

## 2 种乳酸菌发酵酸面团对馒头品质与风味的影响

邢倩<sup>1,2</sup>, 刘敏<sup>2</sup>, 柯胜<sup>2</sup>, 周中凯<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup> 石河子大学 农产品加工与质量安全控制重点实验室 新疆石河子 832003

<sup>2</sup> 天津科技大学食品科学与工程学院 天津 300457)

**摘要** 选取融合魏斯氏菌、植物乳酸杆菌 2 种乳酸菌分别与酵母发酵以及共同与酵母发酵(LP+WC)制备酸面团,与仅添加酵母的酸面团(CK)对比,研究不同酸面团的乳酸菌菌落数变化、有机酸含量及其对馒头面团水分分布、流变学特性以及馒头品质和风味的影响。结果表明,添加乳酸菌发酵的酸面团 24 h 后 pH 值保持稳定,WC+LP 组乳酸菌菌落数在 24 h 达到最高,为 9.34 lg(CFU/g 酸面团)。发酵 24 h 后,LP 组乳酸含量最多,为 7.75 mg/g 酸面团;LP+WC 组乙酸含量最多,为 0.49 mg/g 酸面团。添加酸面团的馒头面团  $T_2$  弛豫时间为 235.43 ms,CK 组为 252.35 ms,低于未添加酸面团的馒头面团的  $T_2$  弛豫时间 289.94 ms,且使馒头面团黏弹性下降。酸面团的加入增加了馒头的比容,LP+WC 组比容最大为 2.17 mL/g,较普通干酵母面包(OSB)增长了 20.56%,降低了馒头的硬度,LP+WC 组的硬度较 OSB 降低了 25.89%,提升了馒头的弹性,LP+WC 组弹性较普通干酵母面包(OSB)增长了 4.5%。GC-MS 分析表明,在 LP+WC 组中检出 35 种风味物质,种类最多,表明融合魏斯氏菌和植物乳酸杆菌复合发酵酸面团对馒头品质及风味有改善作用。

**关键词** 融合魏斯氏菌; 植物乳酸杆菌; 酸面团; 馒头品质; 风味

**文章编号** 1009-7848(2024)02-0200-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.02.019

酸面团是由乳酸菌和酵母菌发酵的谷物加工产物以及水的混合物<sup>[1]</sup>。酸面团技术作为一种流传已久的发酵技术,有着独特的优势。通过酸面团发酵,面团品质得到有效改善<sup>[2]</sup>,产品的质地、营养以及风味也得到改变。由于其具有更高的酸度以及抑制霉菌生长的能力<sup>[3]</sup>,因此酸面团还可作为改良剂,延缓产品的老化,使产品货架期延长。

酸面团中的主要细菌是酵母菌和乳酸菌,不同的细菌在面团发酵过程中发挥不同的作用。酵母菌主要作用是通过产生气体使面团蓬松,乳酸菌则通过自身的酸化能力影响内源蛋白酶和  $\alpha$ -淀粉酶的活性,从而显著改善风味、质地和营养<sup>[4]</sup>。研究表明,将酸面团添加到面团中会降低面团的弹性,使面团变得更加柔软<sup>[5]</sup>。酸面团风味的类型和含量也与乳酸菌的发酵类型密切相关。例如植物乳酸杆菌作为酸面团中典型的发酵菌种,可以利用糖类和蛋白质,产生大量风味物质的前体物质,例如小肽、游离氨基酸等<sup>[6]</sup>。也有使用魏斯氏菌作为新的发酵剂来生产酵母面包的相关研究,魏

斯氏菌不仅可在低酸浓度下生长,而且具有较高的  $\beta$ -半乳糖苷酶活力,能够抑制真菌的生长<sup>[7]</sup>。对融合魏斯氏菌发酵的风味研究较少,且将其与其它乳酸菌复合发酵的相关研究也较匮乏。本文研究融合魏斯氏菌与植物乳杆菌与酵母单独发酵和共同发酵对酸面团 pH 值、酸度(TTA)、乳酸菌菌落数和有机酸含量,以及不同酸面团对馒头面团水分分布、流变学特性及馒头品质和风味的影响,为接下来使用相关菌种发酵酸面团奠定了理论基础。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料、仪器与设备

富强小麦粉,天津食品集团有限公司;安琪高活性酵母,安琪酵母股份有限公司;MRS 培养基,海博生物技术有限公司;融合魏斯氏菌(*Weissella confusa*)ZZK、植物乳酸杆菌(*Lactobacillus plantarum*)11118,粮油科学与工程实验室提供。

电子天平,美国双杰兄弟(集团)有限公司;MARS 60 动态流变仪,德国赛默飞世尔科技有限公司;食品体积测定仪,瑞典波通公司;TA.XT.Plus 质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;7890A/5960C GC-MS 仪器,美国安捷伦公司和面机,青

收稿日期: 2023-02-10

基金项目: 中央引导地方科技发展资金(22ZYGSN00360)

第一作者: 邢倩,女,硕士生

通信作者: 周中凯 E-mail: zkzhou@tust.edu.cn

岛汉尚电器有限公司;恒温恒湿培养箱,上海赫田科学仪器有限公司;Micro MR-25 低场核磁共振仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;电磁炉,广东美的生活电器制造有限公司;苏泊尔蒸锅,浙江苏泊尔股份有限公司;YXQ-LS-75511 立式压力蒸汽灭菌器,上海博讯实业有限公司医疗设备厂。

## 1.2 试验方法

**1.2.1 酸面团的制备** 植物乳酸杆菌和融合魏斯氏菌在 MRS 培养基活化扩培后,取处于生长对数期的细菌培养液在  $5\ 000\times g$ 、 $4\ ^\circ\text{C}$  下离心 10 min 后取菌泥,用无菌蒸馏水洗涤两次后,按  $7\ \text{lg}(\text{CFU}/\text{g})$  接种量接种菌泥到面团中,混合菌发酵组按照植物乳酸杆菌和融合魏斯氏菌体积比 1:1 接种到面团中,每组接种 1% 的活性干酵母,对照组为仅有活性干酵母的组,保证面团得率  $\text{DY 值}=100\times(\text{面粉质量}+\text{水质量})/\text{面粉质量}=200^{[8]}$ 。在  $30\ ^\circ\text{C}$  和 80% 相对湿度下,在恒温恒湿培养箱中发酵 24 h。

**1.2.2 馒头的制备** 普通馒头面团中面粉与水的比例为 2:1,加入 1% 的活性干酵母。酸面团馒头面团中用 30% 的酸面团替代等量的面粉。面团在和面机中搅拌 15 min 至表面光滑,在室温下松弛 10 min 后,将面团分割并手动成型,在  $38\ ^\circ\text{C}$ 、85% 相对湿度(RH)下发酵 40 min。最后,将醒发好的面团上锅蒸 20 min。

