DOI:10.12441/spyswjs.20250115002 [文章编号] 1673-1689(2025)08-0069-10

优良乳酸菌和酵母菌发酵剂的筛选及混合发酵对面包面团品质的影响

陈雨萌[1] 王伟军[2] 沈淑铃[1] 李延华[1,3*] 马敬敬[1] 黄梦涵[1] 刘宇航[1]

(1. 浙江工商大学食品与生物工程学院,浙江 杭州 310018; 2. 浙江农林大学暨阳学院,浙江 诸暨 311800; 3. 浙江省食品微生物重点实验室,浙江 杭州 310018)

摘要:【目的】乳酸菌和酵母菌协同用于酸面团的发酵可更好满足烘焙食品发酵剂的工业生产需求。【方法】通过测定发酵过程中活菌数、pH、吸光度、面团高度增加量和乙醇体积分数,考察各菌发酵过程中耐酸、产酸、产酶、产气和产醇的能力。通过测定面包面团的微生物数量、pH、拉伸面积、延伸度、硬度、黏性、储能模量(G')、损耗模量(G'')等,评价不同发酵菌种对面包面团总滴定酸度(TTA)、拉伸特性、质构特性、流变特性的影响。【结果】副干酪乳酪杆菌(*Lacticaseibacillus paracasei*)LG0260、植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)LG1034、乳酸乳球菌(*Lactococcus lactis*)LG0827以及单孢酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)J2808和单孢酿酒酵母J2815在整个发酵过程都保持良好的产酸速率和产酸能力。其中,副干酪乳酪杆菌LG0260、马克思克鲁维酵母(*Kluyveromyces marxianus*)J2828、乳酸乳球菌LG0827分别表现出最高的植酸酶酶活性(23.21 mU/mL)、淀粉酶酶活性(0.82 U/mL)和蛋白酶酶活性(2.51 U/mL)。此外,单孢酿酒酵母J2808与副干酪乳酪杆菌LG0260共培养发酵制备的液体酸面团菌种MY2L1能够有效改善面包面团的拉伸面积和延伸度(最高分别为242 cm^2和181 mm)。【结论】与商用安琪酵母相比,液体菌种对于酸面团硬度和黏性的影响较大;混合发酵的液体菌种使面团的流体性质增强。该研究可为发酵II型酸面团发酵剂的挖掘和酸面团的品质提升提供参考。

关键词:酸面团;乳酸菌;酵母菌;发酵特性;代谢特性

Screening of Excellent Lactic Acid Bacteria and Yeast Fermentation Agents and Effects of Mixed Fermentation on the Quality of Bread Dough

CHEN Yumeng[1] *WANG Weijun*[2] *SHEN Shuling*[1] *LI Yanhua*[1,3*] *MA Jingjing*[1] *HUANG Menghan*[1] *LIU Yuhang*[1]

(1. School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 2. Jiyang College, Zhejiang A&F University, Zhuji 311800, China; 3. Key Laboratory for Food Microbial Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: [**Objective**] The research on the synergistic use of lactic acid bacteria and yeast in sourdough is beneficial for meeting the industrial production demand of fermentation agents for baking food. [**Method**] This study investigated the acid tolerance, acid production, enzyme production, gas production, and alcohol production abilities of various strains during the fermentation process by measuring the microbial count, pH, stretching area, elongation, hardness, viscosity, storage modulus (G'), loss modulus (G''), etc. of bread dough. The effects of

基金项目:浙江省科技厅重点研发项目(2019C02091)。

通信作者:李延华(1979—),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事微生物发酵、食品加工研究。E-mail:liyanhua607@163.com

收稿日期:2025-01-15 **修回日期:**2025-03-28

different fermentation agents on the total titratable acidity (TTA), stretching characteristics, texture characteristics, and rheological properties of bread dough were investigated. [**Result**] *Lacticaseibacillus paracasei* LG0260, *Lactiplantibacillus plantarum* LG1034, *Lactococcus lactis* LG0827, as well as *Saccharomyces cerevisiae* J2808 and *S. cerevisiae* J2815, maintained good acid production rates and abilities throughout the fermentation process. Especially, *L. paracasei* LG0260, *Kluyveromyces marxianus* J2828, and *L. lactis* LG0827 exhibited the highest phytase enzyme activity (23.21 mU/mL), amylase enzyme activity (0.82 U/mL), and protease enzyme activity (2.51 U/mL), respectively. In addition, the fermentation agent MY2L1 prepared by co-culture fermentation of *S. cerevisiae* J2808 and *L. paracasei* LG0260 effectively improved the stretching area and elongation of bread dough, with the highest values of 242 cm^2 and 181 mm, respectively. [**Conclusion**] Liquid strains have greater impacts on the hardness and viscosity of sourdough than commercial Angel yeast. The mixed fermentation with liquid strains enhances the fluid properties of the dough. This study can provide technical reference for mining type II sourdough fermentation agents and improving sourdough quality.

Keywords: sourdough; lactic acid bacterium; yeast; fermentation characteristic; metabolism characteristic

酸面团是由小麦粉和水混合，经乳酸菌和酵母菌等微生物发酵后的产物，酸面团发酵是传统、可持续的技术[1]。在酸面团发酵过程中，乳酸菌和酵母菌之间存在协同作用，产生这种相互作用的原因是乳酸菌代谢产生有机酸，降低了面团的pH，在酸性环境下酵母菌开始乙醇发酵，同时乳酸菌还会促进酸面团的蛋白质水解，所产生的丙酮酸、二羧酸、氨基酸和脂肪酸等代谢产物促进了酵母菌的生长[2-3]。然而，少数乳酸菌和酵母菌之间还会存在拮抗作用[4]，在酸面团发酵过程中酶制剂对产品质地、风味和营养有重要影响。α-淀粉酶可以参与淀粉的水解，释放麦芽糖、葡萄糖、麦芽糊精等可发酵糖[5]。此外，谷物蛋白质的降解始于酸性环境激活的蛋白酶，将大分子蛋白质分解为寡肽；随后，再由微生物自身的肽酶将寡肽进一步分解为游离氨基酸[5-6]。另一种对酸面团品质有影响的酶为植酸酶，会导致谷物中抗营养因子植酸的降解[7]。

