

基于GC-MS技术的水牛乳与奶牛乳中长链脂肪酸组成差异分析及掺假识别方法初探

黄丽, 彭芹, 杨攀, 施纵策, 王睿敏, 黄文婷, 黄子珍, 罗凤棉, 姜佳齐, 李玲*

(广西壮族自治区水牛研究所, 广西南宁 530001)

摘要: 为了筛选水牛乳中特征性脂肪酸标志物, 并建立识别其是否掺入奶牛乳的检测方法。该研究采用气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS) 对两种乳中的脂肪酸组成进行了系统比较, 并结合正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA) 筛选差异性脂肪酸, 基于差异脂肪酸构建脂肪酸比值指标, 筛选出特征性比值, 以此建立多指标置信区间雷达图用于牛乳的证伪鉴定。结果表明: 两种乳样中均检测出 50 种脂肪酸, 牛乳的总不饱和脂肪酸 (67.14%) 高于奶牛乳 (61.94%) ($P<0.05$), 而奶牛乳的总饱和脂肪酸 (38.07%) 则高于水牛乳 (32.85%) ($P<0.05$); OPLS-DA 模型共筛选出 23 种差异性脂肪酸 (VIP>1), 其中 C22:1T、C20:3、C22:5n-6 等 13 种脂肪酸含量显著高于奶牛乳 ($P<0.05$); C13:0/C22:5n-6 和 C14:1/C22:5n-6 双指标脂肪酸比值的置信区间不重叠且差异最大。综上所述, 有 13 种脂肪酸为水牛乳的潜在特征性脂质成分, C13:0/C22:5n-6 和 C14:1/C22:5n-6 在该实验条件下可有效区分水牛乳和奶牛乳, 可作为识别水牛乳中掺入奶牛乳的潜在参考指标, 具备初步的掺假识别应用价值, 为水牛乳的品质鉴定和掺假识别提供了参考依据。

关键词: 水牛乳; 奶牛乳; 脂肪酸; 差异分析

文章编号: 1673-9078(2026)5-357-366

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.1910

GC-MS Analysis of Medium- and Long-Chain Fatty Acids in Buffalo and Cow Milk for Adulteration Detection

HUANG Li, PENG Qin, YANG Pan, SHI Zongce, WANG Ruimin, HUANG Wenting, HUANG Zizhen,

LUO Fengmian, JIANG Jiaqi, LI Ling*

(Guangxi Buffalo Research Institute, Nanning 530001, China)

Abstract: Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to systematically compare the medium- and long-chain fatty acid compositions of buffalo milk and cow milk, with the aim of identifying characteristic fatty acids in buffalo milk and establishing a method for detecting adulteration with cow milk. Differential fatty acids were screened using orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA), and fatty acid ratio indices were constructed based on these components. Characteristic ratio indices were subsequently selected to establish a multi-index confidence interval radar chart for the authentication of buffalo milk. A total of 50 fatty acids were detected in both milk types. The total unsaturated fatty acid content in buffalo milk (67.14%) was

引文格式:

黄丽, 彭芹, 杨攀, 等. 基于GC-MS技术的水牛乳与奶牛乳中长链脂肪酸组成差异分析及掺假识别方法初探[J]. 现代食品科技, 2026, 42(5): 357-366.

HUANG Li, PENG Qin, YANG Pan, et al. GC-MS analysis of medium- and long-chain fatty acids in buffalo and cow milk for adulteration detection [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 357-366.

收稿日期: 2024-12-24; 修回日期: 2025-06-09; 接受日期: 2026-06-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1600102); 广西科技重大专项 (桂科 AA22068099-7); 南宁市创新创业领军人才“邕江计划”资助项目 (2021018)

作者简介: 黄丽 (1986-), 女, 硕士, 高级畜牧师, 研究方向: 水牛乳特质成分活性解析, E-mail: 564979789@qq.com

通讯作者: 李玲 (1984-), 女, 硕士, 正高级畜牧师, 研究方向: 水牛食品科学, E-mail: liling2010@163.com

significantly higher than that in cow milk (61.94%) ($P<0.05$), whereas the total saturated fatty acid content was higher in cow milk (38.07%) than in buffalo milk (32.85%) ($P<0.05$). Based on the OPLS-DA model, 23 differential fatty acids (VIP>1) were identified, among which 13 fatty acids, including C22:1T, C20:3, and C22:5n-6, were significantly more abundant in buffalo milk than in cow milk ($P<0.05$). The confidence intervals of the two fatty acid ratio indices, C13:0/C22:5n-6 and C14:1/C22:5n-6, did not overlap and exhibited the largest differences between the two milk types. These results indicate that the two ratio indices can effectively distinguish buffalo milk from cow milk under the experimental conditions applied. The identified fatty acids and ratio indices show potential as reference markers for the detection of buffalo milk adulteration and may provide practical value for milk quality authentication.

Key words: buffalo milk; cow milk; fatty acids; difference analysis

乳制品是蛋白质、脂肪、矿物质和维生素等营养物质的优质来源,其中水牛乳的蛋白质、脂肪、矿物质和维生素含量均高于奶牛乳,被誉为世界第二大乳源^[1]。脂肪酸(Fatty Acid, FA)是乳脂肪的重要组成部分,对乳制品的口感、质地、风味及健康效应具有关键影响。目前,在牛奶中已鉴定出 400 多种脂肪酸^[2],按碳链长度可以分为:(1)短链脂肪酸(Short-Chain Fatty Acid, SCFA)-含有 2~6 个碳原子。(2)中链脂肪酸(Medium-Chain Fatty Acid, MCFA)-含有 7~12 个碳原子;(3)长链脂肪酸(Long-Chain Fatty Acid, LCFA)-碳原子数>12。按饱和程度可以分为饱和脂肪酸(Saturated Fatty Acid, SFA)、仅有 1 个碳碳双键的单不饱和脂肪酸(Monounsaturated Fatty Acid, MUFA)和含 2 个或多个碳碳双键的多不饱和脂肪酸(Polyunsaturated Fatty Acid, PUFA)^[3]。

脂肪酸不仅决定了乳制品的风味和质地,还与人体健康密切相关。长链不饱和脂肪酸(如 ω -3 和 ω -6 系列)在心血管健康、神经发育和免疫调节中发挥重要作用, Lundgren 等^[4]证明其对婴幼儿视觉神经系统的发育具有积极意义;而饱和和长链脂肪酸的过量摄入则可能与心血管疾病等健康问题相关。因此,深入研究水牛乳与奶牛乳中长链脂肪酸的组成,对于评估二者的营养价值和健康效应具有重要意义。

近年来,关于牛乳中长链脂肪酸的研究主要集中在其组成、代谢调控、营养价值、检测方法及环境因素的影响等方面,为优化乳制品质量、提升健康效益以及制定精准营养方案提供了科学依据。罗洁等^[5]发现,奶牛品种对乳脂肪酸组成和含量影响显著,水牛乳和牦牛乳的不饱和脂肪酸含量普遍高于黑白花牛乳,其中水牛乳因脂肪球粒径较大,其长链脂肪酸含量也最高。Cuibus 等^[6]报道水牛乳中的共轭亚油酸及长链脂肪酸远高于奶牛乳,而 Rodríguez-Bermúdez 等^[7]指出,日粮、胎次、泌乳阶段及季节等因素均会显著影响牛乳脂肪酸组成。Techeira 等^[8]的研究表明,不同饲

