胡陆军, 林锐, 曹雨澜, 等. 富硒益生菌发酵乳的制备及其富硒能力和风味物质评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 167−174. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040336
HU Lujun, LIN Rui, CAO Yulan, et al. Preparation of Selenium-enriched Probiotic Fermented Milk and Evaluation of Its Selenium Enrichment Capacity and Flavor Compounds[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 167−174. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040336

·生物工程·

富硒益生菌发酵乳的制备及其富硒能力和风味物质评价

胡陆军[1], 林　锐[1], 曹雨澜[1], 林　曼[1], 张　媛[1], 李遇彤[1], 熊大可[1], 徐　腾[1,*], 赵志峰[1,2]
（1.四川轻化工大学食品与酿酒工程学院, 四川 宜宾 644002;
2.四川大学轻工科学与工程学院, 四川 成都 610040）

摘　要: 为开发一款富硒益生菌发酵乳，本研究以本实验室筛选的具有富硒能力的副干酪乳酪杆菌 SCFF20（*Lacticaseibacillus paracasei* SCFF20）于 42 ℃ 条件下发酵牛乳 12 h，并对制备的发酵乳理化指标、硒含量、风味物质等指标进行评价。本研究共设置 4 个实验组：SF 组采用市售副干酪乳酪杆菌，BF 组采用副干酪乳酪杆菌 SCFF20，XF 组采用副干酪乳酪杆菌 SCFF20 和纳米硒颗粒（SeNPs），YF 组采用副干酪乳酪杆菌 SCFF20 和亚硒酸钠。结果发现，XF 组的 Se（0）累积量（4.05±0.01 mg）和 a^*值（1.30±0.02）显著优于其他组（P<0.05），表明 *L. paracasei* SCFF20 发酵制备的发酵乳能有效富硒，且 *L. paracasei* SCFF20 和 SeNPs 在发酵牛乳过程中表现出协同效应。此外，电子鼻和 GC-MS 对风味物质检测结果显示，*L. paracasei* SCFF20 和市售 *L. paracasei* 都能为发酵乳增添酯类、醇类和醛类等风味物质，且 XF 组产生的风味物质多样性优于 SF 组，主要体现在酯类和酸类。因此，*L. paracasei* SCFF20 和 SeNPs 协同改善了发酵乳的硒含量及风味物质。本研究为富硒发酵乳的研究及其相关产品开发提供一定的理论指导。

关键词: 生物源硒, 发酵乳, 风味物质, 品质分析, 副干酪乳酪杆菌
中图分类号: TS252.42　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0167−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040336　　本文网刊:

Preparation of Selenium-enriched Probiotic Fermented Milk and Evaluation of Its Selenium Enrichment Capacity and Flavor Compounds

HU Lujun[1], LIN Rui[1], CAO Yulan[1], LIN Man[1], ZHANG Yuan[1], LI Yutong[1], XIONG Dake[1], XU Teng[1,*], ZHAO Zhifeng[1,2]
（1.School of Food and Liquor Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644002, China;
2.College of Light Industry Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610040, China）

Abstract: To prepare a selenium-enriched probiotic fermented milk, *Lacticaseibacillus paracasei* SCFF20, a selenium-enriching strain isolated in our laboratory, was employed to ferment milk at 42 ℃ for 12 hours. The physicochemical indexes, selenium content, flavor compounds and some other indicators of the prepared fermented milk were systematically evaluated. Four experimental treatments were conducted as follows: SF group was performed using commercially available *L. paracasei*. BF group was performed using *L. paracasei* SCFF20 alone. XF group was performed using *L. paracasei* SCFF20 and selenium nanoparticles (SeNPs), and YF group was performed using *L. paracasei* SCFF20 and sodium selenite. Results showed that the XF group exhibited significantly higher Se(0) content (4.05±0.01 mg) and a^* value (1.30±0.02) compared to other groups (P<0.05), demonstrating *L. paracasei* SCFF20's ability to selenium biotransformation and its synergistic effect with SeNPs during milk fermentation. Furthermore, electronic nose and GC-MS analysis indicated

收稿日期: 2025−04−27
基金项目: 四川省科技计划项目（2025YFHZ0268）; 四川轻化工大学研究生教学改革研究项目（YZ202410）; 四川轻化工大学研究生创新基金（Y2023219）。
作者简介: 胡陆军（1984−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: hulujun@suse.edu.cn。
*** 通信作者:** 徐腾（1991−）, 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 食品化学, E-mail: xuteng@suse.edu.cn。

that both *L. paracasei* SCFF20 and commercial *L. paracasei* contributed esters, alcohols and aldehydes to the flavor profile of the fermented milk. Notably, the XF group showed enhanced flavor diversity, particularly in esters and acids compared to the SF group. Therefore, the incorporation of *L. paracasei* SCFF20 with SeNPs markedly improved both the selenium content and flavor complexity in the fermented milk. This study provides a theoretical basis for research on biogenic selenium-enriched fermented milk and its related product development.

Key words: biogenic selenium; fermented milk; flavor substances; quality analysis; *Lacticaseibacillus paracasei*

硒是人体必需的微量元素，缺硒可能会造成人体神经退行性病变、癌症、免疫功能障碍、心血管疾病、甲状腺功能减退和男性不育等多种疾病[1−2]。硒在自然界分布极不均匀，我国约三分之二的地区处在无硒或低硒地带[3]。硒分为有机硒（如硒蛋白、硒代氨基酸）和无机硒（如硒酸盐、亚硒酸盐）两种形式，无机硒水溶性高，毒性大，生物利用率低；而有机硒毒性较无机硒小且生物利用率高[4]。纳米硒（SeNPs）是目前最安全的有机补硒剂，具有较高的生物利用度和较低的毒性，被认为是一种新型且有前景的人类营养添加剂[5−6]。

益生菌是公认的食品加工中常用的安全微生物（GRAS），其合成 SeNPs 的特性引起研究者广泛关注[7−8]。益生菌合成 SeNPs 被认为是一种绿色生物制造过程[9−10]，而且可以最大限度地减少化学前体产生的环境污染和潜在影响健康的问题[11]。不仅如此，许多益生菌可以在胃肠道中存活和定植，从而更易于将有益的生物活性分子（如 SeNPs）运送到人体并发挥作用[12]。研究表明，益生菌将亚硒酸盐转化为 SeNPs 的机制主要包括三个阶段[13]：首先，亚硒酸盐经细胞膜转运进入细胞内；其次，亚硒酸盐在细胞内被还原；最后，Se^0 组装形成 SeNPs。目前，许多研究利用微生物将无机硒转化为有机硒[14]、益生菌富硒发酵或在生产过程中添加富硒物质[15] 等方法制备富硒发酵乳制品。富硒发酵乳在保留牛乳自身营养价值的同时，又具备了发酵制品独有的风味、保健益生功效以及富硒特性，这进一步拓展了乳酸菌的性能，也有助于开发新型功能食品和膳食硒补充剂。此外，活菌型发酵乳饮品因其补水性和便携性逐渐受到广泛关注，且目前国内对活菌型富硒发酵乳饮品的开发和研究还较少[15]。同时，目前尚未见将亚硒酸钠和纳米硒在活菌型发酵乳中进行系统对比研究的报道。

