汤晓彬, 何秀娟, 罗芳, 等. 酶解和乳酸菌发酵对板栗乳品质及挥发性风味物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 116−124. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060222
TANG Xiaobin, HE Xiujuan, LUO Fang, et al. Effects of Enzymatic Hydrolysis and Lactic Acid Bacteria Fermentation on the Quality and Volatile Flavor Compounds of Chestnut Milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 116−124. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060222

· 研究与探讨 ·

酶解和乳酸菌发酵对板栗乳品质及挥发性风味物质的影响

汤晓彬[1,2,3], 何秀娟[1,+], 罗　芳[2,3], 隋　勇[2], 施建斌[2], 熊　添[2], 梅　新[2,*], 邱文明[1,*]
（1.湖北省农业科学院果树茶叶研究所, 果树种质创新与利用湖北省重点实验室, 湖北武汉 430064;
2.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;
3.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 430048）

摘　要: 本文探究了 α-淀粉酶酶解、乳酸菌发酵及酶解发酵联合处理对板栗乳营养品质、抗氧化活性、总酚及总黄酮的生物可及性以及挥发性风味物质含量的影响，结果表明：相比于对照，发酵、酶解发酵处理均可显著提高板栗乳中总酚、总黄酮含量（$P<0.05$）；酶解发酵处理板栗乳抗氧化活性最高，其羟自由基、$ABTS^{+}$自由基和 DPPH 自由基清除率分别提高了 15.80%、14.84% 和 29.29%；酶解发酵处理的板栗乳在胃、肠阶段总酚的生物可及性分别提升了 45.81%、78.95%，总黄酮的生物可及性分别提升了 59.43%、91.17%。酶解发酵处理对板栗乳挥发性风味物质含量及种类影响最大，结合了酶解和发酵的优势，共检测出 34 种挥发性风味物质，主要有 2,3-丁二酮、1,2-丁二醇、乙醛等，呈现奶油果香。综上，酶解发酵联合处理可有效改善板栗乳的营养成分与风味特性，提升其营养价值及抗氧化活性。

关键词: 板栗乳, 酶解, 乳酸菌发酵, 品质, 挥发性风味
中图分类号: TS255.6　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0116−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060222
本文网刊:

Effects of Enzymatic Hydrolysis and Lactic Acid Bacteria Fermentation on the Quality and Volatile Flavor Compounds of Chestnut Milk

TANG Xiaobin[1,2,3], HE Xiujuan[1,+], LUO Fang[2,3], SUI Yong[2], SHI Jianbin[2], XIONG Tian[2], MEI Xin[2,*], QIU Wenming[1,*]
（1.Hubei Key Laboratory of Germplasm Innovation and Utilization of Fruit Trees, Institute of Fruit and Tea, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;
2.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;
3.School of Modern Industry for Selenium Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, National R & D Center for Se-rich Agricultural Products Processing, Hubei Engineering Research Center for Deep Processing of Green Se-rich Agricultural Products, Wuhan 430048, China）

收稿日期: 2025−06−19　　+并列第一作者
基金项目: 2023 年度中央财政林业科技推广示范项目（鄂 [2023]TG 23 号）; 湖北省农业科技创新中心创新团队项目（2025-620-000-001-019）。
作者简介: 汤晓彬（2003−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食加工, E-mail: TXB37771@163.com。
何秀娟（1982−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 板栗品种选育, E-mail: xiujuanhe2009@163.com。
*** 通信作者:** 梅新（1978−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 粮食加工及副产物加工利用, E-mail: meixin0898@163.com。
邱文明（1984−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 果树遗传育种, E-mail: qiuwm1984@sina.com。

Abstract: This study investigated the effects of α-amylase enzymatic hydrolysis, lactic acid bacteria fermentation, and combined enzymatic-fermentation treatments on the nutritional quality, antioxidant activity, bioaccessibility of total phenolics and flavonoids, and volatile flavor compounds of chestnut milk. The results demonstrated that both fermentation and enzymatic-fermentation treatments significantly increased the content of total phenolics and flavonoids in chestnut milk (P<0.05) compared to the control. Enzymatic-fermentation treatment exhibited the highest antioxidant activity, with significant improvements in hydroxyl radical, $ABTS^+$ radical, and DPPH radical scavenging capacities by 15.80%, 14.84% and 29.29%, respectively. Additionally, enzymatic-fermentation significantly enhanced the bioaccessibility of total phenolics and flavonoids in both gastric and intestinal stages, with increases of 45.81% and 78.95% for phenolics, and 59.43% and 91.17% for flavonoids, respectively. The enzymatic-fermentation treatment also had the most profound effect on the volatile flavor compounds in chestnut milk. This combined approach resulted in the detection of 34 different aroma compounds, primarily including 2,3-butanedione, 1,2-butanediol and acetaldehyde, contributing to a creamy and fruity aroma profile. In conclusion, the combination of enzymatic hydrolysis and fermentation effectively improved the nutritional components and flavor characteristics of chestnut milk, enhancing its nutritional value and antioxidant capacity.

Key words: chestnut milk; enzymatic hydrolysis; lactic acid bacteria fermentation; quality; volatile flavor

板栗（*Castanea mollissima*）是壳斗科栗属坚果类植物。作为中国古代五大名果之一，板栗中含有丰富的营养物质，可供人体吸收利用的营养组分高达98%[1]。中医认为板栗有养胃健脾、补肾强筋、活血止血之功效，并有益于高血压、冠心病的防治。在临床上，板栗还可用于治疗反胃、腰腿软弱、吐血、金疮等症[2−3]。目前，板栗加工食用方式主要是烹饪和糖炒，市售产品多为糖炒板栗和板栗饼，商业化的板栗饮品及相关产品较为缺乏[4]。

发酵植物乳饮料具有营养丰富、口感独特等特点，深受消费者喜爱。乳酸菌已广泛应用于食品发酵，在发酵过程中，产生的乳酸降低了食品体系的pH，一定程度上抑制了病原微生物生长，延长产品的保质期[5]。此外，乳酸菌发酵还可赋予产品独特的风味，改善产品质地，提高产品营养价值和功能特性[6]，乳酸菌发酵乳制品具有缓解乳糖不耐症、降低血清胆固醇、预防胃肠道感染、抗癌等作用；乳酸菌发酵富含淀粉类原料还可产生维生素 B 族、K 族、赖氨酸、叶酸和微量营养素，提高食品的营养价值[7]。淀粉约占板栗仁干物质的 38%~80%，在以板栗仁为原料制作饮料过程中，易出现分层和沉淀等问题[8]，α-淀粉酶可将板栗浆中的淀粉分解为糊精和葡萄糖等小分子物质，提升饮料稳定性，且淀粉酶解产物可作为乳酸菌发酵碳源。顾海华等[9] 以板栗淀粉酶解物和牛乳为原料，利用乳酸菌发酵，制备了一款板栗淀粉酶解物发酵饮料，汪睿等[10] 以集安板栗为主要原料，通过正交试验确定集安板栗乳的最佳配方。现有关于板栗饮品的研究主要聚焦于板栗乳的制作配方和工艺优化，然而对于乳酸菌发酵和酶解工艺在板栗乳品质及风味方面的研究仍显不足。因此，深入探究酶解工艺与乳酸菌发酵对板栗乳品质和挥发性风味的影响，具有重要意义。