喂系统可迅速改变奶牛体内脂肪酸的组成,优化饲养策略后,不饱和及共轭脂肪酸相对浓度升高,从而改善了奶牛健康及相关技术指标。

由于水牛乳具有高蛋白、高脂肪和丰富功能性脂肪酸,其市场价格远高于奶牛乳。水牛乳因其营养成分丰富、产量较低,以及加工、储运成本较高等因素,通常市场中定价高于奶牛乳,不法商家为降低成本谋取暴利而常掺入奶牛乳^[9]。此举不仅稀释了水牛乳的营养价值,还可能引入乳化剂或化学添加剂,造成食品安全隐患。因此,建立高效的掺假检测方法十分迫切。目前,已有电泳法^[10]、PCR 基因检测^[9]、液相色谱及光谱分析等方法,各具优势,但均存在一定局限。

气相色谱-质谱联用(Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)技术以其高灵敏度和高分辨率优势,能够对复杂混合物中的脂肪酸进行有效分离和鉴定^[11]。王峰恩^[12]通过优化 GC-MS 条件,建立了可同时检测 69 种脂肪酸的高通量方法,其灵敏度、线性范围及精确度均表现优异。本研究旨在利用 GC-MS 技术对水牛乳与奶牛乳中长链脂肪酸进行比较分析,为两者的营养特性及品质评价提供数据支持,并探索建立用于乳品真实性判别的技术路径,为乳品真实性鉴定方法构建提供技术手段参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料乳

样本均为泌乳期 120~200 d 的新鲜乳样。乳样分装 50 mL 离心管后放入干冰盒,运至实验室并储存于 -80 °C,待测中长链脂肪酸。乳样按照随机采样法从广西水牛研究所养殖场(37 份单头水牛乳)和皇氏田东牧场(38 份单头奶牛乳)收集。筛选后,水牛乳和奶牛乳的理化指标符合标准限值和 3 倍标准差判别法要求,选取各 6 份样本进行中长链脂肪酸检测。

1.1.2 试剂

甲醇(色谱纯),购自美国 Merck 公司;C19:0 标准品,购自美国 Sigma-Aldrich 公司;52 种脂肪酸甲酯混标,购自上海安谱实验科技股份有限公司;正己烷(色谱纯),购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.1.3 仪器与设备

ThermoTrace1300 气相色谱-ISQ7000 质谱联用仪,美国 Thermo 公司;TGL-16K 离心机,湖南湘仪实验室仪器有限公司;Scienti-12 组织研磨仪,宁波新芝生物科技股份有限公司;VOTEX-5 涡旋仪,其林贝尔有限公司;ZLS-1 旋转蒸发仪,湖南赫西仪器有限公司;QHZ-98A 全温度振荡培养箱,太仓市华美生化仪器厂。

1.2 方法

1.2.1 GC-MS样品前处理

取 0.5 mL 样品至 20 mL 的玻璃离心管中;加入 5 mL 10% (φ) 乙酰氯甲醇和 1 mL 正己烷和 5 μ L 内标(C19:0, 10 mg·mL⁻¹);在恒温振荡摇床 95 $^{\circ}$ C、250 r·min⁻¹下反应 4 h。加入 6 mL 的 6% (质量分数)的碳酸钾溶液,涡旋 2 min。离心取正己烷层,旋转蒸发除去正己烷。加入 100 μ L 正己烷,涡旋 1 min。12 000 r·min⁻¹ 离心 5 min,取上清于进样瓶中待检。

1.2.2 色谱条件

色谱柱:为 DB-5ms (60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m);升温程序:柱温 140 $^{\circ}$ C 保持 5 min,以 10 $^{\circ}$ C·min⁻¹ 升至 180 $^{\circ}$ C,以 2 $^{\circ}$ C·min⁻¹ 升至 210 $^{\circ}$ C 保持 3 min,以 5 $^{\circ}$ C·min⁻¹ 升至 280 $^{\circ}$ C,保持 15 min;载气(He)流量 1.5 mL·min⁻¹;进样量 1 μ L,进样温度 260 $^{\circ}$ C,分流比 10:1。

1.2.3 质谱条件

接口温度 280 $^{\circ}$ C;离子源温度 230 $^{\circ}$ C;电离方式:EI⁺, 70 eV;扫描方式:全扫描;质量范围 m/z 33~550;利用 NIST2017 谱库进行物质定性。

1.2.4 脂肪酸的定性定量

脂肪酸甲酯(Fatty Acid Methyl Ester, FAME)的定性依据是其在 GC 上的保留时间以及通过目标峰的全离子流图与 NIST 库中的标准质谱图对比来鉴定未知化合物。FAME 的定量是根据所选定量离子的峰面积,并通过内标法测定。测定的 FAME 为乳中的绝对质量浓度(ng·mL⁻¹),数据经转化系数校正为 FA 后,又归一化为相对含量(FA 质量百分比,%),这样可以有效减少由于乳脂上浮取样不均匀造成的误差,并便于和文献中的数据进行比较。

1.2.5 数据处理

本数据在 Thermo 数据软件 Chromeleon 7.0 下对 GC-MS 数据进行特征峰提取,并根据 NIST17 数据库对数据进行整理,在 Excel 软件中进行后期编辑,将最终结果组织为二维数据矩阵,包含保留时间(Retention Time, RI)、观察量(样本)和峰强等信息。采用 IBM SPSS Statistics 20 进行独立样本 T 检验,GraphPad Pism 9.5.0 绘制柱状图及堆积图, SIMCA 14.1 进行主成分分析及正交偏最小二乘分析判别,主成分分析图(Principal Component Analysis, PCA)、OPLS-DA (Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA) 得分图和热图通过图图云平台绘制。

2 结果与讨论

2.1 乳中长链脂肪酸谱的整体情况

利用 GC-MS 法检测了水牛乳(Buffalo Milk, BM)和奶牛乳(Cow Milk, CM)中长链脂肪酸组成。表 1 为两种生乳中 50 种脂肪酸的定性定量结果。两种牛乳共有的主要脂肪酸包括肉豆蔻酸、棕榈酸、反式异油酸、岩芹酸、反式岩芹酸、亚油酸、 α -亚麻酸以及反式亚油酸等。

尤其注意的是水牛乳中的油酸含量高达 6.52%,而奶牛乳中仅为 0.80%。油酸作为 ω -9 单不饱和脂肪酸,它能够减轻炎症症状,加速伤口愈合,并且对胰岛素抵抗和 2 型糖尿病发挥积极作用^[13]。在心血管健康方面,油酸作为人类饮食中的主要单不饱和脂肪酸,可以降低低密度脂蛋白和血压,同时提升高密度脂蛋白水平,进而有效改善心血管功能。在免疫系统中,油酸可激活 B 细胞和 T 细胞,增强免疫功能,还能减少活性氧,改善代谢功能障碍^[14]。此外,油酸还能使乳脂更加柔软和易于延展,并赋予乳制品独特风味,高油酸牛乳的乳制品如黄油和冰淇淋口感更顺滑,而且具有较低的氧化速率和更好的稳定性,这意味着其保质期可以延长^[15]。EPA 在水牛乳(1.12%)中的含量显著高于奶牛乳(0.52%) ($P<0.05$),它对心血管健康有积极作用,摄入 3~4 g·d⁻¹ 的 EPA 可使血甘油三酯水平降低 20%~50%^[16]。Radzikowska 等^[17]通过分析牛乳脂肪球膜中的不饱和脂肪酸发现,DHA、EPA 和 CLA 这些多不饱和脂肪酸可调节免疫细胞活性,增强巨噬细胞吞噬能力,促进抗炎因子分泌,从而改善免疫功能并减轻炎症。

