

乳酸菌发酵对混合米粉理化特性及年糕品质的影响

王登宇^{1,2}, 孔垂琴^{1,2}, 王冰^{1,2}, 刘琳琳^{1,2}, 石彦国^{1,2}, 范洪臣^{1,2*}

(¹ 哈尔滨商业大学食品工程学院 哈尔滨 150076

² 黑龙江省谷物食品与资源综合加工重点实验室 哈尔滨 150076)

摘要 以嗜酸乳杆菌(HSP001)、清酒乳杆菌(HSP002)及复配菌株为发酵剂制备发酵混合米粉,分析乳酸菌发酵对混合米粉理化特性及年糕品质的影响。结果表明:乳酸菌发酵能显著提高混合米粉的持水性。糊化特性研究表明,清酒乳杆菌发酵的混合米粉的谷值黏度(TV)最高(1 295 cP),衰减值(BDV)最小(394 cP),最终黏度(FV)最大(1 295 cP),增强了凝胶产品的稳定性。流变特性研究表明,嗜酸乳杆菌发酵的混合米面团的储能模量(G')和损耗模量(G'')最高,损耗正切值($\tan \delta$)最小,弹性增强趋势明显。质构特性和蒸煮损失研究表明,以嗜酸乳杆菌发酵的混合米粉制备的年糕,其硬度及咀嚼性最低,凝聚性最好,蒸煮损失最少。感官评定结果显示:复配乳酸菌发酵制备的年糕呈现良好的感官品质。GC-MS 分析表明:相较于单一菌株,复配乳酸菌发酵制备的年糕,醛类和酯类化合物的种类及含量有所增加,产品具有特有的发酵香味。研究结果为传统米制发酵食品研究与生产提供借鉴。

关键词 乳酸菌发酵;混合米粉;年糕;糊化特性;质构特性

文章编号 1009-7848(2023)03-0229-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.03.024

发酵是保存和生产食品最古老的方法之一,传统发酵食品中拥有大量的微生物类群,其中乳酸菌是最主要的天然菌群和益生菌发酵剂^[1]。在谷物食品发酵过程中,乳酸菌使谷物中的蛋白质、碳水化合物、多糖和微量元素等物质发生一系列的生物化学变化,能够改良谷物粉质的理化特性、加工性能,同时还会影响发酵谷物食品的风味、质构、货架期和营养品质^[2-4]。这些变化与发酵过程中乳酸菌的代谢产物有关,包括有机酸、酶、胞外多糖以及二氧化碳等物质^[5-8]。

近些年,乳酸菌应用于谷物食品的发酵获得广泛关注。Thiele 等^[9]研究发现,乳酸菌在酸面团发酵过程中产生的有机酸会导致面团体系 pH 值下降,激活/抑制发酵基质内源酶(蛋白酶、淀粉酶等)的活性,从而影响谷物的组分和结构。大多数乳酸菌具有产胞外多糖的能力。部分研究表明:乳酸菌同多糖可有效提高产品品质,而乳酸菌杂多糖产量极低,通常不会对产品品质有显著的改善作用^[10]。Abedfar 等^[11]研究发现,产多糖乳酸菌 NR_104573.1 的应用使酸面团的微观呈现良好的

三维网状结构,制备的面包弹性和咀嚼性都明显好于参照组。在 Spirli 等^[3]的研究中,罗伊氏乳杆菌 E81 产生的胞外多糖使酸面团获得了更高的弹性。目前许多研究表明:采用植物乳杆菌对谷物进行强化发酵,能够显著改善谷物发酵制品的品质,如用植物乳杆菌 LB-1 发酵的酸面团表现出更好的黏弹性、延伸性和持水性,并且能够富集香气挥发性化合物^[12]。植物乳杆菌发酵也能改善米粉风味特性,同时保证米粉的质构和蒸煮品质^[13]。另外,Mantzourani 等^[14]利用副干酪乳杆菌 K5 制备酸面团,其中芳香化合物明显增多,品质良好,货架期相应延长。乳酸菌通常被认为是一种安全的微生物,一些乳酸菌产生的抗菌物质被用于食品防腐,如细菌素、有机酸和 H₂O₂ 等^[15-16],尤其细菌素对各种食源性腐败菌和致病菌具有较强的抑菌活性^[17],能显著提高发酵谷物食品的安全性和质量^[18-19],延长产品保质期,实现生物防腐。

本研究将质地硬而有韧性的粳米与香糯黏滑的糯米混合,开发米制食品。选取 40%糯米-60%粳米为原料,以糯玉米发酵液中筛选到的产酸性能优良的嗜酸乳杆菌 (*Lactobacillus acidophilus* HSP001),产酚类及羧酸类等风味物质突出的清酒乳杆菌 (*Lactobacillus sakei* HSP002)及其复配菌作为发酵剂,研究乳酸菌发酵对混合米粉的持

收稿日期:2022-03-09

基金项目:黑龙江省科技重大专项(2020ZX08B02)

第一作者:王登宇,女,博士生,讲师

通信作者:范洪臣 E-mail: fanhongchen@hrbcu.edu.cn

水性、糊化特性、动态流变学特性的影响,并探究发酵混合米粉制备的年糕的质构特性、蒸煮特性、感官性质及挥发性成分,以期为米制发酵食品的品质改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

粳米、糯米,哈尔滨天一生态农副产品有限公司;MRS 培养基,北京奥博星生物技术有限责任公司;嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus* HSP001)、清酒乳杆菌(*Lactobacillus sakei* HSP002),均为本实验室研究人员从糯玉米发酵液中筛选获得。

