唐弦, 陈卫林, 马文瑞, 等. 基于新疆优良酵母菌发酵酸马乳中营养物质及风味物质分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 155−162. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070181
TANG Xian, CHEN Weilin, MA Wenrui, et al. Analysis of Nutrients and Flavor Compounds in Koumiss Fermented with Xinjiang-derived Superior Yeast Strains[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 155−162. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070181

·食品微生物与生物制造·

基于新疆优良酵母菌发酵酸马乳中营养物质及风味物质分析

唐　弦[1], 陈卫林[1], 马文瑞[1], 罗晓红[2], 唐大权[1], 付志昂[1], 汤　凯[1], 武　运[1,*]
（1.新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052;
2.新疆天润生物科技股份有限公司, 新疆乌鲁木齐 830088）

摘　要: 为研究基于新疆优良酵母菌发酵酸马乳中营养物质（游离氨基酸、脂肪酸）及风味物质含量，探究发酵前后物质变化并解析其与自然发酵酸马乳的营养物质及风味差异。采用超高效液相质谱法、气相色谱-质谱法及全二维气相色谱-飞行时间质谱法对鲜马乳、自然发酵酸马乳（对照组）及优良酵母菌发酵酸马乳（试验组）中游离氨基酸、脂肪酸及挥发性风味物质含量进行检测。结果表明，与鲜马乳相比，经发酵后试验酸马乳中游离氨基酸含量及多不饱和脂肪酸相对含量显著上升；挥发性风味物质数目增多，酯类、醇类、羧酸类及杂环化合物相对含量上升。与对照酸马乳相比，试验酸马乳中必需氨基酸含量显著下降，而组氨酸（1297.68 mg/L）、鸟氨酸（545.38 mg/L）及 γ-氨基丁酸（1269.46 mg/L）含量显著提升；饱和脂肪酸相对含量显著降低，多不饱和脂肪酸相对含量显著提升，其中 α-亚麻酸（19.72%）相对含量显著提升，但其亚油酸（9.32%）相对含量显著下降；风味物质总数减少，关键风味物质分别为 2,3-丁二酮、2-十一烷、庚醛和 2-戊基呋喃，风味物质多样性相对较低但其整体风味更为协调，具有黄油味、乳酪味、青草味及脂肪味等风味特征。综上所述，基于新疆优良酵母混菌发酵马乳可提高酸马乳营养价值，平衡风味特征。

关键词: 混菌发酵, 酸马乳, 游离氨基酸, 脂肪酸, 挥发性风味物质
中图分类号: TS252.54　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0155−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070181
本文网刊:

Analysis of Nutrients and Flavor Compounds in Koumiss Fermented with Xinjiang-derived Superior Yeast Strains

TANG Xian[1], CHEN Weilin[1], MA Wenrui[1], LUO Xiaohong[2], TANG Daquan[1], FU Zhi'ang[1], TANG Kai[1], WU Yun[1,*]
（1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urmuqi 830052, China;
2.Xinjiang Tianrun Biotechnology Co., Ltd., Urumqi 830088, China）

Abstract: In order to investigate the content of nutrients (free amino acids, fatty acids) and flavor substances in koumiss fermented with Xinjiang-derived superior yeast strains, as well as the changes in substances before and after fermentation, and the differences in nutrients and flavors compared with that of naturally fermented koumiss, ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry (UPLC-MS), gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry (GC×GC-TOFMS) were employed to detect the contents of free amino acids, fatty acids, and volatile flavor substances in fresh mare's milk, naturally fermented koumiss (control group), and koumiss fermented with superior yeast strains (experimental group) . The results showed that, compared with fresh mare's milk, the content of free amino acids in the experimental group significantly increased, while

收稿日期: 2025−07−17
基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项（2022A02013-3-2C）;科技部国家重点研发计划项目（2022YFE0120800）。
作者简介: 唐弦（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1505896674@qq.com。
*** 通信作者:** 武运（1965−）, 女, 硕士, 教授, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: wuyunster@sina.com。

the relative content of polyunsaturated fatty acids significantly increased, the number of volatile flavor substances increased, the relative contents of esters, alcohols, carboxylic acids, and heterocyclic compounds were elevated. Compared with the control group, the essential amino acid content in the experimental group significantly decreased, the contents of histidine (1297.68 mg/L), ornithine (545.38 mg/L), and γ-aminobutyric acid (1269.46 mg/L, GABA) significantly increased. The relative content of saturated fatty acids significantly decreased, while the relative content of polyunsaturated fatty acids (PUFAs) significantly increased, notably the relative content of α-linolenic acid (19.72%) was significantly enhanced, but the relative content of linoleic acid (9.32%) significantly decreased. The total number of flavor substances in experimental group was reduced, and the key flavor substances were identified as 2,3-butanedione, 2-undecanone, heptanal, and 2-pentylfuran. Although the diversity of flavor substances was relatively lower, the overall flavor profile was more harmonious, characterized by buttery, cheesy, grassy, and fatty notes. In summary, the mixed yeast fermentation intervention effectively boosts the nutritional quality and optimizes the flavor balance of koumiss.

Key words: mixed-strain fermentation; koumiss; free amino acids; fatty acids; volatile flavor compounds