基于此，本研究以板栗为主要原料，纯牛奶、白砂糖为辅料，分别采用 α-淀粉酶酶解、添加直投式乳酸菌发酵剂发酵及酶解-发酵联合处理方式制备不同的板栗乳，比较分析不同板栗乳理化指标、营养成分含量、抗氧化活性和挥发性风味物质含量的差异，并建立体外消化模型，探究板栗乳中总酚、黄酮在胃肠消化阶段的生物可及性，为开发营养板栗乳提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

板栗、纯牛奶、白砂糖　市购；直投式酸奶发酵菌　北京川秀科技有限公司；海藻酸钠、瓜尔豆胶　潍坊英轩实业有限公司；中温 α-淀粉酶（酶活：15 万 U/mL）　沧州夏盛酶生物技术有限公司；2,2'-联氮-双（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼、胃蛋白酶（酶活：250 U/mg）　美国 Sigma 公司；羟自由基清除能力检测试剂盒、胰酶（酶活：4000 U/mg）、猪胆盐　上海源叶生物科技有限公司；其他试剂均为国产分析纯。

CF-100A 发酵箱　中山卡士电器有限公司；ATC 手持式糖度计　济宁国龙物资有限公司；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；722N 可见分光光度计　上海仪电仪器有限公司；7890A/5975C 气相色谱质谱联用仪　安捷伦科技有限公司；S210 pH 计　梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　板栗乳制作工艺　对照板栗乳：参考王尚玉等[11] 的方法并加以修改，板栗去壳清洗后于蒸锅中蒸 25 min，后按料液比 1∶8 g/mL 与蒸馏水混合打浆，浆液过 200 目筛。取 70 g 过筛板栗浆液与 30 g 牛奶、2 g 蔗糖混合，充分混匀后，加入 0.2 g 海藻酸钠、0.2 g 瓜尔豆胶，混合液于 13000 r/min 下均质 5 min 后于 65 ℃ 下巴氏灭菌 30 min，得板栗乳。

酶解板栗乳：参照对照板栗乳制作步骤制作过筛板栗浆，取 70 g 板栗浆，加入 0.2 g α-淀粉酶充分混匀后于 65 ℃ 下酶解 30 min 后 100 ℃ 灭酶 10 min，

酶解板栗浆再参照对照板栗乳制作配方工艺添加辅料，均质得酶解板栗乳。

发酵板栗乳：参照对照板栗乳制作步骤制作过筛板栗浆，取 70 g 板栗浆，接种 0.2 g 直投式酸奶发酵菌，于 43 ℃ 下发酵 20 h 后 65 ℃ 下灭菌 30 min，发酵板栗浆再参照对照板栗乳制作配方工艺，添加辅料，均质得发酵板栗乳。

酶解发酵板栗乳：参照对照板栗乳制作步骤制作过筛板栗浆，参照上述方法，先后经酶解、发酵等步骤处理后，再参照对照板栗乳制作配方工艺，添加辅料，均质得酶解发酵板栗乳。

1.2.2 理化指标测定 板栗乳可溶性固形物含量采用手持糖度计测定；酸度参照 GB 5009.239-2016 中相关方法测定；pH 采用 pH 计测定；稳定性参照万景瑞等[12] 的方法测定：取一定质量板栗乳 w，装入 50 mL 的离心管，以转速 4000 r/min，离心 10 min，弃去上层清液，测定剩余质量 w_0，计算公式如下：

$$稳定性(\%)=\left(1-\frac{w_0}{w}\right)\times 100$$

式中：w_0，剩余固形物的质量，g；w，所取板栗浆液的总质量，g。

1.2.3 营养品质的测定 板栗乳蛋白质含量参照 GB 5009.5-2016 中相关方法测定；还原糖含量测定采用 DNS 法[13]，以葡萄糖为标品制作标准曲线，y=1.471x+0.0872（R^2=0.9919）；板栗乳总酚、总黄酮含量测定：参照 Trigueros 等[14] 的方法稍作修改，取 10.00 g 板栗乳，与 15 mL 含有 50 μL 浓盐酸的酸化甲醇混合，充分混匀后于 8000 r/min，离心 10 min，于 −20 ℃ 下静置过夜，再于 5000 r/min 下离心 10 min，取上清液 4 ℃ 冷藏备用，用于测定总酚、总黄酮含量。总酚含量测定参照刘静等[15] 方法，以没食子酸为标品制作标准曲线，y=8.8231x+0.0283（R^2=0.9919）；总黄酮含量测定采用 $NaNO_2$-$Al(NO_3)_3$ 比色法[16]，以芦丁为标品制作标准曲线，y=1.204x+0.0013（R^2=0.9992）。

1.2.4 抗氧化活性的测定 取 1.2.3 中上清液测定板栗乳抗氧化活性。

1.2.4.1 DPPH 自由基清除能力的测定 参照 Li 等[17] 的方法，将 2 mL 样品溶液和 2 mL DPPH 溶液（0.2 mmol/mL 95% 乙醇）涡旋混匀，在黑暗中静置 30 min 后于 517 nm 处测定吸光度，按公式计算 DPPH 自由基清除率：

$$DPPH\ 自由基清除率(\%)=\left(1-\frac{A_2-A_1}{A_0}\right)\times 100$$

式中：A_0 为空白样品的吸光度，A_2 为样品的吸光度，A_1 为空白试剂的吸光度。

1.2.4.2 $ABTS^+$自由基清除能力的测定 参照 Zhao 等[18] 的方法，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计算：

$$ABTS^+自由基清除率(\%)=\frac{A_0-(A_2-A_1)}{A_0}\times 100$$

式中：A_0 为加入 2 mL ABTS 溶液与 0.15 mL 蒸馏水；A_2 为 2 mL ABTS 溶液与 0.15 mL 样品溶液；A_1 为 0.15 mL 样品溶液与 2 mL 蒸馏水。