目前生产使用的大多是乳酸菌发酵酸面团配合面包酵母发酵制备的面包面团。对于酸面团的研究大多数停留在乳酸菌发酵酸面团，并且是传统的发酵I型酸面团，而对乳酸菌和酵母菌共同发酵II型酸面团的研究比较薄弱。II型酸面团是工业化的液态酸面团，相比于I型酸面团，II型酸面团操作更简便、生产效率更高、发酵条件便于控制[8]。然而在实际应用过程中，只有小部分优势菌株能适应II型酸面团的环境[9]。因此，研究不同乳酸菌和酵母菌发酵剂在II型酸面团中的应用特性，可为工业酸面团发酵剂菌种的挖掘提供参考，并有利于满足大规模生产酸面团的需求。

1 材料与方法

1.1 材料

乳酸菌和酵母菌为作者所在实验室保藏菌种。瑞士乳杆菌（*Lactobacillus helveticus*）LG4316、副干酪乳酪杆菌LG0260、鼠李糖乳酪杆菌（*Lacticaseibacillus rhamnosus*）LG0262、植物乳植杆菌LG1034、乳酸片球菌（*Pediococcus acidilactici*）LG0259，乳酸乳球菌LG0827；单孢酿酒酵母J2808、单孢酿酒酵母J2815、马克思克鲁维酵母J2828、马克思克鲁维酵母J2853；天然鲁邦种菌种：作者所在实验室保藏菌种。

MRS琼脂培养基、MRS肉汤培养基、胰蛋白胨、酵母浸粉、可溶性淀粉、酪蛋白：上海阿拉丁生化科技股份有限公司；无水葡萄糖、植酸钠、钼酸铵、丙酮、乙酸钠、三氯乙酸、碘、碘化钾、*L*-酪氨酸、碳酸钠、氯化钾、七水硫酸铵等：分析纯，上海麦克林生化科技有限公司；商业安琪酵母：安琪酵母股份有限公司；中筋面粉：中粮集团有限公司。

1.2 仪器设备

电子精密天平：PL-2002型，瑞士梅特勒-托利多公司；电子分析天平：AL-104型，瑞士梅特勒-托利多公司；冷冻离心机：H1850R型，湘仪仪器有限公司；超净工作台：SW-CJ-1FD型，苏州安泰空气技术有限公司；立式高压灭菌锅：YXQ-LS-70A型，上海博迅实业有限公司；恒温恒湿培养箱：BSC250型，上海双旭电子有限公司；恒温振荡培

养箱：SKY-200B型，上海苏昆仪器仪表有限公司；酶标仪：1200-6210型，美国安捷伦公司；pH计：DELTA-320型，瑞士梅特勒-托利多公司；紫外分光光度计：UV-2600型，日本岛津公司；布拉本德面团拉伸仪：MD150型，北京东孚久恒仪器公司；质构仪：TA.XT Express型，英国Stable Micro System公司；TA流变仪：AR-G2型，美国TA Instrument公司。

1.3　乳酸菌和酵母菌的生长曲线测定

取活化好的菌悬液按体积分数1%加入MRS或YPD液体培养基中，分别置于37 ℃恒温静置培养箱和28 ℃、180 r/min的恒温振荡培养箱中培养，每隔3 h取样，采用平板菌落计数法进行测定，以时间为横坐标、菌落数的对数为纵坐标，绘制对应的生长曲线。乳酸菌和酵母菌菌数测定分别按照GB 4789.35—2023[10]和GB 4789.15—2016[11]进行。

1.4　乳酸菌和酵母菌的产酸特性测定

取活化好的乳酸菌和酵母菌菌悬液以体积分数5%接种至MRS和YPD液体培养基中，分别置于37 ℃和28 ℃培养，每隔3 h取5 mL发酵液用于测定发酵液pH。以培养时间为横坐标、菌液对应的pH为纵坐标，得到乳酸菌和酵母菌的产酸速率曲线[12]。

1.5　酵母菌的耐酸能力测定

参照韩岳峰等[13]的方法，配制YPD液体培养基，测定不同pH的菌液在600 nm处的OD值，通过抑制率反映酵母菌在不同pH下的生长情况及对酸性条件的耐受性，按式(1)计算抑制率。

$$R=(A_b-A_n)/A_b\times100\% \quad (1)$$

式中：

R——抑制率，%；

A_b——最适pH下菌液的吸光度；

A_n——不同pH下菌液的吸光度。

1.6　酵母菌的发酵力和产醇能力测定

分别参考Chevallier等[14]和李岭卓等[15]的方法测定酵母菌的发酵力和产醇能力。

1.7　乳酸菌、酵母菌的产酶特性分析

分别参照文献[16-18]的方法测定发酵液的植酸酶、α-淀粉酶、蛋白酶在发酵液中24 h的酶活性。

1.8　面包面团的制备

根据乳酸菌和酵母菌单菌种的发酵特性结果，选用单孢酿酒酵母J2808分别与副干酪乳酪杆菌LG0260、植物乳植杆菌LG1034、乳酸乳球菌LG0827发酵制备液体酸面团菌种MY2L1、MY2L2、MY2L3，液体酸面团菌种的制备参照文献[19]，酸面团配料组成见表1。结合文献[18]的方法制备面包面团，并与天然鲁邦种菌种、商业安琪酵母制备的酸面团进行比较。液体酸面团菌种（MY2L1、MY2L2、MY2L3、鲁邦种菌种）和安琪酵母（质量分数1%）发酵得到的酸面团分别命名为DMYL1、DMYL2、DMYL3、DLB、DAQ，DCK0为未发酵酸面团。将制备好的酸面团置于相对湿度85%、温度30 ℃的醒发箱内分别发酵60 min和120 min。

1.9　面团微生物数量、pH和TTA测定

取10 g酸面团，加入90 mL无菌生理盐水混合均匀。乳酸菌计数采用MRS琼脂倾注法，酵母菌计数采用YPD琼脂培养基平板涂布法，分别置于37 ℃和28 ℃恒温培养箱中培养48 h，按菌落形成单位对微生物进行计数，单位为CFU/mL。

使用手持pH计测定混合液的pH。用0.1 mol/L的NaOH标准溶液将混合液pH调至

表1　不同发酵剂菌株制备面包面团的配料组成

Table 1　Ingredient composition of bread dough prepared with different fermentation agents　　单位：g

样品	配料质量							
	高筋粉	水	盐	MY2L1	MY2L2	MY2L3	鲁邦种菌种	安琪酵母
DMYL1	182.2	97.8	2	40	—	—	—	—
DMYL2	182.2	97.8	2	—	40	—	—	—
DMYL3	182.2	97.8	2	—	—	40	—	—
DLB	182.2	97.8	2	—	—	—	40	—
DAQ	200	120	2	—	—	—	—	2
DCK0	200	120	2	—	—	—	—	—