分析天平(AE523),上海舜宇恒平科学仪器有限公司;质构仪(TA.XTC-18),上海保圣实业发展有限公司;流变仪(H-PTD200),奥地利 Anton Paar 公司;RVA 快速粘度仪(TecMaster),瑞典波通公司;超净工作台(DL-CJ-INDII),北京东联哈尔仪器制造有限公司;恒温培养箱(DHP-9162B),上海恒科学仪器有限公司;离心机(TG16-WS),上海卢湘仪离心机仪器有限公司;恒温水浴锅(DK-8D),上海精宏实验设备有限公司;-80℃超低温冰箱(DW-HL528),中科美菱有限公司;冷冻干燥机(LGJ-10C),北京四环启航科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 菌株活化 将-80℃保藏的嗜酸乳杆菌、清酒乳杆菌用划线的方法活化。挑取单菌落于 5 mL MRS 液体培养基中培养过夜。将 2 株乳酸菌以 1%的接种量接入 MRS 液体培养基中,30℃恒温密闭培养 18 h,待用。

1.2.2 发酵混合米粉的制备 将糯米、粳米、水按质量比 2:3:10 混合,乳酸菌接种量为 2×10^8 CFU/g,混合米分组及发酵菌株配比参照表 1。所有混合米样品密封放入 22℃培养箱中发酵 7 d,米粒洗净去除酸液,加水匀浆 2 min,4 000 r/min 离心 10 min,取出沉淀物平铺在培养皿中,置于-80℃超低温冰箱预冻 24 h,取出,放入真空冷冻干燥机中 24 h,将冷冻干燥的各样品放入粉碎机中磨成均匀粉末,过 60 目筛,备用。由混合米 R1~R6 制备的混合米粉被称为米粉样品 F1~F6。

1.2.3 发酵混合米粉的持水力测定^[20] 准确称取各米粉样品 2.00 g,加 10 mL 蒸馏水混匀,4 000 r/

表 1 发酵混合米样品分组及发酵菌株配比

Table 1 Sample grouping of fermented mixed rice and proportion of fermented strains

样品编号	菌株配比	
	嗜酸乳杆菌	清酒乳杆菌
	HSP001/%	HSP002/%
混合米 R1	100	0
混合米 R2	0	100
混合米 R3	50	50
混合米 R4	33.3	66.7
混合米 R5	66.7	33.3
对照样品(混合米 R6)	0	0

min 离心 15 min,倒掉上清液,记录其质量。每 g 样品持水力计算公式:

持水力(g/g)=(10-上清液质量)/样品质量 (1)

1.2.4 发酵混合米粉的糊化特性测定^[21] 采用快速黏度分析仪测定。米粉样品水分基准为 14%,由软件计算样品量和水分添加量,将样品和水置于专用铝制测量筒内,用搅拌桨上、下搅拌以完全分散样品,随后放入仪器中测定。测试程序:50℃保持 1 min,然后以 12℃/min 的速率升温至 95℃(3.75 min),95℃保持 2.5 min,再以 12℃/min 的速率降温至 50℃(3.75 min),50℃保持 1 min。总耗时约 13 min,测定过程中搅拌器 960 r/min 保持 10 s,其余时间均保持在 160 r/min。

1.2.5 发酵混合米面团的动态流变学特性测定^[22] 将各米粉样品与水按质量比 6:5 的比例混合,揉滚成团后静置 30 min,由米粉样品 F1~F6 制备的米面团被称为米面团样品 D1~D6。采用流变仪测定各样品动态流变特性。测试转子用 PP50,平板直径 50 mm,应变振幅 0.05%,温度 25℃,平板间隙 1 mm,角频率 0~126 s⁻¹。测试得样品的储能模量 G' 、损耗模量 G'' ,并计算损耗正切值($\tan \delta = G''/G'$)。

1.2.6 年糕的制作 将各米粉样品与水按质量比 6:5 的比例混合,揉滚成型,放入蒸锅蒸 20 min,冷却后作为年糕质构特性、感官评价、蒸煮损失和挥发性成分测定的待测样品。由米粉样品 F1~F6 制备的年糕被称为年糕样品 RC1~RC6。

1.2.7 年糕的质构特性测定^[23] 采用全质构

(TPA)分析,将蒸好的年糕放入物性测定仪中测定。物性仪的探头选用 TA/0.5 凝胶探头,测试类型为下压,目标模式为形变,目标值 30%,时间 3.00 s,测试前速度 3.00 m/s,测试速度 1.00 m/s,测试后速度 1.00 m/s,触发点类型为力,触发点力为 5.00 gf。

1.2.8 年糕的蒸煮特性测定^[24] 将 5 g 年糕样品放入装有 100 mL 蒸馏水的烧杯中沸水浴煮制 10 min。煮制后将内容物转移到滤纸上除去表面水

分,然后将煮熟的年糕样品精确称重,计算样品的吸水率。除去年糕样品的固体试样,将溶液转移至铝盒中,在 105 ℃烘箱中蒸发水分直至完全干燥,称量干燥的固体,计算蒸煮损失。

1.2.9 年糕的感官评价 年糕的感官评价由 10 名经过培训的人员组成,其中包括 5 名男性和 5 名女性。感官评价人员对年糕的气味、滋味、口感、外观进行综合评价,评价标准见表 2。

表 2 年糕感官评价标准
Table 2 Criteria for sensory analysis of rice cakes

评价指标	项目评分标准	评分
气味(25 分)	米香味、发酵特有香味	20~25
	米香味淡、无发酵特有香味	15~19
	无发酵特有香味、异味突出	≤14
滋味(25 分)	滋味好、酸度适中、有回味	20~25
	滋味淡、无回味	15~19
	有异味、酸度异常	≤14
口感(25 分)	细腻柔韧、硬度良好、黏度良好、弹性良好、不粘牙	20~25
	略粗糙、硬度适中、黏度适中、弹性适中、稍粘牙	15~19
	粗糙、硬度差、黏度差、弹性差、粘牙	≤14
外观(25 分)	有光泽、颜色自然、外形完整饱满	20~25
	光泽不足、颜色较自然、稍有外鼓或塌陷	15~19
	光泽差、颜色深或浅、外鼓或塌陷	≤14