**1.2.3 酸面团发酵过程中 pH 值、TTA 和乳酸菌菌落数的测定** 每隔 2 h 取 10 g 新鲜酸面团样品,溶解于 90 mL 无菌蒸馏水中,置于磁力搅拌器上搅拌 30 min,用 pH 计测量 pH 值。用 0.1 mol/L 的 NaOH 滴定其 pH 值为 8.6,所消耗 NaOH 的量用于表示面团的 TTA。

每 4 h 取 10 g 新鲜酸面团样品,溶解于 90 mL 无菌生理盐水中,在无菌超净台中置于磁力搅拌器上搅拌 20 min,取 1 mL 溶液进行稀释涂布,梯度稀释至  $10^{-5}\sim 10^{-8}$ ,在 MRS 固体培养基上培养 48 h。

**1.2.4 酸面团有机酸含量的测定** 取 5 g 新鲜酸面团,溶解于 20 mL 蒸馏水中,在  $4\ ^\circ\text{C}$  下超声提取 2 h,混合物在  $4\ ^\circ\text{C}$ 、 $10\ 000\times g$  下离心 10 min,然后取 2 mL 上清液在  $4\ ^\circ\text{C}$ 、 $10\ 000\times g$  下离心 30 min。

在  $25\ ^\circ\text{C}$ 、0.8 mL/min 的流速下,使用 C18 柱 ( $5\ \mu\text{m}\times 4.6\ \text{mm}\times 250\ \text{mm}$ ) 通过超高效液相色谱法

测定酸面团中的乳酸和乙酸含量。0.1% 磷酸作为流动相,注射量为  $10\ \mu\text{L}$ 。使用紫外检测器(214 nm)进行检测<sup>[9]</sup>。

**1.2.5 馒头面团的水分流动性测定** 通过低场核磁共振技术(LF-NMR)测量馒头面团的水分分布。将 3 g 的面团放入核磁试管中,然后插入核磁共振探针。使用 Carr-Pure 将制备好的样品放置在直径为 40 mm 的板之间,板之间的间隙设置为 2 mm。在恒定应变幅度为 0.3% 时,用振荡频率为 0.1 Hz 至 ell-Meiboom-Gill 序列(CPMG)确定自旋-自旋弛豫时间。典型的脉冲参数为:接收带宽(SW)=100 kHz,主频(SF)=22 MHz,  $90^\circ$  脉冲时间(P1)=5.00  $\mu\text{s}$ ,数字增益(DRG1)=3,采样点数(TD)=37 368,采样重复间隔时间(TW)=2 000 ms,重复扫描次数(NS)=16,  $180^\circ$  脉冲时间(P2)=11.00  $\mu\text{s}$ ,回波时间(TE)=0.25 ms,回波个数(NECH)=1 500<sup>[10]</sup>。

**1.2.6 馒头面团的流变学测定** 将制备好的样品放置在直径为 40 mm 的板之间,板之间的间隙设置为 2 mm。在恒定应变幅度为 0.3% 时,用振荡频率为 0.1 Hz 至 10 Hz 的  $G'$  和  $G''$  记录动态流变特性<sup>[11]</sup>。

**1.2.7 馒头比容的测定** BVM6630 食品体积测试仪用于测定馒头样品的比体积。每个样品做 3 次平行,取平均值。

**1.2.8 馒头质构特性的测定** 馒头样品冷却 1 h 后,取中心部位,切成  $2\ \text{cm}\times 2\ \text{cm}\times 2\ \text{cm}$  的正方体进行质构特性的测定。使用配备圆柱探头(P/35 型)的质构仪的 TPA 模式。样品以 2 mm/s 的速度进行双重压缩测试,第 1 次压缩和第 2 次压缩之间延迟 5 s,变形率为 40%,触发力为 5.0 g。每个样品做 5 次平行,取平均值。

**1.2.9 馒头风味物质的测定** 挥发性化合物通过顶空固相微萃取(HS-SPME)提取,并用气相色谱-质谱(GC-MS)检测。称量每个馒头样品 3.0 g,将其放入一个 20 mL 的顶空瓶中,在  $60\ ^\circ\text{C}$  的恒温水浴中平衡 20 min,将老化好的 SPME 针刺入小瓶中顶空萃取 30 min,随后迅速将 SPME 针插入  $250\ ^\circ\text{C}$  的进样口中解吸 15 min。使用配备 Rtx-5MS DB-WAX122-7032 ( $30\ \text{m}\times 0.25\ \text{mm}\times 0.25\ \mu\text{m}$ ) 柱的气相色谱仪,通过 GC-MS 分析馒头样品

中的挥发性化合物。

色谱条件:初始温度 45 °C 保持 13 min, 以 4 °C/min 升温至 150 °C 保持 2 min, 然后以 8 °C/min 升温至 250 °C 保持 6 min。氦气流速为 1.0 mL/min, 进样口温度为 250 °C。

质谱条件:电子源温度为 200 °C, 电离能量为 70 eV, 扫描范围为 35~500 *m/z*。通过与标准计算的保留指数(RI)进行比较来鉴定挥发性化合物, 以 2,4,6-三甲基吡啶为内标进行定量分析。根据受试化合物的峰面积与内标的比值计算受试化合物的含量。

### 1.3 数据处理

所有分析测定至少进行 3 次。使用统计软件包 SPSS 22.0 (IMB, Armonk, NY, USA) 和 Origin 8.5 (OriginLab, USA) 对获得的数据进行分析。Duncan 多范围检验用于确定结果之间的差异,  $P < 0.05$  被认为具有显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 酸面团发酵过程中 pH 值、TTA 和菌落数变化

所有酸面团样品的 pH 值均呈下降趋势, 而 TTA 则呈相反趋势。在发酵过程中, 不添加乳酸菌

的酸面团的 pH 值下降最慢, 最终为 4.69, 高于其它样品。16 h 后 LP 组 pH 值低于 WC 组, LP+WC 组 pH 值介于两组之间。这些酸面团的 pH 值分别为 3.99, 4.05 和 4.00。所有处理组酸面团的 pH 值在 16 h 后下降速率减缓, 这可能是由于随着酸度的升高, 乳酸菌本身的生长受到抑制。此外, 与 LP 组相比, WC 组 pH 值下降更快, 可能是由于融合魏斯氏菌生长较植物乳酸杆菌更快。24 h 后, 和 CK 组对比, 添加乳酸菌发酵的酸面团 pH 值保持稳定。

所有酸面团发酵过程中的乳酸菌菌落数呈上升趋势, 添加乳酸菌发酵的酸面团的菌落数多于不添加乳酸菌发酵的酸面团。WC 组菌落数拐点早于 LP 组, 可能是由于融合魏斯氏菌的生长速度快于植物乳酸杆菌。LP+WC 组菌落数在 24 h 达到最高为 9.34 lg(CFU/g 酸面团), 证明两种乳酸菌可以协同发酵。发酵 24 h 后, 由于高浓度有机酸的积累, 乳酸菌遭受酸胁迫, 导致其生长受到抑制或细胞活力丧失<sup>[12]</sup>, 其菌落数开始呈下降趋势。根据菌株的生长活性和酸积累情况, 选择发酵时间为 24 h。

