DOI：10. 16853/j. cnki. 1009-3575. 2026. 06. 011

马乳的营养组成与生物活性研究进展

刘源壹[1]，何千倩[1]，杜 明[1]，芒 来[1]，王雪焦[2]，张心壮[1,*]
（1. 农业农村部马属动物种业创新重点实验室/内蒙古自治区马属动物科学研究与技术创新重点实验室/内蒙古农业大学马属动物研究中心/内蒙古农业大学动物科学学院，呼和浩特 010018；2. 内蒙古农业大学乡村振兴研究院/内蒙古农牧渔业生物实验研究中心，呼和浩特 010018）

摘要：马乳作为拥有数千年食用历史的天然乳源，凭借独特的营养构成与生物活性特性，引起学者们的广泛关注。本文系统梳理了马乳营养成分及其生物活性物质的最新研究进展，阐述了马乳蛋白质、脂质及寡糖的化学组成与结构特征，通过与人乳和牛乳的多维度对比分析，讨论了其独特的生物学优势。文章进一步探讨了马乳新型生物标志物的挖掘策略，以及在解析其成分结构-功能关系方面取得的突破性进展，并剖析了马乳产业化进程中的应用现状、技术瓶颈及潜在解决方案。本综述旨在为功能性马乳制品的基础研究、技术开发及产业化应用提供科学指导与理论支撑。

关键词：马乳；营养成分；生物活性物质；作用机制；产业应用
中图分类号：S821 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-3575(2026)06-0093-08

Research Progress on the Nutritional Composition and Bioactive Properties of Mare's Milk

LIU Yuanyi[1], HE Qianqian[1], DU Ming[1], Manglai [1], WANG Xuejiao[2], ZHANG Xinzhuang[1,*]
(1. *Key Laboratory of Equus Germplasm Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Inner Mongolia Key Laboratory of Equine Science Research and Technology Innovation, Equus Research Center, Inner Mongolia Agricultural University, College of Animal Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*;
2. *Rural Revitalization Research Institute, Inner Mongolia Agricultural University, Agriculture, Animal Husbandry, Fishery and Biology Experiment Research Center, Hohhot* 010018, *China*)

Abstract: As a natural milk source with a history of consumption spanning thousands of years, mare's milk has garnered extensive attention from scholars due to its unique nutritional composition and bioactive properties. This paper systematically reviewed the latest research progress on the nutritional components and bioactive substances in mare's milk, elucidating the chemical composition and structural characteristics of mare milk proteins, lipids, and oligosaccharides. Through multidimensional comparative analysis with human milk and cow milk, its unique biological advantages were discussed. The article further explored the strategies for discovering novel biomarkers in the mare's milk, as well as the breakthroughs achieved in elucidating the structure-function relationships of its components. Additionally, it analyzed the current application status, technological bottlenecks, and potential solutions in the industrialization process of mare milk. This review aimed to provide scientific guidance and theoretical support for fundamental research, technological development, and industrial application of functional mare milk products.

Key words: Mare's milk; Nutritional components; Bioactive substances; Mechanism of action; Industrial application

马乳（mare′s milk），作为一种在亚欧大陆游牧民族中拥有数千年食用历史的天然饮品，不仅是人们重要的营养来源，更被传统医学赋予了宝贵的药用价值[1]。乳中的生物活性物质是一个复杂体系，主要包括具有特殊功能的蛋白质与多肽、独特的脂质组分以及结构多样的寡糖等。例如，高含量的溶菌酶和乳铁蛋白赋予了马乳天然抗菌能力[2-3]；富含α-亚麻酸等多不饱和脂肪酸脂质组分，对心血管健康和神经系统发育具有积极作用[4-5]；而其寡糖结构与人乳寡糖的相似性，则暗示了其在调节肠道菌群、促进婴儿肠道健康方面的巨大潜力[2, 6]。尽管马乳的健康潜力备受关注，但相关研究仍面临诸多挑战。目前，关于马乳中微量生物活性成分的系统性研究尚不充分，许多成分的精确结构、功能机制及其在人体内的生物利用度和临床效果仍有待阐明[1,4]。此外，将理论性发现转化为规模化、标准化商业产品，也面临着原料获取、加工技术以及产品稳定性等多重障碍[7]。

因此，本综述从马乳核心生物活性组分（蛋白质、脂质和寡糖）的化学组成与结构特征出发，将其

收稿日期：2026-01-19
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YDF1300500）；内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目（BR221018，BR251007）
作者简介：刘源壹（1999—），男，博士研究生，主要从事马属动物营养与饲料科学方面的研究；*为通信作者，张心壮（1989—），男，博士，副教授，主要从事马属动物营养与产品品质方面的研究，E-mail：zhangxinzhuang@imau. edu. cn

