第 39 卷 第 6 期
2024 年 12 月

天津科技大学学报
Journal of Tianjin University of Science & Technology

Vol. 39 No. 6
Dec. 2024

DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20230207
数字出版日期：2024–04–17；数字出版网址：http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20240416.1644.006

植物乳植杆菌 GM4 复合发酵对馒头感官品质及风味的影响

刘琳琳[1]，李顺勤[1]，孙荣豪[1]，张国华[2]，吴　涛[1]
（1. 天津科技大学食品科学与工程学院，天津 300457；2. 山西大学生命科学学院，太原 030006）

摘　要：选取植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*）GM4 和酿酒酵母（*Saccharomyces cerevisiae*），进行单菌种和多菌种发酵制备馒头，探究多菌种发酵对馒头的影响。结果表明：经多菌种复合发酵，馒头的 pH 降低，可滴定酸度（TTA）增大，比容显著增大，表现出良好的质构特性。采用扫描电子显微镜观察和气相色谱–质谱（GC-MS）分析，多菌种发酵馒头面筋网络结构连续且紧凑，并检出 20 种风味物质，其中醇类、酸类、酯类物质含量增加。综合分析，经植物乳植杆菌 GM4 和酿酒酵母协同发酵，馒头的品质、风味和口感更佳，深受消费者喜爱。本研究结果为获得高品质老面馒头发酵剂和推动工业化生产应用提供理论依据和技术支撑。

关键词：植物乳植杆菌 GM4；复合发酵；比容；质构；风味物质；感官评价
中图分类号：TS213.2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-6510（2024）06-0007-07

Effects of *Lactiplantibacillus plantarum* GM4 on Sensory Quality and Flavor of Steamed Bun

LIU Linlin[1]，LI Shunqin[1]，SUN Ronghao[1]，ZHANG Guohua[2]，WU Tao[1]
（1. College of Food Science and Engineering，Tianjin University of Science & Technology，Tianjin 300457，China；
2. School of Life Science，Shanxi University，Taiyuan 030006，China）

Abstract：In this study，*Lactiplantibacillus plantarum* GM4 and *Saccharomyces cerevisiae* were selected to prepare steamed buns by single strain and mixed strain fermentation，and the effect of mixed strain fermentation on steamed buns was studied. The results showed the pH value of steamed bun fermented by mixed strain decreased，titratable acidity（TTA）value increased，and specific volume increased significantly，which showed good texture characteristics. According to gas chromatography-mass spectrometry（GC-MS）analysis，the internal structure of steamed bun fermented by mixed strains was continuous and compact，and a total of twenty flavor substances were further detected，among which the contents of alcohol，acid and ester substances increased. In conclusion，the cooperative fermentation of *Lactiplantibacillus plantarum* GM4 and *Saccharomyces cerevisiae* can improve the quality，flavor and taste of steamed bun，which is favored by consumers. Therefore，the study results have thus provided theoretical basis and technical support for obtaining high-quality steamed bun starter and promoting industrialized application.

Key words：*Lactiplantibacillus plantarum* GM4；mixed fermentation；specific volume；texture；flavor substance；sensory evaluation

引文格式：
刘琳琳，李顺勤，孙荣豪，等. 植物乳植杆菌 GM4 复合发酵对馒头感官品质及风味的影响[J]. 天津科技大学学报，2024，39（6）：7–13.

收稿日期：2023–11–03；**修回日期**：2024–02–06
基金项目：国家自然科学基金项目（32172179）
作者简介：刘琳琳（1999—），女，河北沧州人，硕士研究生；**通信作者**：吴　涛，副教授，wutaoxx@gmail.com

LIU L L, LI S Q, SUN R H, et al. Effects of *Lactiplantibacillus plantarum* GM4 on sensory quality and flavor of steamed bun [J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(6): 7-13.

馒头是我国传统的发酵主食，在饮食中占有重要地位。馒头的传统制作方式是利用酸面团作为发酵剂，其发酵耗时长、品质不稳定，无法满足市场的快速需求。近年来，工业上广泛使用活性干酵母发酵法制作馒头，虽然制作工艺简单、发酵时间短，但是产品风味和口感单一。因此，探究一种既可缩短发酵时间，又能使馒头质地、风味受到大众认可的发酵方式至关重要。

酸面团是一种多菌种混合发酵剂，其主要微生物是乳酸菌和酵母菌[1]，它们对面制品的质量、风味[2]、营养价值[3]和保质期特性有着重要作用[4]。在酸面团发酵过程中，微生物会产生多种代谢产物，如多肽、氨基酸和短链脂肪酸等，可以改善酸面团发酵食品的品质和风味。酵母菌发酵产生二氧化碳，可以改善面制品的体积，而乳酸菌可以通过产生有机酸和胞外多糖，调节面团流变学特性和面筋网络结构[5]，并通过合成挥发性化合物增加风味[6]。Aplevicz 等[7]发现，单独使用副干酪乳杆菌发酵的面包品质难以令人满意，但与酿酒酵母协同发酵后，面包的色泽、感官、质地和保质期均有所改善。Peter 等[8]研究发现酿酒酵母和植物乳植杆菌共同发酵时，两者协同作用改善了最终发酵产品的适口性。因此，乳酸菌为改善酵母馒头的品质、风味和营养提供潜在的应用途径。