注：“—”表示未添加。

8.6，记录消耗 NaOH 的体积，以消耗体积（mL）表示液体酸面团的 TTA。

1.10 面团拉伸特性测定

采用布拉本德面团拉伸仪测定面团的拉伸特性。分别取 150 g 搅拌完成的面团放入揉团器中揉圆，小心取出后再放入搓条辊中搓成条柱状，揉圆器转速（83±3）r/min。将其置于拉伸仪的醒发室中分别醒发 60 min 和 120 min，醒发箱工作温度为（30.0±0.2）℃，取出后置于测力系统的托架上测试。电压（AC）/功率为（220±10）V/160 W。

1.11 面团全质构特性测定

取发酵结束的面团，用模具制成直径 3.0 cm、高 1.5 cm 的圆形面团，用质构仪对面团进行全质构特性测定。采用 P0.5 探头，设定测前、测中、测后速度分别为 2.0、1.0、1.0 mm/s；设定压缩比、触发力和前后间隔时间分别为 50%、5 g 和 5 s。

1.12 面团流变特性

采用 TA 流变仪测定面团的流变特性。所用夹具为 25 mm 平板，平板间隙设置为 1 mm，扫描频率为 0.1~100.0 Hz，振荡测试的目标应变为 1%。取 3 g 酸面团置于 TA 流变仪载物台上，下降夹具，刮去多余面团，并在边缘处涂上一层矿物油以防止水分流失，开始测定。

1.13 数据处理和分析

所有试验均重复 3 次，结果表示为平均值±标准偏差，采用 IBM SPSS Statistics 26 对数据进行处理和显著性分析，显著性水平为 $P<0.05$，并使用 OriginPro 2024 绘图。

2 结果与讨论

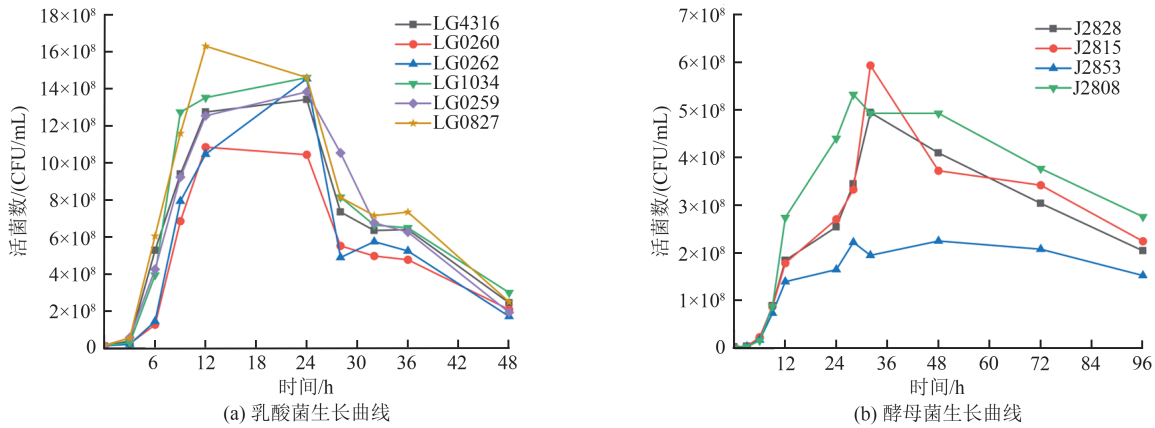
2.1 乳酸菌和酵母菌的生长曲线

乳酸菌的生长曲线见图 1（a）。可以看出，0~3 h 时，乳酸菌生长缓慢，处于生长延滞期；3~12 h 时，乳酸菌大量繁殖，活菌数迅速增加，进入对数生长期，说明此时乳酸菌生长速率最大，代谢旺盛；对比 12 h 和 24 h 时的活菌数，2 个时间点的活菌数差别不大，可知在此阶段乳酸菌进入生长稳定期，活菌数稳定在 10^9 CFU/mL；36 h 后，活菌数开始大量减少，乳酸菌进入生长衰亡期。

酵母菌的生长曲线见图 1（b）。可以看出，4 株酵母菌的生长趋势大致相同，均包括生长延滞期、对数生长期和生长稳定期。4 株酵母菌在 0~3 h 处于生长延滞期，3 h 后进入对数生长期；延滞期较短，对数生长期较长，此时酵母细胞生长速率最大，菌体迅速繁殖；24 h 左右结束对数生长期，转入稳定期，此时酵母菌活菌数稳定在 10^8 CFU/mL；24~96 h 后，酵母菌活菌数变化不大，一直未进入生长衰亡期。

2.2 乳酸菌和酵母菌的产酸特性分析

面包面团所采用发酵剂的产酸特性会影响面团的品质，不同乳酸菌和酵母菌的产酸速率曲线见图 2。可以看出 6 株乳酸菌均可在较短时间内产生大量酸，使菌液 pH 迅速下降，这与周瑶等[20]的研究结果一致。3~12 h 期间乳酸菌产酸速率最快，在 12 h 时，副干酪乳酪杆菌 LG0260 发酵液的 pH（3.8）最低，且与其他几株菌相比差异显著（$P<0.05$），说明副干酪乳酪杆菌 LG0260 产酸能力最强；12 h 后各株乳酸菌的产酸量逐渐减

