黄芳, 赖淑琴, 蔡亦涵, 等. 发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 对发酵乳的理化特性、风味及贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 193−202. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060079
HUANG Fang, LAI Shuqin, CAI Yihan, et al. Research on the Effects of *Limosilactobacillus fermentum* FOSU YHD19 on Physicochemical Properties, Flavor Characteristics, and Storage Quality of Yogurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 193−202. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060079

·生物工程·

发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 对发酵乳的理化特性、风味及贮藏品质的影响

黄　芳[1], 赖淑琴[1], 蔡亦涵[1], 冯绍夫[1], 何敏淇[1], 曾新安[1,2], 黄燕燕[1,*]
（1.佛山大学食品科学与工程学院, 广东省食品智能制造重点实验室, 广东佛山 528225;
2.华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510641）

摘　要: 为解决传统发酵乳制品在风味、营养及功能性上的局限，本研究引入发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 与传统发酵剂协同作用。通过系统考察了不同接种浓度（10^5~10^9 CFU/mL）对发酵乳品质的影响。通过监测发酵过程（pH、可滴定酸度、持水力及活菌数动态变化）和贮藏稳定性，以及产品后熟期的感官特性、微观结构和挥发性风味物质等关键指标。结果表明，FOSU YHD19 的添加显著提升了发酵性能，加速酸化进程（发酵 10 h 内 pH 降至 4.44），并能有效改善发酵乳的质构特性，适度降低产品硬度和弹性，使口感更为绵密柔滑。当接种量为 10^7 CFU/mL 时，发酵乳制品呈现最佳综合品质，效果优于传统发酵剂。具体表现为：其持水力达 94.1%±0.02%，可滴定酸度为 41.2±1.0°T，微观结构显示蛋白凝胶网络更致密均匀，且感官总体评分高于其他组（106.3±4.83 分）。GC-MS 分析显示，该处理组酸类、醇类和酮类物质相对含量提升，赋予产品更丰富的果香和奶酪香气。此外，在 4 ℃ 条件下贮藏 28 d，发酵乳活菌数仍维持在 10^6 CFU/mL，且各项品质参数保持稳定。本研究为开发兼具优良感官特性和益生功能的高附加值发酵乳产品提供了理论支撑和技术参数。

关键词: 发酵粘液乳杆菌, 发酵乳, 品质分析, 挥发性风味物质, 贮藏品质
中图分类号: Q939.99　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0193−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060079
本文网刊:

Research on the Effects of *Limosilactobacillus fermentum* FOSU YHD19 on Physicochemical Properties, Flavor Characteristics, and Storage Quality of Yogurt

HUANG Fang[1], LAI Shuqin[1], CAI Yihan[1], FENG Shaofu[1], HE Minqi[1], ZENG Xin'an[1,2], HUANG Yanyan[1,*]
（1.Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Food Manufacturing, School of Food Science and Engineering, Foshan University, Foshan 528225, China;
2.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China）

Abstract: To address the limitations of traditional fermented dairy products in terms of flavor, nutrition and functional properties, this study introduces *Limosilactobacillus fermentum* FOSU YHD19 in synergy with a traditional starter culture. The effects of different inoculation concentrations (10^5~10^9 CFU/mL) on the quality of yogurt were systematically investigated. The fermentation process (including dynamic changes in pH, titratable acidity, water-holding capacity, and viable cell count) and storage stability were monitored, along with key indicators such as sensory properties, microstructure, and volatile flavor compounds after product maturation. The results demonstrated that the addition of FOSU YHD19 significantly enhanced fermentation performance, accelerating the acidification process (with the pH decreasing to 4.44 within

收稿日期: 2025−06−09
基金项目: 广东省科技创新战略专项资金（2022B1212010015）; 广东省重点研发项目（2023B0202040002）。
作者简介: 黄芳（2000−）, 女, 硕士, 研究方向: 微生物利用与控制, E-mail: 16602749429@163.com。
*** 通信作者:** 黄燕燕（1992−）, 女, 博士, 研究方向: 微生物利用与控制, E-mail: huang_yanyan@fosu.edu.cn。

10 hours). It also effectively improved the texture characteristics of the yogurt by appropriately reducing hardness and elasticity, resulting in a denser and smoother mouthfeel. When the inoculation amount was 10^7 CFU/mL, the fermented dairy product exhibited the best overall quality, outperforming the traditional starter culture. Specifically, its water holding capacity reached 94.1%±0.02%, with titratable acidity of 41.2±1.0 °T. Microstructural observation revealed a denser and more uniform protein gel network. Meanwhile, its overall sensory score (106.3±4.83) was higher than that of all other treatment groups. GC-MS analysis revealed an increase in the relative content of acids, alcohols, and ketones, imparting a richer fruity and cheesy aroma to the product. Furthermore, after 28 days of storage at 4 ℃, the viable bacterial count remained above 10^6 CFU/mL, and all quality parameters remained stable. This study could provides both theoretical foundations and technical parameters for developing premium yogurt products with enhanced organoleptic properties and probiotic benefits.

Key words: *Limosilactobacillus fermentum*; yogurt; quality analysis; volatile flavor compounds; quality during storage

益生菌(Probiotics)是一类活性微生物,当摄入量足够时,对宿主健康十分有益[1]。根据欧盟安全资格认证(QPS)体系规定,目前允许使用的益生菌菌种共计 52 种。这些菌种主要分为四大类:34 种乳酸菌、10 种芽孢杆菌、5 种双歧杆菌以及 3 种葡萄球菌[2]。在食品发酵工业中,乳杆菌属(*Lactobacillus* spp.)微生物因其优良的发酵特性和益生功能而得到最为广泛的应用[3]。发酵粘液乳杆菌(*Limosilactobacillus fermentum*)是发酵食品中的优势微生物,不仅可以提高食品的品质和风味,还具有安全性和多种益生功能,包括降解尿酸、抑制肠道有害菌群、缓解肠道疾病、增强机体免疫力、抗氧化、抗衰老等[4−5]。

发酵粘液乳杆菌在发酵乳制品中的应用研究已取得显著进展。于素素等[6]通过将发酵粘液乳杆菌 HY01 应用于牦牛酸奶发酵,证实该菌株不仅能显著改善产品质构和风味特性,还具有调节肠道菌群的益生功能。Lim 等[7]利用传统泡菜中分离获得的发酵粘液乳杆菌 KU200060 作为发酵剂时,其制备的酸奶在感官品质和理化指标方面均表现出优良特性,且消费者接受度与传统发酵剂无显著差异。在作用机制研究方面,Wei 等[8]发现该菌株产生的中性多糖能有效填充酪蛋白凝胶网络空隙,显著提升发酵乳的持水性和黏弹性。Aziz 等[9]通过多因素评价筛选出的发酵粘液乳杆菌 NPL280 在 4 ℃ 贮藏条件下仍能维持发酵水牛奶较高的活菌数(>10^8 CFU/mL)达 7 d,且感官评分处于可接受范围。以上研究表明,该菌株在发酵乳制品中展现出良好的应用前景。发酵乳制品的品质特性直接影响消费者的感官体验和健康效益。当前传统发酵剂在风味多样性、营养价值和功能特性等方面已难以满足市场多元化需求,因此亟需开发新型益生菌发酵体系。

