

高小妹, 隋勇, 祝振洲, 等. 乳酸菌发酵对米乳品质、风味和抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 127-135. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030251

GAO Xiaomei, SUI Yong, ZHU Zhenzhou, et al. Effect of Lactic Acid Bacteria Fermentation on Quality, Flavour and Antioxidant Activity of Rice Milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 127-135. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030251

· 生物工程 ·

乳酸菌发酵对米乳品质、风味和抗氧化活性的影响

高小妹^{1,2}, 隋勇^{1,*}, 祝振洲², 李书艺², 周雷^{1,2}, 施建斌¹, 熊添¹, 蔡芳¹, 梅新^{1,*}

(1. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室/湖北省农业科学院农产品加工与

核农技术研究所, 湖北武汉 430064;

2. 武汉轻工大学硒科学与工程现代产业学院/国家富硒农产品加工技术研发专业中心/

湖北省绿色富硒农产品精深加工工程技术研究中心, 湖北武汉 430023)

摘要: 为了探究乳酸菌发酵对米乳品质、风味及抗氧化活性的影响, 本研究以黑米、红米和糙米为原料, 以乳粉和蔗糖为辅料, 添加直投式乳酸菌发酵剂制成发酵型米乳。并以相同条件下不添加发酵剂制成的非发酵型米乳为对照, 比较分析 6 种米乳的稳定性、蛋白质含量、还原糖含量、总酚含量、DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除活性以及挥发性风味物质的差异。结果显示, 乳酸菌发酵显著 ($P<0.05$) 提高了米乳的酸度、蛋白质含量、总酚含量、抗氧化活性, 降低了米乳的 pH、可溶性固形物和还原糖含量, 对离心沉淀率无显著影响。气相色谱-质谱联用仪和电子鼻分析结果显示, 与对照组相比, 乳酸菌发酵后米乳中风味物质的种类和含量显著提高, 正己醇、苯甲醛等米乳的主要香气成分含量分别增加了 0.23%~2.42%、0.11%~0.72%。乳酸菌发酵后的米乳具有特有的发酵风味。研究结果可为深入认识乳酸菌发酵对米乳品质、风味和抗氧化活性的影响及发酵谷物饮料的开发提供一定的理论依据。

关键词: 米乳, 乳酸菌发酵, 营养, 风味, 抗氧化活性

中图分类号: TS275.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)04-0127-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030251

本文网刊:



Effect of Lactic Acid Bacteria Fermentation on Quality, Flavour and Antioxidant Activity of Rice Milk

GAO Xiaomei^{1,2}, SUI Yong^{1,*}, ZHU Zhenzhou², LI Shuyi², ZHOU Lei^{1,2}, SHI Jianbin¹, XIONG Tian¹,
CAI Fang¹, MEI Xin^{1,*}

(1. Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agro-product Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;

2. School of Modern Industry for Selenium Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University/National R&D Center for Se-rich Agricultural Products Processing Technology/Hubei Engineering Technology Research Center for Deep Processing of Green Se-rich Agricultural Products, Wuhan 430023, China)

Abstract: In order to explore the effects of lactic acid bacteria fermentation on the quality, flavour and antioxidant activity of rice milk, different rice varieties (black rice, red rice and brown rice), auxiliary ingredients (milk powder and sucrose)

收稿日期: 2024-03-18

基金项目: 湖北省科技计划项目 (2023BBB101); 湖北省农业科学院粮食作物研究所自主创新项目 (2022ZZCX005)。

作者简介: 高小妹 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食加工, E-mail: 15527691868@163.com。

* 通信作者: 隋勇 (1987-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 粮食加工, E-mail: suiyong0429@foxmail.com。

梅新 (1978-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 粮食加工, E-mail: meixin0898@163.com。

and lactic acid bacteria were used to produce rice milk in this study. The stability, protein content, reducing sugar content, total phenolic content, DPPH $\cdot$ and ABTS $\cdot$ scavenging activity, and volatile flavor compounds of fermented and non-fermented rice milk were evaluated. The results showed that the acidity, protein content, total phenolic content and antioxidant activity of rice milk increased significantly after fermentation by lactic acid bacteria, while the pH, soluble solids and reducing sugar content decreased significantly ($P<0.05$), and the centrifugal precipitation rate did not change significantly. The results of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and electronic nose (E-nose) analyses showed that the types and contents of flavouring substances were significantly higher in the rice milk fermented by lactic acid bacteria compared to the control. The contents of n-hexanol and benzaldehyde, which were the main aroma components of rice milk increased by 0.23%~2.42% and 0.11%~0.72%, respectively. And the rice milk fermented by lactic acid bacteria had a unique fermented flavour. The results of this study could provide a theoretical basis for the in-depth understanding of the effects of lactic acid bacteria fermentation on the quality, antioxidant activity and volatile flavour substances of rice milk.

Key words: rice milk; lactic acid bacteria fermentation; nutrition; flavour; antioxidant activity

我国是稻米生产与消费的大国,随着近年来人们消费水平和生活品质的提高,为了满足消费者的需求,学者对于稻米的研究不再仅限于水稻的选育栽培,而是更加关注稻米的食用品质,目前对于稻米品质的研究主要集中于稻米的加工精度、食味品质和营养功能方面。随着消费者健康意识的提高,黑米、红米和糙米等全谷物逐渐取代精白米成为追求健康人群的主食选择。黑米、红米和糙米保留了稻米的米糠和胚芽等部分,具有丰富的营养价值,特别是黑米和红米,它们富含重要的生物活性物质如花色苷,拥有良好的抗氧化和清除自由基的能力^[1-2]。然而与精白米相比,黑米、红米和糙米粗糙的口感限制了其市场消费率。如何提高全谷物的食味品质成为目前稻米研究的重中之重。

