

不同乳酸菌发酵豆乳对面团发酵特性及馒头品质的影响

邵童, 王兴奔, 吴冉, 张怡芸, 张臣臣, 顾瑞霞, 陈霞*
(扬州大学旅游烹饪学院, 江苏扬州 225127)

摘要: 以大豆为原料, 选用从扬州市富春茶社老酵面团中筛选获得的3株乳酸菌为发酵菌, 探究了3种单一乳酸菌和复合乳酸菌(1:1:1)发酵豆乳对面团发酵特性和馒头品质的影响。结果表明, 与单一菌株发酵相比, 复配发酵豆乳的酸度和活菌数更高, 分别为85.06 °T和9.66 (lg(CFU/mL)), 3株乳酸菌在豆乳中具有较好的共生关系。同时, 与对照组相比, 添加发酵豆乳显著提高了面团发酵后的有机酸含量和活菌数, 其中戊糖乳杆菌203发酵豆乳面团的乳酸含量和活菌数最高, 分别为18.57 mg/g和8.94 (lg(CFU/g)); 而发酵乳杆菌202发酵豆乳面团乙酸含量最高, 为3.81 mg/g。与对照组馒头相比, 添加发酵豆乳4组馒头的比容、弹性和高径比均显著提高, 而硬度和咀嚼性均显著降低, 复配组馒头获得了最高的整体可接受度。风味结果显示, 在5组馒头中共检测出48种挥发性风味物质, 其中复配组馒头的风味物质相对含量和种类最多, 分别为71.62%和47种。在4 °C储藏4 d后, 4组发酵豆乳馒头的水分损失率和回生焓值均显著低于对照组, 其中复配组的水分含量最高, 为38.53%; 回生焓值最小, 为1.00 J/g。综上可知, 添加发酵豆乳能够有效提升馒头的品质和风味, 延缓馒头的老化, 而复配发酵豆乳馒头整体效果最好。

关键词: 乳酸菌; 发酵豆乳; 面团; 馒头品质

Effect of Soymilk Fermented by Different Lactic Acid Bacteria on Dough Fermentation Characteristics and Steamed Bun Quality

SHAO Tong, WANG Xingben, WU Ran, ZHANG Yiyun, ZHANG Chenchen, GU Ruixia, CHEN Xia*
(Institute of Culinary Tourism, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: The effects of soymilk fermented with single and mixed (1:1:1) cultures of three strains of lactic acid bacteria (LAB) isolated from sourdough from Fuchun Teahouse in Yangzhou City on the fermentation characteristics of dough and the quality of steamed bun were investigated. The results showed that the acidity and viable bacterial count of soymilk fermented with the mixed culture were 85.06 °T and 9.66 (lg(CFU/mL)), respectively, which were higher than those of the single culture fermented samples. Meanwhile, compared with the control group, the addition of fermented soymilk significantly increased the organic acid content and viable bacterial count of dough. The lactic acid content and viable bacterial count of dough supplemented with *Lactobacillus pentosus* 203 fermented soymilk were the highest, which were 18.57 mg/g and 8.94 (lg(CFU/g)), respectively. Dough added with *Lactobacillus fermentum* 202 fermented soymilk had the highest acetic acid content (3.81 mg/g). Compared with control steamed buns, the specific volume, elasticity and height to diameter ratio of four steamed buns supplemented with fermented soymilk were significantly increased, while the hardness and chewiness were significantly decreased. Steamed buns added with mixed-culture fermented soymilk had the highest overall acceptability. A total of 48 volatile flavor substances were detected in the five groups of steamed buns. Among them, the relative contents and types of flavor substances in the mixed culture group were the highest, which were 71.62% and 47, respectively. After being stored at 4 °C for 4 days, the moisture loss rate and retrogradation enthalpy of steamed buns added with fermented soymilk were significantly lower than those of the control group; the highest moisture content

收稿日期: 2023-03-21

基金项目: 江苏省科技攻关计划-苏北专项(XZ-SZ202042); 扬州市-扬州大学合作共建科技创新平台项目(YZ2020265)

第一作者简介: 邵童(1998—)(ORCID: 0009-0008-2075-2222), 女, 硕士研究生, 研究方向为益生菌的应用及与功能性烘焙食品的结合。E-mail: 971349607@qq.com

*通信作者简介: 陈霞(1976—)(ORCID: 0000-0003-4682-3013), 女, 教授, 博士, 研究方向为益生菌的应用及与功能性烘焙食品的结合。E-mail: chenxia@yzu.edu.cn

of 38.53% and the lowest retrogradation enthalpy of 1.00 J/g were found in the mixed culture group. In conclusion, adding fermented soymilk can effectively improve the quality and flavor and delay the aging of steamed buns, this effect being most pronounced with the incorporation of mixed-culture fermented soymilk.

Keywords: fermented soymilk; dough; fermentation characteristics; steamed bun quality

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230321-211

中图分类号: TS210.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 24-0171-08

引文格式:

邵童, 王兴奔, 吴冉, 等. 不同乳酸菌发酵豆乳对面团发酵特性及馒头品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 171-178.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230321-211. <http://www.spkx.net.cn>

SHAO Tong, WANG Xingben, WU Ran, et al. Effect of soymilk fermented by different lactic acid bacteria on dough fermentation characteristics and steamed bun quality[J]. Food Science, 2023, 44(24): 171-178. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230321-211. <http://www.spkx.net.cn>

馒头是深受我国人民喜爱的传统主食, 近年来, 随着人们健康饮食理念的不断提高, 风味多样、营养均衡的馒头具有更加广阔的市场空间^[1-2]。大豆中营养物质丰富且氨基酸组成全面, 尤其富含谷物中普遍缺乏的赖氨酸, 是一种理想的谷类互补食品^[3]。