近年来，随着消费者对功能性食品需求的增加，马乳因其潜在的益生特性和低致敏性[1]，逐渐成为乳品科学与营养学领域的研究热点。发酵是乳制品加工中提升营养价值与功能特性的重要手段，其丰富的营养物质不仅来源于原料乳本身还与发酵菌种和工艺息息相关[2]。马乳中的脂肪含量相较于牛乳较低，但其游离脂肪酸含量尤其是不饱和脂肪酸（如亚油酸、亚麻酸）较高[3]。传统酸马乳通常采用自然混菌发酵，乳酸菌和酵母菌是其中的优势发酵菌种，可通过代谢作用分解乳中蛋白质、脂肪等大分子物质，释放游离氨基酸、游离脂肪酸等生物活性物质[4]，同时产生酯类、醛类及酮类等挥发性化合物[5]，赋予发酵酸马乳产品独特营养价值和风味特征。目前市面上暂无酸马乳专用发酵菌剂，且已有研究中对发酵酸马乳的乳酸菌菌株挖掘较多，对酵母菌的研究较少。本团队在前期研究中从新疆酸马乳样品中筛选出了两株优良酵母菌（酿酒酵母 TX1-6、马克斯克鲁维酵母 TX3-1），利用两株酵母进行了酸马乳混菌发酵试验并对发酵工艺进行了优化。为进一步探究前期所筛优良酵母菌酿酒酵母 TX1-6 及马克斯克鲁维酵母 TX3-1 与乳酸菌混菌发酵工艺对酸马乳氨基酸、脂肪酸及挥发性风味物质的影响，本文以鲜马乳、试验酸马乳和对照酸马乳为研究对象，通过对比其发酵前后游离氨基酸、脂肪酸及挥发性风味物质的组成变化，探究所筛优良酵母混菌发酵对马乳品质提升与风味特性的调控。此外，已有的研究中发酵乳风味物质分析主要采用 GC-MS 等技术，对于未知风味物质难以检测，其检测方法有待进一步完善[6]。本研究采用了全二维气相色谱-飞行时间质谱对马乳进行风味组学检测，具有高灵敏度和分辨率[7]。该研究为马乳发酵制品的品质提升与功能性开发提供理论依据，对推动牧区发展与健康食品产业升级具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鲜马乳、对照酸马乳（同一牧民家购买，酸马乳采用传统工艺自然发酵） 新疆乌鲁木齐市南山牧场；酿酒酵母 TX1-6、马克斯克鲁维酵母 TX3-1、干酪乳杆菌 MLS5 新疆农业大学食品生物发酵与质量安全研究室菌种库；甲醇（分析纯）、乙腈（分析纯）、乙酸铵（分析纯）、6-氨基喹啉-N-羟基琥珀酰亚胺基氨基甲酸酯（分析纯）、丙酮（分析纯）、碳酸氢钠（分析纯）、盐酸（分析纯）、正己烷（分析纯）、异丙醇（分析纯）、硫酸钠（分析纯）、氢氧化钠（分析纯） CNW Technologies；氨基酸混合标准品、脂肪酸甲酯混合标准品 中国医药集团有限公司；正构烷烃混合标准品 Sigma 公司；正己烷 色谱纯，永华化学股份有限公司；氘代正己醇-d_{13} 色谱纯，C/D/N Isotopes。

HWS-28 型恒温水浴锅 上海一恒科学仪器有限公司；LE200E 电子分析天平 瑞士梅特勒-托利多公司；Heraeus Fresco17 centrifuge 离心机、Vanquish Core 超高效液相-质谱联用仪、TRACE 1300 气相色谱仪、TSQ 9000 质谱仪 赛默飞世尔科技有限公司；YM-080S 超声仪 深圳市方奥微电子有限公司；JXFSTPRP-24 研磨仪 上海净信科技有限公司；H2050R冷冻离心浓缩仪 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 混菌发酵酸马乳制备工艺 经前期工艺优化试验已获得最优工艺及发酵参数，原料鲜马乳经过滤后，预热升温至 65 ℃ 后在压力为 20 MPa 条件下均质，均质后的料液经 85 ℃ 杀菌 30 min 冷却至 40 ℃，以 4.5% v/v 接入复配菌种（酿酒酵母 TX1-6∶马克斯克鲁维酵母 TX3-1∶干酪乳杆菌 MLS5 比例为 1∶1∶3），于恒温振荡培养箱振荡速度 130 r/min 发酵温度 31 ℃ 条件发酵 43 h，冷却终止发酵，于 4 ℃ 的条件下放置 12 h 后熟。

1.2.2 游离氨基酸提取及测定分析

1.2.2.1 游离氨基酸提取 取 50 μL 样本加 200 μL 提取液（乙腈∶甲醇，体积比 1∶1，含内标混合液），涡旋混匀 30 s；冰水浴超声 15 min；样本在 4 ℃，12000 r/min 离心 15 min；取上清液 100 μL 旋转蒸发至干；用 100 μL 50% 甲醇-水复溶，加入 100 μL 衍生剂，加入 50 μL 浓度为 1 mol/L 的碳酸氢钠，涡旋混匀；40 ℃ 水浴锅衍生 1 h，取出后冷却至室温，

加入 50 μL 浓度为 1 mol/L 的盐酸，旋转蒸发至干；200 μL 甲醇-水复溶，过 0.22 μm 滤膜后上机测定。

1.2.2.2　色谱条件　使用 Thermo vanquish UHPLC System（Thermo Fisher）超高效液相色谱仪，通过 Waters ACQUITY UPLC BEH C_{18}（100×2.1 mm，1.7 μm）液相色谱柱对目标化合物进行色谱分离。液相色谱 A 相为乙酸铵，B 相为乙腈。柱温箱温度为 45 ℃，样品盘设为 4 ℃，进样体积为 2 μL，采用梯度洗脱程序。

1.2.2.3　质谱条件　喷雾电压−3300 V；鞘气流速 40 arb；辅助气流速 10 arb；吹扫气流速 1 arb；离子传输管温度 325 ℃；蒸发器温度 350 ℃；m/z 70~1050。

1.2.2.4　定性定量方法　进行 UHPLC-MS/MS 分析之前，将目标化合物标准溶液引入质谱中。针对每个目标化合物，选取信号强度最高的数个母离子-子离子对（transition），对其 MRM 参数进行优化，并选取其中响应最好的离子对用于定量分析，其他离子对用于目标化合物定性分析。所有目标化合物定量分析工作，通过 Skyline 来完成，所有数据采集工作通过 Xcalibur（4.4.16.14，Thermo Fisher）来完成。

1.2.3　脂肪酸提取及测定分析

1.2.3.1　标准品配制　参考文献 [8−9] 的方法，39 种脂肪酸甲酯混标溶液（4000 μg/mL）用正己烷配制成 1、5、10、25、50、100、250、500、1000、2000 μg/mL 10 个混合标准浓度梯度，其中浓度为各组分的总浓度。

1.2.3.2　代谢物提取　精确移取 50 μL 样本于 10 mL 玻璃离心管中，加入 2 mL 1% 硫酸甲醇溶液，充分混匀振荡；80 ℃ 水浴锅中酯化 30 min；取出后冷却，加入 1 mL 正己烷萃取，振荡混匀，静置 2 min，加入 5 mL 4 ℃ 的 H_2O 洗涤，3500 r/min 4 ℃ 离心 10 min；取 700 μL 上清液于 2 mL 离心管中，再加入 100 mg 无水硫酸钠粉末除去多余水分，振荡混匀；取 300 μL 上清液于 2 mL 离心管中，加入 15 μL 0.5 mg/L 水杨酸甲酯为内标，振荡混匀，吸取 50 μL 上清液加入检测瓶中，过 0.22 μm 滤膜后上机测定。