基于此,本研究以课题组前期从泡菜中分离获得的发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 为研究对象,针对目前发酵乳制品中该菌株最适添加量研究缺失的问题,系统考察了不同接种浓度(10^5~10^9 CFU/mL)对发酵乳品质的影响,为开发兼具优良感官品质和功能特性的新型发酵乳制品提供了理论依据和技术参数。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19　由课题组前期从泡菜中分离筛选得到,并于 2024 年 3 月 6 日保藏于广东省微生物菌种保藏中心,保藏编号为 GDMCC NO.64389;发酵粘液乳杆菌 YL-11　商业对照菌株,购于广东省微生物菌种保藏中心,保藏编号为 GDMCC 1.1796;传统商业发酵剂　由佛山大学广东省食品智能制造重点实验室提供(含保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌和嗜酸乳杆菌,接种比例为 1∶1∶1 CFU/mL);MRS 肉汤培养基、琼脂粉　广东环凯微生物科技有限公司;酚酞指示剂(AR)、氢氧化钠(AR)、2.5% 戊二醛溶液、PBS 缓冲液、氯化钠(AR)、无水乙醇(AR)　阿拉丁生化科技股份有限公司;全脂乳粉、白砂糖　中国佛山本地大润发超市。

Thermo 1386 生物安全柜、Quattro S 环境扫描电镜　赛默飞世尔科技公司;HS-250HC-11 恒温培养箱　上海-恒科学仪器有限公司;H2-16KR 台式高速离心机　湖南可成仪器设备有限公司;XFH-30CA 电热式蒸汽压力灭菌锅　中友机械制造有限公司;FiveEasy Plus 型 pH 计　梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;7890B/5799A 气相色谱质谱联用仪　安捷伦科技有限公司;TA.XTplus质构仪　上海瑞玢智能科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　菌种活化　将甘油保藏的发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 和 YL-11 于室温解冻后,接种于 MRS 肉汤培养基中,37 ℃ 恒温培养 12 h 进行初次活化。取活化后的菌液按 1%(v/v)接种量转接至新鲜 MRS 培养基,相同条件下进行二次活化。离心(8000×g, 10 min, 4 ℃)收集菌体,并用无菌 PBS 缓冲液(0.1 mol/L, pH7.4)洗涤 3 次以去除培养基残留,最终菌体重悬于 PBS 中,4 ℃ 保存备用。

1.2.2　发酵乳的制备　首先将全脂乳粉(11.5%, m/v)和白砂糖(6.5%, m/v)溶解于 65 ℃ 蒸馏水中,持续搅拌 15 min 使其充分混匀,随后将混合液分装至无菌发酵罐中密封,于 65 ℃ 条件下进行 30 min 巴氏杀菌,杀菌完成后立即冷却。按照表 1 所示的实验分组分别添加传统商业发酵剂和不同浓度的发酵粘液乳杆菌菌悬液,充分搅拌混匀后密封,置于 37 ℃ 恒温培养箱中发酵至凝乳形成且 pH 降至 4.5 左右。最终将发酵产物转移至 4 ℃ 冰箱中进行 24 h 冷藏后熟处理,以获得品质稳定的发酵乳终产品。

表 1　实验分组设计

Table 1　Experimental group design

实验分组	接种量		
	传统商业发酵剂（CFU/mL）	发酵粘液乳杆菌FOSU YHD19（CFU/mL）	发酵粘液乳杆菌 YL-11（CFU/mL）
ck	1×10^7	–	–
MY11	1×10^7	–	1×10^7
LF19	1×10^7	1×10^5	–
MF19	1×10^7	1×10^7	–
HF19	1×10^7	1×10^9	–

注：“–”表示未添加。

1.2.3　发酵乳发酵期内理化性质测定

1.2.3.1　活菌数测定　在发酵期间的 0、2、4、6、8、10 h 分别取样，经充分振荡混匀后，准确量取 0.1 mL 样品加入 0.9 mL 无菌生理盐水中，进行梯度稀释。采用稀释涂布平板法，每个稀释梯度取 100 μL 菌液涂布于 MRS 琼脂平板，37 ℃ 培养 48 h 后，选择菌落数为 30~300 CFU 的平板进行计数。

1.2.3.2　pH 和可滴定酸度测定　在发酵期间的 0、2、4、6、8、10 h 分别取样，用手持 pH 计测量 pH，取 3 个平行样品的平均值，精确至小数点后两位。在相同时间点分别取 1 g 样品并加入 4 mL 蒸馏水，根据 Huang 等[10] 的方法测定发酵乳的可滴定酸度。

1.2.3.3　持水力测定　参考 Huang 等[10] 的方法加以改进，在发酵期间的 0、2、4、6、8、10 h 分别取 5 g 样品置于离心管中，记录总质量（m_1）。4 ℃ 下 8000 r/min 离心 8 min，弃上清液后称重（m_2）。根据式（1）计算发酵乳的持水力：

$$\text{持水力}(\%)=\frac{m_2}{m_1}\times100 \qquad \text{式（1）}$$

1.2.4　微观结构观察　取 1 mL 后熟发酵乳样品离心（8000×g，5 min，4 ℃）洗涤三次后，加入 1 mL 2.5% 戊二醛溶液，在 4 ℃ 条件下固定 12 h。固定完成后洗净固定液，加入不同浓度乙醇溶液进行梯度脱水（30%~100%），脱水后的样品在通风橱风干 6 h，采用离子溅射方法镀金后通过扫描电镜观察并拍照。

1.2.5　质构特性测定　采用 TA.XTplus 质构仪（ABE 探头，直径 40 mm）测定发酵乳的质构特性。测试条件：压缩模式，测试距离 30 mm，测前及测试速度均为 1.0 mm/s，测后速度为 10.0 mm/s。