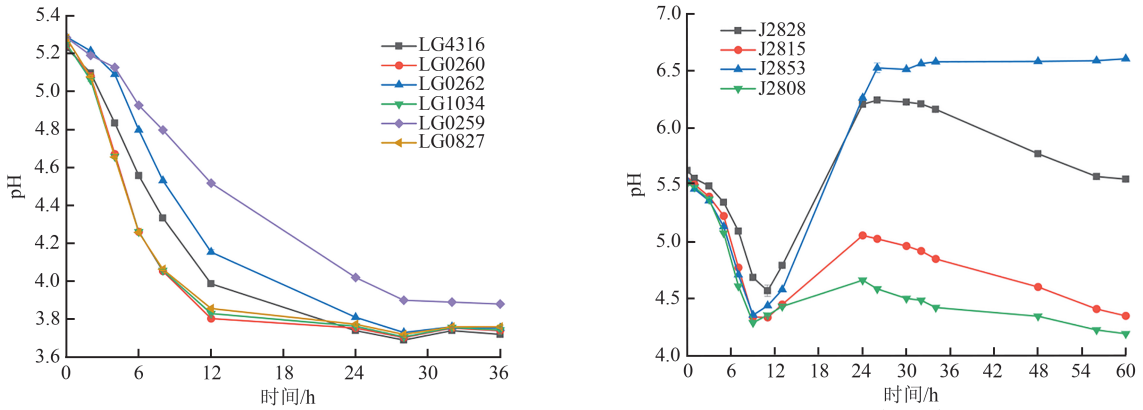


(a) 乳酸菌生长曲线　(b) 酵母菌生长曲线

图 1　乳酸菌和酵母菌的生长曲线

Fig. 1　Growth curves of lactic acid bacteria and yeast

少并趋于稳定。在24 h时，瑞士乳杆菌LG4316、副干酪乳酪杆菌LG0260、植物乳植杆菌LG1034、乳酸乳球菌LG0827之间差异不显著（P>0.05）。同时，除乳酸片球菌LG0259以外，其他5株乳酸菌生长24 h时的pH都在4.0以下，显示出良好的产酸能力。酵母菌在发酵7~9 h时pH达到最低，之后pH呈现先上升后下降的趋势。结果表明，酵母菌发酵剂在生长过程中具有一定的产酸能力，其中单孢酿酒酵母J2808的产酸能力最强（P<0.05）。



(a) 乳酸菌产酸　　(b) 酵母菌产酸

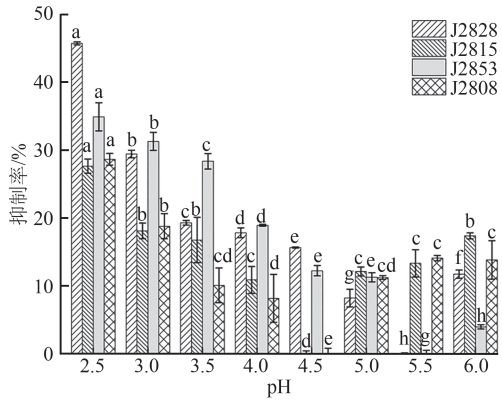
图2　不同乳酸菌和酵母菌的产酸速率曲线

Fig. 2　Acid production rate curves of different strains of lactic acid bacteria and yeast

2.3　酵母菌的耐酸能力分析

由于乳酸菌、酵母菌共同生长会涉及乳酸发酵、乙酸发酵等产酸过程，进而影响酵母菌的生长、酶的生成、营养物质的吸收和各种代谢途径等方面[21]。4株酵母菌在不同pH的培养基中24 h后的生长情况见图3，通过抑制率来反映不同pH对酵母菌生长的抑制情况。

由图3可以看出，培养基pH低于4.0时，酵母菌生长受到不同程度抑制。通常情况下，酵母菌生长的最适pH在4.5~5.5。在4种酵母菌中，马克思克鲁维酵母J2828和马克思克鲁维酵母J2853在pH为5.5时生长情况最佳；单孢酿酒酵母J2815和单孢酿酒酵母J2808的最适pH为4.5。当pH增大或减小时，由于菌株的生长受到显著抑制，抑制率显著增加（P<0.05）。当pH在2.5~4.0时，马克思克鲁维酵母J2828和马克思克鲁维酵母J2853的抑制率都大于单孢酿酒酵母J2815和单孢酿酒酵母J2808，且差异显著（P<0.05），说明马克思克鲁维酵母J2828和马克思克鲁维酵母J2853的耐酸性远远弱于单孢酿酒酵母J2815和单孢酿酒酵母J2808。在pH为3.5~4.5时，单孢酿酒酵母J2808的抑制率小于单孢酿酒酵母J2815，说明单孢酿酒酵母J2808对于酸性环境的适应性最强。



不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图3　不同pH对酵母菌生长抑制情况

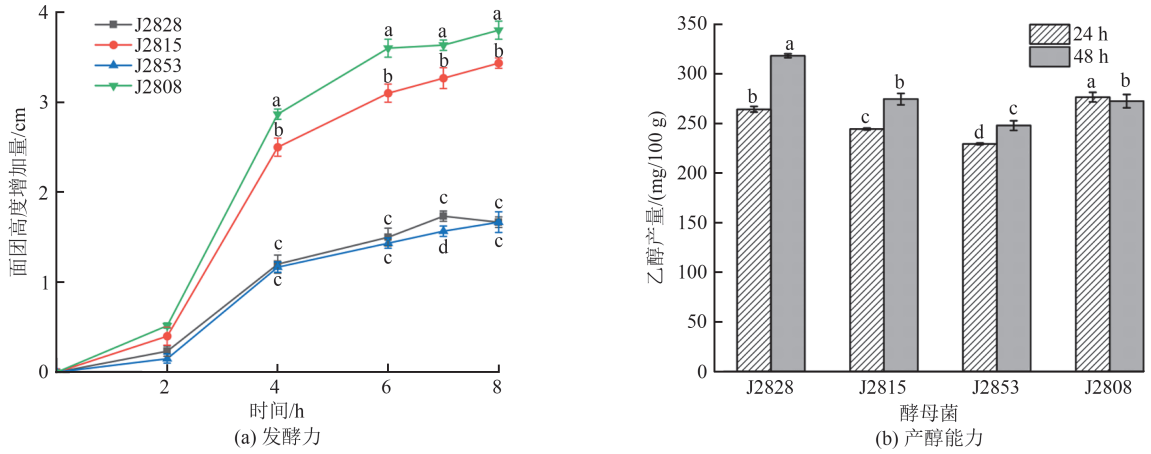
Fig. 3　Inhibitory effects of different pH on the growth of yeast

2.4　酵母菌发酵力和产醇能力

酵母菌发酵力是指在规定时间内按一定的比例制成面团，经酵母菌发酵产生的CO_2气体的量。发酵力是衡量酵母菌发酵能力最重要的指标[14]。4株酵母菌发酵不同时间面团高度的增加量见图4（a），表明不同酵母菌的产气能力是有差异的，这是由酵母菌自身性质决定的。发酵初始阶段（0~2 h）面团高度增加量与2~4 h相比差异显著（P<0.05），说明发酵初期酵母菌活力还不是很强，处于生长延滞期。发酵2 h后，面团高度增加量迅速提升。在发酵4~8 h时，单孢酿酒酵母J2808发