1.2.4.3 羟自由基清除能力 按试剂盒说明书测定，将样品与试剂涡旋混匀，置于 37 ℃ 水浴 60 min 后常温离心（10000 r/min）10 min，取各上清分别测定 536 nm 处的吸光度。羟自由基清除率计算公式如下：

$$羟自由基清除率(\%)=\frac{A_{测定}-A_{对照}}{A_{空白}-A_{对照}}\times 100$$

式中：$A_{测定}$、$A_{对照}$与 $A_{空白}$分别代表测定管、对照管与空白管的吸光度值。

1.2.5 体外模拟消化 参照 Janhavi 等[19] 方法对板栗乳进行体外模拟消化，消化结束后，分别收集胃、肠阶段消化产物，离心，取上清液用于测定胃、肠消化阶段总酚、总黄酮含量，并按如下公式计算总酚、总黄酮生物可及性。

$$B=\frac{d}{c}\times 100$$

式中：B 表示生物可及性，%；d 表示消化后总酚或总黄酮含量，mg/g；c 表示消化前总酚或总黄酮含量，mg/g。

1.2.6 挥发性风味物质的测定

1.2.6.1 电子鼻的测定 参照周元等[20] 的方法并略加修改。取 10 mL 板栗乳置于样品瓶中，于 40 ℃ 下孵育 20 min 后采用电子鼻分析检测。检测程序：准备 5 s，清洗 120 s，检测 120 s。电子鼻传感器的性能参数如表 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 array and its performance

序号	传感器	传感器相应特征
1	W1C	芳香成分苯类
2	W5S	氮氧化合物灵敏
3	W3C	氨类，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	甲基类灵敏
7	W1W	无机硫化物灵敏
8	W2S	醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	芳香成分、有机硫化物灵敏
10	W3S	长链烷烃灵敏

1.2.6.2 GC-MS 测定 参照陈臣等[21] 的方法并稍作修改。样品前处理：称取 5 g 发酵乳样品置于 20 mL 顶空瓶中，用聚四氟乙烯硅胶隔垫封口后，300 r/min、60 ℃ 条件下平衡 10 min。萃取头老化（270 ℃，5 min）后插入气相瓶萃取发酵乳，于 65 ℃

条件下萃取 30 min，在 270 ℃ 下解吸附 5 min。GC 条件：初始柱温 40 ℃，恒温 4 min 后以 3 ℃/min 升至 100 ℃，恒温 2 min，再以 4 ℃/min 升至 150 ℃ 恒温 2 min，最后以 10 ℃/min 升至 220 ℃；载气为 He，流速 1.0 mL/min，汽化室温度 250 ℃，不分流。MS 参数：电子电离源（70 eV），电压 350 V，扫描范围 50~450 m/z；传输线、离子源和四极杆温度分别为 280、230 和 150 ℃。筛选匹配度（Qual）≥70 的化合物，通过与 NIST 08 谱库对物质进行定性，采用峰面积归一化法计算挥发性风味物质的相对含量。

1.3　数据处理

所有实验均重复三次，实验结果以平均值±标准差（Mean±SD）表示，SPSS 19.0 进行数据分析，$P<0.05$ 水平上进行差异显著分析，Origin 2019 绘图。

2　结果与分析

2.1　酶解和乳酸菌发酵对板栗乳理化特性的影响

如表 2 所示，不同板栗乳可溶性固形物含量无显著差异，相比于对照，发酵及酶解发酵处理可显著降低板栗乳 pH，提高其酸度（$P<0.05$），酶解对板栗乳 pH 和酸度无显著影响。发酵、酶解发酵板栗乳 pH、酸度无显著差异。乳酸菌发酵过程中，产生淀粉酶和脂肪酶酶解板栗乳中碳水化合物和脂肪生成有机酸、脂肪酸等物质，导致体系 pH 降低，酸度升高[22]。此外，相比于对照板栗乳，酶解、发酵及酶解发酵处理均对板栗乳稳定性有显著影响（$P<0.05$），对照、酶解、发酵、酶解发酵板栗乳稳定性分别为 83.78%、85.54%、64.64%、69.22%，由此可见，单纯酶解提升了板栗乳稳定性，发酵及酶解发酵处理降低了板栗乳稳定性。板栗浆含有大量淀粉，酶解降低淀粉分子尺寸，使其结构松散，暴露出羧基、羟基等亲水基团，提高其水合能力[23]，提升板栗乳稳定性，而发酵后的酸性环境导致乳液中蛋白质疏水性基团暴露，蛋白质分子间相互作用形成聚集体，降低了板栗乳稳定性[24]。

2.2　酶解和乳酸菌发酵对板栗乳营养品质的影响

如表 3 所示，相比于对照，酶解、发酵、酶解发酵处理均显著降低了板栗乳中蛋白质含量（$P<0.05$），其中酶解发酵板栗乳蛋白质含量下降幅度最大，达 12.77%；酶解及酶解发酵处理可显著提升板栗乳中还原糖含量（$P<0.05$），发酵处理显著降低板栗乳中还原糖含量（$P<0.05$），酶解处理后板栗乳中还原糖含量上升幅度最大，达 177.06%。乳酸菌以板栗乳中还原糖为碳源[25]，故发酵处理降低了板栗乳中还原糖含量，酶解处理提升了板栗乳中还原糖含量，促进了乳酸菌增殖，而乳酸菌具有一定蛋白酶活性，可降蛋白质分解为小分子肽、游离氨基酸等[26]，由此，酶解发酵处理板栗乳蛋白质含量最低。相比于对照，酶解板栗乳总酚略有下降，王宁雅等[27] 研究发现黑米饮料酶解处理后总酚含量下降，与本文结果一致；发酵和酶解发酵处理板栗乳的总酚含量分别提升了 50.00% 和 35.00%，总黄酮含量分别提高了 9.09% 和 18.18%，可能是乳酸菌发酵产生了 β-葡萄糖苷酶、酚酸脱羧酶，这些酶可将结合态黄酮和多酚分解为游离型[28]。

2.3　酶解和乳酸菌发酵对板栗乳抗氧化活性的影响

如图 1 所示，相比对照，酶解、发酵、酶解发酵处理均可提升板栗乳抗氧化活性，酶解发酵板栗乳抗氧化活性最强，其羟自由基、$ABTS^+$自由基和 DPPH 自由基清除率分别达 83.63%、50.15%、62.95%，均显著高于对照（$P<0.05$）。酶解处理在降低淀粉分子尺寸同时，暴露出被淀粉颗粒包裹的具有抗氧化活性的基团，如酚羟基、羧基等，提升了板栗乳抗氧化活性[29]，陈东方[30] 的研究也表明，酶解处理可提升燕麦粉抗氧化活性；而乳酸菌发酵过程中，可转化利用底物中蛋白质，将其分解为具有抗氧化活性小分子肽和氨基酸，也可代谢产生抗氧化肽、活性苷元等具有抗氧化活性化合物[31]。