1.2.3.3　色谱条件　Thermo Trace 1300 气相系统，色谱柱 Thermo TG-FAME 毛细管柱（50 m×0.25 mm ID×0.20 μm）；分流进样，进样量 1 μL，分流比 8:1。进样口温度 250 ℃；离子源温度 300 ℃；传输线温度 280 ℃。程序升温起始温度 80 ℃，保持 1 min；以 20 ℃/min 升至 160 ℃，保持 1.5 min；以 3 ℃/min 升至 196 ℃，保持 8.5 min；以 20 ℃/min 升至 250 ℃，保持 3 min。载气为氦气，载气流速 0.63 mL/min。

1.2.3.4　质谱条件　Thermo TSQ 9000 质谱仪的电子轰击电离（EI）源，SIM 扫描方式，电子能量 70 eV，离子源温度设定为 230 ℃，接口温度设定为 280 ℃。

1.2.3.5　定性定量方法　根据物质保留时间和定量离子比对混标总离子流图定性分析。以标准品的浓度为横坐标，标准品峰面积或标准品与内标的峰面积比值为纵坐标构建校正曲线，得到各物质线性回归方程，根据标准品回归方程进行定量计算。

1.2.4　挥发性风味物质的测定与分析

1.2.4.1　挥发性风味物质测定　将样品送往苏州帕诺米克生物医药科技有限公司采用全二维气相色谱-飞行时间质谱法进行检测。

1.2.4.2　定性定量方法　利用正构烷烃混合标准品（C_7~C_{30}）计算各挥发性组分线性保留指数，与标准数据库（NIST 2020）比对初筛，并将样品组分质谱图与 NIST2020 比对进行定性分析。采用内标法定量（氘代正己醇-d_{13} 为同位素内标），以氘代正己醇-d_{13} 的特征离子峰面积作为内标参照，换算为单位样品中各挥发性风味物质绝对含量，实现相对定量分析。

1.2.4.3　相对气味活度值计算　将所有样本总体风味贡献度最大的组分，定义其 ROAV=100。其他物质的 ROAV 基于贡献度最大的组分的 ROAV 进行计算，公式为：ROAV=100×（待测物质的归一化定量值/待测物质阈值）/（ROAV=100 的物质的归一化定量值/ROAV=100 的物质阈值）。

1.3　数据处理

每个试验重复 3 次，数据以平均值±标准误差的形式表示。使用 Excel 2016 进行数据处理和分析，采用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析多重比较检验不同组之间的差异，并用 Origin 2021 绘图，部分数据在苏州诺米代谢云平台（https://www.biodeep.cn/home）上进行分析。

2　结果与分析

2.1　游离氨基酸含量分析

氨基酸是人体所需的基本物质之一，对人体肌肉组织、免疫系统乃至细胞代谢都有着不可替代的作用。鲜马乳、对照酸马乳和试验酸马乳中游离氨基酸结果如表 1 所示，3 种样品中共检测出 20 种氨基酸。其中包含 8 种成人必需氨基酸（异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸、苏氨酸、色氨酸及缬氨酸）、2 种半必需氨基酸（组氨酸和精氨酸）和 10 种非必需氨基酸。试验酸马乳中游离氨基酸含量相较鲜马乳显著上升（P<0.05），表明其发酵过程中促进了游离氨基酸的生成。对照酸马乳中游离氨基酸总量高于鲜马乳但无显著性差异。孙哲航[10] 研究发现，经过发酵后的马奶在氨基酸组成及含量上大大增加，脯氨酸、甲硫氨酸、苯丙氨酸、酪氨酸和精氨酸为主要差异氨基酸，本研究结果与之相似。

鲜马乳、对照酸马乳和试验酸马乳中必需氨基酸占比分别为 31.63%、35.07% 及 21.72%。相较于鲜马乳及对照酸马乳，试验酸马乳中必需氨基酸含量显著下降（P<0.05），其中赖氨酸和色氨酸含量显著上升（P<0.05），异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸及缬氨酸显著下降（P<0.05）；半必需氨基酸和非必需氨基酸总

表 1 3 种样品中游离氨基酸浓度(mg/L)

Table 1 Concentration of free amino acids in three samples (mg/L)

氨基酸名称	鲜马乳	对照酸马乳	试验酸马乳
缬氨酸(Val)	433.71±32.01^{b}	993.93±45.46^{a}	126.67±13.44^{c}
异亮氨酸(Ile)	576.41±61.18^{a}	524.28±46.23^{a}	72.81±8.09^{b}
亮氨酸(Leu)	261.93±21.15^{b}	799.58±17.39^{a}	117.38±9.64^{c}
赖氨酸(Lys)	835.86±48.10^{b}	418.60±31.87^{c}	1021.10±41.31^{a}
蛋氨酸(Met)	65.59±6.78^{ab}	79.76±11.02^{a}	49.43±7.84^{b}
苯丙氨酸(Phe)	391.65±32.02^{a}	443.27±56.28^{a}	128.53±3.22^{b}
苏氨酸(Thr)	597.37±18.07^{a}	329.82±40.98^{b}	647.42±57.05^{a}
色氨酸(Trp)	21.05±1.94^{b}	31.18±5.72^{b}	157.22±8.07^{a}
组氨酸(His)	684.99±35.23^{b}	394.16±27.57^{c}	1297.68±75.92^{a}
丙氨酸(Ala)	1764.55±53.07^{a}	801.35±72.44^{b}	1751.04±46.3^{a}
精氨酸(Arg)	56.38±3.13^{c}	780.85±68.35^{a}	146.37±9.89^{b}
天冬酰胺(Asn)	46.50±3.06^{b}	116.97±19.16^{a}	4.36±0.78^{c}
天冬氨酸(Asp)	80.74±6.35^{a}	96.57±12.03^{a}	60.52±9.04^{b}
γ-氨基丁酸(GABA)	1.73±0.45^{b}	7.75±1.08^{b}	1269.46±83.11^{a}
谷氨酸(Glu)	2150.32±121.51^{a}	1887.64±55.40^{b}	388.08±54.29^{c}
甘氨酸(Gly)	458.61±45.66^{a}	349.50±50.40^{b}	316.32±3.03^{b}
鸟氨酸(Orn)	122.58±4.55^{b}	91.69±12.58^{b}	545.38±32.51^{a}
脯氨酸(Pro)	116.71±7.51^{c}	1381.97±25.07^{a}	1043.62±22.4^{b}
丝氨酸(Ser)	907.15±47.23^{a}	177.94±18.94^{b}	989.91±65.78^{a}
酪氨酸(Tyr)	489.94±16.48^{b}	615.46±69.47^{a}	553.10±24.03^{ab}
必需氨基酸	3183.58±48.95^{b}	3620.42±97.36^{a}	2320.55±40.39^{c}
总氨基酸	10063.80±210.39^{b}	10322.27±183.26^{ab}	10686.39±352.17^{a}