1.2.6　挥发性风味物质测定　准确称取 5.0 g 发酵乳样品，采用 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头进行顶空固相微萃取。萃取条件：250 ℃ 老化 3 min，50 ℃ 吸附 30 min，250 ℃ 解吸 5 min。程序升温模式：初始温度 35 ℃ 保持 3 min，以 4 ℃/min 升至 140 ℃ 保持 1 min，再以 10 ℃/min 升至 250 ℃ 保持 3 min。质谱分析采用电子轰击电离（EI）源，电离能量 70 eV，离子源温度 230 ℃，传输线温度 280 ℃，质量扫描范围 m/z 33~450，发射电流 100 μA。获得的质谱数据通过 NIST 11 标准谱库进行检索匹配，设定匹配度阈值≥80，仅保留匹配分数达标的挥发性化合物。采用峰面积归一化法定量分析各挥发性成分的相对含量，根据式（2）进行计算，Ci 为第 i 种挥发性物质相对百分含量；Ai 为该物质色谱峰面积；An 为所有检出挥发性组分总峰面积。

$$\text{Ci}(\%)=\frac{\text{Ai}}{\text{An}}\times100 \qquad \text{式（2）}$$

1.2.7　感官评价　参考 GB 19301-2010《食品安全国家标准 发酵乳》对发酵乳进行感官评价，选取 20 名食品感官评定志愿者（男女各半，年龄 20~35 岁）参与样品评价。评定在标准感官实验室（温度 24±1 ℃，相对湿度 60%±5%）中进行，评价指标包括色泽（20 分）、口感（30 分）、滋味与气味（30 分）和组织状态（20 分）四个维度，具体评分标准详见表 2。评定前样品均以随机三位数编号，并置于白色一次性品尝杯中，在 4 ℃ 条件下呈递。每个样品间隔 5 min 以避免感官疲劳。最终结果取各指标得分的算术平均值作为样品感官品质评价依据。

表 2　发酵乳感官评分标准

Table 2　Sensory scoring criteria for yogurt

项目	评分标准	感官评分（分）
色泽（满分20分）	色泽均匀一致，呈乳白色或微黄色，有光泽	15~20
	色泽基本均匀，颜色平淡，有光泽	10~14
	色泽不均匀，颜色较深或较浅，无光泽	0~9
口感（满分20分）	口感细腻爽滑，无砂质感	15~20
	口感细腻，略有砂质感	10~14
	口感粗糙，有砂质感	0~9
滋味、气味（满分30分）	具有高蛋白发酵乳产品特有的滋味、气味，微酸，无异味	25~30
	具有产品特有的滋味、气味不足，味道较酸，无异味	15~24
	没有产品特有的滋味、气味，味道酸，有苦味或其他异味	0~14
组织状态（满分30分）	表面柔滑，无微量乳清析出，无杂质，无气泡，组织均匀细腻，黏度适宜	25~30
	表面光滑，有乳清析出，无杂质，略有气泡，组织细腻，黏度适中	15~24
	表面不光滑，有大量乳清析出，无杂质，有气泡，组织粗糙，黏度明显下降	0~14

1.2.8　发酵乳贮藏期间理化性质的测定　后熟完成的发酵乳于 4 ℃ 冰箱贮藏 28 d，在第 0、7、14、21 和 28 d 分别取样测定活菌数、pH、可滴定酸度以及持水力，测定方法同 1.2.3 小节。

1.3　数据处理

实验数据均以均值±标准差（$\bar{x}\pm s$）形式呈现，每组实验重复三次。采用 SPSS 27.0 和 Origin 2018 软件进行数据处理和作图，运用单因素方差分析和独立样本 *t* 检验等方法进行组间差异比较，显著性水平设定为 0.05。

2　结果与分析

2.1　发酵乳发酵期内理化性质分析

2.1.1　活菌数分析　活菌数作为评价发酵乳品质的

表 3 发酵期内活菌数的变化

Table 3 Changes in the number of viable bacteria during the fermentation period

时间(h)	活菌数(×10⁶ CFU/mL)				
	ck	HF19	MF19	LF19	MY11
0	45.00±5.00^{Ab}	42.50±4.50^{Ac}	2.15±0.05^{Bc}	0.09±0.02^{Cc}	2.75±0.05^{Ba}
2	70.00±10.00^{Ab}	54.50±5.50^{Bc}	2.10±0.00^{Cc}	0.06±0.01^{Dc}	2.45±0.15^{Ca}
4	105.00±15.00^{Ba}	315.00±15.00^{Ab}	5.10±0.80^{Cb}	0.33±0.04^{Eb}	2.50±0.00^{Da}
6	20.00±0.00^{Bc}	430.00±30.00^{Aa}	8.75±0.35^{Ca}	0.08±0.06^{Ec}	0.40±0.20^{Dc}
8	11.00±0.00^{Ad}	4.00±1.00^{Bd}	1.75±0.65^{Ccd}	0.66±0.03^{Da}	1.15±0.55^{Cb}
10	0.59±0.00^{Ce}	7.00±1.00^{Ad}	1.05±0.25^{Bd}	0.69±0.04^{Ca}	1.10±0.10^{Bb}

注: 不同大写字母代表组间具有显著性差异, $P<0.05$; 不同小写字母代表组内具有显著性差异, $P<0.05$。

关键指标, 直接影响产品的感官特性和功能特性[11]。如表 3 所示, 不同处理组的活菌数动态变化呈现显著差异。ck 组、HF19 组和 MF19 组的活菌数均呈现先升高后降低趋势, 其中 HF19 组在发酵中期(4~6 h)表现出最强的增殖能力。相比之下, LF19 组的菌体活性整体较低, 而 MY11 组则表现出较好的稳定性。值得注意的是, 在相同接种量(10^7 CFU/mL)条件下, 发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 的活菌数显著高于对照菌株 YL-11($P<0.05$), 表明该菌株更适应发酵乳的生长环境。发酵终点时, 除 LF19 组外, 其余各组活菌数均出现下降, 这主要归因于乳酸积累导致的 pH 降低对菌体生长的抑制作用。研究结果证实, 当 FOSU YHD19 接种量为 10^9 CFU/mL 时, 可获得最佳的菌体生长性能, 这与其较强的酸耐受性和代谢活性密切相关。

2.1.2 pH、可滴定酸度以及持水力分析 pH 是监测发酵过程的关键参数, 也是判定发酵终点的重要指标, 通常以 pH=4.5 作为酸奶发酵完成的临界值[12]。当 pH 降到 4.5 左右时, 牛奶中的酪蛋白会凝固, 形成酸奶的质地, 同时抑制有害菌的生长, 确保食品安全[13]。如图 1A 所示, 除 HF19 组外, 各处理组初始 pH 均为 6.70±0.05, 在发酵前 4 h 内 pH 未见显著变化, 这可能与乳酸菌的生长迟滞期有关。HF19 组因菌体浓度较高, pH 下降速率显著快于其他组别($P<0.05$)。6~10 h 为快速产酸期, 各处理组 pH 均显著下降, 其中 HF19 组在 10 h 时 pH 最低(4.44±0.02), 已达标发酵终点; 而 LF19 组 pH 最高(5.72±0.03), 尚未达到理想凝固点。相应地, 可滴定酸度测定结果显示, HF19 组酸度最高(41.2±1.0°T), 各处理组酸度值与 pH 变化呈显著负相关($P<0.05$)(图 1B), 这与酪蛋白在 pH4.5~4.6 时发生等电点沉淀形成凝胶结构的理论相符[14]。这些结果表明, FOSU YHD19 能通过调节产酸代谢显著影响发酵进程, 其作用效果具有剂量依赖性特征。持水力是表征发酵乳胶体稳定性的重要指标, 直接影响产品的质构特性和贮藏品质[15]。如图 1C 所示, 各组整体均呈上升的趋势, 当 FOSU YHD19 添加量为10^7 CFU/mL 时, 发酵乳的持水力高于其他组, 最高为 94.1%±0.02%。HF19 组的持水力在 8~10 h 降低, 可能是由于过度酸化导致蛋白质结构破坏, 乳清析出增加[14]。