表 2　酶解和乳酸菌发酵对板栗乳理化特性的影响

Table 2　Effects of enzymatic hydrolysis and lacticacid bacteria fermentation on the physicochemical properties of chestnut milk

样品名称	可溶性固形物（°Brix）	pH	酸度（°T）	稳定性（%）
对照板栗乳	9.06±0.23^a	6.75±0.11^a	8.22±0.61^b	83.78±0.73^b
酶解板栗乳	9.13±0.25^a	6.83±0.02^a	9.38±0.46^b	85.54±0.19^a
发酵板栗乳	8.83±0.15^a	3.78±0.10^b	53.71±0.54^a	64.64±0.55^d
酶解发酵板栗乳	8.80±0.26^a	3.85±0.02^b	54.14±1.16^a	69.22±2.07^c

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$），表3同。

表 3　酶解和乳酸菌发酵对板栗乳的营养品质的影响

Table 3　Effects of enzymatic hydrolysis and lactic acid bacteria fermentation on nutritional quality of chestnut milk

样品名称	蛋白质（g/100 mL）	还原糖（μg/mL）	总酚（mg/mL）	总黄酮（mg/mL）
对照板栗乳	11.51±0.16^a	9.59±0.08^e	0.20±0.03^c	0.22±0.02^{bc}
酶解板栗乳	11.18±0.21^b	26.57±0.52^a	0.19±0.01^c	0.21±0.01^c
发酵板栗乳	10.75±0.02^c	7.00±0.08^d	0.30±0.02^a	0.24±0.01^b
酶解发酵板栗乳	10.04±0.16^d	23.89±0.41^b	0.27±0.01^b	0.26±0.01^a

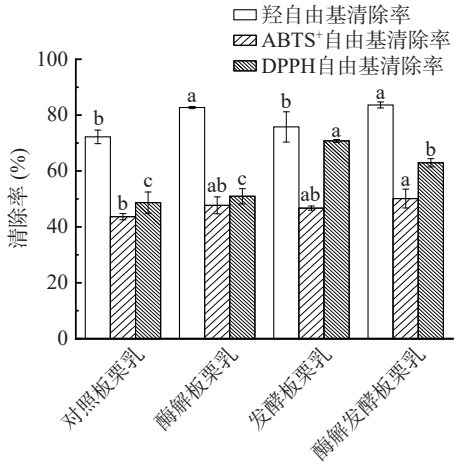


图 1 酶解和乳酸菌发酵对板栗乳抗氧化活性的影响

Fig.1 Effects of enzymatic hydrolysis and lactic acid bacteria fermentation on the antioxidant capacity of chestnut milk

注: 不同字母表示样品间差异显著(P<0.05), 图 2 同。

2.4 酶解和乳酸菌发酵对板栗乳总酚、总黄酮生物可及性的影响

不同板栗乳在体外模拟消化阶段总酚、总黄酮的生物可及性如图 2 所示。相同处理下, 总酚、总黄酮在胃阶段生物可及性明显高于肠阶段, 可能是因为酚类物质在胃阶段酸性条件下稳定性明显高于肠阶段中性或弱碱性条件[32]; 而总黄酮在肠道环境条件下, 不仅易发生结构修饰, 还可与胆汁盐相互作用, 导致其生物可及性降低[33]。相比于对照板栗乳, 酶解处理对板栗乳中总酚、总黄酮在胃、肠阶段生物可及性影响较小; 发酵显著提升了板栗乳中总酚、总黄酮在胃、肠阶段生物可及性。可能是微生物代谢产生的

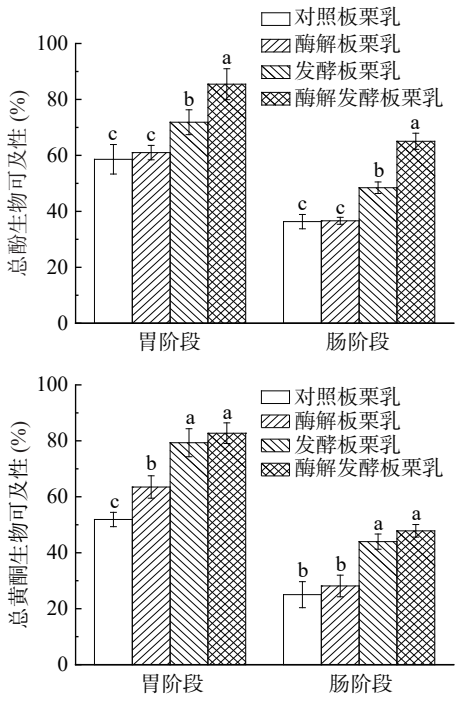


图 2 不同板栗乳体外消化总酚、总黄酮生物可及性

Fig.2 Bioaccessibility of total phenolics and flavonoids in different chestnut milks during *in vitro* digestion

有机酸、酶促进游离的总酚和总黄酮的释放, 增加其与肠道吸收位点的接触机会, 且发酵的酸性环境可抑制酚类和黄酮类的氧化聚合, 维持其结构稳定性, 减少活性损失[34]。其中, 酶解发酵板栗乳中总酚、总黄酮在胃、肠阶段生物可及性均最高, 相较于对照板栗乳, 总酚在胃、肠阶段生物可及性分别提升了 45.81%、78.95%, 黄酮在胃、肠阶段生物可及性分别提升了 59.43%、91.17%。

2.5 酶解和乳酸菌发酵对板栗乳挥发性风味物质的影响

2.5.1 电子鼻分析 不同板栗乳的电子鼻雷达图如图 3 所示, 从图中可以看出, 对照、酶解、发酵、酶解发酵处理板栗乳的风味轮廓间存在明显差异。在 10 个传感器中, W1S、W2S、W5S、W1W、W2W 等传感器响应显著, 表明电子鼻传感器对板栗乳中甲基类、醇类、醛酮类、氮氧化合物、芳香族及硫化物这些挥发性成分具有较高的灵敏度。从不同处理板栗乳在 W5S、W1W 和 W2W 传感器上响应值变化可以看出, 酶解发酵板栗乳响应值最高, 乳酸菌发酵后板栗乳中硫化物、芳香成分、氮氧化合物增加, 而板栗乳经酶解处理后, 作为底物促进了乳酸菌增殖, 产生了更丰富的风味物质。