发酵植物乳饮料具有营养丰富、口感独特等特点,一直以来都是国内外饮料行业重点研究及开发的领域^[3]。以黑米、红米和糙米为原料进行发酵,制造出一种既营养丰富又口感出众的饮品,可实现粮食加工和饮料行业的紧密结合。近年来,绿色、健康的饮食观念逐渐被人们所认同。已有许多工作研究了谷物饮料的配方、制作工艺和稳定性等。乐梨庆等^[4]以藜麦为原料,采用正交实验对藜麦饮料酶解工艺和稳定性进行优化最终制得了一种稳定性高、风味独特的复合藜麦饮料。Arya 等^[5]等以稗子、谷子、小米等杂粮为原料,研制了一种低 GI 的杂粮功能饮料。目前关于谷物饮料的研究多集中于复合谷物配方,而对于单独以糙米为原料的研究较少,且均集中在研究米乳的制作配方和工艺上,乳酸菌发酵对于米乳饮料品质和风味的影响方面研究较少。作为一种新型谷物类饮料,乳酸菌发酵米乳饮料完整地保留了大米中的蛋白质、维生素、膳食纤维和矿物质等有益营养成分,有利于优化和改善人们的饮食结构^[6]。在乳酸菌发酵米乳的过程中,稻米中的多糖、蛋白质和脂类等大分子物质会被分解成更容易被人体吸收的单糖和氨基酸等小分子物质,使得营养物质更容易被吸收利用^[7],研究乳酸菌发酵对于米乳饮料的影响具有重要意义。

因此,本研究分别以黑米、红米和糙米为原料,以乳粉和蔗糖为辅料,添加直投式发酵剂制成发酵型米乳,分析了不同品种米乳发酵前后营养成分、体外抗氧化活性及挥发性风味物质的变化,为进一步优化发酵米乳生产工艺及功能性提供技术参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黑米、红米、糙米、蔗糖、全脂奶粉等常规原料市购;直投式酸奶发酵菌 北京川秀科技有限公司;中温 α -淀粉酶(150000 U/mL) 沧州夏盛酶生物技术有限公司;复配增稠稳定剂(黄原胶、羟丙基甲基纤维素、瓜尔豆胶) 潍坊英轩实业有限公司;2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS) 上海源叶生物科技有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH) 美国 Sigma 公司;浓盐酸、氢氧化钠、浓硫酸、硫酸钾、硫酸铜、3,5-二硝基水杨酸、过硫酸钾、无水乙醇 以上均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

CF-100A 发酵箱 中山卡士电器有限公司;STARTER 2C 型 pH 计 奥豪斯仪器有限公司;ATC 手持式糖度计 济宁国龙物资有限公司;01040080 分光光度计 上海仪电分析仪器有限公司;K9840 自动凯氏定氮仪 济南海能仪器有限公司;XHF-DY 型高速分散器 宁波新芝生物科技股份有限公司;PEN3 电子鼻 德国 AIRSENSE 公司;EXPEC5231 气相三重四级杆质谱联用仪(GC-MS) 杭州谱育科技发展有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 米乳制作工艺 参考赵慧等^[6]的方法并加以修改。非发酵型米乳:将米清洗浸泡过夜后放入预热好的烤箱进行烘烤,180 $^{\circ}\text{C}$ 烘烤 40 min,将烘烤后的米进行粉碎,过 80 目筛。向蒸煮容器中加入 35 g 过筛好的米粉、10 g 乳粉、20 g 蔗糖、700 mL 水,充分搅拌后蒸煮 30 min,晾凉后向米浆中加入 0.2 g α -淀粉酶在 65 $^{\circ}\text{C}$ 下液化 30 min,100 $^{\circ}\text{C}$ 灭酶 10 min,随

后加入 0.5 g 黄原胶、0.1 g 羟丙基甲基纤维素、0.1 g 瓜尔豆胶,使用均质机在 13000 r/min 下均质 5 min,65 ℃ 下灭菌 30 min 即得非发酵型米乳。

发酵型米乳:其他工艺均与上述非发酵米乳的制作工艺相同,不同的是酶解后的米乳晾凉后接种 0.2 g 直投式酸奶发酵菌,40 ℃ 下发酵 20 h,向发酵好的米浆中加入 0.5 g 黄原胶、0.1 g 羟丙基甲基纤维素、0.1 g 瓜尔豆胶,高速分散器在 13000 r/min 下均质 5 min,65 ℃ 下灭菌 30 min 即得发酵型米乳。

1.2.2 理化性质的测定

1.2.2.1 可溶性固形物含量的测定 使用手持糖度计进行测定。

1.2.2.2 酸度的测定 参考 GB 5009.239-2016《食品酸度的测定》,采用国标标准碱滴定法(以乳酸计)。

1.2.2.3 米乳稳定性的测定 参考刘妍^[8]方法并加以修改。向烘至恒重的 10 mL 离心管中加入 10 mL 米乳并称重,将装有样品的离心管于 4500 r/min 下离心 15 min,弃去上清液后称重并记录。离心沉淀率的计算公式如下:

$$\text{离心沉淀率}(\%) = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: m_1 表示沉淀物的质量, g; m_2 表示 10 mL 米乳的质量, g。

1.2.3 营养品质的测定

1.2.3.1 蛋白质含量的测定 参考 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》,采用凯氏定氮法进行蛋白质的测定。

1.2.3.2 还原糖含量的测定 采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定乳酸菌发酵米乳中还原糖含量,参照彦繁鹤等^[9]的方法并做适当改进。以葡萄糖浓度为横坐标,吸光度为纵坐标绘制标准曲线($y=0.7557x+0.0145$, $R^2=0.9992$)。

1.2.3.3 总酚含量的测定 多酚含量的测定采用福林酚比色法,参考刘静等^[10]的方法绘制没食子酸标准曲线($y=8.8231x+0.0283$, $R^2=0.9992$)。

1.2.4 抗氧化活性的测定

1.2.4.1 DPPH·清除活性的测定 参考 Chen 等^[11]的方法,并稍作修改。将 2 mL 样品溶液和 2 mL DPPH 溶液(0.2 mmol/mL 95% 乙醇)的混合溶液涡旋混匀,在黑暗中静置 30 min,分别测量 95%(v/v)乙醇溶液在 517 nm 吸光度值 A_1 ,混合溶液在 517 nm 吸光度值 A_2 ,2 mL DPPH 溶液与 2 mL 95% 乙醇溶液的混合溶液在 517 nm 的吸光度值 A_0 ,按公式(2)计算 DPPH 自由基清除率:

$$\text{DPPH} \cdot \text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_2 - A_1}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: A_2 表示试样与 DPPH 溶液反应后的吸光度值, A_1 表示试样吸光度值, A_0 表示 DPPH 溶液吸