本研究选取从老面中分离得到的一株优势菌植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*）GM4，与酿酒酵母分别采用单菌种、混合菌种发酵面团，制备得到馒头。通过测定馒头的比容、质构、风味物质并进行感官评价，探究植物乳植杆菌 GM4 对酵母馒头品质的影响，为获得高品质老面馒头发酵剂提供理论和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料

五得利面粉，五得利面粉（邯郸市）有限公司；高活性酵母，安琪酵母股份有限公司；MRS 肉汤培养基，青岛高科园海博生物技术有限公司；植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*）GM4 由山西大学生命科学学院提供；氢氧化钠，国药集团化学试剂有限公司。

LS-B50L 型压力式蒸汽灭菌锅，上海华线医用核子仪器公司；SPX-250B-Z 型生化培养箱，上海博迅实业有限公司医疗设备厂；LEGEND Micro 17R 型高速小型台式离心机，赛默飞世尔（上海）仪器有限公司；HWS-250 型恒温恒湿培养箱，宁波赛福实验仪器有限公司；EMS-18 型恒温磁力搅拌器，天津欧诺仪器仪表有限公司；pH 计，上海仪电科学仪器股份有限公司；NR110 型色差计，深圳市三恩驰科技有限公司；TA.XT Plus 质构仪，英国 Stable Micro System 公司；7890A/5960C 型气相色谱-质谱仪（GC-MS），美国安捷伦公司。

1.2　实验方法

1.2.1　植物乳植杆菌 GM4 的培养和菌泥的制备

将斜面保藏的植物乳植杆菌 GM4 挑取接种到 MRS 固体培养基，在 32 ℃的培养箱中培养 48 h 进行活化，重复 2 次。将单个菌落接种到 MRS 液体培养基中，32 ℃培养 24 h，得到发酵液。量取 10 mL（菌体密度为 10^9 CFU/mL）植物乳植杆菌 GM4 菌液，3 500 r/min 离心 5 min。用无菌生理盐水洗涤重悬 3 次，收集菌泥用于进一步实验。

1.2.2　馒头的制备

将 100 g 小麦粉、发酵剂和 50 mL 无菌水放入和面机，搅拌至面团表面光滑，将面团放置于温度 32 ℃、湿度 70% 的恒温恒湿培养箱发酵 2 h。发酵结束后，取出面团排气整形，继续二次醒发 30 min，再上锅蒸制 20 min，获得各组馒头样品。Control 组不添加任何发酵剂，作为空白对照；Sc 组以活性干酵母（活菌数为 $1\,0^{10}$ CFU/g）为发酵剂，以干面粉为基准，添加量为 10^8 CFU/g；Lp 组以植物乳植杆菌 GM4 作为发酵剂，以干面粉为基准，添加量为 10^8 CFU/g；Sc-Lp 组以活性干酵母和植物乳植杆菌 GM4 为复合发酵剂，以干面粉为基准，添加量均为 10^8 CFU/g。

1.2.3　馒头 pH、可滴定酸度的测定

称取 10.0 g 馒头样品，加入少量蒸馏水，使用磁力搅拌器中速搅拌 30 min，用无二氧化碳水定容至 100 mL。将悬浊液 4 ℃、3 500 r/min 离心 10 min，取上清液测定 pH，即为馒头的 pH。用 0.1 mol/L NaOH 标准溶液滴定上清液至 pH 为 8.5，所消耗 NaOH 的体积（mL）即为样品的可滴定酸度（TTA）[9]。每份样品平行测定 3 次。

1.2.4　馒头比容的测定

待馒头冷却 1 h 后，对馒头进行称量，利用小米

置换法测定馒头的体积[10]。馒头的体积质量比为馒头的比容，单位为 mL/g。每组馒头样品重复测定 3 次。

1.2.5　馒头白度的测定

利用便携色差仪测定馒头外表皮的色泽，待馒头冷却 1 h 后，将测试头紧贴馒头表面，测定馒头样品的 L^*值、a^*值和 b^*值，并根据亨特白度公式计算馒头的白度[11]。

$$W=100-\sqrt{(100-L^*)^2+(a^*)^2+(b^*)^2} \quad (1)$$

式中：W 为馒头的白度；L^*为明度；a^*为色度，正值表示偏红，负值表示偏绿；b^*为色度，正值表示偏黄，负值表示偏蓝。

1.2.6　馒头质构特性的测定

待馒头冷却 1 h 后，将馒头芯切成 2 cm × 2 cm × 2 cm 的正方体备用[12]。采用质构仪配置探头 P/36R 对馒头切片的硬度、弹性、黏聚性、胶着度等性质进行质构分析，每个样品重复 5 次，取平均值。质构仪参数为：测前速度 3.0 mm/s，测中速度 1.0 mm/s，测后速度 1.0 mm/s，应变位移 40%，间隔时间 3.0 s，触发力 5.0 g。