2.2 发酵乳微观结构观察

凝固型发酵乳的凝胶性质的变化通常与配方的改变相关联, 这会直接影响凝胶的微观结构[16]。牛乳中的脂肪通常以小球体或小液滴的形式存在, 并形成乳脂球膜覆盖于发酵乳外层[17]。如图 2 所示, 与 ck 组相比, 其他实验组均表现出更致密、均匀的微观结构, 且孔隙结构的致密程度与 FOSU YHD19 接种量呈正相关。其中, HF19 组样品表面可见明显的颗粒状物质和局部孔洞, 这可能是由于乳清蛋白未完全溶解导致的凝胶网络不均匀现象[18]。MF19 组则因较强的乳酸发酵作用导致 pH 快速下降, 使蛋白质静电斥力增大, 形成表面粗糙和裂缝结构。值得注意的是, ck 组和 MY11 组样品呈现较多的不规则孔隙结构, 这种结构缺陷可能导致产品质地松散和持水力下降。以上结果表明, FOSU YHD19 的添加能有效改善发酵乳凝胶网络的均匀性和致密性。

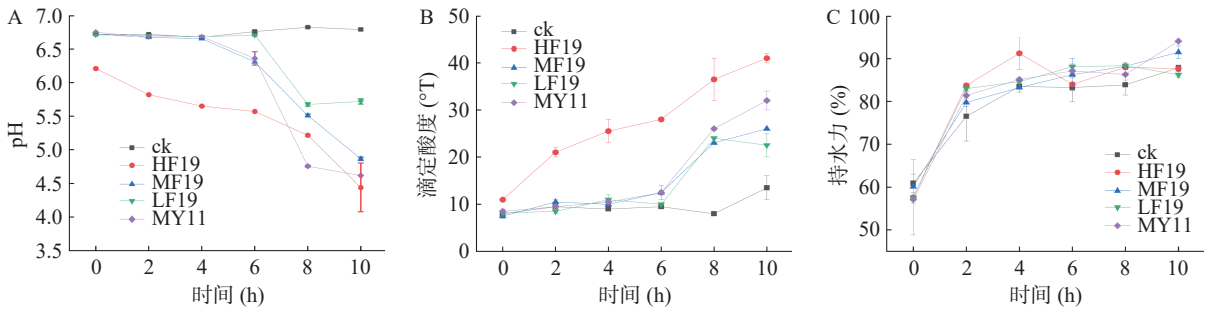


图 1 发酵期内发酵乳 pH(A)、可滴定酸度(B)、持水力(C)变化

Fig.1 Changes in pH (A), titratable acidity (B), and water-holding capacity (C) of the yogurt during the fermentation period

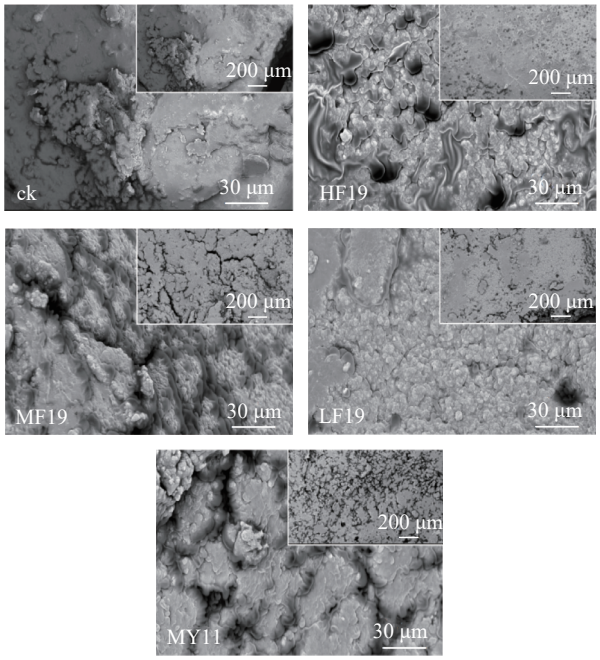


图 2　发酵乳扫描电镜图

Fig.2　Scanning electron micrographs of yogurt

2.3　发酵乳质构特性分析

发酵乳的质构特性是评价其品质的重要指标，直接影响产品的物理特性和感官接受度[19]。本研究通过质构仪分析了硬度、弹性、内聚性、咀嚼性等关键参数的变化规律。结果表明，不同处理组的硬度未呈现显著差异（P>0.05），但值得注意的是，接种 FOSU YHD19 的 HF19、LF19 组以及 MY11 组硬度值均低于 ck 组（图 3A）。在弹性指标方面，所有接种发酵粘液乳杆菌的处理组均低于 ck 组（图 3B），这可能是由于乳酸菌发酵过程中产生的有机酸和蛋白酶改变了酪蛋白胶束的交联程度，导致凝胶网络结构更为松散[19]。此外，各组在黏性和恢复力关键质构参数上均未表现出显著性差异（P>0.05）。综合各质构参数可知，FOSU YHD19 菌株能有效改善发酵乳的质构特性。

2.4　发酵乳挥发性风味物质分析

本试验通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用仪（HS-SPME-GC-MS）检测分析后熟完成的 5 组发酵乳中的挥发性物质。如表 4 所示，所有发酵乳中共检测到 51 种挥发性风味化合物，其中醇类化合物 16 种，醛类化合物 1 种，酮类化合物 12 种，酯类化合物 8 种以及酸类化合物 14 种。

醇类化合物作为乳酸菌发酵过程中的特征代谢产物，主要通过糖酵解途径及氨基酸分解代谢产生[20]。如表 4 所示，HF19 组醇类物质的相对含量最高（18.38%），高于其他实验组（MF19 组 9.40%、MY11 组 8.58%、LF19 组 4.95%）和 ck 组（4.29%）。这一差异可能与不同处理组中乳酸菌代谢活性的差异密切相关。在检测到的醇类物质中，乙醇、1-戊醇和正己醇为各组共有成分。特别值得关注的是，1-戊醇和正己醇作为重要的风味活性物质，具有典型的水果香（如香蕉、苹果）和花香（如玫瑰）特征。

