牛奶、驼奶和驴奶营养特性与适应性进化的研究进展

任 薇，孟 璐，王加启，郑 楠*

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，农业农村部奶产品质量安全风险评估实验室（北京），北京 100193

摘 要：随着对奶产品多样性和营养价值的重视，牛奶、驼奶和驴奶的研究逐渐深入。其营养价值和特征性成分成为评估奶产品质的重要指标。本综述从蛋白质、脂肪、矿物质和维生素以及生物活性成分的角度，综合分析了牛奶、驼奶和驴奶的独特营养特性和健康效应；并深入探讨了奶中特征成分与生物进化和环境适应机制的联系，以及其对幼崽生长发育的潜在益处。本研究为奶品行业提供了新的理论视角，对开发更具营养价值和功能特性的奶制品具有重要意义。

关键词：奶；营养成分；特征成分；适应性进化

文章编号：1671–4393（2025）11–0071–11 DOI:10.12377/1671–4393.25.11.09

中国乳业线上阅读

0 引言

奶制品是人们日常饮食中不可或缺的一部分，其中牛奶、驼奶和驴奶因其独特的营养价值而受到青睐。牛奶是全球消费最广泛的奶制品之一，其营养价值得到广泛的认可。驼奶被誉为“软黄金”，其营养成分与牛奶相似，但含有更丰富的脂肪，尤其是长链不饱和脂肪酸等，有助于提高免疫和控制血糖水平[1]。驴奶具有低脂肪含量高不饱和脂肪酸、高溶菌酶等特性，被认为是一种高营养价值和健康益处的特色奶品[2]。每种特色奶品都有其独特的优势，为不同人群提供多样化营养选择。

乳汁的出现是哺乳动物进化的关键特征之一。研究发现，品种差异、生存环境及气候条件显著影响乳汁中的营养组成，以适应幼崽在不同环境下的生长需求[3]。骆驼作为极端干旱环境的适应者，其乳汁中含有丰富的长链不饱和脂肪酸和免疫增强因

基金项目：国家重点研发计划（2022YFD1600100）；新疆维吾尔自治区重大科技专项（2024A02005）；中国农业科学院科技创新工程（ASTIP–IAS12）

作者简介：任 薇（1999–），女，河北邢台人，在读硕士，研究方向为奶产品营养功能评价；
孟 璐（1986–），女，江苏徐州人，博士，副研究员，研究方向为奶产品质量安全风险评估；
王加启（1967–），男，安徽宿州人，博士，研究员，研究方向为奶牛营养与牛奶质量安全。
*通信作者：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安全风险评估与营养功能评价。

子，这反映其长期的进化压力和生理适应机制[1，4]。另一方面，驴奶的低脂肪和高乳糖含量，可能与其在资源匮乏环境中的适应性有关，为其幼崽提供了稳定的能量来源和保护性的生物活性物质[5，6]。这些发现强调了乳汁在哺乳动物进化过程中的重要作用，并为进一步探索特色奶品的营养价值和人类健康益处提供了科学基础。本文将基于这些科学研究，全面分析奶成分的多样性及其对哺乳动物幼崽生存和健康的影响，为特色奶品的营养价值和人类健康益处提供更深入的见解。