与人乳和牛乳进行多维度比较,总结其独特性。在此基础上,本综述将重点关注近年来的重要进展,特别是在新型生物标志物探索和成分结构-功能关系解析方面的进展。最后,本综述剖析马乳产业化应用的现状、面临的技术挑战与潜在解决方案,并展望未来创新研究方向。通过对以上内容全面论述,以期为马乳的基础研究、技术开发和产业化应用提供科学依据和前瞻性指导。

1 马乳的生物活性物质的化学组成与结构特征

马乳的生物活性主要源于其独特的化学成分,这些成分不仅为机体提供必需的营养,更通过特定的分子结构发挥着超越基础营养的生理调节功能[8]。马乳中3类关键的生物活性物质包括蛋白质、脂质及寡糖。

1.1 蛋白质与生物活性肽

马乳的蛋白质含量通常低于牛乳,但其组成模式却与人乳相似,这构成了其低致敏性和高生物活性的基础[9]。马乳属于"白蛋白乳",其乳清蛋白与酪蛋白的比例接近1∶1,而牛乳则是"酪蛋白乳",酪蛋白占主导地位[10-11]。这种独特的蛋白质比例不仅影响其消化特性,也决定了其所含生物活性蛋白的种类和丰度。

1.1.1 主要生物活性蛋白质

马乳中富含多种具有明确生物活性的蛋白质,其结构和功能各具特色。由于溶菌酶(lysozyme)是一种能够水解细菌细胞壁中肽聚糖的酶,从而对革兰氏阳性菌表现出强大的裂解作用[12]。Gallo等[13]研究表明,溶菌酶能显著减少肠道致病菌数量,同时促进有益菌的定植,维持肠道微生物的稳态。其高丰度是马乳天然抗菌活性的重要来源,对维持肠道微生物稳态、保护新生动物免受病原体感染具有至关重要的作用。Bruhn等[14]发现马乳中的溶菌酶通过水解细菌细胞壁肽聚糖中的β-(1,4)-糖苷键,导致细胞裂解。

马乳中的乳铁蛋白(lactoferrin)含量也相当可观,约为0.08~0.20 g/L[1]。乳铁蛋白是一种多功能的铁结合糖蛋白,其生物学功能多样,包括广谱抗菌、抗病毒、抗炎、抗氧化以及免疫调节等[15]。马乳中的乳铁蛋白通过调节免疫细胞的活性和细胞因子的产生,在先天免疫和适应性免疫中发挥桥梁作用[16]。

α-乳白蛋白(α-lactalbumin)是马乳中最主要的乳清蛋白,含量约为1.00 g/L[1]。α-乳白蛋白在结构上富含色氨酸,是合成神经递质5-羟色胺的前体,因此可能对情绪调节和睡眠质量产生积极影响[17]。此外,当α-乳白蛋白与油酸形成复合物时,可能表现出抗肿瘤潜力[18]。其本身也具有一定的抗菌和抗氧化防御能力。

而在马乳的初乳中,含有丰富的免疫球蛋白(immunoglobulins),如IgA、IgG和IgM[1]。这些抗体为新生幼驹提供了关键的被动免疫保护,帮助其在自身免疫系统成熟前抵御病原体的入侵。Rivero等[19]的研究表明马乳分泌型IgA(sIgA)在黏膜免疫中尤为重要,能够中和肠道中的毒素和病毒,阻止病原体附着于肠道上皮细胞。

1.1.2 生物活性肽的前体

除了完整的蛋白质,马乳蛋白还是生物活性肽的丰富前体库。这些肽链在蛋白质分子内部以无活性形式存在,但在消化道中经过胃蛋白酶、胰蛋白酶等内源性酶酶解,或在发酵过程中被微生物产生的蛋白酶水解后,发挥多种生理功能[20]。这些释放肽段可能具有降血压、抗氧化、抗菌、抗炎和免疫调节等多种活性[21]。

1.2 脂质

马乳的脂肪含量相对较低,通常在1.0%~1.5%之间,但其脂质的结构和组成却极具特色,赋予其独特的营养和生物学功能[1,22]。

1.2.1 脂肪球结构与消化吸收

马乳脂肪最显著的特征之一是其脂肪球的尺寸小,平均直径仅为2.00~3.00 μm,相比之下,牛乳的脂肪球直径更大(表1)[23]。这使得消化道中的脂肪酶能够更有效地接触和水解甘油三酯,从而提高

表1 不同哺乳动物物种乳汁的脂肪球大小

Table 1 Fat globule size of the milk from different mammalian species

分类		脂肪球直径/μm
反刍动物	牛	2.80~4.60
	水牛	4.10~8.70
	山羊	2.60~3.50
	绵羊	3.00~4.60
	骆驼	3.00
非反刍动物	马	2.00~3.00
	驴	1.00~10.00
人		4.00