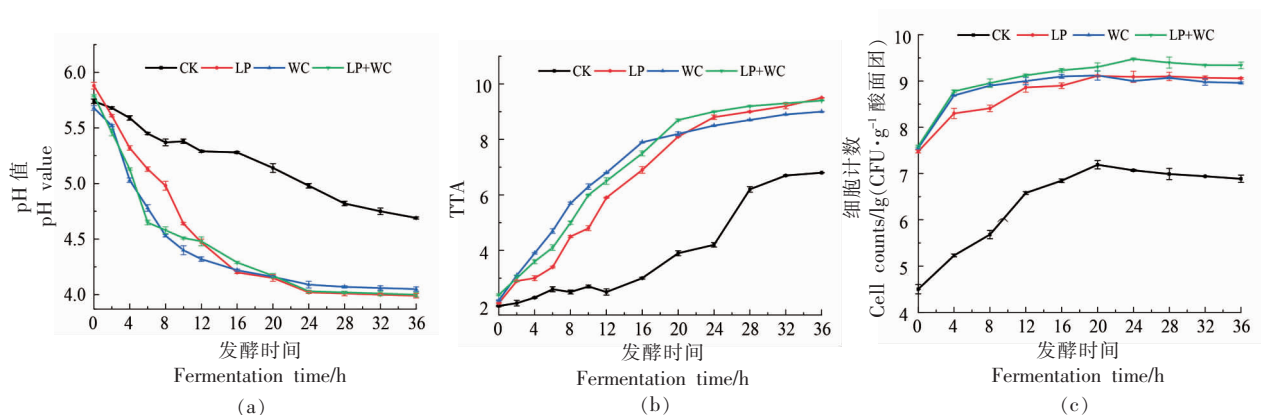


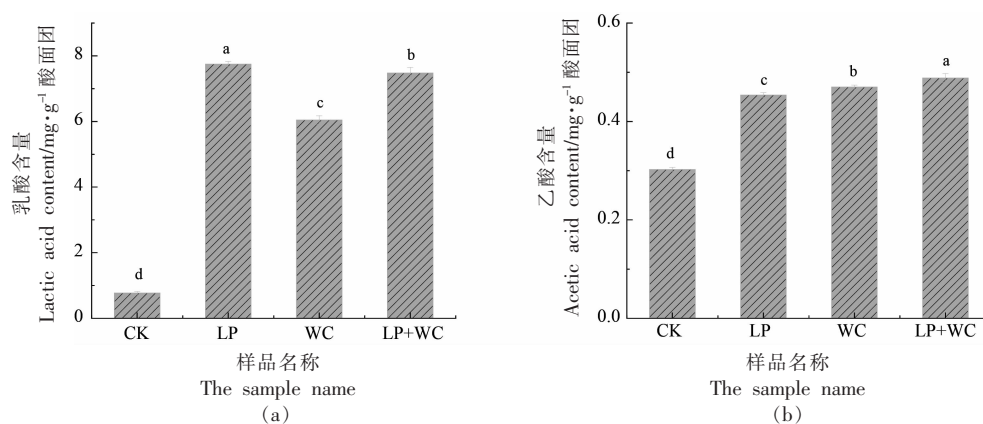
图 1 酸面团发酵过程中 pH 值、TTA 和乳酸菌菌落数

Fig.1 pH value, TTA and lactic acid bacteria colony count during sourdough fermentation

### 2.2 酸面团有机酸含量

添加乳酸菌发酵的面团中乳酸和乙酸的含量均高于不添加乳酸菌的面团。发酵 24 h 后, LP 组乳酸含量最高为 7.75 mg/g 酸面团, LP+WC 组中乙酸含量最高为 0.49 mg/g 酸面团。小麦酸面团中有机酸的产生与乳酸菌的代谢类型密切相关。植

物乳酸杆菌是兼性异型发酵乳酸菌, 融合魏斯氏菌是异型发酵乳酸菌<sup>[13]</sup>。在发酵过程中, 植物乳杆菌代谢葡萄糖产乳酸, 而融合魏斯氏菌代谢葡萄糖产乳酸和乙酸, 因此, LP 组乳酸含量高于 WC 组, 而乙酸含量低于 WC 组。由于乳酸菌之间的相互作用, 通过乳酸菌共同发酵, 乙酸的含量增



注:不同小写字母表示不同组别乳酸、乙酸含量的显著性差异( $P < 0.05$ )。

图 2 酸面团中乳酸、乙酸含量

Fig.2 Content of lactic acid and acetic acid in sourdough

加<sup>[14]</sup>。乙酸的酸度低于乳酸,因此 LP 组 pH 值低于 WC 组,这与测量的 pH 值结果一致。

### 2.3 馒头面团水分流动性

低场核磁共振(LF-NMR)是测定面团中不同成分之间质子分布和迁移的有效技术。根据横向弛豫时间( $T_2$ )的分布,面团中质子分布的 3 个群体被命名为  $T_{21}$ 、 $T_{22}$  和  $T_{23}$ 。不同的  $T_2$  弛豫时间表明水分的流动性不同。流动性有限的  $T_{21}$  部分属于结合水, $T_{22}$  代表半结合水, $T_{23}$  代表自由水<sup>[15]</sup>。如图 3 所示,由于该峰的积分面积占总峰面积的百分比约为 80%,因此 <sup>1</sup>H 群体在  $T_{22}$  中最为丰富,这表明面团中的半结合水是水分存在的主要形式。

OSB 组  $T_2$  弛豫时间为 289.94 ms,LP、WC 和 LP+WC 组的  $T_2$  弛豫时间为 235.43 ms,CK 组为 252.35 ms,添加酸面团的  $T_2$  弛豫时间较普通馒头面团短,表明添加酸面团的馒头面团水分流动性较慢。添加接种乳酸菌酸面团的馒头面团弛豫时间较 CK 组短,有研究发现,与不含酸的样品相比,添加酸会限制面团中水的流动性<sup>[16]</sup>,添加酸面团的馒头面团的酸含量增加,这可能是添加酸面团的馒头面团水流动性受限的原因之一。不同乳酸菌发酵的面团对馒头面团的水流动性影响无明显区别,样品之间质子分布面积的差异不显著。

