度越大，流动性降低。发酵可能使米浆体系中直链淀粉含量增加，直链淀粉之间通过氢键相互作用增强，米浆体系的流动性降低。

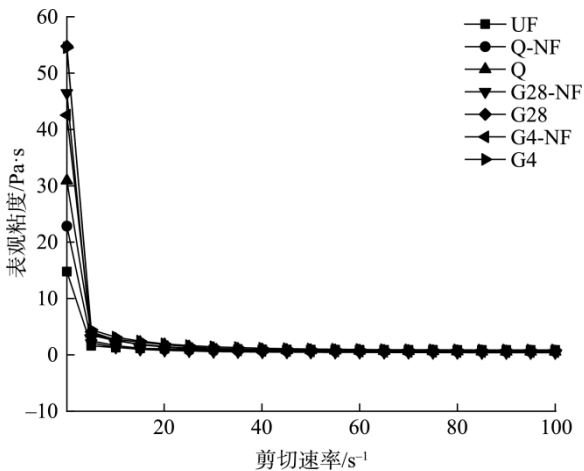


图 2 不同乳酸菌发酵米浆静态流变曲线

Fig.2 Static rheological curves of fermented rice slurry with different lactic acid bacteria

表 5 不同乳酸菌发酵对米浆静态流变学特性的影响
Table 5 Effects of different lactic acid bacteria fermentation on static rheological properties of rice slurry

样品	$K/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	n	R^2
UF	4.11±0.23 ^g	0.62±0.01 ^g	0.99
Q-NF	5.67±0.21 ^f	0.46±0.01 ^f	0.98
Q	9.23±0.11 ^d	0.39±0.02 ^c	0.98
G28-NF	7.36±0.30 ^c	0.31±0.01 ^a	0.98
G28	11.16±0.28 ^b	0.34±0.01 ^b	0.99
G4-NF	9.71±0.24 ^c	0.35±0.01 ^c	0.99
G4	12.50±0.15 ^a	0.38±0.02 ^d	0.99

2.2.3 乳酸菌发酵对米浆 pH 与米浆发酵能力的影响

由表 6 可知: 米浆 pH 按从低到高为乳酸菌发酵米浆、自然发酵米浆、未发酵米浆。3 株乳酸菌发酵米浆 pH 从高到低为清酒乳杆菌清酒亚种、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、发酵黏液乳杆菌。乳酸菌发酵产酸, 酸性物质进行米内部, 所以经乳酸菌发酵米磨浆后 pH 低。3 种乳酸菌中, 发酵黏液乳杆菌产酸能力最强, 米浆 pH 最小。酸性条件下凝胶结构形成速度更快, 凝胶结构更加稳定。因此, 发酵黏液乳杆菌发酵米制作米发糕品质可能更优。

米浆发酵能力反映的是米浆体系内酵母产气能力以及米浆持气能力。米浆发酵能力从高到低为乳酸菌发酵米浆、自然发酵米浆、未发酵米浆。3 株乳酸菌发酵米磨浆的发酵能力从高到低为类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、发酵黏液乳杆菌、清酒乳杆菌清酒亚种。可能原因是乳酸菌发酵米磨浆的黏度较大, 米浆持气能力强, 对酵母产生的 CO₂ 气体有更好的包裹, 使米浆体积变大。

表 6 不同乳酸菌发酵对米浆 pH 与发酵能力的影响
Table 6 Effects of different lactic acid bacteria fermentation on pH and fermentation capacity of rice slurry

样品	pH	体积/mL
UF	5.39±0.01 ^g	110.24±20.00 ^g
Q-NF	4.98±0.01 ^f	145.92±18.10 ^f
Q	4.87±0.01 ^c	189.77±12.31 ^c
G28-NF	4.98±0.02 ^c	178.40±9.49 ^c
G28	4.63±0.01 ^b	190.55±10.56 ^a
G4-NF	4.89±0.03 ^d	179.85±11.72 ^d
G4	4.48±0.03 ^a	190.24±26.21 ^b

表 7 不同乳酸菌发酵对米发糕质构特性的影响
Table 7 Effects of different lactic acid bacteria fermentation on texture characteristics of rice cakes