注:表格数据来自文献[23]。

了脂肪的消化吸收效率。此外，马乳的乳脂肪球膜（milk fat globule membrane，MFGM）结构也十分复杂，由蛋白质、磷脂和糖蛋白构成的三层结构[24]。MFGM不仅在物理上稳定了脂肪球，其本身也富含多种生物活性成分，如磷脂、鞘脂和多种功能性蛋白质，这些成分在婴儿神经发育、细胞信号传导和肠道健康中发挥着重要作用[25]。

1.2.2　脂肪酸组成

马乳脂质的另一个关键特征是其高度不饱和的脂肪酸谱。马乳富含多不饱和脂肪酸（polyunsaturated fatty acids，PUFA），特别是两种人体无法合成的必需脂肪酸：亚油酸（linoleic acid，LA，n-6）和α-亚麻酸（α-linolenic acid，ALA，n-3）[1, 4]。α-亚麻酸是合成二十碳五烯酸（EPA）和二十二碳六烯酸（DHA）的前体，这两种长链 *n*-3 多不饱和脂肪酸以其抗炎、改善血脂谱和促进心血管健康的作用而闻名[4]。较高的PUFA含量，特别是 *n*-3 系列脂肪酸的富集，使马乳在营养价值上优于以饱和脂肪酸为主的牛乳，被认为对预防慢性炎症性疾病和心血管疾病具有潜在益处[26]。

1.2.3　磷脂

磷脂是马乳核心脂质组分，不仅承担营养素运输功能，更是构建细胞膜骨架的基础物质[3]。这一特性使其在促进肠道黏膜成熟、神经系统发育及抗氧化应激方面具有独特优势，对维护机体健康和促进早期生长发育具有重要作用[1, 27]。Garcia 等[28]利用高精度的磷-31 核磁共振（^{31}P NMR）光谱分析技术发现，马乳富含 11 种磷脂类别，其种类丰富度在哺乳动物乳源中仅次于人乳。

1.3　寡糖类

寡糖是乳汁中继乳糖和脂肪之后的重要组成成分，在马乳中，这类碳水化合物同样扮演着至关重要的生物学角色。马乳寡糖（mare's milk oligosaccharides，MMOs）在分子结构层面展现出与人乳寡糖（human milk oligosaccharides，HMOs）的相似性，而与牛乳寡糖（bovine milk oligosaccharides，BMOs）的结构特征存在差异。Difilippo 等[29]研究发现，马乳寡糖与人乳寡糖在结构上约有 63% 的重叠率。这一比例高于马乳与牛乳的重叠率，表明马乳在生物合成途径上更接近人类。同时研究还发现，马乳中性寡糖占比更高，而酸性寡糖相对较少。这一特征与人乳的中性寡糖特征一致，表明其在肠道益生菌促进方面具有潜在优势[29]，表 2 展示了人乳、马乳及牛乳寡糖的差异对比。这种结构的同源性特征，构成了马乳能够部分模拟人乳生物学功能的分子机制基础，为其作为人乳替代品的潜在应用提供了生物学依据。

表 2　人乳、马乳及牛乳寡糖差异的对比

Table 2　Comparison of oligosaccharide differences among human milk，horse milk，and cow milk

乳源类型	寡糖总含量/(g/L)	寡糖种类数	与人乳结构相似度	参考文献
人乳	成熟乳 5.00~15.00，初乳 20.00~25.00	大于 200 种		[30-31]
马乳	初乳 2.12~4.63	约 48 种	高	[32-33]
牛乳	成熟乳 0.03~0.06，初乳约为 1.00	约 20~50 种	低	[34]

综上所述，马乳的生物活性源于其蛋白质、脂质和寡糖 3 大类物质的独特结构和协同作用。这些成分不仅使其成为一种营养均衡、易于消化的食品，更赋予了其作为功能性食品和特殊医学用途配方食品开发的巨大潜力。

2　与人乳、牛乳的比较

马乳与人乳、牛乳进行比较，其在营养成分与功能特性上的独特优势得以凸显，为其作为人乳替代品或功能性食品原料的开发提供了一定基础及科学依据。

2.1　成分相似性与差异性

2.1.1　碳水化合物

马乳寡糖（MMOs）在结构上与人乳寡糖（HMOs）的相似性是其区别于牛乳寡糖（BMOs）的最重要特征之一。这意味着马乳在模拟 HMOs 的益生元和免疫调节功能方面，比牛乳具有天然优势[34]。

2.1.2　维生素与矿物质

马乳在维生素与矿物质的组成方面展现出独特优势，与牛乳存在差异（表 3）。其中，维生素 C 含量尤为突出，显著高于经过热处理的牛乳，更接近于人乳[4]。维生素 C 作为一种重要的水溶性维生素，具有强大的抗氧化作用，能够清除体内自由基，保护细胞免受氧化损伤，对于维持人体正常生理功能、增强免疫力等方面发挥着关键作用[35]。在马乳中，高含量维生素 C 使其在提供营养方面具有独特价值。