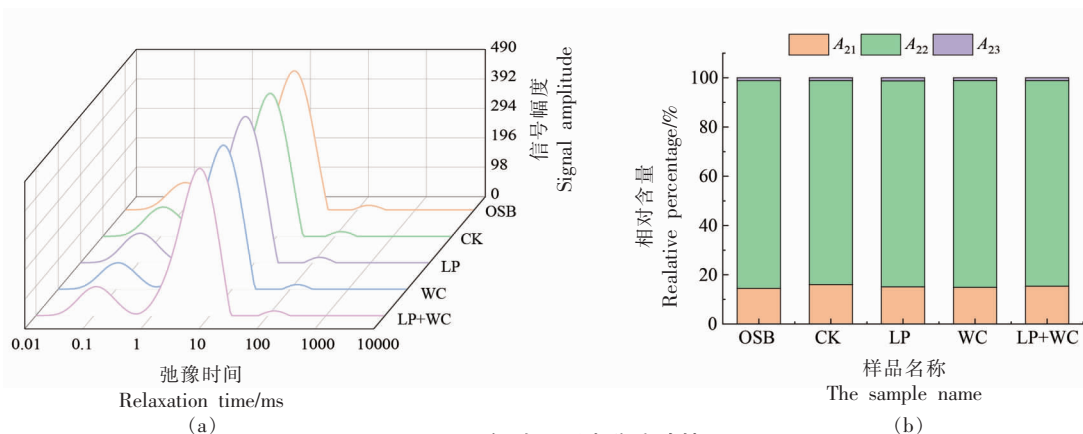


图 3 馒头面团水分流动性

Fig.3 The water mobility characterization of steamed bread dough

### 2.4 馒头面团流变特性

通过动态流变学研究馒头面团的黏弹性。如图 4 所示。所有面团样品的储能模量( $G'$ )和损耗

模量( $G''$ )均随频率的增加而增加,面团的  $G'$  大于  $G''$ ,表明馒头面团的弹性大于黏性。结果表明,当添加酸面团时, $G$  和  $G''$  均降低。添加乳酸菌发酵酸

面团的馒头面团  $G'$  和  $G''$  均高于不添加乳酸菌发酵酸面团的馒头面团, LP+WC 组的  $G'$  和  $G''$  均高于 LP 组和 WC 组。

酸面团的添加促进了面团的吸水性, 发生形变的原因之一是面团中的水分含量增加, 在流变学上则体现为黏弹性下降。面筋网络结构与面团的流变学有高度相关性<sup>[17]</sup>, 面团结构的弱化与蛋白质的溶解度有关, 蛋白质溶解度的增加促进了面筋蛋白质内的分子内静电排斥, 静电排斥阻止形成新的键, 从而导致结构弱化。在低 pH 值下, 小麦面筋更容易溶解, 添加酸面团导致了这一结果<sup>[18]</sup>。除了蛋白质外, 添加酸面团还可以改变淀粉

颗粒结构, 乳酸菌在面团中的代谢使淀粉溶解, 这也使面团软化, 即黏弹性降低<sup>[19]</sup>。与不添加乳酸菌的酸面团相比, 添加乳酸菌发酵的馒头面团的黏弹性有所改善, 这可能是因为乳酸菌的某些代谢产物与蛋白质和淀粉相互作用, 改善了面团的网络结构。例如, 发酵过程中产生的有机酸可能是最重要的影响之一, 乳酸有助于增强面筋的弹性, 而乙酸进一步硬化面筋<sup>[20]</sup>。此外, 淀粉酶、蛋白酶和半纤维素酶等酶的活性也会影响馒头面团的流变学特性。因此, 添加酸面团对面团流变学的影响是多种因素综合作用的结果。

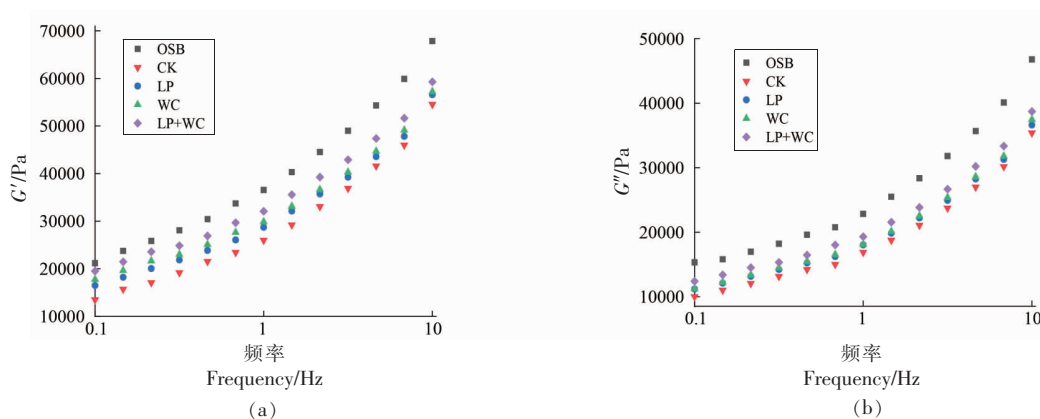


图4 馒头面团的动态流变特性

Fig.4 Rheological properties of steamed bread doughs

## 2.5 馒头比容

添加酸面团对馒头的比容有积极影响。LP+WC 组比容最大为 2.17 mL/g, 较普通干酵母面包 (OSB) 增长了 20.56%, 添加酸面团对馒头比容的影响取决于酸度分布和结构网络<sup>[21]</sup>。馒头比容的增加可能是由于添加酸面团改善了网络结构, 融合魏斯氏菌属于异型发酵乳酸菌, 在发酵过程中将葡萄糖转化为乳酸、乙酸和二氧化碳。WC 组比容大于 LP 组, 这主要是由于融合魏斯氏菌通过 6-磷酸葡萄糖/磷酸戊糖途径 (异型乳酸发酵) 产生  $\text{CO}_2$ <sup>[22]</sup>。融合魏斯氏菌和植物乳杆菌协同发酵有助于提高馒头的比容。