本实验室前期研究发现副干酪乳酪杆菌 SCFF20（*Lacticaseibacillus paracasei* SCFF20）可以将亚硒酸钠还原为 SeNPs，且具有较强的富硒能力[16]。基于此，本研究利用副干酪乳酪杆菌 SCFF20 发酵制备生物源硒益生菌发酵乳，探究亚硒酸钠和不同形态的硒对发酵乳色差、单质硒含量、总硒含量以及挥发性风味成分的影响。本研究旨在开发一款富硒活菌型发酵乳饮品，为缺硒人群提供一种安全有效的补硒产品，为活菌型富硒发酵乳的理论研究及其产品开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜牛乳　四川省宜宾市优友特乳业有限公司；副干酪乳酪杆菌 SCFF20（*Lacticaseibacillus paracasei* SCFF20）　四川轻化工大学食品微生物菌种保藏中心；*L. paracasei*　西安聚生原生物科技有限公司；MRS 培养基　广东环凯微生物科技有限公司；白砂糖　上海枫末实业有限公司；三聚磷酸钠（分析纯）　河南万邦化工科技有限公司；硝酸、过氧化氢　分析纯，成都市科隆化学品有限公司；九水硫化钠（分析纯）　上海麦克林生化科技股份有限公司；庚酸甲酯（色谱纯）　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；亚硒酸钠（分析纯）　成都西亚化工股份有限公司。

BSC-250 恒温恒湿培养箱　上海博迅实业有限公司；DZKW-4 电热恒温水浴锅　北京中兴伟业世纪仪器有限公司；YC-330L 医用冷藏箱　中科美菱低温科技股份有限公司；SW-CJ-2FD 超净工作台　上海泰坦科技股份有限公司；立式压力蒸汽灭菌器（MVS-83）　冰山松洋生物科技（大连）有限公司；台式高速冷冻离心机　大龙兴创实验仪器（北京）股份公司；PHS-10pH 计　成都世纪方舟科技有限公司；ETT-CP5000 旋转流变仪　广州来美科技有限公司；UltraScan VIS 色差仪　美国 HunterLab；UV-1601 紫外分光光度计　北京北分瑞利分析仪器有限责任公司；Optima8000 型 ICP-OES 发射光谱仪　美国 PerkinElmer；iNose 电子鼻　上海瑞玢国际贸易有限公司；TSQ8000 气相色谱-质谱联用仪　赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 发酵乳基的制备　发酵乳基制备前先将发酵剂（副干酪乳酪杆菌 SCFF20 和市售副干酪乳酪杆菌）利用 MRS 液体培养基活化后涂布平板，挑取单菌落接入 MRS 液体培养基中制备种子悬液备用。

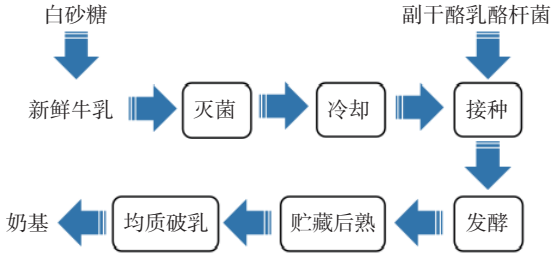


图 1　发酵乳基的制备流程

Fig.1　Preparation process of the fermented milk base

表 1　四个实验组的处理方式

Table 1　Treatment methods of four experimental groups

组别	组成	处理方式
SF组	市售副干酪乳酪杆菌+牛乳	取活化后的市售副干酪乳酪杆菌培养，通过离心（8000 r/min）收集菌体沉淀，无菌生理盐水清洗3次后添加到新鲜牛乳中，副干酪乳酪杆菌浓度10^8 CFU/mL。
BF组	副干酪乳酪杆菌SCFF20+牛乳	取活化后副干酪乳酪杆菌SCFF20培养，通过离心（8000 r/min）收集菌体沉淀，无菌生理盐水清洗3次后添加到新鲜牛乳中进行发酵，副干酪乳酪杆菌SCFF20浓度10^8 CFU/mL。
XF组	副干酪乳酪杆菌SCFF20+SeNPs+牛乳	按照优化后的培养方法（温度 37 ℃，振荡速度 180 r/min，胁迫时间 24 h，接种量 3%，亚硒酸钠浓度 120 μg/mL）[13]制备出含SeNPs的菌悬液，先通过离心（8000 r/min）去除菌体，再通过离心（12000 r/min）收集SeNPs颗粒，无菌生理盐水清洗3次去除亚硒酸钠溶液，再添加到新鲜牛乳中进行发酵，副干酪乳酪杆菌SCFF20浓度10^8 CFU/mL。
YF组	副干酪乳酪杆菌SCFF20+亚硒酸钠+牛乳	接入副干酪乳酪杆菌SCFF20（10^8 CFU/mL）到新鲜牛乳中6 h后，再添加亚硒酸钠进行共同发酵。

注：XF组和YF组中亚硒酸钠添加量都是120 μg/mL，XF组是先在MRS培养基中利用副干酪乳酪杆菌SCFF20转化为纳米硒后再加入到牛乳中进行发酵，而YF组是直接将亚硒酸钠加入牛乳中发酵。

发酵乳基制备工艺流程如图 1 所示，其制备过程参考 Kumar 等[17] 和 Rosa 等[18] 的方法，并稍作修改。首先进行原辅料的准备，往新鲜牛乳中加入 2% 白砂糖，85 ℃ 灭菌 20 min 后冷却，然后接入发酵剂（10^8 CFU/mL）进行发酵。本研究共设置 4 个实验组分别为：市售副干酪乳酪杆菌组（SF 组）、副干酪乳酪杆菌 SCFF20 组（BF 组）、副干酪乳酪杆菌 SCFF20+SeNPs 组（XF 组）、副干酪乳酪杆菌 SCFF20 组+亚硒酸钠组（YF 组）（表 1）。发酵温度设置为 42 ℃，当 pH 到达 4.6~4.7 时停止发酵，接种后 0、3、6、9 和 12 h 分别取样测定测定发酵乳的酸度、pH、活菌数和黏度。发酵结束后，置于 4 ℃ 条件下后熟 12 h。