光度值。

1.2.4.2 ABTS⁺·清除能力的测定 参考 Tong 等^[12]的方法,稍作修改。通过将 ABTS 溶液(7 mmol/L)与过硫酸钾溶液(2.45 mmol/L)混合制成 ABTS 储备液,在黑暗中放置 12~16 h 后将该溶液用 70% 乙醇溶液稀释至 0.7(734 nm)的吸光度值制成 ABTS 工作液。将 0.15 mL 样品溶液与 2 mL ABTS 工作液混匀,室温避光反应 6 min 后,在 734 nm 处测定吸光度。ABTS⁺·自由基清除率用以下公式(3)计算:

$$\text{ABTS}^+ \cdot \text{清除率}(\%) = \frac{A_1 - A_2}{A_0} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中: A_0 表示 0.15 mL 70% 乙醇和 2.0 mL ABTS 工作液混合液的吸光度, A_1 表示 0.15 mL 样品溶液和 2.0 mL ABTS 工作液混合液的吸光度, A_2 表示空白(不含 ABTS)体系中样品的吸光度值。

1.2.5 挥发性风味物质的测定

1.2.5.1 电子鼻的测定 参考 Fang 等^[13]的方法并加以修改。样品瓶中分别加入 10 mL 米乳样品并拧紧瓶盖,孵育时间 20 min。检测程序为:准备时间 5 s,清洗时间 100 s,检测时间 120 s。PEN3 型电子鼻不同传感器的性能的描述如表 1 所示。

表 1 PEN3 便携式标准传感器阵列及性能
Table 1 PEN3 portable standard sensor arrays and performance

序号	传感器	传感器相应特征
1	W1C	芳香成分苯类
2	W5S	灵敏度大,对氮氧化合物很敏感
3	W3C	氨类,对芳香成分灵敏
4	W6S	主要对氢化物有选择性
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对无机硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	芳香成分、对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.2.5.2 GC-MS 的测定 参考 Chai 等^[14]的方法并加等以修改。GC 条件:升温程序:40 ℃ 保持 5 min,以 4 ℃/min 升至 100 ℃,保持 2 min,再以 10 ℃/min 升至 210 ℃,保持 2 min;再以 15 ℃/min 升至 270 ℃,保持 5 min。载气 He,流速 0.8 mL/min,进样口温度:250 ℃,分流比:5:1。

MS 条件:质谱条件:电子轰击离子源;电子能量 70 eV;离子源温度 200 ℃;检测电压 350 V;质量扫描范围 m/z 33~450。

检测结果根据保留时间、保留指数(retention index, RI)进行定性;相对含量的计算采用面积归一法。

1.3 数据分析

所有实验均重复三次,结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 19.0 进行统计分析, $P < 0.05$ 代表差

异显著。采用 Origin 2019 绘图软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 乳酸菌发酵对理化特性的影响

表 2 所示为不同米乳发酵前后理化指标的变化。由表 2 可知,发酵前,三种米乳的 pH 均在 6.5 左右,酸度为 5.5 mg/mL。经过乳酸菌发酵后,三种米乳的 pH 显著($P<0.05$)下降至 3.9 左右,酸度显著($P<0.05$)上升至 34.27 mg/mL 以上,乳酸菌发酵后,米乳中可溶性固形物的含量有一定的下降,但不明显。这主要是因为乳酸菌发酵代谢过程中会产生淀粉酶和脂肪酶,将米乳中的糖类和脂肪逐渐降解,产生有机酸和脂肪酸类物质,使体系的 pH 降低,酸度提高,可溶性固形物含量降低^[15]。Yang 等^[16]以薏苡仁、藜麦、小米、糙米为原料制作发酵乳,结果表明,随着发酵过程的进行,发酵乳的 pH 逐渐降低,可滴定酸逐渐升高。Ayub 等^[17]以藜麦为原料制作了一种益生菌藜麦乳,益生菌发酵后,藜麦乳的 pH 降低,酸度升高。本研究与上述文献结果基本一致。除此之外,由表 2 可以看出,乳酸菌发酵后米乳的离心沉淀率虽有所升高,但升高幅度不大,与非发酵米乳相比,发酵米乳离心沉淀率变化不显著,非发酵米乳与发酵米乳稳定性均较高。这主要是由于制作过程中添加了复合稳定剂的原因。发酵谷物饮料的稳定性是影响饮料感官品质的最为重要的因素之一。发酵谷物饮料组分复杂,各组分在饮料中存在的形式不同。这就会造成发酵谷物饮料容易出现分层、结块、悬浮、沉淀等不良现象。研究表明物理方法(超声波预处理、均质预处理)能够改善产品的稳定性,但是提高谷物发酵饮料稳定剂最为常用的方法是添加稳定剂,或者多种方法配合使用^[18]。一般来说,复合稳定剂相对单一稳定性能好,更有利于提高发酵谷物饮料的稳定性。

表 2 不同类型米乳理化性质
Table 2 Physicochemical properties of different types of rice milk

米乳种类	pH	酸度(mg/mL)	可溶性固形物(°Brix)	离心沉淀率(%)
黑米乳	6.28±0.11 ^b	5.80±0.56 ^c	8.47±0.25 ^b	0.30±0.04 ^a
发酵黑米乳	3.87±0.09 ^c	34.27±0.40 ^a	8.43±0.06 ^b	0.38±0.04 ^a
红米乳	6.37±0.10 ^b	5.33±0.21 ^c	8.07±0.15 ^c	0.33±0.03 ^a
发酵红米乳	3.95±0.18 ^c	33.50±0.30 ^b	8.01±0.12 ^c	0.36±0.08 ^a
糙米乳	6.70±0.17 ^a	5.87±0.38 ^c	9.00±0.10 ^a	0.29±0.04 ^a
发酵糙米乳	3.98±0.25 ^c	33.67±0.15 ^{ab}	8.92±0.17 ^a	0.38±0.05 ^a

注: 同列不同字母表示数据差异显著($P<0.05$), 表 3 同。

2.2 营养品质

表 3 所示为三种米乳发酵前后的营养品质的变化。由表 3 可知,三种米乳经过乳酸菌发酵后,蛋白质含量显著($P<0.05$)上升,其中乳酸菌发酵后,黑米乳的蛋白质含量提高了 27.40%,红米乳的蛋白质含量提高了 9.91%,糙米乳的蛋白质含量提高了