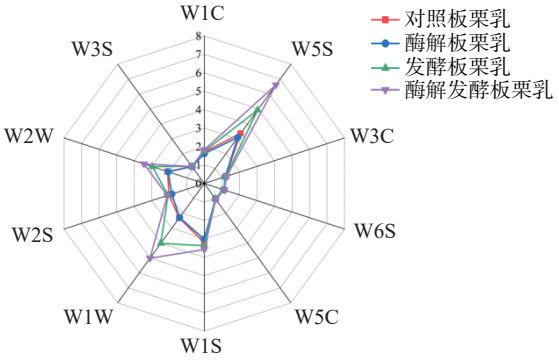


图 3 不同板栗乳电子鼻雷达图

Fig.3 Electronic nose radargrams of different chestnut milk

2.5.2 电子鼻正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA) 以电子鼻的 10 个传感器为 x 变量, 不同处理的板栗乳为 y 变量, 建立 OPLS-DA 模型, 结果显示 R^2x=0.949, R^2y=0.802, Q^2=0.526, 当 R^2 和 Q^2 超过 0.5 表示拟合结果可接受[35]。根据 OPLS-DA 判别模型可知(图 4), 发酵板栗乳与酶解发酵板栗乳在置信区间内分界明显, 酶解板栗乳和对照板栗乳在置信区间内分界不明显, 与电子鼻结果相符。

2.5.3 GC-MS 表 4 结果表明, 不同处理板栗乳中共检测出 53 种挥发性风味物质, 乳酸菌发酵处理提高了板栗乳中挥发性风味物质数量, 对照、酶解、发酵、酶解发酵板栗乳中检出挥发性风味物质分别为 24 种、23 种、33 种、34 种。发酵、酶解发酵板栗乳风味物质显著提升与乳酸菌的代谢密切相关, 有研究表明, 乳酸菌发酵在利用碳水化合物合成有机酸同

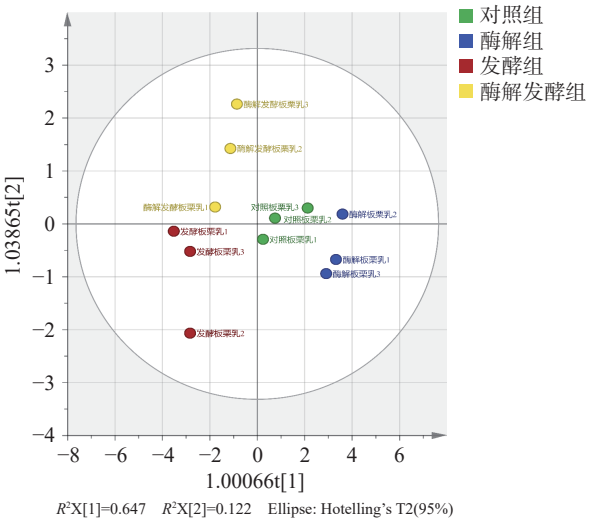


图 4　不同板栗乳电子鼻 OPLS-DA 结果

Fig.4　Electronic nose OPLS-DA result of different chestnut milk

时，还可利用蛋白质、氨基酸，产生酸类、酮类、醛类、醇类等风味物质[36]。四种板栗乳具有丰富的支链酮醇类，对应电子鼻结果中高灵敏度 W1S、W2S 信号。

对照板栗乳中以乙醇、丙酮、2-庚酮（青草/奶酪味）为主要挥发性风味物质，与对照板栗乳相比，酶解板栗乳挥发性物质无显著变化，虽释放果香前体（如己醛）但风味单薄；发酵板栗乳中酸类、醛类、酮类物质显著增加，乙醇含量下降。其中，乙酸、己酸是发酵板栗乳中主要酸类物质，相对含量分别是 3.16%、3.00%，主要来源于乳糖和氨基酸的降解、脂肪分解以及参与发酵过程的细菌的代谢[37−38]。醛类物质中乙醛贡献值远高于对照板栗乳，相对含量由 0.02% 增至 3.81%，其作为发酵乳中重要的抑臭活性化合物之一，主要由苏氨酸分解产生，赋予板栗乳清新果香[39]。2,3-丁二酮和 3-羟基-2-丁酮的相对含量分别是

表 4　不同板栗乳的挥发性成分

Table 4　Volatile flavor compounds of different chestnut milk

种类	CAS	挥发性物质	分子式	相对含量(%)			
				对照板栗乳	酶解板栗乳	发酵板栗乳	酶解发酵板栗乳
醇类	71-36-3	正丁醇	$C_4H_{10}O$	–	–	0.26	0.08
	3391-86-4	1-辛烯-3-醇	$C_8H_{16}O$	–	–	0.17	–
	104-76-7	2-乙基-1-己醇	$C_8H_{18}O$	0.47	–	0.13	0.09
	584-03-2	1,2-丁二醇	$C_4H_{10}O_2$	–	–	–	3.65
	111-27-3	1-己醇	$C_6H_{14}O$	–	–	1.22	0.28
	111-27-3	正己醇	$C_6H_{14}O$	–	–	0.17	0.25
	71-41-0	1-戊醇	$C_5H_{12}O$	–	0.11	0.26	0.23
	565-67-3	2-甲基-3-戊醇	$C_6H_{14}O$	0.03	0.05	1.42	2.46
	64-17-5	乙醇	C_2H_6O	9.49	8.59	3.34	3.16
	597-49-9	3-乙基-3-戊醇	$C_7H_{16}O$	0.06	0.06	–	0.05
	2919-23-5	环丁醇	C_4H_8O	0.54	0.41	–	0.05
	67-63-0	异丙醇	C_3H_8O	–	–	–	1.35
酸类	64-19-7	乙酸	$C_2H_4O_2$	–	–	3.16	3.24
	142-62-1	己酸	$C_6H_{12}O_2$	–	–	3.00	1.28
	107-92-6	丁酸	$C_4H_8O_2$	–	–	0.86	0.59
	503-74-2	3-甲基丁酸	$C_5H_{10}O_2$	–	–	0.36	0.38
	591-81-1	4-羟基丁酸	$C_4H_8O_3$	0.38	–	–	0.04
酮类	513-86-0	3-羟基-2-丁酮	$C_4H_8O_2$	–	–	3.55	5.45
	600-14-6	2,3-戊二酮	$C_5H_8O_2$	–	–	0.11	1.87
	431-03-8	2,3-丁二酮	$C_4H_6O_2$	–	–	8.32	5.84
	67-64-1	丙酮	C_3H_6O	0.62	3.22	0.41	0.98
	4984-85-4	3-羟基-4-己酮	$C_6H_{12}O_2$	–	–	–	2.90
	78-93-3	2-丁酮	C_4H_8O	0.24	0.08	0.11	0.11
	107-87-9	2-戊酮	$C_5H_{10}O$	0.49	0.70	0.11	1.87
	110-43-0	2-庚酮	$C_7H_{14}O$	1.27	2.30	1.13	1.23
	821-55-6	2-壬酮	$C_9H_{18}O$	–	0.11	2.29	0.10
	112-12-9	2-十一酮	$C_{11}H_{22}O$	–	–	0.23	–
	589-38-8	3-己酮	$C_6H_{12}O$	–	–	1.09	1.52
	98-86-2	苯乙酮	C_8H_8O	0.11	0.10	–	–
胺类	75-31-0	异丙胺	C_3H_9N	1.48	0.78	1.74	0.13
	79-05-0	丙酰胺	C_3H_7NO	0.02	0.20	–	–
	75-31-0	2-丙胺	C_3H_9N	0.23	–	–	–
	78-90-0	1,2-丙二胺	$C_3H_{10}N_2$	0.01	0.51	–	–
	107-91-5	氰乙酰胺	$C_3H_4N_2O$	–	1.67	1.67	0.25

