李丹蕾, 孔夏冰, 陈贺, 等. 基于模拟胃肠道消化的驼乳与牛乳蛋白肽的比较研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 146−155. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020151

LI Danlei, KONG Xiabing, CHEN He, et al. Comparative Study of Camel and Cow Milk Protein Peptides Based on Simulated Gastrointestinal Digestion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 146−155. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020151

· 研究与探讨 ·

基于模拟胃肠道消化的驼乳与牛乳蛋白肽的比较研究

李丹蕾[1,2,3], 孔夏冰[1,2,3], 陈　贺[4], 于　悦[1,2], 李国萍[1,2], 张九凯[1,2,*], 陈　颖[1,2,3]

（1.中国质量检验检测科学研究院, 北京 100176;
2.国家市场监督管理总局重点实验室（食品真实性鉴别）, 北京 100176;
3.北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048;
4.新疆农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 新疆乌鲁木齐 830091）

摘　要: 驼乳是西北地区重要的特色乳资源，富含多种活性蛋白，其在体内消化过程中释放的生物活性肽具有潜在的健康益处，但目前对其系统研究仍相对较少。本研究通过模拟胃肠道消化，利用液相色谱-串联质谱（LC-MS/MS）对驼乳和牛乳消化后的蛋白肽进行鉴定分析，并结合蛋白肽数据库筛选潜在的生物活性肽。结果显示，共鉴定出 1074 条蛋白肽，其中驼乳中特有 561 条，牛乳中特有 385 条，两种乳品共有 128 条。这些蛋白肽的分子质量主要集中在 750~1000 Da，长度多在七到十一肽之间，多数来源于酪蛋白。通过生物活性数据库分析，从驼乳中鉴定出 6 条生物活性肽，其中 2 条为驼乳特有的二肽基肽酶Ⅳ（Dipeptidyl Peptidase Ⅳ，DPP-Ⅳ）抑制活性肽，其余 4 条与牛乳共有的活性肽则具有血管紧张素转化酶（Angiotensin Converting Enzyme，ACE）抑制、抗菌、抗凝血酶和抗血栓等活性。进一步通过基于机器学习的肽段活性预测工具 Peptide Ranker，预测得到驼乳中特有的潜在生物活性肽有 70 条，牛乳中有 44 条。这些发现揭示了驼乳在生物活性肽种类多样性及功能特异性方面的独特优势。该研究系统解析了驼乳与牛乳蛋白肽的组成差异，为开发具有精准营养功能的新型乳基食品提供了理论基础和实践指导，有助于推动相关产业的发展。

关键词: 驼乳, 牛乳, 模拟胃肠道消化, 多肽组学, 生物活性预测

中图分类号: TS252.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0146−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020151

本文网刊:

Comparative Study of Camel and Cow Milk Protein Peptides Based on Simulated Gastrointestinal Digestion

LI Danlei[1,2,3], KONG Xiabing[1,2,3], CHEN He[4], YU Yue[1,2], LI Guoping[1,2], ZHANG Jiukai[1,2,*], CHEN Ying[1,2,3]

（1.Chinese Academy of Quality and Inspection and Testing, Beijing 100176, China;
2.Key Laboratory of Food Authenticity Identification, State Administration for Market Regulation, Beijing 100176, China;
3.School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
4.Xinjiang Academy of Agriculture Sciences, Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Urumqi 830091, China）

Abstract: Camel milk, a characteristic dairy resource in Northwest China, is rich in bioactive peptides. Released during *in*

收稿日期: 2025−02−20

基金项目: 国家重点研发计划项目（2022YFD1600103）; 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目（2022A02006-3）; 自治区现代农业产业技术体系（XJARS-11-09）。

作者简介: 李丹蕾（1999−）（ORCID: 0009−0008−2309−9142）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品真实性鉴别与品质识别, E-mail: 972693898@qq.com。

*** 通信作者:** 张九凯（1986−）（ORCID: 0000−0002−7284−6748）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品真实性鉴别与品质识别, E-mail: zhjk_caiq@163.com。

vivo digestion, bioactive peptides have potential health benefits, however, systematic studies in this field remain limited. In this study, simulated gastrointestinal digestion combined with liquid chromatography-tandem mass spectrometry was used to identify and analyze peptides in camel and cow milk. Potential bioactive peptides were screened using peptide databases. The analysis identified 1074 peptides, including 561 unique to camel milk, 385 unique to cow milk, and 128 identical in both. These peptides predominantly had molecular weights of 750~1000 Da and lengths of 7~11 amino acids, most of which originated from casein. Bioactivity database analysis identified six bioactive peptides in camel milk, including two camel-specific dipeptidyl peptidase Ⅳ inhibitory peptides. The remaining four peptides, as in cow milk, had angiotensin converting enzyme inhibitory, antimicrobial, antithrombin, and antithrombotic activities. In addition, the machine-learning-based peptide activity prediction tool, Peptide Ranker, predicted 70 potential bioactive peptides unique to camel milk and 44 unique to cow milk. These findings revealed the unique advantages of camel milk in terms of the diversity of bioactive peptide types and functional specificity. The study systematically elucidated the compositional differences of protein peptides between camel milk and cow milk, providing a theoretical basis and practical guidance for the development of novel dairy-based foods with precise nutritional functions, and contributing to the advancement of the relevant industries.

Key words: camel milk; cow milk; simulates gastrointestinal digestion; peptidomics; bioactivity prediction

驼乳营养丰富，对西北地区的饮食和经济具有重要意义。2024 年 3 月，国家卫生健康委发布的《GB 19644-2024 食品安全国家标准 乳粉和调制乳粉》正式纳入了驼乳等特色奶畜的奶粉及其基本要求，进一步促进了驼乳产业的高质量发展。与牛乳相比，驼乳乳清蛋白含量较高，不含有易于致敏的 β-乳球蛋白[1]。富含多种活性蛋白，包括参与 PI3K-Akt 信号通路的长链脂肪酸-CoA 连接酶等代谢相关蛋白[2]，以及乳铁蛋白、乳过氧化物酶等免疫营养因子[3]。此外，驼乳酪蛋白中含有特有的乳清酸性蛋白和铁蛋白重链[4]，进一步突显其营养价值。

近年来，营养学研究发现，乳制品中的蛋白质在消化过程中可分解为由 2~50 个氨基酸残基组成的小分子肽段[5]，这些肽段在消化后被激活，具有多种生物学作用[6]。体外消化模型广泛用于模拟人体消化过程，以评估食物的营养和生物活性[7]。在特色乳品的生物活性肽分析中，该模型展现出了显著的应用价值。Li 等[8] 利用多肽生物活性数据库分析了牦牛、黄牛和犏牛乳清蛋白在模拟胃肠道消化后的产物，发现一些多肽具有抗氧化和 ACE 抑制等多种生物活性。Shi 等[9] 和魏光强等[10] 的研究也发现，在模拟消化后，云南传统乳制品（如乳扇和奶渣）中的蛋白肽分子量主要集中在 500~1000 Da，且存在多种具有免疫调节和抗菌作用的生物活性肽。这些发现进一步凸显了这些传统乳制品的高生物学价值。此外，Basilicata 等[11] 对六种水牛乳产品进行了研究，揭示了其中存在多种 ACE 抑制肽等活性肽，并强调了制造工艺对肽生物利用性的重要影响。Moreno-Montoro 等[12] 的研究发现，超滤羊奶和植物乳杆菌发酵羊奶在模拟消化后能够释放出长度主要集中在 7~20 个氨基酸的蛋白肽，透析膜分离实验表明，部分具有生物活性的肽段在透析后仍能被有效检测到，这表明这些肽段在消化过程中具有较高的稳定性，可能在人体内发挥生理功能，显示出显著的健康促进潜力。