11.58%。发酵后基质的粗蛋白含量的增加表明基质中营养物质的增多,除此之外,由于微生物在生长过程中利用其它营养成分生长代谢,并将其转化为蛋白质类物质,同时微生物大量繁殖,其菌体本身也是一种蛋白质,增加了基质中的蛋白质含量^[17]。Li 等^[19]以大豆和藜麦为原料制作发酵植物饮料,发酵后发酵大豆饮料和发酵藜麦饮料中的粗蛋白含量显著上升。Mendes 等^[20]制作了一种新型坚果发酵乳,研究结果表明发酵后饮料中的蛋白质含量上升。本文的研究结果与上述文献基本一致。除此之外,从表 3 中还可以看到三种米乳经乳酸菌发酵后,米乳中的还原糖含量均显著($P<0.05$)下降,其中黑米乳的还原糖含量降低了 3.06%,红米乳的还原糖含量降低了 12.57%,糙米乳的还原糖含量降低了 12.89%。这是由于糖类是乳酸菌主要的营养物质,为其提供丰富的 C 源,发酵过程中乳酸菌不断利用基质中的糖类物质,使得发酵后的米乳含量显著下降。酚类化合物由于其在治疗人类疾病如癌症和心血管疾病中的有效性和安全性而引起了极大的关注^[21]。由表 3 可知,黑米中的总酚含量显著($P<0.05$)高于红米和糙米。发酵后,三种米乳中的总酚含量均显著($P<0.05$)上升,其中黑米乳的总酚含量提高约 2 倍左右,红米乳的总酚含量提高了 1 倍,糙米乳的总酚含量提高了约 4 倍左右,乳酸菌发酵显著提高了米乳中的总酚含量。这是由于乳酸菌在发酵过程中分泌的纤维素水解酶类,作用于黑米、红米和糙米的麸皮,促进了麸皮中多酚的释放^[10]。Huang 等^[22]以大豆和藜麦为基质,对不同基质配比的配方进行乳酸菌接种,结果表明,发酵显著提高了大豆藜麦乳的总酚含量。本文的研究结果与之一致。

表 3 不同类型米乳的营养品质
Table 3 Nutritional qualities of different types of rice milk

米乳种类	蛋白质含量(g/100 g)	还原糖含量(mg/mL)	总酚含量(mg/mL)
黑米乳	4.20±0.06 ^c	19.44±0.14 ^a	0.32±0.09 ^c
发酵黑米乳	5.35±0.01 ^a	18.84±0.12 ^b	0.87±0.04 ^a
红米乳	4.24±0.04 ^c	17.02±0.40 ^c	0.13±0.03 ^d
发酵红米乳	4.66±0.06 ^c	14.88±0.05 ^c	0.44±0.04 ^b
糙米乳	4.49±0.01 ^d	18.91±0.06 ^b	0.08±0.03 ^d
发酵糙米乳	5.01±0.05 ^b	16.47±0.07 ^d	0.40±0.05 ^{bc}

2.3 乳酸菌发酵对米乳抗氧化活性的影响

2.3.1 DPPH·清除活性 不同类型米乳清除 DPPH·的能力如图 1 所示。结果表明,无论是否发酵,黑米乳的 DPPH·清除率显著($P<0.05$)高于红米乳和糙米乳,这主要是由于黑米中富含花色苷等生物活性物质,抗氧化活性更高。除此之外,非发酵米乳的 DPPH·清除率介于 11.2%~56.9%,发酵米乳 DPPH·清除率介于 16.5%~68.7%。整体来看,乳酸菌发酵显著提高了不同品种米乳的 DPPH·清除能力($P<0.05$)。这可能是因为产品中的蛋白质和碳水化合物

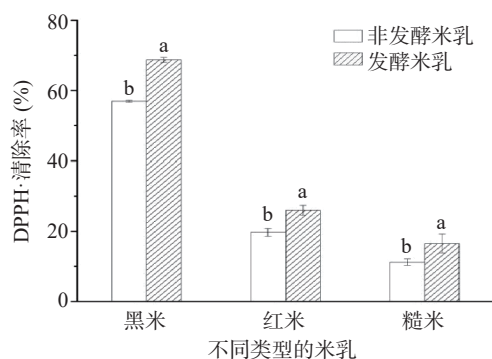


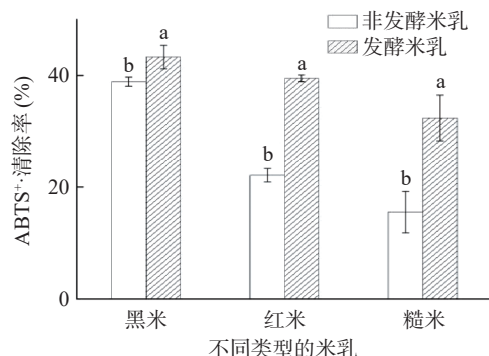
图 1 不同类型米乳的 DPPH·清除能力

Fig.1 DPPH· scavenging capacity of different types of rice milk

注: 所有数据取三次实验结果的平均值±标准差, 不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$), 图 2 同。

等营养成分在发酵过程中被乳酸菌消耗分解, 从而代谢生成多种小分子的生理活性物质及酚类化合物^[23]。而且据文献报道, 乳酸菌本身有一些抗氧化酶类物质使其本身具有一些抗氧化性^[24], 这也是使乳酸菌发酵之后米乳饮料抗氧化性升高的原因。

2.3.2 ABTS⁺清除活性 如图 2 所示, 不同品种发酵与非发酵米乳均具有一定的 ABTS⁺清除能力, 其 ABTS⁺清除率介于 15.5%~43.4%。结果表明, 乳酸菌发酵能显著提高各品种的 ABTS⁺清除能力 ($P < 0.05$)。其中, 发酵前后的黑米乳的 ABTS⁺清除能力最强, 红米乳次之, 糙米乳最差。Juáreztrujillo 等^[25]以一种谷物种子为原料制成一种发酵谷物饮料, 发酵后饮料的总酚含量上升, DPPH·和 ABTS⁺清除率显著提高, 抗氧化能力提高。本文的研究结果与之一致。

图 2 不同类型米乳的 ABTS⁺清除能力Fig.2 ABTS⁺ scavenging capacity of different types of rice milk