续表 4

种类	CAS	挥发性物质	分子式	相对含量(%)			
				对照板栗乳	酶解板栗乳	发酵板栗乳	酶解发酵板栗乳
酯类	108-05-4	乙酸乙烯酯	$C_4H_6O_2$	0.05	–	0.21	1.11
	145747-16-6	甲氧基乙酸己酯	$C_9H_{18}O_3$	–	–	–	0.07
	108-64-5	3-甲基丁酸乙酯	$C_7H_{14}O_2$	0.05	–	–	–
	2524-52-9	2-吡啶甲酸乙酯	$C_8H_9NO_2$	0.05	0.13	–	–
	1000305-90-0	异丙氧基氨基甲酸乙酯	$C_6H_{13}NO_3$	2.59	2.84	1.27	
	591-81-1	4-羟基丁酸乙酰酯	$C_4H_8O_3$	0.38	–	–	–
醛类	66-25-1	己醛	$C_6H_{12}O$	–	0.25	2.91	–
	110-62-3	戊醛	$C_5H_{10}O$	1.31	–	–	–
	75-07-0	乙醛	C_2H_4O	0.02	0.03	3.81	3.88
	124-19-6	壬醛	$C_9H_{18}O$	–	–	0.31	–
其他物质	560-21-4	2,3,3-三甲基戊烷	C_8H_{18}	–	0.38	–	–
	625-54-7	2-乙氧基丙烷	$C_5H_{12}O$	–	–	0.25	0.05
	13952-84-6	2-氨基丁烷	$C_4H_{11}N$	–	0.16	–	–
	625-54-7	2-乙氧丙烷	$C_5H_{12}O$	–	–	0.21	0.06
	91-20-3	环烷	$C_{10}H_8$	0.12	–	1.82	3.13
	108-95-2	苯酚	C_6H_6O	0.07	–	–	–
	110-85-0	哌嗪	$C_4H_{10}N_2$	–	0.49	–	–
	3777-69-3	2-戊基呋喃	$C_9H_{14}O$	–	–	0.37	–
	1020-31-1	3,5-二叔丁基邻苯二酚	$C_{14}H_{22}O_2$	–	0.05	–	–

注: –表示未检出。

8.32%、3.55%, 作为发酵板栗乳含量较高的风味物质, 二者不仅具有强烈的奶油香气, 还伴有淡淡的甜香[40]。整体而言, 发酵板栗乳风味偏酸且带发酵香; 酶解发酵板栗乳则结合了酶解和发酵的优势, 挥发性物质种类最丰富, 既有发酵产生的酸类、醛类, 还通过前体富集与微生物代谢协同, 生成焦甜酮类物质(如 3-羟基-2-丁酮 5.45%、3-羟基-4-己酮 2.90%)和具有清甜风味的醇类(如 1,2-丁二醇 3.65%), 提升了奶油香、果香等愉悦风味物质的复杂度与强度, 抑制了胺类等不良气味, 较发酵板栗乳酸类风味物质含量减少了 1.94%, 整体风味更丰富协调。

2.5.4 GC-MS 聚类热图分析 从图 5 可以看出, 不同处理板栗乳的挥发性风味物质存在明显差异。热图中颜色(蓝-红渐变对应物质相对含量高-低)和聚

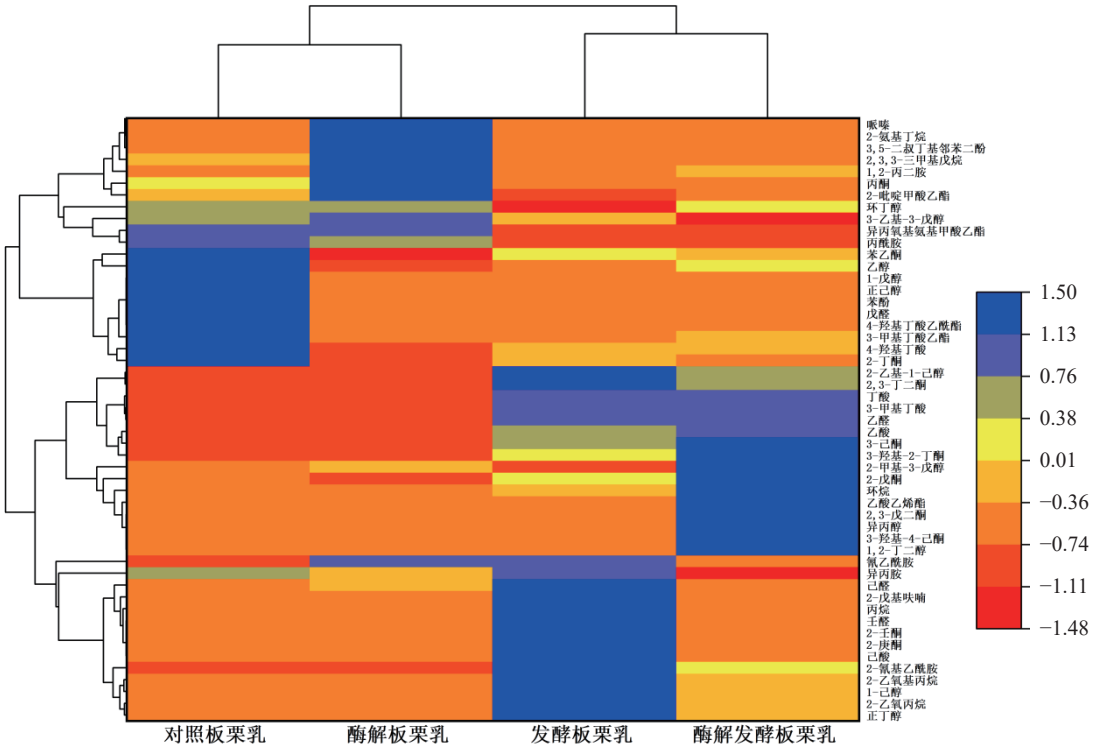


图 5 不同板栗乳挥发性风味物质的聚类热图

Fig.5 Clustering heat map of volatile flavor substances in different chestnut milks