注: 不同字母代表同行差异显著(P<0.05); 表2~表3同。

表 2 3 种样品饱和脂肪酸相对含量(%)

Table 2 Relative content of saturated fatty acids in three samples (%)

脂肪酸名称	鲜马乳	对照酸马乳	试验酸马乳
C6:0	0.38±0.01^{a}	0.32±0.01^{b}	0.36±0.03^{ab}
C8:0	3.19±0.02^{a}	3.00±0.06^{a}	3.16±0.18^{a}
C10:0	5.62±0.03^{a}	5.80±0.12^{a}	5.27±0.17^{b}
C11:0	0.67±0.04^{a}	0.61±0.02^{a}	0.63±0.04^{a}
C12:0	6.59±0.11^{c}	6.67±0.07^{b}	6.97±0.37^{a}
C13:0	0.05±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}
C14:0	6.84±0.11^{a}	6.90±0.17^{a}	6.48±0.13^{b}
C15:0	0.33±0.01^{a}	0.23±0.01^{b}	0.31±0.02^{a}
C16:0	18.38±0.21^{b}	19.78±0.34^{a}	18.35±0.20^{b}
C17:0	0.17±0.01^{a}	0.14±0.01^{b}	0.16±0.01^{a}
C18:0	0.77±0.02^{b}	1.00±0.06^{a}	0.76±0.07^{b}
C20:0	0.04±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}	0.04±0.01^{a}
C21:0	0.01±0.01^{a}	0.01±0.01^{a}	0.01±0.01^{a}
C22:0	0.01±0.01^{a}	0.01±0.01^{a}	0.01±0.01^{a}
C23:0	0.01±0.01^{a}	0.02±0.01^{a}	0.01±0.01^{a}
C24:0	0.01±0.01^{a}	0.01±0.01^{a}	0.01±0.01^{a}
SFA	43.06±0.39^{b}	44.58±0.18^{a}	42.57±0.24^{b}

注: SFA表示饱和脂肪酸(Saturated fatty acid)。

量显著上升(P<0.05),其中组氨酸、精氨酸、γ-氨基丁酸、鸟氨酸及脯氨酸含量显著上升(P<0.05),天冬酰胺、天冬氨酸、谷氨酸及甘氨酸显著下降(P<0.05)。综合分析可知,试验酸马乳中组氨酸、赖氨酸、鸟氨酸和 γ-氨基丁酸浓度显著高于鲜马乳及对照酸马乳,是混菌发酵酸马乳中优势氨基酸。组氨酸具有清除自由基、延缓运动性疲劳及改善类风湿关节炎等作用[11];赖氨酸可以促进大脑发育,改善肝功能、人体免疫系统,增强人体抵抗力[12];鸟氨酸具有抗疲劳和抑制皮肤老化的作用[13]。试验酸马乳中 γ-氨基丁酸的升高最为显著(P<0.05),含量达 1269.46±83.11 mg/L,达总游离氨基酸的 11.88%;谷氨酸含量占比从原料鲜马乳中的 21.37% 降至 3.63%,2 种氨基酸存在代谢关系,可能是由于发酵菌种引起了谷氨酸到 γ-氨基丁酸的转化。γ-氨基丁酸是一种非蛋白质的天然氨基酸[14],具有降血脂、调节激素分泌、改善睡眠质量、增强记忆力、防治肥胖等重要生理功能[15−16]。后续可进一步研究高产 γ-氨基丁酸能力来源于发酵菌种中的哪一株或哪种特定发酵菌种组合,为相关食品的开发及应用提供思路。

2.2 脂肪酸含量分析

2.2.1 饱和脂肪酸含量分析 脂肪酸中不含双键的称为饱和脂肪酸,是一种高效的能量来源,具有耐高温性、不易被氧化的特点,但摄入过量会增加患心脑血管疾病的风险[17]。如表 2 所示,3 种样品中共检测出饱和脂肪酸 16 种。试验酸马乳中饱和脂肪酸相对含量相较于鲜马乳有所下降但差异不显著,经发酵后月桂酸(C12:0)相对含量显著上升(P<0.05),癸酸(C10:0)和肉豆蔻酸(C14:0)相对含量显著下降(P<0.05)。而相较于对照酸马乳,试验酸马乳中饱和脂肪酸相对含量显著减少(P<0.05),其中癸酸(C10:0)、肉豆蔻酸(C14:0)、棕榈酸(C16:0)和硬脂酸(C18:0)相对含量显著小于对照酸马乳(P<0.05),而月桂酸(C12:0)、十五烷酸(C15:0)及十七烷酸(C17:0)相对含量显著高于对照酸马乳(P<0.05)。

2.2.2 不饱和脂肪酸含量分析 不饱和脂肪酸根据双键个数的不同还可分为单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸[18]。单不饱和脂肪酸具有调节血糖的作用,可以改善胰岛素敏感性,其利于血糖平衡[19];多不饱和脂肪酸具有调节血脂和机体免疫力的作用,其有利于保护心脑血管健康[20]。如表 3 所示,3 种样品中共检测出不饱和脂肪酸共 23 种,其中单不饱和脂肪酸 10 种,多不饱和脂肪酸 13 种。试验酸马乳中不饱和脂肪酸相对含量最高达 57.43%,其中鲜马乳中单不饱和脂肪酸相对含量最高达 28.87%,试验酸马乳中多不饱和脂肪酸相对含量最高 29.84%。与鲜马乳样品相比,经过发酵后试验酸马乳样品中不饱和脂肪酸含量有所上升但无显著性差异,其中 α-亚麻酸(C18:3N3)和花生二烯酸(C20:2)相对含量显著上升(P<0.05),而油酸(C18:1N9C)、花生烯酸(C20:1)及亚油酸(C18:2N6)相对含量显著下降(P<0.05)。同时试验酸马乳中不饱和脂肪酸含量显著大于对照酸马乳(P<0.05)。其中肉豆蔻烯酸(C14:1)、棕榈油酸(C16:1)、十七碳烯酸(C17:1)、异油酸(C18:1N7)、α-亚麻酸(C18:3N3)及顺式-11,14-二十碳二烯酸

表 3　三种样品中不饱和脂肪酸相对含量(%)

Table 3　Relative content of unsaturated fatty acids in three samples (%)