1.2.10 年糕的挥发性成分测定^[25] 称取适量年糕样品置于顶空瓶中,加 3 mL 饱和 NaCl 溶液密封,于 80 ℃下平衡 30 min,用固相微萃取针萃取 30 min,待萃取结束后,萃取针在进样口解吸 5 min。色谱柱:HP-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm);分流比:不分流;载气流速:1.0 mL/min;进样口温度:240 ℃;扫描方式:Full Scan;离子源温度:230 ℃;四级杆温度:180 ℃;升温程序:起始温度 45 ℃,保持 4 min,以 6 ℃/min 的速率升至 130 ℃,再以 10 ℃/min 的速率升至 240 ℃,保持 8 min。采集到的质谱图利用 NIST 谱库进行检索,鉴定样品中的挥发性成分,并利用面积归一化法分析各成分的相对含量。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS Statistics 26 进行数据处理与分析,Origin 2017 进行相关图

形的绘制。

2 结果与分析

2.1 乳酸菌发酵对混合米粉理化特性的影响

2.1.1 发酵混合米粉持水力分析 由图 1 可知,乳酸菌发酵的各米粉样品持水性均高于对照米粉样品(F6),并且存在显著性差异。其中,复配乳酸菌发酵的样品 F3、F4、F5 的持水性差异不显著,它们的持水性显著高于样品 F1 和 F2。由此可知,在提高混合米粉持水性方面,复配乳酸菌发酵比单一菌株发酵更有优势。持水力受混合米粉粒径、淀粉、蛋白、脂肪、脂质-淀粉复合物等多重因素影响。本研究中乳酸菌发酵使混合米粉具有更好的持水性,因此在利用发酵混合米粉制作面团时不用担心搁置时间延长而导致面团失水、开裂等品质下降的问题。

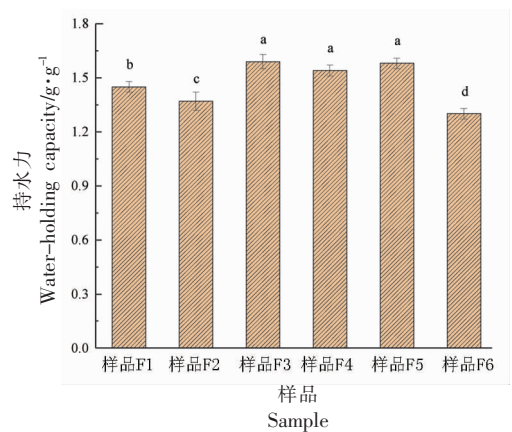


图1 乳酸菌发酵对混合米粉持水力的影响
Fig.1 Effects of lactic acid bacteria fermentation on the water-holding capacity of mixed rice flour

2.1.2 发酵混合米粉的糊化特性分析 原料糊化特性不仅影响其蒸煮前、后的性质,还与谷物食品老化动力学高度相关^[26]。研究结果见表3,对照米粉样品(F6)的峰值黏度(Peak Viscosity,PV)明显高于乳酸菌发酵的其它米粉样品,存在显著性差异。峰值黏度反映淀粉糊化过程中淀粉颗粒的膨胀程度,膨胀程度越大,对应的峰值黏度越高,它与支链淀粉的含量、淀粉颗粒大小有关^[27]。此结果说明乳酸菌发酵过程中产生的酸和酶等物质使淀粉水解,影响直链淀粉、支链淀粉等物质的组成及含量,导致淀粉膨胀程度下降,PV发生显著变化。当试样达到峰值黏度后,淀粉颗粒开始破裂,黏度

降到最小值即谷值黏度(Trough Viscosity,TV)^[28]。所有发酵米粉样品的TV均高于样品F6,除样品F1外,样品F2、F3、F4、F5与F6存在显著性差异,其中样品F2的TV最高。衰减值(Breakdown value,BDV)反映淀粉糊在高温条件下的耐剪切能力以及淀粉热糊的稳定性^[21,29]。发酵样品F1~F5的BDV明显低于样品F6,其值越小,加热过程中糊的稳定性和耐剪切性越强,其在热和机械作用下越稳定,其中样品F2的BDV最小,说明糊化后的样品F2最稳定。测试结束时的试样黏度为最终黏度(Final Viscosity,FV),它对产品的黏性起关键作用。除样品F1外,其它发酵样品的FV均比样品F6高,其中样品F2和F5的最终黏度与样品F6存在显著性差异,并且样品F2的FV最大。最终黏度与谷值黏度之间的差为回生值(Setback value,SBV),反映淀粉的回生程度^[30]。其中,样品F4的SBV最低,所有发酵米粉样品与样品F6的SBV无显著差异,表明乳酸菌发酵在抗老化方面的效果并不理想。糊化温度(Pasting Temperature)是淀粉糊化后导致颗粒膨胀而破裂的最低温度,反映样品的糊化难易程度^[31]。各发酵米粉样品的糊化温度与样品F6差异不显著。各发酵米粉样品达到峰值的时间(Peak Time)明显短于对照样品,且样品F1~F4之间差异不显著,峰值时间越长,样品在加热过程中吸水膨胀,形成凝胶的时间越长,因此乳酸菌发酵样品较易糊化。

表3 乳酸菌发酵对混合米粉糊化特性的影响
Table 3 Effects of lactic acid bacteria fermentation on the pasting properties of mixed rice flour