1.2.7　馒头微观结构的测定

将蒸好的馒头冷却后，从馒头的中心部位取样，用小刀切取大小均匀、边长约为 3 mm 的正方体，将其冷冻干燥。用扫描电子显微镜对冷冻干燥后馒头的横截面进行形态观察[13]。

1.2.8　馒头挥发性风味物质的测定

样品处理：采用顶空固相微萃取–气相色谱–质谱法（HS-SPME-GC-MS）对馒头的挥发性风味物质进行定量分析[14]。待馒头冷却 1 h 后，称取 5.0 g 馒头芯置于 25 mL 的顶空瓶中，然后加入 10 μL 7.752 × 10^{-2} μg/μL 2–甲基–3–庚酮作为内标物质，立即旋紧瓶盖。将装有样品的顶空瓶在 60 ℃恒温水浴中平衡 30 min，将已老化的 75 μm CAR/PDMS 萃取头伸入顶空瓶的上空，60 ℃恒温水浴萃取 30 min。萃取结束后，立刻将萃取头插入气相色谱的进样口。

色谱条件：色谱柱 DB–Wax FS（30 m×0.32 mm×0.50 μm），载气为高纯氦气，流量 1.0 mL/min。程序升温设置：50 ℃保持 1 min，然后以 3 ℃/min 的速率升至 180 ℃，保持 1 min，以 8 ℃/min 的速率升至 250 ℃，保持 3 min。

质谱条件：离子源温度 220 ℃，进样口温度 220 ℃，质量扫描范围 m/z 40 ~ 500，扫描速度设定为 1 000，分流比 5.0，柱流量 2.00 mL/min，清洗流量 3.00 mL/min。

采用 NIST 11s Library 谱库检索，选择匹配度大于 85% 的化合物，并参考相关文献最终确定挥发性物质里的各个化学成分。每种化合物的丰度由峰面积确定，根据内标浓度计算挥发性风味物质的含量。

1.2.9　馒头的感官评价

馒头的感官评定由具有一定感官评定经验的 20 名评价员（男女比例为 1 ∶ 1）组成。从馒头的外观、弹性、内部结构、风味、口感 5 个方面进行综合评价，评分标准见表 1。

表 1　馒头的感官评价标准

Tab. 1　Sensory evaluation criteria of steamed bun

项目	评分标准	分数
外观（20 分）	乳白色，色泽均匀	13 ~ 20
	洁白或稍黄且色泽均匀	7 ~ ＜13
	发黄或者暗灰，色泽不均匀	0 ~ ＜7
弹性（10 分）	复原速度较快	7 ~ 10
	回弹稍差，复原较慢	4 ~ ＜7
	回弹弱或不回弹	0 ~ ＜4
内部结构（20 分）	气孔均匀、细小	13 ~ 20
	气孔均匀、粗大	7 ~ ＜13
	气孔粗糙、不均匀	0 ~ ＜7
风味（30 分）	有麦香味，酸碱适中，口感宜人	20 ~ 30
	香味较淡，口感稍带酸或碱味	10 ~ ＜20
	带有异味，口感过酸	0 ~ ＜10
口感（20 分）	黏度适口，柔软易下咽	13 ~ 20
	软硬适口，不粘牙	7 ~ ＜13
	口感偏硬，难以下咽	0 ~ ＜7

1.3　数据处理

采用 Excel 和 SPSS 19.0 进行数据统计分析，结果以“平均值 ± 标准差”表示。运用方差分析法（ANOVA）进行显著性分析，不同小写字母表示组间存在显著性差异（P＜0.05）。

2　结果与分析

2.1　馒头的 pH 和 TTA

酸化是乳酸菌发酵制品的一个重要特征，合理的酸化对馒头风味和货架期可以产生积极影响[15]。馒头的 pH 和 TTA 如图 1 所示。相比空白组，Sc 组、Lp 组和 Sc-Lp 组馒头的 pH 明显下降，TTA 呈现相反变化趋势。据报道，植物乳植杆菌具有较高的酸化能力[16]。在发酵过程中，植物乳植杆菌通过自身代谢活动可以产生大量有机酸[17]，酿酒酵母可以通过糖酵解、三羧酸循环等代谢途径产生少量有机酸[18]，所以 Lp 组的 pH 最低。Sc-Lp 组馒头的 pH 略高于 Lp 组，

表明酵母菌和乳酸菌共存时，对其生长有一定的拮抗作用。

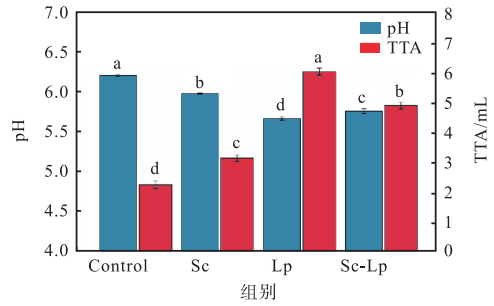

图 1　不同发酵剂对馒头 pH 和 TTA 的影响

Fig. 1　Effect of different starter cultures on pH and TTA of steamed bun

2.2　馒头的比容

馒头的比容大小代表着馒头的蓬松度，是衡量馒头口感的重要指标之一。不同发酵剂对馒头比容的影响如图 2 所示。Sc-Lp 组和 Sc 组馒头的比容均显著高于 Lp 组，其中 Sc-Lp 组馒头的比容最大，为 3.10 mL/g。这表明酿酒酵母具有较强的发酵产气能力。此外，馒头的比容也与面筋网络持气能力有关[19]。植物乳植杆菌 GM4 发酵代谢产生有机酸与胞外多糖，会强化面筋蛋白聚集，形成均匀的网络结构，改善面团网络的持气能力[20]，达到增加馒头比容的效果。这表明植物乳植杆菌 GM4 复合发酵，可以进一步提升馒头的比容。