已有研究显示脱脂驼乳粉相较于牛乳粉有更高的消化率，且能产生更小的粒子和低分子量肽段[13]。Zou 等[14] 的研究比较了单峰驼乳、牛乳和人乳的消化特性，表明驼乳适合作为婴儿配方奶粉的蛋白质来源。中国作为全球双峰驼核心分布区之一，驼乳富含优质蛋白，可作为生物活性肽的重要来源，基于此，本研究通过对比双峰驼乳与牛乳原料乳在模拟胃肠道消化后的蛋白肽谱，旨在揭示两者蛋白肽种类和来源的差异。并鉴定潜在生物活性肽，为推动驼乳的研究与应用提供科学支持。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

驼乳样本　来源于新疆维吾尔自治区哈密市伊州区某合作社的准噶尔双峰驼；荷斯坦奶牛乳样本采集自北京某乳品公司的牧场。每种乳样均设有 6 个生物学重复。所有参与采样的动物均为混合养殖方式，并处于泌乳中期。在实验过程中，每头动物提供的乳汁样本均被视作独立的生物学重复样本进行分析。样品采集后立即进行低温保存，并经冻干处理后制成粉末，最终于−80 ℃ 冰箱中保存，以待后续分析；尿素（Urea, UA）　北京伊诺凯有限公司；三羟甲基氨基甲烷盐酸盐（Tris(hydroxymethyl) aminomethane hydrochloride, Tris-HCl）　北京索莱宝科技有限公司；胃蛋白酶（来自猪胃黏膜，≥250 U/mg）、胰蛋白酶（来自牛胰腺，≥10000 U/mg）、Bradford 试剂盒　美国 Sigma-Aldrich 公司；考马斯亮蓝 G-250、牛血清白蛋白　北京鼎国生物技术有限公司；二硫苏糖醇（Dithiothreitol, DTT）、三氟乙酸（Trifluoroacetic acid, TFA）　上海生工生物工程股份有限公司；iRT Kit　美国 Biognosys 公司；5 kDa 超滤膜　德国 Sartorius 公司；甲酸、乙腈　上海 TCI 公司。

FD-1A-50 冷冻干燥机　上海比朗仪器制造有限公司；Q-Exactive HFX 质谱仪、Easy-nLC 1000 液相色谱仪　美国赛默飞世尔科技公司。

1.2　实验方法

1.2.1　蛋白质的提取　蛋白质的提取参考了董雅静

等[15]的实验方法，并进行了适当调整。准确称取 200 mg 乳样冻干粉，置于 50 mL 离心管中，随后加入 10 mL UA 裂解液（7 mol/L 尿素，50 mmol/L Tris-HCl，pH7.8）。使用涡旋振荡器进行充分混匀，直至冻干粉完全溶解。将混合液置于冰浴中，使用超声波处理器处理 30 min。随后，在 4 ℃ 下以 12000×g 离心 20 min，去除不溶性杂质，收集上清液。采用 Bradford 法测定蛋白浓度。提取的蛋白溶液分装至 1.5 mL 离心管中，置于−80 ℃ 冰箱保存，以备后续实验使用。

1.2.2 驼乳与牛乳蛋白模拟胃肠道消化 参考 Brodkorb 等[16]以及 Liu 等[17]的方法，对来自驼乳和牛乳的乳蛋白进行体外胃肠道消化，并进行了适当修改。具体步骤如下：首先将驼乳和牛乳蛋白置于 37 ℃ 的水浴中预热，随后用 1.0 mol/L HCl 调节 pH 至 1.5。按照 2%（w/w 蛋白质）的比例加入胃蛋白酶，将混合物置于 37 ℃ 的摇床中连续振荡孵育 2 h。接着使用 1.0 mol/L NaOH 将胃消化后的混合物 pH 调节至 7.5，加入 2%（w/w 蛋白质）的胰蛋白酶，在 37 ℃ 下继续振荡孵育 2 h。然后将反应混合物置于 95 ℃ 的沸水中加热 10 min，以终止消化反应。将反应混合物在 4 ℃ 下以 8000×g 的转速离心 15 min，收集上清液。

1.2.3 肽段处理 针对肽段样本，将收集到的上清液采用 5 kDa 超滤膜进行过滤。随后使用 C18 Cartridge 进行脱盐处理，具体操作如下：用 10 mL 甲醇和 10 mL 超纯水依次活化和冲洗 C18 Cartridge，使填料充分润湿。用 HCl 将酶解肽段溶液 pH 调至 2~3，缓慢加入活化的小柱中，控制流速 1 mL/min 以确保充分吸附。再用 10 mL 含 0.1% TFA 的超纯水以同样流速洗涤小柱去除杂质，最后用 10 mL 含 50% 乙腈和 0.1% TFA 的溶液以 1 mL/min 的流速洗脱肽段，收集洗脱液于干净的离心管中，进行冻干处理。冻干后的肽段样本加入 20 μL 0.1% 甲酸溶液进行复溶，并通过在 OD_{280} 条件下测定肽段的浓度。在 2 μg 酶解肽段中加入 6 μL 1×iRT 标准肽段后，随后进行质谱检测。

1.2.4 LC-MS/MS 鉴定驼乳、牛乳蛋白肽 参照 Li 等[18]的方法，使用纳升流速 HPLC 系统进行样品色谱分离。流动相 A 为 0.1% 甲酸水溶液，流动相 B 为 0.1% 甲酸乙腈水溶液。色谱柱首先以 95%A 平衡，样品通过自动进样器上样至捕获柱（Thermo Scientific Acclaim PepMap100，100 μm×2 cm，nanoViper C18），随后在分析柱（Thermo Scientific EASY Column，75 μm×10 cm，3 μm，C18）上进行分离，流速设定为 300 nL/min。分离后的样品通过 Q-Exactive HFX 质谱仪进行分析。梯度洗脱程序如下：0~3.0 min，B：0%；3.0~68 min，B：0%~30%；68~83 min，B：30%~55%；83~85 min，B：55%~100%；85~90 min，B：100%。质谱条件：正离子模式，母离子扫描范围为 300~1800 m/z，一级质谱分辨率设为 60000，AGC 目标值为 1×10^6，最大注射时间为 50 ms，动态排除时间为 30 s。MS^2 扫描设置：每次循环采集 20 次碎片图谱，采用 HCD 激活，隔离窗口宽度为 1.5 m/z，二级质谱分辨率设为 15000，碰撞能量为 30 eV，Underfill 比率设为 0.1%。

1.2.5 驼乳与牛乳蛋白肽数据库检索 DIA 数据采用 Spectronaut 软件进行处理，数据库来源于 UniProt，涵盖的物种包括骆驼（*Camelus bactrianus*）和牛（*Bos taurus*）。软件参数设置如下：retention time prediction type 设置为 dynamic iRT；interference on MS^2 level correction 设置为 enabled；cross run normalization 设置为 enabled。所有结果必须通过设定的过滤参数，Q Value cutoff 为 0.01（相当于FDR<1%）。

1.3 数据处理

1.3.1 数据统计分析 采用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行处理及分析。采用 IBM SPSS Statistics 25 中独立样本 t 检验进行差异显著性分析，显著性定义为 $P<0.05$。使用 R 语言工具包进行火山图、热图的绘制。

1.3.2 多肽生物活性的预测和筛选 先通过 BIOPEP[19]（https://www.uwm.edu.pl/biochemia/index.php/en/biopep）和 MBPDB[20]（https://mbpdb.nws.oregonstate.edu/）数据库对多肽的功能活性进行了分析。这些数据库收录了众多经过实验验证并报道的生物活性肽，并且随着科研进展不断更新扩充。同时利用在线肽段活性预测数据库 Peptide Ranker（https://distilldeep.ucd.ie/PeptideRanker/）来对鉴定到的多肽进行生物活性预测，它是一种用于预测肽段活性的机器学习算法，会为每个独特的肽序列分配了一个介于 0~1 之间的生物活性概率评分，接近 1 的评分表示该肽具有较高的可能性展现生物活性。根据这一标准，评分超过 0.5 的多肽被普遍认为具有显著的生物活性[21]。