发酵乳的奶香味主要来自酮类化合物，使发酵乳具有更浓郁的风味，此外，酮类的存在还可使发酵乳产生果香味，其风味阈值通常较低，对发酵乳的整体风味有较大影响[21]。在所有组别中，均检测到 2-庚酮和 2-壬酮物质，它们赋予发酵乳花香味、果味（2-庚酮有类似梨的香味）和霉味[22]。其中，ck 组 2-庚酮含量（12.0%）最高，LF19、MF19 和 HF19 组含量依次为 2.9%、1.6% 和 0.4%（表 4），即 2-庚酮产量随着发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19接种量增加而

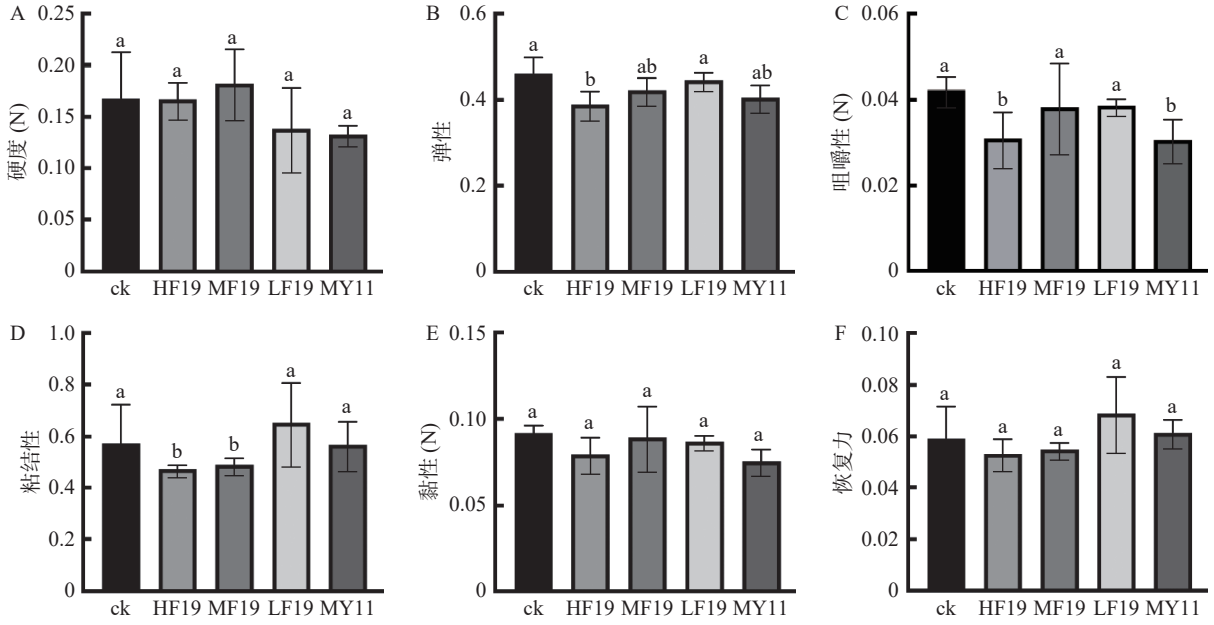


图 3　发酵乳质构特性

Fig.3　Texture properties of yogurt

注：不同小写字母表示组间具有显著性差异，P<0.05。

表 4 发酵乳的挥发性风味物质

Table 4 Volatile flavor compounds in yogurt

序号	化合物名称	相对含量(%)				
		ck	HF19	MF19	LF19	MY11
	酸类					
1	5-二甲氨基-1,3-苯二甲酸	1.60	ND	ND	ND	ND
2	丁酸	0.89	0.69	1.10	0.48	2.00
3	己酸	4.30	2.60	3.30	1.80	10.40
4	辛酸	2.50	1.20	1.40	0.76	3.40
5	N-甲酰-L-丙氨酸	28.00	ND	ND	ND	ND
6	冰乙酸	ND	6.30	2.90	0.39	3.40
7	乙基硼酸	ND	0.28	ND	ND	ND
8	异辛酸	ND	0.14	ND	0.13	ND
9	癸酸	ND	ND	0.09	0.06	ND
10	2-甲基己酸	ND	ND	0.06	ND	ND
11	异戊酸	ND	ND	0.06	ND	ND
12	正戊酸	ND	ND	1.40	0.76	0.20
13	2,3-二氢苯并呋喃-5-丙酸	ND	ND	ND	0.10	ND
14	2-氯苯甲酸	ND	ND	ND	0.11	ND
	总计	37.29	14.31	10.31	4.59	19.40
	醇类					
15	乙醇	2.50	14.00	0.76	0.23	1.50
16	1-戊醇	1.20	0.24	0.36	0.22	0.95
17	正己醇	0.37	0.50	0.43	0.31	0.36
18	1-庚醇	0.22	ND	0.13	0.06	ND
19	2-庚醇	ND	1.40	1.80	ND	ND
20	4-甲基-1-己醇	ND	0.11	0.13	ND	0.18
21	2-壬醇	ND	0.36	0.23	ND	ND
22	(2S,3S)-(+)-2,3-丁二醇	ND	0.28	ND	0.33	ND
23	(±)-5-甲基-2-己醇	ND	0.09	ND	ND	ND
24	(S)-(+)-2-庚醇	ND	1.40	ND	ND	ND
25	DL-2-氨基丙醇	ND	ND	0.46	ND	ND
26	1,3-二氧戊环-2-甲醇	ND	ND	0.82	ND	ND
27	3-甲基-1-丁醇	ND	ND	0.66	0.19	ND
28	1-辛醇	ND	ND	0.05	0.03	ND
29	(2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇	ND	ND	3.50	ND	4.30
30	3-甲基-1-己醇	ND	ND	0.07	ND	ND
	总计	4.29	18.38	9.40	4.95	8.58
	酮类					
31	2,3-戊二酮	0.47	ND	0.28	0.18	1.60
32	2-庚酮	12.00	0.40	1.60	2.90	11.00
33	3-羟基-2-丁酮	8.40	ND	ND	ND	ND
34	2-壬酮	2.50	1.40	1.00	0.69	2.00
35	甲基壬基甲酮	0.60	ND	0.29	ND	ND
36	丙酮	ND	ND	1.60	2.90	12.60
37	乙偶姻	ND	ND	2.50	9.70	0.71
38	2,3-丁二酮	ND	ND	ND	5.50	ND
39	2,2,3-三甲基环丁酮	ND	ND	ND	0.22	ND
40	2-十一酮	ND	ND	ND	0.17	0.58
41	2-戊酮	ND	ND	ND	ND	1.60
42	2,5-哌嗪二酮	ND	ND	ND	ND	2.30
	总计	23.97	1.80	7.27	22.26	32.39
	酯类					
43	邻苯二甲酸二丁酯	11.00	ND	ND	ND	ND
44	丙烯酸乙烯酯	ND	0.12	ND	ND	ND
45	偶氮二甲酸二乙酯	ND	0.62	ND	ND	ND