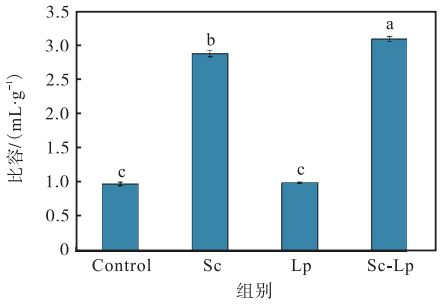

图 2　不同发酵剂对馒头比容的影响

Fig. 2　Effect of different starter cultures on specific volume of steamed bun

2.3　馒头的白度

馒头的白度反映馒头白的程度，是消费者在感官评价中外观色泽方面的重要参考指标。不同发酵剂对馒头白度的影响见表 2。由表 2 可知，Sc-Lp 组馒头的 L^*值最高，a^*值和 b^*值最低，说明植物乳植杆菌 GM4 复合发酵可以显著增加酵母馒头的明度和白度，降低馒头的黄值和绿值。Lp 组馒头的白度最低，可见 Sc-Lp 组白度的提高，归因于植物乳植杆菌 GM4 和酿酒酵母复合发酵过程中的协同作用。馒头内部结构越细腻，馒头越白[21]。因此，Sc-Lp 组馒头白度的增加，与其比容的增加一致，酿酒酵母和植物乳植杆菌 GM4 协同发酵的代谢产物，参与调节面筋网络结构，使馒头内部结构更细腻、更均匀[22]。

表 2　不同发酵剂对馒头白度的影响

Tab. 2　Effect of different starter cultures on whiteness of steamed bun

组别	L^*	a^*	b^*	W
Control	71.81 ± 0.31^{b}	1.42 ± 0.05^{b}	17.35 ± 0.10^{a}	66.87 ± 0.32^{b}
Sc	77.28 ± 0.18^{a}	0.85 ± 0.04^{c}	16.09 ± 0.23^{b}	72.15 ± 0.25^{a}
Lp	67.86 ± 0.98^{c}	2.07 ± 0.20^{a}	17.34 ± 0.21^{a}	63.42 ± 0.88^{c}
Sc-Lp	78.23 ± 0.22^{a}	0.84 ± 0.01^{c}	15.53 ± 0.24^{c}	73.25 ± 0.14^{a}

2.4　馒头的质构特性

馒头的质构特性可以反映馒头的品质，其各项参数共同影响消费者的接受度。研究表明，硬度和咀嚼性与馒头品质呈负相关，其数值越小馒头越松软，弹性和回复性则相反[15]。不同发酵剂对馒头质构特性的影响见表 3。由表 3 可知，Sc-Lp 馒头的硬度、咀嚼性低于其他馒头，弹性和回复性高于其他馒头。结果表明，酿酒酵母和植物乳植杆菌 GM4 复合发酵馒头的硬度和咀嚼性值更低，容易获得消费者认可。

表 3　不同发酵剂对馒头质构特性的影响

Tab. 3　Effect of different starter cultures on texture properties of steamed bun

组别	硬度	弹性	咀嚼性	回复性
Control	$5\,398.08 \pm 45.78^{a}$	0.69 ± 0.02^{bc}	$1\,976.28 \pm 48.60^{a}$	0.20 ± 0.02^{b}
Sc	596.11 ± 65.93^{c}	0.86 ± 0.13^{ab}	502.00 ± 10.33^{c}	0.51 ± 0.01^{a}
Lp	$3\,430.39 \pm 53.25^{b}$	0.64 ± 0.09^{c}	$1\,616.86 \pm 68.50^{b}$	0.26 ± 0.10^{b}
Sc-Lp	428.17 ± 23.26^{d}	0.92 ± 0.02^{a}	326.86 ± 24.15^{d}	0.52 ± 0.01^{a}

2.5　馒头的宏观以及微观结构

馒头的内部结构与其比容、白度和质构特性直接相关，通过馒头宏观和微观形貌，可以进一步了解植物乳植杆菌 GM4 复合发酵对馒头品质的影响。不同发酵剂对馒头结构的影响如图 3 所示。放大 50 倍后，Lp 组馒头的气孔小、数量多，Sc 组馒头的气孔比较大，气孔的形状大小不均一，该结果证实了酿酒酵母发酵能力强，产气速率快，而过快的产气速率使孔隙壁面应力增大，小孔隙容易合并形成大气孔，导致馒头呈现较大且不均匀的气孔。酵母菌和乳酸菌复合发酵的过程较为平缓，产气速率较慢，缓慢而渐进的气体形成保证了面团更好的延展性[23]。因此，Sc-Lp 组馒头的气孔大小相近且分布均匀。