2.4 乳酸菌发酵对米乳挥发性风味物质的影响

2.4.1 电子鼻分析 电子鼻主要是模拟人体嗅觉系统, 可用于检测和区分复杂样品气味的完整信息^[26]。6 种米乳饮料的电子鼻雷达图如图 3 所示。从图中可以看出, 不同饮料的风味轮廓之间存在差异, 说明 6 种饮料的挥发性物质有一定程度的不同。在电子鼻的 10 个传感器中, R2、R6、R7、R8、R9 号传感器的响应值较为明显, 表明传感器对 6 种米乳饮料的

氮氧化物、碳氢化合物、硫化氢、醇类、芳香族化合物和烷烃(甲烷等)等挥发性成分较灵敏。通过 R2、R7 号传感器的变化规律可以看出, 乳酸菌发酵后的黑米乳、红米乳和糙米乳饮料中氮氧化物和硫化物升高。这是由于在发酵过程中, 氨基酸发生斯特勒降解反应或醛醇缩合反应产生含羰基化合物(如醛、酮、酯等)^[19]。金子灿^[23]通过研究发酵对糙小米饮料风味物质的影响发现, 乳酸菌发酵后, 糙小米饮料中的氮氧化物和芳香化合物的响应值升高, 这与本文的研究结果基本一致。

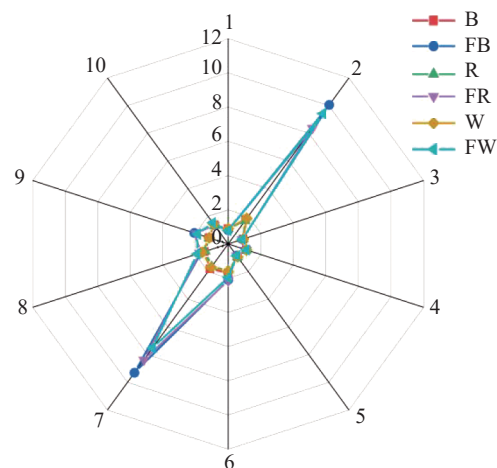


图 3 不同类型米乳发酵前后电子鼻雷达图

Fig.3 Electronic nose radargrams of different types of rice milk before and after fermentation

注: 图中 B、FB、R、FR、W、FW 分别代表黑米乳、发酵黑米乳、红米乳、发酵红米乳、糙米乳、发酵糙米乳, 图 4、图 5、表 4 同。

2.4.2 电子鼻最小偏二乘判别分析 最小偏二乘判别分析(PLS-DA)可将高维数据可视化、判别分析和代谢变化有关的潜在代谢物^[27]。以电子鼻的 10 个传感器为 x 变量, 以不同类型的米乳为 y 变量, 进行 PLS-DA 建立相关模型, 模型的判别效果如图所示, $R^2X=0.998$, $R^2Y=0.976$, $Q^2=0.9$, 说明该模型稳定性较好, 未出现过拟合现象, 具有较好的预测能力。根据 PLS-DA 判别模型可知(图 4), 各品种发酵前后的米乳在置信区间内分界明显, 表明不同类型米乳的挥发

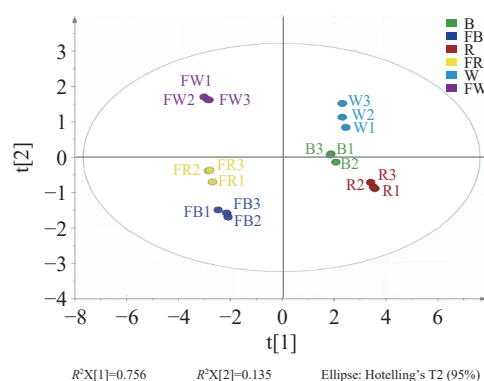


图 4 不同类型米乳发酵前后电子鼻 PLS-DA 分析

Fig.4 Electronic nose PLS-DA analysis of different types of rice milk before and after fermentation

性风味物质存在显著差异。

2.4.3 GC-MS 采用气相色谱和质谱联用的方法,对 6 种不同类型的发酵与非发酵米乳的风味物质进行分析比较,结果如表 4 所示。与非发酵米乳相比,发酵米乳的挥发性风味物质有明显的变化。乳酸菌发酵前,黑米乳中共检测出 21 种物质,红米乳中共

检测出 23 种物质,糙米乳中共检测出 23 种物质。乳酸菌发酵后,黑米乳中共检测出 29 种物质,红米乳中共检测出 25 种物质,糙米乳中共检测出 27 种物质,这与之前的研究结果相似,即乳酸菌发酵后会产生更多的挥发性物质^[7]。

与非发酵米乳相比,发酵米乳的挥发性风味物

表 4 不同类型米乳挥发性化合物测定结果
Table 4 Results of volatile compounds in different types of rice milk