样品编号	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	衰减值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	峰值时间/min	糊化温度/℃
样品 F1	1 794.67 ± 29.28 ^c	1 212.00 ± 16.70 ^{cd}	566.00 ± 38.30 ^c	1 735.67 ± 51.08 ^c	523.67 ± 34.50 ^a	3.78 ± 0.04 ^c	68.22 ± 0.41 ^a
样品 F2	1 689.33 ± 6.80 ^c	1 295.33 ± 11.02 ^a	394.00 ± 11.27 ^c	1 827.00 ± 13.08 ^a	531.67 ± 5.86 ^a	3.80 ± 0.00 ^c	68.55 ± 0.00 ^a
样品 F3	1 801.67 ± 8.33 ^c	1 243.33 ± 12.22 ^{bc}	558.33 ± 10.07 ^c	1 781.00 ± 10.15 ^{abc}	537.67 ± 2.08 ^a	3.80 ± 0.00 ^c	68.52 ± 0.03 ^a
样品 F4	1 739.00 ± 18.19 ^d	1 264.67 ± 16.01 ^{ab}	474.33 ± 33.00 ^d	1 773.00 ± 17.00 ^{bc}	508.33 ± 33.00 ^a	3.75 ± 0.04 ^c	68.45 ± 0.00 ^a
样品 F5	1 945.67 ± 27.74 ^b	1 256.67 ± 30.35 ^b	689.00 ± 3.46 ^b	1 812.00 ± 23.43 ^{ab}	555.33 ± 10.69 ^a	3.87 ± 0.00 ^b	68.80 ± 0.52 ^a
样品 F6	2 039.00 ± 17.00 ^a	1 206.33 ± 14.74 ^d	832.67 ± 29.67 ^a	1 742.33 ± 5.69 ^c	536.00 ± 19.97 ^a	4.89 ± 0.03 ^a	68.3 ± 0.48 ^a

注:同列不同小写字母表明样品差异显著(P<0.05)。

2.2 乳酸菌发酵对混合米面团动态流变特性的影响

图2、3所示,所有米面团样品的 G' 大于 G'' , 表明米面团样品中弹性贡献大。乳酸菌发酵的米面团样品 G' 和 G'' 均显著高于对照米面团样品(D6),且样品D1的 G' 和 G'' 均达到最大值。图4所示,经乳酸菌发酵的米面团样品 $\tan \delta$ 值均低于对照组,说明发酵使混合米面团更偏向形成凝胶结构,获得更好的弹性。 $\tan \delta$ 值越小,米面团刚性越强,其中样品D1的刚性最强; $\tan \delta$ 值的减小并不一定意味着米面团变硬,它可能仅意味着米面团变得足够坚韧,可以抵抗外力的破坏。其原因可能是乳酸菌发酵过程中产生的代谢产物酶及有机酸作用于发酵底物,使混合米中直链淀粉聚合度下降,支链淀粉分支密度降低,对淀粉凝胶的形成更有利^[32]。另外,乳酸菌代谢可能产生大量的胞外多糖,对米面团的黏弹性有改善作用^[33]。

2.3 乳酸菌发酵对年糕品质的影响

2.3.1 年糕质构特性及感官评价分析 年糕样品的TPA试验结果见表4。与对照年糕样品(RC6)相比,通过乳酸菌发酵工艺显著降低了年糕样品的硬度,样品RC6的硬度最大,样品RC5、RC4、RC2、RC3、RC1的硬度依次减小,其中样品RC2和RC4差异不显著,样品RC1和RC3也差异不显著。在咀嚼性方面,样品RC6的咀嚼性最大,样品RC5、RC4、RC2、RC1、RC3的咀嚼性依次降低,样品RC6与RC5之间无显著差异,而与其它样品间有显著差异。在凝聚性方面,样品RC1的凝聚性最强,与样品RC6存在显著性差异,而与其它年糕样品差异不显著。另外,所有年糕样品的弹性和回复性差异不显著。感官评分中,样品RC6的分值最低,发酵米粉样品制备的年糕在气味、滋味、口感、外观方面均有显著改善。综合来看样品RC4有劲道感,并且口感更加适口,风味更加柔和,获得最高的感官评分。研究表明,乳酸菌发酵能显著降低年糕产品的硬度和咀嚼性,提高产品的凝聚性,产品的感官品质得以改善。

2.3.2 年糕的蒸煮特性分析 吸水率、蒸煮损失率是评价年糕蒸煮品质的重要指标。蒸煮品质较好的年糕应具有较高的吸水率和较低的蒸煮损失率。乳酸菌发酵的年糕蒸煮特性如图5所示,乳酸

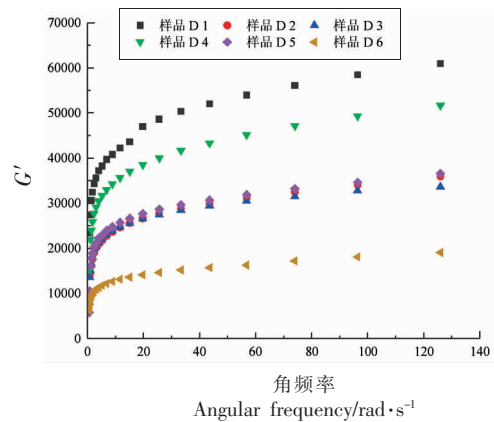


图2 发酵混合米面团的储能模量 G'