## 2.6 馒头质构特性

添加酸面团的馒头在硬度、黏性和咀嚼性方面显著改善, 在弹性、黏聚性和回复性方面略有改善。WC+LP 组的硬度较 OSB 降低了 25.89%, 添加

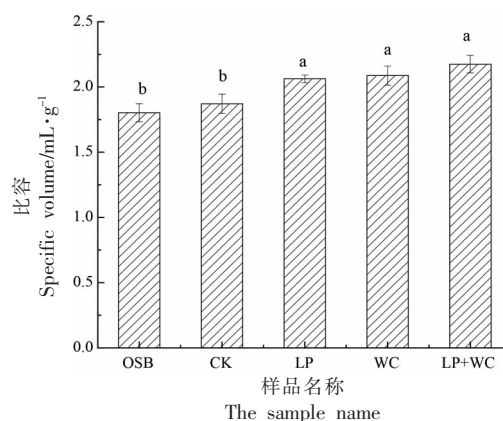


图5 馒头的比容

Fig.5 Special volume of steamed breads

LP+WC 酸面团的馒头的质构特性最好。由图 5 可知, LP+WC 组的比容最大, 这可以解释硬度、咀嚼性较低, 弹性较好的原因。黏聚性代表材料破裂前

的变形程度,反映馒头结构的内阻。由于馒头在咀嚼过程中形成块状而不是直接解体,因此需要更

高的黏聚性<sup>[23]</sup>。结果表明,两种菌株的协同作用提供了更好的质构特性。

表 1 馒头的质构特性

Table 1 Texture parameters of steamed breads

	硬度/g	弹性/%	黏聚性	黏性/g	咀嚼性/g	回复性
OSB	2 254.59 ± 151.09 <sup>a</sup>	0.88 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.67 ± 0.02 <sup>c</sup>	1 385.01 ± 101.34 <sup>a</sup>	1 333.28 ± 46.06 <sup>a</sup>	0.30 ± 0.01 <sup>c</sup>
CK	2 078.26 ± 108.58 <sup>ab</sup>	0.89 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.68 ± 0.01 <sup>bc</sup>	1 269.84 ± 34.45 <sup>b</sup>	1 252.45 ± 52.11 <sup>ab</sup>	0.32 ± 0.02 <sup>bc</sup>
LP	1 807.29 ± 111.01 <sup>bc</sup>	0.91 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.69 ± 0.02 <sup>bc</sup>	1 215.65 ± 48.35 <sup>b</sup>	1 212.24 ± 36.63 <sup>b</sup>	0.35 ± 0.01 <sup>ab</sup>
WC	1 710.31 ± 89.57 <sup>c</sup>	0.91 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.70 ± 0.01 <sup>ab</sup>	1 200.22 ± 33.06 <sup>b</sup>	1 209.97 ± 66.63 <sup>b</sup>	0.36 ± 0.01 <sup>a</sup>
WC+LP	1 670.87 ± 78.51 <sup>c</sup>	0.92 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.72 ± 0.01 <sup>a</sup>	1 197.33 ± 21.12 <sup>b</sup>	1 202.19 ± 37.24 <sup>b</sup>	0.36 ± 0.02 <sup>a</sup>

## 2.7 馒头风味特性

馒头中共检测到 35 种挥发性化合物,包括醛(4)、酮(3)、酸(6)、醇(9)、酯(6)、呋喃(2)和芳香类化合物(5)。添加酸面团的馒头风味比普通馒头风味丰富,且添加乳酸菌发酵酸面团馒头的风味比未添加乳酸菌发酵酸面团的馒头风味丰富。

醛类是通过脂质和氨基酸的氧化产生的<sup>[24]</sup>,酸面团的较长发酵时间为不饱和脂肪酸的氧化提供了有利条件,随着面筋的溶解,包裹在面筋网络中的面粉脂质可能会释放。乳酸菌还可以促进脂质氧化,因为它们可以通过代谢葡萄糖产生乳酸<sup>[25]</sup>。可能是由于植物乳杆菌的氨基酸代谢能力较弱<sup>[26]</sup>,LP 组醛的浓度低于 WC 组,LP+WC 组醛类浓度最高。

酮类物质主要是由氨基酸降解以及饱和脂肪酸的 $\beta$ -氧化产生<sup>[26]</sup>。2-辛酮具有牛奶和奶酪的味道,而仅在 WC 组和 LP+WC 组中检测到,这可能是融合魏斯氏菌代谢的独特产物。在所有样品中检测到的酮类物质很少,而添加乳酸菌发酵酸面团的馒头中产生的酮类物质含量更多。

对于酸,由于在面团发酵过程中,乳酸菌代谢产有机酸以形成一系列酸性化合物,使样品具有更柔和的酸味,故 LP、WC 和 LP+WC 组酸含量较多。乙酸可能来自酸面团中乳酸菌的异乳酸发酵或酵母、醋酸菌的代谢。LP+WC 组中乙酸含量最多,与有机酸测定结果一致。由于乙酸是酯的重要前体,所以适量的乙酸对风味有积极影响<sup>[27]</sup>。还检测到异戊酸、己酸和正庚酸。辛酸仅在添加酸面团的馒头中检测到,辛酸是一种具有酸干酪味道的

酸,且辛酸可与乙醇反应生成辛酸乙酯,为馒头提供特殊的风味。

所有样品中都含有丰富的醇。3-甲基-1-丁醇是最丰富的醇类,它被认为是由酵母细胞通过艾利希途径生成的。苯乙醇也通常被认为是由苯丙氨酸通过艾利希途径产生的。通过这种方式,作为芳香前体的氨基酸被释放出来<sup>[25]</sup>。检测到的各种醇取决于乳酸菌菌株或酵母,Pérel 等<sup>[28]</sup>发现正戊醇和正庚醇主要由乳酸菌生产。LP+WC 组中醇类物质含量最多,证明两种乳酸菌可以与酵母协同发酵产生更多醇类。

由于挥发性高,酯是一种重要的芳香化合物。醇和酸在酯化酶的作用下发生酯化和脱水。同时,基质中前体酸和醇的含量也会影响酯的形成<sup>[29]</sup>。可能是由于高酯酶活性和耐酒精性,添加酸面团的馒头中的乙酸乙酯含量增加<sup>[27]</sup>,且 LP+WC 组增加最多。辛酸乙酯、乙酸己酯、乳酸乙酯和辛酸乙酯可以赋予馒头水果风味,这些酯对香气有显著贡献<sup>[30]</sup>。由于融合魏斯氏菌通过异乳酸发酵生产乙醇,乙醇作为酯的前体,所以 WC 组的酯含量比 LP 组丰富。

亚油酸通过氧化生成 $\alpha,\beta$ -不饱和醛,然后转化为烷基呋喃,2-戊基呋喃使馒头具有花香气味<sup>[25]</sup>。亚麻酸通过氧化降解途径或苯丙氨酸通过 Strecker 降解途径生成苯甲醛,这是一种令人愉悦的杏仁风味<sup>[31]</sup>。萘是由类胡萝卜素的热降解形成的,Wang 等<sup>[32]</sup>也在馒头中检测到萘。LP+WC 组芳香类化合物含量最多。