1 牛奶、驼奶和驴奶的营养成分

1.1 牛奶的营养成分及其特性

牛奶作为高营养食品，其中蛋白质、脂肪、乳糖、矿物质、维生素及生物活性物质等成分被认为是品质的重要评定指标。研究发现，牛奶中蛋白质含量为3.0%~3.9%，主要由酪蛋白和乳清蛋白组成[7]。其中，酪蛋白约占牛奶蛋白质的80%，具有良好的营养价值和生物利用率，常用于制奶酪和酸奶。而乳清蛋白则相对容易消化，常用于运动营养和补充剂[8]。牛奶中脂肪含量为3.2%~4.2%，主要以乳脂球的形式存在[9]。乳脂肪主要为甘油三酯（97%~ 98%）、磷脂（0.2%~1.0%）、0.1%~0.4%游离脂肪酸和0.4%胆固醇组成[10，11]。其中，乳脂肪中的磷脂、鞘磷脂、中性糖基神经酰胺、酸性糖基神经酰胺和神经节苷脂在神经发育中发挥着重要作用[9，12~14]。在新鲜牛奶脂肪酸的分析中发现，中短链脂肪酸（C4−C12）是牛奶风味形成的重要因素，丁酸、己酸、辛酸、癸酸、丙酮酸和乳酸等化合物在牛奶的挥发性风味物质中发挥主要作用，从而赋予牛奶特有的香味[14，15]。同时，中短链脂肪酸的熔点较低，使其在室温下呈液态，进一步增强了乳脂肪的柔润质感。牛奶中乳糖含量为4.5%~5.2%，是乳汁中特有的碳水化合物，不仅是牛奶热量的主要来源，还促进肠道中有益菌生长[16]。乳糖的甜度约为蔗糖的1/5，为牛奶提供了轻微的甜味。然而，乳糖不耐受者（缺乏乳糖酶）在消化乳糖时，易引发腹胀、腹泻、腹痛等症状[17]。牛奶中必需矿物质的含量为0.7%~0.75%，主要包括钙、镁、磷、钾、钠和锌等[18]。据《中国居民膳食营养素推荐摄入量（RNIs）》显示，成年人每日建议饮用300 mL牛奶，从中摄入360 mg钙，达到成年人每日钙需要量的45%。奶中的钙吸收效率远高于其他食物（30%~35%）[19]。此外，牛奶中还含有丰富的维生素，包括维生素A、D、E以及B族维生素，这些维生素对维持视力、增强免疫力、促进钙吸收、能量代谢和神经系统健康都至关重要[20，21]。综上所述，牛奶含有丰富的蛋白质和生物活性物质对人体健康有着重要的促进作用，但不适合乳糖不耐受的人群。

1.2 驼奶的营养成分及其特性

驼奶被冠以“沙漠白金”之称，在干旱和半干旱地区是重要的营养资源和经济来源。在水资源短缺的环境中，驼奶的高含水量（84%~88%）被认为是重要的水源[22，23]。驼奶的蛋白质含量为3.81%~4.97%，其在体内的吸收率极高（97%~98%）[23，24]。酪蛋白是其主要的蛋白质成分，其中β−酪蛋白的占比高于其他奶源，且不含有易引起过敏反应的β−乳球蛋白，这使得驼奶更易于消化并减少了过敏风险[25]。此外，驼奶中的蛋白质还具有抗菌特性，有助于免疫系统的健康[26]。驼奶含有的人体必需氨基酸占总氨基酸的44.92%[27]。值得注意的是，驼奶的脂肪含量为3.4%~6.2%，其脂肪酸组成以长链不饱和脂肪酸为主，其中5 种长链脂肪酸占总脂肪酸的75.83%[27]。亚油酸的含量为4.42%，亚麻酸的含量为1.43%，这对心血管健康具有积极作用[27，28]。驼奶中乳糖含量为2.4%~5.3%，其乳糖颗粒较小，易于消化吸收。此外，驼奶中酪啡肽的浓度较低[29]，减少肠道的蠕动，从而让乳糖有更长的时间接触乳糖酶。驼奶中L−乳酸的含量较高，可减少过敏性[25，30，31]，因此，驼奶被认为更适合乳糖不耐症患者。在矿物质方面，驼奶含有丰富的钙、磷、钾、钠、铁、铜和锌等，这些矿物质对于骨骼

中国乳业线上阅读

健康和多种生理功能至关重要。驼奶中钙的含量为1 000~1 600 mg/L，铁为1.297 mg/L，高于其他奶源的钙铁含量[32]。此外，驼奶中的矿物质盐含量较高，有助于维持身体电解质平衡。研究发现，驼奶中含有丰富的维生素，其中水溶性维生素的含量高于其他奶源，尤其是VB_3和VC的含量[33]。这些维生素对于增强免疫力、促进细胞健康和维持正常的生理功能都是必不可少的。综上所述，驼奶不仅含有丰富的蛋白质，还含有人体必需的氨基酸和脂肪酸，是宝贵的天然营养资源。