Fig.2 The G' of fermented mixed rice dough

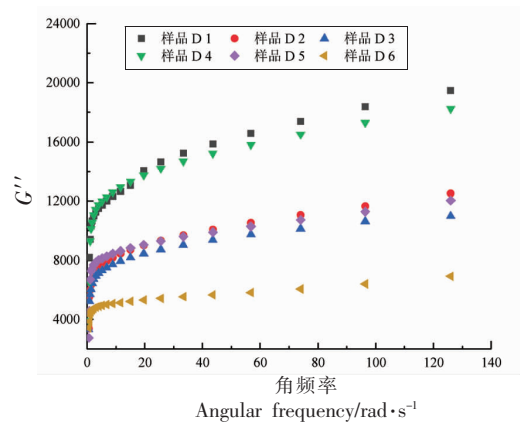


图3 发酵混合米面团的损耗模量 G''

Fig.3 The G'' of fermented mixed rice dough

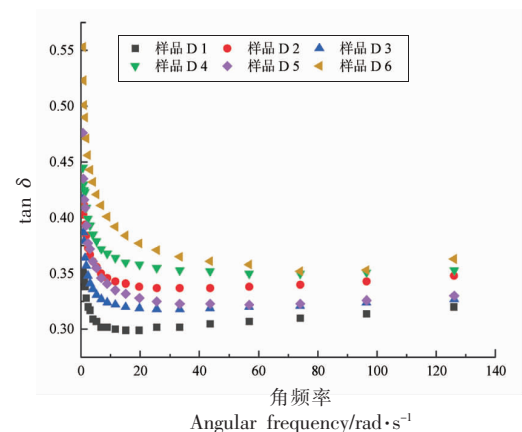


图4 发酵混合米面团的 $\tan \delta$

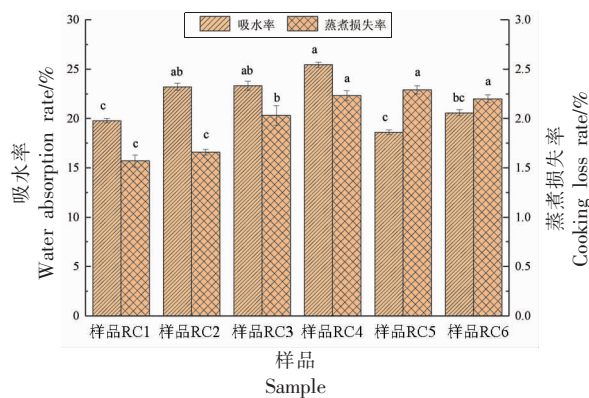
Fig.4 The $\tan \delta$ of fermented mixed rice dough

菌发酵的年糕样品中RC2、RC3、RC4的吸水率接近,它们与RC6存在显著性差异,其中RC4吸水率最高,达25.44%;而RC1、RC5与RC6的吸水率

表 4 乳酸菌发酵对年糕质构和感官品质的影响

样品编号	质构特性					感官评分
	硬度/gf	弹性	咀嚼性/gf	凝聚性	回复性	
样品 RC1	391.52 ± 5.65 ^d	0.88 ± 0.01 ^a	285.84 ± 4.28 ^{cd}	0.83 ± 0.01 ^a	0.50 ± 0.01 ^a	79.8 ± 1.03 ^c
样品 RC2	419.66 ± 9.55 ^c	0.88 ± 0.01 ^a	292.94 ± 10.80 ^c	0.79 ± 0.02 ^{ab}	0.49 ± 0.02 ^a	82.2 ± 0.79 ^b
样品 RC3	394.23 ± 7.56 ^d	0.86 ± 0.01 ^a	272.44 ± 5.91 ^d	0.80 ± 0.01 ^{ab}	0.51 ± 0.01 ^a	78.2 ± 1.40 ^d
样品 RC4	429.45 ± 9.89 ^c	0.88 ± 0.01 ^a	301.11 ± 15.16 ^{bc}	0.80 ± 0.03 ^{ab}	0.49 ± 0.02 ^a	86.9 ± 0.99 ^a
样品 RC5	456.55 ± 12.95 ^b	0.88 ± 0.03 ^a	318.92 ± 12.62 ^{ab}	0.80 ± 0.01 ^{ab}	0.50 ± 0.04 ^a	82.7 ± 0.82 ^b
样品 RC6	479.87 ± 9.14 ^a	0.87 ± 0.01 ^a	330.64 ± 8.51 ^a	0.79 ± 0.01 ^b	0.50 ± 0.01 ^a	75.4 ± 0.84 ^e

注:同列不同小写字母表明样品差异显著(P<0.05)。



注:不同柱状图案中不同小写字母表明样品差异显著(P<0.05)。

图 5 乳酸菌发酵对年糕蒸煮特性的影响
Fig.5 Effects of lactic acid bacteria fermentation the cooking characteristics of rice cakes

接近。蒸煮过程中样品吸水多,可以使其弹性和爽滑性有所提高。乳酸菌发酵制备的年糕样品的蒸煮损失率在 1.57%~2.29%之间,其中样品 RC5 的蒸煮损失率最大,RC1 的蒸煮损失率最小,并且样品 RC6 与 RC4、RC5 无显著性差异,与 RC1、RC2、RC3 存在显著性差异。由此可知,乳酸菌发酵能提高年糕样品的吸水性,减少年糕样品的蒸煮损失,提高了产品的食用品质,其原因可能是乳酸菌发酵有利于米粉形成更致密的凝胶网络,在年糕蒸煮过程中减少固形物的溶出^[34]。

2.3.3 年糕的挥发性成分分析 研究发现年糕样品 RC1 的黏弹性好,RC2 的凝胶稳定性高,RC4 的感官品质和质构特性较为理想。采用 GC-MS 方法测定样品 RC1、RC2 及 RC4 的挥发性成分。由表 5 可知,从 3 个年糕样品中共测得 63 余种挥发性风味物质,主要包括 12 种醛类、11 种羧酸类、