样品	硬度/gf	弹性/mm	咀嚼性/gf	黏聚性	回复性
UF	3124.65±754.09 ^g	0.49±0.02 ^f	948.11±62.04 ^g	0.62±0.01 ^f	0.16±0.01 ^c
Q-NF	1647.15±395.99 ^f	0.55±0.01 ^d	534.50±52.17 ^a	0.59±0.01 ^g	0.16±0.01 ^c
Q	1290.59±186.28 ^a	0.66±0.02 ^a	681.43±38.39 ^d	0.80±0.02 ^c	0.10±0.01 ^f
G28-NF	1540.37±265.72 ^d	0.55±0.01 ^d	550.68±25.67 ^b	0.65±0.03 ^e	0.14±0.02 ^d
G28	1330.53±120.38 ^b	0.65±0.01 ^b	717.82±32.49 ^c	0.83±0.02 ^b	0.13±0.02 ^c
G4-NF	1590.39±137.85 ^c	0.53±0.03 ^c	590.03±47.72 ^c	0.70±0.01 ^d	0.21±0.02 ^a
G4	1409.43±119.49 ^c	0.60±0.01 ^c	718.81±20.04 ^f	0.85±0.04 ^a	0.17±0.03 ^b

2.3 乳酸菌发酵对米发糕特性的影响

2.3.1 乳酸菌对米发糕质构特性的影响

米发糕的质构特性包括硬度、弹性、咀嚼性等指标, 是衡量米发糕品质的一个重要指标。优质的发糕一般具有适中的硬度、较大的弹性、良好的咀嚼性、较大的回复性。

由表 7 可知: 米发糕的硬度从大到小为未发酵米发糕、自然发酵米发糕、乳酸菌发酵米发糕; 米发糕的弹性与黏聚性从大到小为乳酸菌发酵米发糕、除清酒乳杆菌清酒亚种发酵对应的自然发酵米发糕、未发酵米发糕; 米发糕的咀嚼性从大到小为未发酵米发糕、乳酸菌发酵米发糕、自然发酵米发糕。乳酸菌发酵大米制作米发糕的硬度与咀嚼性从高到低为: 发酵黏液乳杆菌、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、清酒乳杆菌清酒亚种。造成此现象的原因可能是发酵黏液乳杆菌发酵造成大米中直链淀粉含量增加, 直链淀粉之间通过氢键相互交联缠绕, 形成具有一定强度的淀粉凝胶网络^[7], 此结构稳定, 强度加大, 发酵黏液乳杆菌发酵米制作发糕咀嚼性较大。3 株乳酸菌中发酵黏液乳杆菌发酵米发糕的硬度较大, 结合感官特性, 品质较优, 清酒乳酸菌发酵米发糕结构支撑性稍差。而原料大米经自然发酵制作的米发糕的硬度大于乳酸菌发酵, 弹性与黏聚性小于乳酸菌发酵, 酵母发酵产气未能在汽蒸时包裹, 造成米发糕的凝胶强度更大, 米发糕的刚性强度过大, 表现出米发糕内部气孔均匀度较差, 米发糕柔软多孔的结构不显现, 成品品质较差。

2.3.2 乳酸菌对米发糕比容特性的影响

比容是判断米发糕品质的一个重要指标, 表示单位质量的米发糕所占的体积, 反映米发糕的蓬松度^[32]。由图 3 可知: 米发糕的比容从大到小为乳酸菌发酵米发糕、自然发酵米发糕、未发酵米发糕。米浆的密度与黏度大小能影响米发糕的比容大小。3 种乳酸菌发酵米发糕的比容从大到小为发酵黏液乳杆菌、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、清酒乳杆菌清酒亚种。米发糕的结构主要是由大米糊化形成的凝胶所支撑, 米粉中直链淀粉含量较低形成的凝胶网络结构稳定性差, 乳酸菌发酵使得大米中被蛋白质包裹的部分直链淀粉释放出来, 米发糕形成凝胶结构更稳定, 米发糕的比容更大^[30]。自然发酵米发糕的比容低于乳酸菌发酵的, 可能原因是直链淀粉没有充分暴露出来, 淀粉凝胶结构松散, 淀粉凝胶网络结构对米发糕内部气孔保留率降低, 使得米发糕的比容较小。