1.3 驴奶的营养成分及其特性

驴奶作为一种新兴的奶类资源，因其与人奶相似的营养成分和潜在的健康益处而受到关注。研究表明，驴奶中的水分含量较高（86%~90.4%），总干物质中蛋白质含量相对较低，约为1.74%[34, 35]。乳清蛋白是其主要的蛋白质成分，占64.3%，与人奶非常接近[36]。乳清蛋白不仅含有人体所需的必需氨基酸，而且其氨基酸组成与人体需求比例接近，易于消化吸收[37]。此外，驴奶脂肪含量（0.5%~1.5%）较低，被称为天然脱脂奶。其脂肪酸组成中不饱和脂肪酸，尤其是ω-3脂肪酸含量高（亚油酸占总脂肪酸的27.95%），对婴儿的健康生长和发育具有重要作用[38~40]。此外，驴奶中的胆固醇含量较低（2.2 mg/100 g），适合需要控制胆固醇摄入的人群[39]。在乳糖含量方面，驴奶与人奶相似，一般在5.8%~7.4%，高含量的乳糖有助于增加肠道对钙的吸收，从而促进骨骼健康[41, 42]。驴奶中还含有丰富的矿物质和维生素，其中硒（Se）的含量达到80 μg/kg，VC的含量高达5.16 mg/100 g，VD的含量为2.23 μg/100 mL[38, 43, 44]。这些成分对于增强免疫力和抗氧化具有重要作用。此外，多项研究中已表明，驴奶含有丰富的α-乳清蛋白、溶菌酶、乳铁蛋白、乳过氧化物酶、免疫球蛋白，可在抗氧化、抗菌、抗病毒、抗真菌、降血糖、抗寄生虫、抗肿瘤等方面发挥重要作用[2, 35, 42]。综上所述，驴奶的低致敏性、抑菌性和抗癌活性等特性，使驴奶成为婴儿和对牛奶过敏人群的理想替代品；作为天然脱脂奶和高不饱和脂肪酸的优势，受到减肥人士和心血管疾病患者的青睐。

2 牛奶、驼奶和驴奶的营养成分比较及其应用

2.1 牛奶、驼奶和驴奶的营养成分比较

牛奶、驼奶和驴奶是常见的动物奶源，为幼崽生长发育提供营养物质的重要来源。奶在蛋白质和氨基酸组成、脂肪和脂肪酸结构，以及乳糖、矿物质和维生素含量上存在显著差异（表1），不仅影响它们的营养特性，也决定了它们的健康品质。

在蛋白质和脂肪组成方面，牛奶和驼奶的蛋白质含量相对较高，牛奶中酪蛋白含量约占总蛋白的65%，其中κ-酪蛋白占优势，而驼奶以β-酪蛋白和α-酪蛋白为主[45]。值得注意的是，驼奶不含β-乳球蛋白，富含α-乳白蛋白、乳铁蛋白、免疫球蛋白、溶菌酶、α-乳白蛋白和血清白蛋白，使其不仅具有低致敏性，还能提高免疫力[46]。此外，驼奶的酪蛋白磷酸化程度低，在酸性环境中不易形成凝固物，这与其他反刍动物奶有所不同[30]。驴奶的蛋白质含量较低，但其乳清蛋白和酪蛋白的比例与人奶接近，更易消化吸收[47]。在脂肪组成上，牛奶中饱和脂肪酸含量约70%，显著高于人奶[48]。相比之下，驼奶和驴奶含有较高比例的不饱和脂肪酸，有利于心血管健康。驼奶的中长链脂肪酸含量显著高于牛奶和驴奶，尤其是共轭亚油酸含量，使其具有抗炎和抗氧化特性[49]。驴奶的脂肪球较小，脂肪含量相对较低，但其含有对人体健康有益的不饱和脂肪酸含量，且脂肪组成的独特性有助于提高消化率[50, 51]。此外，鲜驴奶脂肪还具有抑制结核分枝杆菌生长作用，在缓解肺结核等疾病方面发挥重要作用[52]。