水牛乳中饱和脂肪酸的总含量为 32.85%;奶牛乳中饱和脂肪酸的含量为 38.07%。水牛乳中不饱和脂肪酸的含量为 67.14%;奶牛乳中不饱和脂肪酸的总含量

为 61.94%。此前，张依等^[18]的研究中证明了除了饱和脂肪酸外，水牛乳中的单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸、反式脂肪酸、游离脂肪酸均显著高于奶牛乳 ($P<0.05$)；潘斌^[19]的研究中水牛乳中不饱和脂肪酸总量 (31%) 高于普通奶牛乳 (26%)，饱和脂肪酸含量 (69%) 低于普通奶牛乳 (74%)。从营养学角度来看，水牛乳中较低比例的饱和脂肪酸和较高比例的不饱和脂肪酸是更健康的饮食结构^[20]。为了提高不饱和脂肪酸的比例，Gagliostro 等^[21]的研究中通过对奶牛喂食富含多不饱和脂肪酸 (PUFA) 的补充剂 (向日葵籽、向日葵油和鱼油) 后，牛奶中的共轭亚油酸、油酸、 α -亚麻酸等多种不饱和脂肪酸的含量显著提高。

表 1 水牛乳和奶牛乳中长链脂肪酸谱
Table 1 Long-chain fatty acid profiles in buffalo and cow milks

	中文名	脂肪酸	水牛乳 /%	奶牛乳 /%	FC	<i>P</i> 值	VIP
ECSFA-偶数链脂肪酸	辛酸	C8:0	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	1.05	0.904	0.083
	癸酸	C10:0	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	1.19	0.607	0.240
	十二烷酸 / 月桂酸	C12:0	3.99 ± 0.46 ^B	6.47 ± 0.92 ^A	1.62	0.001	1.352
	十四烷酸 / 肉豆蔻酸	C14:0	14.61 ± 5.35	17.28 ± 7.38	1.18	0.490	0.438
	十六烷酸 / 棕榈酸	C16:0	10.89 ± 8.49	10.24 ± 4.61	0.94	0.873	0.127
	十八烷酸 / 硬脂酸	C18:0	0.08 ± 0.05	0.04 ± 0.01	0.55	0.134	0.866
	二十烷酸 / 花生酸	C20:0	0.12 ± 0.03	0.10 ± 0.07	0.82	0.517	0.396
	二十四烷酸 / 木蜡酸	C24:0	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	1.77	0.090	0.807
	Σ ECSFA- 偶数链脂肪酸		29.69 ^B	34.15 ^A			
OCSFA-奇数链脂肪酸	十一烷酸	C11:0	0.05 ± 0.01 ^B	0.15 ± 0.02 ^A	3.32	0.000	1.501
	十三烷酸	C13:0	0.13 ± 0.02 ^B	0.25 ± 0.04 ^A	1.90	0.000	1.421
	十五烷酸	C15:0	1.83 ± 0.20 ^B	2.32 ± 0.35 ^A	1.27	0.019	1.021
	十七烷酸 / 珠光脂酸	C17:0	0.90 ± 0.08	1.01 ± 0.16	1.11	0.202	0.566
	二十一烷酸	C21:0	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.01	1.13	0.528	0.244
	二十二烷酸 / 山俞酸	C22:0	0.18 ± 0.02 ^A	0.13 ± 0.02 ^B	0.72	0.001	1.337
	二十三烷酸	C23:0	0.04 ± 0.00 ^A	0.02 ± 0.00 ^B	0.60	0.000	1.467
	Σ OCSFA- 奇数链脂肪酸		3.16 ^B	3.92 ^A			
MUFA-单不饱和和脂肪酸	十四碳烯酸 (反-9) / 反式肉豆蔻烯酸	C14:1T	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	1.92	0.015	1.080
	十四碳烯酸 (顺-9) / 肉豆蔻烯酸	C14:1	0.76 ± 0.09 ^B	1.42 ± 0.21 ^A	1.87	0.000	1.411
	十五碳烯酸 (反-10)	C15:1T	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.01	1.26	0.498	0.361
	十五碳烯酸 (顺-10)	C15:1	0.04 ± 0.01 ^B	0.06 ± 0.01 ^A	1.35	0.012	1.068
	十六碳烯酸 (反-9) / 反棕榈油酸	C16:1T	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.01	1.48	0.308	1.068
	十六碳烯酸 (顺-9) / 棕榈油酸	C16:1	2.36 ± 0.31	2.79 ± 0.42	1.18	0.072	0.782
	十七碳烯酸 (反-10)	C17:1T	0.25 ± 0.03 ^B	0.32 ± 0.05 ^A	1.29	0.012	1.066
	十八碳烯酸 (反-6) / 反式岩芹酸	C18:1T	9.97 ± 7.58	7.56 ± 4.23	0.76	0.512	0.382
	十八碳烯酸 (顺-6) / 岩芹酸	C18:1	6.87 ± 1.91	5.81 ± 1.95	0.85	0.362	0.536
	十八碳烯酸 (反-9) / 反油酸	C18:1T	0.04 ± 0.00 ^B	0.07 ± 0.01 ^A	1.68	0.002	1.310
	十八碳烯酸 (顺-11) / 异油酸	C18:1	2.62 ± 1.61	2.11 ± 0.35	0.80	0.477	0.388
	十八碳烯酸 (顺-9) / 油酸	C18:1	6.52 ± 8.46	0.80 ± 0.51	0.12	0.159	0.707
	十七碳烯酸 (顺-10)	C17:1	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	1.11	0.731	0.225
	十八碳烯酸 (反-11) / 反异油酸	C18:1T	6.62 ± 1.14	12.16 ± 6.09	1.84	0.077	0.884
	十九碳烯酸 (反-10)	C19:1T	0.22 ± 0.03	0.27 ± 0.06	1.25	0.070	0.829
	十九碳烯酸 (反-7)	C19:1T	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.01	1.24	0.242	0.503
	二十碳烯酸 (顺-11)	C20:1	0.50 ± 0.04 ^A	0.33 ± 0.06 ^B	0.67	0.000	1.403
	二十碳烯酸 (反-11)	C20:1T	0.26 ± 0.05 ^A	0.16 ± 0.02 ^B	0.62	0.002	1.376
	二十二碳烯酸 (顺-13) / 芥酸	C22:1	0.20 ± 0.02 ^A	0.14 ± 0.02 ^B	0.71	0.000	1.389
	二十二碳烯酸 (反-13) / 巴惟酸	C22:1T	0.18 ± 0.02 ^A	0.01 ± 0.00 ^B	0.05	0.000	1.569
	Σ MUFA- 单不饱和脂肪酸		37.46 ^A	34.08 ^B			