脂肪酸名称	鲜马乳	对照酸马乳	试验酸马乳
C14:1	0.66±0.01^{a}	0.60±0.01^{b}	0.64±0.02^{a}
C15:1	0.04±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}
C16:1	5.85±0.13^{a}	5.32±0.07^{b}	5.90±0.37^{a}
C17:1	0.47±0.01^{a}	0.30±0.01^{b}	0.44±0.03^{a}
C18:1N12	1.28±0.01^{a}	1.37±0.23^{a}	1.23±0.06^{a}
C18:1N9C	14.31±0.19^{a}	13.14±0.29^{b}	13.39±0.18^{b}
C18:1N7	0.88±0.01^{a}	0.71±0.02^{b}	0.83±0.08^{a}
C20:1	5.26±0.10^{b}	6.23±0.03^{a}	5.00±0.13^{c}
C22:1N9	0.09±0.01^{a}	0.11±0.01^{a}	0.10±0.02^{a}
C24:1	0.03±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}
C18:2N6	10.11±0.08^{a}	10.42±0.15^{a}	9.32±0.36^{b}
C18:3N6	0.03±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}
C18:3N3	17.17±0.36^{b}	16.24±0.26^{c}	19.72±0.42^{a}
C20:2	0.19±0.01^{b}	0.19±0.01^{b}	0.22±0.01^{a}
C20:3N6	0.04±0.01^{a}	0.04±0.01^{a}	0.04±0.01^{a}
C20:3N3	0.31±0.01^{b}	0.40±0.01^{a}	0.30±0.01^{b}
C20:4N6	0.05±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}	0.04±0.01^{a}
C22:2	0.02±0.01^{a}	0.02±0.01^{a}	0.02±0.01^{a}
C20:5N3	0.02±0.01^{b}	0.04±0.01^{a}	0.02±0.01^{b}
C22:4	0.02±0.01^{a}	0.02±0.01^{a}	0.02±0.01^{a}
C22:5N6	0.01±0.01^{a}	0.02±0.01^{a}	0.02±0.01^{a}
C22:5N3	0.06±0.01^{a}	0.08±0.01^{a}	0.07±0.01^{a}
C22:6N3	0.02±0.01^{a}	0.02±0.01^{a}	0.02±0.01^{a}
UFA	56.94±0.39^{a}	55.42±0.18^{b}	57.43±0.24^{a}
MUFA	28.87±0.40^{a}	27.85±0.10^{b}	27.59±0.40^{b}
PUFA	28.07±0.28^{b}	27.57±0.10^{b}	29.84±0.44^{a}

(C20:2)相对含量显著高于对照酸马乳(P<0.05)，但其花生烯酸(C20:1)、亚油酸(C18:2N6)、二十碳三烯酸(C20:3N3)及二十碳五烯酸(C20:5N3)相对含量显著小于对照酸马乳(P<0.05)。

综合分析可得，棕榈酸、油酸、亚油酸及 α-亚麻酸在 3 个样品中均占较高比例，可能为马乳及发酵马乳中特征脂肪酸。叶乐等[3] 研究发现，蒙古马乳中相对含量占比前四的为棕榈酸、油酸、亚油酸及 α-亚麻酸，本文研究与之一致。不同发酵菌种及工艺造成了 2 种酸马乳样品脂肪酸代谢差异，与对照酸马乳相比试验酸马乳优势在于饱和脂肪酸含量低，不饱和脂肪酸含量高，α-亚麻酸含量最高，其营养品质更为健康。亚油酸和 α-亚麻酸被称为必需脂肪酸，是人体所需要但无法自身合成的，只能从食物中摄取，由此可得鲜马乳及发酵马乳制品可作为必需脂肪酸的来源。不饱和脂肪酸是维持人体健康的核心营养素，具有保护心脑血管、降血脂及抑制动脉粥样硬化的作用，推测酸马乳中高不饱和脂肪酸含量是其具有功能特性的原因之一。

2.3　挥发性风味物质分析

2.3.1　鉴定物质数目统计　3 种样品中挥发性风味物质二维总离子流图如图 1 所示。不同颜色代表检测物质离子峰，其越红则表明响应强度越高。通过对比样品 GC×GC 色谱图中的峰位置、峰面积、峰形等

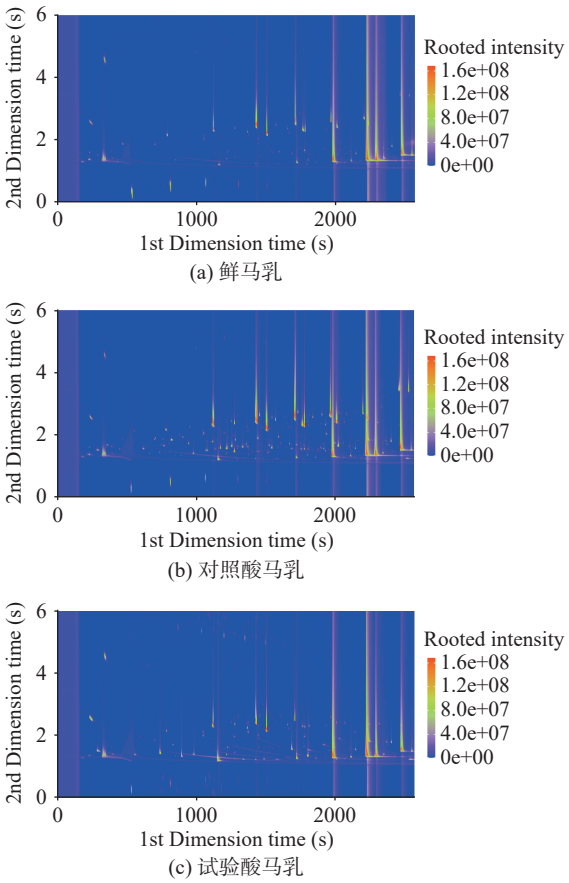


图 1　3 种样品中挥发性风味物质二维总离子流图

Fig.1　Two-dimensional total ion flow map of volatile flavor substances for three samples

特征，可知对照酸马乳与试验酸马乳中挥发性风味物质相较于鲜马乳中种类及其响应强度均有所上升，表明发酵后酸马乳中风味物质组成更为复杂。

通过对检测物质进行注释、除杂后，可得到风味物质鉴定信息，总风味物质数目见图 2 所示。鲜马乳中共检测出 942 种物质，对照酸马乳中共检测出 1398 种物质，试验酸马乳中共检测出 1115 种物质。相较于鲜马乳 2 种酸马乳样品中风味物质总数上升，试验酸马乳风味物质总数低于对照酸马乳。推测可能是由于对照酸马乳工艺采用传统自然发酵工艺，其发酵“引子”中微生物多样性更高[21]，菌种代谢产物和交互作用更为复杂。

