马奶营养成分及其功能研究进展

卓依娜[1, 2]，郑　楠[1]，赵艳坤[1, 3]，孟　璐[1*]

1 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所，农业农村部奶及奶制品质量安全控制重点实验室，北京 100193
2 青岛农业大学食品科学与工程学院，山东青岛 8300912
3 新疆维吾尔自治区农业科学院，新疆乌鲁木齐 266109

摘　要：马奶是一种营养成分与人体母乳高度相似的天然乳制品，因其低致敏性、高消化率及丰富的生物活性物质而备受关注。本文系统综述了马的泌乳规律、马奶的基础营养成分（蛋白质、脂肪、乳糖、矿物质与维生素）、活性成分[如乳铁蛋白、溶菌酶、乳脂球膜（MFGM）蛋白等]及其功能特性。研究表明，马奶的酪蛋白与乳清蛋白比例接近人乳，致敏性低；其乳脂球膜（MFGM）中鉴定出773 种功能蛋白，与免疫调节、细胞代谢密切相关。发酵工艺可显著提升马奶营养价值，酸马奶中乳糖含量降低，并产生抗菌肽、有机酸等代谢产物，赋予其调节血脂、增强免疫等功能。本文还探讨了酸马奶、马奶粉等衍生产品的开发潜力，未来应加强马奶活性成分的作用机制解析，优化标准化生产与加工技术，推动其从区域性民族食品向高值化功能性食品产业发展，为中国特色乳业资源开发提供支撑。

关键词：马奶；泌乳规律；营养价值；功能活性

文章编号：1671–4393（2025）11–0082–11　　DOI:10.12377/1671–4393.25.11.10

0 引言

马是世界上与人类关系密切的动物[1]，长期以来，其繁衍生息与人类文明、生活息息相关，起着重要作用。同时马是六畜之首，是人类的重要伙伴[2]，尤其在我国内蒙古等地区人民的生活里，是游牧民族重要的高效便捷的交通和生产工具，通过提升机动性、运输和战争彻底改变了人类历史[3]，极大地推动了生产、生活的发展；马是季节性多次发情动物，在5—10月间[4]怀孕，孕期在11 个月[4]左右，在次年春夏时间诞下小马。母马会泌乳3~6 个月。与家喻户晓、广泛普及的牛奶相较，马奶有着独特的地域消费特色。当前，随着马产业全方位、深层次的

基金项目：国家重点研发计划（2022YFD1600100）；中国农业科学院科技创新工程（ASTIP–IAS12）
作者简介：卓依娜（2003–），女，山东德州人，在读硕士，研究方向为乳品加工与安全；
郑　楠（1980–），女，内蒙古包头人，博士，研究员，研究方向为奶产品质量与安全风险评估研究；
赵艳坤（1989–），女，河南周口人，博士，研究员，研究方向为乳品安全控制与品质评价。
*通信作者：孟　璐（1986–），女，江苏徐州人，博士，助理研究员，研究方向为奶产品风险评估与营养功能评价。

中国乳业实时阅读

转型、拓展，马奶领域的研究也日新月异，不断迈向新的高度。

根据目前发展趋势，马奶作为一种营养饮品，在欧洲大陆获得了显著的关注度提升，其中法国、意大利、匈牙利和荷兰等国[2]的消费群体增长尤为明显。据统计数据显示，全球范围内约有3 000 万[5]消费者已将马奶或者马奶酒作为日常膳食的组成部分，且消费人数呈逐年稳步上升态势。随着消费升级和乳制品市场的多元化竞争，开发高附加值、功能性乳制品已成为行业新增长点，马奶也衍生了众多副产品，比如：酸马奶[6]，马奶粉[7]等，为中国特色乳业资源开发提供参考。但是目前马奶产业仍有许多挑战，我们需要进一步研究了解马及马奶的营养价值，提高对于马奶的认识以及产业应用。

1 马奶的营养价值

不同物种的哺乳动物在其生命周期的不同阶段（如哺乳期）会分泌乳汁，而不同物种、同一物种的不同品种的乳汁在产量及成分组成上均存在显著差异。Centoducati等[8]收集了意大利重挽马[9]为期180 天泌乳期产奶量数据，结果表明意大利重挽马的日均产奶量为16.11 kg[8]，最低产奶量为10.53 kg，最高产奶量为20.84 kg。孙啸渊等[10]选择了60 匹同一泌乳期3~5 胎次的哈萨克马，实验结果表明在第60天左右是泌乳高峰期，第3胎次的泌乳高峰期比第4、5胎次的泌乳高峰期持久。吕士鹏等[11]研究中选择了新疆伊犁的15 匹同一泌乳期3~4 胎次的伊犁马，发现伊犁马泌乳期的第55天达到泌乳高峰，日均产奶量为9.20 kg，最高产奶量为10.29 kg/d，并估算出120 d总产量为1 053 kg。

马奶的营养价值非常高，且在营养成分组成上与人乳具有高度相似性[12]，如表1所示。马奶乳汁成分包括营养成分和特殊成分两部分[13]。营养成分包括蛋白质、脂肪、乳糖、矿物质以及维生素等[14]，是有益于人体健康的优质营养来源[14]。此外，马乳中还富含乳铁蛋白、溶菌酶、免疫球蛋白等多种功能活性成分，这些成分赋予其抗菌、抗病毒及增强机体免疫力等优异的生物活性功能。此外新鲜的马奶经微生物发酵后[15]，可制得香气浓郁醇厚、质地更加细腻丝滑、酸度趋于适宜稳定，营养价值更加提升的酸马奶。这些特性使其成为具有重要营养价值的天然乳制品，是婴幼儿、免疫力低下群体以及老弱病残者理想的营养补给饮品[16]。

表 1 不同哺乳动物乳汁成分 [17]

组成	脂肪	蛋白质	乳糖	灰分
马	1.21	2.14	6.37	0.42
牛	3.61	3.25	3.25	0.76
人	3.64	1.42	6.71	0.22

1.1 马奶的基础营养成分

马奶呈白色或乳白色稀薄液态，营养成分丰富，富含大量蛋白质、不饱和脂肪、乳糖以及矿物质和维生素等营养成分[18]。马奶中水分含量介于88%~90%，高水分易于消化吸收。