续表1						
	中文名	脂肪酸	水牛乳 /%	奶牛乳 /%	FC	P 值
PUFA-多不饱 和脂肪酸	二十四碳烯酸（顺-15）/神经酸	C24:1	0.16 ± 0.01 ^A	0.11 ± 0.02 ^B	0.74	0.002
	十八碳三烯酸（顺-6,9,12）/γ-亚麻酸	C18:3	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.01	1.19	0.337
	十八碳二烯酸（顺-9,12）/亚油酸/CLA	C18:2	16.01 ± 10.14	17.36 ± 7.50	1.08	0.798
	十八碳三烯酸（顺-9,12,15）/α-亚麻酸	C18:3	3.19 ± 0.54	3.92 ± 0.74	1.23	0.079
	十八碳二烯酸（反-1,12）/反亚油酸	C18:2T	6.96 ± 0.62 ^A	4.34 ± 1.24 ^B	0.62	0.001
	二十碳四烯酸（顺-5,8,11,14）/花生四烯酸	C20:4	0.22 ± 0.02	0.20 ± 0.03	0.94	0.375
	二十碳五烯酸（顺-5,8,11,14,17）/EPA	C20:5	1.12 ± 0.19 ^A	0.52 ± 0.06 ^B	0.47	0.000
	二十碳三烯酸（顺-11,14,17）	C20:3	0.44 ± 0.05 ^A	0.25 ± 0.05 ^B	0.58	0.000
	二十碳三烯酸（顺-8,11,14）/HOMO-γ-亚麻酸	C20:3	0.15 ± 0.05 ^A	0.06 ± 0.01 ^B	0.41	0.010
	二十碳二烯酸（顺-11,14）	C20:2	0.03 ± 0.00	0.09 ± 0.07	2.87	0.112
	二十二碳六烯酸（顺-4,7,10,13,16,19）/DHA	C22:6	0.05 ± 0.00	0.17 ± 0.16	3.66	0.087
	二十二碳五烯酸（顺-7,10,13,16,19）/DPA	C22:5n-3	0.72 ± 0.14 ^A	0.40 ± 0.27 ^B	0.55	0.024
	二十二碳五烯酸（顺-7,10,13,16,19）/DPA	C22:5n-6	0.61 ± 0.13 ^A	0.26 ± 0.05 ^B	0.43	0.001
	二十二碳四烯酸（顺-7,10,13,16）	C22:4	0.004 ± 0.003 ^B	0.11 ± 0.02 ^A	24.7	0.000
	二十二碳二烯酸（顺-13,16）	C22:2	0.01 ± 0.02	0.02 ± 0.01	1.17	0.801
	Σ PUFA-多不饱和脂肪酸		29.68 ^A	27.86 ^B		

注：不同大写字母表示同一行差异显著（ $P<0.05$ ）；FC 值为差异倍数，由奶牛乳含量 / 水牛乳含量计算得到。

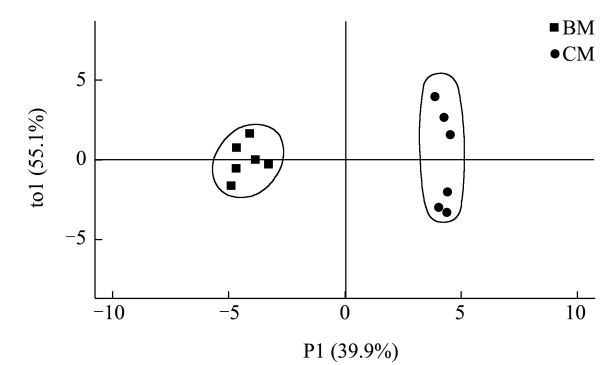


图 1 水牛乳和奶牛乳总中长链脂肪酸组成 OPLS-DA 得分图
Fig.1 OPLS-DA score plot of long-chain fatty acid composition in total buffalo and cow milk

牛乳中的 SFA 因其较高的热量密度和较慢的代谢速率，摄入过多容易导致能量过剩并促进脂肪堆积，同时也可能影响血脂代谢，增加心血管疾病的发生风险。一项对 2 363 名受试者的流行病学研究发现，高 SFA 摄入者（棕榈酸占总能量摄入 12% 以上）发生肥胖的风险比低摄入者（棕榈酸占比 < 5%）高 15%~20%，限制长链 SFAs 摄入（每日 < 10 mg·g⁻¹ 体质量）可使肝脏炎症因子表达降低 30%~40%^[22]。研究显示，中长链饱和脂肪酸（C12:0~C16:0）具有促动脉粥样硬化和血栓形成的潜力，SFA 降低 1% 可使低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）水平降低 1.3~2.1 mg·dL⁻¹^[23]。一项基于 5.9 万人的大规模研究进一步表明，减少膳食 SFA 摄入可使复合心血管事件（含心血管死亡、非致命性心肌梗死、中风、心绞痛等）风险显著降低 21%^[24]。

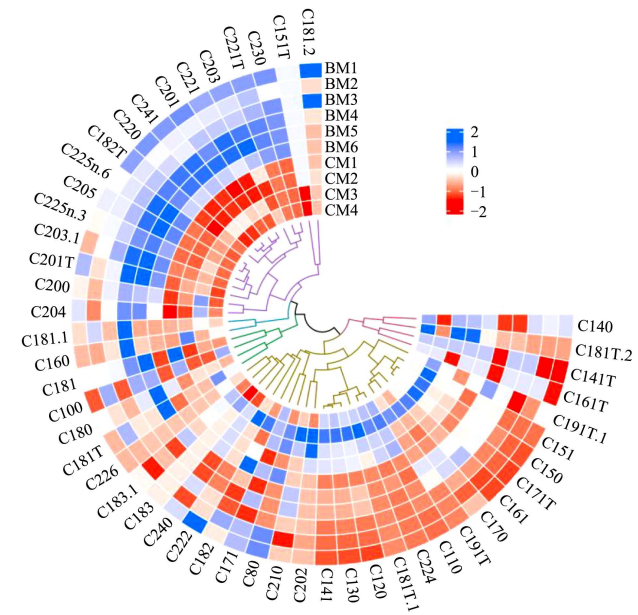


图 2 水牛乳和奶牛乳总中长链脂肪酸环状热图
Fig.2 Cyclic thermograms of long-chain fatty acids in buffalo milk and total cow milk

本研究进一步将这些脂肪酸分为 4 类进行分析，包括偶数链脂肪酸（Even-Chain Saturated Fatty Acid, ECSFA）、奇数链脂肪酸（Odd-Chain Saturated Fatty Acid, OCSFA）、单不饱和脂肪酸（Monounsaturated Fatty Acid, MUFA）和多不饱和脂肪酸（Polyunsaturated Fatty Acid, PUFA）。水牛乳和奶牛乳均为 $\Sigma \text{MUFA} > \Sigma \text{PUFA} > \Sigma \text{ECSFA} > \Sigma \text{OCSFA}$ 。与奶牛乳相比，水牛乳中的不饱和脂肪酸（MUFA 和

PUFA) 含量更高 ($P < 0.05$), 具体而言, 水牛乳的 MUFA 和 PUFA 总含量分别为 37.46% 和 29.68%, 而奶牛乳分别为 34.08% 和 27.86%。然而, 奶牛乳中的饱和脂肪酸总含量明显高于水牛乳 ($P < 0.05$), 对于 ECSFA 和 OCSFA 的含量, 奶牛乳分别达到 34.15% 和 3.92%, 而水牛乳则为 29.69% 和 3.16%。