1.2.2　活菌型发酵乳的制备　如图 2 所示，在 60 ℃ 的无菌水中依次加入三聚磷酸钠（0.3%）和白砂糖（10%）并搅拌均匀，于 85 ℃ 灭菌 20 min，冷却后加入熟化后的奶基（50%），搅拌均匀备用。分析活菌型发酵乳的理化指标：色差、单质硒含量、总硒含量、挥发性风味成分和嗅觉分析等指标。

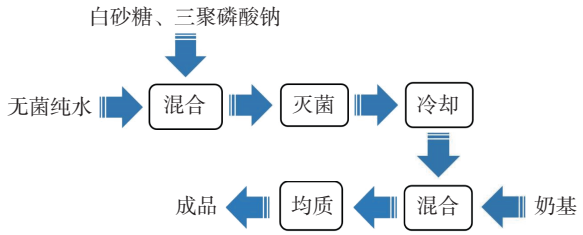


图 2　活菌型发酵乳的工艺流程

Fig.2　Technological process of the fermented milk with live cultures

1.2.3　发酵乳理化指标测定　接种发酵剂后的发酵乳每隔 3 h 测定 pH、可滴定酸度、黏度和菌落总数。准确吸取 10 mL 发酵奶基，用校正后的 pH 计测定 pH；根据齐新阳[19] 的方法并加以修改进行黏度分析，吸取 25 mL 发酵奶基，并以吹打的方式进行均质，然后将样品置于流变仪平台上进行黏度分析。测试条件为：剪切速率设置为 20 s^{-1}，运行温度设置为 20 ℃，运行时间设置为 10 s。可滴定酸度和菌落总数计数参照 Chen 等[20] 的方法，取 15 mL 发酵奶基进行可滴定酸度的测定，将发酵奶基稀释涂布后进行菌落计数（CFU/mL）。

1.2.4　发酵乳色差测定　将模式类型设置为 TTRAB-总透射，观察面积选择 0.375 mm 进行色差仪的校正。校正完毕后吸取 25 mL 发酵乳于 40 mm 大面通光的石英比色皿中，使用移液枪将样品吹打均匀，以新鲜牛乳作为空白对照样，发酵乳作为测试样，对样品色差进行测定并记录 L^*、b^*、a^*和ΔE 值。ΔE 值带入公式（1）进行计算，色差值代表颜色间的距离。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^* + \Delta a^* + \Delta b^*} \qquad 式（1）$$

1.2.5　发酵乳单质硒含量测定　单质硒 Se(0)含量的测定根据 Biswas 等[21] 的方法，采用黑色粉末状单质硒粉作为单质硒的标准绘制硒含量标准曲线（y=0.00534x+0.00154，R^2=0.998，其中，y 表示吸光度 $OD_{500\ nm}$；x 表示 Se(0)含量(mg)）。将菌株富硒培养后，通过 8000 r/min 离心 10 min 收集细菌培养物和 Se(0)。然后用 0.9% 的氯化钠溶液洗涤两次，再将沉淀中的红色单质硒重悬在 15 mL 硫化钠（1 mol/L）中，振荡均匀。随后，离心除去细菌沉淀，上清液用紫外分光光度计测量红棕色溶液的吸光度（$OD_{500\ nm}$）。

1.2.6　发酵乳总硒含量测定　根据 Martínez 等[22] 的方法，测定发酵乳中的 Se 浓度。使用含有 2 mL 浓 HNO_3 和 1 mL 30%（v/v）H_2O_2 的坩埚反应容器，对获得的 SeNPs 进行酸消解。冷却后，用超纯水将所得溶液稀释至 100 mL，并使用电感耦合等离子体（ICP-OES）定量分析 Se(0)浓度。ICP-OES 分析硒元素所用气体为高纯液氩，功率 1150 W，雾化气流量 0.55 L/min，泵速 45 r/min，冷却气流量 12.5 L/min，辅助气流量 0.50 L/min，硒元素分析波长 196.090 nm。硒还原率计算采用公式（2）计算：

$$硒还原率(\%) = (m_1/m_2) \times 100 \qquad 式（2）$$

式中：m_1 为 SeNPs 中硒含量，mg/kg；m_2 为 Na_2SeO_3 中硒含量，mg/kg。

1.2.7　发酵乳的电子鼻分析　利用电子鼻对发酵乳中挥发性风味物质进行测定[23]，电子鼻传感器敏感物质类型如表 2 所示。吸取 10 mL 发酵乳于顶空瓶

中, 用保鲜膜密封后手动进样, 平行测定 3 次取平均值。测定参数: 传感器清洗时间 120 s, 数据调零时间 10 s, 数据采集时间 60 s, 流量 0.5 L/min。

表 2 电子鼻传感器敏感物质类型

Table 2 Types of sensitive substances of electronic nose sensors

序号	传感器类型
S1	氨、胺类化合物
S2	硫化氢、硫磺
S3	氢
S4	醇类、有机溶剂
S5	食品烹饪过程中的挥发性气体
S6	甲烷、沼气、碳氢化合物
S7	易燃性气体
S8	VOC挥发性有机物(用于环境空气污染检测)
S9	氢氧化物、汽油、煤油
S10	烷烃、可燃性气体
S11	芳香族化合物
S12	硫化物
S13	甾醇、三萜类
S14	内酯、吡嗪

1.2.8 发酵乳挥发性风味物质的测定 发酵乳中挥发性风味物质采用 GC-MS 进行测定[24]。吸取 10 mL 发酵乳样品置于 25 mL 顶空瓶中, 以庚酸甲酯为内标物质(浓度 1%, v/v), 50 ℃ 预热 10 min, 将 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取针头插入顶空瓶, 于 50 ℃ 下固相吸附 30 min, 于 250 ℃ 进样口解吸 5 min。使用条件: 载气采用高纯氦气(>99.99%), 恒定流速 1.0 mL/min。初始温度在 35 ℃ 条件下保持 5 min, 以 5 ℃/min 的速度升至 140 ℃, 保持 5 min, 再以 10 ℃/min 的速度升至 250 ℃, 然后在此温度下保持 3 min。质谱 MS 条件为: 电子电离能 70 eV, 离子源温度 280 ℃, 全扫描模式扫描范围 m/z 40~400。