从矿物质含量角度来看，马乳总矿物质含量低于牛乳，这一特性使其与人乳更为接近[4]（表 4）。矿

表3 马乳、牛乳和人乳中脂溶性及水溶性维生素的组成对比

Table 3 Comparative analysis of fat-soluble and water-soluble vitamin compositions in mare's, cow's, and human milk

维生素	马乳	人乳	牛乳
维生素 A(mg/L)	0.40	0.46	0.44~0.80
维生素 B1(μg/L)	20.00~40.00	14.00~17.00	28.00~90.00
维生素 B2(μg/L)	10.00~37.00	20.00~60.00	115.00~202.00
维生素 B3(μg/L)	70.00~140.00	147.00~178.00	50.00~120.00
维生素 B5(μg/L)	277.00~300.00	184.00~270.00	260.00~490.00
维生素 B6(μg/L)	30.00	11.00~14.00	30.00~70.00
维生素 B9(μg/L)	0.13	5.20~16.00	1.00~18.00
维生素 C(μg/L)	1 280.00~8 100.00	3 500.00~10 000.00	300.00~2 300.00
维生素 D3(μg/L)	4.93	0.03~0.12	2.31~15.39
维生素 E(mg/L)	1.13	5.09	1.05~1.95
维生素 K2(μg/L)	17.93	1.80	4.81~17.00

注:表格数据来自文献[4]。

表4 马乳、牛乳和人乳中矿物质含量组成

Table 4 Composition of mineral content in mare's, cow's and human milk

单位：mg/(100 mL)

矿物质成分	马乳	人乳	牛乳
Ca^{2+}	50.00~135.00	28.00~34.00	112.00~123.00
P	20.00~121.00	14.00~43.00	59.00~119.00
K^{+}	25.00~87.00	53.00~62.00	106.00~163.00
Na^{+}	8.00~85.00	10.00~18.00	58.00

注:表格数据来自文献[4]。

物质在动物及人体中参与多种生理过程,是维持生命活动不可或缺的物质,但过高的矿物质摄入会增加肾脏的代谢负担[36-38]。马乳总矿物质含量较低,意味着其肾溶质负荷较低。但是马乳中矿物质含量波动较大,目前尚无较为准确的数值,有待学者针对这一问题进行进一步的研究。

2.2 免疫原性差异

免疫原性,特别是过敏原性,是评价乳品安全性和适用性的关键指标,尤其是在婴幼儿营养领域。在这一点上,马乳相对于牛乳展现出优势。在婴幼儿群体中,牛乳蛋白过敏是最为普遍的食物过敏类型之一。其主要过敏原涵盖β-乳球蛋白与酪蛋白,其中又以αs1-酪蛋白的致敏性尤为突出[39-40]。而马乳酪蛋白整体的免疫原性相较于牛乳酪蛋白明显更弱,为婴幼儿提供了更为安全、低敏的营养选择。Gasser等[41]研究表明,某种物质蛋白质序列更类似于人类蛋白质,其引发免疫反应的可能性也就越低。一项英国食品研究所的研究表明,马乳αs1-酪蛋白和β-酪蛋白与人乳相比更为相似(表5)[42]。这种更高的同源性可能是人体对马乳具有更好耐受性的分子基础。

综上所述,马乳凭借其与人乳高度相似的成分谱和显著低于牛乳的免疫原性,在特殊营养领域,例如婴幼儿配方乳粉、过敏人群营养支持和功能性食品开发中,展现出独特且不可替代的优势。

3 马乳研究技术前沿

近年来,随着组学技术和高精度分析方法的应用,对马乳生物活性物质的研究正在从宏观成分分析转向微观分子机制的探索。尽管重要突破尚不多见,但一些创新性发现正在为更深层次理解和利用马乳提供基础。

3.1 新型生物标志物发现

生物标志物是指可表征系统、器官、组织、细胞及亚细胞结构或功能改变或可能发生改变的生化指标[43]。在马乳研究领域,寻找可用于诊断、监测健康状况或预测疾病风险的新型生物标志物,是研究热点与前沿。现有研究更多地集中在成分鉴定与功能推测,大量研究致力于鉴定马乳中的蛋白质、肽、脂质及维生素等,并基于其已知功能推测其对健康的潜在影响,如抗炎、抗高血压等[1,19]。然而,这些成分能否作为特定疾病状态的稳定、灵敏生物标志物尚缺乏直接证据,更多是基于理论推测。同样,蛋白质组学和代谢组学等高通量技术已用于分析马乳的整体成分谱,揭示了其蛋白质组富