采用 OPLS-DA 得分图和热图对两种乳进行聚类分析。如图 1 所示, 基于中长链脂肪酸能将水牛乳跟奶牛乳明显区分, 这与图 2 的聚类关系一致。

2.2 饱和脂肪酸的比较

如图 3 所示, 水牛乳与奶牛乳区分明显, 因此, 两种乳的饱和脂肪酸组成具有明显特征。

如表 1 所示, 在所测生乳样品中, 水牛乳饱和脂肪酸种类与奶牛乳相似, 但含量有所差别。总的来说, 奶牛乳中的饱和脂肪酸总含量高于水牛乳 ($P < 0.05$)。奶牛乳中饱和脂肪酸总含量为 38.07%, 而水牛乳中的饱和脂肪酸总含量为 32.85%。对于两种牛乳, 主要饱和脂肪酸是肉豆蔻酸、棕榈酸、月桂酸。Yang 等^[25]比较了不同哺乳动物乳脂的脂肪酸组成, 发现水牛乳的棕榈酸和硬脂酸含量高于奶牛乳, 但肉豆蔻酸相对较低, 这个结论与本研究相似。本研究中牛乳的饱和脂肪酸含量差异主要体现在月桂酸和肉豆蔻酸上, 奶牛乳的含量分别为 6.47%、17.28%; 而水牛乳的含量分别为 3.99%、14.61%。奶牛乳中存在多个饱和脂肪酸含量显著高于水牛乳, 如月桂酸、十一烷酸、十三烷酸、十五烷酸; 水牛乳中主要是长链饱和脂肪酸含量显著高于奶牛乳, 如山俞酸、二十三烷酸。

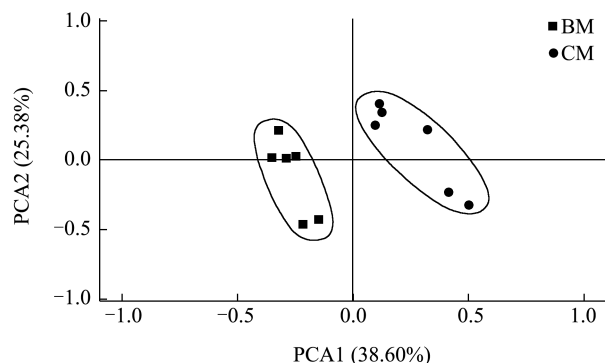


图 3 水牛乳和奶牛乳饱和脂肪酸组成的主成分分析图

Fig.3 Principal component analysis of saturated fatty acid composition of buffalo and cow milks

2.3 单不饱和脂肪酸 (MUFA) 的比较

如图 4 所示, 水牛乳和奶牛乳能明显区分, 因此, 两种乳的 MUFA 组成具有明显特征。

如表 1 所示, 总的来说, 水牛乳中 MUFA 较奶牛

乳丰富, 水牛乳中的 MUFA 总含量为 37.46%, 奶牛乳中的总含量为 34.08%。Pegolo 等^[26]在他们的研究中全面表征了地中海水牛乳和奶牛乳的脂肪酸组成, 水牛奶的 MUFA 总含量为 25.95%, 奶牛乳为 24.25%, 整体上, 水牛乳的总 MUFA 含量更高 ($P < 0.05$), 这与我们的结论相似。在两种水牛乳中, 反式岩芹酸、岩芹酸、反异油酸的含量很高, 是两种牛乳中的主要 MUFA。值得注意的是, 油酸的含量在两种牛乳中差异较大, 主要体现在水牛乳中油酸有 6.52%, 而奶牛乳中只有 0.80%。除此之外, 水牛乳中二十碳烯酸、反式二十碳烯酸、芥酸、巴惟酸的含量显著高于奶牛乳。

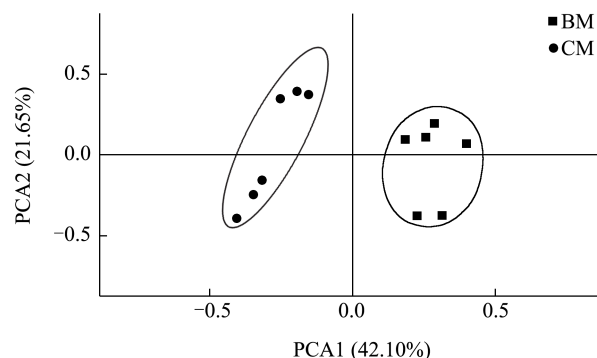


图 4 水牛乳和奶牛乳单不饱和脂肪酸组成的主成分分析图

Fig.4 Principal component analysis of monounsaturated fatty acid composition of buffalo milk and cow milk

2.4 多不饱和脂肪酸 (PUFA) 的比较

如图 5 所示, 水牛乳能与奶牛乳区分开, 因此, 这两种物种的 PUFA 组成具有各自的特征。

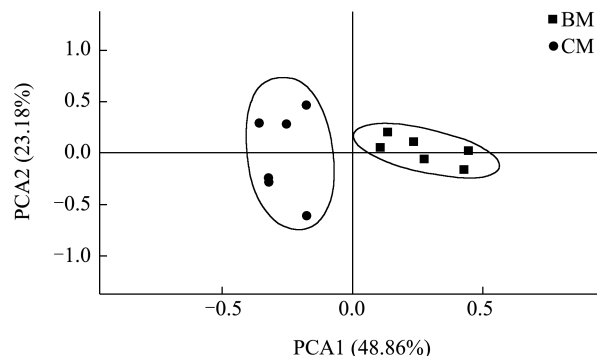


图 5 水牛乳和奶牛乳多不饱和脂肪酸组成的主成分分析图

Fig.5 Principal component analysis of polyunsaturated fatty acid composition of buffalo and cow milks

如表 1 所示, 水牛乳的 PUFA 的总含量较水牛乳高 ($P < 0.05$), 分别达到 29.68% 和 27.86%。先前的研究中, Wang 等^[27]建立了一种高通量的检测方法并应用于多种动物奶脂肪酸的检测, 其中奶牛乳多不饱和脂肪酸的总含量为 34.47%, 而水牛乳中的总含量

为 35.29%。我们的结果与此前报道相似。C18:2 是水牛乳和奶牛乳中最主要的 PUFA, 分别达到 16.01% 和 17.36%。水牛乳多种 PUFA 的含量都显著高于奶牛乳, 如神经酸、反亚油酸、二十碳五烯酸、二十碳三烯酸、二十二碳五烯酸。

2.5 水牛乳与奶牛乳显著差异脂肪酸分析

对不同乳的脂肪酸进行单变量统计分析, 筛选变量重要性投影 (Variable Importance in Projection, VIP) 大于 1.0 且 P 值小于 0.05 脂质为两种牛乳间差异脂肪酸。发现水牛乳和奶牛乳间具有显著差异的脂肪酸共有 23 种, 其中水牛乳中 13 种差异性脂肪酸显著高于奶牛乳 ($P < 0.05$)。值得关注的是, 二十二碳烯酸 (反-13)、二十碳三烯酸 (顺-11,14,17)、二十二碳五烯酸 (顺-7,10,13,16,19)、二十碳五烯酸 (顺-5,8,11,14,17)、二十二碳五烯酸 (顺-7,10,13,16,19)、二十三烷酸、二十碳三烯酸 (顺-8,11,14)、二十碳烯酸 (反-11)、十八碳二烯酸 (反-1,12) 的差异倍数 FC 值在 0.05~0.62, 是差异最显著的亚类, 且在水牛乳含量为 0.04%~6.96%, 可作为水牛乳潜在特征性脂质成分。