将庚酸甲酯作为内标物加入发酵样品中, 采用峰面积归一化法计算所有组分的相对峰面积比。样品中各组分风味物质的浓度代入公式(3)计算:

$$Ci = \frac{Ai}{As} \times Cs \qquad 式(3)$$

式中, Ci 为试验样品中各挥发性风味化合物的质量浓度, ng/kg; Cs 为庚酸甲酯的质量浓度, ng/kg; Ai 为样品中待测物质对应的色谱峰面积; As 为内标物庚酸甲酯的色谱峰面积。

1.3 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行数据分析, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 法进行差异分析, $P<0.05$ 时表示差异显著。试验均重复 3 次, 结果以平均值($\bar{x}$)±标准偏差(SD)表示, 利用 GraphPad Prism 6.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 发酵乳动态理化指标分析

一般而言, 典型发酵乳的成熟终点 pH 处于 4.6~4.8[25]。四组发酵乳的理化参数动态变化如表 3 所示, 经过 12 h 发酵后, SF、BF、XF 和 YF 四组发酵乳的 pH 均接近成熟期。在整个发酵期间四组样品的 pH 总体呈下降趋势, 其中 XF 组的 pH 下降趋势远超其他三组发酵乳, 且 XF 组的可滴定酸度和黏度也均高于其他发酵乳。据 Lee 等[26] 报道, 发酵乳中酸度的降低与乳酸菌将乳糖发酵成乳酸有关, 发酵乳的低 pH 和高酸化会导致酪蛋白在其等电点附近发生凝集, 随着 pH 的降低和可滴定酸度的增加, 发酵乳进一步发生凝胶收缩、孔隙率增大、自然脱水, 从而析出乳清。结果发现, SeNPs 的存在不会影响副

表 3 发酵乳 pH、可滴定酸度、黏度和菌落总数随时间的变化

Table 3 Changes of pH, titratable acidity, viscosity and total bacterial count with time in the fermented milk

项目	组别	发酵0 h	发酵3 h	发酵6 h	发酵9 h	发酵11 h	发酵12 h	后熟12 h
pH	SF	6.923±0.005^{a}	6.677±0.005^{b}	5.957±0.014^{b}	5.513±0.010^{c}	5.057±0.007^{d}	4.823±0.005^{e}	4.793±0.003^{f}
	BF	6.923±0.003^{a}	6.397±0.007^{b}	5.683±0.012^{c}	4.927±0.031^{d}	4.870±0.005^{d}	4.723±0.003^{e}	4.660±0.004^{f}
	XF	6.923±0.005^{a}	6.427±0.007^{b}	5.667±0.003^{c}	4.850±0.005^{d}	4.593±0.007^{e}	4.483±0.007^{f}	4.370±0.012^{g}
	YF	6.923±0.003^{a}	6.383±0.012^{b}	5.820±0.005^{c}	5.483±0.003^{d}	5.147±0.005^{d}	4.847±0.021^{e}	4.710±0.009^{f}
可滴定酸度(g/L)	SF	0.887±0.010^{f}	2.626±0.022^{e}	2.691±0.035^{de}	2.770±0.024^{d}	3.445±0.045^{c}	3.833±0.039^{b}	4.050±0.019^{a}
	BF	0.887±0.010^{f}	2.512±0.010^{e}	2.746±0.014^{d}	2.720±0.019^{d}	3.174±0.014^{c}	4.339±0.036^{b}	4.692±0.037^{a}
	XF	0.887±0.010^{f}	2.534±0.025^{e}	2.809±0.023^{d}	2.846±0.044^{d}	4.437±0.029^{c}	5.411±0.079^{b}	5.721±0.129^{a}
	YF	0.887±0.010^{e}	2.859±0.019^{d}	2.853±0.005^{d}	2.871±0.005^{d}	3.028±0.021^{c}	3.552±0.010^{b}	3.916±0.015^{a}
黏度(mPa·s)	SF	25.22±0.43^{e}	25.30±0.24^{e}	25.78±0.46^{e}	29.47±0.79^{d}	60.77±1.30^{c}	79.37±0.21^{b}	86.44±0.19^{a}
	BF	25.22±0.43^{e}	26.90±0.53^{e}	25.46±0.46^{e}	29.71±0.90^{d}	62.37±0.88^{c}	94.07±0.20^{b}	138.89±0.37^{a}
	XF	25.22±0.43^{e}	27.34±0.25^{e}	27.38±0.27^{e}	46.20±0.80^{d}	99.05±0.23^{c}	163.10±0.15^{b}	217.00±3.54^{a}
	YF	25.22±0.43^{f}	28.91±0.47^{e}	25.62±0.97^{f}	38.18±0.24^{d}	45.86±0.52^{c}	74.67±0.51^{b}	120.19±0.30^{a}
活菌数(lg (CFU/mL))	SF	8.107±0.003^{f}	8.327±0.003^{e}	8.593±0.020^{d}	9.183±0.006^{c}	10.260±0.005^{b}	10.523±0.008^{a}	10.499±0.005^{a}
	BF	8.109±0.005^{e}	9.431±0.016^{d}	10.139±0.023^{c}	10.488±0.013^{b}	10.510±0.008^{b}	10.600±0.003^{a}	10.590±0.004^{a}
	XF	8.124±0.008^{f}	9.353±0.011^{e}	10.117±0.013^{d}	10.496±0.003^{c}	10.587±0.003^{b}	10.623±0.005^{a}	10.6250.003^{a}
	YF	8.113±0.010^{g}	9.482±0.010^{d}	10.146±0.006^{c}	10.493±0.009^{a}	10.451±0.006^{b}	9.182±0.006^{e}	9.090±0.013^{f}

注: SF组为市售副干酪乳酪杆菌; BF组为副干酪乳酪杆菌SCFF20; XF组为SeNPs颗粒+副干酪乳酪杆菌SCFF20; YF组为亚硒酸钠+副干酪乳酪杆菌SCFF20; 同一行的不同小写字母表示存在显著性差异, $P<0.05$。