种类	序号	挥发性物质	分子式	CAS	相对峰面积(%)					
					B	FB	R	FR	W	FW
醇类	1	反式-2-辛烯-1-醇	C ₈ H ₁₆ O	18409171	0.29	0.30	—	0.31	0.48	0.51
	2	1-庚炔-3-醇	C ₇ H ₁₂ O	7383199	0.08	—	—	—	—	—
	3	3-甲基-3-丁烯-1-醇	C ₅ H ₁₀ O	763326	1.15	0.75	—	—	—	—
	4	正己醇	C ₆ H ₁₄ O	111273	—	0.23	—	—	0.59	3.01
	5	4-甲基-1-戊醇	C ₆ H ₁₄ O	626891	—	—	0.31	0.34	0.15	—
	6	2,3-二甲基环己醇	C ₈ H ₁₆ O	26001581	—	0.56	0.53	0.35	—	0.45
	7	1-十一醇	C ₁₁ H ₂₄ O	112425	—	—	3.24	—	5.36	6.26
	8	庚醇	C ₇ H ₁₆ O	111706	—	0.39	—	0.35	0.30	0.37
	9	1-壬醇	C ₉ H ₂₀ O	143088	—	—	—	6.81	—	1.92
	10	1-辛醇	C ₈ H ₁₈ O	111875	—	1.21	—	—	—	2.34
	11	苯乙醇	C ₈ H ₁₀ O	60128	—	—	—	—	0.28	0.43
胺类	1	N-甲基异丙基胺	C ₅ H ₁₃ N	625434	5.81	5.67	0.83	0.56	1.41	0.14
	2	氰乙酰胺	C ₃ H ₄ N ₂ O	107915	—	3.58	9.71	9.11	—	3.45
	3	2-苯乙酰胺	C ₈ H ₉ NO	103811	—	0.02	—	0.13	—	—
	4	2-羟基丙酰胺	C ₃ H ₇ NO ₂	2043438	—	—	0.68	—	—	—
	5	异庚胺	C ₇ H ₁₇ N	123820	—	3.24	—	0.46	—	2.78
	6	1,3-二甲基丁胺	C ₆ H ₁₅ N	108098	—	—	—	0.65	0.53	0.87
	7	1,5-二甲基己胺	C ₈ H ₁₉ N	543828	—	—	—	0.45	0.35	0.49
醛类	1	正己醛	C ₆ H ₁₂ O	66251	0.78	—	0.29	—	—	—
	2	(E)-2-庚烯醛	C ₇ H ₁₂ O	18829555	0.45	0.71	0.49	—	0.63	--
	3	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	100527	0.14	0.25	—	—	—	0.72
	4	壬醛	C ₉ H ₁₈ O	124196	5.14	—	2.16	0.65	2.41	0.55
	5	癸醛	C ₁₀ H ₂₀ O	112312	0.68	0.82	—	—	—	—
	6	反式-2-癸烯醛	C ₁₀ H ₁₈ O	3913813	0.89	3.19	0.71	0.49	0.98	0.27
	7	2,4-癸二烯醛	C ₁₀ H ₁₆ O	2363884	0.37	0.89	—	—	—	—
	8	正辛醛	C ₈ H ₁₆ O	124130	—	0.61	0.33	—	—	—
	9	反-2-辛烯醛	C ₈ H ₁₄ O	2548870	—	—	0.14	—	—	—
	10	己醛	C ₆ H ₁₂ O	66251	—	—	—	—	0.44	0.49
酮类	1	丙酮	C ₃ H ₆ O	67641	6.07	4.73	—	—	—	—
	2	2-壬酮	C ₉ H ₁₈ O	821556	0.77	—	2.98	0.51	0.66	—
	3	2-十三烷酮	C ₁₃ H ₂₆ O	593088	0.67	0.53	—	—	0.64	—
	4	2,3-丁二酮	C ₄ H ₆ O ₂	431038	—	1.39	—	—	—	—
	5	2,3-戊二酮	C ₅ H ₈ O ₂	600146	—	0.88	—	—	—	—
	6	2-庚酮	C ₇ H ₁₄ O	110430	—	0.16	—	—	0.27	—
	7	5-甲基-2-己酮	C ₁₁ H ₂₂ O	927491	—	—	0.41	—	—	—
	8	2-十二烷酮	C ₁₂ H ₂₄ O	6175491	—	—	0.60	0.35	—	—
	9	3-羟基-2-丁酮	C ₄ H ₈ O ₂	513860	—	—	—	—	2.90	—
烷烃及其衍生物类	1	十四烷	C ₁₄ H ₃₀	629594	1.01	—	0.31	0.27	—	—
	2	十九烷	C ₁₉ H ₄₀	629925	0.93	0.61	—	1.28	0.70	0.46
	3	十六烷	C ₁₆ H ₃₄	544763	1.33	—	1.10	0.40	—	—
	4	2,3-环氧丁烷	C ₄ H ₈ O	3266237	—	1.31	—	—	—	—
	5	十七烷	C ₁₇ H ₃₆	629798	—	0.52	0.61	0.93	—	0.72
	6	2,3-环氧-2-甲基丁烷	C ₅ H ₁₀ O	5076197	—	—	1.38	—	8.65	12.38
	7	环戊烷	C ₅ H ₁₀	287923	—	—	—	1.30	—	—

续表 4

种类	序号	挥发性物质	分子式	CAS	相对峰面积(%)					
					B	FB	R	FR	W	FW
酸、氨基酸衍生物类	1	丙二酸	C ₃ H ₄ O ₄	141822	1.41	—	—	0.97	—	0.92
	3	苯甲酸	C ₇ H ₆ O ₂	65850	—	1.74	—	—	—	—
	4	十一烷酸	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	112378	—	7.27	—	0.37	—	0.22
	5	癸酸	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	334485	—	3.19	2.07	2.24	1.18	0.03
	7	肉豆蔻酸	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	544638	—	0.16	0.44	—	—	0.41
	8	十六烷酸	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	57103	—	—	0.42	0.78	0.80	0.68
	9	辛酸	C ₈ H ₁₆ O ₂	124072	—	—	—	6.04	—	0.34
	1	2,6-二甲基吡嗪	C ₆ H ₈ N ₂	108509	0.32	—	—	—	—	—
	2	2,3-二氢苯并呋喃	C ₈ H ₈ O	496162	1.11	0.86	0.63	—	0.77	0.25
杂环类	3	间苯二酚	C ₆ H ₆ O ₂	108463	0.36	—	—	—	—	—
	4	2,6-二叔丁基苯酚	C ₁₄ H ₂₂ O	128392	—	0.27	—	—	0.27	—

质在种类和含量上差异较大。其中差异最大的是酸类物质和胺类物质。酸类物质是乳酸菌代谢产生的次级产物。在乳酸菌发酵过程中,乳酸菌代谢产生氨基酸脱羧酶,氨基酸在脱羧酶的作用下脱羧生成生物胺,乳酸菌发酵后,米乳中的胺类物质提高了 4 倍多。Li 等^[19] 以大麻籽为原料制作一种新型谷物发酵饮料,发酵后饮料中的胺类物质和酸类物质浓度如己酸等显著上升,本文研究结果与之基本一致。在检出的挥发性风味物质中,对米乳的风味贡献最大的物质主要是醇、酮、醛以及呋喃等一些杂环类化合物,如正己醇、2-庚酮、2-壬酮具有果香味、奶油香气,苯甲醛具有清香味、杏仁味,壬醛和癸醛具有玫瑰花香,反-2-辛烯醛具有爆米花香,这些香味物质构成了米乳的香味成分。从表 4 中可以看出,乳酸菌发酵后,黑米乳中的正己醇的含量升高至 0.23%,糙米乳中正己醇的含量从 0.59% 升高至 3.01%,乳酸菌发

酵米乳的果香味和奶油香气更浓。金子灿等^[23] 的研究表明乳酸菌发酵增加了更多的醇类物质,使发酵制品具有更好的风味,与本文研究结果基本一致。除此之外,黑米乳中的癸醛含量从 0.68% 升高至 0.82%;糙米乳中的苯甲醛随着乳酸菌的发酵升高至 0.72%,乳酸菌发酵后米乳的风味更佳。