表 5　不同物种蛋白质相似性比较

Table 5　Comparison of protein similarity across different species

蛋白类型	物种	访问号	与最接近的牛同源物的相似性百分比/%	与人类同源物的相似性百分比/%
αs1-酪蛋白	牛	P02662	100	29
	山羊	Q8MIH4	88	29
	绵羊	P04653	88	28
	大鼠	P02661	22	27
	马	Q8SPR1	39	44
	人类	P47710	29	100
	骆驼	O97943	41	36
	兔子	P09115	37	37
β-酪蛋白	牛	P02666	100	53
	山羊	Q712N8	91	54
	绵羊	P11839	91	54
	马	Q9GKK3	56	58
	人类	P05814	53	100
	骆驼	Q9TVD0	66	58
	兔子	P09116	52	55

注：表格数据来自文献[42]。

含参与脂质代谢和炎症调控的蛋白质[44]。未来突破可能来自深入探索马乳独特 miRNA 谱系与饮用者健康状态的关联、利用代谢组学挖掘与心血管健康显著相关的特定代谢物，以及通过蛋白质组学比较健康与炎症疾病人群血清蛋白质谱以发现反映疾病活动度的蛋白质标志物[45-46]。

3.2　结构修饰与功能关系解析

生物大分子的功能不仅取决于其一级序列，还受翻译后修饰（post-translational modifications，PTMs）和高级结构的影响。解析这些结构特征与生物活性之间的关系，是理解其作用机制并进行功能优化的关键。

3.2.1　翻译后修饰对活性的影响

磷酸化与糖基化是乳蛋白质中最普遍的翻译后修饰类型，对蛋白质结构特性、稳定性及生物活性发挥具有决定性影响[47]。磷酸化是酪蛋白的核心标志，不仅影响酪蛋白胶束形成、钙结合能力及溶解性，还对生物活性肽释放机制与功能特性有重要影响[48]。马乳蛋白质富含酪蛋白，经酶解后能释放具有调节矿物质吸收、抑制血管紧张素转换酶降血压、抗菌及免疫调节等功能的生物活性肽[49]。

糖基化指聚糖链连接至蛋白质的过程，能显著提升蛋白质稳定性、抵抗蛋白酶水解能力及溶解度[50]。Cebo 等[51]研究表明，马乳乳脂球膜（MFGM）中关键糖蛋白乳凝素存在多种异构体，相对分子质量差异主要由差异性糖基化导致。研究显示，马乳乳凝素 60 kDa 和 57 kDa 异构体对去 N-糖基化酶 PNGase F 敏感，证实含有 N-糖基化；研究推测相对分子质量差异还可能源于 O-糖基化。文献明确证实马乳中特定糖蛋白存在复杂多样的糖基化修饰，这成为未来研究热点。

3.2.2　结构-活性关系的计算解析

随着研究深入，科学家致力于揭示肽从氨基酸序列到三维结构再到生物活性的内在联系，即结构-活性关系（SAR）[52]。定量构效关系（QSAR）模型是解析 SAR 的有力工具，通过数学方法将肽描述符与实测生物活性关联，建立预测模型[53]。目前针对马乳的研究主要集中于鉴定和分离具有血管紧张素转换酶（ACE）抑制活性的肽段，而非建立预测性 QSAR 模型。例如 Chen 等[54]从传统马乳酒中分离并测定多种肽组分的 ACE 抑制活性，但未构建定量模型。这是一个重要研究空白，开发此类模型将指导如何通过酶解或基因工程手段从马乳蛋白质中高效设计生产特定功能肽段。

综上所述，尽管在新型生物标志物方面的突破尚不显著，但在结构-功能关系解析方面，研究者已开始利用翻译后修饰知识和先进计算模型，为从分子层面揭示和优化马乳生物活性开辟新道路。

4　马乳产业化应用

马乳独特的营养价值和生物活性为其在食品、保健品及医药领域的产业化提供了广阔前景，但从传统食品向现代工业化产品转化仍面临技术挑战。目前商业化产品主要集中在传统发酵乳制品方面。

传统发酵乳制品中，以酸马奶（koumiss）为代表的发酵马乳具有悠久的历史。其制作依赖于乳酸

菌与酵母的共生发酵,将乳糖转化为乳酸、乙醇和二氧化碳,同时部分水解蛋白质,释放出生物活性肽[55-56]。现代研究不仅证实了其独特风味,更深入揭示了其健康益处。王嘉鑫[57]研究表明,发酵马乳具有改善并恢复高脂血症大鼠血脂水平的生理功能。该功能可能与发酵马乳中的多种生物活性物质、肠道菌群结构的调节以及对脂代谢信号通路的调控作用密切相关。Yan等[58]的研究发现,酸马奶对慢性弓形虫感染小鼠模型表现出积极效果,能减少脑内包囊数量并改善海马区β-淀粉样蛋白的沉积。从酸马奶中分离的特定菌株,如*Lactobacillus fermentum* SM-7,已被证实具有降低胆固醇的作用[59]。目前,酸马奶的生产与消费主要集中于中亚、东欧等地区,以及中国的内蒙古和新疆等地。这些区域中酸马奶的相关研究较为活跃,致力于菌种筛选、功能评价及工业化生产技术的探索,为其从传统饮品转向标准化功能性食品提供了基础。