2 结果与分析

2.1 驼乳与牛乳的消化产物蛋白肽

2.1.1 蛋白肽鉴定数量统计 本研究采用液相色谱-串联质谱（LC-MS/MS）技术对驼乳和牛乳的消化产物进行了肽段序列解析，将驼乳和牛乳消化产物与现

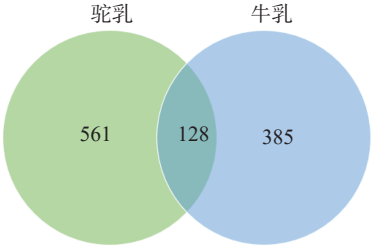


图 1 驼乳和牛乳蛋白肽数量的维恩图

Fig.1 Venn diagram of the number of protein peptides in camel milk and cow milk

有的蛋白数据库进行比对，共鉴定出 1208 条蛋白肽，对定量多肽进行筛选时，以半数以上数据具有有效值作为标准。共检测到 1074 条蛋白肽，其中源自驼乳的特有蛋白肽为 561 条，源自牛乳特有的蛋白肽为 385 条，两个品种共有的多肽为 128 条(图 1)。这一结果不仅揭示了驼乳和牛乳在蛋白质氨基酸序列组成上的差异，而且也反映了它们在消化过程中产生的多肽谱的差异。

2.1.2　蛋白肽分子量和长度分析　乳品消化产物的分子质量分布分析显示，驼乳与牛乳多肽主要分布于 500~3500 Da 区间，其中 750~1250 Da 组分占比最高(图 2)。具体而言，750~1000 Da 多肽在驼乳和牛乳中分别占 36.97% 与 42.42%，其次是 1000~1250 Da 的组分，分别占各自蛋白肽总量的 31.58% 和 31.57%。驼乳中 500~1000 Da 多肽的累积占比显著低于牛乳(P<0.05)，而 1250~3500 Da 大分子多肽比例显著更高(P<0.05)，表明驼乳蛋白在消化过程中更易生成大分子量水解产物。分子质量分布特征与蛋白酶切割位点选择性及肽键断裂效率密切相关[22]，且 750~1250 Da 多肽因分子量较低，可能通过肠上皮被动扩散或主动转运机制高效吸收[9]，结果提示两种酶解产物均具有潜在生物可利用性。进一步分析多肽链长分布发现，驼乳与牛乳中多肽主要集中于 7~11 个氨基酸残基区间(图 3)，其中八肽占比最高，驼乳和牛乳中八肽的占比分别为 16.87% 和 19.55%。差异对比显示，驼乳中 7~10 个氨基酸组成的蛋白肽占比显著低于牛乳(P<0.05)，而由 11~13 个氨基酸组成的蛋白肽的比例则显著更高(P<0.05)，表明驼乳酶解产物具有长链多肽富集特性。从结构化学角度，长链多肽因更多氨基酸残基可形成密集的分子内氢键网络及疏水相互作用，显著增强其构象稳定性。这种稳定性可能延缓消化酶切割效率，使长链多肽以完整形式抵达靶点，从而延长其功能活性[23]。相比之下，短链多肽因分子量较低，更易通过肠道快速吸收并参与免疫调节、抗氧化等生理过程[24]。上述结果表明，驼乳酶解产物中长链多肽的富集特性可能赋予其缓释功能优势，而牛乳中高比例短链多肽则利于快速生物效应。二者差异为乳源功能成分的精准开发提供了理论依据。

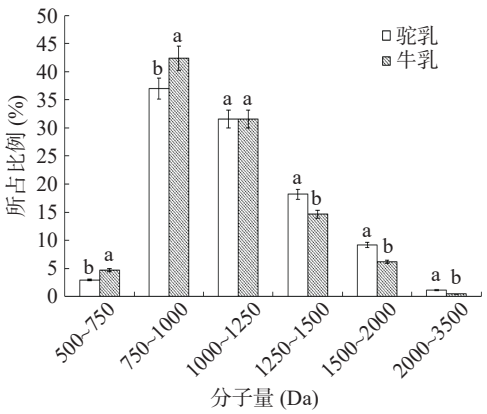


图 2　驼乳与牛乳蛋白肽的分子质量分布

Fig.2　Molecular weight distribution of protein peptides in camel milk and cow milk

注：不同字母标记表示驼乳与牛乳在分子量上存在显著差异(P<0.05)；图 3 同。

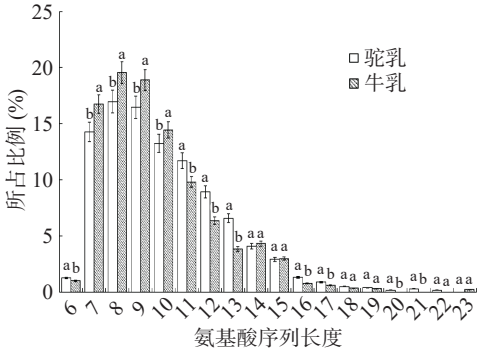


图 3　驼乳和牛乳蛋白肽的氨基酸序列长度分布

Fig.3　Amino acid sequence length distribution of camel milk and cow milk protein peptides

2.2　蛋白肽的来源分析

驼乳和牛乳在蛋白质组成、酪蛋白胶束结构以及氨基酸序列上存在显著差异，这些差异对它们的消化性、生物活性以及对健康的潜在益处产生影响。图 4 展示了驼乳与牛乳中蛋白肽的主要来源。在驼乳中，主要的蛋白质贡献者包括 β-酪蛋白(9.72%)、α-S1-酪蛋白(7.26%)和白蛋白(5.95%)。而在牛乳中，免疫球蛋白轻链，λ 基因簇(11.89%)、α-S1-酪蛋白(6.43%)和 β-酪蛋白(6.04%)是蛋白肽的主要来源。

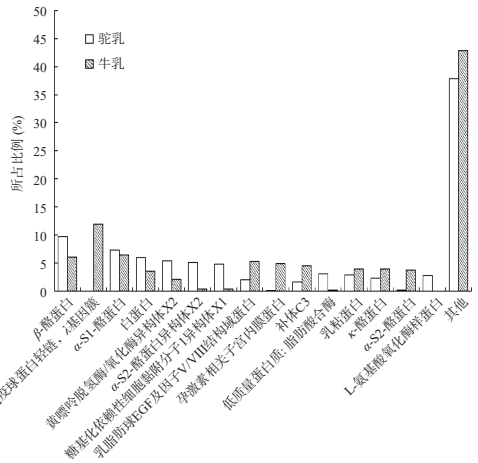


图 4　驼乳与牛乳中蛋白对应肽段数量占比柱状图

Fig.4　Bar chart of the proportion of corresponding peptides in camel milk and cow milk

Zhang 等[25] 在对单峰驼和双峰驼乳内源性多肽的比较分析中，在单峰驼乳中，有 55% 的肽段来自 β-酪蛋白，在双峰驼乳中没有发现来自 β-酪蛋白的内源性肽段[14]。Jiang 等[13] 的研究通过模拟消化脱脂驼乳粉，发现蛋白肽源于 β-酪蛋白的数量最多。在本研究中，驼乳中也得到了同样的结果，蛋白肽的产生数量和种类，并非仅与亲本蛋白的丰度有关，还可

能受到酶解条件、蛋白底物的结构和大小等多种因素的共同影响[26−27]。此外，在牛乳中发现了 β-乳球蛋白的蛋白肽，但在驼乳中没有出现，与前人研究结果一致[13]。在该研究中也鉴定到一些源自乳脂肪球膜蛋白的低丰度的蛋白。如黄嘌呤脱氢酶/氧化酶，乳凝聚素等，这些亲本蛋白质也在 Ras 奶酪中鉴定到过[28]。