与牛奶相比，马奶的蛋白质含量相对较低，约为2.3%[19]；但其中主要是易消化吸收的白蛋白和球蛋白，其白蛋白和球蛋白含量显著高于牛乳中相应蛋白质的含量。牛乳中以酪蛋白为主导，消化速率相对较慢，可能会导致过敏现象。而马奶蛋白质组成与人乳相似[20]，其蛋白质以乳清蛋白[21]为主，乳清蛋白易消化、低致敏，有助于生长发育和免疫调节，是过敏体质人群[22]的福音。同时马奶富含人体必需的9 种氨基酸[23]，马奶中天冬酰胺、苏氨酸、脯氨酸、亮氨酸和赖氨酸的含量显著高于牛奶，部分氨基酸含量可达牛奶的6 倍[17]，谷氨酰胺水平是牛奶的3 倍[17]，可以满足人体全面需求。马奶发酵时，蛋白质水解生成生物活性多肽和氨基酸，提高生物利用度，并为乳酸菌提供必需氮源，推动发酵进程。

马奶脂肪含量1%~2%，显著低于人乳和牛乳。马奶的乳脂肪具有细腻、柔滑的质地，使其在人体的消化吸收更加快速、高效。其脂肪球微小，不饱和脂肪酸占比高，磷脂是由多不饱和脂肪酸构成的复杂化合物，是细胞膜脂蛋白质的组成部分。与人乳和牛乳相比，马奶磷脂含量较为丰富。马奶可以

中国乳业线上阅读

起到降低血液胆固醇、预防心血管疾病，促进人体消化吸收[24]的作用。发酵使部分脂肪水解为游离脂肪酸，提高风味口感，增强抗氧化活性[25]。

马奶乳糖含量约为6.37%，略低于人乳，马奶在人体分解为葡萄糖与半乳糖，前者起到供能的作用，后者可以促进糖脂质生成。乳糖分解产生的半乳糖对婴幼儿脑部发育具有重要作用，并且乳糖不耐受人群[26]可选发酵后的酸马奶，因乳酸菌代谢产乳酸等酸性物质而使乳糖含量降低。

马奶的灰分含量相对较低，但其矿物质含量相对丰富。研究表明，马奶中含有多种必需矿物质元素，包括钙、磷、钾、钠、铁和镁等。在马奶中钙磷比（1.6~1.8∶1）[17]比牛乳（约1.4∶1）[17]更有利年轻生物化的骨骼正常生长[17]，且更接近人乳（约1.9∶1）[17]，这些元素在人体生理功能中发挥着重要作用[27]。

此外，马奶还是多种维生素的重要来源，富含大量的维生素A、维生素C、维生素D和维生素E等[28]元素，起到促进人体骨骼、视力发育与免疫力强化等作用。与牛奶相比，马奶富含维生素C，因此马奶具有一定的抗氧化性和抗炎性的特点。研究表明，马奶中维生素D的含量高于人乳，维生素D是一种与钙和骨骼代谢密切相关[29]的重要化合物，其在生长发育阶段的哺乳动物体内发挥着类似激素的生理功能，并具有抗脊柱裂的活性[30]。而补充维生素D能够显著降低过早死亡以及癌症相关死亡[31]的风险，从而有助于维持整体健康状态[32]。目前，已有众多临床试验深入探讨了维生素D在抗癌[31]、抗乳糜泻以及免疫调节方面的作用机制[31，33]，同时其在预防骨质疏松症中的生理功能也得到了广泛关注和研究。

虽然马奶的营养成分大致相同，但是营养成分还受饲料、品种、地区的影响。张积荣等[34]开展的泌乳期母马试验显示补喂60 g酵母培养物，60 d后相较于对照组，产奶量提高27.30%，乳脂率提高35.77%，但对总蛋白、葡萄糖等生化指标无统计学显著影响。贾雨欣[35]研究证实，泌乳期伊犁马日粮中添加支链氨基酸可显著提升母马产奶量，同时能显著提高乳中乳蛋白、乳脂的含量水平。此外，还可增加乳中部分功能性氨基酸、生长激素及胰岛素的含量，进而实现乳品质改善与泌乳性能提升的双重效果，并明确该条件下支链氨基酸的最适添加量为114 g/d[35]。值得注意的是，不同品种马的乳营养成分存在一定的差异，如表2。

根据张萌萌等[6]的实验数据，选取内蒙古锡林郭勒盟地区代表性马种——阿巴嘎黑马和乌珠穆沁白马的新鲜马奶作为实验原料，运用自然发酵技术，系统分析马奶从发酵前到发酵过程再到发酵后，营养成分和功能性指标的动态变化特征，结果表明，在蛋白质和脂肪含量方面，阿巴嘎鲜马奶显著高于乌珠穆沁鲜马奶，而在乳糖含量方面，乌珠穆沁鲜马奶则高于阿巴嘎鲜马奶。但二者在水分和灰分含量上未表现出显著差异。发酵过程中所测定的脂肪平均含量，高于孙天松[40]等对新疆地区酸马奶的研究数据，这进一步证实了马奶基本营养成分的地域差异性[6]。在发酵进程中，两种品种酸马奶的营养品质与功能特性呈现出同步变化趋势，且整体呈上升特征。发酵处理降低了马奶中的乳糖含量，为乳糖不耐受人群提供了更适宜的饮用选择。

表2 不同品种马奶成分含量[36~39]

品种	蛋白质（%）	脂肪（%）	乳糖（%）
蒙古马（Mongolian horse）	2.0	1.5~2.0	6.0~8.0
阿达耶夫马（Adaev mare）	1.76±0.29	1.71±0.79	6.19±0.5
智利科拉雷马（Chilean Corralero horse）	2.08±0.09	0.99±0.16	6.4±0.11
波兰冷血马（Polish Coldblood mare.）	1.98	1.11	6.72
哈萨克马（Kazakh mare）	1.917±0.021	0.394±0.032	6.950±0.238
索科尔斯基马（Sok ó lski horse）	1.86±0.39	0.21±0.25	6.83±0.42
伊犁马（Ili horse）	2.2~2.8	1.6~2.2	5.13~7.67