酵的面团高度增加量在不同时间均为最大(最大是 1 个值),与其他酵母菌发酵的面团相比差异显著(P<0.05),说明单孢酿酒酵母 J2808 的产气能力最好。

不同发酵时间酵母菌的产醇情况见图 4(b),发酵至 24 h 时,单孢酿酒酵母 J2808 产乙醇量最高,为 270 mg/100 g(以酸面团质量计),且与其他菌株相比差异显著(P<0.05),比乙醇产量最少的马克思克鲁维酵母 J2853 多 20.5%;发酵 48 h 后,乙醇产量下降,这与其他 3 株菌变化趋势不同。结果表明,单孢酿酒酵母 J2808 的发酵力、产醇能力均最好,在酵母菌组中表现出最优的发酵特性。



不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 4　不同酵母菌的发酵力和产醇能力

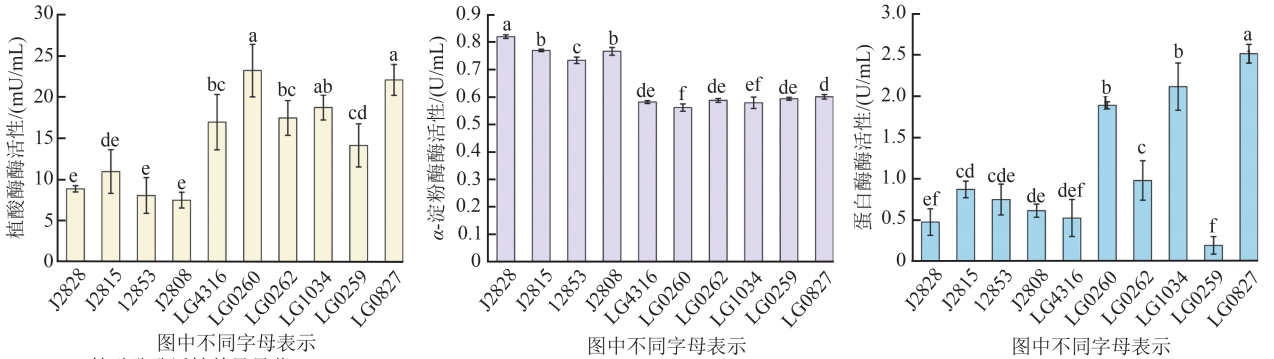
Fig. 4　Fermentation capacity and alcohol production capacity of different yeast strains

2.5　乳酸菌和酵母菌产酶特性分析结果

从工业角度来看,菌株分泌胞外酶的活性对于面包制作非常重要。4 株酵母菌和 6 株乳酸菌在相同条件下培养 24 h 时的植酸酶、α-淀粉酶、蛋白酶的酶活性情况见图 5(a)~(c)。10 株菌显示出不同的植酸酶酶活性,且在培养基条件下乳酸菌的植酸酶酶活性(14.12~23.21 mU/mL)高于酵母菌(7.47~10.95 mU/mL)。其中副干酪乳酪杆菌 LG0260 和乳酸乳球菌 LG0827 培养 24 h 的植酸酶酶活性最高,分别为 23.21 mU/mL 和 22.07 mU/mL,与其他菌株相比差异显著(P<0.05)。不同酵母菌分泌的植酸酶酶活性差异不显著(P>0.05)。有研究表明,具有植酸酶酶活性的菌种对酸面团中植酸的降解发挥重要作用[22-23]。相反,酵母菌的 α-淀粉酶酶活性(0.73~0.82 U/mL)高于乳酸菌(0.56~0.60 U/mL),且差异显著(P<0.05),这说明酵母菌参与水解淀粉的能力要强于乳酸菌。其中,马克思克鲁维酵母 J2828 分泌 α-淀粉酶酶活性最高,α-淀粉酶酶活性最高的乳酸菌为乳酸乳球菌 LG0827,这表明不同菌株代谢淀粉的能力具有明显差异性,该结果与 Amapu 等[24]关于乳酸菌的淀粉酶活性(0.38~1.10 U/mL)的研究结果相似。同时,乳酸乳球菌 LG0827 的蛋白酶酶活性最高(2.51 U/mL),副干酪乳酪杆菌 LG0260、植物乳植杆菌 LG1034 的蛋白酶酶活性次之,且与其他菌株相比差异显著(P<0.05)。结果表明,不同菌株分泌的蛋白酶酶活性差异较大。

2.6　面包面团中微生物数量、pH 和 TTA 变化

筛选的优良酵母菌和乳酸菌共发酵制备的面包面团中微生物数量、pH 和 TTA 变化见表 2。发酵结束时由单孢酿酒酵母 J2808 和植物乳植杆菌 LG1034 共同发酵制备的 DMYL2 中乳酸菌数最高,达到 7.5×10^8 CFU/mL,且较其他面团差异显著(P<0.05),酵母菌数为 1.9×10^7 CFU/mL。DAQ 中酵母菌数最多,达到 2.1×10^8 CFU/mL,且较其他面团差异显著(P<0.05)。同时,与其他发酵酸面团相比,由商业发酵剂安琪酵母制备的面团的 TTA 最低,液体酸面团菌种制备的面团的 pH 范围为 3.93~4.07。结果表明,乳酸菌参与发酵是面团中 TTA 的最主要来源。在液体酸面团菌种制成的面团中,DLB 的酵母菌菌数(2.7×10^7 CFU/mL)最多。与其他面团相比,DMYL2 具有最低的 pH 和最高的 TTA



图中不同字母表示植酸酶酶活性差异显著(P<0.05)。(a) 植酸酶酶活性

图中不同字母表示α-淀粉酶酶活性差异显著(P<0.05)。(b) α-淀粉酶酶活性

图中不同字母表示蛋白酶酶活性差异显著(P<0.05)。(c) 蛋白酶酶活性

图5　不同乳酸菌和酵母菌产植酸酶、α-淀粉酶、蛋白酶酶活性情况

Fig. 5　Activities of phytase, alpha-amylase, and protease produced by different strains of lactic acid bacteria and yeast

(P<0.05)，这可能与植物乳植杆菌LG1034是异型发酵乳酸菌密切相关[19]。研究表明，单孢酿酒酵母J2808与植物乳植杆菌LG1034共同发酵在II型酸面团中具有较好的环境适应性。

表2　面团中乳酸菌数、酵母菌数、pH和TTA变化

Table 2　Changes in lactic acid bacterial count, yeast count, pH, and TTA in dough