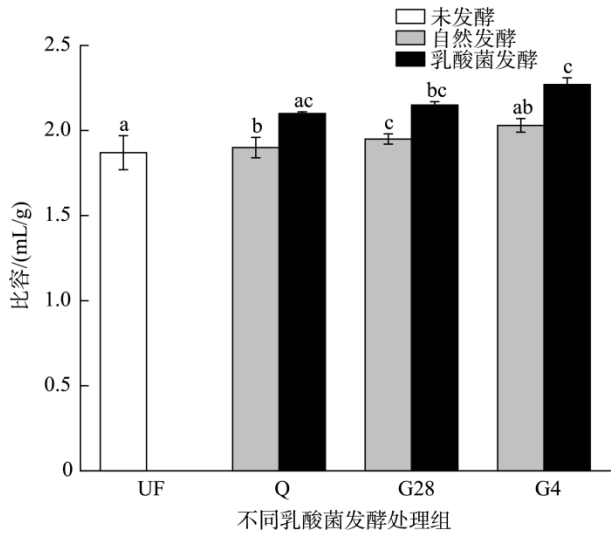


图 3 不同乳酸菌发酵对米发糕比容特性的影响
Fig.3 Effects of different lactic acid bacteria fermentation on specific volume characteristics of rice cakes

2.3.3 乳酸菌对米发糕感官特性的影响

由图 4 可知：与未发酵相比，发酵能提高米发糕的感官评分，尤其是经乳酸菌发酵的大米制作米发糕的感官评分较大，乳酸菌发酵米发糕的感官评分从高到低依次为发酵黏液乳杆菌、类干酪乳酪杆菌类干酪亚种、清酒乳杆菌清酒亚种。原料大米未经发酵制作米发糕口感差，弹性差，内部无米发糕的典型蜂窝状结构，口感有韧劲缺乏弹性，没有发酵的香味。由图 5 可知：原料大米经发酵制作的米发糕口感有嚼劲、较大的比容与弹性、内部气孔组织结构均匀、细密的孔洞、良好的发酵香味，尤其是经乳酸菌发酵的米发糕内部气孔均匀，发酵黏液乳杆菌发酵的米发糕内部气孔最均匀致密。

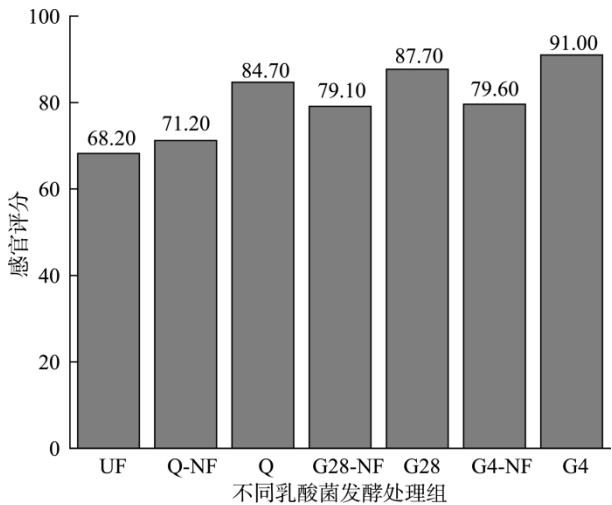


图 4 不同乳酸菌发酵对米发糕感官特性的影响
Fig.4 Effects of different lactic acid bacteria fermentation on sensory characteristics of rice cakes