尽管市场前景广阔,但马乳产业化仍面临活性成分保留难、加工成本高等瓶颈。针对这些挑战,具体的技术方案包括:采用微胶囊化技术保护热敏性和易氧化的活性成分,以提高其在加工和储存过程中的稳定性,例如乳铁蛋白、溶菌酶[60]。利用低温喷雾干燥技术替代传统高温干燥,可有效保留乳铁蛋白等热敏成分的生物活性[61];传统高温喷雾干燥易导致热敏物质失活和营养流失,而低温干燥或冻干技术是更优选择。此外,建立标准化的原料收集与质量控制体系也是实现规模化生产的关键。

5 结论

马乳作为一种独特的天然乳资源,凭借与人乳高度相似的营养成分、低致敏性以及富含溶菌酶、乳铁蛋白、多不饱和脂肪酸、类人乳寡糖等生物活性物质,在功能食品、特医营养以及高端消费领域展现出巨大潜力。然而,马乳研究与产业化仍面临严峻挑战。在科学层面,微量活性成分的系统挖掘、精确的结构-功能关系解析仍是薄弱环节,新型生物标志物的发现尚处于起步阶段;在产业层面,原料供应稳定性、加工过程中活性物质的保护以及高成本分离纯化技术是制约规模化发展的主要瓶颈。展望未来,马乳研究将向更深、更广、更精准的方向发展。多组学技术整合、先进计算模型开发、靶向功能成分挖掘以及智能化加工技术创新,将推动马乳研究从现象观察走向机制阐明,从宏观应用走向精准营养。攻克当前的科学与技术难题,将为功能性乳制品行业带来显著进展。

参考文献:

[1] BLANCO-DOVAL A,BARRON L J R,BUSTAMANTE M Á,et al. Characterization and monitoring of changes during lactation in the profile of multiple bioactive compounds of milk from grazing mares[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2025,105(3):1894-1903.

[2] SHOKROLLAHI B,CHOI J Y,WON M,et al. Koumiss (fermented mare's milk) as a functional food: bioactive proteins, peptides, and future perspectives[J]. Foods,2025,14(22):3954.

[3] MUSAEV A,SADYKOVA S,ANAMBAYEVA A,et al. Mare's milk: composition,properties,and application in medicine[J]. Archives of Razi Institute,2021,76(4):1125-1135.

[4] GHANDOUR M,ZOLLMANN H,HORSCH A. The application of mare's milk in medicine: does it hold a potential therapeutic value?[J]. Nutrition and Dietary Supplements,2025,17:87-98.

[5] 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.

[6] KARAV S,SALCEDO J,FRESE S A,et al. Thoroughbred mare's milk exhibits a unique and diverse free oligosaccharide profile[J]. FEBS Open Bio,2018,8(8):1219-1229.

[7] LIN T T,MELETHARAYIL G,KAPOOR R,et al. Bioactives in bovine milk: chemistry,technology,and applications[J]. Nutrition Reviews,2021,79(Suppl 2):48-69.

[8] MIRAGLIA N,SALIMEI E,FANTUZ F. Equine milk production and valorization of marginal areas: a review[J]. Animals,2020,10(2):353.

[9] BLANCO-DOVAL A,SOUSA R,BARRON L J R,et al. Assessment of in vitro digestibility and postdigestion peptide release of mare milk in relation to different management systems and lactation stages[J]. Journal of Dairy Science,2024,107(10):7594-7608.

[10] REITER A S,REED S A. Lactation in horses[J]. Animal Frontiers,2023,13(3):96-100.

[11] 高学云,芒 来. 发酵乳中功能性乳酸菌的研究进展[J]. 内蒙古科技与经济,2007(17):39-40.

[12] KHORSHIDIAN N,KHANNIRI E,KOUSHKI M R,et al. An overview of antimicrobial activity of lysozyme and its functionality in cheese[J]. Frontiers in Nutrition,2022,9:833618.

[13] GALLO V, ARIENZO A, TOMASSETTI F, et al. Milk bioactive compounds and gut microbiota modulation: the role of whey proteins and milk oligosaccharides[J]. Foods, 2024, 13(6): 907.

[14] BRUHN O, GRÖTZINGER J, CASCORBI I, et al. Antimicrobial peptides and proteins of the horse: insights into a well-armed organism [J]. Veterinary Research, 2011, 42(1): 98.