2.3 驼乳与牛乳蛋白肽的潜在生物活性

为了探究驼乳和牛乳中蛋白肽的生物活性及其潜在的健康益处，利用 BIOPEP 和 MBPDB 数据库对驼乳和牛乳中的蛋白肽进行了分析，结果表明，经酶解处理的蛋白肽呈现出多样化的生物活性特征。驼乳中的肽段 ILDKEGIDY 和 LLQLEAIR 显示出的 DPP-Ⅳ抑制活性，对血糖控制具有重要意义。DPP-Ⅳ抑制剂通过减少肠促胰岛素的降解，增强胰岛素分泌，从而改善 2 型糖尿病患者的血糖水平。Nongonierma 等[29] 通过胰蛋白酶水解驼乳蛋白，利用 LC-MS/MS 和 QSAR 模型鉴定了这两条肽段，其 IC_{50} 值分别为 347.8±42.8 μmol/L 和 177.8±22.2 μmol/L，均表现出显著的 DPP-Ⅳ抑制活性。这些肽段在模拟胃肠消化后表现出良好的稳定性，体现它们在人体中具有较高的潜在生物利用度，为驼乳作为糖尿病管理的功能性食品成分提供了科学支持。

在牛乳中，鉴定出 28 条具有抗氧化、抗菌、免疫调节和 ACE 抑制等多种生物活性的蛋白肽，其中多数表现出显著的 ACE 抑制作用。此外，还识别出 4 种驼乳和牛乳共有的生物活性蛋白肽：VLPVPQKAVPYPQR、YQEPVLGPVR、VLPVPQK 和 MAIPPKK。Sowmya 等[30] 研究发现，水牛乳酪蛋白衍生的十肽 YQEPVLGPVR 具有显著的抗炎和抗氧化特性。该肽在体外和细胞实验中表现出强大的免疫调节能力，能显著抑制小鼠脾细胞的增殖（$P<0.01$），降低促炎细胞因子 IFN-γ 的水平，同时提高抗炎细胞因子 IL-10 和 TGF-β 的水平，并显著增强小鼠腹膜巨噬细胞的吞噬能力（$P<0.01$）。Liu 等[31] 也鉴定到了牛乳酪蛋白衍生肽 VLPVPQK，研究发现其对 HepG2 细胞胰岛素抵抗的影响及其调节机制，能有效清除自由基，逆转高葡萄糖和脂肪酸对 HepG2 细胞葡萄糖摄取的负面影响，同时不影响细胞活性，并能逆转 AKR1B10 的抑制。在发酵驴乳中鉴定到的肽段 MAIPPKK 具有增强抗氧化性和抑制大肠杆菌与金黄色葡萄球菌生长的能力，这些特性不仅能够提升驴乳的营养价值，也为开发新型功能性食品提供了重要的生物活性成分[32]。

大多数生物活性肽源自酪蛋白（表 1）。酪蛋白含量高、易于消化且具有多种生物活性，为生物活性多肽的来源提供了充足的原料。相较于牛乳，驼乳中鉴定出的蛋白肽段数量虽多，但具有生物活性肽的数量相对较低，这种现象可能由几个因素导致。首先，数据库中收录的生物活性肽大多源自牛乳，而骆驼等特色乳物种的肽段信息相对缺乏[10]。其次，许多肽段可能需要更深入的水解和更精细的分析方法才能揭示其潜在的生物活性。此外，生物活性肽的功能可能依赖于特定的序列、结构或与其他分子的相互作用。同时，由于 BIOPEP 数据库主要收录较短的肽段，而较长的活性蛋白肽难以被准确鉴定，容易被忽视[9]。

表 1 驼乳与牛乳潜在生物活性肽

Table 1 Potential bioactive peptides in camel milk and cow milk

蛋白质名称	Uniprot ID	基因名称	氨基酸序列	生物活性	驼乳	牛乳
α-乳球蛋白f[123-130]	A0A9W3F240	*LALBA*	ILDKEGIDY	DPP-Ⅳ抑制剂	√	×
f[147-156]	A0A452DI34		VGINYWLAHK	ACE抑制剂、抗氧化DPP-Ⅳ抑制剂	×	√
α-S1-酪蛋白f[123-130]	A0A9W3F965	*CSN1S1*	LLQLEAIR	DPP-Ⅳ抑制剂	√	×
f[195-208]	P02662		SDIPNPIGSENSEK	抗菌	×	√
f[209-214]			TTMPLW	ACE抑制剂、抗菌、免疫	×	√
f[42-49]			PFPEVFGK	ACE抑制剂	×	√
f[130-138]			NAVPITPTL	抗氧化、骨合成代谢	×	√
f[189-196]			FALPQYLK	ACE抑制剂、抗氧化	×	√
f[40-47]			NMAINPSK	ACE抑制剂	×	√
f[204-212]			AMKPWIQPK	ACE抑制剂	×	√
f[205-212]			MKPWIQPK	ACE抑制剂	×	√
f[96-106]			ALNEINQFYQK	ACE抑制剂	×	√
f[83-98]			FQSEEQQQTEDELQDK	促进钙吸收	×	√
f[148-155]			VKEAMAPK	抗菌、抗氧化	×	√
β-酪蛋白f[220-233]	A0A452DHW7	*CSN2*	VLPVPQKAVPYPQR	抗菌	√	√
f[99-106]			IHPFAQTQ	改善记忆丧失、抑制PEP	×	√
f[227-233]			AVPYPQR	ACE抑制剂、抗菌、抗氧化、结合、脂氧合酶抑制剂	×	√
f[243-252]			YQEPVLGPVR	抗炎、抗氧化、抗菌、ACE抑制剂	√	√
f[242-252]			LYQEPVLGPVR	抗炎、免疫	×	√

续表 1

蛋白质名称	Uniprot ID	基因名称	氨基酸序列	生物活性	驼乳	牛乳
f[220-226]			VLPVPQK	ACE抑制剂、ACE抑制剂、抗凋亡	√	√
f[253-259]			GPFPIIV	ACE抑制剂	×	√
f[241-252]			LLYQEPVLGPVR	ACE抑制剂	×	√
β-乳球蛋白f[49-56]	A0A3Q1LYE8	*PAEP*	DAQSAPLR	抗菌	×	√
f[100-107]			IDALNENK	抗菌、促进增殖	×	√
f[141-151]			TPEVDDEALEK	抗菌、DPP- IV抑制剂	×	√
f[108-116]			VLVLDTDYK	抗菌、DPP- IV抑制剂	×	√
f[41-56]			AASDISLLDAQSAPLR	抗菌	×	√
f[158-164]			ALPMHIR	ACE抑制剂、减少的血管收缩素-1释放、刺激增殖	×	√
f[48-56]			LDAQSAPLR	ACE抑制剂	×	√
f[110-116]			VLDTDYK	ACE抑制剂	×	√
f[17-24]			LIVTQTMK	免疫反应	×	√
κ-酪蛋白f[46-55]	A0A140T8A9	*CSN3*	YIPIQYVLSR	抗炎、C3a受体激动剂、收缩、降压	×	√
f[119-126]			HPHPHLSF	ACE抑制剂、抗氧化、促骨形成	×	√
f[127-133]			MAIPPKK	ACE抑制剂、抗凝血酶、抗血栓	√	√

注: 表中“√”表示在该物种中检测到对应的生物活性肽段; “×”表示未检测到。

该研究采用模拟胃肠道消化结合生物活性数据库分析的方法, 首次对双峰驼乳和牛乳原料乳中的蛋白肽潜在生物活性进行了系统研究。通过模拟人体消化过程, 能够更准确地评估这两种乳源蛋白肽在实际消化环境中的生物活性表现。同时, 借助生物活性数据库的分析, 挖掘这些蛋白肽可能具有的多种生物活性功能, 旨在研究二者的差异, 为驼乳的开发利用提供科学依据。