发酵豆乳是以豆乳为主要原料, 添加乳酸菌发酵制成的具有一定酸度的发酵制品^[4]。乳酸菌发酵产生的有机酸、胞外多糖、酶类等代谢物质对改善面团特性、提升产品风味有积极作用^[5]。酸性环境下被激活的谷物内源性蛋白酶可以促进面筋蛋白降解, 从而增加面筋蛋白的膨胀和溶解度, 使面团具有更好的延展性和膨胀性^[6-7]; 发酵产生的有机酸可以通过抑制致病菌延长馒头的货架期^[8]; 此外, 乳酸菌发酵还可以通过释放氨基酸等风味前体物质以及生成风味化合物等途径影响产品的风味^[9]。大豆中的抗营养因子含量较高, 且磨浆后大豆存在令人不悦的豆腥味, 而乳酸菌发酵可以降解豆乳中抗营养因子含量, 缓解豆腥味并产生新风味^[10]。苏珊等^[11]以豆渣为原料, 探究了豆渣酸面团添加量对馒头品质的影响, 结果表明当添加量达到20%时, 对馒头的外观、色泽、口感均产生了积极影响。张娟等^[12]评价了添加熟豆浆制备全豆馒头的营养情况, 结果表明全豆馒头的多种营养成分含量(膳食纤维、必需氨基酸、必需脂肪酸等)均高于普通馒头。

已有研究表明, 不同豆粉添加物和豆类副产品的添加会对面制品品质及风味产生影响^[13-14], 但关于发酵豆乳对面团发酵及馒头品质影响的研究还鲜见报道。与乳酸菌直接发酵面团相比, 发酵豆乳的添加弥补了普通馒头中赖氨酸含量缺乏的劣势^[3], 并且为馒头增添了新的风味和口感; 与发酵豆粉相比, 发酵豆乳可以避免因缺乏面筋蛋白而不利于面团内部面筋网络结构形成的问题^[15], 因此, 发酵豆乳是一种新的可尝试的豆类添加物。本研究选择从扬州餐饮老店老酵面团中筛选的植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum* 201, *Lp201*)、发酵乳

杆菌(*Lactobacillus fermentum* 202, *Lf202*)和戊糖乳杆菌(*Lactobacillus pentosus* 203, *Lp203*)作为发酵菌株, 3株菌经前期测定在面团和豆乳中均有良好的产酸和生长能力, 且有较强的抑菌能力和酶活性, 适合本研究。分别采用3种单一乳酸菌和复合乳酸菌(1:1:1)发酵制备发酵豆乳, 并探究不同乳酸菌发酵豆乳对面团发酵特性及馒头品质的影响, 以期开发品质优良、风味独特的豆乳馒头提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄豆 扬州欧尚超市; 中筋小麦粉、百钻牌面粉(蛋白质含量、脂肪含量、碳水化合物含量分别为18%、2%和15%); 活性干酵母 安琪酵母有限公司; 脱脂乳粉由实验室提供; 白砂糖 太古糖业(中国)有限公司; 食用盐 中盐上海盐业有限公司; 发酵豆乳为实验室自制。

Lp201、*Lf202*、*Lp203*筛选自扬州富春茶社老酵面团, 保藏于扬州大学江苏省乳品生物技术与安全控制重点实验室。

MRS肉汤培养基、MRS琼脂培养基 青岛高科园海博生物技术有限公司; 氢氧化钠、无水乙醇、三氯乙酸(均为分析纯) 国药集团(上海)化学试剂有限公司; 乳酸、乙酸标准品 上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

雷磁PHS-3E pH计 上海仪电科学仪器股份有限公司; 260高效液相色谱(high performance liquid chromatograph, HPLC)仪 德国Agilent仪器有限公司; TMS-pro质构仪 美国FTC仪器有限公司; Clarus690-SQ8T气相色谱-质谱联用仪 珀金埃尔默股份有限公司; DSC 8500差示扫描量热仪 美国PerkinElmer有限公司; 50/30 μm DVB/CAR/PDMS萃取头 上海朴贝公司;

1510酶标仪 赛默飞世尔科技有限公司; JF-SX-500全自动灭菌锅 日本TOMY公司; SPX-250B型生化培养箱 上海跃进医疗器械厂。

1.3 方法

1.3.1 发酵豆乳的制备

参照黄玉军等^[16]的方法并稍作修改, 大豆清洗干净后于4℃中浸泡12 h(豆:水=1:2), 沸水磨浆8 min(湿豆:水=1:4)后过120目筛去除杂质, 同时配制脱脂乳(12%脱脂乳粉)并过120目筛待用。将豆浆与脱脂乳按一定比例(豆浆:脱脂乳=7:3)混合, 再加入6%白砂糖混合均匀, 20 MPa均质2次后105℃高压灭菌15 min, 冷却后按3%比例接入乳酸菌, 放入37℃恒温培养箱中发酵至pH 4.5, 置于4℃冰箱中冷藏24 h即可使用。

1.3.2 发酵豆乳基本性质的测定

不同乳酸菌发酵豆乳活菌数测定参照GB 4789.35—2016《食品微生物学检验 乳酸菌检验》^[17]; pH值测定使用pH计; 总滴定酸度(total titratable acid, TTA)的测定参照GB 5009.239—2016《食品酸度的测定》^[18]。

1.3.3 发酵豆乳酸面团的制备

将不同乳酸菌发酵豆乳以40%比例(按面粉质量计)与面粉混合, 加水后放入37℃培养箱中发酵24 h。发酵面团具体配方如表1所示。

表1 发酵豆乳酸面团配方

配料	CG	Lp201	Lf202	Lp203	FP
小麦粉/g	100	100	100	100	100
发酵豆乳/g	—	40	40	40	40
水/g	100	68	68	68	68

注: CG.不添加发酵豆乳; FP.添加复配发酵豆乳; 水的添加根据发酵豆乳固形物含量调整, 保证每组加水量一致。下同。—未添加, 表2同。

1.3.4 面团发酵过程中pH值、TTA及活菌数的变化

每隔2 h测定面团的pH值和TTA。pH值使用pH计测定; TTA的测定参照马子琳^[19]的方法; 活菌数的测定参照GB 4789.35—2016^[17]。

1.3.5 面团发酵前后有机酸的变化

参照马子琳^[19]的方法, 称取10.0 g酸面团样品, 加入20 mL超纯水, 高速搅拌10 min后12 000 r/min离心20 min, 取上清液过0.22 μm滤膜至色谱进样瓶中, 采用HPLC法测定样品中的乳酸和乙酸含量, 并根据乳酸和乙酸的含量计算发酵熵, 发酵熵=乳酸含量/乙酸含量。