续表 4

序号	化合物名称	相对含量(%)				
		ck	HF19	MF19	LF19	MY11
46	顺丁二烯酸二烯丙酯	ND	0.15	ND	ND	ND
47	丁炔二酸二甲酯	ND	2.20	ND	ND	ND
48	N-(4-乙基苯甲酰基)-L-丙氨酸庚酯	ND	ND	0.29	ND	ND
49	亚硝酸乙酯	ND	ND	2.90	ND	2.50
50	丙酮酸丙酯	ND	ND	ND	5.50	ND
	总计	11.56	3.09	3.19	5.58	2.79
	醛类					
51	2,3-二甲基戊醛	ND	ND	0.29	ND	ND
	总计	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00

注：ND表示未检测到该物质。

降低。类似地，ck 组中也检测到最高含量的 2-壬酮，为 2.50%，而由 HF19、MF19、LF19 组中检测结果可知，随着发酵粘液乳杆菌添加量的增加，2-壬酮的产量随之升高，依次为 1.4%、1.0% 和 0.69%（表 4）。2,3-戊二酮也赋予发酵乳独特风味，在 MF19、LF19 和 MY11 组中均检测出该化合物，分别为 0.28%、0.18% 和 1.6%。值得注意的是，LF19组和 MY11 组中检测出乙偶姻，含量分别为 2.5%、9.7% 和 0.71%（表 4）。乙偶姻又名 3-羟基丁酮，通常通过乳酸菌先将柠檬酸转化为丙酮酸，丙酮酸的一部分进一步转化为各种风味化合物，如双乙酰和乙偶姻[22]，该化合物是发酵乳制品中的常见风味物质，具有弱奶油香味，略带甜味，能缓和双乙酰产生的过于强烈的奶油味[23]。总体上看，与 CK 组和 MY11 组对比，发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 的加入使得发酵乳中的酮类化合物种类增多，可能因此赋予发酵乳更丰富的风味。

在乳制品发酵过程中，乳酸菌常会产生低浓度的酯类化合物，使发酵乳拥有果香味，具有较低的风味阈值的特点[24]。检测发现，HF19 的酯类种类均高于其余组别，但是 ck 组的酯类含量明显多于其余组（表 4）。MF19、LF19 组仅检测出两种酯类化合物，可能是由于 FOSU YHD19 能产出相关酯酶，且发酵乳后熟完成拥有较多酸类物质，进而在酸性条件下，酯酶催化酯类化合物水解产生酸和醇类化合物[25]，这也从一定程度上反映了除 ck 组外的所有组别均含有较多的醇类物质。

酸奶中的挥发性酸类物质是发酵乳的典型化合物，在风味方面是不可或缺的存在，且可作为前体，转化为酯类和醇类化合物[26]。在 5 组样品中一共检测出 15 种化合物，其中五组发酵乳均有的酸类化合物分别为丁酸、己酸、辛酸（表 4）。己酸为发酵乳提供奶酪香气与乳制品独特的甜味，分别为 4.3%、2.6%、3.3%、1.8% 和 10.4%，辛酸则提供果香味[10]，分别为 2.5%、1.2%、1.4%、0.76%、3.4%（表 4）。由此可知，当发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 的接种量为 10^7 CFU/mL 时，发酵乳的风味特征得到显著优化。

醛类化合物作为发酵乳中重要的风味前体物质，主要通过氨基酸降解途径形成：氨基酸首先转化为 α-酮酸，随后在脱羧酶作用下生成相应的醛类化合物[27]。然而本研究发现，与其他挥发性成分相比，醛类物质的种类和含量均相对较少。仅在 MF19 组检测到 2,3-二甲基戊醛（0.29%），其余处理组均未检出（表 4）。这一现象可能与醛类化合物的代谢特性有关，在后熟过程中，醛类物质易被进一步还原为相应的醇类或氧化为酸类化合物，导致其最终残留量较低[27]。

总体而言，发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 的添加显著改变了发酵乳中挥发性风味物质的组成特征。与对照组相比，实验组中酸类和醇类物质的含量明显增加，这主要源于醛类和酯类化合物的代谢转化。在发酵过程中，醛类物质易被氧化为相应的有机酸，而酯类则通过水解反应生成醇类化合物。这一发现与李亚凤[4] 的研究结果相吻合，其研究同样证实发酵粘液乳杆菌能够促进酸奶中风味物质的积累。

2.5　发酵乳感官评价分析

发酵乳因配方及加工方法的不同可产生各种感官特性，如色泽、口感、风味、组织状态，这是消费者所能直观感受的发酵乳质量属性[28]。如图 4 所示，各组在色泽和口感方面差异不显著，均呈现典型的乳白色或微黄色外观，且具有均匀的光泽度和细腻爽滑的质地特征。值得注意的是，HF19 组由于酸度较高（41±1°T），其滋味评分低于其他组别，且观察到明显的乳清析出现象。相比之下，MF19 组（接种量 10^7 CFU/mL）展现出最优的综合感官品质，总评分达 106.3±4.83 分，这主要得益于其适中的酸度和稳定的凝胶结构。研究结果表明，发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 的接种量显著影响产品感官特性，其中 10^7 CFU/mL 的接种浓度最有利于平衡产品的风味特征和质构特性。

2.6　发酵乳贮藏期内的理化性质分析

2.6.1　活菌数　根据联合国粮食及农业组织（FAO）和世界卫生组织（WHO）的标准要求，发酵乳中的活菌数应不低于 10^6 CFU/mL[29]。如表 5 所示，发酵乳

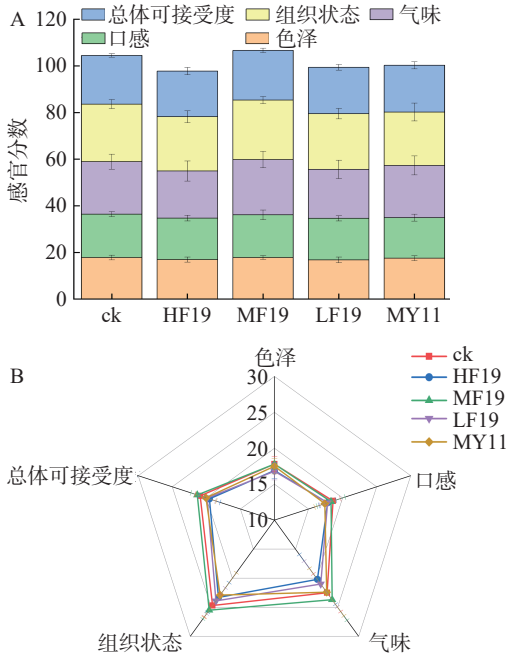


图 4 发酵乳感官评分堆积柱状图(A)和雷达图(B)