类分支直观呈现差异，将对照、酶解板栗乳归为一类，发酵、酶解发酵板栗乳归为一类。对照板栗乳和酶解板栗乳风味物质少且多为低含量（红/黄色），风味单调；发酵板栗乳和酶解发酵板栗乳蓝色区域（高含量物质）覆盖更广，风味物质增多且风味浓郁。因此，相较于仅酶解处理，发酵处理对板栗乳风味挥发性风味物质影响更大，乳酸菌发酵提升了板栗乳中风味物质含量与多样性。

3　结论

酶解、乳酸菌发酵及酶解发酵联合处理对板栗乳品质与风味均产生影响。其中，酶解处理后板栗乳的总酚与总黄酮含量略有降低，而发酵处理及酶解发酵联合处理则显著提升了这两类物质的含量。三种处理方式均能增强板栗乳的抗氧化活性，同时提高总酚、黄酮在胃肠消化阶段的生物可及性，尤以酶解发酵联合处理的效果最为突出。从风味变化来看，酶解与乳酸菌发酵均会改变板栗乳的挥发性风味物质组成，酶解虽释放果香前体，但风味变化不够显著，发酵板栗乳的酸类、酮类、醛类物质显著增加（如乙酸、2,3-丁二酮、乙醛），风味偏酸、带发酵香；酶解发酵板栗乳结合了酶解和发酵的优势，呈现奶油香与果香，挥发性物质种类最丰富，共检测出 34 种挥发性风味物质，主要有 2,3-丁二酮、1,2-丁二醇、乙醛等。综合而言，酶解发酵联合处理可有效改善板栗乳的营养成分与风味特性，提升其营养价值及抗氧化活性。

© 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］ 张乐, 王赵改, 杨慧, 等. 不同板栗品种营养成分及风味物质分析[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 164−169. ［ZHANG Le, WANG Zhaogai, YANG Hui, et al. Nutritional components and flavor substances of different varieties of Chinese chestnut[J]. Food Science, 2016, 37(10): 164−169.］

［2］ 刘桂娟, 崔恩姬, 郑昌吉. 板栗化学成分与药理作用的研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(10): 1843−1847. ［LIU Guijuan, CUI Enji, ZHENG Changji. Advances on chemical constituents and pharmacological effects of *Castanea mollissima* Blume[J]. Natural Product Research and Development, 2018, 30(10): 1843−1847.］

［3］ 葛祎楠, 李斌, 范晓燕, 等. 板栗的功能性成分及加工利用研究进展[J]. 河北科技师范学院学报, 2018, 32(4): 18−23. ［GE Yinan, LI Bin, FAN Xiaoyan, et al. Research progress on functional components and processing of chestnut[J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2018, 32(4): 18−23.］

［4］ 高海生, 常学东, 蔡金星, 等. 我国板栗加工产业的现状与发展趋势[J]. 中国食品学报, 2006, 6(1): 429−436. ［GAO Haisheng, CHANG Xuedong, CAI Jinxing, et al. Production situation and development trend of chestnut processing[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2006, 6(1): 429−436.］

［5］ 王超, 林小晖, 杜冰. 乳酸菌发酵型饮料的研究现状与前景[J]. 饮料工业, 2018, 21(1): 68−70. ［WANG Chao, LIN Xiaohui, DU Bing. Status and prospects of *Lactobacillus* fermented beverages[J]. The Beverage Industry, 2018, 21(1): 68−70.］

［6］ 马媛, 耿伟涛, 王金菊, 等. 乳酸菌代谢与食品风味物质的形成[J]. 中国调味品, 2019, 44(1): 159−163,172. ［MA Yuan, GENG Weitao, WANG Jinju, et al. Lactic acid bacteria metabolism and formation of food flavor substances[J]. China Condiment, 2019, 44(1): 159−163,172.］

［7］ PETROVA P, PETROV K. Lactic acid fermentation of cereals and pseudocereals: Ancient nutritional biotechnologies with modern applications[J]. Nutrients, 2020, 12(4): 1118.

［8］ LIU Chang, WANG Shujun, CHANG Xuedong, et al. Structural and functional properties of starches from Chinese chestnuts[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 568−576.

［9］ 顾海华, 王珺, 汪涛, 等. 板栗淀粉酶解物与鲜牛乳混合发酵饮料研制[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 97−102. ［GU Haihua, WANG Jun, WANG Tao, et al. Preparation of fermented beverage from Chinese chestnut enzymatic hydrolysates and fresh milk[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(3): 97−102.］

［10］ 汪睿, 邵信儒, 徐明, 等. 集安板栗乳的研制[J]. 农产品加工, 2017(16): 8−9,12. ［WANG Rui, SHAO Xinru, XU Ming, et al. Development of Ji'an chestnut milk[J]. Farm Products Processing, 2017(16): 8−9,12.］

［11］ 王尚玉, 汪芳安. 板栗乳饮料的研究[J]. 食品科学, 2004, 25(7): 214−215. ［WANG Shangyu, WANG Fang'an. Study on proceseing Chinese chestnuts beverage[J]. Food Science, 2004, 25(7): 214−215.］

［12］ 万景瑞, 张乐, 王赵改, 等. 新型板栗饮料稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 158−162. ［WAN Jingrui, ZHANG Le, WANG Zhaogai, et al. Stability of a new type of Chinese chestnut beverage[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(14): 158−162.］

［13］ 曾志恒, 曾辉, 程翊, 等. 双孢蘑菇发酵液还原糖和总糖的含量测定[J]. 中国食用菌, 2018, 37(6): 40−43,49. ［ZENG Zhiheng, ZENG Hui, CHENG Yi, et al. Determination of reducing sugar and total sugar content in fermentation liquid of *Agaricus bisporus*[J]. Edible Fungi of China, 2018, 37(6): 40−43,49.］

［14］ TRIGUEROS L, WOJDYŁO A, SENDRA E. Antioxidant activity and protein-polyphenol interactions in a pomegranate (*Punica granatum* L.) yogurt[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(27): 6417−6425.