为了进一步分析驼乳和牛乳中潜在的生物活性蛋白肽, 并识别现有数据库中未记录的活性肽, 本研究采用基于机器学习的在线工具 Peptide Ranker 对驼乳和牛乳中的蛋白肽进行生物活性预测。研究结果显示, 驼乳中特有的潜在生物活性蛋白肽共有 70 条, 而牛乳中则有 44 条(图 5)。此外, 牛乳中评分超过 0.9 的肽段有 1 条。这些数据表明, 驼乳和牛乳中存在尚未被充分研究的生物活性肽。驼乳与牛乳中潜在生物活性多肽的主要来源均为酪蛋白, 其中驼乳中源自酪蛋白的生物活性肽占比为 35.7%, 牛乳中占比 34.1%。具体氨基酸序列及来源详见表 2。该研究揭示了驼乳和牛乳中具有潜在生物活性的成分及其来源, 为挖掘乳制品中的功能性成分提供了基础。

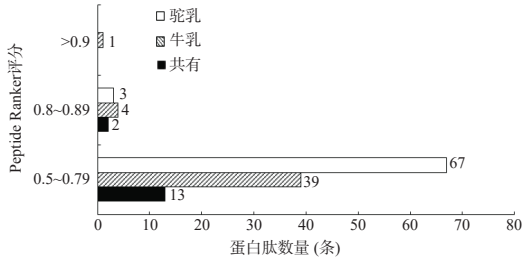


图 5　驼乳与牛乳中评分>0.5 的特有及共有蛋白肽数量

Fig.5　Number of unique and shared protein peptides with a score >0.5 in camel milk and cow milk

表 2　驼乳与牛乳中 Peptide Ranker 评分>0.5 的蛋白肽

Table 2　Peptide Ranker score >0.5 protein peptides in camel milk and cow milk

来源	蛋白质名称	Uniport ID	基因名称	氨基酸序列	得分
驼乳	*β*-1,4-半乳糖基转移酶1f[51-59]	A0A9W3F6C2	*B4GALT1*	GAALLPPLR	0.88
	上颌下腺雄激素调节蛋白3A f[52-59]	A0A9W3FKT4	*SMR3A*	PYLPFQPR	0.85
	β-酪蛋白f[1-10]	A0A077SL35	*CSN2*	FLPPLQPAVM	0.82
	中性粒细胞明胶酶相关脂质运载蛋白f[27-35]	A0A9W3GQ90	*LCN2*	LIPAPPLLR	0.79
	黏蛋白15f[318-329]	A0A9W3GZ61	*MUC15*	DGIPMDDIPPLR	0.78
	嗜乳脂蛋白亚家族1成员A1亚型3f[233-242]	A0A9W3FG03	*LOC105084142*	ISIPAPSFPR	0.78
	Serpin A3-8异构体X4f[249-258]	A0A9W3FJE6	*LOC105079903*	IPSLVTPMFR	0.78
	乳凝集f[399-406]	A0A9W3EQ51	*MFGE8*	NMFETPFL	0.77
	中性粒细胞明胶酶相关脂质运载蛋白f[27-34]	A0A9W3GQ90	*LCN2*	LIPAPPLL	0.76
	β-酪蛋白(部分)f[1-8]	A0A077B3P4		FLPPLQPA	0.75
	中性粒细胞明胶酶相关脂质运载蛋白f[27-34]	A0A9W3GQ90	*LCN2*	LIPAPPL	0.73
	κ-酪蛋白f[75-83]	L0P304	*csn3*	FIPYPNYAK	0.73
	乳铁蛋白f[300-315]	A0A9W3F6J9	*LTF*	GKPSAFQLFGSPAGQK	0.71
	κ-酪蛋白f[74-83]	L0P304	*csn3*	QFIPYPNYAK	0.71
	低质量蛋白质: 脂肪酸合酶f[796-802]	A0A9W3EJJ1	*FASN*	FLSNMGR	0.71

续表 2

来源	蛋白质名称	Uniport ID	基因名称	氨基酸序列	得分
	乳铁蛋白f[167-176]	A0A9W3EQ51	*MFGE8*	NPWIQVNLLR	0.70
	蛋白质二硫键异构酶A3f[131-140]	A0A9W3F3I1	*PDIA3*	QAGPASVPLR	0.69
	肽聚糖识别蛋白1f[130-136]	A0A9W3GMC1	*PGLYRP1*	MGNYMNR	0.66
	乳过氧化物酶异构体X1 f[348-355]	A0A9W3EK51	*LPO*	DLSSPLGL	0.66
	α-S2-酪蛋白亚型X2 f[101-107]	A0A9W3F984	*LOC105080410*	NPWDQGK	0.66
	乳铁蛋白f[633-639]	A0A9W3F6J9	*LTF*	QQAHFGR	0.66
	低质量蛋白质: 脂肪酸合酶f[1583-1591]	A0A9W3EJJ1	*FASN*	LSPDAIPGK	0.65
	β-酪蛋白f[94-107]	A0A077SL35	*CSN2*	PLQPAVMVPFLQPK	0.65
	β-酪蛋白f[96-107]	A0A077SL35	*CSN2*	QPAVMVPFLQPK	0.65
	α-S2-酪蛋白亚型X2 f[110-118]	A0A9W3F984	*LOC105080410*	AYPFIPTVN	0.64
	β-酪蛋白f[219-227]	A0A077SL35	*CSN2*	GLHPVPQPL	0.64
	β-酪蛋白f[219-229]	A0A077SL35	*CSN2*	GLHPVPQPLVP	0.64
	包含Ig样结构域的蛋白f[178-188]	A0A3Q1N3I9		PIQHQDWTGGK	0.63
	黄嘌呤脱氢酶/氧化酶亚型X2 f[1229-1240]	A0A9W3EG81	*XDH*	IPAFGSIPTEFR	0.63
	肽聚糖识别蛋白1 f[113-124]	A0A9W3GMC1	*PGLYRP1*	GAHAGPTWNPIS	0.63
	β-酪蛋白f[219-231]	A0A077SL35	*CSN2*	GLHPVPQPLVPVI	0.63
	乳脂球EGF和因子Ⅴ/Ⅷ结构域f[168-175]	F1MXX6	*MFGE8*	NPWIQVNL	0.62
	β-酪蛋白f[97-107]	A0A077SL35	*CSN2*	PAVMVPFLQPK	0.62
	中性粒细胞明胶酶相关脂质运载蛋白f[36-42]	A0A9W3GQ90	*LCN2*	VPLQPDF	0.62
	α-S1-酪蛋白f[140-146]	A0A9W3F965	*CSN1S1*	LSSHPYL	0.60
	骨桥蛋白f[156-164]	A0A9W3F4V6	*SPP1*	GDNIGYALR	0.60
	黏蛋白16样蛋f[2751-2758]	A0A9W3G4A7	*LOC105068410*	SEYQLNFR	0.60
	乳脂球EGF和因子Ⅴ/Ⅷ结构域f[135-143]	F1MXX6	*MFGE8*	HLGFMGLQR	0.59
	β-酪蛋白f[100-107]	A0A077SL35	*CSN2*	MVPFLQPK	0.59
	Butyrophilin亚家族1成员A1异构体X3 f[334-341]	A0A9W3FG03	*LOC105084142*	LPETPDRF	0.59
	β-酪蛋白f[219-230]	A0A077SL35	*CSN2*	GLHPVPQPLVPV	0.59
	钠/氢交换调节因子NHE-RF1 f[2-13]	A0A9W3GPX9	*SLC9A3R1*	SADSAAGAPLPR	0.59
	低质量蛋白质: 脂肪酸合酶f[2121-2129]	A0A9W3EJJ1	*FASN*	AVAHILGIR	0.58
	黄嘌呤脱氢酶/氧化酶亚型X2f[959-966]	A0A9W3EG81	*LOC105080410*	LEGFNLPR	0.57
	骨桥蛋白f[156-164]	A0A9W3F4V6	*SPP1*	GDNIGYAL	0.57
	κ-酪蛋白f[73-83]	L0P304	*csn3*	NQFIPYPNYAK	0.57
	肌动蛋白f[19-28]	A0A9W3F4H2	*ACTB*	AGFAGDDAPR	0.56
	白蛋白f[361-371]	A0A9W3F988	*ALB*	HPEYAVSLLLR	0.56
	乳黏着蛋白f[399-408]	A0A9W3EQ51	*MFGE8*	NMFETPFLAR	0.55
	低质量蛋白质: 硫醇氧化酶1f[511-523]	A0A9W3EPQ9	*QSOX1*	IVLDLPSAGLSPR	0.55
	β-酪蛋白f[98-107]	A0A077SL35	*CSN2*	AVMVPFLQPK	0.55
	单核细胞分化抗原CD14 f[309-315]	A0A9W3FCP8	*CD14*	APRPDEL	0.54
	糖基化依赖性细胞粘附分子1异构体X1f[181-187]	A0A9W3F2R1	*LOC105076320*	ETMDFL	0.54
	乳过氧化物酶异构体X1f[447-453]	A0A9W3EK51	*LPO*	MQIITFR	0.54
	低质量蛋白质: 硫醇氧化酶1f[514-523]	A0A9W3EPQ9	*QSOX1*	DLPSAGLSPR	0.54
	丝氨酸蛋白酶抑制剂 A3-8异构体X4f[241-248]	A0A9W3FJE6	*LOC105079903*	SVEVPMMR	0.54
	低质量蛋白质: 脂肪酸合酶f[1407-1415]	A0A9W3EJJ1	*FASN*	LAPQASPVF	0.54
	β-酪蛋白f[65-71]	A0A077SL35	*CSN2*	IYTFPQP	0.54
	醌氧化还原酶f[250-257]	A0A9W3GYB7	*CRYZ*	GPIEINPR	0.53
	κ-酪蛋白f[77-83]	L0P304	*csn3*	PYPNYAK	0.53
	β-酪蛋白f[209-218]	A0A077SL35	*CSN2*	FQEPVPDPVR	0.53
	乳脂球EGF和因子Ⅴ/Ⅷ结构域f[415-421]	F1MXX6	*MFGE8*	PVAWHNR	0.53
	β-酪蛋白f[190-199]	A0A077SL35	*CSN2*	PQQMVPYPQR	0.52
	β-酪蛋白f[207-218]	A0A077SL35	*CSN2*	LPFQEPVPDPVR	0.52
	补体衰变加速因子f[176-186]	A0A9W3HP00	*CD55*	NGHVIIPDGIL	0.51
	α-S2-酪蛋白异构体X2 f[86-93]	A0A9W3F984	*LOC105080410*	FLQYLQAL	0.51
	嗜乳脂蛋白亚家族1成员A1异构体X3f[494-502]	A0A9W3FG03	*LOC105084142*	EIPLSPMAG	0.51
	κ-酪蛋白f[76-83]	L0P304	*csn3*	IPYPNYAK	0.51
	乳黏着蛋白f[413-420]	A0A9W3EQ51	*MFGE8*	LPVAWHNR	0.50