Fig.4 Stacked bar chart (A) and radar chart (B) of sensory evaluation scores for yogurt

表 5 贮藏期内活菌数的变化

Table 5 Changes in viable bacterial counts during storage period

时间(d)	活菌数(×10⁶ CFU/mL)				
	ck	HF19	MF19	LF19	MY11
0	0.59±0.00^{Cb}	7.00±1.00^{Ae}	1.05±0.25^{Bcd}	0.69±0.04^{Ca}	1.10±0.10^{Bc}
7	1.43±0.00^{Cb}	12.85±0.05^{Ad}	5.75±0.15^{Ba}	0.12±0.01^{Dd}	2.60±0.10^{Ca}
14	9.87±0.72^{Ba}	26.53±1.51^{Ab}	4.57±0.75^{Cb}	0.29±0.01^{Ec}	1.90±0.23^{Db}
21	10.17±0.76^{Ba}	23.43±0.99^{Ac}	1.69±0.20^{Cc}	0.45±0.10^{Db}	1.90±0.36^{Cb}
28	1.28±0.03^{Bb}	43.63±2.97^{Aa}	1.50±0.68^{Bc}	0.20±0.01^{Cc}	0.25±0.04^{Cd}

注: 不同大写字母代表组间具有显著性差异, 不同小写字母代表组内具有显著性差异, P<0.05。

ck 组、MF19 组、LF19 组和 MY11 组在贮藏期间的活菌数变化呈现先升高后降低的趋势。除 LF19 组外, 其余实验组在 21 d 的贮藏期内均符合 FAO/WHO 的活菌数标准要求, 维持在 10^6 CFU/mL。进一步参照国际乳品联合会(International Dairy Federation)对发酵乳的更严格标准(活菌数>10^7 CFU/mL)[30], 结果显示在贮藏第 28 d 时, ck 组和 HF19 组仍能达到该标准要求。

2.6.2 pH、可滴定酸度及持水力分析 pH 和酸度变化是评价发酵乳贮藏稳定性的重要指标。如图 5A 所示, 除 ck 组外, 各实验组样品在贮藏 28 d 时的 pH 均保持在 4.5 左右。样品的可滴定酸度则呈现上升趋势, 同样在贮藏初期(0~7 d)上升最为显著, 后期变化趋于平缓。这种变化可能与发酵粘液乳杆菌的代谢活性密切相关。在贮藏初期, 菌体处于旺盛的代谢状态, 能够快速利用乳中营养物质产生大量乳酸, 这可能导致酸度不断升高[31]。值得注意的是, 接种 FOSU YHD19 菌株的实验组表现出更显著的酸度上

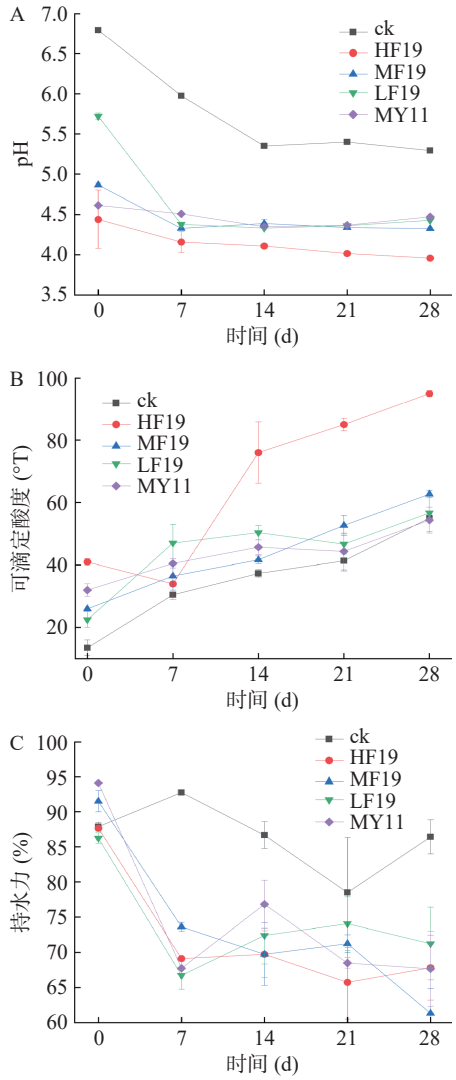


图 5 贮藏期内发酵乳的 pH(A)、可滴定酸度(B)、持水力(C)变化

Fig.5 Changes in pH (A), titratable acidity (B), and water-holding capacity (C) of yogurt during storage

升趋势, 这进一步证实了该菌株具有优良的产酸能力和贮藏稳定性。不同处理组发酵乳在贮藏期间的持水力变化呈现明显差异(图 5C)。ck 组表现出独特的动态特征: 在贮藏初期(0~7 d)持水力出现短暂回升(从初始值 92.75%±0.02% 升至 93.42%±0.03%), 随后在 7~21 d 显著(P<0.05)下降至 78.50%±0.08%。与之相比, 各实验组均呈现持续下降趋势。

3 结论

本研究系统探究了发酵粘液乳杆菌 FOSU YHD19 对发酵乳品质的调控作用。研究表明, 添加 FOSU YHD19 菌株能显著提升发酵乳的综合品质。该菌株有效加速了发酵酸化过程, 并协同改善了产品的质构特性, 通过适度调整硬度和弹性, 使成品口感更加绵密柔滑。在最佳接种量(10^7 CFU/mL)下, 其发酵乳的综合品质优于传统发酵剂, 具体表现为极高的持水力、适宜的口酸度以及致密均匀的蛋白凝胶微观结构, 感官接受度也显著提高。风味分析证实, 该处理促进了酸类、醇类和酮类等风味物质的形成,

赋予了产品更丰富协调的香气。此外，产品在冷藏条件下展现出优异的贮藏稳定性，活菌数在整个保质期内始终保持较高水平（$>10^6$ CFU/mL），且各项品质参数保持稳定。本研究为开发高品质发酵乳提供了理论依据，但产品风味调控仍需进一步优化，后续研究需进一步完善实验设计以验证风味物质变化的可重复性。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ HILL C, GUARNER F, REID G, et al. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic[J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 2014, 11(8): 506−514.

［2］ KOUTSOUMANIS K, ALLENDE A, ALVAREZ-ORDÓÑEZ A, et al. Scientific opinion on the update of the list of QPS-recommended biological agents intentionally added to food or feed as notified to EFSA (2017–2019)[J]. EFSA Journal, 2020, 18(2).