在微观水平上观察放大 1 000 倍的样品，可以看

到 Lp 组馒头中有较多可辨识的裸露淀粉颗粒，面筋网络结构分布不连续，而 Sc-Lp 组馒头中连续紧凑的面筋网络以膜状分布，将淀粉颗粒均匀包裹。植物乳植杆菌代谢产生的胞外多糖，可以通过增加体系的黏度，强化面筋蛋白聚集，形成均匀的面团网络结构[24-27]。因此，植物乳植杆菌 GM4 和酿酒酵母协同发酵，使馒头的内部气孔更均匀，组织更细腻，这与馒头的比容、白度、质构特性结果一致。

2.6　馒头的风味物质

风味是影响消费者选择的重要指标之一。采用 HS-SPME-GC-MS 对 4 组馒头的挥发性风味物质进行了检测，并采用内标法定量。馒头的挥发性风味物质分析结果见表 4，共检测出 36 种典型的风味物质，其中醇类物质 14 种，醛类物质 12 种，酸类物质 1 种，酯类物质 2 种，酮类物质 6 种，其他化合物 1 种。与单菌种发酵馒头相比，Sc-Lp 组馒头风味物质含量最高，其醇类、醛类、酸类和酯类物质有所增加，这证实了植物乳植杆菌 GM4 发酵可以丰富馒头风味[28]。

馒头风味化合物总含量分析如图 4 所示。醇类物质是发酵的主要产物，对馒头的风味贡献较大。在 4 组馒头中，Sc-Lp 组馒头的醇类物质含量最高，主要包括乙醇、苯乙醇和异戊醇。乙醇贡献清香气味，苯乙醇和异戊醇则是酿酒酵母通过 Ehrlich 途径将苯丙氨酸和亮氨酸分解代谢获得[29]，苯乙醇和异戊醇的增加归因于植物乳植杆菌 GM4 和酿酒酵母发酵的协同作用，促进 Ehrlich 途径代谢。醛类物质是淀粉在发酵剂作用条件下降解而生成，可使食品的香气醇厚[30]。

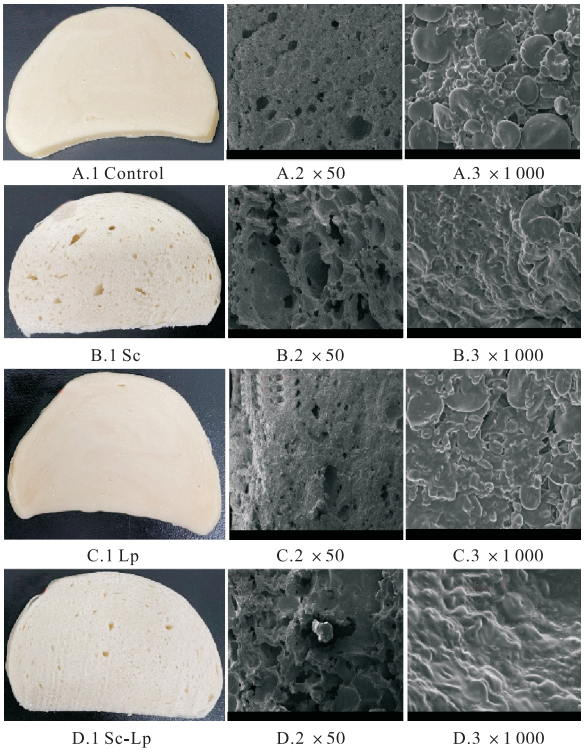

图 3　不同发酵剂对馒头结构的影响

Fig. 3　Effect of different starter cultures on structure of steamed bun

表 4　馒头的挥发性风味物质分析结果

Tab. 4　Composition of volatile flavor compounds in steamed buns

序号	化合物名称	风味物质含量/(μg·g^{-1})				序号	化合物名称	风味物质含量/(μg·g^{-1})			
		Control	Sc	Lp	Sc-Lp			Control	Sc	Lp	Sc-Lp
1	乙醇	0.061	2.450	0.184	2.472	19	2-庚烯醛	0.002	—	0.003	—
2	正丁醇	0.008	—	0.016	—	20	癸醛	0.011	0.010	0.010	0.009
3	正戊醇	0.076	0.051	0.073	0.047	21	苯甲醛	0.005	0.016	0.007	0.018
4	正己醇	0.088	0.276	0.142	0.228	22	十二醛	0.003	0.006	—	—
5	正庚醇	—	0.007	—	0.005	23	十六醛	—	—	0.004	0.005
6	异丁醇	—	0.208	—	0.211	24	5-甲基呋喃醛	0.002	—	0.003	—
7	异戊醇	—	3.866	—	3.988	25	反式-2-壬烯醛	0.002	0.003	0.002	0.003
8	苯乙醇	—	0.238	—	0.356	26	2,2-二甲基-3-羟基丙醛	0.003	0.003	—	—
9	2,3-丁二醇	—	0.027	—	0.035	27	乙酸	—	0.009	0.025	0.017
10	1,3-丁二醇	—	0.020	—	—	28	乳酸乙酯	—	—	—	0.009
11	2-十四醇	—	—	0.001	—	29	辛酸乙酯	—	0.010	—	0.011
12	1-辛烯-3-醇	0.012	0.006	0.013	0.006	30	4-辛酮	0.004	—	—	—
13	2-乙基己醇	0.002	0.014	0.003	0.041	31	环己酮	0.008	—	—	—
14	2-异丙氧基乙醇	—	0.213	—	0.114	32	3-羟基-2-丁酮	—	—	0.011	—
15	正己醛	0.149	—	0.418	—	33	3-甲基-2-庚酮	0.019	0.046	0.025	0.046
16	正辛醛	0.004	—	—	—	34	甲基庚烯酮	0.029	0.040	0.037	0.041
17	糠醛	0.016	—	0.036	—	35	3-辛烯-2-酮	—	—	0.004	—
18	壬醛	—	—	—	0.033	36	2-正戊基呋喃	—	—	0.011	—