表2 馒头的挥发性物质  
Table 2 Volatile compounds of steamed breads

保留时间	化合物名称	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				
		OSB	CK	LP	WC	LP+WC
	醛类					
6.233	正己醛	141.13 ± 10.95 <sup>d</sup>	191.15 ± 9.33 <sup>c</sup>	252.39 ± 20.59 <sup>b</sup>	250.08 ± 11.46 <sup>b</sup>	342.90 ± 8.33 <sup>a</sup>
9.146	正庚醛	40.72 ± 2.83 <sup>d</sup>	109.29 ± 11.68 <sup>a</sup>	85.43 ± 4.90 <sup>c</sup>	88.86 ± 8.04 <sup>bc</sup>	102.18 ± 10.93 <sup>ab</sup>
15.212	壬醛	16.27 ± 3.73 <sup>c</sup>	60.82 ± 4.96 <sup>ab</sup>	44.25 ± 6.95 <sup>b</sup>	76.06 ± 8.34 <sup>a</sup>	52.94 ± 15.16 <sup>b</sup>
19.156	反式-2-壬烯醛	24.35 ± 3.12 <sup>c</sup>	78.96 ± 6.43 <sup>b</sup>	156.79 ± 11.12 <sup>a</sup>	164.92 ± 10.23 <sup>a</sup>	171.90 ± 7.38 <sup>a</sup>
	酮类					
9.063	4-甲基-2-己酮	12.93 ± 1.89 <sup>d</sup>	28.70 ± 1.37 <sup>bc</sup>	26.71 ± 4.26 <sup>c</sup>	38.30 ± 6.39 <sup>a</sup>	37.21 ± 7.63 <sup>ab</sup>
11.982	3-羟基-2-丁酮	16.48 ± 3.15 <sup>d</sup>	42.76 ± 5.12 <sup>b</sup>	32.75 ± 2.10 <sup>c</sup>	36.52 ± 4.32 <sup>bc</sup>	61.43 ± 8.23 <sup>a</sup>
12.071	2-辛酮	—	—	—	13.17 ± 2.88 <sup>b</sup>	14.15 ± 1.61 <sup>a</sup>
	酸类					
16.804	乙酸	97.31 ± 9.44 <sup>c</sup>	217.70 ± 21.20 <sup>b</sup>	185.97 ± 19.84 <sup>c</sup>	226.71 ± 13.73 <sup>b</sup>	285.00 ± 17.76 <sup>a</sup>
19.810	异丁酸	64.88 ± 5.66 <sup>a</sup>	—	59.52 ± 6.84 <sup>a</sup>	40.18 ± 3.85 <sup>b</sup>	39.83 ± 6.84 <sup>b</sup>
22.358	异戊酸	31.13 ± 5.97 <sup>c</sup>	38.43 ± 2.97 <sup>c</sup>	71.36 ± 12.35 <sup>a</sup>	46.32 ± 8.64 <sup>bc</sup>	59.63 ± 7.13 <sup>ab</sup>
26.557	己酸	77.77 ± 6.84 <sup>c</sup>	139.50 ± 15.44 <sup>d</sup>	279.54 ± 23.41 <sup>c</sup>	389.23 ± 25.61 <sup>a</sup>	322.42 ± 19.89 <sup>b</sup>
28.737	正庚酸	4.04 ± 1.38 <sup>c</sup>	6.77 ± 2.46 <sup>bc</sup>	9.59 ± 3.37 <sup>ab</sup>	13.39 ± 2.14 <sup>a</sup>	13.27 ± 3.49 <sup>a</sup>
30.433	辛酸	—	21.32 ± 2.67 <sup>b</sup>	22.75 ± 1.91 <sup>b</sup>	44.47 ± 4.37 <sup>a</sup>	26.28 ± 2.82 <sup>b</sup>
	醇类					
6.500	异丁醇	406.75 ± 38.71 <sup>a</sup>	323.32 ± 19.76 <sup>b</sup>	358.63 ± 27.83 <sup>ab</sup>	306.22 ± 18.97 <sup>b</sup>	317.40 ± 24.55 <sup>b</sup>
9.748	异戊醇	2 676.04 ± 176.89 <sup>ab</sup>	2 352.14 ± 136.58 <sup>c</sup>	2 544.03 ± 98.65 <sup>bc</sup>	2 742.46 ± 186.79 <sup>ab</sup>	2 938.76 ± 171.98 <sup>a</sup>
12.392	正戊醇	33.59 ± 3.17 <sup>c</sup>	26.67 ± 1.79 <sup>c</sup>	57.26 ± 4.62 <sup>a</sup>	50.65 ± 3.87 <sup>ab</sup>	48.68 ± 5.03 <sup>b</sup>
13.997	正己醇	558.88 ± 49.83 <sup>d</sup>	770.47 ± 49.82 <sup>c</sup>	1 025.75 ± 88.71 <sup>b</sup>	1 135.24 ± 91.06 <sup>ab</sup>	1 184.66 ± 73.57 <sup>a</sup>
16.713	1-辛烯-3-醇	28.18 ± 1.93 <sup>c</sup>	89.16 ± 9.83 <sup>b</sup>	78.02 ± 5.49 <sup>b</sup>	129.62 ± 8.47 <sup>a</sup>	137.48 ± 15.17 <sup>a</sup>
19.583	正辛醇	9.65 ± 1.17 <sup>d</sup>	36.26 ± 3.90 <sup>c</sup>	35.89 ± 2.25 <sup>c</sup>	87.01 ± 9.33 <sup>a</sup>	64.92 ± 7.32 <sup>b</sup>
21.042	2-壬烯-1-醇	10.89 ± 2.21 <sup>b</sup>	—	15.78 ± 2.06 <sup>a</sup>	20.52 ± 3.40 <sup>a</sup>	19.29 ± 1.77 <sup>a</sup>
22.716	顺-3-壬烯醇	35.88 ± 3.44 <sup>bc</sup>	9.77 ± 1.02 <sup>d</sup>	32.03 ± 4.17 <sup>c</sup>	69.75 ± 5.11 <sup>a</sup>	39.39 ± 3.30 <sup>b</sup>
26.016	4-乙基环己醇	—	12.48 ± 2.15 <sup>b</sup>	17.06 ± 3.67 <sup>b</sup>	5.44 ± 3.96 <sup>c</sup>	43.30 ± 4.17 <sup>a</sup>
	酯类					
2.683	乙酸乙酯	3.12 ± 0.89 <sup>d</sup>	4.55 ± 0.78 <sup>d</sup>	10.23 ± 1.84 <sup>c</sup>	14.62 ± 2.00 <sup>b</sup>	19.39 ± 3.03 <sup>a</sup>
10.792	己酸乙酯	21.97 ± 1.58 <sup>d</sup>	23.09 ± 0.82 <sup>d</sup>	69.56 ± 4.66 <sup>c</sup>	99.77 ± 8.05 <sup>b</sup>	109.88 ± 6.76 <sup>a</sup>
11.698	乙酸己酯	—	—	3.69 ± 0.41 <sup>b</sup>	4.82 ± 0.75 <sup>b</sup>	7.42 ± 0.94 <sup>a</sup>
13.671	2-羟基丙酸乙酯	—	—	163.45 ± 9.84 <sup>b</sup>	167.33 ± 13.74 <sup>b</sup>	206.72 ± 17.54 <sup>a</sup>
16.331	辛酸乙酯	28.94 ± 1.73 <sup>d</sup>	115.21 ± 13.58 <sup>c</sup>	152.91 ± 11.75 <sup>b</sup>	298.84 ± 21.33 <sup>a</sup>	301.38 ± 25.46 <sup>a</sup>
30.156	$\gamma$ -正戊基丁内酯	15.65 ± 3.74 <sup>d</sup>	36.11 ± 2.54 <sup>b</sup>	24.87 ± 1.08 <sup>c</sup>	60.28 ± 5.14 <sup>a</sup>	40.55 ± 3.21 <sup>b</sup>
	呋喃					
7.458	2-正丁基呋喃	—	—	10.31 ± 1.10 <sup>a</sup>	12.18 ± 0.94 <sup>a</sup>	12.73 ± 1.42 <sup>a</sup>
10.808	2-戊基呋喃	85.01 ± 9.03 <sup>c</sup>	387.67 ± 25.14 <sup>c</sup>	262.27 ± 16.50 <sup>d</sup>	619.99 ± 44.37 <sup>a</sup>	496.20 ± 35.67 <sup>b</sup>
	芳香类					
18.742	苯甲醛	103.38 ± 8.15 <sup>c</sup>	125.02 ± 11.08 <sup>c</sup>	310.27 ± 24.97 <sup>b</sup>	380.26 ± 17.85 <sup>a</sup>	409.97 ± 31.56 <sup>a</sup>
24.137	萘	10.83 ± 1.25 <sup>c</sup>	12.00 ± 1.47 <sup>c</sup>	18.32 ± 1.46 <sup>b</sup>	36.72 ± 4.18 <sup>a</sup>	36.00 ± 3.69 <sup>a</sup>
27.618	1-甲基萘	—	12.82 ± 0.75 <sup>c</sup>	16.47 ± 2.16 <sup>ab</sup>	18.77 ± 1.94 <sup>a</sup>	14.34 ± 1.40 <sup>bc</sup>
27.954	苯乙醇	324.53 ± 29.73 <sup>d</sup>	620.85 ± 58.43 <sup>c</sup>	881.76 ± 64.38 <sup>ab</sup>	817.83 ± 79.61 <sup>b</sup>	970.45 ± 81.67 <sup>a</sup>
34.331	邻苯二甲酸二乙酯	162.54 ± 13.47 <sup>c</sup>	255.56 ± 20.17 <sup>b</sup>	354.34 ± 23.84 <sup>a</sup>	353.09 ± 25.70 <sup>a</sup>	351.13 ± 22.67 <sup>a</sup>