水牛乳中二十二碳五烯酸、二十碳五烯酸 (顺-5,8,11,14,17)、二十碳三烯酸 (顺-11,14,17) 含量显著高于奶牛乳 ($P < 0.05$), 以上 ω -3 PUFA 对人体健康具有重要作用, 可有效降低心血管疾病风险。一项试验表明, 连续 7 周每日摄入 3.8 g 二十碳五烯酸 (顺-5,8,11,14,17) (EPA) 可使甘油三酯水平降低 21%^[28]。此外, ω -3PUFA 还有利于降低患糖尿病风险^[29]、抗炎消炎^[30]、保护视力及预防眼部疾病^[31]。水牛乳中的 HOMO- γ -亚麻酸、二十二碳五烯酸 (顺-7,10,13,16,19) 的含量显著高于奶牛乳 ($P < 0.05$), 以上属于 ω -6 类脂肪酸, 先前的研究报道已经证实 ω -6 类脂肪酸可降低血清总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇, 亚油酸每增加 5% 能量摄入 (替代等量碳水化合物), 冠心病风险可降低 40%^[32]。水牛乳中巴惟酸、二十碳烯酸 (反-11)、二十碳烯酸 (顺-11)、二十碳烯酸 (反-11)、芥酸、神经酸的含量显著高于奶牛乳 ($P < 0.05$), 以上属于 ω -9 类 PUFA, 牛乳中的 ω -9 类脂肪酸, 特别是油酸和神经酸, 这些单不饱和脂肪酸有助于降低胆固醇, 从而支持心血管健康。Santamarina 等^[33]研究发现, 富含 ω -9 的低碳水高脂饮食可改善血脂代谢和炎症反应。 ω -9 组的小鼠模型中总胆固醇下降 47% (从 178.56 mg·dL⁻¹ 降至 94.62 mg·dL⁻¹), 低密度脂蛋白胆固醇 (LDL-c) 和动脉粥样硬化指数 (AI) 也显著下降, 间接降低心血管疾病风险; 促炎因子 IL-17 显著降

低, 抗炎因子 IL-33 水平显著提高, 出现明显抗炎效应; 此外, ω -9 通过调节肝脏脂肪酸代谢酶减少减少脂肪堆积, 进一步降低肥胖相关代谢疾病。神经酸是鞘脂类的重要组成部分, 参与细胞膜的形成、凋亡和神经传递等生物过程, 在神经系统发育和功能维护方面起重要作用^[34]。

牛乳脂肪酸组成是多方面因素共同调控的结果, 其中日粮配方以及饲养方式^[35]、品种及遗传特性^[36]、泌乳期及采样季节^[37]等因素对牛乳脂肪酸组成的影响较大。造成本研究中两种牛乳脂肪酸组成差异的原因可能是品种以及来自于两个不同牧场造成的饲料以及饲养方式不同。本研究的对象为尼里-拉菲水牛乳和荷斯坦奶牛乳, 荷斯坦奶牛产奶量高, 单产可达 30~40 kg·d⁻¹, 对能量需求更高, 更多的是饲喂玉米、豆粕、麦麸等精饲料来维持泌乳性能, 通过舍饲结合日粮全混合模式喂养。奶水牛的产奶量相对较低 (15~20 kg·d⁻¹), 但乳脂含量较高 (可达 7%~8%), 它们对高纤维饲料的消化能力更强, 更多的是放牧饲喂, 依赖天然牧草以及象草、甘蔗尾叶等青储饲料。

综上, 水牛乳中有 13 种脂肪酸显著高于奶牛乳 ($P < 0.05$), 巴惟酸、HOMO- γ -亚麻酸、二十二碳五烯酸、二十碳五烯酸、二十二碳五烯酸、二十三烷酸、二十碳三烯酸、二十碳烯酸、反亚油酸、二十碳烯酸、芥酸、山俞酸、神经酸这 13 种物质可作为水牛乳潜在特征性脂质成分, 为水牛乳作为特定功能性乳制品的研究与开发提供参考。

2.6 水牛乳特征脂肪酸比值及真实性鉴定

参考王峰恩^[12]的乳真实性鉴定方法, 基于两种动物间显著性差异的脂肪酸, 选择两种动物乳的高含量特征 FA 和低含量特征 FA, 筛选出在两种乳中含量差异较大的组合。以这种 FA 组合的比值, 作为表征这两种乳差异性的特征指标。这种特征 FA 比值应在一种乳中为极大值, 而另一种乳中为极小值。分别计算每种乳中脂肪酸成分比值, 筛选出在两种乳中差异最大且比值的置信区间不重叠的组合, 作为表征这两种乳差异性的特征指标。在本研究中, 由于样品数量有限, 置信区间按照平均值 (Average, AVG) ± 3 倍标准偏差 (Standard Deviation, SD) 进行计算, 在数据正态分布的情况下达到 99.7% 的置信水平。优选出 C13:0/C22:5n-6 和 C14:1/C22:5n-6 是区分水牛乳中掺入奶牛乳的特征脂肪酸比值。其中 C13:0/C22:5n-6 在水牛乳和奶牛乳含量均值分别为 (0.13%, 0.25%)/(0.61%, 0.26%), 置信区间分别为 0.15~0.29 和 0.73~1.16; 相对应的是 C14:1/C22:5n-6, 在水牛乳

和奶牛乳含量均值分别为 (0.76%, 1.42%)/(0.61%, 0.26%), 置信区间分别为 0.81~1.71 和 4.25~6.54。因此, C13:0/C22:5n-6 和 C14:1/C22:5n-6 可以用于鉴别水牛乳中是否掺杂了奶牛乳的指标。

表 2 为部分特征比值筛选结果, 选择在两种乳中置信区间不重叠且差异最大的特征比值作为判别依据。

如图 6 所示, 根据 C13:0/C22:5n-6 和 C14:1/C22:5n-6 进行双指标掺假识别。当待测样品为真实水牛乳时, 坐标 (C13:0/C22:5n-6, C14:1/C22:5n-6) 将落在浅蓝色的水牛乳置信区间内; 当待测样品掺杂了奶牛乳时, 坐标极易落在置信区间外, 如浅紫色区域。因此, 该方法可作为水牛乳掺杂奶牛乳的快速鉴定方法。