2.4.4 GC-MS 聚类热图分析 为进一步分析挥发性风味物质,依据每种风味物质的峰强度值做出热图^[28-30]。可以直观地看到 6 种米乳的挥发性风味物质差异明显。如图 5 所示,在聚类热图中,将不同品种发酵与非发酵米乳的关键挥发性化合物分组为三个大的聚类,其中黑米乳、红米乳和糙米乳各为三个不同的聚类,说明不同品种的米乳之间挥发性风味物质差异显著。在每个大聚类中,发酵与非发酵的米乳又被分成两个不同的聚类,说明乳酸菌发酵显著改变了米乳中风味物质的浓度和多样性,发酵米乳的风味

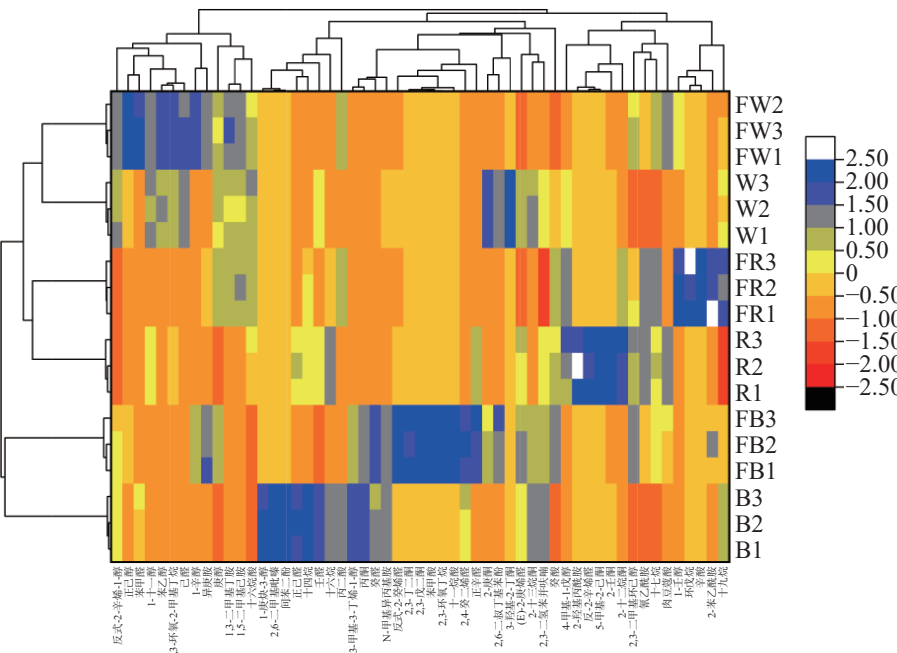


图 5 不同类型米乳挥发性风味物质的聚类热图

Fig.5 Clustering heat map of volatile flavour substances in different types of rice milk

相较于非发酵米乳更加丰富。

3 结论

本研究探究了乳酸菌发酵对米乳的品质、风味物质及抗氧化活性的影响。通过研究发现乳酸菌发酵对米乳的 pH、酸度、蛋白质含量、总酚含量、抗氧化活性、挥发性化合物整体影响较大,而对米乳的可溶性固形物含量和离心沉淀率影响较小。与同品种未发酵的米乳相比,乳酸菌发酵后米乳的酸度、蛋白质含量和总酚含量显著($P<0.05$)上升,而 pH 和还原糖的含量显著($P<0.05$)下降,其中蛋白质含量提高了 9.91%~27.40%,总酚含量提高了 1~4 倍,还原糖含量降低了 3.06%~12.89%,乳酸菌发酵提高了米乳的营养品质。乳酸菌发酵引起了米乳稳定性的降低,但由于复合稳定剂的添加,下降幅度不显著。除此之外,体外抗氧化试验表明,乳酸菌发酵提高了米乳的 DPPH·和 ABTS⁺清除率,发酵后米乳的 DPPH·和 ABTS⁺清除率分别提高了 20.73%~47.32% 和 11.31%~109.7%。通过电子鼻和 GC-MS 发现,乳酸菌发酵引起了米乳挥发性风味物质的改变,乳酸菌发酵后米乳中风味物质的种类和含量显著提高,其中醇类、胺类和酸类物质含量显著上升。乳酸菌发酵有利于米乳主要香气成分如正己醇和苯甲醛萃取,发酵后的米乳具有特有的发酵风味。综合分析,乳酸菌发酵可改善米乳的营养成分,提高营养价值,丰富米乳的风味且发酵后米乳的抗氧化活性显著上升。近年来,发酵谷物饮料逐渐进入市场,本研究为粮食的精深加工与发酵饮料产业的结合提供了理论参考。后续还可以针对米乳饮料的发酵工艺进行优化,通过谷物原料的复配丰富米乳饮料的口感与风味,探究不同菌种及不同接种量等因素对米乳饮料品质的影响。

© The Author(s) 2025. 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] TANG Y, CAI W, XU B. From rice bag to table: Fate of phenolic chemical compositions and antioxidant activities in waxy and non-waxy black rice during home cooking[J]. *Food Chemistry*, 2016, 191: 81–90.
- [2] SOMPONG R, SIEBENHANDL-EHN S, LINSBERGER-MARTIN G, et al. Physicochemical and antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Sri Lanka[J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(1): 132–140.
- [3] FEDERICA C, ANDREA O, VESNA M, et al. Innovative fermented beverages made with red rice, barley, and buckwheat[J]. *Foods*, 2021, 10(3): 613.
- [4] 乐梨庆, 欧阳建勇, 公续霄, 等. 藜麦饮料加工工艺与稳定性研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(2): 79–86. [LE L Q, OUYANG J Y, GONG X X, et al. Research on the processing and stability of quinoa beverage[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(2): 79–86.]
- [5] ARYA S S S N K. High fiber, low glycaemic index (GI) prebiotic multigrain functional beverage from barnyard, foxtail and ko-

do millet[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2021, 135(1): 109–991.