干酪乳酪杆菌 SCFF20 的发酵活性，并且能够产生大量乳酸，有效降低发酵乳的 pH 和提高可滴定酸度。研究发现，发酵乳制品在后熟的储存过程中可能会继续酸化[27]，表 3 也可以看出，四组发酵乳在后熟阶段 pH 仍在下降，酸度值升高。pH 和可滴定酸度与黏度高度关联，从表 3 可以看出，发酵 9 h 后四组发酵乳黏度逐渐升高，可能是 pH 的降低和可滴定酸度的升高，使得发酵乳的 pH 接近酪蛋白等电点开始出现凝聚现象。发酵乳菌落总数分析的结果显示（表 3），各组发酵乳发酵终点活菌数都保持在 10^8 CFU/mL 以上。由于糖源的消耗和酸度增加带来的抑制作用[28]，SF 组在 0~11 h 内增长迅速，随后增长缓慢，BF 组和 XF 组从 0~9 h 增长迅速，从 9~12 h 趋于平稳，而 YF 组可能由于亚硒酸钠的毒害作用导致活菌数在发酵 9 h 后开始下降（表 3）。

综上所述，随着发酵时间的延长，发酵乳 pH 呈下降趋势，可滴定酸度、黏度和活菌数大体均呈上升趋势，副干酪乳酪杆菌 SCFF20 的产乳酸发酵能力优于市售副干酪乳酪杆菌，且 SeNPs 的添加可以促进副干酪乳酪杆菌 SCFF20 的发酵活性，能够率先到达发酵终点，而亚硒酸钠的添加会抑制副干酪乳酸菌的生长，降低发酵乳的活菌数量。本研究结果与刘骏[29]利用纳米硒和亚硒酸盐对土壤微生物生长繁殖影响的发现类似，研究发现纳米硒促进了土壤益生菌的繁殖，而亚硝酸盐则降低了土壤微生物的丰度和多样性，这可能与亚硒酸盐转化过程中释放的持久性自由基的毒性有关。

2.2　发酵乳色差分析

SeNPs 会导致发酵乳的颜色变化，而颜色是食品的一个重要属性，是影响消费者感官的一个非常重要的特征，从而影响消费者的偏好。本研究通过色差仪测定发酵乳的颜色，通过 L^*、a^*、b^*和ΔE 值量化其颜色特征。如表 4 所示，市售副干酪乳酪杆菌 SF 组与利用副干酪乳酪杆菌 SCFF20 发酵的 BF 组、XF 组、YF 组相比，其颜色参数 L^*和 b^*值均存在显著性差异（P<0.05），可能因为每株菌都可以使发酵乳产生独特的颜色[30]。在色差系统中，L^*指的是从 0~100 的明、暗数值，代表白到黑，a^*值从负（绿色）到正（红色），b^*值从负（蓝色）到正（黄色）。从表 4 可以看出，不同形态的硒也会显著改变发酵乳的 L^*、a^*和 b^*值（P<0.05）。添加 SeNPs 后的 XF 组发酵乳 a^*最高，其次是 YF 组。证明副干酪乳酪杆菌 SCFF20 在发酵乳中也能够有效转化亚硒酸钠，产生 SeNPs 为发酵乳带来红色的纳米颗粒，增大颜色参数 a^*值，又因为富硒发酵乳的 b^*值也为正值，这就表明富硒发酵乳的颜色为红色或偏棕色[31]。

表 4　基于 L^*、a^*、b^*和 ΔE 值的发酵乳色差

Table 4　Chromatic aberration of the fermented milk based on the value of L^*, a^*, b^*, and ΔE

组别	L^*	a^*	b^*	ΔE
SF组	1.13±0.01^a	0.23±0.00^c	1.50±0.02^a	1.89±0.02^a
BF组	0.82±0.01^b	0.24±0.01^c	1.42±0.00^b	1.66±0.01^b
XF组	0.57±0.01^d	1.30±0.02^a	1.26±0.01^d	1.90±0.02^a
YF组	0.61±0.01^c	1.19±0.01^b	1.33±0.01^c	1.89±0.01^a

注：同一列的不同小写字母表示存在显著性差异，P<0.05。

2.3　发酵乳单质硒含量分析

四组发酵乳单质硒 Se(0)含量如图 3 所示，XF 组的 Se(0)含量为 4.05±0.01 mg，显著高于其他组（P<0.05），YF 组也显著高于未加硒的 SF 组和 BF 组（P<0.05）。此外，YF 组 Se(0)含量与 XF 组相差 0.95 mg，表明副干酪乳酪杆菌 SCFF20 在发酵乳中能够有效将亚硒酸钠转化为 SeNPs，但该菌株在鲜牛乳中的转化能力较 MRS 培养基低，可能是因为新鲜牛乳所能为微生物提供的营养物质不足，或发酵牛乳时长较短，导致微生物还未能将亚硒酸钠全部代谢转化成 Se(0)。发酵基质对微生物来说非常重要，不仅会对微生物的生长有影响，还会抑制菌株的一些具有功能性的转化能力。

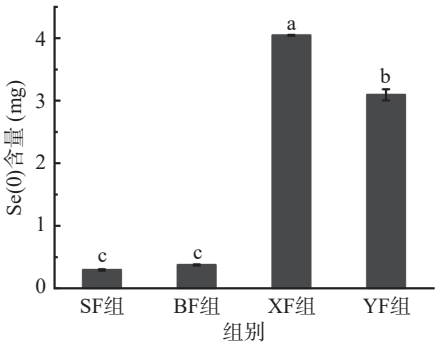


图 3　发酵乳单质硒 Se(0)含量结果

Fig.3　Results of elemental selenium Se(0) content in the fermented milk

注：SF 组为市售副干酪乳酪杆菌；BF 组为副干酪乳酪杆菌 SCFF20；XF 组为 SeNPs 颗粒+副干酪乳酪杆菌 SCFF20；YF 组为亚硒酸钠+副干酪乳酪杆菌 SCFF20；不同小写字母表示显著性差异，P<0.05，图 4 同。

2.4　发酵乳总硒含量分析

采用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP-OES 测定发酵乳各组中的总硒浓度。如图 4 所示，XF 组中的硒含量为 0.49 mg/L，YF 组的含量为 0.50 mg/L，得副干酪乳酪杆菌 SCFF20 将亚硒酸钠转化成有机硒的转化率为 97.35%。本研究富硒发酵乳硒含量明显高于先前采用瑞士乳杆菌和保加利亚乳杆菌混合发酵剂制备酸奶的研究（27.7 μg/kg）[32]。且 SF 和 BF 两组硒含量均<0.02 mg/L。目前我国国家标准中还未有乳酸菌富硒含量的相关规定，但 GB 1903.21-2016《食品营养强化剂 富硒酵母》中要求：菌株有机硒含量≥97%。因此，副干酪乳酪杆菌 SCFF20 符合该食品营养强化剂有关规定。此外，两组富硒发酵乳总硒含量在 0.049~0.050 mg/L 之间，根据 GB 14880-2012《食品营养强化剂》使用标准对含乳饮料的规