10 种醇类、8 种烃类、6 种酯类、6 种胺类、3 种酰胺类及其它化合物。由表 6 可知,所有测试的年糕样品中的醛类物质和羧酸类物质不仅种类数量多,相对含量也较高。相较于样品 RC1 和 RC2,样品 RC4 中烃类物质种类减少,醇类物质和酯类物质的种类有所增加,并且酯类相对含量大幅增加。酯类具有各种果实香味^[35],因此乳酸菌发酵会赋予产品特有的发酵香气。

3 个年糕样品的挥发性风味物质的相对含量和种类各不相同,只有 5 种成分同时出现在 3 个年糕样品中。醛类中的戊醛具有特殊香味,己醛具有类似于甘草的清香风味和苹果味,苯甲醛具有特殊的杏仁气味。样品 RC4 中这 3 个物质含量均比单一菌株发酵的含量高,说明乳酸菌混合发酵可以促进这 3 种物质的生成。羧酸类物质醋酸作为一种酸味剂,含量过高会产生刺激性气味并影响食品的感官品质,含量适当则会产生爽口感。本研究中混合发酵制备的样品 RC4 中,醋酸相对含量明显低于样品 RC1,而比样品 RC2 高,乳酸菌的复配发酵在某种程度上缓解了该物质含量过高或过低给年糕样品带来的不愉快感受。亚油酸是人体不能合成的必需脂肪酸,该物质在人体内的代谢物是大脑的重要营养要素,对心脑血管疾病有很好的防治作用。其在样品 RC2 中的含量最高,样品 RC4 中含量次之,样品 RC1 中含量最低。以上结果表明:清酒乳杆菌和嗜酸乳杆菌共发酵对两类羧酸类物质的产生未起到协同增效作用,可能是发酵过程中这两种乳酸菌的代谢途径彼此干扰,机理有待研究。

表 5 年糕挥发性风味化合物的比较
Table 5 Comparison of volatile flavor compounds of rice cakes

类别	挥发性风味化合物名称	挥发性风味化合物含量/%		
		样品 RC1	样品 RC2	样品 RC4
醛类	乙醛	0.89	—	1.31
	正戊醛	1.31	0.5	1.67
	正己醛	12.39	6.21	15.62
	苯甲醛	1.38	2.01	2.48
	2,4-壬二烯醛	5.16	—	—
	庚醛	—	1.32	1.58
	正辛醛	—	1.35	—
	苯乙醛	—	0.72	—
	反-2-辛烯醛	—	1.87	—
	壬醛	—	7	—
	十二醛	—	0.44	1.48
	桃醛	—	3.34	—
醇类	1-戊醇	1.07	—	—
	3-氨基-1-丙醇	1.27	—	—
	2-甲基环己醇	5.35	—	—
	3-甲基-1,5-戊二醇	2.03	—	—
	正己醇	—	2.27	—
	(S)-(+)-5-甲基-1-己醇	—	1.57	—
	乙醇	—	—	0.69
	1-壬醇	—	—	0.75
	反式-2-壬烯-1-醇	—	—	3.55
	2-羟基-5-甲基间苯二甲醇	—	—	0.7
烃类	1,2,2-三氯-1,1-二氟乙烷	1.25	—	—
	3-甲基-1-戊烯	1.4	—	—
	3,5,5-三甲基-1-己烯	1.29	—	—
	1,1-二甲基环戊烷	0.88	—	—
	1-辛烯	—	0.37	—
	3-甲基-1-戊烯	—	0.73	—
	1-戊烯	—	—	0.79
	丙烷	—	—	0.77
酯类	丁基异硫氰酸酯	0.64	—	—
	α-无水葡萄糖酯	—	0.48	—
	棕榈酸乙酯	—	0.6	—
	氯甲酸正己酯	—	—	8
	丙位壬内酯	—	—	5.49
	异丁酸丁酯	—	—	2.56
胺类	乙胺	0.76	—	—
	N-甲基烯丙基胺	1.17	—	—
	二烯丙基胺	1.9	—	—
	正己胺	—	0.51	—
	N-甲酰乙胺	—	—	1.13
	N-甲基苄胺	—	—	0.62
酰胺类	氟乙酰胺	—	—	0.6
	丙酰胺	1.09	—	—
	N,N-二甲基甲酰胺	1.46	—	—
羧酸类	醋酸	13.21	3.13	7.86
	2-氨基-5-甲基苯甲酸	0.75	—	—
	正戊酸	5.27	—	—

(续表 5)

类别	挥发性风味化合物名称	挥发性风味化合物含量/%		
		样品 RC1	样品 RC2	样品 RC4
其它	吡咯-2-羧酸	0.73	—	—
	肉豆蔻酸	9.19	2.47	—
	亚油酸	7.81	12.95	7.94
	己酸	—	4.67	6.1
	胍基乙酸	—	0.6	—
	辛酸	—	3.23	3.13
	壬酸	—	1.08	—
	棕榈酸	—	20.77	9.27
	2,5-二甲基吡嗪	0.95	—	—
	麦芽糖	2.9	—	—
	丁烯酮	0.97	—	—
	2-氟苯基乙腈	1.83	—	—
	2-乙氧基吡啶	—	0.83	—
	蜜二糖	—	0.45	—
	1,3-二氢异苯并呋喃	—	—	1.28

注:—:样品中未发现。

表 6 年糕挥发性风味化合物的种类及含量的变化

Table 6 Changes in types and contents of volatile flavor compounds of rice cakes

样品编号	酚类		羧酸类		醇类		酯类		烃类	
	种类	含量/%	种类	含量/%	种类	含量/%	种类	含量/%	种类	含量/%
样品 RC1	5	21.13	6	36.96	4	9.72	1	0.64	4	4.82
样品 RC2	10	24.76	8	48.9	2	3.84	2	1.08	2	1.1
样品 RC4	6	24.14	5	34.3	4	5.69	3	16.05	2	1.56