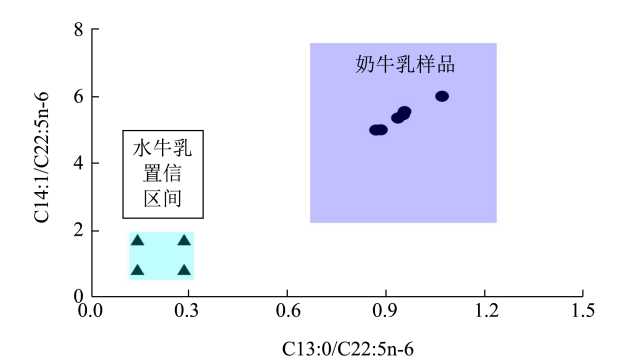


图 6 水牛乳中掺杂奶牛乳的鉴定

Fig.6 Identification of buffalo milk adulterated with cow milk

当前, 对于乳制品的真实性鉴定, 已有多种方法被开发和应用。Zhang 等^[38]利用液相色谱-质谱技术检测蛋白质, 成功地从骆驼乳、驴乳、山羊乳、绵羊乳、牦牛乳、水牛乳和牛乳等七种动物乳中鉴定出 37 条特征标识肽段, 实现了对这七种乳源的同时鉴别。Deng 等^[39]基于线粒体 cytb 基因序列差异建立了双重 PCR 检测体系, 能够灵敏检测骆驼乳、马乳及羊乳中低至 0.1% 的牛乳掺入量, 方法具有高特异性和重复性, 在市售乳制品 (酸奶、奶粉、巴氏奶) 中得到验证, 为乳制品真实性鉴别提供了可靠的分子检测手段。

目前水牛乳掺杂奶牛乳的检测方法并不单一, 但每种方法都有其优势与不足。聚合酶链式反应 (PCR) 检测法^[40], 该方法是一种基于 DNA 检测的分子生物学技术, 灵敏度高, 可检测极低浓度 (0.1%) 的掺杂, 具有高度特异性, 准确性高, 但是需要专业实验室和昂贵的仪器, 操作复杂, 样品前处理要求高, 适用于分子生物学实验室, 不适用于现场快速检测。酶联免疫吸附试验 (ELISA)^[41]是一种基于抗原-抗体反应的检测方法, 可以检测奶牛乳中特异性蛋白, 如 β -乳球蛋白 (β -LG) 或酪蛋白, 从而识别掺杂现象。该方法简单, 成本也较低, 灵敏度为 1%, 但可能出现交叉反应, 导致假阳性或假阴性, 仅适用于检测蛋白质未变性的样品。傅里叶变换红外光谱 (FT-IR)^[42]和近红外光谱 (NIR) 是一种非破坏性检测技术, 通过分析奶样的脂肪、蛋白和乳糖的光谱特征, 判断其成分是否异常。该方法能做到快速检测, 但精度较低, 灵敏度为 5%, 为提高精度, 通常需要结合高级算法。

本研究借鉴了王峰恩^[12]的研究方法, 建立了中水牛乳掺杂奶牛乳的快速鉴定方法。该方法依据乳的特征脂肪酸比值构建双指标判定法和多指标置信区间, 为乳制品真实性鉴定提供了新途径。该方法具有以下特点: 技术门槛低, 仅需利用气相色谱常规检测手段; 只需测定少量特征 FA, 无论是绝对含量还是相对含量均能满足要求; 数学模型简易, 通过对比特征 FA 比值和置信区间即可完成鉴定; 属于证伪类型, 若掺杂了特定种类的乳必然会被检测出来, 但检测出异常并不一定意味着掺杂了这种特定乳。因此, 该方法在判断待测乳品是否为真品时具有较高的可靠性, 但在确定掺假来源方面存在一定局限性。适用范围未知, 由于不同品种、饲喂方式、不同来源等的水牛乳和奶牛乳在脂肪酸组成上可能存在一定差异, 该方法是否适用于所有种类和产地的水牛乳与奶牛乳仍不确定, 需进一步扩大样本研究来评估其普适性。

表 2 水牛乳和奶牛乳的特征FA比值

Table 2 Characteristic index of milk from Holstein cow and buffalobased on fatty acid ratios

特征 FA 比值	水牛乳			奶牛乳			置信区间是否重叠
	AVG	SD	置信区间	AVG	SD	置信区间	
C20:3/C22:1	0.82	0.25	0.07-1.58	7.31	2.35	0.26-14.36	有重叠
C14:1/C22:5n-6	1.26	0.15	0.81-1.71	5.39	0.38	4.25-6.54	无重叠
C13:0/C22:5n-6	0.22	0.02	0.15-0.29	0.95	0.07	0.73-1.16	无重叠
C11:0/C22:5n-6	0.08	0.02	0.03-0.12	0.58	0.07	0.37-0.79	无重叠
C13:0/C20:1	0.26	0.03	0.18-0.34	0.75	0.04	0.64-0.86	无重叠
C11:0/C20:3	0.11	0.02	0.06-0.16	0.62	0.15	0.17-1.07	无重叠

综上所述, 尽管方法适用性尚需进一步验证, 但所提出的方法在当前实验条件下展现出较好的识别能力, 对乳品真实性初步判别具有一定实用价值, 并为相关乳制品的掺假识别提供了可行的技术思路。

3 结论

本研究利用 GC-MS 技术检测了水牛乳与奶牛乳的中长链脂肪酸, 发现水牛乳中低饱和脂肪酸高不饱和脂肪酸的组成特征有助于优化饮食结构。巴惟酸、HOMO- γ -亚麻酸、二十二碳五烯酸等 13 种功能性不饱和脂肪酸是水牛乳的特征性脂质成分 ($P < 0.05$, VIP > 1)。优选出 C13:0/C22:5n-6 和 C14:1/C22:5n-6 比值作为双指标判定方法, 可作为水牛乳中掺假奶牛乳的定性判断依据。

本研究通过系统分析水牛乳与奶牛乳中长链脂肪酸的组成差异, 揭示了两者在脂肪酸含量和种类上的显著不同, 为水牛乳的营养优势提供了科学依据。同时, 基于特征脂肪酸比值的筛选, 构建了可用于识别水牛乳中掺入奶牛乳的判别模型。尽管样品范围有限, 该方法在本研究条件下展现出良好的区分能力, 具备作为乳制品掺假识别技术的初步应用潜力, 为乳品质量控制和市场监管提供了有益参考。