［3］ 谢玉锋, 王龙飞, 刘洋, 等. 功能性乳酸菌在食品中的应用及展望[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(5): 4−6. ［XIE Y F, WANG L F, LIU Y, et al. Application and prospects of functional lactic acid bacteria in food[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(5): 4−6.］

［4］ 李亚凤. 益生菌发酵沙棘酸奶粉的制备及其产品特性评价[D]. 银川：宁夏大学, 2023. ［LI Y F. Preparation of probiotic-frmented sea buckthorn milk powder and evaluation of its product characteristics[D]. Yichuan: Ningxia University, 2023.］

［5］ 敖晓琳, 蒲彪, 蔡义民, 等. 发酵乳杆菌及其益生特性研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(2): 121−127. ［AO X L, PU B, CAI Y M, et al. Research progress on *Limosilactobacillus fermentum* and its probiotic properties[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2015, 34(2): 121−127.］

［6］ 于素素, 杨佳杰, 马向阳, 等. 含发酵乳杆菌 HY01 牦牛酸奶工艺优化及主体风味成分动态解析[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 105−113. ［YU S S, YANG J J, MA X Y, et al. Process optimization and dynamic analysis of dominant flavor components in yak yogurt containing *Limosilactobacillus fermentum* HY01[J]. Food Science, 2021, 42(2): 105−113.］

［7］ LIM S M, LEE N K, KIM K T, et al. Probiotic *Lactobacillus fermentum* KU200060 isolated from watery kimchi and its application in probiotic yogurt for oral health[J]. Microbial Pathogenesis, 2020, 147: 104430.

［8］ WEI Guangqiang, DAI Xingying, ZHAO Bo, et al. Structure-activity relationship of exopolysaccharides produced by *Limosilactobacillus fermentum* A51 and the mechanism contributing to the textural properties of yogurt[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108993.

［9］ AZIZ K, FAROOQ Z, TARIQ M, et al. Metataxonomic analysis of microbiota from Pakistani dromedary camelids milk and characterization of a newly isolated *Lactobacillus fermentum* strain with probiotic and bio-yogurt starter traits[J]. Folia Microbiologica, 2021, 66(3): 411−428.

［10］ HUANG Yanyan, YU Jiajia, ZHOU Qinyu, et al. Preparation of yogurt-flavored bases by mixed lactic acid bacteria with the addition of lipase[J]. Lwt, 2020, 131: 109577.

［11］ SHIBY V K, MISHRA H N. Fermented milks and milk products as functional foods: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(5): 482−496.

［12］ AHMADI E, MOHAMMADI R, HASANVAND S, et al. Effects of fermentative factors on biochemical, microbiological and sensory characteristics of probiotic Iranian fermented milk (doogh)[J]. Current Nutrition & Food Science, 2019, 15(1): 40−47.

［13］ MUELAS R, ROMERO G, DÍAZ J R, et al. Quality and functional parameters of fermented milk obtained from goat milk fed with broccoli and artichoke plant by-products[J]. Foods, 2022, 11(17): 2601.

［14］ SODINI I, REMEUF F, HADDAD S, et al. The relative effect of milk base, starter, and process on yogurt texture: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2004, 44(2): 113−137.

［15］ 杨同香, 李全阳. 酸乳凝胶特性影响机理的探讨[J]. 中国乳品工业, 2011, 39(11): 4−6,15. ［YANG T X, LI Q Y. Investigation on the influencing mechanism of yogurt gel properties[J]. China Dairy Industry, 2011, 39(11): 4−6,15.］

［16］ LEE W J, LUCEY J A. Structure and physical properties of yogurt gels: Effect of inoculation rate and incubation temperature[J]. Journal of Dairy Science, 2004, 87(10): 3153−3164.

［17］ MICHALSKI M C, OLLIVON M, BRIARD V, et al. Native fat globules of different sizes selected from raw milk: Thermal and structural behavior[J]. Chemistry and Physics of Lipids, 2004, 132(2): 247−261.

［18］ 张婷, 王丹, 赵谦, 等. 基于微流变学技术分析不同脂肪含量对发酵乳特性的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(11): 1576−1582. ［ZHANG T, WANG D, ZHAO Q, et al. Analysis of the effect of different fat contents on yogurt properties based on microrheology technique[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(11): 1576−1582.］

［19］ ZHANG S J, de BRUYN F, POTHAKOS V, et al. Following coffee production from cherries to cup: Microbiological and metabolomic analysis of wet processing of *Coffea arabica*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2019, 85(6): e02635−e02618.

［20］ CHEN Yi, LI Pao, LIAO Luyan, et al. Characteristic fingerprints and volatile flavor compound variations in Liuyang Douchi during fermentation via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130055.

［21］ CELANO G, COSTANTINO G, CALASSO M, et al. Distinctive traits of four Apulian traditional agri-food product (TAP) cheeses manufactured at the same dairy plant[J]. Foods, 2022, 11(3): 425.

［22］ 孙昕萌, 袁惠萍, 赵钜阳, 等. 发酵乳风味及其分析技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(15): 6111−6117. ［SUN X M, YUAN H P, ZHAO J Y, et al. Research progress on flavor and analytical techniques of yogurt[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(15): 6111−6117.］

［23］ 刘文俊, 张和平. 发酵乳中的主要风味物质及其代谢合成途径和关键功能基因[J]. 中国科技论文, 2016, 11(12): 1391−1397. ［LIU W J, ZHANG H P. Major flavor compounds in yogurt: Their metabolic pathways and key functional genes[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(12): 1391−1397.］

［24］ BOECK T, ISPIRYAN L, HOEHNEL A, et al. Lentil-based yogurt alternatives fermented with multifunctional strains of lactic acid bacteria: Techno-functional, microbiological, and sensory char-

acteristics[J]. Foods, 2022, 11(14): 2013.
[25] den ABT T, SOUFFRIAU B, FOULQUIÉ-MORENO M R, et al. Genomic saturation mutagenesis and polygenic analysis identify novel yeast genes affecting ethyl acetate production, a non-selectable polygenic trait[J]. Microbial Cell, 2016, 3(4): 159−175.
[26] LAM L, ILIES M A. Evaluation of the impact of esterases and lipases from the circulatory system against substrates of different lipophilicity[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(3): 1262.
[27] CHEN Chen, ZHAO Shanshan, HAO Guangfei, et al. Role of lactic acid bacteria on the yogurt flavour: A review[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup1): S316−S330.
[28] YANG Xiaoqi, LI Yan, WANG Peng, et al. Quality changes of duck meat during thermal sterilization processing caused by microwave, stepwise retort, and general retort heating[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1016942.
[29] SHI Zihang, LI Xiefei, FAN Xiankang, et al. PMA-qPCR method for the selective quantitation of viable lactic acid bacteria in fermented milk[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 984506.
[30] MARCO M L, SANDERS M E, GÄNZLE M, et al. The international scientific association for probiotics and prebiotics (ISAPP) consensus statement on fermented foods[J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 2021, 18(3): 196−208.
[31] HUANG Yanyan, JIA Xiangze, YU Jiajia, et al. Effect of different lactic acid bacteria on nitrite degradation, volatile profiles, and sensory quality in Chinese traditional Paocai[J]. Lwt, 2021, 147: 111597.