色谱柱: C₁₈-ST柱(300 mm×7.8 mm, 5 μm); 流动相: 0.1%磷酸溶液和甲醇, 流速0.7 mL/min; 柱温: 25℃; 进样量: 10 μL; 于波长215 nm下测试。

1.3.6 豆乳馒头的制备

将不同乳酸菌发酵豆乳以40%比例(按面粉质量计)加入到馒头面团中, 馒头的制作配方如表2所示。馒头采用一次发酵法, 所有干料提前混合后加入水和发

酵豆乳, 充分搅拌至面团光滑均匀后切分面团60 g/个。面团整形搓圆后于37℃、相对湿度85%的醒发箱中醒发1 h, 大火蒸制15 min, 关火后静置5 min取出。馒头在室温下自然冷却1 h后进行指标测定。

表2 馒头配方

Table 2 Formulations of steamed buns with and without added fermented soymilk

配料	CG	Lp201	Lf202	Lp203	FP
小麦粉/g	100	100	100	100	100
发酵豆乳/g	—	40	40	40	40
白砂糖/g	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
干酵母/g	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
盐/g	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
水/g	55	22	22	22	22

1.3.7 馒头基本指标的测定

馒头质构的测定参照林江涛等^[20]的方法, 选取馒头中间3片, 采用P/36探头进行TPA测试, 测定参数为: 触发力5 N, 测前速率3 mm/s, 测中速率1 mm/s, 测后速率1 mm/s, 压缩比例50%。

馒头的比容和高径比测定分别采用油菜籽替代法和游标卡尺法^[18]。

1.3.8 馒头风味物质的测定

参照何晓赞^[13]的方法并稍作修改, 称取馒头样品5.00 g于固相萃取样品瓶中, 60℃条件下顶空萃取30 min。萃取结束后于250℃解吸7 min, 同时启动仪器采集数据。

1.3.8.1 色谱条件

色谱柱: DB-WAX 122-7032毛细管色谱柱; 设置载气He; 流量: 恒流, 0.9 mL/min; 设置升温程序: 起始温度为40℃, 保留3.5 min, 然后以5℃/min升至90℃, 接着以12℃/min升温至220℃, 并保留7 min。

1.3.8.2 质谱条件

电子电离源; 设置进样孔温度250℃, 离子源温度200℃; 电子能量70 eV; 发射电流200 μA; 全扫描采集, 采集的质量范围m/z 33~495。

1.3.9 馒头储藏期品质变化的测定

将制备好的馒头密封在塑封袋中, 于4℃冰箱中储藏4 d, 每隔1 d取样, 测定前先将馒头从冰箱中取出, 恢复至室温。

1.3.9.1 回生焓值的变化

参照杨新宇^[21]的方法, 称取馒头芯样品10 mg于铝坩锅中, 使用差示扫描量热仪进行测定, 扫描温度为30~100℃, 升温速率为10℃/min。以未添加样品的空坩锅作空白对照。

1.3.9.2 水分含量的变化

取馒头芯部分, 水分含量的测定参照GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》^[22]。

1.3.10 馒头的感官评价

参照马子琳^[19]的方法,通过九分嗜好法对馒头外观、色泽、内部结构、风味、口感及整体可接受度进行感官评定。得分越高,代表喜好程度越强,9分为最佳。

1.4 数据处理

采用SPSS 20.0处理数据,每次测定均重复3次,取平均值,并进行显著性分析, $P < 0.05$,差异显著。采用Origin 2019绘图。

2 结果与分析

2.1 发酵豆乳基本性质

由图1A可知,随着发酵时间的延长,4组发酵豆乳的pH值均逐渐下降,TTA逐渐上升,且在2~8 h期间产酸速度最快,8 h后趋缓;4组豆乳发酵时间存在差异,其中Lp203组和复配组发酵时间较短,分别为9.0 h和9.5 h。复配发酵豆乳组TTA最高,为85.06 °T;而Lf202发酵豆乳组最低,为66.17 °T,说明不同乳酸菌在豆乳中的产酸能力存在差异。由图1B可知,4组发酵豆乳在发酵结束时的活菌数显著提高,均超过9.0 (lg (CFU/mL)),其中复配组的活菌数最高,为9.66 (lg (CFU/mL)),说明3株乳酸菌在豆乳中存在良好的共生关系,复配后在豆乳中具有较高的生长速度和产酸性能。

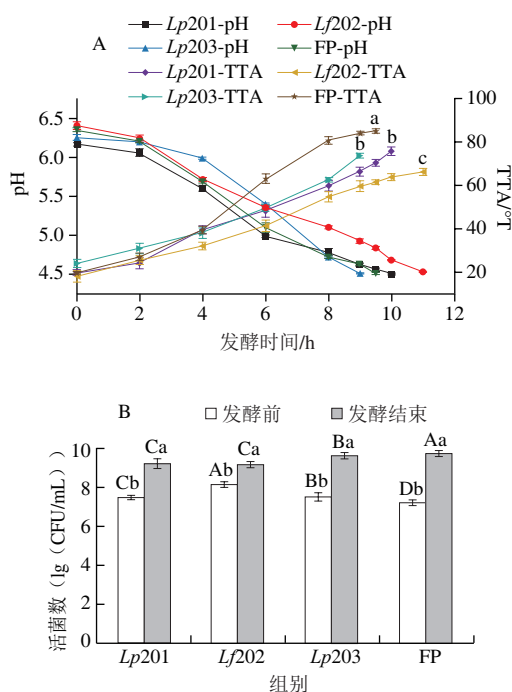


Fig. 1 Basic properties of fermented soy milk with different LAB strains
A. pH值和TTA; B.活菌数。图A同一指标字母不同表示不同组别差异显著 ($P < 0.05$); 图B小写字母不同表示同组不同发酵阶段差异显著,大写字母不同表示同一发酵阶段不同组别差异显著 ($P < 0.05$)。图2同。