中国乳业杂志网

1.2 马奶活性营养成分

马奶除了基础的营养成分，同时还富含多种特殊营养成分，如乳铁蛋白[41]、溶菌酶[42]、免疫球蛋白、共轭亚油酸等，各具独特功能[27]。乳铁蛋白具有强抗菌抗病毒能力，与铁结合可以抑制微生物生长，在肠道防止病菌入侵，还有助于人体铁吸收利用，防止缺铁性贫血。溶菌酶能破坏细菌细胞壁，裂解有害菌，保护人体免受感染。免疫球蛋白可以增强机体特异性免疫性，识别结合抗原，激活免疫反应，抵御病菌病毒。共轭亚油酸可以调节血脂代谢，降低胆固醇、甘油三酯，动脉粥样硬化，还具有抗炎抗癌潜能[43]。这些特殊成分协同作用，使马奶保健功能卓越，促进人体维持生理平衡，预防多种疾病，是天然营养宝库。

乳清蛋白是一类营养丰富、功能多样的蛋白质，广泛用于食品与营养领域[41]。有研究表明，从马奶乳清蛋白中[43]分离出来的生物活性肽具有多种对人体健康有着积极作用的生理功能，包括减低血压、血脂、抗菌和抗氧化等功能，这些功能特性使乳清蛋白在多个领域得到了关注和应用。但是在不同的乳源中，乳清蛋白的含量存在明显不同。马奶中乳清蛋白的成分复杂，主要包括多种低分子量的蛋白质，例如：α－乳白蛋白[44]、β－乳球蛋白[45]、血清白蛋白、免疫球蛋白、溶菌酶、和乳铁蛋白等。其中，马奶乳清蛋白的主要包括β－乳球蛋白[45]和α－乳白蛋白[44]，二者约占乳清蛋白总量65%。有研究证明，马奶中的乳清蛋白结合耐力运动[46]可以促进肌肉线粒体蛋白[47]合成率，同时可以起到增加饱腹感，起到缓解疲劳、增强免疫的作用。乳清蛋白含有大量的必需氨基酸，同时也在消化过程中可以产生活性肽。乳清蛋白活性肽[48]在吸收前与肠腔内的特定受体[51]结合，或者在吸收血液后与靶器官中的特定受体结合[49]来发挥作用。此外，研究还发现了一些具有降胆固醇[50]作用、影响肠道蠕动的肽[48]。同时，乳清蛋白的肽[51]具有实现多种生物学功能，如钙离子吸收[52]、抗氧化活性[52]、食欲调节、抗癌活性和抗糖尿病[53]等作用。

相较于牛奶，马奶在特定营养成分构成及生理活性物质含量方面具有独特优势，可作为一种具有较高营养价值的膳食选择。马奶的酪蛋白与乳清蛋白[54]比例更接近人乳，这使得其蛋白质在消化吸收效率上表现出一定优势，更易被人体利用； 此外，马奶不仅能解渴，还能为人类提供宝贵的营养[55]。乳脂球膜（MFGM）是马奶的重要成分。MFGM是由乳脂球组成的三层结构复合物，具有很高的营养价值，包裹在泌乳细胞的质膜上[56]。有研究发现，马奶的MFGM中含有高达773 种[57] MFGM蛋白，这些蛋白被证实与免疫调节、细胞代谢密切相关。

这些结果表明，不同品种马的MFGM蛋白亚细胞定位具有一致性[58]，但该蛋白参与的生物学过程在部分物种间存在差异，如图1所示。

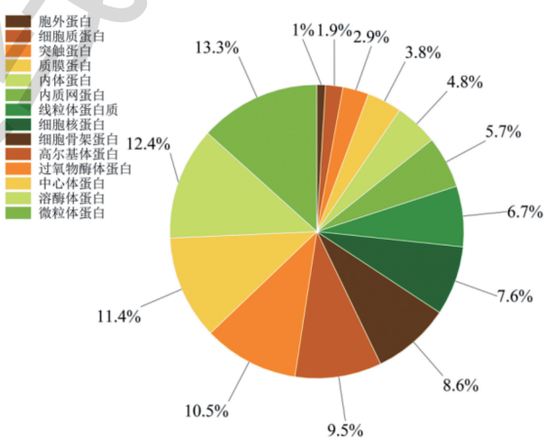


图 1 MFGM 的亚细胞定位分析 [58]

MFGM为一种组分复杂的生物学结构，其主要构成包括蛋白质和脂类物质。在婴幼儿生长发育阶段，MFGM具有丰富的生物学功能，其中尤为突出的是其在婴幼儿神经发育调控[59]及肠道免疫系统建立与成熟[59]过程中的关键作用。因此，MFGM能够满足婴幼儿时期对营养的高度需求[60]。另外，在肠道内，MFGM可与肠道环境发生相互作用，通过诱饵作用以及发挥直接杀菌活性[60]，增强机体对病原菌的防御能力，降低感染风险。

中国乳业线上阅读

根据Agostoni等[61]的研究报告，MFGM中的聚唾液酸[62]作为神经细胞黏附分子的关键组分，为神经突触的形成提供重要支持。另有研究表明，MFGM含有的唾液酸[62]、鞘磷脂与胆碱组分，对婴儿大脑发育[63]具有积极的促进作用。Ten Bruggencate[64]研究指出，MFGM有利于减少腹泻型大肠杆菌，促进肠道调节，同时MFGM中的胆固醇、磷脂和胆碱等其他组分可能促进新陈代谢[65]，并且对婴儿的健康[65]具有积极作用。Novaković P等[66]研究证实MFGM蛋白具有抑制感染的能力。同时利用通主成分分析[67]和聚类分析等方法，结论确定为马奶与人乳中的乳脂球膜蛋白组成之间具有高度相似性，这一发现表明马奶有望作为人乳的潜在替代品，为婴幼儿提供更为适宜的营养来源。