在矿物质和维生素方面，驴奶和驼奶富含人体必需的营养元素。驼奶含有丰富的钙、钾等矿物质，高于牛奶。而驴奶中的矿物质含量与人奶相似，且硒含量较高，是牛奶的5.2倍[2]。此外，驴奶

中国乳业线上阅读

表 1 牛奶、驼奶、驴奶和人奶的营养成分比较

营养成分	牛奶 [5, 61~63]	驼奶 [1, 27, 46, 61~65]	驴奶 [5, 37, 57, 62, 63, 66, 67]	人奶 [21, 63, 65, 68]
蛋白质（g/100 g）	3.3~3.9	2.9~5.0	1.4~2.0	0.9~1.7
脂肪（g/100 g）	3.6~5.7	3.4~6.2	0.3~2.5	3.5~4.6
饱和脂肪酸（%）	75.49	53.66	57.96	49.29
单不饱和脂肪酸（%）	21.63	41.00	35.01	36.90
多不饱和脂肪酸（%）	1.89	5.21	6.05	12.65
乳糖（g/100 g）	4.6~5.2	2.4~5.3	5.8~7.4	6.3~7.9
干物质（g/100 g）	12.3~14.5	11.9~15.5	8.8~11.7	11.5~12.6
酪蛋白（g/100 g）	2.40~2.80	2.20~4.80	0.51~1.03	0.24~0.42
乳清蛋白（g/100 g）	0.55~0.70	0.54~1.00	0.49~0.90	0.68~0.83
as1– 酪蛋白 / 酪蛋白（%）	38.00	21.00	3.90~9.70	6.25~16.70
as2– 酪蛋白 / 酪蛋白（%）	10.0	9.0	–	–
β – 酪蛋白 / 酪蛋白（%）	36.0	65.0	–	71.4
κ – 酪蛋白 / 酪蛋白（%）	13.00	3.00~5.00	< 检出限	0.05~0.10
α – 乳白蛋白 / 乳清蛋白（%）	19.0	45.0~53.0	23.0~33.0	23.8~32.5
β – 乳球蛋白 / 乳清蛋白（%）	47.0	–	30.0~57.0	< 检出限
溶菌酶 / 乳清蛋白（%）	< 检出限	0.26~3.8	21.03	0.5~25.0
乳铁蛋白 / 乳清蛋白（%）	0.1	1.1~3.8	4.5	1.7~2.0
维生素（μg/100 mL）				
维生素 A	17~50	5~97	9~58	30~200
维生素 C	1 200~2 500	2 610~5 000	2 010~3 120	3 500~5 000
维生素 D	0.1~1.0	0.25~1.60	2.23	0.04~0.100
维生素 E	20~184	21~150	2.14~38.4	237~800
维生素 B_1	18~40	28~90	12~60	14~17
维生素 B_2	140~200	300~500	30~97	20~60
维生素 B_6	30~70	50~55	34~148	11~14
维生素 B_9（μM）	0.02	0.40~2.00	0.83	0.37
维生素 B_{12}	0.27~0.70	0.20~1.60	0.11	0~0.05
矿物质（mg/L）				
钙	1 120~1 300	1 500~1 600	330~1 150	276~340
镁	70.0~120.0	80.0~160.0	20.0~82.7	30.0~40.0
锌	3.0~5.5	1.5~7.3	1.0~3.0	2.0~4.6
钾	1 060~1 520	1 240~1 560	2 009~2 400	550~713
铁	0.30~1.00	0.42~3.70	0.40~3.74	0.40~2.00
硒	1.0~2.0	0.5~2.3	0.1~0.3	–
脂肪酸（mol %）				
C4：0	8.65	–	1.06	0.02
C6：0	4.79	0.10	1.58	0.05
C8：0	2.84	0.10	1.51	0.14
C10：0	4.69	0.10	2.92	1.71
C12：0	3.90	1.05	2.89	6.74
C14：0	11.76	11.84	7.52	8.54
C16：0	30.43	27.07	31.24	23.83
C18：0	7.50	11.85	8.31	6.09
C18：1 ω–9	17.94	29.25	31.77	33.43