注:不同小写字母表示不同样品风味物质的差异性显著( $P < 0.05, n=3$ )。

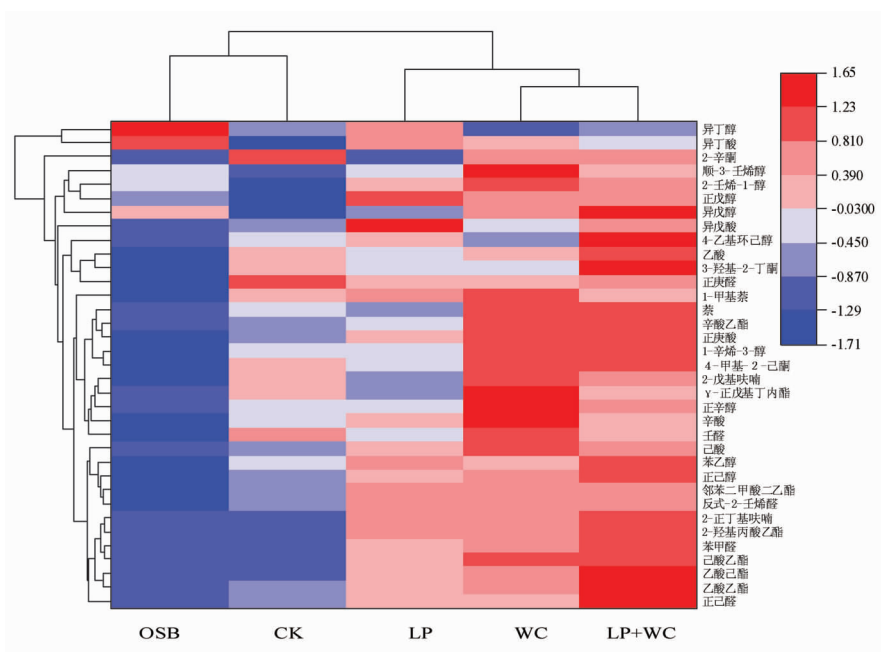


图 6 馒头中挥发性物质的聚类分析

Fig.6 Cluster analysis of volatile compounds in steamed breads

### 3 结论

植物乳杆菌和融合魏斯氏菌发酵都使得酸面团的 pH 值下降, TTA 和乳酸菌菌落数上升。LP 组 pH 值下降速度较 WC 慢, LP+WC 组乳酸菌菌落数最多。由于植物乳杆菌和融合魏斯氏菌的代谢途径和代谢能力不同, 植物乳杆菌产生更多的乳酸, 而融合魏斯氏菌代谢产生更多的乙酸, LP 组中乳酸含量最高, LP+WC 组中乙酸含量最高。添加酸面团限制了面团中的水分流动, 降低了面团的黏弹性, 然而, 添加植物乳杆菌和融合魏斯氏菌发酵酸面团的馒头面团的  $G'$  和  $G''$  均高于仅添加酵母酸面团的馒头面团, 且 LP+WC 组相对 LP 组和 WC 组黏弹性更好。酸面团的加入增加了馒头的比容, 改善了馒头的质构特征, 丰富了馒头的风味。结果表明, LP+WC 组馒头比容最大, 质构特性最好, 风味最佳, 表明两种乳酸菌可以协同与酵母发酵, 使馒头具有更好的品质。

### 参 考 文 献

[1] VAN KERREBROECK S, BASTOS F C C, HARTH H, et al. A low pH does not determine the community dynamics of spontaneously developed back-

sloped liquid wheat sourdoughs but does influence their metabolite kinetics [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 239: 54–64.

- [2] VUYST L D, HARTH H, KERREBROECK S V, et al. Yeast diversity of sourdoughs and associated metabolic properties and functionalities [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 239: 26–34.
- [3] SAA D T, SILVESTRO R D, DINELLI G, et al. Effect of sourdough fermentation and baking process severity on dietary fibre and phenolic compounds of immature wheat flour bread [J]. *LWT— Food Science and Technology*, 2017, 83: 26–32.
- [4] GAENZLE M G. Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation [J]. *Food Microbiology*, 2014, 37: 2–10.
- [5] RUPESH S C, SHRADDHA R C. Sourdough technology—a traditional way for wholesome foods: A review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety*, 2011, 10(3): 169–182.
- [6] 张国华, 贺霞霞, 卫晓蓉, 等. 植物乳杆菌-Gm4 发酵制备酸面团粉的工艺优化 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(11): 228–234.
- ZHANG G H, HE X X, WEI X R, et al. Optimization of fermentation process of *Lactobacillus plantarum*-Gm4 for the preparation of sourdough [J].