图1 不同乳酸菌发酵豆乳基本性质

Fig. 1 Basic properties of fermented soy milk with different LAB strains

2.2 发酵豆乳酸面团在发酵过程中的pH值、TTA及活菌数变化

由图2A可知,在发酵过程中5组酸面团的pH值逐渐降低,TTA逐渐上升,且均在16 h后趋于平缓,最终pH值在4.07~4.71,TTA在7.28~11.97 mL。与对照组相比,添加了发酵豆乳的4组酸面团具有较低的pH值和较高的TTA,其中Lp203组的pH值最低,为4.07,复配组的TTA最高,为11.97 mL。由图2B可知,在发酵24 h后5组酸面团的活菌数均显著升高,添加了发酵豆乳的4组酸面团的活菌数均显著高于对照组,其中Lp203组的活菌数最高,为8.94 (lg (CFU/g)),说明乳酸菌由豆乳带入面团后仍保持了良好的生长状态,在面团中保持了旺盛的代谢产酸能力。

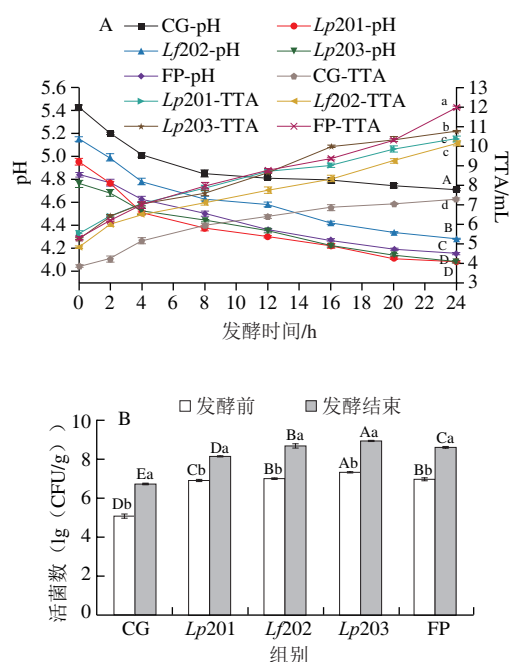


Fig. 2 pH, TTA and viable bacterial count of sourdough added with fermented soy milk with different LAB strains
A. pH, TTA and viable bacterial count; B.活菌数。图A同一指标字母不同表示不同组别差异显著 ($P < 0.05$); 图B小写字母不同表示同组不同发酵阶段差异显著,大写字母不同表示同一发酵阶段不同组别差异显著 ($P < 0.05$)。图2同。

2.3 发酵豆乳酸面团的有机酸变化

表3为添加不同发酵豆乳的酸面团在发酵前后的有机酸(乳酸、乙酸)含量。5组酸面团在发酵24 h后的乳酸和乙酸含量均显著升高,而添加了发酵豆乳的4组酸面团乳酸和乙酸含量均显著高于对照组 ($P < 0.05$),这与pH值和TTA结果一致。其中Lp203组的乳酸含量最高,为18.57 mg/g, Lf202组的乙酸含量最高,为3.81 mg/g,而复配组中和了各菌株的优势,达到了较好的有机酸平衡。由表3可知,5组酸面团的发酵熵存在显著差异, Lf202组和复配组的发酵熵较低。发酵熵为乳酸与乙酸的比值,是与发酵面制品的风味密切相关的参数之一,其数值一般在4~12之间最佳^[23],面粉类型和温度是影响

面团发酵过程中两种酸形成的主要因素^[24]。图2和表3均表明发酵豆乳中的乳酸菌在面团中进一步酸化产生了有机酸,作为发酵主要代谢物的有机酸有两个重要功能,一是延长保质期,有机酸产生的酸性环境可以改善淀粉酶活性,延缓淀粉回生并延缓产品老化速度^[25];二是提高感官质量,有机酸促进蛋白质水解产生氨基酸,这些氨基酸则是最终某些风味物质的前体物质^[26]。此外,它们可以为产品提供更高的弹性、延展性和比容^[25]。

Su Xueqian等^[25]通过在配料中添加醋酸、乳酸等有机酸提高面包质量,所有有机酸都使面包的比容增加、pH值和硬度降低。

面团中乳酸与乙酸含量的不同可能是因为各菌株的发酵类型不同,不同发酵类型的乳酸菌会产生不同的代谢产物,这与周一鸣等^[8]的研究结果一致。发酵乳杆菌作为一种专性异型发酵菌株^[27],主要通过磷酸戊糖途径发酵,发酵产物除乳酸外,还产生乙醇、乙酸和二氧化碳等多种物质,因而L_f202在发酵过程中产生的乙酸显著高于其他菌株;而植物乳杆菌和戊糖乳杆菌均属于兼性异型发酵菌株^[28],它们主要利用己糖(如D-葡萄糖、D-果糖)和戊糖(如D-木糖、L-阿拉伯糖)在发酵的过程中产生乳酸,其具有的磷酸酮醇酶又能够分解戊糖产生少量的乙酸。

表3 发酵豆乳面团中的有机酸变化

Table 3 Changes of organic acids in sourdough added with fermented soymilk

组别	乳酸/(mg/g)		乙酸/(mg/g)		24 h发酵熵
	0 h	24 h	0 h	24 h	
CG	—	7.46±0.07 ^c	—	0.94±0.11 ^d	7.93±0.15 ^c
L _p 201	2.89±0.08 ^b	17.80±0.17 ^b	—	1.42±0.08 ^c	12.57±0.34 ^d
L _f 202	2.40±0.09 ^c	13.91±0.16 ^d	—	3.81±0.17 ^a	3.65±0.11 ^c
L _p 203	3.75±0.12 ^a	18.57±0.18 ^a	—	1.82±0.08 ^c	10.21±0.26 ^b
FP	3.08±0.12 ^b	15.76±0.16 ^c	—	3.25±0.11 ^b	4.84±0.14 ^d