[15] KIM J W, LEE J S, CHOI Y J, et al. The multifaceted functions of lactoferrin in antimicrobial defense and inflammation[J]. Biomolecules, 2025, 15(8): 1174.

[16] KRUZEL M L, ZIMECKI M, ACTOR J K. Lactoferrin in a context of inflammation-induced pathology[J]. Frontiers in Immunology, 2017, 8: 1438.

[17] MARKUS C R, OLIVIER B, PANHUYSEN G E, et al. The bovine protein alpha-lactalbumin increases the plasma ratio of tryptophan to the other large neutral amino acids, and in vulnerable subjects raises brain serotonin activity, reduces Cortisol concentration, and improves mood under stress[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2000, 71(6): 1536-1544.

[18] GUSTAFSSON L, HALLGREN O, MOSSBERG A K, et al. HAMLET kills tumor cells by apoptosis: structure, cellular mechanisms, and therapy 1 2[J]. The Journal of Nutrition, 2005, 135(5): 1299-1303.

[19] RIVERO M J, COOKE A S, GANDARILLAS M, et al. Nutritional composition, fatty acids profile and immunoglobulin G concentrations of mare milk of the Chilean Corralero horse breed[J]. PLoS One, 2024, 19(9): e0310693.

[20] HUANG X X, HE L J, MA J, et al. Ellagic acid on milk production performance, blood and milk hormones, antioxidant capacity and fecal microbial communities in lactating Yili mares[J]. Frontiers in Microbiology, 2025, 16: 1656100.

[21] GANZORIG K, URASHIMA T, FUKUDA K. Exploring potential bioactive peptides in fermented Bactrian camel's milk and mare's milk made by Mongolian nomads[J]. Foods, 2020, 9(12): 1817.

[22] DENG L, YANG Y X, LI Z, et al. Impact of different dietary regimens on the lipidomic profile of mare's milk[J]. Food Research International, 2022, 156: 111305.

[23] CLAEYS W L, VERRAES C, CARDOEN S, et al. Consumption of raw or heated milk from different species: An evaluation of the nutritional and potential health benefits[J]. Food Control, 2014, 42: 188-201.

[24] PAN J Y, CHEN M Q, LI N, et al. Bioactive functions of lipids in the milk fat globule membrane: a comprehensive review[J]. Foods, 2023, 12(20): 3755.

[25] ELAGIZI A, LAVIE C J, O'KEEFE E, et al. An update on omega-3 polyunsaturated fatty acids and cardiovascular health[J]. Nutrients, 2021, 13(1): 204.

[26] GREGIĆ M, MIJIĆ P, BABAN M, et al. Changes in the fatty acid composition of milk of Lipizzaner mares during the lactation period[J]. Metabolites, 2022, 12(6): 506.

[27] BOURLIEU C, CHEILLAN D, BLOT M, et al. Polar lipid composition of bioactive dairy co-products buttermilk and butter serum: Emphasis on sphingolipid and ceramide isoforms[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 67-74.

[28] GARCIA C, LUTZ N W, CONFORT-GOUNY S, et al. Phospholipid fingerprints of milk from different mammals determined by 31P NMR: Towards specific interest in human health[J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1777-1783.

[29] DIFILIPPO E, WILLEMS H A M, VENDRIG J C, et al. Comparison of milk oligosaccharides pattern in colostrum of different horse breeds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(19): 4805-4814.

[30] BODE L. Human milk oligosaccharides at the interface of maternal-infant health[J]. Breastfeeding Medicine, 2018, 13(S1): S7-S8.

[31] 徐　铮,李　娜,陈盈利,等. 人乳寡糖 2′-FL 和 3-FL 的生物制备研究进展[J]. 生物工程学报, 2020, 36(12): 2767-2778.

[32] 阎思宇,苏新然,林大为,等. 特色乳中低聚糖组成及生物活性研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2024, 47(6): 60-69.

[33] 杨景博,赵晶晶,王雨奇,等. 羊乳低聚糖和其他家畜乳低聚糖研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(17): 296-305.

[34] URASHIMA T, SAITO T, NAKAMURA T, et al. Oligosaccharides of milk and colostrum in non-human mammals [J]. Glycoconjugate Journal, 2001, 18 (5): 357-371.

[35] KOŁODZIEJCZYK A M, KARWOWSKI B. Anti-DNA damage mechanisms and the role of carotenoids, vitamin A, and its derivatives[J]. Nutrients, 2025, 17(17): 2721.

[36] 袁崇善,鞠贵春,张爱武. 梅花鹿营养需要研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 97-102.

[37] RAZZAQUE M S, WIMALAWANSA S J. Minerals and human health: from deficiency to toxicity[J]. Nutrients, 2025, 17(3): 454.