- [6] 赵慧, 薛冰莹, 贾才华, 等. 复合菌发酵米乳饮料的配方优化及其储藏品质变化[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(6): 223–229. [ZHAO H, XUE B Y, JIA C H, et al. Formulation optimisation of fermented rice milk drink with complex bacteria and its storage quality changes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(6): 223–229.]
- [7] 王晓雯, 王灵娟, 王哲, 等. 发酵对蛋白质组成、结构与功能特性及风味影响的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 24(7): 1–8. [WANG X W, WANG L J, WANG Z, et al. Progress in the study of the effect of fermentation on protein composition, structural and functional properties and flavour[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2023, 24(7): 1–8.]
- [8] 刘妍. 乳酸菌发酵藜麦乳饮料的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019. [LIU Y. Study on quinoa-milk fermentation beverage by lactic acid bacteria[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019.]
- [9] 彦繁鹤, 周金梅, 吴如春. DNS 法测定甘蔗渣中还原糖含量[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(2): 126–128. [YAN F H, ZHOU J M, WU R C. Determination of reducing sugars in bagasse by DNS method[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(2): 126–128.]
- [10] 刘静, 牛秀梅, 王美美, 等. 体外模拟消化对紫薯桑葚复合口服液抗氧化成分及其活性影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(4): 8–14. [LIU J, NIU X M, WANG M M, et al. Effects of *in vitro* simulated digestion on antioxidant components and their activities of purple potato mulberry composite oral liquid[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(4): 8–14.]
- [11] CHEN Q, CHEN X, LI S, et al. Preparation, characterization, and *in vitro* antioxidant activities of natural selenium-enriched peanut protein fractions[J]. *Food Bioscience*, 2022(49): 101923.
- [12] TONG X, CAO J, TIAN T, et al. Changes in structure, rheological properties and antioxidant activity of soy protein isolate fibrils by ultrasound pretreatment and EGCG[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021(7): 107084.
- [13] FANG L W. A comprehensive analysis of aroma compounds and microstructure changes in brown rice during roasting process[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2018, 98: 613–621.
- [14] CHAI C, JU H K, KIM S C, et al. Determination of bioactive compounds in fermented soybean products using GC/MS and further investigation of correlation of their bioactivities[J]. *Journal of Chromatography B Analytical Technologies in the Biomedical & Life Sciences*, 2012, 880: 42–49.
- [15] PETROVA P, PETROV K. Lactic acid fermentation of cereals and *Pseudocereals*: Ancient nutritional biotechnologies with modern applications[J]. *Nutrients*, 2020, 12(4): 11–18.
- [16] YANG Z J, ZHU X L, WEN A Y, et al. Development of probiotics beverage using cereal enzymatic hydrolysate fermented with *Limosilactobacillus reuteri*[J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10(9): 3143–3153.
- [17] AYUB M, CASTRO-ALBA V, LAZARTE C E. Development of an instant-mix probiotic beverage based on fermented quinoa with reduced phytate content[J]. *Journal of Functional Foods*, 2021, 87: 104–831.
- [18] 陶金亚. 植物源蛋白益生菌发酵饮料开发取得进展[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(7): 397. [TAO J Y. Progress in the development of probiotic fermented beverages with plant-derived pro-

- teins[J]. Chinese Journal of Food, 2021, 21(7): 397.]
- [19] LI X Y, HE Y T, XIE Y M, et al. Effects of fermentation with Kefir grains on nutrient composition, flavor volatiles, and product physical stability of a hemp seed (*Cannabis sativa* L.) beverage[J]. LWT, 2023, 181: 114934.
- [20] MENDES S G C, CHAVES E A R, CARRIJO M P P, et al. New plant-based fermented beverage made of baru nut enriched with probiotics and green banana: Composition, physicochemical and sensory properties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(10): 2607–2618.
- [21] MAITE D F, ÁNGEL I, ANGELINA V, et al. Influence of culinary process on free and bound (poly) phenolic compounds and antioxidant capacity of artichokes[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2021(publish): 100389.
- [22] HUANG K, LIU Y, ZHANG Y, et al. Formulation of plant-based yoghurt from soybean and quinoa and evaluation of physicochemical, rheological, sensory and functional properties[J]. Food Bioscience, 2022, 40(10): 18–31.
- [23] 金子灿. 发芽富硒糙小米及其乳酸菌发酵饮料的风味及抗氧化研究[D]. 锦州:渤海大学, 2021. [JIN Z C. Flavour and antioxidant study of sprouted selenium-enriched brown millet and its lactobacillus fermented beverage[D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.]
- [24] 熊忠飞, 李惠, 付岩吉, 等. 响应面法优化“黄元帅”苹果浓缩汁防褐变工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(12): 143–151. [XIONG Z F, LI H, FU Y J, et al. Optimisation of anti-browning process of "Yellow Marshal" apple juice concentrate by response surface method[J]. China Food Additives, 2019, 30(12): 143–151.]
- [25] JUÁREZTRUJILLO N, GONZÁLEZAVILA C, BERIS-TAINGUEVARA I C, et al. Nutritional, physicochemical and antioxidant properties of sprouted and fermented beverages made from *Phalaris canariensis* seed[J]. International Journal of Food Science Technology, 2023, 58(10): 5299–5310.
- [26] 陈妍婕. 乳酸杆菌在全谷物糙米乳中发酵特性的研究[D]. 锦州:渤海大学, 2016. [CHEN Y J. Study on the fermentation characteristics of *Lactobacillus casei* in whole grain brown rice milk[D]. Jinzhou: Bohai University, 2016.]
- [27] 张乐, 魏依馨, 史冠莹, 等. 基于 GC-IMS 和 GC-MS 技术结合化学计量法分析干燥方式对香椿挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 1–13. [ZHANG L, WEI Y X, SHI G Y, et al. Effect of drying method on volatile components of *Toona sinensis* based on GC-IMS and GC-MS techniques combined with chemometrics[J]. Food Industry Science and Technology, 2024, 45(11): 1–13.]
- [28] XIONG Y, ZHANG P Z, DOROTHY R W, et al. Cereal grain-based functional beverages: from cereal grain bioactive phytochemicals to beverage processing technologies, health benefits and product features[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 62(9): 21–25.
- [29] BAI S, WANG Y, LUO R, et al. Formation of flavor volatile compounds at different processing stages of household stir-frying mutton sao zi in the northwest of China[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 139(5): 110735.
- [30] MARGHERITA D, DAVIDE G, CAROLA P, et al. Development and characterization of fermented soy beverages containing encapsulated or non-encapsulated vaginal probiotics[J]. LWT, 2023, 180: 114–173.