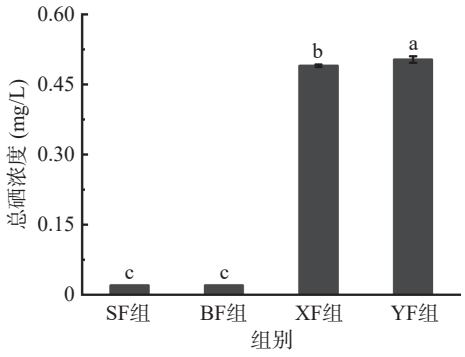


图 4 发酵乳总硒浓度对比

Fig.4 Comparison of total selenium concentration in the fermented milk

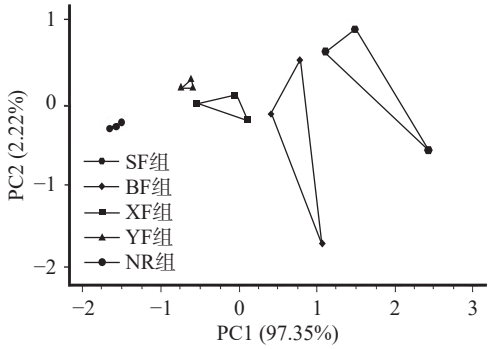


图 5 发酵乳挥发性风味成分主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of volatile flavor components in the fermented milk

注: SF 组为市售副干酪乳酪杆菌; BF 组为副干酪乳酪杆菌 SCFF20; XF 组为 SeNPs 颗粒+副干酪乳酪杆菌 SCFF20; YF 组为亚硒酸钠+副干酪乳酪杆菌 SCFF20; NR 组为新鲜牛乳组。

定: 营养强化剂硒的含量要在 50~200 μg/kg 范围内, 本研究所得富硒发酵乳基本符合要求。

2.5 基于电子鼻的发酵乳风味物质分析

如图 5 所示, PC1 贡献率为 97.35%, PC2 贡献率为 2.22%, 总贡献率达到 99.57%(>85%), 说明 PC1 和 PC2 具备反映样品特点的要求, 且发酵乳的风味主要是由 PC1 决定。同时, 同一样品的数据点聚集状态越高, 表明同一组的重复性和稳定性良好, 不同组的距离是分散的, 没有重叠, 表明不同组之间的风味组成存在差异[33]。从图 5 可以看出 5 组发酵乳的 PCA 图均没有出现重叠或接近, 说明它们产生的挥发性风味物质有显著区别。

2.6 基于 GC-MS 的发酵乳挥发性风味物质分析

采用 GC-MS 对发酵乳中挥发性风味物质测定, 如表 5 所示, 不同组发酵乳风味物质存在差异。5 组发酵乳样品共检出 15 种挥发性风味物质。其中 SF 组 11 种, BF 组 12 种, XF 组 12 种, YF 组 12 种, NR 组 5 种。

酯类物质的香味阈值一般很低, 所以对发酵乳的风味影响比较大[34]。发酵乳中典型的水果香味就是酯类化合物所贡献的, 其中己酸乙酯具有甜香、水

表 5 发酵乳挥发性风味物质对比

Table 5 Comparison of volatile flavor substances in the fermented milk

种类	CAS编号	保留时间(min)	物质含量(ng/kg)				
			SF	BF	XF	YF	NR
酯类							
乙酸乙酯	141-78-6	3.40	532.86	395.83	109.83	566.31	–
二甲氧基乙酸甲酯	89-91-8	8.61	96.65	57.76	281.04	417.41	–
正己酸乙酯	123-66-0	14.42	227.77	441.70	33.38	107.87	284.17
棕榈酸乙酯	628-97-7	36.04	273.22	100.23	663.29	126.63	–
醇类							
D-氨基丙醇	35320-23-1	1.37	369.35	316.83	185.20	316.57	195.18
异戊醇	123-51-3	13.47	94.56	84.09	21.54	–	–
苯乙醇	60-12-8	31.17	48.58	44.17	59.22	177.05	–
酸类							
2,3-二羟基丙酸	473-81-4	8.77	–	2869.35	5239.56	4926.82	–
酮类							
3-羟基-2-丁酮	513-86-0	13.25	–	–	–	148.91	–
醛类							
糠醛	98-00-0	21.7	–	–	359.64	269.67	
烷烃类							
1,4,7,10,13-五氧环十五烷	188.59	40.58	59.46	214.28	–	–	–
其他							
4-甲硫基丁腈	59121-24-3	2.08	148.37	253.98	183.05	216.91	–
甲基异脲硫酸盐	29427-58-5	1.43	39.18	55.21	32.30	46.90	151.33
八(乙二醇)一(十二烷基)醚	3055-98-9	26.3	–	–	–	–	254.94
甲基肼	60-34-4	4.47	198.52	798.46	369.33	1214.70	395.52

注: SF组为市售副干酪乳酪杆菌; BF组为副干酪乳酪杆菌SCFF20; XF组为SeNPs颗粒+副干酪乳酪杆菌SCFF20; YF组为亚硒酸钠+副干酪乳酪杆菌SCFF20; NR组为新鲜牛乳组; “–”表示未检测到该类物质。

果香和窖香，乙酸乙酯具有清香和果香[35]。此外，酯类还能稀释脂肪酸和胺类物质所带来的苦味[35]。如表 5 所示，相较于未发酵牛乳（NR 组），发酵牛乳增加了酯类物质的种类和含量。在五组样品中，XF 组棕榈酸乙酯含量最高。在生成的醇类物质中，异戊醇赋予了发酵乳杂醇油、威士忌味等独特的风味特征[36]，可能来源于氨基酸代谢、甲基酮还原、乳糖的代谢以及亚油酸的降解[37]。如表 5 所示，相较于未发酵牛乳（NR 组），发酵牛乳增加了醇类物质的种类和含量。相对于其他发酵组，副干酪乳酪杆菌 SCFF20 和纳米硒颗粒共同发酵组（XF 组）醇类物质产生量较低。