续表 2

来源	蛋白质名称	Uniport ID	基因名称	氨基酸序列	得分
牛乳	α-S1-酪蛋白f[47-55]	A0A9W3F965	*CSN1S1*	AVVSPIQFR	0.50
	铁传递蛋白f[143-152]	G3X6N3	*TF*	SAGWNIPMGK	0.91
	α-S1-酪蛋白	P02662	*CSN1S1*	FVAPFPEVFGK	0.84
	低质量蛋白质: 肌联蛋白f[38-49]	A0A9W3GCD8	*TTN*	PFPEVLW	0.83
	α-S1-酪蛋白f[41-49]	P02662	*CSN1S1*	APFPEVFGK	0.83
	乳转铁蛋白f[308-315]	B3VTM3	*LF*	FGSPPGQR	0.81
	κ-酪蛋白f[76-84]	A0A140T8A9	*CSN3*	FLPYPYYAK	0.79
	免疫球蛋白样结构域蛋白f[341-348]	G5E513		GFAPADVF	0.79
	ATP结合盒亚家族G成员2f[477-485]	A7E3T8	*ABCG2*	LLSDLLPMR	0.79
	α-S2-酪蛋白f[189-195]	P02663	*CSN1S2*	FALPQYL	0.78
	α-S1-酪蛋白f[40-49]	P02662	*CSN1S1*	VAPFPEVFGK	0.77
	κ-酪蛋白f[90-97]	A0A140T8A9	*CSN3*	SPAQILQW	0.76
	E1A激活基因阻遏子1f[45-53]	A0A3Q1LS20	*CREG1*	LLLPPLPPR	0.76
	β-酪蛋白f[234-240]	A0A452DHW7	*CSN2*	DMPIQAF	0.72
	α-S2-酪蛋白f[206-212]	P02663	*CSN1S2*	KPWIQPK	0.71
	NFX1型锌指蛋白1f[706-712]	A0A9W3GAE9	*ZNFX1*	NLPMHLR	0.71
	乳转铁蛋白f[305-315]	B3VTM3	*LF*	FQLFGSPPGQR	0.68
	黄嘌呤脱氢酶/氧化酶f[931-938]	A0A3Q1LW91	*XDH*	GFGGPQAL	0.66
	κ-酪蛋白f[78-84]	A0A140T8A9	*CSN3*	PYPYYAK	0.66
	α-乳白蛋白f[148-156]	A0A452DI34	*LALBA*	GINYWLAHK	0.65
	κ-酪蛋白f[74-84]	A0A140T8A9	*CSN3*	NQFLPYPYYAK	0.65
	40S核糖体蛋白S24类似物f[28-34]	A0A9W3H8R9	*LOC105081288*	TPPDVIF	0.65
	含解整素和金属蛋白酶结构域蛋白25类似物f[8-15]	A0A9W3FEL2	*LOC105083421*	VAPYPGAR	0.64
	免疫球蛋白轻链λ基因簇f[133-144]	Q1RMN8	*IGL@*	SPPSVTLFPPST	0.64
	囊泡胺转运1f[77-91]	F1MUP9	*VAT1*	PAAPSAPGTGQLTLR	0.63
	免疫球蛋白轻链λ基因簇f[293-301]	A5D7Q2		FTWNPTGGK	0.62
	κ-酪蛋白f[77-84]	A0A140T8A9	*CSN3*	LPYPYYAK	0.61
	乳过氧化物酶f[722-729]	G3MXZ0	*LPO*	DLSPWASR	0.60
	乳转铁蛋白f[256-262]	B3VTM3	*LF*	APVDAFK	0.59
	脂蛋白脂酶f[201-208]	P11151	*LPL*	LSPDDADF	0.58
	黄嘌呤脱氢酶/氧化酶f[458-465]	A0A3Q1LW91	*XDH*	VLFQPGSM	0.57
	多聚免疫球蛋白受体蛋白f[608-625]	A6QNW3	*PIGR*	DAAGGPGAPADPGRPTGY	0.56
	类似Sal蛋白4 f[330-340]	A0A9W3GV78	*SALL4*	LPGALLPQAPG	0.56
	免疫球蛋白样结构域蛋白f[179-188]	A0A3Q1N3I9		IQHQDWTGGK	0.56
	β-酪蛋白f[238-252]	A0A452DHW7	*CSN2*	QAFLLYQEPVLGPVR	0.54
	免疫球蛋白轻链λ基因簇f[318-324]	G5E513		YLLPPTR	0.54
	α-S1-酪蛋白f[23-37]	P02662	*CSN1S1*	HQGLPQEVLNENLLR	0.54
	免疫球蛋白轻链λ基因簇f[293-301]	G5E513		HSDLPFPEK	0.53
	脂蛋白脂酶f[21-30]	A0A3Q1LR40	*LIPG*	DPTPLGPEGR	0.52
	多聚免疫球蛋白受体f[20-27]	A6QNW3	*PIGR*	SPIFGPEE	0.51
	β-酪蛋白f[131-147]	A0A452DHW7	*CSN2*	PVVVPPFLQPEVMGVSK	0.51
	乳脂肪球表皮生长因子和凝血因子Ⅴ/Ⅷ结构域包含蛋白f[211-220]	F1MXX6	*MFGE8*	QFQFIQVAGR	0.51
	白蛋白f[131-138]	A0A140T897	*ALB*	DDSPDLPK	0.51
	孕激素相关子宫内膜蛋白f[165-172]	A0A3Q1LYE8	*PAEP*	LSFNPTQL	0.51
	孕激素相关子宫内膜蛋白f[157-164]	A0A3Q1LYE8	*PAEP*	KALPMHIR	0.51