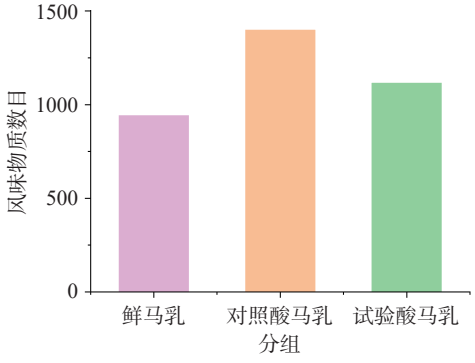


图 2　总风味物质鉴定数目

Fig.2　Number of total flavor substances identified

2.3.2 风味物质种类及相对含量分析 风味物质种类主要包括烃类、醛类、酯类、羧酸类、酮类、醇类、杂环类化合物及其他，3 种样品中不同种类挥发性风味物质数如图 3 所示。相较于鲜马乳，发酵后 2 种酸马乳样品中各类风味物质数目均呈上升趋势，试验酸马乳中羧酸类物质数目高于对照酸马乳，醛类、酯类、酮类、醇类、杂环类化合物及其他风味物质数目均低于对照酸马乳。

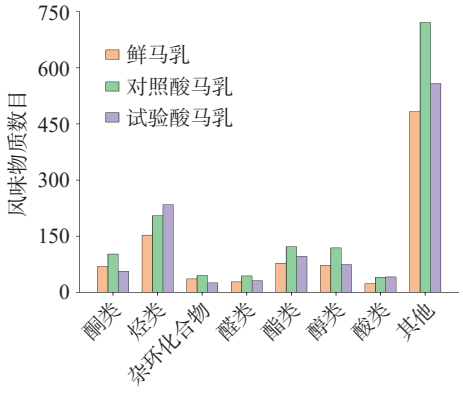


图 3 风味物质种类数目

Fig.3 Number of flavor substance species

3 种样品中各类风味物质相对含量如图 4 所示，除其他物质外鲜马乳中相对含量由高到低分别为酯类（23.96%）、酮类（12.28%）、醇类（7.74%）、烃类（6.20%）、醛类（2.47%）、羧酸类（1.29%）及杂环化合物（0.47%）。相较于鲜马乳经发酵后试验酸马乳中酯类（29.60%）、醇类（8.85%）、羧酸类（1.97%）及杂环化合物（1.09%）物质相对含量上升，酮类（5.56%）、烃类（4.26%）和醛类（1.47%）物质相对含量降低。而相较于试验酸马乳，对照酸马乳中酯类（32.42%）、酮类（6.70%）、醛类（5.72%）、杂环化合物（1.82%）相对含量增加，醇类（4.79%）、羧酸类（1.25%）及烃类物质（3.92%）相对含量减少。酯类可赋予酸马乳果香、花香及奶油香[22]，在鲜马乳和酸马乳中占比最高；酮类可增强黄油香和奶香，经发酵后增多使酸马乳风味更加醇厚；醛类物质过多易导致腐败味和金属味，少量可增加清新感[23]，对照酸马乳中醛类物质增加可能是由于其传统工艺导致的不饱和脂肪酸氧化；醇类可赋予酒香，丰富风味层次，是酸马乳独特风味之一；烃类

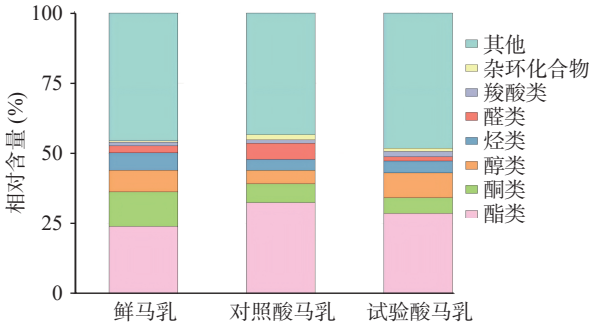


图 4 风味物质种类相对含量

Fig.4 Relative content of flavor substances

物质阈值较高，通常不会对风味产生较大影响；羧酸类物质可赋予酸味和奶酪风味[24]；杂环化合物可赋予坚果香，使酸马乳风味更为丰富。发酵菌种及工艺差异使 2 种酸马乳中非挥发性风味物质组成和变化差异较大。杜晓敏等[25] 研究发现，酸马奶发酵期间风味物质趋向于生成小分子类的酸类、醇类及酯类等物质。同时李宏强[26] 研究发现，牦牛乳中酮类和酯类较多，而酮类和醛类物质会随着冷藏时间延长在原料乳中均逐渐增加，本研究结果与之相似。

2.3.3 特征风味物质分析 采用相对气味活度法（ROAV）来评价样品的风味，ROAV 值的大小可表示挥发性化合物对整体风味或香气的贡献程度[27]。通常 ROAV≥1 的物质为关键风味物质，ROAV 介于 0.1 至 1 的物质为协同修饰贡献风味物质。

以 ROAV 值≥0.1 为条件可在 3 种样品中筛选出 15 种风味物质，结果如表 4 所示。3 种样品中共有的关键风味物质有 3 种，分别为 2,3-丁二酮、2-十一烷和庚醛，为乳品提供了共有香气黄油味、奶香、乳酪味、青草味及脂肪味。鲜马乳中关键风味物质分别为 2,3-丁二酮、2-十一烷、庚醛、1-辛烯-3-酮、丙烯酸乙酯及 2-甲基丁醛，共 6 种。其中，1-辛烯-3-酮具有蘑菇味；丙烯酸乙酯具有果香、甜香和醇味；2-甲基丁醛具有可可味和杏仁香味，根据 ROAV 值可推测 2-甲基丁醛为鲜马乳中特征风味物质。此外，还有 4 种物质起修饰作用，分别为 2-戊基呋喃、2-庚酮、乙醛及壬醛。对照酸马乳中关键风味物质分别为 2,3-丁二酮、2-十一烷、庚醛、2-戊基呋喃、1-辛烯-3-酮及 2-壬烯醛，共 6 种。其中 2-戊基呋喃可为样品提供青草味和蔬菜味，2-壬烯醛可为样品提供脂肪味及黄瓜味，2-壬烯醛为对照酸马乳中特征风味物