注:同列字母不同表示差异显著(P<0.05);—未检出。下同。

2.4 不同乳酸菌发酵豆乳对馒头质构、比容及高径比的影响

表4为添加不同乳酸菌发酵豆乳馒头的质构、比容和高径比测定结果。与对照组相比,添加了发酵豆乳的馒头硬度和咀嚼性均显著降低,而弹性、比容和高径比均显著增大(P<0.05),说明发酵豆乳的添加使得馒头内部结构更加柔软,富有弹性,体积更大,且更加挺拔。这是因为乳酸菌发酵产酸能够促进酵母的生长发酵,增加了面团中二氧化碳的数量^[29],同时产生的有机酸可以软化面筋,提高面团延展性和膨胀性^[30]。这与武盟^[31]的研究结果一致,其研究发现添加豆粉会降低面包的比容,而添加经乳酸菌发酵的豆粉则会显著提高产品面包的比容。

在添加发酵豆乳的4组样品中,复配组和L_f202组馒头的弹性和比容均较高,这是因为发酵乳杆菌属于专性异型发酵菌株,其在发酵过程中会产生二氧化碳气体,而植物乳杆菌和戊糖乳杆菌属于兼性异型发酵,发酵过程中不产气,因而L_f202组和复配组馒头体积较大,具有较高的比容和弹性^[28]。

表4 馒头的基本性质

Table 4 Basic properties of steamed buns

组别	硬度/N	弹性/mm	咀嚼性/mj	比容/(mL/g)	高径比
CG	27.01±0.76 ^c	7.90±0.39 ^b	154.99±4.75 ^a	2.32±0.03 ^c	0.57±0.02 ^c
L _p 201	24.77±0.74 ^b	8.49±0.19 ^a	124.04±4.01 ^c	2.56±0.06 ^b	0.63±0.02 ^b
L _f 202	24.48±0.55 ^b	8.72±0.11 ^a	135.75±3.10 ^b	2.68±0.04 ^a	0.64±0.01 ^a
L _p 203	23.01±1.39 ^b	8.35±0.24 ^b	116.12±2.74 ^a	2.59±0.05 ^b	0.62±0.01 ^b
FP	24.16±0.53 ^b	8.91±0.52 ^a	135.04±3.92 ^b	2.65±0.06 ^b	0.61±0.01 ^b

2.5 不同乳酸菌发酵豆乳馒头的感官评定

图3为馒头的感官评定结果。添加了发酵豆乳的4组馒头在外观、内部结构、风味、口感和整体可接受度的得分均高于对照组,这是因为发酵豆乳的添加使得馒头组织变得更加柔软且有弹性,风味物质种类增多,风味和口感更好。与添加豆粉的馒头相比,发酵豆乳是采用磨浆过筛的豆乳制作而成,馒头组织相对更细腻;且豆乳经乳酸菌发酵后豆腥味有所缓解,改善了因豆类物质加入对馒头感官品质带来的负面影响。4组发酵豆乳馒头的色泽得分均略低于对照组,这是因为豆乳的黄色降低了馒头的白度和光泽度。与单菌株发酵豆乳馒头相比,复配组馒头具有最高的整体可接受度,这也与质构测定的结果一致。

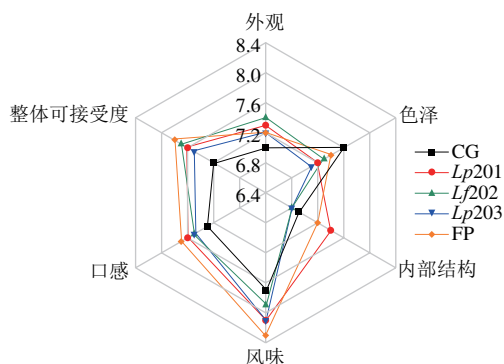


图3 不同乳酸菌发酵豆乳馒头的感官评定

Fig. 3 Sensory evaluation of steamed buns added with fermented soymilk with different LAB strains

2.6 不同乳酸菌发酵豆乳对馒头风味的影响

由表5可知,在5组馒头样品中共检测出48种挥发性风味物质,主要包括醇类、醛类、酯类、酸类、酮类和其他类化合物。5组样品的风味物质种类分别为30、40、35、36种和47种,其中复配组馒头的风味物质相对含量和种类最多,分别为71.62%和47种,说明添加发酵豆乳

可以增加馒头中风味物质的种类,提升馒头的香气和风味。有25种化合物共同存在于5种馒头中,主要的风味物质为醇类(乙醇、异戊醇、正己醇等)、醛类(正己醛、正壬醛等)和酸类(乙酸、己酸等),这些物质具有花香和水果类的风味,为馒头提供了更丰富的气味。

醇类是5组馒头样品中种类最多且含量最高的化合物,其中乙醇、异戊醇和正己醇相对含量最高,这与李晓敏^[32]、王聪^[33]等的研究结果一致。醇类物质中很多具有酒香味、水果香味和花香味,例如异戊醇具有苹果和白兰地的香气,正己醇具有水果香味,正庚醇呈现水果香和花香,正壬醇具有玫瑰花香和果香^[34]。发酵豆乳馒头的醇类物质更多可能与其氨基酸含量有关,为乳酸菌和酵母菌提供了更充足的发酵底物^[35];此外,发酵豆乳中的乳酸菌对酵母菌生长具有很好的促进作用^[36],因而产生的醇类物质也更多。

醛类物质具有较为浓郁的香气^[19],与对照组相比,添加了发酵豆乳的4组样品中醛类物质相对含量均有一定程度的增加,其中复配组中共检测到10种醛类物质,比对照组多3种,且相对含量增加了51.16%。正己醛是5组样品中含量最高的醛类物质,它是豆类中的不饱和脂肪酸在内源性过氧化物酶和脂氧合酶的催化下生成的氧化产物^[37]。过高的己醛含量被认为是豆腥味的主要来源,研究证明^[4]乳酸菌发酵会显著降低豆乳中的正己醛含量,从而缓解不良风味。而具有水果香味的正庚醛未在Lj202组中检测到,这可能与其它代谢途径不同有关^[38]。