样品	乳酸菌数/（CFU/mL）	酵母菌数/（CFU/mL）	pH	TTA/mL
DCK0	—	—	6.20±0.03^{a}	0.90±0.10^{f}
DAQ	—	2.1×10^{8}±2.1×10^{7}^{a}	5.55±0.05^{b}	2.73±0.25^{e}
DMYL1	3.4×10^{8}±8.5×10^{7}^{b}	8.5×10^{6}±1.1×10^{6}^{b}	4.07±0.04^{d}	6.08±0.14^{c}
DMYL2	7.5×10^{8}±7.1×10^{7}^{a}	1.9×10^{7}±1.4×10^{6}^{b}	3.93±0.03^{e}	7.92±0.38^{a}
DMYL3	6.1×10^{8}±7.8×10^{7}^{a}	1.6×10^{7}±7.1×10^{5}^{b}	4.03±0.05^{d}	6.58±0.14^{b}
DLB	6.3×10^{8}±4.2×10^{7}^{a}	2.7×10^{7}±1.4×10^{6}^{b}	4.36±0.04^{c}	5.43±0.21^{d}

注：不同小写字母表示同列之间差异显著(P<0.05)；“—”表示未检出。

2.7　不同酸面团菌种对面包面团拉伸特性的影响

拉伸阻力可以反映面团的弹性和强度，延伸度可以反映面团的可塑性和延展性，拉伸比反映了面团弹性和延展性之间的平衡性[25]。不同发酵剂制备的酸面团发酵60 min和120 min时的拉伸特性见表3。与未发酵的面团相比，面团发酵后拉伸比显著下降，这是因为微生物代谢和酸化会增加面筋蛋白的溶胀程度和溶解度，使得面团更易于膨胀和延展。如果拉伸比过小，面团会迅速流散，甚至塌陷[26]。随着发酵的进行(60~120 min)，每组面团的拉伸比都显著增加(P<0.05)，其中DLB的拉伸比增加最大。此外，从60~120 min，每组面团的延伸度均减小(P<0.05)，说明随着发酵过程的持续，面团的可塑性减弱。同时，与未发酵的面团相比，发酵60~120 min面团的延伸度逐渐增加，最大拉伸阻力不断减小，说明随着发酵的进行，面团的弹性变差但延展性变好。这可能是因为酸面团对面包面团有软化作用，且酸面团发酵剂对面包面团延展性的改善作用大于弹性。

拉伸面积代表了面团的强度，拉伸面积越大，所需的能量越大，表示面团的筋力越强，面团的烘焙品质越好。与未发酵面团相比，所有酸面团发酵至120 min时的拉伸面积增加(P<0.05)，发酵60 min和120 min时，DMYL1的拉伸面积最大，分别为242 cm^{2}和252 cm^{2}，较其他组面包面团差异显著(P<0.05)，但是DAQ、DMYL3、DLB这3组在发酵至60 min时拉伸面积未发生显著变化(P>0.05)。结果表明，乳酸菌和酵母菌共同发酵制备的面包面团强度增加，尤其是发酵60 min时，单孢酿酒酵母J2808与副干酪乳酪杆菌LG0260混合发酵的酸面团拉伸面积和延伸度最高(分别为242 cm^{2}和181 mm)，显著高于商用安琪酵母(分别为203 cm^{2}和161 mm)和天然鲁邦种菌种发酵的面包面团(分别为208 cm^{2}和151 mm)(P<0.05)，有效改善了面包面团的烘焙品质。面团强度的提高与发酵时间、发酵的菌种密切相关。整体上，酵母菌和乳酸菌共培养发酵可以改善面团的弹性和延展性，增加面团的强度，在所有的样品中，单孢酿酒酵母J2808与副干酪乳酪杆菌LG0260共培养得到的液体酸面团菌种MY2L1对面团的改善作用最好。

2.8　不同酸面团菌种对面包面团质构特性的影响

表4为不同菌种制备的面包面团发酵结束后

表 3　酸面团发酵剂对面包面团的拉伸特性的影响

Table 3　Effects of sourdough fermentation agents on the stretching characteristics of dough

组别	拉伸面积/cm²	延伸度/mm	最大拉伸阻力/BU	最大拉伸比
DCK0	212±3^{cde}	108±8^{e}	2348±158^{a}	21.85±0.07^{a}
DAQ 60 min	203±7^{e}	161±6^{bcd}	999±1^{e}	6.30±0.14^{fg}
DAQ 120 min	237±9^{ab}	150±4^{cd}	1 322±28^{cd}	8.85±0.07^{d}
DMYL1 60 min	242±1^{ab}	181±6^{a}	1 091±13de	6.15±0.07^{fgh}
DMYL1 120 min	254±5^{a}	147±13^{cd}	1 397±53^{bc}	9.55±0.49^{cd}
DMYL2 60 min	227±2^{bcd}	175±4^{ab}	1 016±36^{e}	5.95±0.21^{gh}
DMYL2 120 min	246±3^{ab}	161±6^{bc}	1 256±79^{cd}	7.85±0.78^{e}
DMYL3 60 min	198±6^{e}	152±1^{cd}	1 043±25^{e}	6.85±0.21^{f}
DMYL3 120 min	233±7^{abc}	145±8^{d}	1 369±100^{bc}	10.2±0.28^{c}
DLB 60 min	208±23de	151±2^{cd}	807±4^{f}	5.50±0.14^{h}
DLB 120 min	242±4^{ab}	155±2^{cd}	1 461±110^{b}	11.1±0.14^{b}

注：不同小写字母表示同列之间差异显著（P<0.05）。

的质构特性。与 DCK0 相比，发酵后面包面团的硬度和黏性均发生不同程度降低，且差异显著（P<0.05）。与其他面团相比，DAQ 的硬度和黏性最大，分别为 176.1 g 和 138.7。同时，所有混合培养的液体菌种和鲁邦种菌种制备的面包面团之间的硬度和黏性差异不显著（P>0.05）。