[38] SHAFIE A, ASHOUR A A, TAYEB F J, et al. Impacts

of excessive iron intake on infant growth and fluorimetric and colorimetric detection methods: a comprehensive review[J]. Journal of Fluorescence, 2025, 35(9): 7495-7515.

[39] 王佳蕊,李朝旭,李书国. 牛乳中主要过敏原致敏机理及其脱敏技术的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2019,47(6):28-32.

[40] 丛艳君,吕晓哲,李 晔,等. 牛乳αS1-酪蛋白与大豆蛋白交叉过敏原的识别鉴定[J]. 食品科学,2019, 40(18):70-75.

[41] GASSER H C, RAJAN A, ALFARO J A. A novel decoding strategy for ProteinMPNN to design with less visibility to cytotoxic T-lymphocytes[J]. Computational and Structural Biotechnology Journal, 2025, 27: 3693-3703.

[42] JENKINS J A, BREITENEDER H, CLARE MILLS E N. Evolutionary distance from human homologs reflects allergenicity of animal food proteins[J]. The Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2007, 120(6): 1399-1405.

[43] 高 天,景晓霞,占 登,等. 骆驼乳清蛋白对对乙酰氨基酚致小鼠肝损伤的保护作用[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2023,44(1):1-6.

[44] ISLAMIYATI R, AZIS I U, AMAL I, et al. Integrative metabolomics and hormonal profiling reveal biomarkers of milk yield efficiency in Sapera dairy goats under tropical conditions[J]. Veterinary World, 2025, 18(11): 3594-3606.

[45] LAMARCHE B, ASTRUP A, ECKEL R H, et al. Regular-fat and low-fat dairy foods and cardiovascular diseases: perspectives for future dietary recommendations[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2025, 121(5): 956-964.

[46] GRELET C, LARSEN T, CROWE M A, et al. Prediction of key milk biomarkers in dairy cows through milk mid-infrared spectra and international collaborations[J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(3): 1669-1684.

[47] DALLAS D C, LEE H, LE PARC A, et al. Coupling mass spectrometry-based "omic" sciences with bioguided processing to unravel milk's hidden bioactivities[J]. Journal of Advances in Dairy Research, 2013, 1(2): 104.

[48] 赵新琦,陈平华,米晓磊,等. 不同加工处理方式对酪蛋白胶束的影响研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2021,44(1):51-56.

[49] NIELSEN S D, LIANG N J, RATHISH H, et al. Bioactive milk peptides: an updated comprehensive overview and database[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(31): 11510-11529.

[50] RAMAKRISHNAN K, JOHNSON R L, WINTER S D, et al. Glycosylation increases active site rigidity leading to improved enzyme stability and turnover[J]. The FEBS Journal, 2023, 290(15): 3812-3827.

[51] CEBO C, REBOURS E, HENRY C, et al. Identification of major milk fat globule membrane proteins from pony mare milk highlights the molecular diversity of lactadherin across species[J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(3): 1085-1098.

[52] PEREDO-LOVILLO A, HERNÁNDEZ-MENDOZA A, VALLEJO-CORDOBA B, et al. Conventional and in silico approaches to select promising food-derived bioactive peptides: A review[J]. Food Chemistry: X, 2022, 13: 100183.

[53] XU B T, DONG Q, YU C X, et al. Advances in research on the activity evaluation, mechanism and structure-activity relationships of natural antioxidant peptides[J]. Antioxidants, 2024, 13(4): 479.

[54] CHEN Y, WANG Z, CHEN X, et al. Identification of angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides from koumiss, a traditional fermented mare's milk[J]. Journal of Dairy Science, 2010, 93(3): 884-892.

[55] 赵飞燕,刘文俊,张和平. 自然发酵乳制品中细菌多样性的研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2021,42(6):116-120.

[56] 马新淼,魏敏敏,张左利,等. 新疆哈萨克酸马奶中功能性乳酸菌株的筛选、鉴定及功能评价[J]. 食品安全质量检测学报,2024,15(7):151-159.

[57] 王嘉鑫. 发酵马奶对高脂血症大鼠的降血脂作用及机制研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2023.

[58] YAN X L, SUN Y F, ZHANG G Z, et al. Study on the antagonistic effects of koumiss on *Toxoplasma gondii* infection in mice[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1014344.

[59] XILIN T Y, HE X L, BI Y Q, et al. Research progress on chemical composition, microbial diversity and effects on human health of koumiss[J]. Food & Medicine Homology, 2025, 2(2): 9420027.

[60] 黄镇宇,徐 磊,孙培龙,等. 基于文献计量分析益生菌微胶囊化研究现状及发展趋势[J]. 食品与发酵工业,2024,50(7):398-408.

[61] 王继芳,田 木,张欣宇,等. 低温喷雾干燥制备益生菌微生态制剂的工艺条件优化[J]. 中国乳品工业, 2016,44(12):7-10.