添加发酵豆乳后,馒头中的酮类和酯类物质含量和数量均显著增加,其中复配组最多,共检测出3种酮类和7种酯类,相对含量为3.43%和2.68%。这两类物质的香气较为持久,其中3-羟基-2-丁酮具有浓郁的奶油香气,2-辛酮有牛奶、蘑菇的香味,均是发酵乳中的主要香气成分^[39]。乳酸菌在豆乳中生长代谢产生的有机酸不仅赋予产品酸味,同时有机酸还是许多风味物质的前体物质,如与醇类酯化生成酯类等^[19]。添加发酵豆乳的馒头中酸类物质的含量普遍低于对照组,而酯类物质含量均高于对照组,这可能是由于酸类物质被用来合成其他风味物质。酯类物质因为阈值较低,其气味更容易被察觉,如具有酒香味的辛酸乙酯和呈现香蕉气味的乙酸乙酯^[19]。综上所述,发酵豆乳的添加可以改善馒头的风味,其中复配组效果最好,不同菌株的协同发酵使形成的代谢产物种类更丰富,对于改善馒头风味具有明显优势。

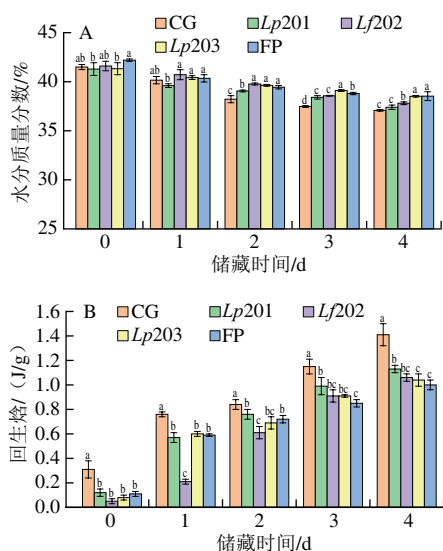
表5 馒头的挥发性风味物质含量

序号	保留时间/min	挥发性风味物质	相对含量/%				
			CG	Lp201	Lj202	Lp203	FP
醇类							
1	4.37	乙醇	12.48	14.87	13.76	15.02	14.95
2	8.10	异丁醇	1.52	2.29	2.89	2.17	2.62
3	11.59	异戊醇	7.45	10.02	15.41	14.34	11.16
4	12.09	正戊醇	0.45	0.61	0.65	0.67	0.58
5	13.97	2-甲基戊醇	—	0.13	—	—	0.14
6	14.47	2-十二醇	—	0.26	—	—	0.26
7	15.17	正己醇	5.52	6.18	6.83	6.08	6.48
8	16.80	1-辛烯-3-醇	1.02	1.16	1.25	1.05	2.98
9	16.92	正庚醇	—	0.45	—	0.42	0.38
10	17.39	异辛醇	—	1.33	—	1.10	1.12
11	18.15	2-十四醇	—	0.27	—	0.21	0.39
12	18.57	2,3-丁二醇	0.19	0.27	0.34	0.21	0.29
13	19.53	正壬醇	—	0.11	—	0.71	0.28
14	19.80	顺-3-壬烯-1-醇	0.15	0.19	—	—	0.14
15	22.08	苯乙醇	1.16	1.96	1.25	2.12	3.07
		总计	29.92	40.1	42.38	44.1	44.78
醛类							
1	7.47	正己醛	2.07	3.16	3.06	3.36	3.11
2	9.02	正戊醛	—	—	0.15	—	0.11
3	10.24	正庚醛	0.79	0.88	—	0.78	0.88
4	15.80	正壬醛	1.48	2.31	1.12	1.58	2.31
5	16.39	(E)-2-辛烯醛	—	0.14	—	0.13	0.14
6	17.31	苯甲醛	0.17	0.18	0.21	0.19	0.20
7	17.47	癸醛	1.24	1.27	1.21	1.11	1.27
8	17.81	苯乙醛	—	—	0.11	—	0.16
9	17.99	(E)-2-壬烯醛	0.16	0.31	0.23	0.42	0.31
10	23.19	椰子醛	0.11	0.11	0.53	0.49	0.61
		总计	6.02	8.36	6.62	8.06	9.10
酮类							
1	13.27	2-辛酮	—	0.37	—	—	0.29
2	13.58	3-羟基-2-丁酮	1.89	2.82	3.12	2.26	2.82
3	14.62	甲基庚烯酮	—	0.28	—	0.16	0.32
		总计	1.89	3.47	3.12	2.42	3.43
酯类							
1	4.08	乙酸乙酯	—	—	0.22	—	0.78
2	8.09	乙酸异戊酯	—	—	0.22	—	0.17
3	8.49	2-甲基丁基乙酸酯	—	—	—	0.21	0.13
4	11.09	正己酸乙酯	—	—	0.12	—	—
5	13.56	乳酸乙酯	0.13	0.68	0.39	0.79	0.46
6	16.47	辛酸乙酯	—	0.17	0.43	0.11	0.17
7	16.96	甲酸庚酯	—	—	0.55	—	0.36
8	23.15	肉豆蔻酸异丙酯	1.27	0.32	0.60	—	0.61
		总计	1.4	1.17	2.53	1.11	2.68
酸类							
1	15.81	乙酸	6.03	3.12	5.32	2.74	3.13
2	18.99	丁酸	1.97	0.86	0.48	0.79	0.58
3	21.03	戊酸	0.71	0.27	0.19	0.35	0.32
4	21.32	己酸	4.02	2.88	2.45	2.63	2.21
5	22.68	庚酸	0.74	0.25	0.27	0.21	0.20
6	23.69	辛酸	1.06	0.49	0.58	0.62	0.68
7	25.96	壬酸	0.26	0.30	0.27	0.32	0.31
8	27.14	正癸酸	0.75	0.27	0.38	0.30	0.31
		总计	15.54	8.44	9.94	7.96	7.74
其他							
1	11.70	2-戊基呋喃	2.56	0.82	—	0.82	0.54
2	22.05	2,6-二叔丁基对甲苯酚	5.28	1.84	1.68	4.82	2.84
3	27.02	呋喃	0.34	0.16	0.25	—	0.16
4	29.32	4-叔辛基苯酚	—	—	0.72	0.13	0.35
		总计	8.18	2.82	2.65	5.77	3.89