1.3 马奶营养成分检测方法

采用基于无标记质谱[68]的蛋白质定量技术[69]，研究了包括牛、羊、骆驼和马在内的动物乳蛋白组成[70]。GO富集分析显示，与蛋白质降解相关的蛋白质在马奶中的表达量高于其他3 种奶，有助于更容易的吸收和适口性[70]。KEGG分析表明，马奶含有大量与病原菌耐药性相关的抗菌相关蛋白质，从而降低了病原性疾病的风险[70]。马奶中与咖啡因代谢、氨基酸生物合成[71]和糖酵解/糖异生相关的蛋白质[71]积累更高，这有助于其独特的风味。值得注意的是，马奶中高度表达的蛋白质与免疫信号通路[72]密切相关，作为免疫调节剂。

采用SDS-PAGE法[73]对驴奶和马奶中的蛋白质组分进行测定，通过灰度扫描后计算驴奶和马奶中蛋白质组分的含量[74]，发现驴奶与马奶[75]的营养成分与肠道微生物相互影响。SDS-PAGE电泳法在蛋白质的定性鉴别、纯度与杂质控制以及定量测定方面应用广泛[73]。人乳与马奶消化特性的相关研究表明[76]，模拟胃液条件下，人乳酪蛋白可降解为分子质量低于20 kg/mol[77]的蛋白质片段；而马奶中部分酪蛋白[76]则进一步水解为更小分子量的肽段，该类小分子肽段因分子量过低[76]，在SDS-PAGE凝胶电泳中难以被检出。基于SDS-PAGE蛋白质分离，在马奶样本中发现的含量最多的蛋白质是分子量在10~30 kDa之间的蛋白质[78]。

2 发酵马奶的营养变化

马奶发酵为酸马奶，是目前主要的产品，其营养成分产生变化[79]。酸马奶是以新鲜马奶为原料，经净乳、接种、发酵、搅拌、冷却等传统工艺制备而成的发酵乳制品[80]，其色泽多呈乳白色[80]或淡青色，口感微酸，且无任何异常气味。作为一种药食同源的优质饮品，酸马奶富含多种有效成分，包括蛋白质、脂肪、糖类、维生素以及矿物质等。

李倩等[81]结果表明，与鲜马奶相比，酸马奶的水分含量显著升高，而有机物及灰分含量则显著降低，原因可能是在乳酸菌与酵母菌的发酵作用下，鲜马奶中的乳糖等碳水化合物被分解转化为有机酸及其他代谢产物，导致酸马奶中有机物含量减少。此外，由于鲜马奶中乳清蛋白占比较高、酪蛋白占比较低，在发酵过程中，体系的胶体稳定性被破坏，大量乳清成分得以析出，进而使得酸马奶中的水分含量相对增加。同时发酵会使马奶蛋白质产生部分水解，多肽、氨基酸含量升高，这种转化不仅提高了蛋白质的消化吸收率，更关键的是释放出具有特定生物活性的功能性肽段，包括血管紧张素转换酶抑制肽、抗氧化肽及免疫调节肽等多功能活性成分，起到抗氧化、降血压、免疫调节等功能[82]。金花等[83]研究表明，酸马奶中乳糖经乳酸菌代谢利用，含量降低，有利于缓解乳糖不耐受症状。脂肪水解出游离脂肪酸，增强风味口感，提高营养价值[84]。维生素如B族维生素、维生素K等含量因微生物代谢改变，满足人体更多需求。

3 马奶的功能活性研究

3.1 低过敏反应

牛奶过敏是婴儿和儿童最常见的食物过敏现

中国乳业线上阅读

象，牛奶中乳清蛋白和酪蛋白含量较高[85]，是导致过敏的主要原因。研究表明，相较于牛奶，马奶的蛋白质与脂肪含量更低，而乳糖含量则相对更高，与人乳[86]特性相似[77]，同时富含维生素，具有较高的营养价值。为了更加了解马奶的营养成分，通过对其进行蛋白质组分及蛋白质模拟体外消化分析，来验证替代牛奶的优质乳。通过实验证明，马奶的蛋白质含量比牛奶低[77]，马奶的营养特征与人乳具有相似性，且其含有的蛋白质均为优质蛋白，营养价值丰富；此外，马奶中可溶性蛋白含量更高，更易于人体消化吸收。马奶中酪蛋白和K-酪蛋白的含量高于驴奶[74]，且马奶中酪蛋白更易溶于水，使得马奶比其他畜种奶更易消化吸收，起到减少过敏现象的作用。

3.2 抑菌活性

马奶和酸马奶均含有抗菌杀菌作用，但是酸马奶效果更为显著。酸马奶是以乳酸菌和酵母菌为主的微生物经发酵后制成的乳制品，在发酵过程中，这些微生物通过代谢作用将马奶中的乳糖分解为乳酸，同时产生多种生物活性物质，赋予酸马奶独特的风味和营养特性。其制备工艺主要依赖于乳酸菌、乳糖发酵酵母和非乳糖发酵酵母三类微生物的协同发酵作用[87]。从微生物学角度而言，酸马奶的抑菌作用主要归因于其含有的多种生物活性成分，包括有机酸[88]、生物活性短肽[89]和益生乳酸菌[90]等。在发酵过程中，乳酸菌[91]可通过竞争性抑制作用抑制病原菌[92]的生长繁殖，同时其代谢过程中会产生有机酸、乳酸等具有抑菌活性的物质，这类代谢产物进一步强化了酸马奶的抗菌[92]效能。据王文婧等[93]研究，乳酸菌代谢产物可通过降解病原菌细胞壁与膜结构的完整性，同时干扰胞内代谢酶活性，阻碍其正常生理功能，显著抑制微生物的生长增殖过程，由此发挥抗菌作用。

3.3 预防消化疾病

酸马奶作为一种营养丰富的发酵乳制品，富含大量的有机酸、益生菌以及维生素。酸马奶乳中酸性物质含量增多，这对改善肠道环境、推动食物的消化吸收大有帮助。研究表明，酸马奶不仅具有较高的营养价值，还具有显著的医疗保健功能，包括改善肠道菌群平衡[94]，以及对肺结核[94]、贫血和中风等疾病的辅助治疗作用。敖其等[95]研究表明，酸马奶结合蒙药可以有效缓解慢性胃炎患者腹痛、反酸等消化道症状，同时通过调节生化指标，对肝肾功能恢复起到积极作用[80]。