3 结论

采用快速黏度仪、流变仪、质构仪、固相微萃取-气相色谱-质谱联用仪测定乳酸菌发酵制备的的混合米粉、米面团及年糕的糊化特性、流变特性、质构特性及挥发性物质。与对照米粉样品相比,清酒乳杆菌发酵的混合米粉更易形成凝胶,且稳定性更高;嗜酸乳杆菌发酵的米面团弹性更好,用其制备的年糕硬度和咀嚼性显著降低,凝聚性增强,蒸煮损失率减小。挥发性成分中,复配乳酸菌发酵制备的年糕,具有果香和油脂香气的醛类及酯类的种类和数量有所增加,提高了年糕的整体风味。下步将对乳酸菌代谢途径展开研究。

参 考 文 献

[1] MOKOENA M P, MUTANDA T, OLANIRAN A O. Perspectives on the probiotic potential of lactic acid bacteria from African traditional fermented foods and

beverages[J]. Food & Nutrition Research, 2016, 60 (1): 29630.
[2] CENNET P B G, RAIMONDO G, ELENA F, et al. Molecular analysis of the dominant lactic acid bacteria of chickpea liquid starters and doughs and propagation of chickpea sourdoughs with selected *Weissella confusa*[J]. Food Microbiology, 2020, 91: 103490.
[3] SPIRLI H, ZMEN D, YILMAZ M T, et al. Impact of glucan type exopolysaccharide (EPS) production on technological characteristics of sourdough bread[J]. Food Control, 2020, 107: 106812.
[4] AHMED H I, RANSOM J E, SADIQ S, et al. Structural characterisation of two medium molecular mass exopolysaccharides produced by the bacterium *Lactobacillus fermentum* Lf2 [J]. Carbohydrate Research, 2020, 488: 107909.
[5] GOBBETTI M, RIZZELLO C G, DI C R, et al. How the sourdough may affect the functional features of leavened baked goods[J]. Food Microbiology, 2014,

- 37: 30–40.
- [6] GÄNZLE M G. Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation[J]. Food Microbiology, 2014, 37: 2–10.
- [7] GÄNZLE M G, LOPONEN J, GOBBETTI M. Proteolysis in sourdough fermentations: mechanisms and potential for improved bread quality [J]. Trends in Food Science and Technology, 2008, 19(10): 513–521.
- [8] GAUCHEZ H, LOISEAU A L, SCHLICH P, et al. Impact of aging on the overall liking and sensory characteristics of sourdough breads and comparison of two methods to determine their sensory shelf life [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(10): 3517–3526.
- [9] THIELE C, GRASSL S, GÄNZLE M. Gluten hydrolysis and depolymerization during sourdough fermentation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52: 1307–1314.
- [10] GALLE S, SCHWAB C, ARENDTE, et al. Exopolysaccharide-forming *Weissella* strains as starter cultures for sorghum and wheat sourdoughs[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(9): 5834–5841.
- [11] ABEDFAR A, HOSSEININEZHAD M, CORSETTI A. Effect of wheat bran sourdough with exopolysaccharide producing *Lactobacillus plantarum* (NR_104573.1) on quality of pan bread during shelf life [J]. LWT, 2019, 111: 158–166.
- [12] SUN L, LI X, ZHANG Y, et al. A novel lactic acid bacterium for improving the quality and shelf life of whole wheat bread [J]. Food Control, 2020, 109: 106914.
- [13] GENG D H, LIU L, ZHOU S M, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* inoculum on the fermentation rate and rice noodle quality[J]. Journal of Oleo Science, 2020, 69(9): 1031–1041.
- [14] MANTZOURANI I, PLESSAS S, ODATZIDOU M, et al. Effect of a novel *Lactobacillus paracasei* starter on sourdough bread quality[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 259–265.
- [15] LAA B, NCB C, QB B, et al. Expression of the hybrid bacteriocin Ent35–MecV in *Lactococcus lactis* and its use for controlling *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* in milk[J]. Int Dairy J, 2020, 104: 104650.
- [16] SILVA C, SILVA S, RIBEIRO S C. Application of bacteriocins and protective cultures in dairy food preservation[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 594.
- [17] MORAANIN S M V, DUKI D A, MEMI N R. Bacteriocins produced by lactic acid bacteria: A review[J]. Acta Periodica Technologica, 2012, 45(45): 271–283.
- [18] ANKAIAH D, PALANICHAMY E, ANTONYRAJ C B, et al. Cloning, overexpression, purification of bacteriocin enterocin–B and structural analysis, interaction determination of enterocin–A, B against pathogenic bacteria and human cancer cells[J]. Int J Biol Macromol, 2018, 116: 502–512.
- [19] PAUL M M. Lactic acid bacteria and their bacteriocins: classification, biosynthesis and applications against uropathogens: a mini-review[J]. Molecules, 2017, 22(8): 1255.
- [20] 秦洋. 乳酸菌发酵改良玉米粉加工性能化理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- QIN Y. Improvement on corn flour's applicability by lactic acid bacteria fermentation: a mechanism study [D]. Shengyang: Shenyang agricultural university, 2017.
- [21] CORNEJO F, ROSELL C M. Physicochemical properties of long rice grain varieties in relation to gluten free bread quality[J]. LWT–Food Science and Technology, 2015, 62(2): 1203–1210.
- [22] 罗其琪, 顾丰颖, 曹晶晶, 等. 鼠李糖乳杆菌发酵对玉米粉、玉米面团理化特性及发糕品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(18): 1–7.
- LUO Q Q, GU F Y, CAO J J, et al. Effects of *Lactobacillus rhamnosus* fermentation on the physicochemical properties of corn flour and corn dough and the quality of steamed sponge cake [J]. Food Science, 2018, 18(39): 1–7.
- [23] 代任任, 李文钊, 刘亚平. 等. 羟丙基木薯淀粉对糯米混粉特性及年糕品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 4(36): 59–64.
- DAI R R, LI W Z, LIU Y P, et al. Effect of hydroxypropyl tapioca starch on glutinous rice flour blending characteristics and rice cake quality [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 4(36): 59–64.
- [24] 杨晨希, 花旺忠, 余丽琴, 等. 弋阳年糕加工过程品质及体外消化特性变化[J]. 南昌大学学报 (理科