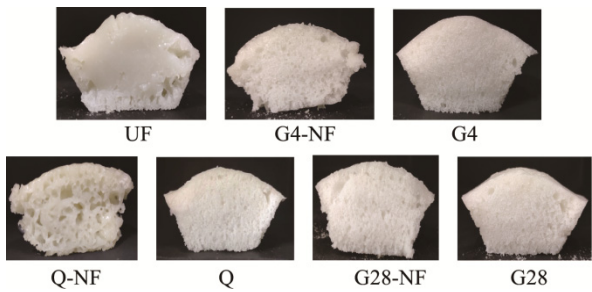
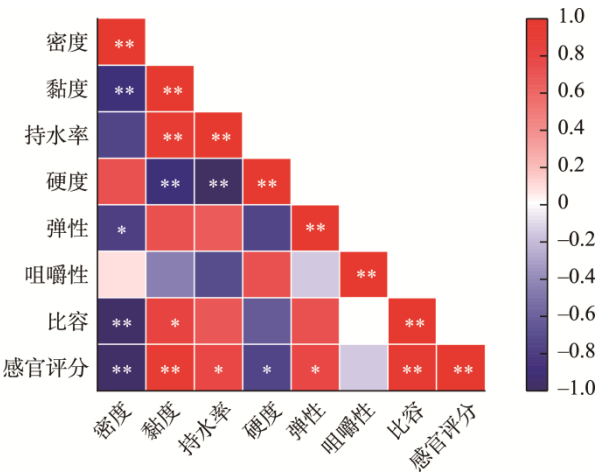


图 5 米发糕截面组织结构图
Fig.5 Section organization charts of rice cakes

2.4 米浆性质与米发糕品质之间的相关性分析

如图 6 可知：通过皮尔逊分析，得到米浆性质与米发糕品质之间的相关性。通过分析得出，米浆的密度与黏度之间呈显著负相关，米浆密度越小，黏度越高；米浆黏度与持水率之间呈显著正相关，米浆黏度越小，持水率越高。米浆密度与米发糕的比容、感官评分呈极显著正相关，米浆密度越小，米发糕越蓬松，感官品质越高；米浆黏度、持水率与米发糕的感官评分呈显著正相关，米浆黏度、持水率与米发糕硬度呈显著负相关，米浆的黏度与持水率越高，米发糕的硬度较低。米发糕感官评分与米发糕的硬度呈显著负相关、与米发糕的弹性、比容、感官评分呈显著正相关。因此，分析米浆性质的差异可以较好地预测米发糕品质的差异。



注：*显著相关($P<0.05$)；**极显著相关($P<0.01$)。
图 6 米浆性质与米发糕品质之间的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between rice slurry properties and rice cake qualities

3 结 论

本研究测定了 3 株乳酸菌强化发酵大米、自然发酵大米、未发酵大米对米发糕米浆及米发糕品质的影响，系统

评价了乳酸菌强化发酵原料大米对米发糕品质的影响。结果显示: 米浆性质对米发糕的品质有直接影响, 米浆密度低、黏度高、持水性强、酸度低、发酵能力强、流变学特性好, 能制作出比容较大、弹性较大、内部气孔均匀致密的米发糕; 3 株乳酸菌强化发酵原料大米相比其自然发酵米浆都能降低米浆的密度与酸度、提高米浆的持水性与黏度, 具有良好的流变学特性; 3 株乳酸菌强化发酵原料大米相比其自然发酵米发糕都具有颜色均匀洁白、色泽透亮; 有较大的比容; 米发糕具有发酵米香味; 内部组织结构均匀, 气孔分布相对均匀致密; 弹性较好、组织结构较好; 3 株乳酸菌强化发酵对米浆与米发糕的差异化表现较明显。米发糕品质从高到低依次为: 发酵黏液乳杆菌、类干酪乳杆菌类干酪亚种、清酒乳杆菌清酒亚种, 筛选出发酵黏液乳杆菌可以作为米发糕的发酵菌种, 本研究为米发糕和发酵米食品在菌种选择上提供借鉴。