3.4 抗心血管疾病

马奶含有大量的蛋白质、氨基酸[96]、维生素等，这些物质对于增强免疫力、维持免疫系统的正常运转，预防心血管疾病的发生[97]起着至关重要的作用。此外，经发酵后的马奶中可能产生具备免疫调节活性的肽类物质与代谢产物，它们能够进一步提升人体的免疫力水平，同时马奶中的脂肪球微小，易被人体消化与吸收，同时富含不饱和脂肪酸与低分子脂肪酸，此类脂肪酸有助于降低血液中的胆固醇[94]含量，起到预防高胆固醇血症[97]、动脉硬化[97]、促进胃肠道的消化吸收功能[98]。同时，马奶富含大量维生素C，有研究证明，维生素C可以通过提高心脏肌糖原的转化速率[97]，有效的减少心肌缺血等情况，从而起到修复心肌损伤的作用。

3.5 提高免疫功能

马奶中富含大量的钙、磷等矿物质元素，这些元素对于维持骨骼的正常结构与功能、促进生长发育不可或缺。适度饮用马奶，能够满足人体对钙、磷等矿物质的需求，有效预防骨质疏松、骨折等骨骼疾病的发生。同时马奶粉是以新鲜马奶为原料，经过滤、杀菌、发酵等预处理后，采用先进的冷冻干燥技术加工而成的淡白色粉末状产品[99]。马奶粉含有高含量的钙和维生素D，有助于骨骼健康，而维生素E和抗氧化物质则能够减少色斑形成、延缓皮肤衰老[100]。此外，马奶粉中的免疫球蛋白和乳铁蛋白[101]具有增强免疫力的作用。

中国乳业线上阅读

4 结论与展望

马作为人类重要伙伴，其泌乳特性、营养价值及乳制品产品价值在营养与食品科学领域展现出独特优势。马奶不仅具有与母乳高度相似的营养成分构成，其低致敏性、高生物利用度及丰富的功能性成分，使其成为极具开发潜力的天然营养资源，未来研究应该加强推动马奶产业技术转型，通过建立标准、技术创新以及大力发展新市场等方法，打造独特的产业形象，大力开发马奶独特活性，打造马奶新品牌。同时在产品发展的过程中也要监管到位，注重生产过程中的安全问题，切实保护人们食品安全，实现马奶标准化生产，推动马奶从区域性民族食品向全球化功能性食品的发展，为健康中国战略提供特色乳品资源支撑。

参考文献

[1] 韩国才.马的起源驯化、种质资源与产业模式[J].生物学通报，2014，49（2）：1–3，63.

[2] 敖敏，赵一萍，康德措，等.马奶营养价值和产品开发进展[J].内蒙古科技与经济，2018（20）：63–65.

[3] Liu X，Jia Y，Pan J，et al.Selection at the GSDMC locus in horses and its implications for human mobility[J].Science，2025，389（6763）：925–930.

[4] Blanco–Doval A，Barron L J R，Aldai N.Nutritional quality and socio–ecological benefits of mare milk produced under grazing management[J].Foods，2024，13（9）：1412.

[5] Xia Y，Yu J，Miao W，et al.A UPLC–Q–TOF–MS–based metabolomics approach for the evaluation of fermented mare's milk to koumiss[J].Food Chemistry，2020，320：126619.

[6] 张萌萌，赵雪妮，双全，等.马奶营养品质及功能特性的发酵动态分析[J].食品与发酵工业，2022，48（7）：103–109.

[7] 陶克涛，芒来.马奶酒与马奶粉营养成分分析研究[J].黑龙江畜牧兽医，2015（21）：107–109，113.

[8] Centoducati P，Maggiolino A，De Palo P，et al.Application of Wood's model to lactation curve of Italian Heavy Draft horse mares[J].Journal of Dairy Science，2012，95（10）：5770–5775.

[9] Lancioni H，Cardinali I，Giontella A，et al.Mitochondrial DNA variation in the Italian Heavy Draught Horse[J].PeerJ，Inc，2020，8：e8996.

[10] 孙啸渊，薛利，古丽巴合提·达吾列提汗，等.哈萨克马泌乳拟合及乳中营养成分分析[J].黑龙江畜牧兽医，2025（3）：47–53.

[11] 吕士鹏，刘玲玲，孟军，等.伊犁马泌乳曲线的拟合研究[J].中国畜牧杂志，2019，55（4）：66–69.

[12] Malacarne M，Martuzzi F，Summer A，et al.Protein and fat composition of mare's milk：some nutritional remarks with reference to human and cow's milk[J].International Dairy Journal，2002，12（11）：869–877.

[13] 莫合塔尔·夏甫开提.新疆乳用型马品种有关的前期研究进展[J].新疆畜牧业，2016（6）：27–29.

[14] 蔡俊娜.羊乳蛋白体外模拟消化及羊乳对肠道微生物的影响[D].西安：陕西师范大学，2021.

[15] Teichert J，Cais–Sokoli ń ska D，Dank ó w R，et al.Color stability of fermented mare’s milk and a fermented beverage from cow’s milk adapted to mare’s milk composition[J].Foods，2020，9（2）：217.

[16] 张志恒，范文鹏，黄越川，等.不同品种牛牛嘴宽度与生产性状的相关分析[J].中国畜牧杂志，2023，59（11）：129–132.

[17] 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.

[18] Kushugulova A，Kozhakmetov S，Sattybayeva R，et al.Mare's milk as a prospective functional product[J].Functional Foods in Health and Disease，2018，8（11）：548–554.

[19] Kocyigit E，Abdurakhmanov R，Kocyigit B F.Potential role of camel，mare milk，and their products in inflammatory rheumatic diseases[J].Rheumatology International，2024，44（3）：425–434.

[20] Liu C，Liu L–X，Yang J，et al.Exploration and analysis of the composition and mechanism of efficacy of camel milk[J].Food Bioscience，2023，53：102564.

[21] 李龙柱，张富新，贾润芳，等.不同哺乳动物乳中主要营养成分比较的研究进展[J].食品工业科技，2012，33（19）：396–400.