表 4 关键风味物质气味活度值及香气描述

Table 4 Odor activity value and aroma description of key flavor substances

序号	物质名称	阈值（mg/L）	ROAV			香气特征[29−31]
			鲜马乳	对照酸马乳	试验酸马乳	
1	2,3-丁二酮	0.002	66.67	100.00	79.07	黄油味
2	2-十一烷	0.0043	42.91	16.42	43.30	奶油香、乳酪味
3	庚醛	0.003	5.67	31.59	2.13	青草味、脂肪味
4	2-戊基呋喃	0.006	0.16	58.94	1.23	青草味、蔬菜味
5	异戊醇	1.69	0.05	0.05	0.59	焦香味、麦芽香味
6	1-辛烯-3-酮	0.005	1.49	6.17	0.44	蘑菇味
7	2-庚酮	0.75	0.87	0.34	0.19	甜香、果香
8	乙醛	1.50	0.21	0.20	0.12	果香、青草味
9	丙烯酸乙酯	0.0066	1.05	0.35	0.10	果香、甜香、醇味
10	壬醛	1.00	0.15	0.08	0.02	甜香、柑橘香、玫瑰香
11	2-壬烯醛	0.0002	0.02	20.50	0.01	脂肪味、黄瓜味
12	丙醛	1.00	0.04	0.24	0.01	果香、青草味
13	2-甲基丁醛	0.001	4.50	0.42	0.00	可可味、杏仁味
14	2,4-壬二烯醛	0.02	0.00	0.14	0.00	黄瓜味、青草味
15	2-乙基呋喃	2.30	0.01	0.15	0.00	甜香、咖啡香气

质。此外还有 7 种修饰风味物质，分别为 2-庚酮、乙醛、丙烯酸乙酯、丙醛、2-甲基丁醛、2,4-壬二烯醛和 2-乙基呋喃。从中可以得出，对照酸马乳样品风味更为复杂，但其脂肪味及蔬菜味偏重，可能会影响整体风味协调性。试验酸马乳中关键风味物质分别为 2,3-丁二酮、2-十一烷、庚醛、2-戊基呋喃，共 4 种，具有黄油味、奶香、乳酪味、青草味、脂肪味及蔬菜味等香气，此外异戊醇、1-辛烯-3-酮、2-庚酮、乙醛、丙烯酸乙酯 5 种物质在试验酸马乳风味中起修饰作用，与对照酸马乳相比其关键风味物质及起修饰作用的风味物质较少，但其整体味道更为协调和统一，而从食品工业的角度看，该表现可能意味着可控性强、稳定性高和风味导向更为清晰。王欣璐等[28]研究发现，燕麦发酵乳经发酵之后，酮类物质如 2,3-丁二酮、1-辛烯-3-酮等显著增多，是主要的风味贡献物质，本研究结果与之相似。

3　结论

本文以基于新疆优良酵母菌发酵酸马乳为研究对象，探究了其游离氨基酸、脂肪酸及风味物质含量，并将其与鲜马乳和对照酸马乳进行了对比。研究发现，与鲜马乳相比，试验酸马乳中总游离氨基酸含量升高；饱和脂肪酸相对含量无显著性变化，单不饱和脂肪酸相对含量下降，多不饱和脂肪酸相对含量显著上升；挥发性风味物质数目增多，其中酯类、醇类、羧酸类及杂环化合物相对含量上升。与对照酸马乳相比，试验酸马乳中游离氨基酸含量无显著性差异，必需氨基酸含量显著下降；饱和脂肪酸相对含量显著降低，总不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸相对含量显著上升，其中 α-亚麻酸（19.72%）相对含量显著上升，但其亚油酸（9.32%）相对含量显著下降，脂肪酸比例更为健康；风味物质总数减少，关键风味物质分别为 2,3-丁二酮、2-十一烷、庚醛和 2-戊基呋喃，风味物质多样性相对较低但与对照酸马乳相比整体风味更为协调。同时，试验酸马乳中组氨酸（1297.68 mg/L）、鸟氨酸（545.38 mg/L）、赖氨酸（1021.10 mg/L）和 γ-氨基丁酸含量（1269.46 mg/L）及α-亚麻酸相对含量均显著高于鲜马乳和对照酸马乳，具有高组氨酸、鸟氨酸、赖氨酸、γ-氨基丁酸和高 α-亚麻酸的特点。综上所述，基于新疆优良酵母混菌发酵马乳可提高酸马乳营养价值，平衡风味特征，为酸马乳产品的开发和功能性乳制品的挖掘提供了一定的理论依据。

© 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] 许晶辉，王朝霞，张富新，等. 驴乳和马乳蛋白质组分及其消化特性[J]. 乳业科学与技术，2020，43(5)：1−7. [XU Jinghui, WANG Zhaoxia, ZHANG Fuxin, et al. Protein composition and digestive characteristics of donkey and horse milk[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2020, 43(5): 1−7.]

[2] NESTEL P J, MORI T A. Dairy foods: Beneficial effects of fermented products on cardiometabolic health[J]. Current Nutrition Reports, 2023, 12(3): 478−485.

[3] 叶乐，王越男，刘雨佳，等. 蒙古马乳营养成分检测与特征分析[J]. 中国乳品工业，2022，50(10)：23−29. [YE Le, WANG Yuenan, LIU Yujia, et al. Determination and characteristic analysis of nutritional components in Mongolian horse milk[J]. China Dairy Industry, 2022, 50(10): 23−29.]

[4] ABIAD M G, AJJOUR C, KASSAIFY Z, et al. Preliminary physiological, phenotypic, and probiotic characterization of *Lactobacillus* strains isolated from Anbaris-traditional Lebanese fermented dairy product[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 1266−1278.

[5] 陈宝蓉，曹洪宇，张雨萌，等. 不同热处理对马乳中蛋白及风味物质的影响[J]. 食品科学，2024，45(17)：191−198. [CHEN Baorong, CAO Hongyu, ZHANG Yumeng, et al. Effects of different heat treatments on proteins and flavor compounds in horse milk[J]. Food Science, 2024, 45(17): 191−198.]

[6] YU Yamin, CHEN Shuang, NIE Yao, et al. Optimization of an intra-oral solid-phase microextraction (SPME) combined with comprehensive two-dimensional gas chromatography–time-of-flight mass spectrometry (GC×GC-TOFMS) method for oral aroma compounds monitoring of Baijiu[J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132502.

[7] CHEN Zhipeng, TANG Haiqing, OU Changrong, et al. A comparative study of volatile flavor components in four types of Zaoyu using comprehensive two-dimensional gas chromatography in combination with time-of-flight mass spectrometry[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): e15230.

[8] 谢希杨，孙万成，罗毅皓. 脂肪酸鉴定及其在牦牛乳、牦牛肉品质分析中的应用[J]. 中国油脂，2021，46(3)：134−141. [XIE Xiyang, SUN Wancheng, LUO Yihao. Fatty acid identification and its application in quality analysis of yak milk and yak meat[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(3): 134−141.]