参考文献

- [1] 刘冬梅, 邱嘉华, 黄燕燕, 等. 复合乳酸菌发酵米发糕风味物质及储存特性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 1-8.
LIU DM, KUANG JH, HUANG YY, *et al.* Flavor compounds and storage property of lactic acid bacteria fermented rice cake [J]. J South China Univ Technol (Nat Sci Ed), 2021, 49(11): 1-8.
- [2] 梁言, 林伟锋, 陈中, 等. 米发糕发酵工艺模型的建立[J]. 食品科技, 2019, 44(5): 148-155.
LIANG Y, LIN WF, CHEN Z, *et al.* Establishment of mathematical model of fermentation technology of fermented rice cake [J]. Food Sci Technol, 2019, 44(5): 148-155.
- [3] 李棒棒. 米饼制作过程中浸米工艺的优化[D]. 新乡: 河南科技学院, 2019.
LI BB. Optimization of rice soaking process in rice cake making [D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2019.
- [4] 吴玉新, 陈佳芳, 马子琳, 等. 乳酸菌发酵米粉酸面团生化特性及其对馒头蒸制特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 64-71.
WU YX, CHEN JF, MA ZL, *et al.* Biochemical characteristics of rice flour sourdough fermented by lactic acid bacteria and its effects on steaming characteristics of steamed bread [J]. Food Sci, 2020, 41(6): 64-71.
- [5] 王东坤, 张佳艳, 李才明, 等. 植物乳杆菌强化发酵对鲜湿米粉品质的影响及作用机理分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 134-139.
WANG DK, ZHANG JY, LI CM, *et al.* Effects of *Lactobacillus plantarum* enhanced fermentation on the quality of fresh rice noodles and its mechanism [J]. Food Ferment Ind, 2022, 48(7): 134-139.
- [6] 李芸, 杨梦妍, 陈小雪, 等. 微生物强化发酵对米粉品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(11): 1-6, 31.
LI Y, YANG MY, CHEN XX, *et al.* Effect of fortified fermentation with microorganisms on quality of rice noodles [J]. J Chin Cereals Oils Ass, 2016, 31(11): 1-6, 31.
- [7] 李萌, 徐一涵, 张建华. 乳酸菌发酵对淀粉类食品品质的影响[J]. 中国酿造, 2020, 39(2): 13-18.
LI M, XU YH, ZHANG JH. Effect of lactic acid bacteria fermentation on the quality of starchy foods [J]. China Brew, 2020, 39(2): 13-18.
- [8] 曹伟超, 张宾乐, Omedi Jacob OJOBI, 等. 功能性乳酸菌发酵黑豆麦麸面团面包的营养及烘焙特性[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 142-150.
CAO WC, ZHANG BL, OJOBI OJ, *et al.* Nutritional and baking characteristics of black bean-wheat bran sourdough bread fermented by functional lactic acid bacteria [J]. Food Sci, 2022, 43(2): 142-150.
- [9] FALADE AT, EMMAMBUX MN, BUYS EM, *et al.* Improvement of maize bread quality through modification of dough rheological properties by lactic acid bacteria fermentation [J]. J Cere Sci, 2014, 60(3): 471-476.
- [10] 李芸. 发酵米粉生产过程中的菌相变化及发酵对米粉品质的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
LI Y. Microbial succession during rice noodle processing and influence of fermentation on quality of rice noodle [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [11] NAMI Y, GHAREKHANI M, AALAMI M, *et al.* Lactobacillus-fermented sourdoughs improve the quality of gluten-free bread made from pearl millet flour [J]. J Food Sci Technol Mys, 2019, 56(10): 4057-4067.
- [12] 闵伟红. 乳酸菌发酵改善米粉食用品质机理的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
MIN WH. Study on the mechanism of improving eating quality of rice noodles by lactic acid bacteria fermentation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2003.
- [13] ZHU J, CHEN Y, LV C, *et al.* Study on optimization of removing cadmium by *Lactobacillus* fermentation and its effect on physicochemical and quality properties of rice noodles [J]. Food Control, 2019, 106: 106740.
- [14] 王登宇, 孔垂琴, 王冰, 等. 乳酸菌发酵对混合米粉理化特性及年糕品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(3): 229-239.
WANG DY, KONG CQ, WANG B, *et al.* Effect of active acid bacteria fermentation on the physicochemical characteristics of mixed rice flour and the quality of rice cakes [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2023, 23(3): 229-239.
- [15] CIZEIKIENE D, JAGELAVICIUTE J, STANKEVICIUS M, *et al.* Thermophilic lactic acid bacteria affect the characteristics of sourdough and whole-grain wheat bread [J]. Food Biosci, 2020, 38: 100791.
- [16] 李路遥. 发酵鲜湿米粉的优良菌种选育及品质研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2016.
LI LY. Study on fine strains breeding and quality of fermented fresh rice flour [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2016.
- [17] 唐慧, 范洪臣, 陈凤莲, 等. 乳酸菌发酵大米工艺优化制备米发糕研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(1): 48-51.
TANG H, FAN HC, CHEN FL, *et al.* Study on the process optimization of lactic bacteria fermentation rice by making rice cake [J]. J Cere Oils, 2023, 36(1): 48-51.
- [18] BUSTILLOS MA, JONCHERE C, GARNIER C, *et al.* Rheological and microstructural characterization of batters and sponge cakes fortified with pea proteins [J]. Food Hydrocolloid, 2020, 101: 105553.
- [19] 张俊. 发芽对高粱性质的影响及其在无麸质蛋糕中的应用[D]. 成都:

- 西华大学, 2021.
- ZHANG J. Effect of germination on sorghum properties and its application in gluten-free cake [D]. Chengdu: Xihua University, 2021.
- [20] SHAO YY, LIN KH, CHEN YH. Batter and product quality of eggless cakes made of different types of flours and gums [J]. J Food Process Pres, 2015, 39(6): 2959–2968.
- [21] 阮征, 周雅轩, 廖思敏, 等. 发酵时间和蒸制强度对预拌粉马拉糕面糊特性及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 204–212.
- RUAN Z, ZHOU YX, LIAO SM, *et al.* Effects of fermentation time and steaming intensity on the batter characteristics and quality of Mala cake made using pre-mixed powder [J]. Sci Technol Food Ind Food Ind, 2023, 44(2): 204–212.
- [22] 成林梢, 梁钦梅, 姚镇江, 等. 米粉品质评价及生产研究现状及展望[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(6): 71–79.
- CHENG LS, LIANG QM, YAO ZJ, *et al.* Rice noodles quality evaluation and production research status and prospects [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2022, 30(6): 71–79.
- [23] SWAMI SB, DAS SK, MAITI B. Effect of water and air content on the rheological properties of black gram batter [J]. J Food Eng, 2004, 65(2): 189–196.
- [24] TURABI E, SUMNU G, SAHIN S. Rheological properties and quality of rice cakes formulated with different gums and an emulsifier blend [J]. Food Hydrocolloid, 2008, 22(2): 305–312.
- [25] HUNTER TN, PUGH RJ, FRANKS GV, *et al.* The role of particles in stabilizing foams and emulsions [J]. Adv Colloid Int, 2008, (2): 137.
- [26] ASLAN M, BILGICLI N. Improvement of functional cake formulation with fermented soy (*Glycine max*) and lupin (*Lupinus albus* L) powders [J]. Int J Gastron Food Sci, 2021, 1(26): 1–7.
- [27] YU HH, LEE Y, NAM YS, *et al.* Surface analysis of fermented wheat and rice starch used for coating traditional Korean textiles [J]. Materials, 2022. DOI: 10.3390/ma15062001
- [28] AOKI N, KATAOKA T, NISHIBA Y. Crucial role of amylose in the rising of gluten-and additive-free rice bread [J]. J Cere Sci, 2019, 1(92): 1–5.
- [29] 王永俊. 四种功能性低聚糖在海绵蛋糕中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- WANG YJ. Study on the application of four functional oligosaccharides in sponge cake [D]. Guangzhou: South China university of Technology, 2019.
- [30] XU MM, ZOU J, ZHAO XD, *et al.* Effect of lactobacteria fermentation on structure and physicochemical properties of Chinese yam starch (*Dioscorea opposita* Thunb.) [J]. Food Chem, 2022, 387: 132873.
- [31] 邹奇波, 王家宝, 陈诚, 等. 乳化剂和保泡型流态起酥油对海绵蛋糕面糊及其烘焙特性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 28–33, 151.
- ZOU QB, WANG JB, CHEN C, *et al.* Effect of different emulsifiers and bubble-retaining type liquid shortening on batter and baking characteristics of sponge cake [J]. Food Mach, 2019, 35(11): 28–33, 151.
- [32] 张成志. 青稞全粉发糕的制备及其品质评价的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- ZHANG CZ. Research on preparation and quality evaluation of highland barley steamed sponge cake [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- (责任编辑: 张晓寒 郑 丽)

作者简介



范洪臣, 博士, 讲师, 主要研究方向为传统食品发酵。
E-mail: fanhongchen@hrbcu.edu.cn