[22] Businco L，Giampietro P G，Lucenti P，et al.Allergenicity of mare’s milk in children with cow’s milk allergy[J].ournal of Allergy and Clinical Immunology，2000，105（5）：1031–1034.

[23] 邱冀，孟阳，赵怿，等.不同哺乳动物乳中主要营养成分研究进展[J].乳业科学与技术，2021，44（3）：50–54.

[24] 张妍.不同哺乳期山羊乳脂质组成及其消化吸收特性的比较研究[D].无锡：江南大学，2021.

[25] 吴宝森，孙玥晖，刘姝韵，等.发酵肉制品中脂肪、蛋白

中国乳业线上阅读

质水解氧化与微生物的关系[J].食品安全质量检测学报，2017，8（3）：832-837.

[26] Potočnik K，Gantner V，Kuterovac K，et al.Mare’s milk：composition and protein fraction in comparison with different milk species[J].Mljekarstvo：časopis za unaprjeđenje proizvodnje i prerade mlijeka，2011，61（2）：107-113.

[27] 鲍台山.双峰驼乳对Ⅱ型糖尿病模型大鼠红细胞膜抗氧化作用的初探[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2015.

[28] Kocyigit E，Abdurakhmanov R，Kocyigit B F.Potential role of camel，mare milk，and their products in inflammatory rheumatic diseases[J].Rheumatology International，2024，44（3）：425-434.

[29] 唐鲲.1.维生素D3羟化酶基因的克隆表达和活性检测2.臂踝脉博波速度与骨质疏松症风险的相关性研究[D].苏州：苏州大学，2021.

[30] Holick M F，Binkley N C，Bischoff-Ferrari H A，et al.Evaluation，treatment，and prevention of vitamin D deficiency：An endocrine society clinical practice guideline[J].The Journal of Clinical Endocrinology&Metabolism，2011，96（7）：1911-1930.

[31] 张妮，王丽娟.维生素D与慢性病的剂量-效应关系[J/OL].卫生研究,1-8[2025-11-17].https：//link.cnki.net/urlid/11.2158.R.20251024.1131.002.

[32] Altomonte I，Salari F，Licitra R，et al.Donkey and human milk：Insights into their compositional similarities[J].International Dairy Journal，2019，89：111-118.

[33] Vici G，Camilletti D，Polzonetti V.Possible role of vitamin D in celiac disease onset[J].Nutrients，2020，12（4）：1051.

[34] 张积荣，王骁，李佳豪，等.补饲对放牧条件下哺乳期马驹生长发育的影响[J].安徽农业科学，2020，48（9）：109-112.

[35] 贾雨欣.补喂支链氨基酸对伊犁马泌乳性能及血液指标的影响[D].乌鲁木齐：新疆农业大学，2024.

[36] 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].Public Library of Science ONE，2024，19（9）：e0310693.

[37] Czyżak-Runowska G，W ó jtowski J A，Dank ó w R，et al.Mare's milk from a small polish specialized farm-basic chemical composition，fatty acid profile，and healthy lipid indices[J].Animals（Basel），2021，11（6）：1590.

[38] Toishimanov M，Zhanten O，Kanat R，et al.The effects of the lactation period，mare age，and foaling on the chemical and physical composition of milk from kazakh mares kept under natural pasture conditions[J].Animals（Basel），2025，15（12）：1817.

[39] Barłowska J，Polak G，Janczarek I，et al.The Influence of selected factors on the nutritional value of the milk of Cold-Blooded mares：the example of the Sok ó lski Breed[J].Animals（Basel），2023，13（7）：1152.

[40] 孙天松.中国新疆地区传统发酵酸马奶的化学组成及乳酸菌生物多样性研究[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2006.

[41] 红梅，包艳青，芒来，等.内蒙古地区传统发酵酸马奶不同发酵时期乳清蛋白SDS-PAGE分析[J].畜牧与饲料科学，2023，44（5）：83-92.

[42] Lou X，Shao W，Wu Y，et al.Peptidomic analysis of potential bioactive peptides in mare milk under different heat treatment conditions[J].Foods，2024，13（22）：3592.

[43] Gantner V，Baban M，Hanžek D，et al.Human and mare's milk-protein fraction and lipid composition[J].Poljoprivreda，2014，20（2）：36-42.

[44] Semenova E S，Simonenko E S，Manuylov B M.Structure and properties of a-lactalbumin in Mare's milk[J].Food Processing Industry，2022：22-24.

[45] Wodas L，Mackowski M，Borowska A，et al.Genes encoding equine β-lactoglobulin（LGB1 and LGB2）：Polymorphism，expression，and impact on milk composition[J].Public Library of Science ONE，2020，15（4）：e0232066.

[46] Kanda A，Nakayama K，Fukasawa T，et al.Post-exercise whey protein hydrolysate supplementation induces a greater increase in muscle protein synthesis than its constituent amino acid content[J].British Journal of Nutrition，2013，110（6）：981-987.

[47] Phillips S M.The impact of protein quality on the promotion of resistance exercise-induced changes in muscle mass[J].Nutrition&Metabolism，2016，13：1-9.

[48] Qi X，Chen H，Guan K，et al.Identification，inhibitory mechanism and transepithelial transport of xanthine oxidase inhibitory peptides from whey protein after simulated gastrointestinal digestion and intestinal absorption[J].Food Research International，2022，162（Pt A）：111959.

[49] Luhovyy B L，Akhavan T，Anderson G H.Whey proteins in the regulation of food intake and satiety[J].Journal of the American College of Nutrition，2007，26（6）：704S-712S.

[50] Arendse L B，Danser A J，Pogitsch M，et al.Novel therapeutic approaches targeting the renin-angiotensin system and associated peptides in hypertension and heart failure[J].Pharmacological Reviews，2019，71（4）：539-570.

[51] 王磊，成雪，毛学英.乳清蛋白及其活性多肽的生物学功能研究进展[J].中国农业科技导报，2010，12（5）：30-35.

[52] 田志琴.乳清蛋白的特性及在乳制品生产中的应用[J].中国食品工业，2022（23）：86-88.