醛类物质是油脂氧化的产物，且轻微的氧化有助于风味的形成[38−39]。比如，糠醛可以提供桂皮油香气、杏仁味以及木质味和面包味[35]。如表 5 所示，副干酪乳酪杆菌 SCFF20 和硒共同发酵牛乳组（XF 组和 YF 组）发酵产生了糠醛，而仅有副干酪乳酪杆菌发酵组（SF 组和 BF 组）未产生糠醛。酸类物质主要是由乳酸菌分解代谢糖类以及氨基酸产生，赋予酸奶特有的风味[40]。如表 5 所示，副干酪乳酪杆菌 SCFF20 发酵组产生 2,3-二羟基丙酸（BF 组 2869.35 ng/kg、XF 组 5239.56 ng/kg、YF 组 4926.82 ng/kg），而市售副干酪乳酪杆菌发酵组并未产生 2,3-二羟基丙酸。酮类物质主要是不饱和脂肪酸发生热降解以及氧化，或者是微生物代谢所产生，能够赋予酸奶独特的风味[41]。3-羟基-2-丁酮具有奶油香味，乳脂气息、微甜。如表 5 所示，3-羟基-2-丁酮仅在副干酪乳酪杆菌 SCFF20 和亚硒酸钠共同发酵中产生，而其他发酵组并未生成该物质。

总的来说，微生物对发酵乳挥发性风味物质的累积产生了积极影响，主要是一些酯类、醇类和醛类等风味物质，如乙酸乙酯、二甲氧基乙酸甲酯、棕榈酸乙酯、异戊醇和苯乙醇等，且富硒副干酪乳酪杆菌 SCFF20 产生的风味物质多样性也优于市售副干酪乳酪杆菌，主要在一些酸类、酯类和醛类上体现，如 2,3-二羟基丙酸、棕榈酸乙酯和糠醛等。

3　结论

本研究利用副干酪乳酪杆菌 SCFF20 发酵制备富硒活菌性发酵乳，SeNPs 的添加可有效促进副干酪乳酪杆菌 SCFF20 的发酵活性，使发酵乳率先到达发酵终点，而亚硒酸钠的添加会在一定程度上抑制副干酪乳酪杆菌 SCFF20 的生长，减少发酵乳中活菌的数量。同时，SeNPs 颗粒和副干酪乳酪杆菌 SCFF20 共同发酵组（XF 组）发酵乳 a^* 最高，且 Se(0) 含量显著高于其他组（$P<0.05$）。因此，副干酪乳酪杆菌 SCFF20 制备的发酵乳不仅能有效富硒，且不同形态的硒也会显著改变发酵乳的 Se(0) 含量。此外，副干酪乳酪杆菌 SCFF20 发酵牛乳产生的风味物质多样性优于市售副干酪乳酪杆菌，主要体现在酯类和酸类，如棕榈酸乙酯、2,3-二羟基丙酸等。本研究为发酵乳的富硒研究及其相关产品开发奠定了研究基础，为缺硒人群补硒提供一种有效补硒手段。

© 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] PESCUMA M, GOMEZ-GOMEZ B, PEREZ-CORONA T, et al. Food prospects of selenium enriched-*Lactobacillus acidophilus* CRL 636 and *Lactobacillus reuteri* CRL 1101[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 35: 466−473.

[2] PEDRERO Z, MADRID Y, CÁMARA C. Selenium species bioaccessibility in enriched radish (*Raphanus sativus*): A potential dietary source of selenium[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(6): 2412−2417.

[3] 李理, 朱珺, 林国栋, 等. 富硒乳酸菌的筛选及富硒发酵乳抗氧化活性研究[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(8): 9−14. [LI Li, ZHU Jun, LIN Guodong, et al. Screening of selenium-enriched lactic acid bacteria and evaluation of antioxidant activity in selenium-enriched fermented milk[J]. China Dairy Industry, 2022, 50(8): 9−14.]

[4] 徐巧林, 吴文良, 赵桂慎, 等. 微生物硒代谢机制研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(1): 207−216. [XU Qiaolin, WU Wenliang, ZHAO Guishen, et al. Selenium metabolism in microorganisms[J]. Microbiology China, 2017, 44(1): 207−216.]

[5] HU C H, LI Y L, XIONG L, et al. Comparative effects of nano elemental selenium and sodium selenite on selenium retention in broiler chickens[J]. Animal Feed Science and Technology, 2012, 177(3−4): 204−210.

[6] BIEŃ D M, MICHALCZUK M, SZKOPEK D, et al. Changes in lipids metabolism indices as a result of different form of selenium supplementation in chickens[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 13817.

[7] LI Zhijian, WANG Qingqing, DAI Fujuan, et al. Reduction of selenite to selenium nanospheres by Se(IV)-resistant *Lactobacillus paralimentarius* JZ07[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133385.

[8] POPHALY S D, POONAM, SINGH P, et al. Selenium enrichment of lactic acid bacteria and bifidobacteria: A functional food perspective[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 39(2): 135−145.

[9] CUI Yinhua, LI Lingli, ZHOU Nanqing, et al. *In vivo* synthesis of nano-selenium by *Tetrahymena thermophila* SB210[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2016, 95: 185−191.

[10] ULLAH A, YIN X, WANG Fe H, et al. Biosynthesis of selenium nanoparticles (via *Bacillus subtilis* BSN313), and their isolation, characterization, and bioactivities[J]. Molecules, 2021, 26(18): 5559.

[11] TUGAROVA A V, KAMNEV A A. Proteins in microbial synthesis of selenium nanoparticles[J]. Talanta, 2017, 174: 539−547.

[12] ANDREONI V, LUISCHI M, CAVALCA L, et al. Selenite tolerance and accumulation in the *Lactobacillus* species[J]. Annals of Microbiology, 2000, 50(1): 77−88.

[13] 王睿楠, 李金宇, 卢阳阳, 等. 乳酸菌富硒机制及硒化产物特性研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(7): 378−386. [WANG Ruinan, LI Jinyu, LU Yangyang, et al. Research progress on selenium enrichment mechanism and selenized product characteristics of lactic acid bacteria[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(7): 378−386.]

[14] 涂青, 杨双全, 章之柱, 等. 富硒酵母发酵工艺的优化[J]. 中国酿造, 2022, 41(10): 140−145. [TU Qing, YANG Shuangquan, ZHANG Zhizhu, et al. Optimization of fermentation technolo-