［15］ 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 Jing, NIU Xiumei, WANG Meimei, et al. Effect of *in vitro* simulated digestion on antioxidant components and activity of purple sweet potato and mulberry compound oral liquid[J]. Food Research and Development, 2023, 44(4): 8−14.］

［16］ 黄宁馨. 复合乳酸菌发酵枸杞汁的工艺优化及其营养品质变化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021. ［HUANG Ningxin. Study on the optimization of fermatation process of Goji juice by combined lactic acid bacteria and the changes of nutritional quality[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.］

［17］ LI Shunfeng, WANG Anjian, LIU Lina, et al. Extraction of polysaccharides under vacuum condition from *Lentinus edodes* stipe and their antioxidant activities *in vitro*[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(3): 759−767.

［18］ ZHAO Xinxin, TANG Fengxian, CAI Wenchao, et al. Effect of fermentation by lactic acid bacteria on the phenolic composition, antioxidant activity, and flavor substances of jujube-wolfberry composite juice[J]. LWT, 2023, 184: 114884.

[19] JANHAVI P, SINDHOORA S, MUTHUKUMAR S P. Correction to: Bioaccessibility and bioavailability of polyphenols from sour mangosteen (*Garcinia xanthochymus*) fruit[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(5): 2424.
[20] 周元, 傅虹飞, 胡亚云. 基于电子鼻和 GC-MS 的酶解猕猴桃汁香气成分动态解析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 101−109. [ZHOU Yuan, FU Hongfei, HU Yayun. Evolution analysis of enzymatically released volatiles from kiwifruit juices using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry analysis[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2021, 49(3): 101−109.]
[21] 陈臣, 田同辉, 刘政, 等. 基于感官评价、GC-IMS 和 GC-MS 的中式酸凝奶酪挥发性风味比较[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 228−236. [CHEN Chen, TIAN Tonghui, LIU Zheng, et al. Comparative study on volatile flavor of Chinese acid-curd cheese using sensory evaluation, gas chromatography-ion mobility spectrometry and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2023, 44(16): 228−236.]
[22] 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. [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.]
[23] LIU Mengyu, GUO Xiaoxiao, MA Xinyu, et al. Physicochemical properties of a novel chestnut porous starch nanoparticle [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261: 129920.
[24] BLAIOTTA G, di CAPUA M, COPPOLA R, et al. Production of fermented chestnut purees by lactic acid bacteria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 158(3): 195−202.
[25] SHARMA H P, PATEL H, SUGANDHA. Enzymatic added extraction and clarification of fruit juices-a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(6): 1215−1227.
[26] DU Xiang, YIN Shulei, WANG Tao, et al. Identification of proteolytic bacteria from Yunnan fermented foods and their use to reduce the allergenicity of *β*-lactoglobulin[J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(11): 8990−9004.
[27] 王宁雅, 马勤, 张瑞芬, 等. 不同食品大分子对黑米饮料花色苷加工和储藏稳定性的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(4): 136−145. [WANG Ningya, MA Qin, ZHANG Ruifen, et al. Effects of different food macromolecules on the processing and storage stability of anthocyanins in black rice beverage[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 136−145.]
[28] LI Changhong, DAI Taotao, CHEN Jun, et al. Protein-polyphenol functional ingredients: The foaming properties of lactoferrin are enhanced by forming complexes with procyanidin[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128145.
[29] WU Shengjun, LU Mingsheng, FANG Yaowei, et al. Degradation of potato starch and the antioxidant activity of the hydrolysates: Degradation of potato starch[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(4): e13068.
[30] 陈东方. 酶解提高燕麦粉抗氧化活性的作用机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. [CHEN Dongfang. Mechanism of enhancement of antioxidant activity of oat flour afterenzymatic hydrolysis[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.]
[31] SANJUKTA S, PADHI S, SARKAR P, et al. Production, characterization and molecular docking of antioxidant peptides from peptidome of kinema fermented with proteolytic *Bacillus* spp[J]. Food Research International, 2021, 141: 110161.
[32] 王娟, 李莎怡静, 张佳欣, 等. 消化过程中多酚类物质的稳定性研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2020(3): 33−37. [WANG Juan, LI Shayijing, ZHANG Jiaxin, et al. Research progress on stability of polyphenols during digestion[J]. Cereal & Feed Industry, 2020(3): 33−37.]
[33] LI Yuting, HE Dong, LI Bing, et al. Engineering polyphenols with biological functions via polyphenol-protein interactions as additives for functional foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 470−482.
[34] DOGAN K, AKMAN P K, TORNUK F. Role of non-thermal treatments and fermentation with probiotic *Lactobacillus plantarum* on *in vitro* bioaccessibility of bioactives from vegetable juice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(11): 4779−4788.
[35] YUN Jing, CUI Chuanjian, ZHANG Shihua, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033.
[36] 许凌云, 侯阳, 杨倩, 等. SPME Arrow-GC-MS 鉴定 3 种不同杀菌乳中特征香气物质[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(7): 53−60. [XU Lingyun, HOU Yang, YANG Qian, et al. Identification of characteristic aroma substances of three kinds of milk by solid-phase microextraction arrow-gas chromatography-mass spectrometry[J]. China Dairy Industry, 2022, 50(7): 53−60.]
[37] LIU Chen, YANG Ping, WANG Haili, et al. Identification of odor compounds and odor-active compounds of yogurt using DHS, SPME, SAFE, and SBSE/GC-O-MS[J]. LWT, 2022, 154: 112689.
[38] JOUNG J Y, LEE J Y, HA Y S, et al. Enhanced microbial, functional and sensory properties of herbal yogurt fermented with Korean traditional plant extracts[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2016, 36(1): 90−99.
[39] 常旭龙, 周青霞, 马文聪, 等. 不同发酵剂发酵酸奶的风味及理化特性的研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 263−271. [CHANG Xulong, ZHOU Qingxia, MA Wencong, et al. Research on the flavor and physicochemical characteristics of yogurt fermented by different starter cultures[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 263−271.]
[40] DUAN Wenhui, GUAN Qijie, ZHANG Huiling, et al. Improving flavor, bioactivity, and changing metabolic profiles of Goji juice by selected lactic acid bacteria fermentation[J]. Food Chemistry, 2023, 408: 135155.