- 版), 2021, 3(45): 238–245.
- YANG C X, HUA W Z, YU L Q. Research on processing quality and *in vitro* digestibility of Yiyang rice cake[J]. Journal of Nanchang University(Natural Science), 2021, 3(45): 238–245.
- [25] 王立峰, 厉珺, 徐斐然, 等. 副干酪乳杆菌对小麦发酵面团流变特性与风味的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 225–233.
- WANG L F, LI J, XU F R, et al. Effects of *Lactobacillus paracasei* on rheological properties and flavor of wheat fermented dough[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(7): 225–233.
- [26] THIRUMDAS R, DESHMUKH R R, ANNAPURE U S. Effect of low temperature plasma on the functional properties of basmati rice flour[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(6): 2742–2751.
- [27] SINGH N, KAUR M, SANDHU K S, et al. Physicochemical, thermal, morphological and pasting properties of starches from some Indian black gram (*Phaseolus mungo* L.) cultivars [J]. Starch –Stärke, 2004, 56(11): 535–544.
- [28] PALABIYIK I, YILDIZ O, TOKER OS, et al. Investigating the addition of enzymes in gluten-free flours–The effect on pasting and textural properties [J]. LWT – Food Science and Technology, 2016, 69: 633–641.
- [29] GANI A, WANI S M, MASOODI F A, et al. Characterization of rice starches extracted from Indian cultivars[J]. Food Science & Technology International, 2013, 19(2): 143–152.
- [30] KAUSHAL P, KUMAR V, SHARMA HK. Comparative study of physicochemical, functional, antinutritional and pasting properties of taro (*Colocasia esculenta*), rice (*Oryza sativa*) flour, pigeon-pea (*Cajanus cajan*) flour and their blends[J]. LWT–Food Science and Technology, 2012, 48(1): 59–68.
- [31] MILLICENT Y A, LUTTERODT H E, EMMANUEL K, et al. Effect of bambara groundnut supplementation on the physicochemical properties of rice flour and crackers[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(9): 3556–3563.
- [32] 袁美兰. 乳酸发酵改善玉米淀粉凝胶质地的机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- YU M L. Mechanism study on the improvement of the gel texture of corn starch by lactic fermentation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007.
- [33] WOLTER A, HAGER A S, ZANNINI E, et al. Influence of dextran –producing Weissellacibaria, on baking properties and sensory profile of gluten-free and wheat breads[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 172: 83–91.
- [34] 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 D K, ZHANG J Y, LI C M, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* enhanced fermentation on quality of fresh rice noodles and its mechanism of improvement[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(7): 134–139.
- [35] LIU N, CHENG X Y, SUN Y F, et al. GC–MS analysis of the flavor of traditional sourdough steamed bread and the effect of edible alkali on its flavor profiles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, (16): 76–81.

Effects of Lactic Acid Bacteria Fermentation on the Physicochemical Characteristics of Mixed Rice Flour and the Quality of Rice Cakes

Wang Dengyu^{1,2}, Kong Chuiqin^{1,2}, Wang Bing^{1,2}, Liu Linlin^{1,2}, Shi Yanguo^{1,2}, Fan Hongchen^{1,2*}

⁽¹⁾College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076

⁽²⁾Key Laboratory of Grain Food and Comprehensive Processing of Heilongjiang Province, Harbin 150076)

Abstract Glutinous rice and japonica rice were selected as the raw materials. In addition, *Lactobacillus acidophilus* HSP001, *Lactobacillus sakei* HSP002 and their compound strains were used as starters to investigate effects of Lactic acid bacteria (LAB) fermentation on the physicochemical characteristics of mixed rice flour and the quality of rice cakes. The results showed that, LAB fermentation significantly improved the water-holding capacity of mixed rice flour. Further-

more, the mixed rice flour fermented by *Lactobacillus sakei* HSP002 exhibited excellent pasting properties due to the highest trough viscosity (1 295 cP), the lowest breakdown value (394 cP), and the largest final viscosity (1 295 cP). In the dynamic rheological characteristics study, the mixed rice dough prepared using *Lactobacillus acidophilus* HSP001 possessed good viscoelasticity, which was attributed to the largest storage modulus (G') and loss modulus (G''), and the smallest tangent value ($\tan \delta$). In terms of texture and cooking properties of rice cakes, the rice cakes prepared using *Lactobacillus acidophilus* HSP001 owned the lowest hardness and chewability, the best cohesiveness, and the least cooking loss rate. Moreover, the rice cakes prepared using compound starter presented good sensory quality. Compared with rice cakes prepared using a single strain, the types and contents of aldehydes and ester in rice cakes prepared using compound starter increased, and the products had a unique fermentation flavor. These results provide a reference for the research and production of traditional rice-based fermented foods.

Keywords lactic acid bacteria fermentation; mixed rice flour; rice cakes; pasting properties; texture properties