中国乳业线上阅读

[53] 王晔，王若男，刘双，等.乳清蛋白在运动营养中的功效研究进展[J].中国乳品工业，2024，52（12）：45–52，58.

[54] Faubladier C，Julliand V，Daneiche L，et al.Comparative fibre–degrading capacity in foals at immediate and late post–weaning periods[J].Animal，2017，11（9）：1497–1504.

[55] 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.

[56] Ma Y，Zhang L，Wu Y，et al.Changes in milk fat globule membrane proteome after pasteurization in human，bovine and caprine species[J].Food Chemistry，2019，279：209–215.

[57] Lv K，Yang Y，Li Q，et al.Identification and comparison of milk fat globule membrane and whey proteins from Selle Français，Welsh pony，and Tieling Draft horse mare's milk[J].Food Chemistry，2024，437（Pt 2）：137915.

[58] Lv K，Yang Y，Li Q，et al.Identification and comparison of milk fat globule membrane and whey proteins from Selle Français，Welsh pony，and Tieling Draft horse mare’s milk[J].Food Chemistry，2024，437：137915.

[59] Nie C，Zhao Y，Wang X，et al.Structure，biological functions，separation，properties，and potential applications of milk fat globule membrane（MFGM）：A review[J].Nutrients，2024，16（5）587.

[60] 王煜林，吉日木图，何静.乳脂球膜中的营养成分在婴儿健康和发育中的作用[J].中国食品学报，2023，23（6）：402–410.

[61] Agostoni C，Braegger C，Decsi T，et al.Breast–feeding：a commentary by the ESPGHAN committee on nutrition[J].Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition，2009，49（1）：112–125.

[62] 阳菊红.多聚唾液酸修饰对神经细胞粘附分子介导的信号通路的影响[D].西安：西北大学，2021.

[63] 郭晋红,段昊,王点点,等.乳脂肪球膜功能特性的研究进展[J].食品安全质量检测学报，2023，14（23）：264–273.

[64] Ten Bruggencate S J，Frederiksen P D，Pedersen S M，et al. Dietary milk–fat–globule membrane affects resistance to diarrheagenic *Escherichia coli* in healthy adults in a randomized，placebo–controlled，double–blind Study.J Nutr，2016，146（2）：249–255.

[65] 时佳，张海娇，赵锋，等.乳脂肪球膜结构、功能特性及其应用研究进展[J].乳业科学与技术，2025，48（1）：46–52.

[66] Novaković P，Huang Y Y，Lockerbie B，et al.Identification of escherichia coli f4ac–binding proteins in porcine milk fat globule membrane[J].Canadian Journal of Veterinary Research，2015，79（2）：120–128.

[67] 张璐，任佳琦，何强，等.基于主成分分析的不同乳中脂肪酸组成及含量的比较[J].现代食品科技，2025，41（6）：190–197.

[68] 潘俊宇，王斌，范荣波，等.蛋白质组学技术在不同物种乳掺假检测中的应用[J].现代食品科技，2023，39（12）：328–335.

[69] 胡娜，利佳炜，闫珍珍，等.蛋白质定量质谱技术及其在食品加工用酵母中的应用[J].食品科学，2023，44（3）：12–21.

[70] Chen X，Gulbahar K，Ding H，et al.Comparative analysis of proteomics and transcriptomics reveals novel mechanism underlying the antibacterial activity and immune–enhancing properties of horse milk[J].Frontiers in Nutrition，2025，12：1512669.

[71] Lin J，Jing H，Wang J，et al.Effects of lysine and threonine on milk yield，amino acid metabolism，and fecal microbiota of Yili lactating mares[J].Frontiers in Veterinary Science，2024，11：1396053.

[72] 布仁其其格，董超，包玉龙，等.利用宏转录组学技术分析酸马奶发酵过程中活性微生物功能基因表达的变化特征[J].畜牧与饲料科学，2024，45（4）：1–9.

[73] Curadi M C，Orlandi M，Greppi G，et al.Identification of protein fractions in mare's colostrum and milk[J].Milchwissenschaft，2000，55（8）：446–449.

[74] 许晶辉.驴乳和马乳的营养成分及对肠道微生物的影响[D].西安：陕西师范大学，2020.

[75] Fantuz F，Ferraro S，Todini L，et al.Distribution of calcium，phosphorus，sulfur，magnesium，potassium，and sodium in major fractions of donkey milk[J].Journal of Dairy Science，2020，103（10）：8741–8749.

[76] Xiao T，Zeng J，Zhao C，et al.Comparative analysis of protein digestion characteristics in human,cow，goat，sheep，mare，and camel milk under simulated infant condition[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry，2023，71（41）：15035–15047.

[77] 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.

[78] Blanco–Doval A，Azkargorta M，Iloro I，et al.Comparative proteomic analysis of the changes in mare milk associated with different lactation stages and management systems[J].Food Chemistry，2024，445：138766.

[79] 赵雪妮.阿巴嘎黑马与乌珠穆沁白马鲜马奶发酵前后品质特性比较分析[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2021.

[80] 秀布松，满达，特木其乐，等.蒙医酸马奶疗法对儿童自闭症谱系障碍肠道菌群影响的研究进展[J].中国民族医药杂志，2024，30（12）：51–54.

[81] 李倩，李海，黄新新，等.鲜马乳与发酵酸马乳常规营养成分的比较分析[J].中国乳品工业，2022，50（7）：19–23.