2.7 不同乳酸菌发酵豆乳对馒头储藏特性的影响变化
由图4A可知,随着贮藏时间的延长,5组馒头芯

的水分含量均呈逐渐下降的趋势，且在贮藏前期水分下降较快。在0 d，对照组馒头芯的水分含量与其他4组差异不显著 ($P>0.05$)，但在4 d，其水分质量分数最低，为37.08%，显著低于复配组、*Lp203*和*Lf202*组 ($P<0.05$)；而复配组的水分含量最高，为38.53%。在馒头贮藏期间，水分的丧失会引起一系列的变化，诸如淀粉老化、表皮变硬、特征风味丧失等。添加发酵豆乳后馒头的保水性的提高，这主要是因为豆乳中的可溶性膳食纤维能与面团中的面筋蛋白及淀粉相互融合，形成黏性物质吸附和截留水分子^[40]，从而提高面团的水合能力和膨胀能力。

回生焓值可以准确代表支链淀粉重结晶和淀粉回生的程度，是衡量面制品老化的重要指标，回生焓值越高说明老化程度越严重^[41]。由图4B可知，随着贮藏时间的延长，5组馒头的回生焓值均呈逐渐增大的趋势，且在贮藏前期增加速率较快。在贮藏4 d期间，添加了发酵豆乳的4组样品回生焓值均显著低于对照组 ($P<0.05$)；其中复配组的回生焓值最低，比对照组降低了29.08%，为1.00 J/g，说明其延缓馒头老化的效果最好，这与水分含量结果一致。刘若诗^[42]研究发现，乳酸菌在馒头中的抗老化作用与菌种及酸化程度都有关系。添加发酵豆乳后面团呈酸性环境，加速了支链淀粉的水解，形成了更多的低分子质量的糊精，这有助于抑制支链淀粉的回生老化，即使使用化学酸化的面团制作的面包，其淀粉重结晶速度也会变慢^[42]。此外，不同乳酸菌抑制淀粉老化的效果也存在一定差异，这与其产酸性能不同有关，也与乳酸菌代谢产胞外多糖的能力有关^[43]。综上所述，复配组馒头的老化速度最慢。



字母不同表示同一时间不同组别差异显著 ($P<0.05$)。

图4 不同乳酸菌发酵豆乳馒头储藏期水分含量 (A) 和回生焓值 (B) 的变化

Fig. 4 Changes in moisture content (A) and retrogradation enthalpy (B) of steamed buns added with fermented soymilk with different LAB strains during storage

3 结论

本研究将不同乳酸菌发酵豆乳用于馒头制备，提高馒头品质并丰富产品风味。结果显示，3株乳酸菌在豆乳基质中有良好的共生关系，其中复配乳酸菌发酵豆乳具有更高的TTA和活菌数。与对照组相比，添加发酵豆乳的面团在发酵后TTA、活菌数和有机酸含量均显著提高 ($P<0.05$)。添加发酵豆乳的馒头弹性、比容和高径比均显著提高，而硬度和咀嚼性均显著降低 ($P<0.05$)，且馒头的外观、内部结构、风味、口感等感官品质均得到显著改善，其中复配组馒头的整体可接受度最高。5组馒头样品中共检测出48种挥发性风味物质，有25种化合物共同存在于5种馒头中，主要的风味物质为醇类、醛类和酸类，这些物质为馒头提供了更丰富的气味，其中复配组的风味物质种类和相对含量均最多。贮藏期结果显示，发酵豆乳的添加显著降低了馒头的水分损失率和回生焓值 ($P<0.05$)，提高了馒头的持水性，延缓了馒头的老化，其中复配组抗老化效果最佳。综上所述表明添加发酵豆乳能够改善面团发酵特性和馒头品质，本研究为开发发酵豆乳馒头提供了理论参考。

参考文献:

- CUI R B, FEI Y C, ZHU F. Physicochemical, structural and nutritional properties of steamed bread fortified with red beetroot powder and their changes during breadmaking process[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 1-10. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.132547.
- CARLA G, MINNAMARI E, ANABELA R, et al. Yogurt as a starter in sourdough fermentation to improve the technological and functional properties of sourdough-wheat bread[J]. Journal of Functional Foods, 2022, 88: 104877. DOI:10.1016/j.jff.2021.104877.
- 张娟, 周媛, 张晶晶, 等. 熟豆浆馒头与传统小麦粉馒头的感官品质及营养成分对比[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(2): 125-128. DOI:10.3969/j.issn.1674-506X.2021.02-019.
- 徐寅, 黄玉军, 陈霞, 等. 牛乳含量对发酵豆乳风味成分的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(4): 1-5. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20111126-277.
- 陈霞, 邵童, 朱展鹏, 等. 酸面团中乳酸菌的多样性及筛选标准研究[J]. 美食研究, 2022, 39(1): 86-89. DOI:10.19913/j.cnki.2095-8730msyj.2022.01.12.
- CAPONIO G R, DIFONZO G, DE GENNARO G, et al. Nutritional improvement of gluten-free breadsticks by olive cake addition and sourdough fermentation: how texture, sensory, and aromatic profile were affected?[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 830932. DOI:10.3389/fnut.2022.830932.
- KEWUYEMII Y O, KESA H, ADEBO O A. Biochemical properties, nutritional quality, colour profile and techno-functional properties of whole grain sourdough and malted cowpea and quinoa flours[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 57(3): 1527-1543. DOI:10.1111/ijfs.15512.
- 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201209-107.
- GANZLE M G, LOPONEN J, GOBBETTI M. Proteolysis in sourdough fermentations: mechanisms and potential for improved