参考文献

- [1] EMAKPOR O L, EDO G I, JIKAH A N, et al. Buffalo milk: an essential natural adjuvant [J]. Discover Food, 2024, 4(1): 1-17.
- [2] HEIN L, SØRENSEN L P, KARGO M, et al. Genetic analysis of predicted fatty acid profiles of milk from Danish Holstein and Danish Jersey cattle populations [J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(3): 2148-2157.
- [3] GUO J H, DUAN H, ZHENG X P, et al. Comparative assessment of nutritional value in milk through fatty acid from various sources: a review [J]. Journal of Future Foods, 2024, 5(5): 429-442.
- [4] PIA L, LENA J, LOTTA G, et al. Visual outcome at 2.5 years of age in ω -3 and ω -6 long-chain polyunsaturated fatty acid supplemented preterm infants: a follow-up of a randomized controlled trial [J]. The Lancet Regional Health-Europe, 2023, 32: 100696.
- [5] 罗洁, 王紫薇, 宋君红, 等. 不同品种牛乳脂质的共聚焦拉曼光谱指纹图谱[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 125-129.
- [6] ALEX C, EUGEN C J, AURELIA C, et al. A review of milk fatty acid composition in different breeds of water buffalo, *Bubalus bubalis*, with specific health benefits for consumers [J]. ABAH Bioflux, 2025, 17(1): 64-75.
- [7] RUTH R, RAMIRO F, MARGARITA R, et al. Factors affecting fatty acid composition of Holstein cow's milk [J]. Animals, 2023, 13(4): 574.
- [8] TECHEIRA N, KEEL K, GARAY A, et al. Milk fatty acid profile from grass feeding strategies on 2 Holstein genotypes: Implications for health and technological properties [J]. JDS Communications, 2023, 4(3): 169-174.
- [9] 林波, 黎颖, 李玲, 等. 水牛乳及其制品中掺入奶牛乳的单重和双重PCR检测方法[J]. 中国乳品工业, 2013, 41(6): 35-38.
- [10] TRIMBOLI F, COSTANZO N, LOPREIATO V, et al. Detection of buffalo milk adulteration with cow milk by capillary electrophoresis analysis [J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(10): 8792-8801.
- [11] WU X F, CHEN M Q, WANG F G, et al. A new isopropyl esterification method for quantitative profiling of short-chain fatty acids in human and cow milk by gas chromatograph-mass spectrometer [J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(8): 5366-5375.
- [12] 王峰恩. 生乳脂肪酸组成特征及加工处理对其影响的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [13] FARAG M A, MOHAMED Z G. Omega-9 fatty acids: potential roles in inflammation and cancer management [J]. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, 2022, 20: 48.
- [14] LOTFI K, SALARI-MOGHADDAM A, YOUSEFINIA M, et al. Dietary intakes of monounsaturated fatty acids and risk of mortality from all causes, cardiovascular disease and cancer: A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies [J]. Ageing Research Reviews, 2021, 72: 101467.
- [15] Gonzalez S, Duncan S E, O'Keefe S F, et al. Oxidation and textural characteristics of butter and ice cream with modified fatty acid profiles [J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(1): 70-77.
- [16] Andrew E, Carl J L, Evan O'K, et al. An update on omega-3 polyunsaturated fatty acids and cardiovascular health [J]. Nutrients, 2021, 13(1): 204.
- [17] URSZULA R, ARTURO O R, ZEYNEP Ç S, et al. The influence of dietary fatty acids on immune responses [J]. Nutrients, 2019, 11(12): 2990.
- [18] 张依, 苏俊东, 罗雪路, 等. 水牛奶与奶牛奶常规营养成分与脂肪酸含量的差异及季节变化规律[J]. 中国奶业, 2021, 1: 35-41.
- [19] 潘斌. 湖北杂交水牛乳中脂肪酸和氨基酸成分分析及其营养价值评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [20] HANUŠ O, SAMKOVÁ E, KŘÍŽOVÁ L, et al. Role of fatty acids in milk fat and the influence of selected factors on their variability-A review [J]. Molecules, 2018, 23(7): 1636.
- [21] Gerardo A G, Daniel A G, Marla A R, et al. Feeding polyunsaturated supplements to grazing dairy cows improve the healthy value of milk fatty acids [J]. Agricultural Sciences, 2017, 8: 759-782.
- [22] ZHOU H, URSO C J, JADEJA V. Saturated fatty acids in obesity-associated inflammation [J]. Journal of Inflammation Research, 2020, 13: 1-14.
- [23] MAKI K C, DICKLIN M R, KIRKPATRICK C F. Saturated fats and cardiovascular health: Current evidence and controversies [J]. Journal of Clinical Lipidology, 2021, 15(6): 765-772.
- [24] HOOPER L, MARTIN N, JIMOH O F, et al. Reduction in saturated fat intake for cardiovascular disease [J]. The Cochrane Database of Systematic Reviews, 2020, 5(5): CD011737.
- [25] Yang J, Zheng N, Wang J. Comparative milk fatty acid analysis of different dairy species [J]. International Journal of Dairy Technology, 2018, 71(4): 853-862.
- [26] PEGOLO S, STOCCO G, MELE M, et al. Factors affecting variations in the detailed fatty acid profile of Mediterranean buffalo milk determined by 2-dimensional gas chromatography [J]. Journal of Dairy Science, 2017, 100(4): 2564-2576.

- [27] WANG F E, CHEN M Q, LUO R B, et al. Fatty acid profiles of milk from Holstein cows, Jersey cows, buffalos, yaks, humans, goats, camels, and donkeys based on gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(2): 1687-1700.
- [28] Gyu Y C, Philip C C. The differential effects of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid on cardiovascular risk factors: an updated systematic review of randomized controlled trials [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2024, 11: 1423228.
- [29] YOSHIMURA E H, SANTOS N W, MACHADO E, et al. Functionality of cow milk naturally enriched with polyunsaturated fatty acids and polyphenols in diets for diabetic rats [J]. *Public Library of Science ONE*, 2018, 13(4): e0195839.
- [30] CALDER P C. Omega-3 fatty acids and inflammatory processes: from molecules to man [J]. *Biochemical Society Transactions*, 2017, 45(5): 1105-1115.
- [31] GORUSUPUDI A, CHANG F Y, NELSON K, et al. n-3 PUFA supplementation alters retinal very-long-chain-PUFA levels and ratios in diabetic animal models [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2019, 63(15): e1801058.
- [32] WILLETT W C. The role of dietary n-6 fatty acids in the prevention of cardiovascular disease [J]. *Journal of Cardiovascular Medicine*, 2007, 8(Suppl 1): S42-S45.
- [33] ALINE B S, RENATA G M, LAÍS V M, et al. Low-carbohydrate diet enriched with omega-3 and omega-9 fatty acids modulates inflammation and lipid metabolism in the liver and white adipose tissue of a mouse model of obesity [J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2025, 35(8): 103932.
- [34] Phung NV, Rong F, XIA WY, et al. Nervonic acid and its sphingolipids: Biological functions and potential food applications [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(24): 8766-8785.
- [35] MARI J J, TYTTI J L, PIIA K K, et al. The effect of dietary forage to concentrate ratio and forage type on milk fatty acid composition and milk fat globule size of lactating cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(10): 8825-8838.
- [36] PALOMBO V, MILANESI M, SGORLON S, et al. Genome-wide association study of milk fatty acid composition in Italian Simmental and Italian Holstein cows using single nucleotide polymorphism arrays [J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(12): 11004-11019.
- [37] KOSTOVSKA R, DROUIN G, SALAS J J, et al. Multispecies pasture diet and cow breed impact the functional lipid profile of milk across lactation in a spring calving dairy system [J]. *Journal of Dairy Science*, 2025, 108(2): 1261-1284.
- [38] ZHANG J K, CHEN Y, DENG T T, et al. Authenticity identification of animal species in characteristic milk by integration of shotgun proteomics and scheduled multiple reaction monitoring (MRM) based on tandem mass spectrometry [J]. *Food Chemistry*, 2024, 436: 137736.
- [39] DENG L, LI A, GAO Y, et al. Detection of the bovine milk adulterated in camel, horse, and goat milk using duplex PCR [J]. *Food Analytical Methods*, 2020, 13(2): 560-567.
- [40] MA X, XIA H, PAN Y, et al. Double-tube multiplex TaqMan Real-Time PCR for the detection of eight animal-derived dairy ingredients [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(20): 11640-11651.
- [41] FENG R, HE Y, WU H, et al. Detecting adulteration of Buffalo Milk based on a single amino acid mutation site using immunoassay [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2025, 112(2): 55-68.
- [42] SINEM C, IREM U, ALI N, et al. Adulteration detection of cow milk in buffalo milk using fourier-transform infrared spectroscopy and artificial intelligence-based techniques [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2025, 140: 107203.