2.4　驼乳与牛乳蛋白肽差异表达分析

在驼乳和牛乳蛋白肽的比较分析过程中，采用了火山图可视化工具，以揭示两组间蛋白肽的显著性差异。图 6 中显著下调的蛋白肽以蓝色标记（Fold Change<0.67 且 P<0.05），显著上调的蛋白肽则以红色突出（Fold Change>1.5 且 P<0.05）。最终筛选出 49 条差异显著表达的蛋白肽，其中 19 条在驼乳中上调表达，30 条则表现出下调表达。进一步利用层次聚类算法对这些多肽进行分类，并通过热图直观展现了分类结果（图 7），这些多肽分为两个主要聚类，反映了驼乳与牛乳蛋白肽在表达模式上的差异。在此基础上，分析发现牛乳中的 MAIPPKK 和 YQEPVLGPVR 两种蛋白肽的丰度较高，且已知它们具有多种生物活性，包括 ACE 抑制作用和抗菌活

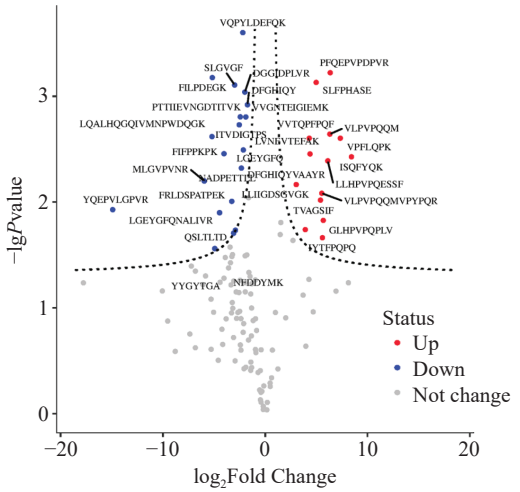


图 6 驼乳与牛乳的差异表达蛋白肽的火山图

Fig.6 Volcanic diagram of differentially expressed protein peptides in camel milk and cow milk

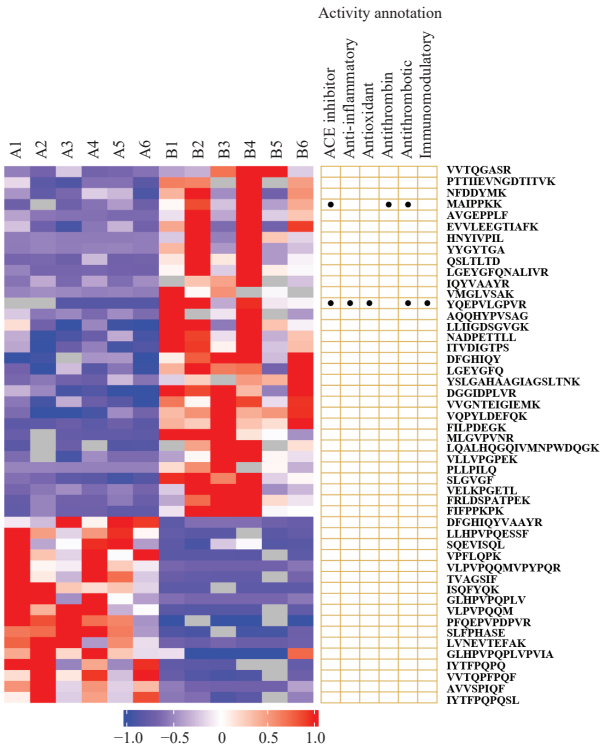


图 7 驼乳与牛乳差异表达蛋白肽的聚类分析热图

Fig.7 Heat map of cluster analysis of differentially expressed protein peptides in camel milk and cow milk

注: 图中 A 为驼乳, B 为牛乳。

性。值得注意的是, ISQFYQK 这种蛋白肽在驼乳中的丰度是牛乳的 344 倍, VPFLQPK 的丰度是牛乳的 161 倍, 且该肽段的 Peptide Ranker 评分为 0.59, 表明其具有较高概率的生物活性, 张少辉等[33] 发现, 该蛋白肽可通过降低 α-葡萄糖苷酶与 α-淀粉酶的活性, 减缓了肠道中碳水化合物的分解及葡萄糖的摄取, 从而有效减少了餐后血糖水平。这些蛋白肽的发现不仅为区分驼乳与牛乳提供了潜在的生物标志物, 还为未来研究驼乳和牛乳的营养价值提供了新的线索, 这些线索有待进一步探索和验证。

3 结论

本研究通过模拟胃肠消化过程, 利用 LC-MS/MS 技术对驼乳和牛乳中的蛋白肽进行了比较分析。共鉴定出 1074 条蛋白肽, 其中驼乳中特有 561 条, 牛乳中特有 385 条, 两种乳品共有 128 条。这些蛋白肽的分子量主要分布在 500~3500 Da 之间, 长度由 6~23 个氨基酸残基组成。驼乳蛋白肽主要来源于 β-酪蛋白, 而牛乳蛋白肽主要来源于免疫球蛋白轻链, λ 基因簇。通过生物活性数据库分析, 在驼乳和牛乳中共鉴定出 34 条具有生物活性的蛋白肽, 涵盖了 DPP-IV 抑制、ACE 抑制和抗菌等多种生物活性。Peptide Ranker 评分分析显示, 驼乳中具有潜在生物活性的蛋白肽的数量高于牛乳。此外, ISQFYQK 蛋白肽在驼乳中的丰度是牛乳的 344 倍, VPFLQPK 的丰度是牛乳的 161 倍。结果表明, 驼乳和牛乳在蛋白肽的种类和功能上存在差异。这些发现不仅为驼乳与牛乳的差异分析提供了重要的参考依据, 也为乳制品的进一步开发和功能性产品的创制提供了科学支持。

© 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] 张敏, 彭小雨, 高宇, 等. 双峰驼乳的营养特性和生物活性研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 230−234. [ZHANG Min, PENG Xiaoyu, GAO Yu, et al. Research progress on nutritional characteristics and biological activity of Bactrian camel milk[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 230−234.]

[2] HE Jing, SI R, WANG Yulin, et al. Lipidomic and proteomic profiling identifies the milk fat globule membrane composition of milk from cows and camels[J]. Food Research International, 2024, 179: 113816.

[3] HAN Binsong, ZHANG Lina, ZHOU Peng. Comparative proteomics of whey proteins: New insights into quantitative differences between bovine, goat and camel species[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 227: 10−16.