液体面团菌种对于酸面团硬度和黏性的影响要显著大于商用安琪酵母。DMYL3 的内聚性与 DCK0 差异不显著（P>0.05），其他面团的内聚性与 DCK0 相比均显著增加（P<0.05）。内聚性是形成样品形态所需的内部结合力的大小，能够反映样品内部分子间或各结构要素间的结合作用的强弱，体现了样品抵抗受损、保持自身完整性的能力[27-28]。由单孢酿酒酵母 J2808 分别和副干酪乳酪杆菌 LG0260、植物乳植杆菌 LG1034 制备的 DMYL1 和 DMYL2 的内聚性分别为 0.850 和 0.861，表明所选菌株混合发酵制作的面团具有较好抵抗受损、保持自身完整性的能力。此外，所有发酵面团的胶着性均发生不同程度的下降，其中 DMYL2 和 DMYL3 的胶着性下降显著（P<0.05）。与未发酵的面团相比，DAQ 和 DLB 的回复性分别增加了 16.76% 和 17.77%；液体酸面团菌种发酵的面团回复性降低，降低范围为 1.52%~9.14%，这可能是由于过度发酵破坏了该面团的产气性，导致回复性下降。DMYL2 的质构特性变化最明显，其原因可能是 DMYL2 的乳酸菌数最高，pH 最低，酸化是由于蛋白质的降解导致的[19]。

表 4　不同面包面团的质构特性

Table 4　Texture characteristics of bread dough in different groups

组别	硬度/g	黏性	内聚性	胶着性	回复性
DCK0	214.4±17.3^{a}	186.2±14.2^{a}	0.753±0.040^{b}	164.2±15.4^{a}	0.197±0.018^{b}
DAQ	176.1±14.4^{b}	138.7±7.7^{b}	0.840±0.027^{a}	150.4±14.7^{ab}	0.230±0.015^{a}
DMYL1	140.4±10.9^{c}	109.1±16.4^{c}	0.850±0.014^{a}	119.3±9.2^{cd}	0.186±0.010^{b}
DMYL2	126.5±12.8^{c}	106.7±5.4^{c}	0.861±0.031^{a}	109.1±14.8^{d}	0.194±0.008^{b}
DMYL3	132.0±10.6^{c}	117.4±11.8^{bc}	0.783±0.041^{b}	103.3±8.4^{d}	0.179±0.008^{b}
DLB	147.2±16.8^{c}	123.7±6.2^{bc}	0.849±0.042^{a}	138.9±2.9^{bc}	0.232±0.014^{a}

注：不同小写字母表示同列之间差异显著（P<0.05）。

2.9　不同酸面团菌种对面包面团流变特性的影响

动态流变特性可以反映面包面团的物性特征[29]，不同酸面团菌种对面包面团流变特性的影响见图 6。可以看出，添加液体菌种或者商用安琪酵母之后，面团的 G' 和 G'' 均降低，说明在微生物的作用下，面团的弹性和黏性都降低。G' 和 G'' 的变化幅度不同，与固体菌种发酵的面团 DAQ 相比，添加液体菌种制备的面团弹性和黏性降低更明显，这可能是由于液体菌种的流变特性引起的。所有面团的 tan δ 都小于 1，G'' 小于 G'，说明

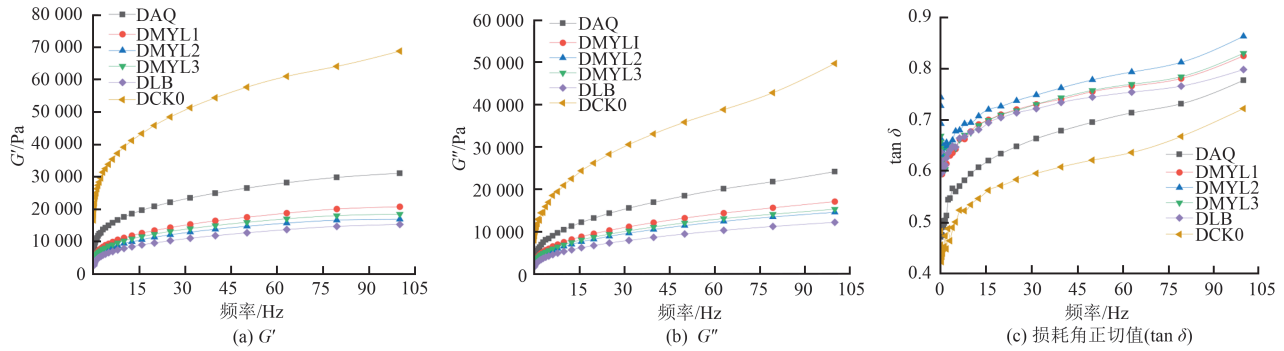


图 6　面团的 G'、G'' 及 tan δ

Fig. 6　G', G'', and tan δ of sourdough

面团的固体属性仍占据优势。DMYL2的tan δ最大，说明其流体性质最明显。面团的黏弹性是预测面团加工性能及应用品质的重要指标[30]。因此，乳酸菌和酵母菌混合发酵对调节面团黏弹性的平衡发挥重要作用。

3 结论

通过比较不同乳酸菌和酵母菌发酵剂在生长特性、产酸与耐酸特性、产气性能和产酶特性等方面的差异，作者将所筛选的单孢酿酒酵母J2808分别与副干酪乳酪杆菌LG0260、植物乳植杆菌LG1034、乳酸乳球菌LG0827共培养制备II型酸面团发酵剂，发现混合制备的发酵剂可以较好促进面包面团弹性和延展性的平衡，并改善面包面团的质构特性。经过发酵的面包面团在硬度、黏性、胶着性方面均减小，内聚性增加。尽管液体面团菌种使面包面团的流变特性增强，但固体属性仍占主导地位。与商用安琪酵母和天然鲁邦种菌种发酵的面包面团相比，具有良好发酵性能和产酶特性的单孢酿酒酵母J2808和副干酪乳酪杆菌LG0260混合发酵能够有效改善面包面团的物性特征，提高面包面团的拉伸面积和延伸度，增加面团的强度，充分表明II型酸面团发酵剂的筛选可有效提升面包面团的品质。

参考文献

[1] GOBBETTI M，DE ANGELIS M，DI CAGNO R，et al. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology，2018，302：103-113.

[2] ISPIRLI H，DEMIRBAS F，YÜZER M O，et al. Identification of lactic acid bacteria from spontaneous rye sourdough and determination of their functional characteristics [J]. Food Biotechnology，2018，32：222-235.

[3] LIANG J J，CHAI K M，WANG X Y，et al. From gluten structure to immunogenicity：investigating the effects of lactic acid bacteria and yeast co-fermentation on wheat allergenicity in steamed buns[J]. Food Chemistry，2025，492(1)：145356.