注：—表示未检出。

Lp 组馒头的醛类物质种类较多，含量较高，表明植物乳植杆菌 GM4 可以催化淀粉降解并氧化分解产生醛类物质。酸类物质赋予馒头独特的酸味，它还可以和醇类物质反应生成酯类物质[31]。在馒头中检测到的酸类物质较少，只检测到乙酸的存在，其中 Sc-Lp 组馒头的乙酸含量高于 Sc 组，植物乳植杆菌参与发酵产生有机酸使馒头中 TTA 增加，达到调节馒头风味和延长货架期的作用。酯类物质一般有较低的阈值，气味醇厚且持久，对产品的风味影响较大[32]。在 Sc-Lp 组馒头中检测到乳酸乙酯和辛酸乙酯，且含量相对较高，在 Sc 组馒头中只检测到乳酸乙酯，说明混合发酵有利于增加酯类物质的积累和丰度。酮类物质主要来源于醇类物质的氧化和酯类物质的分解，但其呈香作用弱，在馒头整体香气特征中表现不明显[33]。4 组馒头的酮类物质含量差异不大。因此，Sc-Lp 组馒头的风味提升归因于醇类、醛类、酸类和酯类物质的增加。

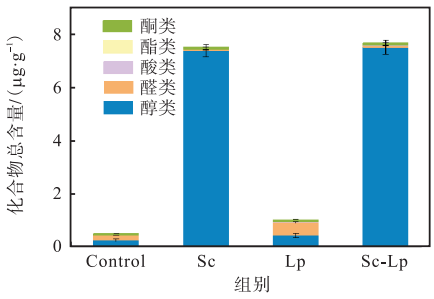

图 4　馒头风味化合物总含量分析

Fig. 4　Composition of total volatile flavor compounds contents in steamed buns

2.7　感官评价

馒头的感官评价是消费者对馒头接受度的直观体现。优质馒头的外表饱满光滑，色泽乳白，内部孔隙均匀。馒头的感官评分见表 5。

表 5　馒头的感官评分

Tab. 5　Sensory score of steamed bun

项目	评分			
	Control	Sc	Lp	Sc-Lp
外观	4.90 ± 1.45^{c}	16.40 ± 1.62^{b}	5.20 ± 1.17^{c}	18.20 ± 1.33^{a}
弹性	1.90 ± 0.70^{b}	8.90 ± 0.94^{a}	2.10 ± 0.83^{b}	9.10 ± 0.70^{a}
内部结构	5.20 ± 0.98^{c}	14.90 ± 1.64^{b}	6.30 ± 2.15^{c}	18.10 ± 1.76^{a}
风味	12.10 ± 2.70^{b}	26.50 ± 2.01^{b}	13.70 ± 3.38^{a}	27.40 ± 1.91^{a}
口感	5.20 ± 1.25^{c}	14.30 ± 3.20^{b}	5.90 ± 0.94^{c}	18.30 ± 1.62^{a}
总分	29.30 ± 2.57^{c}	81.00 ± 5.71^{b}	33.20 ± 4.31^{c}	91.10 ± 3.01^{a}

Sc-Lp 组馒头的感官评分最高，各项指标的评分均高于 Sc 组，尤其在外观、内部结构和口感方面，而 Lp 组馒头各项评分较低，这是由于未添加酿酒酵母，植物乳植杆菌缺少营养因子且代谢产气量不足，面团不能充分发酵。结果表明，植物乳植杆菌与酵母菌协同发酵制作的馒头具有更好的感官特性，大众的可接受度更高。

3　结　语

植物乳植杆菌 GM4 和酿酒酵母协同发酵对馒头感官品质和风味均产生积极影响。植物乳植杆菌 GM4 参与发酵，使馒头的 pH 下降、TTA 增加。与 Control 组和单菌种发酵馒头相比，混合菌种发酵可以增大馒头的比容，提高白度，降低硬度和咀嚼度，提高弹性和回复性，使馒头表现出良好的质构特性。Sc-Lp 组馒头的风味物质含量增加，其中醇类、醛类、酸类和酯类物质增加明显。混合菌种发酵馒头的内部结构细腻均匀，口感松软富有弹性，口味独特。本研究为植物乳植杆菌GM4 复合发酵馒头的感官品质及风味优化提供理论支撑，助力老面馒头工业化生产。

参考文献：

[1] MICHEL E, MONFORT C, DEFFRASNES M, et al. Characterization of relative abundance of lactic acid bacteria species in French organic sourdough by cultural, qPCR and MiSeq high-throughput sequencing methods [J]. International journal of food microbiology, 2016, 239: 35–43.