- bread quality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2008, 19(10): 513-521. DOI:10.1016/j.tifs.2008.04.002.
- [10] 唐宇. 用于发酵豆乳的乳酸菌筛选及发酵豆乳抗氧化性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2018.
- [11] 苏珊, 徐瑞霞, 张顺, 等. 乳酸菌发酵豆渣酸面团对馒头面团特性和馒头品质的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(11): 2218-2228. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2022.11.2218.
- [12] 张娟, 张中兴, 朱凤林, 等. 全豆营养馒头的成分测定与评价[J]. 大豆科学, 2022, 41(2): 216-221. DOI:10.11861/j.issn.1000-9841.2022.02.0216.
- [13] 何晓赟. 乳酸菌发酵类型对老酵馒头风味特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [14] 陈佳芳, 汤晓娟, 蒋慧, 等. 不同高产胞外多糖乳酸菌发酵荞麦酸面团对面团筋网络结构和面包烘焙特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 1-6. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201806001.
- [15] 孙祥祥, 刘长虹, 张煌. 杂粮馒头的开发与发展前景[J]. 粮食科技与经济, 2017, 42(5): 61-64. DOI:10.16465/j.gste.cn431252ts.20170517.
- [16] 黄玉军, 周帆, 于俊娟, 等. 高转化大豆异黄酮乳酸菌的筛选及在豆乳中的发酵特性[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(3): 157-162. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.03.026.
- [17] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品微生物学检验 乳酸菌检验: GB 4789.35—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品酸度的测定: GB 5009.239—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [19] 马子琳. 产单宁酶乳酸菌在豆类酸面团馒头中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [20] 林江涛, 孙灵灵, 黄美琳, 等. 小麦粉受热对面团流变学特性及馒头品质的影响[J]. 现代食品科技, 2021, 37(10): 162-170. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.10.0070.
- [21] 杨新宇. 冻干乳酸菌酸面团发酵剂的制备及在馒头中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- [22] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [23] CODA R, NIONELLI L, RIZZELLO C G, et al. Spelt and emmer flours: characterization of the lactic acid bacteria microbiota and selection of mixed starters for bread making[J]. Journal of Applied Microbiology, 2010, 108(3): 925-935. DOI:10.1111/j.1365-2672.2009.04497.x.
- [24] HANSEN A, SCHIEBERLE P. Generation of aroma compounds during sourdough fermentation: applied and fundamental aspects[J]. Trends Food Science Technology, 2005, 16: 85-94. DOI:10.1016/j.tifs.2004.03.007.
- [25] SU X Q, WU F F, ZHANG Y Q, et al. Effect of organic acids on bread quality improvement[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 267-275. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.11.011.
- [26] MOHSEN S M, ALY M H, ATTIA A.A, et al. Effect of sourdough on shelf life, freshness and sensory characteristics of Egyptian Balady bread[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2016, 4(2): 39-45. DOI:10.12691/jaem-4-2-3.
- [27] PAHLOW G, MUCK R E, DRIEHUIS F, et al. Microbiology of ensiling[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015: 31-93.
- [28] MUCK R E. Silage microbiology and its control through additives[J]. Revista Brasileira De Zootecnia, 2010, 39(4): 183-191. DOI:10.1590/S1516-35982010001300021.
- [29] 苏晓琴, 张可欣, 黄卫宁, 等. 高 γ -氨基丁酸绿豆酸面团面包营养与烘焙特性[J]. 食品工业科技, 2016, 37(13): 340-345. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.13.062.
- [30] KETABI A, SOLEIMANIAN Z S, KADIVAR M, et al. Production of microbial exopolysaccharides in the sourdough and its effects on the rheological properties of dough[J]. Food Research International, 2008, 41(10): 948-951. DOI:10.1016/j.foodres.2008.07.009.
- [31] 武盟. 高产 α -半乳糖苷酶乳酸菌的筛选及其在三种豆粉酸面团面包中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [32] 李晓敏, 韩伟, 黎琪, 等. 传统酸面团菌群结构及其酵制馒头风味物质分析[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 162-170. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200109-107.
- [33] 王聪, 吕莹果, 陈洁. 不同发酵剂发酵馒头风味成分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(18): 261-267. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020090240.
- [34] 赵畅雯, 潘晓倩, 成晓瑜, 等. 产香酵母发酵面团挥发性风味物质分析[J]. 中国酿造, 2023, 42(1): 147-154. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2023.01.025.
- [35] AKKAD R, KHARRAZ E, HAN J. Characterisation of the volatile flavour compounds in low and high tannin faba beans (*Vicia faba* var. minor) grown in Alberta, Canada[J]. Food Research International, 2019, 120: 285-294. DOI:10.1016/j.foodres.2019.02.044.
- [36] GOBBETTI M. The sourdough microflora: interactions of lactic acid bacteria and yeasts[J]. Trends in Food Science & Technology, 1998, 9(7): 267-274. DOI:10.1016/S0924-2244(98)00053-3.
- [37] JIANG Z, PULKKINEN M, WANG Y, et al. Faba bean flavour and technological property improvement by thermal pre-treatments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 68: 295-305. DOI:10.1016/j.lwt.2015.12.015.
- [38] KATINA K, HEINIO R L, AUTIO K, et al. Optimization of sourdough process for improved sensory profile and texture of wheat bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2006, 39(10): 1189-1202. DOI:10.1016/j.lwt.2005.08.001.
- [39] 宗丽娜, 瞿恒贤, 张龙飞, 等. 不同混合发酵方式对发酵豆乳特征风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 102-110. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033522.
- [40] LIU C M, LIANG R H, DAI T T, et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57(6): 55-61. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.01.015.
- [41] 詹冬玲, 任玉雪, 闵伟红, 等. 面包老化机理及其分析技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(23): 353-355; 360. DOI:CNKI:SUN:SPKJ.0.2013-23-090.
- [42] 刘若诗. 乳酸菌酸面团发酵剂的制备及其发酵烘焙特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [43] KORAKLI M, PAVLOVIC M, GANZLE M, et al. Exopolysaccharide and kestose production by *Lactobacillus sanfranciscensis* LTH2590[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(4): 2073-2079. DOI:10.1128/AEM.69.4.2073-2079.2003.