[4] 张国华，张纬珍，梁武龙，等. 一株高产胞外多糖乳酸菌的鉴定及其特性研究[J]. 中国食品学报，2020，20(12)：229-238.
ZHANG G H，ZHANG W Z，LIANG W L，et al. Studies on identification and characterization of a high-yield exopolysaccharides lactic acid bacteria [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2020，20(12)：229-238.(in Chinese)

[5] LIU L，WU J L，YANG J T，et al. Isolation and fermentation characteristics of γ-Aminobutyric acid-producing lactic acid bacteria from Yujiangsuan，a traditional miao ethnic fermented condiment [J]. Food Science，2021，42(18)：73-79.

[6] XIANG L P，FAN B Q，YANG Z L，et al. Screening and identification of a strain of *Saccharomyces cerevisiae* and its characteristics [J]. Food and Machinery，2021，37(06)：51-55.

[7] ADOM K K，SORRELLS M E，LIU R H. Phytochemical profiles and antioxidant activity of wheat varieties [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2003，51(26)：7825-7834.

[8] 邢君梅，张重权，王有琼，等. 混菌固态发酵辣木粕的营养价值和功能特性[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(5)：26-36.
XING J M，ZHANG Z Q，WNAG Y Q，et al. Exploring the nutritional value and functional characteristics of moringa seed meal by mixed bacteria solid-state fermentation [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(5)：26-36.(in Chinese)

[9] YEŞIM A，FURKAN A，TUĞBA B，et al. Molecular characterization and multifunctional evaluation of lactic acid bacteria isolated from traditional sourdough [J]. International Journal of Food Microbiology，2024，423，110845.

[10] 中华人民共和国国家标准. GB/T 4789.35—2016，食品微生物学检验 乳酸菌检验[S]. 北京：中国标准出版社，2016.

[11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 4789.15—2016，食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[12] 迪娜热尔·迪力达西，刘璐，加勒哈斯别克·塞力克，等. 新疆传统发酵乳品中乳酸菌与酵母菌的益生特性[J]. 中国微生态学杂志，2018，30(1)：5-9.
DILIDAXI D，LIU L，JIALEHASI BIEKE S，et al. Probiotic characteristics of the lactic acid bacteria and yeasts in Xinjiang traditional fermented dairy products[J]. Chinese Journal of Microecology 2018，30(1)：5-9.(in Chinese)

[13] 韩岳峰，焦明，马慧君，等. 鼠李糖乳杆菌细菌素WO-A/2的表达及其抗菌特性[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(05)：19-25.
HAN Y F，JIAO M，MA H J，et al. Expression and antibacterial properties of bacteriocin WO-A/2 from *Lactobacillus rhamnosus* [J]. Journal of Food Science

and Biotechnology，2024，43(05)：19-25.(in Chinese)

[14] CHEVALLIER S，ZÚÑIGA R，LE-BAIL A. Assessment of bread dough expansion during fermentation [J]. Food & Bioprocess Technology，2012，5(2)：609-617.

[15] 李岭卓，李锐，熊小毛，等. 发酵液中乙醇含量的测定方法[J]. 酿酒科技，2018(4)：126-128.
LI L Z，LI R，XIONG X M，et al. Determination of ethanol content in fermenting liquid[J]. Liquor-Making Science & Technology，2018(4)：126-128.(in Chinese)

[16] NUOBARIENE L，HANSEN A S，JESPERSEN L，et al. Phytase-active *yeasts* from grain-based food and beer[J]. Journal of Applied Microbiology，2011，110(6)：1370-1380.

[17] XIAO Z Z，STORMS R，TSANG A. A quantitative starch-iodine method for measuring alpha-amylase and glucoamylase activities[J]. Analytical Biochemistry，2006，351(1)：146-148.

[18] CUPP-ENYARD C. Sigma's non-specific protease activity assay：casein as a substrate[J]. Journal of Visualized Experiments，2008，19：899.

[19] 方鲁平. 优良乳酸菌和酵母菌发酵液体酸面团的品质和蛋白组分变化研究[D]. 杭州：浙江工商大学，2022.

[20] 周瑶，李娟，贾凤霞，等. 单一及混合乳酸菌发酵对番木瓜汁品质的影响[J]. 食品与机械，2024，40(1)：175-182.
ZHOU Y，LI J，JIA F X，et al. Lactic acid fermentation of papaya juice using single and mixed lactic acid bacteria[J]. Food & Machinery，2024，40(1)：175-182.(in Chinese)

[21] 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.

[22] MOHAMMADI-KOUCHESFAHANI M，HAMIDI-ESFAHANI Z，AZIZI M H. Isolation and identification of lactic acid bacteria with phytase activity from sourdough[J]. Food Science & Nutrition，2019，7(11)：3700-3708.

[23] KEVSER K，OSMAN S，M. ZEKI D. Use of phytase active yeasts and lactic acid bacteria isolated from sourdough in the production of whole wheat bread[J]. LWT-Food Science and Technology，2018，91：557-567.

[24] AMAPU T Y，AMEH J B，ADO S A，et al. Amylolytic potential of lactic acid bacteria isolated from wet milled cereals，cassava flour and fruits [J]. Microbiology Research Journal International，2016，13(2)：1-8.

[25] 陈洁，李璞，王稳新，等. 马铃薯生全粉对小麦粉面团特性的影响[J]. 粮食与油脂，2018，31(7)：41-44.
CHEN J，LI P，WANG W X，et al. Effect of potato raw powder on the characteristics of wheat flour dough[J]. Cereals & Oils，2018，31(7)：41-44.

[26] MCCANN T H，GALL M L，LI D. Extensional dough rheology：impact of flour composition and extension speed [J]. Journal of Cereal Science，2016，69：228-237.

[27] SU T C，DU W K，DENG B Y，et al. Effects of sodium carboxymethyl cellulose on storage stability and qualities of different frozen dough[J]. Heliyon，2023，9(8)：e18545.

[28] SUN W，ZHANG W，XU Y，et al. Dough rheology，pasting property，and steamed bread quality of wheat flour as affected by the addition of sprouted wheat flour [J]. International Journal of Food Properties，2023，26(1)：2160-2170.

[29] BÁRBARA B，MARIANA M，NOOSHIN V，et al. Dough rheology and internal structure of bread produced with wheat flour partially substituted by buckwheat flour：a step towards enhancing nutritional value [J]. Food Structure，2024，39，100364.

[30] DOBRASZCZYK B J，SALMANOWICZ B P. Comparison of predictions of baking volume using large deformation rheological properties[J]. Journal of Cereal Science，2008，47(2)：292-301.

（责任编辑：李春丽）