[4] WANG Xiaxia, ZHAO Xiaowei, HUANG Dongwei, et al. Proteomic analysis and cross species comparison of casein fractions from the milk of dairy animals[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 43020.

[5] WANG Linghong, DONG Chao, LI Xian, et al. Anticancer potential of bioactive peptides from animal sources (Review)[J]. Oncology Reports, 2017, 38(2): 637−651.

[6] 苏娜, 吉日木图, 伊丽. 驼乳肽生物功能特性的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 321−329. [SU Na, JIRIMUTU, YI Li. Recent progress in biological functions of camel milk peptides[J]. Food Science, 2020, 41(21): 321−329.]

[7] BAPTISTA D P, SALGAÇO M K, SIVIERI K, et al. Use of static and dynamic *in vitro* models to simulate Prato cheese gastrointestinal digestion: Effect of *Lactobacillus helveticus* LH-B02 addition on peptides bioaccessibility[J]. LWT, 2020, 134: 110229.

[8] LI Yufang, LI Shijun, ZHAO Xingwen, et al. Novel insights into whey protein among yak, yellow cattle, and cattle-yak milk [J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101384.

［9］ SHI Yanan, WEI Guangqiang, HUANG Aixiang. Simulated *in vitro* gastrointestinal digestion of traditional Chinese Rushan and Naizha cheese: Peptidome profiles and bioactivity elucidation[J]. Food Research International, 2021, 142: 110201.
［10］ 魏光强, 施娅楠, 万长江, 等. 基于模拟胃肠道消化的云南民族乳制品蛋白肽研究[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 208−214. ［WEI Guangqiang, SHI Yanan, WAN Changjiang, et al. Characterization of peptides from simulated gastrointestinal digestion of ethnic dairy products in Yunnan, China[J]. Food Science, 2021, 42(1): 208−214.］
［11］ BASILICATA M G, PEPE G, SOMMELLA E, et al. Peptidome profiles and bioactivity elucidation of buffalo-milk dairy products after gastrointestinal digestion[J]. Food Research International, 2018, 105: 1003−1010.
［12］ MORENO-MONTORO M, JAUREGI P, NAVARRO-ALARCÓN M, et al. Bioaccessible peptides released by *in vitro* gastrointestinal digestion of fermented goat milks[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2018, 410(15): 3597−3606.
［13］ JIANG Hui, XU Yunxuan, CHEN Gangliang, et al. Digestive properties and peptide profiles exhibited significant differences between skim camel milk and bovine milk powder after static *in vitro* simulated infant gastrointestinal digestion[J]. Food Research International, 2024, 178: 113860.
［14］ ZOU Zhengzheng, DULEY J A, COWLEY D M, et al. Digestibility of proteins in camel milk in comparison to bovine and human milk using an *in vitro* infant gastrointestinal digestion system [J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131704.
［15］ 董雅静, 张九凯, 邢冉冉, 等. 基于高通量定量蛋白组学技术的全脂牛乳和脱脂牛乳蛋白组差异分析研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 61−69. ［DONG Yajing, ZHANG Jiukai, XING Ranran, et al. Comparison of proteome differences between whole milk and skim milk based on high-throughput quantitative proteomics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 61−69.］
［16］ BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion[J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991−1014.
［17］ LIU Dandan, GUO Yiting, WU Ping, et al. The necessity of walnut proteolysis based on evaluation after *in vitro* simulated digestion: ACE inhibition and DPPH radical-scavenging activities[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125960.
［18］ LI Shanshan, CAO Qichen, XIAO Weidi, et al. Optimization of acquisition and data-processing parameters for improved proteomic quantification by sequential window acquisition of all theoretical fragment ion mass spectrometry[J]. Journal of Proteome Research, 2017, 16(2): 738−747.
［19］ DALLAS D C, GUERRERO A, KHALDI N, et al. A peptidomic analysis of human milk digestion in the infant stomach reveals protein-specific degradation patterns[J]. The Journal of Nutrition, 2014, 144(6): 815−820.
［20］ NIELSEN S D, BEVERLY R L, QU Y Y, et al. Milk bioactive peptide database: A comprehensive database of milk protein-derived bioactive peptides and novel visualization[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 673−682.
［21］ MOONEY C, HASLAM N J, POLLASTRI G, et al. Towards the improved discovery and design of functional peptides: Common features of diverse classes permit generalized prediction of bioactivity[J]. PLoS One, 2012, 7(10): e45012.
［22］ 李欣蔚, 廖佳, 董秀瑜, 等. 功能性肽的分离及富集研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 267−276. ［LI Xinwei, LIAO Jia, DONG Xiuyu, et al. A review of the separation and enrichment of functional peptides[J]. Food Science, 2020, 41(1): 267−276.］
［23］ 郝晓丽, 张霞, 李磊, 等. 驼乳与牛乳乳清蛋白酶解工艺优化及其产物抗氧化能力分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 187−194,201. ［HAO Xiaoli, ZHANG Xia, LI Lei, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of camel milk and milk whey protein and analysis of its antioxidant capacity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(13): 187−194,201.］
［24］ XU Chengzhi, LIU Yuting, LI Ke, et al. Absorption of food-derived peptides: Mechanisms, influencing factors, and enhancement strategies[J]. Food Research International, 2024, 197: 115190.
［25］ ZHANG Lina, HAN Binsong, LUO Baolong, et al. Characterization of endogenous peptides from Dromedary and Bactrian camel milk[J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(4): 1149−1160.
［26］ 高芸芳, 王金水, 苏银杰. 酪蛋白结构及其酶解特性研究进展[J]. 农产品加工(学刊), 2013(5): 1−4,9. ［GAO Yunfang, WANG Jinshui, SU Yinjie. Development of structure and enzymatic properties of casein[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2013(5): 1−4,9.］
［27］ 华实, 豆智华, 谢飞, 等. 驼乳乳清蛋白多态性的研究[J]. 中国乳品工业, 2023, 51(7): 11−17. ［HUA Shi, DOU Zhihua, XIE Fei, et al. Study on the polymorphism of camel milk whey protein[J]. China Dairy Industry, 2023, 51(7): 11−17.］
［28］ HELAL A, CATTIVELLI A, CONTE A, et al. Effect of ripening and *in vitro* digestion on bioactive peptides profile in Ras cheese and their biological activities[J]. Biology, 2023, 12(7): 948.
［29］ NONGONIERMA A B, PAOLELLA S, MUDGIL P, et al. Identification of novel dipeptidyl peptidase IV (DPP-IV) inhibitory peptides in camel milk protein hydrolysates[J]. Food Chemistry, 2018, 244: 340−348.
［30］ SOWMYA K, BHAT M I, BAJAJ R K, et al. Buffalo milk casein derived decapeptide (YQEPVLGPVR) having bifunctional anti-inflammatory and antioxidative features under cellular milieu [J]. International Journal of Peptide Research and Therapeutics, 2019, 25(2): 623−633.
［31］ LIU Hanxiong, TU Maolin, CHENG Shuzhen, et al. An anticoagulant peptide from beta-casein: Identification, structure and molecular mechanism[J]. Food & Function, 2019, 10(2): 886−892.
［32］ CIRRINCIONE S, LUGANINI A, LAMBERTI C, et al. Donkey milk fermentation by *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* and *Lactobacillus rhamnosus* affects the antiviral and antibacterial milk properties[J]. Molecules, 2021, 26(16): 5100.
［33］ 张少辉, 周婕慧, 彭小杰, 等. 生物活性肽及其制备方法和应用: CN202410206734.9[P]. 2024-08-30. ZHANG Shaohui, ZHOU Jiehui, PENG Xiaojie, et al. Bioactive peptides and their preparation methods and applications: CN202410206734.9[P]. 2024-08-30.