gy of selenium-riched yeast[J]. China Brewing, 2022, 41(10): 140−145.]
[15] 祁新华, 张秀秀, 王海霞, 等. 响应面法优化富硒发酵羊乳饮料加工工艺[J]. 中国乳品工业, 2018, 46(10): 50−54. [QI Xinhua, ZHANG Xiuxiu, WANG Haixia, et al. Optimization of selenium enriched fermented goat milk beverage processing technology by response surface method[J]. China Dairy Industry, 2018, 46(10): 50−54.]
[16] 赵志峰, 曹雨澜, 陈晓蝶, 等. 利用副干酪乳酪杆菌 SCFF20 高效生物合成纳米硒颗粒: 一种潜在的亚硒酸盐生物转化工厂[J]. 微生物学报, 2024, 64(7): 2352−2367. [ZHAO Zhifeng, CAO Yulan, CHEN Xiaodie, et al. Efficient biosynthesis of selenium nanoparticles by Lacticaseibacillus paracasei SCFF20: A potential cell factory for selenite conversion[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(7): 2352−2367.]
[17] KUMAR A, KAUR A, TOMER V. Process optimization for the development of a synbiotic beverage based on lactic acid fermentation of nutricereals and milk-based beverage[J]. LWT, 2020, 131: 109774.
[18] ROSA L S, SANTOS M L, ABREU J P, et al. Probiotic fermented whey-milk beverages: Effect of different probiotic strains on the physicochemical characteristics, biological activity, and bioactive peptides[J]. Food Research International, 2023, 164: 112396.
[19] 齐新阳. 浓缩乳蛋白强化型高蛋白酸奶工艺与消化性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [QI Xinyang. Research on technology and digestibility of highprotein yogurts fortified with milk protein concentrate[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
[20] CHEN Xiaodie, LIN Man, HU Lujun, et al. Research on the effect of simultaneous and sequential fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus* plantarum on antioxidant activity and flavor of apple cider[J]. Fermentation, 2023, 9(2): 102.
[21] BISWAS K C, BARTON L L, TSUI W L, et al. A novel method for the measurement of elemental selenium produced by bacterial reduction of selenite[J]. Journal of Microbiological Methods, 2011, 86(2): 140−144.
[22] MARTÍNEZ F G, MORENO-MARTIN G, PESCUMA M, et al. Biotransformation of selenium by lactic acid bacteria: Formation of seleno-nanoparticles and seleno-amino acids[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2020, 8: 506.
[23] 张钰麟. 传统腊肉葡萄球菌的筛选及其对腊肉品质的影响研究[D]. 成都: 成都大学, 2023. [ZHANG Yulin. Screening of *Staphylococcus* from traditional bacon and its effect on the quality of bacon[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023.]
[24] ZHANG Zheqi, ZANG Mingwu, ZHANG Kaihua, et al. Effects of phospholipids and reheating treatment on volatile compounds in phospholipid-xylose-cysteine reaction systems[J]. Food Research International, 2021, 139: 109918.
[25] WILKOWSKE H H. Relationship between titratable acidity and pH during lactic acid fermentation in reconstituted nonfat milk 1[J]. Journal of Dairy Science, 1954, 37(1): 22−29.
[26] LEE W J, LUCEY J A. Formation and physical properties of yogurt[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2010, 23(9): 1127−1136.
[27] 许丽君. 混合型瑞士乳杆菌发酵剂弱后酸化机制初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017. [XU Lijun. Preliminary study on the weak post-acidification mechanism of mixed lactobacillus helveticus starter cultures[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.]
[28] CHEN Xiaoqian, ZHAO Zifu, ZHANG Chenyi, et al. Effect of epigallocatechin gallate on the fermentative and physicochemical properties of fermented milk[J]. Journal of Dairy Science, 2022, 105(9): 7322−7333.
[29] 刘骏. 纳米硒强化解磷菌及其根际效应研究[D]. 济南: 山东大学, 2021. [LIU Jun. Enhancement of phosphorus-solubilizing bacteria by selenium nanoparticles and its rhizosphere effect[D]. Jinan: Shandong University, 2021.]
[30] MANI-LÓPEZ E, PALOU E, LÓPEZ-MALO A. Probiotic viability and storage stability of yogurts and fermented milks prepared with several mixtures of lactic acid bacteria[J]. Journal of Dairy Science, 2014, 97(5): 2578−2590.
[31] ABOU ELMAATY T, RAOUF S, SAYED-AHMED K, et al. Multifunctional dyeing of wool fabrics using selenium nanoparticles[J]. Polymers, 2022, 14(1): 191.
[32] 宋玉卿, 汪鸿, 耿浩源, 等. 利用富硒菌体制备富硒酸乳[J]. 食品工业, 2020, 41(3): 25−30. [SONG Yuqing, WANG Hong, GENG Haoyuan, et al. Preparation of selenium-riched yogurt by selenium-riched bacteria[J]. The Food Industry, 2020, 41(3): 25−30.]
[33] ZHU Zongshuai, PIUS BASSEY A, CAO Yaqi, et al. Meat quality and flavor evaluation of Nanjing water boiled salted duck (NWSD) produced by different Muscovy duck (*Cairina moschata*) ingredients[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133833.
[34] FARES K, LANDY P, GUILARD R, et al. Physicochemical interactions between aroma compounds and milk proteins: Effect of water and protein modification[J]. Journal of Dairy Science, 1998, 81(1): 82−91.
[35] 杨秉坤, 剧柠, 丁雨红, 等. 沙棘酸奶挥发性风味物质的 GC-IMS 表征[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 308−315. [YANG Bingkun, JU Ning, DING Yuhong, et al. Characterization of volatile flavors of fermented sea-buckthorn yoghurt using gas chromatography-ion mobility spectroscopy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(13): 308−315.]
[36] GÜLER Z. Changes in salted yoghurt during storage[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2007, 42(2): 235−245.
[37] 于华, 王艺, 刘济玮, 等. 百香果酸奶酒酿造工艺优化及风味分析[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(3): 52−59. [YU Hua, WANG Yi, LIU Jiwei, et al. Optimization of brewing technology and flavor analysis of passion fruit sour milk wine[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2023, 59(3): 52−59.]
[38] CARROLL A L, DESAI S H, ATSUMI S. Microbial production of scent and flavor compounds[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2016, 37: 8−15.
[39] XIE Jianchun, SUN Baoguo, ZHENG Fuping, et al. Volatile flavor constituents in roasted pork of Mini-pig[J]. Food Chemistry, 2008, 109(3): 506−514.
[40] ZHANG Yanzeng, LIN Xiangna, JI Yanqing, et al. Characterization and correlation of dominant bacteria and volatile compounds in post-fermentation process of Ba-Bao Douchi[J]. Food Research International, 2022, 160: 111688.
[41] 罗小叶, 田春燕, 刘婉琳, 等. 一株副干酪乳杆菌发酵生产香菇酸奶工艺研究及挥发性成分分析[J]. 中国调味品, 2024, 49(1): 40−47. [LUO Xiaoye, TIAN Chunyan, LIU Wanlin, et al. Study on fermentation process of mushroom yogurt by a strain of *Lactobacillus paracasei* and analysis of volatile components[J]. China Condiment, 2024, 49(1): 40−47.]