[2] FANG L P, WANG W J, DOU Z X, et al. Effects of mixed fermentation of different lactic acid bacteria and yeast on phytic acid degradation and flavor compounds in sourdough [J]. LWT-Food science and technology, 2023, 174: 114438.

[3] 孙楚楠，楚炎沛. 酸面团及其在发酵面制食品中的应用[J]. 现代面粉工业，2020，34(1)：25–28.

[4] SAA D T, DI SILVESTRO R, 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.

[5] 卫娟，洪静，郑学玲. 酸面团发酵过程中面团流变及面筋蛋白降解变化研究[J]. 食品科技，2021，46(3)：129–134.

[6] FALASCONI I, FONTANA A, PATRONE V, et al. Genome-assisted characterization of *Lactobacillus fermentum*, *Weissella cibaria*, and *Weissella confusa* strains

isolated from sorghum as starters for sourdough fermentation[J]. Microorganisms, 2020, 8(9): 1388–1403.

[7] APLEVICZ K S, DA SILVA T, FRITZEN-FREIRE C B, et al. Effect of the incorporation of different freeze-dried cultures on the properties of sourdough bread[J]. Journal of culinary science & technology, 2014, 12(4): 354–367.

[8] PETER S, WOLFGANG E. Characterization of novel, sulfur-containing Maillard flavor compounds[J]. International congress series, 2002, 1245: 229–233.

[9] BARTKIENE E, SCHLEINING G, JUODEIKIENE G, et al. The influence of lactic acid fermentation on biogenic amines and volatile compounds formation in flaxseed and the effect of flaxseed sourdough on the quality of wheat bread[J]. LWT-Food science and technology, 2014, 56(2): 445–450.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 小麦粉馒头: GB/T 21118—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 白度的表示方法: GB/T 17749—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[12] YU Y, WANG L, QIAN H, et al. Contribution of spontaneously-fermented sourdoughs with pear and navel orange for the bread-making[J]. LWT-Food science and technology, 2018, 89: 336–343.

[13] LI J, AI L, XU F, et al. Structural characterization of exopolysaccharides from *Weissella cibaria* NC516.11 in distiller grains and its improvement in gluten-free dough [J]. International journal of biological macromolecules, 2022, 199: 17–23.

[14] ZHANG G H, WU T, SADIQ F A, et al. A study revealing the key aroma compounds of steamed bread made by Chinese traditional sourdough[J]. Journal of Zhejiang university: science B, 2016, 17(10): 787–797.

[15] 曾正海. 富含 EPS 酸面团对馒头品质的影响及馒头制作配方的优化[D]. 雅安: 四川农业大学, 2021.

[16] PRUCKLER M, LORENZ C, ENDO A, et al. Comparison of homo- and heterofermentative lactic acid bacteria for implementation of fermented wheat bran in bread[J]. Food microbiology, 2015, 49: 211–219.

[17] CHAVAN R S, CHAVAN S R. Sourdough technology: a traditional way for wholesome foods: a review[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2011, 10(3): 169–182.

[18] 刘璐. 含麸面团的品质特性及其面包制品的研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2021.

[19] ABEDFAR A, HOSSEININEZHAD M, CORSETTI A. RETRACTED: effect of wheat bran sourdough with exopolysaccharide producing *Lactobacillus plantarum* (NR_104573.1) on quality of pan bread during shelf life[J]. LWT-Food science and technology, 2019, 111: 158–166.

[20] CARBONETTO B, NIDELET T, GUEZENEC S, et al. Interactions between *Kazachstania humilis* yeast species and lactic acid bacteria in sourdough[J]. Microorganisms, 2020, 8(2): 240–258.

[21] 石飞, 刘长虹. 不同米粉对酵子及馒头品质影响研究[J]. 食品科技, 2017, 42(6): 142–146.

[22] 吴玉新, 陈佳芳, 马子琳, 等. 乳酸菌发酵米粉酸面团生化特性及其对馒头蒸制特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 64–71.

[23] YU Y, WANG L, QIAN H, et al. Effect of selected strains on physical and organoleptic properties of breads [J]. Food chemistry, 2019, 276: 547–553.

[24] SHUMOY H, VAN BOCKSTAELE F, DEVECIOGLU D, et al. Effect of sourdough addition and storage time on in vitro starch digestibility and estimated glycemic index of tef bread[J]. Food chemistry, 2018, 264: 34–40.

[25] 艾志录, 聂文静, 李真, 等. 中国不同地区老酵头对馒头质构和感官品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(6): 1427–1433.

[26] OLOJEDE A O, SANNI A I, BANWO K. Rheological, textural and nutritional properties of gluten-free sourdough made with functionally important lactic acid bacteria and yeast from Nigerian sorghum[J]. LWT-Food science and technology, 2020, 120: 108875.