- Food Industry Technology, 2022, 43(11): 228–234.
- [7] LEE W K, PARK Y J, JEONG R H, et al. Probiotic properties of *Weissella* strains isolated from human faeces[J]. Anaerobe, 2012, 18(1): 96–102.
- [8] 周一鸣, 欧阳博雅, 向茜, 等. 不同乳酸菌发酵酸面团对面包品质及风味的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 176–183.
- ZHOU Y M, OUYANG B Y, XIANG Q, et al. Effects of different lactic acid bacteria fermenting sourdough on bread quality and flavor[J]. Food Science, 2022, 43(2): 176–183.
- [9] JIN J, HANH N, HUMAYUN S, et al. Characteristics of sourdough bread fermented with *Pediococcus pentosaceus* and *Saccharomyces cerevisiae* and its bio-preservative effect against *Aspergillus flavus* [J]. Food Chemistry, 2021, 345, 128787.
- [10] SUN Y, ZHANG M, CHEN H. LF-NMR intelligent evaluation of rheology and printability for 3D printing of cookie dough pretreated by microwave [J]. LWT- Food Science and Technology, 2020, 132: 109752.
- [11] LIU Z, BHESH B, SANGEETA P, et al. Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 87: 413–424.
- [12] SERGINE E, LINDLEY N D, PASCAL L, et al. Dynamic response of catabolic pathways to autoacidification in *Lactococcus lactis*: Transcript profiling and stability in relation to metabolic and energetic constraints[J]. Molecular Microbiology, 2002, 45(4): 1143–1152.
- [13] CAPUANI A, STETINA M, GSTATTENBAUER A, et al. Multivariate analysis of buckwheat sourdough fermentations for metabolic screening of starter cultures[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 185: 158–166.
- [14] SETTACHAIMONGKON S, NOUT M J R, FER-NANDES E C A, et al. Influence of different proteolytic strains of *Streptococcus thermophilus* in co-culture with *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* on the metabolite profile of set-yoghurt[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 177: 29–36.
- [15] HU X H, LI C, YAN H, et al. Impact of celluloses and pectins restrictions on gluten development and water distribution in potato-wheat flour dough[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 206: 534–542.
- [16] HOPKINS E J, NEWLING B, HUCL P, et al. Water mobility and association by <sup>1</sup>H NMR and diffusion experiments in simple model bread dough systems containing organic acids[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 283–291.
- [17] LI Y M, ZHANG C C, JIANG X G, et al. The effects of different additives on the physical properties of dumpling wrapper[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(4): 3077–3085.
- [18] KUMAR R K, ACHUTHA P K. Non-linear rheological (LAOS) behavior of sourdough-based dough [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 481–492.
- [19] GALLE S, ARENDT E K. Exopolysaccharides from sourdough lactic acid bacteria[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2014, 54(7): 891–901.
- [20] CORSETTI A, SETTANNI L. *Lactobacilli* in sourdough fermentation[J]. Food Research International, 2006, 40(5): 539–558.
- [21] GOBBETTI M, GÄNZLE M. Handbook on sourdough biotechnology[M]. 2012: 85–103.
- [22] YU Y F, WANG L, QIAN H F, et al. Effect of selected strains on physical and organoleptic properties of breads[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 547–553.
- [23] DHEN, REJEB I B, BOUKHRIS H, et al. Physicochemical and sensory properties of wheat - Apricot kernels composite bread[J]. LWT, 2018, 95: 262–267.
- [24] CAI Z D, RUAN Y F, HE J, et al. Effects of microbial fermentation on the flavor of cured duck legs [J]. Poultry Science, 2020, 99(9): 4642–4652.
- [25] WU S M, PENG Y L, XI J Z, et al. Effect of sourdough fermented with corn oil and lactic acid bacteria on bread flavor [J]. LWT, 2022, 155: 112935.
- [26] YI C P, LI Y S, ZHU H, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the volatile flavors of mung beans[J]. LWT, 2021, 146: 111434.
- [27] PANG X N, CHEN C, HUANG X N, et al. Influence of indigenous lactic acid bacteria on the

- volatile flavor profile of light-flavor Baijiu[J]. LWT, 2021, 147: 111540.
- [28] PÉTEL C, ONNO B, PROST C. Sourdough volatile compounds and their contribution to bread: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 59: 105–123.
- [29] ZHAO G Z, DING L L, YAOY P, et al. Extracellular proteome analysis and flavor formation during soy sauce fermentation[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1872.
- [30] XU Y Q, ZHAO J G, LIU X, et al. Flavor mystery of Chinese traditional fermented Baijiu: The great contribution of ester compounds[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130920.
- [31] DING A Z, ZHU M, QIAN X Q, et al. Effect of fatty acids on the flavor formation of fish sauce[J]. LWT – Food Science and Technology, 2020, 134: 110259.
- [32] WANG Y H, YANG Y Y, LI H Q, et al. Characterization of aroma-active compounds in steamed breads fermented with Chinese traditional sourdough [J]. LWT, 2021, 152: 112347.

### Effects of Two Kinds of Lactic Acid Bacteria Fermented Sourdough on the Quality and Flavor of Steamed Bread

Xing Qian<sup>1,2</sup>, Liu Min<sup>2</sup>, Ke Sheng<sup>2</sup>, Zhou Zhongkai<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Quality Control of Specialty, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang

<sup>2</sup>College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457)

**Abstract** In this paper, *Weissella confusa* (WC) and *Lactobacillus plantarum* (LP) were used to ferment sourdough with yeast alone and together, compared with the sourdough fermented with yeast alone (CK) to discuss the change of lactic acid bacteria number and organic acid content of different sourdoughs. And to discuss the effects of different sourdoughs to steamed bread dough on water distribution, rheological properties and to steamed bread on quality and flavor. The results of the study found that the pH of the sourdough fermented with lactic acid bacteria remained stable after 24 h. The bacterial number of WC+LP group reached the highest at 24 h, which was 9.34 lg(CFU/g sourdough). After 24 h fermentation, the lactic acid content in LP group was 7.75 mg/g sourdough, and the acetic acid content in LP+WC group was 0.49 mg/g sourdough. The  $T_2$  relaxation time of steamed bread dough with sourdough was 235.43 ms and of CK group was 252.35 ms, The  $T_2$  relaxation time of these groups was shorter than that without sourdough which was 289.94 ms, and the viscoelasticity of steamed bread dough decreased. The addition of sourdough increased specific volume, reduced the hardness and improved the elasticity of steamed bread, the maximum specific volume of the LP+WC group was 2.17 mL/g, which was 20.56% higher than that of ordinary yeast bread, the hardness of the LP+WC group was reduced by 25.89% and the elasticity of the LP+WC group increased by 4.5% compared with that of ordinary dry yeast bread (OSB). GC-MS analysis showed that 35 flavor substances were detected in LP+WC group, with the largest variety. The results showed that the quality and flavor of steamed bread could be improved by the compound fermented sourdough with *Weissella confusa* and *Lactobacillus plantarum*, which laid a theoretical foundation for the next use of related bacteria to ferment sourdough.

**Keywords** *Weissella confusa*; *Lactobacillus plantarum*; sourdough; steamed bread quality; flavor