[9] O'CALLAGHAN T F, O'DONOVAN M, MURPHY J P, et al. Evolution of the bovine milk fatty acid profile–From colostrum to milk five days post parturition[J]. International Dairy Journal, 2020, 104: 104655.

[10] 孙哲航. 酸马奶源优势菌群与特征风味的探讨及代谢组学研究[D]. 杭州：浙江工商大学，2019. [SUN Zhehang. Investigation of dominant microbiota and characteristic flavors in koumiss and metabolomics study[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019.]

[11] BARBIERI F, TABANELLI G, COMAS-BASTÉ O, et al. Improvement of the safety of artisanal Spanish fermented sausages: Spotlight on the role of bacteriocinogenic *Lactiplantibacillus paraplantarum* against a *Companilactobacillus alimentarius* histaminogenic strain[J]. Food Control, 2025, 168: 110962.

[12] ZHANG Huang, MO Lan, CHEN Xi, et al. Effect of exogenous free N^{ε}-(carboxymethyl) lysine on diabetes-associated cognitive dysfunction: Neuroinflammation, and metabolic disorders[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(5): 2970−2981.

[13] 徐心怡，张斌，吴晓玉，等. L-鸟氨酸发酵菌种的代谢工程研究进展[J]. 微生物学报，2020，60(3)：421−430. [XU Xinyi, ZHANG Bin, WU Xiaoyu, et al. Advances in metabolic engineering of L-ornithine producing strains[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2020, 60(3): 421−430.]

[14] 赵国群，关军锋. 高产 γ-氨基丁酸酿酒酵母的筛选及其在梨酒酿制中的应用[J]. 食品工业科技，2015，36(23)：173−176,181.

［ZHAO Guoqun, GUAN Junfeng. Screening of *Saccharomyces cerevisiae* with high γ-aminobutyric acid production and its application in pear wine brewing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(23): 173−176,181.］
［15］杜一星, FATTORINI G, CATALANO M, 等. γ-氨基丁酸转运体 1 在大脑皮质小胶质细胞中的表达[J]. 神经损伤与功能重建, 2020, 15(12): 761.［DU Yixing, FATTORINI G, CATALANO M, et al. Expression of γ-aminobutyric acid transporter 1 in microglia of cerebral cortex[J]. Neural Injury and Functional Reconstruction, 2020, 15(12): 761.］
［16］LI Yandie, WANG Tong, LI Shan, et al. Influence of GABA-producing yeasts on cheese quality, GABA content, and the volatilome[J]. LWT, 2022, 154: 112766.
［17］魏黎阳, 张九凯, 陈颖. 不同哺乳动物乳的营养成分及生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 365−374.［WEI Liyang, ZHANG Jiukai, CHEN Ying. Research progress on nutritional components and bioactivities of milk from different mammals[J]. Food Science, 2023, 44(5): 365−374.］
［18］SAM S M, MENSAH S I. The classification of fatty acids of lipids from seeds of *Persea grattisima* Miller and *Chrysophyllum albidum* G. Don[J]. Ife Journal of Science, 2017, 19(2): 447.
［19］彭佳佳, 张小军, 田鑫, 等. 核桃内种皮游离氨基酸呈味特征及其营养评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 226−232.［PENG Jiajia, ZHANG Xiaojun, TIAN Xin, et al. Taste characteristics and nutritional evaluation of free amino acids in walnut pellicle[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 226−232.］
［20］LEE S H, KIM Y B, KIM D H, et al. Dietary soluble flaxseed oils as a source of omega-3 polyunsaturated fatty acids for laying hens[J]. Poultry Science, 2021, 100(8): 101276.
［21］TUO Yanfeng, ZHANG Lanwei, HAN Xue, et al. *In vitro* assessment of immunomodulating activity of the two *Lactobacillus strains* isolated from traditional fermented milk[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2011, 27(3): 505−511.
［22］丹彤, 张和平. 发酵乳中风味物质的研究进展[J]. 中国食品学报, 2018, 18(11): 287−292.［DAN Tong, ZHANG Heping. Research progress on flavor compounds in fermented milk[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(11): 287−292.］
［23］WURIHAN, BAO L S, HASIGAOWA, et al. Bacterial community succession and metabolite changes during the fermentation of koumiss, a traditional Mongolian fermented beverage[J]. International Dairy Journal, 2019, 98: 1−8.
［24］马艳丽, 曹雁平, 杨贞耐, 等. SPME-GC-MS 检测不同中西方奶酪的挥发性风味物质及比较[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 103−107.［MA Yanli, CAO Yanping, YANG Zhennai, et al. Detection and comparison of volatile flavor compounds in different Chinese and Western cheeses by SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2013, 34(20): 103−107.］
［25］杜晓敏, 刘文俊, 张和平. 传统酸马奶发酵过程中挥发性风味物质动态变化研究[J]. 中国乳品工业, 2017, 45(5): 4−9.［DU Xiaomin, LIU Wenjun, ZHANG Heping. Study on dynamic changes of volatile flavor compounds during fermentation of traditional koumiss[J]. China Dairy Industry, 2017, 45(5): 4−9.］
［26］李宏强. 甘南地区冷藏和发酵牦牛乳中风味物质的鉴定及分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023.［LI Hongqiang. Identification and analysis of flavor compounds in refrigerated and fermented yak milk from Gannan region[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023.］
［27］李延华, 王伟军, 张兰威, 等. 发酵乳中风味物质的研究进展[J]. 中国酿造, 2008, 14(8): 8−11.［LI Yanhua, WANG Weijun, ZHANG Lanwei, et al. Research progress on flavor compounds in fermented milk[J]. China Brewing, 2008, 14(8): 8−11.］
［28］王欣璐. 燕麦发酵乳的制备及品质影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.［WANG Xinlu. Study on preparation and quality influencing factors of oat fermented milk[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.］
［29］杨行, 王莉, 郭丽君, 等. 新疆喀什地区传统酸奶中乳酸菌的分离鉴定及产酸能力评价[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(2): 102−107.［YANG Xing, WANG Li, GUO Lijun, et al. Isolation, identification and acid-producing ability evaluation of lactic acid bacteria from traditional yogurt in Kashgar region, Xinjiang[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(2): 102−107.］
［30］黄业传, 贺稚非, 李洪军, 等. 皮下脂肪和肌内脂肪对猪肉风味的作用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(10): 2118−2130.［HUANG Yechuan, HE Zhifei, LI Hongjun, et al. Roles of subcutaneous fat and intramuscular fat in pork flavor[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(10): 2118−2130.］
［31］NAVRÁTILOVÁ P. Content of nutritionally important components in mare milk fat[J]. Mljekarstvo, 2018: 282−294.