[27] ARENDT E K, RYAN L A, DAL BELLO F. Impact of sourdough on the texture of bread[J]. Food microbiology, 2007, 24(2): 165–174.

[28] XU D, ZHANG Y, TANG K, et al. Effect of mixed cultures of yeast and lactobacilli on the quality of wheat sourdough bread[J]. Frontiers in microbiology, 2019, 10: 2113.

[29] CHOI Y J, LEE J, JANG Y S, et al. Metabolic engineering of microorganisms for the production of higher alcohols[J]. mBio, 2014, 5(5): 01524-14.

[30] LI Z, LI H, DENG C, et al. Effect of mixed strain starter

（下转第 20 页）

sciences, 1991, 88(8): 3120–3124.
[8] PRICE H P, GOULDING D, SMITH D F. ARL1 has an essential role in *Trypanosoma brucei*[J]. Biochemical society transactions, 2005, 33(4): 643–645.
[9] LOWE S L, WONG S H, HONG W. The mammalian ARF-like protein 1(Arl1) is associated with the Golgi complex[J]. Journal of cell science, 1996, 109(1): 209–220.
[10] 樊振川, 刘雁霞. 莱茵衣藻 LZTFL1 蛋白的多克隆抗体制备及应用[J]. 中国生物工程杂志, 2017, 37(11): 109–115.
[11] 田伟. 莱茵衣藻纤毛内蛋白 IFT139 的原核表达、纯化及多克隆抗体的制备[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
[12] 薛斌, 王高飞, 潘强, 等. 莱茵衣藻 IFT22 蛋白的原核表达、纯化及其多克隆抗体的制备[J]. 中国细胞生物学学报, 2018, 40(11): 1915–1921.
[13] 任海月, 董彬, 樊振川, 等. 莱茵衣藻纤毛内运输蛋白 IFT46 的原核表达纯化及其多克隆抗体的制备[J]. 生物工程学报, 2016, 32(8): 1124–1132.
[14] 王晶. 小 G 蛋白 BBS3b 的原核表达纯化及其多克隆抗体的制备[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
[15] 刘雁霞, 刘思佳, 王慧, 等. 莱茵衣藻 BBS1 蛋白的原核表达、纯化及其多克隆抗体制备[J]. 天津科技大学学报, 2019, 34(6): 31–34.
[16] AJMAL M, KHAN M I, NEVELING K, et al. Exome sequencing identifies a novel and a recurrent BBS1 mutation in Pakistani families with Bardet-Biedl syndrome[J]. Molecular vision, 2013, 19: 644–653.
[17] 韩鹏飞, 闫珍, 樊振川. 莱茵衣藻纤毛内运送蛋白 IFT57 抗原的原核表达、纯化及其多克隆抗体的制备[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(11): 108–114.
[18] 董彬, 吴松, 程荣强, 等. 莱茵衣藻 BBSome 蛋白 BBS2 原核表达、纯化和多克隆抗体的制备及鉴定[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(2): 145–152.
[19] BERNSTEIN M, BEECH P L, KATZ S G, et al. A new kinesin-like protein(Klp1) localized to a single microtubule of the *Chlamydomonas flagellum*[J]. Journal of molecular cell biology, 1994, 125(6): 1313–1326.
[20] 王震, 董彬, 樊振川, 等. 莱茵衣藻 IFT25 的原核表达、纯化及其多克隆抗体的制备[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(9): 903–908.
[21] 李桂新, 孙长凯, 程桂芝, 等. 应用 Protein A 亲和层析法制备及纯化 R1 JHL 单克隆抗体[J]. 大连医科大学学报, 2008(2): 188–190.
[22] 李文娟, 贾航, 薛斌, 等. 莱茵衣藻 BBS8 蛋白的原核表达、纯化及多克隆抗体的制备[J]. 水生生物学报, 2022, 46(9): 1319–1324.
[23] JIANG W, LIU X, WU D, et al. A simple, rapid one-step ELISA using antibody-antibody complex[J]. Biotechnology and applied biochemistry, 2015, 62(1): 126–131.
[24] LIMSUWANCHOTE S, WUNGSINTAWEEKUL J, YUSAKUL G, et al. Preparation of a monoclonal antibody against notoginsenoside R1, a distinctive saponin from *Panax notoginseng*, and its application to indirect competitive ELISA[J]. Planta medica, 2014, 80(4): 337–342.

责任编辑: 郎婧

(上接第 13 页)

culture on rheological properties of wheat dough and quality of steamed bread[J]. Journal of texture studies, 2014, 45(3): 180–186.
[31] MANDHA J, SHUMOY H, DEVAERE J, et al. Effect of lactic acid fermentation of watermelon juice on its sensory acceptability and volatile compounds[J]. Food chemistry, 2021, 358: 129809.
[32] 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, 2017.
[33] 孙祥祥, 刘长虹, 张萌, 等. 酵母与酵子及其制作馒头挥发性物质分析[J]. 中国酿造, 2018, 37(12): 186–191.

责任编辑: 郎婧