中国乳业线上阅读

[82] Semenova E，Simonenko E，Simonenko S，et al.Hydrolysates of mare's milk proteins.Immunochemical and physico-chemical characteristics[J].Food Systems，2024，7（3）：466-472.
[83] 金花，代丽君，高娃.酸马奶[J].中国乳品工业，1998，（4）：16-17.
[84] 宋园亮，李海燕，柳陈坚.乳酸菌治疗乳糖不耐受症的研究进展[J].中国微生态学杂志，2010，22（8）：751-753.
[85] 杨俊华，孔祥明，王洁，等.高效液相色谱法测定宁夏牛奶中β-乳球蛋白和α-乳白蛋白含量[J].食品安全质量检测学报，2025，16（22）：293-298.
[86] Shi Y-D，Sun G-Q，Zhang Z-G，et al.The chemical composition of human milk from Inner Mongolia of China[J].Food Chemistry，2011，127（3）：1193-1198.
[87] 胜利.酸马奶发酵剂菌株的筛选及其发酵工艺优化[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2022.
[88] Meng Y，Chen X，Sun Z，et al.Exploring core microbiota responsible for the production of volatile flavor compounds during the traditional fermentation of Koumiss[J].LWT-Food Science and Technology，2021，135：110049.
[89] Man L-L，Xiang D-J.Characterization of a broad spectrum bacteriocin produced by Lactobacillus plantarum MXG-68 from Inner Mongolia traditional fermented koumiss[J].Folia Microbiologica，2019，64：821-834.
[90] Suissa R，Oved R，Jankelowitz G，et al.Molecular genetics for probiotic engineering：dissecting lactic acid bacteria[J].Trends in Microbiology，2022，30（3）：293-306.
[91] Gao Z，Daliri E B，Wang J，et al.Inhibitory effect of lactic acid bacteria on foodborne pathogens：A review[J].Journal of Food Protection，2019，82（3）：441-453.
[92] 胡爱心，刘金松，许英蕾，等.乳酸菌抑菌作用机制的研究进展[J].动物营养学报，2021，33（12）：6690-6698.
[93] 王文婧，殷文政，冀昌龙.产抑菌活性物质菌株的筛选及其抑菌机理的研究[J].现代食品科技，2016，32（12）：151-157.
[94] 孟岳成，黄阮卿，陈杰，等.热处理对酸马奶中蛋白质稳定性的影响[J].中国食品学报，2022，22（12）：174-180.
[95] 敖其，王丹，包英姝，等.酸马奶对慢性胃炎患者临床症状的改善效果研究[J].中国乳品工业，2018，46（5）：14-17.
[96] Timakova R，Il'yukhina Y V，Startsev V.Evaluation of the balance of amino acid composition of dry mare's milk protein[J].Food Processing Industry，2023：16-21.
[97] 黄雅琴，于海宁，沈生荣.马奶营养成分及其对心血管疾病的防治作用[J].现代医药卫生，2024，40（24）：4294-4298.
[98] Shaikh A，Mehta B，Jana A H.Chemistry，nutritional properties and application of Mare's milk：A review[J].Agricultural Reviews，2022，43（3）：355-361.
[99] 小美.微胶囊化酸马奶粉制备工艺研究[D].通辽：内蒙古民族大学，2024.
[100] Sarsembayev K S，Sinyavskiy Y A，Ibraimov Y.Use of powdered mare's milk in the production of specialized sports nutrition products[J].Experimental Biology，2021：78-87.
[101] 王威.生鲜马乳中乳铁蛋白及脂肪酸分析与应用研究[D].乌鲁木齐：新疆农业大学，2017.

Research Progress On Nutrient Composition And Function of Mare's Milk

ZHUO Yina[1,2]，ZHENG Nan[1]，ZHAO Yankun[1,3]，MENG Lu[1*]

[1]Key Laboratory of Quality & Safety Control for Milk and Dairy Products of Ministry of Agriculture and Rural Affairs，Institute of Animal Sciences，Chinese Academy of Agricultural Sciences，Beijing 100193

[2]School of Food Science and Engineering，Qingdao Agricultural University，Qingdao Shandong 830091

[3]Xinjiang Academy of Agricultural Sciences，Urumqi Xinjiang 266109

Abstract：Mare's milk is a natural dairy product with nutritional components highly similar to human breast milk.

下转102页

中国乳业线上阅读

Study and Application of the Formation Mechanism and Systematic Control Strategies for Off-flavors in Bovine Milk

CHEN Qiping，WU Weijun*，LI Songqun，FAN Cunfei，WU Zepeng，SUN Kelong，ZHANG Jinyu，GAO Fangyang，LIU Lanfeng，HUANG Hai，ZHANG Wanying
Guangzhou Fengxing Dairy Co.，Ltd.，Guangzhou Guangdong 510610

Abstract：Bovine milk is a nutrient-rich natural beverage，and its flavor directly influences consumers' acceptance and the market value of the product. Throughout the entire industrial chain from the pasture to the dining table，bovine milk is prone to developing unpleasant odors due to various factors，which significantly reduces product quality and simultaneously hinders the high-quality development of the dairy industry. This paper systematically analyzed the main types，key influencing factors and biochemical mechanisms of milk odor. On this basis，it further explored the systematic control methods at the pasture end，covering aspects such as dairy cow health management，feed nutrition matching，milking hygiene assurance，and proposes precise and feasible technical solutions. Meanwhile，in combination with the core concept of the “China Excellent Milk Project”，this paper expounded the path for upgrading the flavor and quality of bovine milk from “safety” to “quality”，providing theoretical references and practical guidance for the dairy industry and contributing to the improvement of the flavor quality of high-quality milk.

Keywords：high-quality milk；off odor；formation mechanism；control methods；upgrade path

▲上接91页

It has attracted much attention due to its low allergenicity，high digestibility，and rich bioactive substances. This paper systematically reviewed the lactation patterns of mares，the basic nutritional components of mare's milk（such as protein，fat，lactose，minerals，and vitamins），its active components（such as lactoferrin，lysozyme，and milk fat globule membrane proteins），and their functional characteristics. Research showed that the ratio of casein to whey protein in mare's milk is close to that in human milk，and it has low allergenicity. 773 functional proteins have been identified in the milk fat globule membrane of mare's milk，which are closely related to immune regulation and cell metabolism. Fermentation technology can significantly enhance the nutritional value of mare's milk，reducing lactose content and generating metabolites such as antimicrobial peptides and organic acids，endowing it with functions such as regulating blood lipids and enhancing immunity. This paper also explored the development potential of derivative products such as acid mare's milk and mare's milk powder. In the future，it is necessary to strengthen the analysis of the mechanism of action of active components in mare's milk， optimize standardized production and processing technologies，and promote its development from a regional ethnic food to a high-value functional food industry，providing support for the development of China's characteristic dairy resources.

Keywords：mare's milk；lactation regularity；nutritive value；functional activity

中国乳业线上阅读