中国乳业线上阅读

续表 1

营养成分	牛奶[5, 61~63]	驼奶[1, 27, 46, 61~65]	驴奶[5, 37, 57, 62, 63, 66, 67]	人奶[21, 63, 65, 68]
C18：2 ω-6	1.12	3.31	5.53	10.57
C18：3 ω-3	0.13	1.37	0.40-0.70	0.67
C18：3 ω-6	0.86	0.17	0.15	0.05
C20：0	0.36	0.62	0.16	0.25
C20：1 ω-9	–	0.14	0.42	0.24
氨基酸（mg/100 g）				
组氨酸	1.00~1.10	0.69~1.26	0.36~1.10	0.21~0.36
异亮氨酸	1.40~1.68	1.62~2.30	0.87~1.68	0.55~0.75
亮氨酸	2.90~3.09	2.01~3.99	1.35~2.02	0.96~1.31
赖氨酸	2.70~2.75	1.32~3.17	1.15~2.75	0.69~0.81
蛋氨酸	0.57~0.60	0.57~1.00	0.28~0.57	0.16~0.23
苯丙氨酸	1.51~1.60	1.51~1.77	0.68~1.51	0.42~0.57
苏氨酸	1.38~1.50	1.66~1.94	0.56~1.66	0.44~0.60
色氨酸	0.31~0.50	0.31~0.40	0.26~0.31	0.17~0.23
缬氨酸	1.60~2.02	1.35~2.56	1.02~2.02	0.55~0.78
丙氨酸	0.91~1.00	0.87~0.91	0.55~0.91	0.38~0.52
精氨酸	1.02~1.10	1.02~1.57	0.66~1.02	0.23~0.52
天冬氨酸	2.37~2.60	2.37~3.12	1.40~2.37	0.90~1.08
半胱氨酸	0.06~0.20	0.05~0.63	0.06~0.07	0.17~0.22
甘氨酸	0.56~0.60	0.52~0.69	0.19~0.56	0.23~0.34
谷氨酸	6.97~7.70	6.97~8.82	3.58~6.97	1.78~2.31
脯氨酸	2.91~3.20	2.91~4.41	1.38~2.91	0.80~1.12
丝氨酸	1.66~1.60	1.66~2.01	0.98~1.66	0.50~0.66
酪氨酸	1.25~1.50	1.25~1.54	0.58~1.25	0.52~0.61

中B族维生素的含量高于人奶，包括硫胺素、核黄素、烟酸、吡哆醇和叶酸，为新生儿和特殊饮食需求者具有较高的营养价值。驴奶中维生素C的含量（2~5.7 mg/100 mL）极高，是牛奶的4.75倍，而维生素D的含量也达到2.23 μg/100 mL，是牛奶的7倍多[5]。另外，驼奶和驴奶均含有丰富的生物活性成分，对增强免疫力和促进健康具有显著效果。驼奶中的免疫球蛋白具有抗菌和免疫增强作用，特别适合免疫力低下的人群。研究表明，驼奶中的蛋白质更易于被糜蛋白酶消化，产生大量潜在的生物活性肽[53]。而驴奶含有高含量的天然抗菌物质-溶菌酶，能有效降低疾病发生率，并延长生驴奶的保质期[52, 54, 55]。研究发现，使用经热处理保留溶菌酶的驴奶饲喂小鼠能够减缓慢性压力所致的肠道损伤[55, 56]。驴奶中的牛磺酸含量是牛奶和驼奶的3 倍，具有抗衰作用[57]。驴奶中还含有芋碱酸，具有养颜美白效果[58]。驴奶中低聚糖以硅氨酰化低聚糖，通过P38通路诱导肠道上皮细胞分化、促进细胞凋亡、抑制细胞增殖[59]。鲜驴奶具有抑制实体瘤和延长腹水瘤小鼠存活时间的作用[52, 60]。

总的来说，牛奶是营养丰富的天然食品，是日常饮食中钙和蛋白质的重要来源。驼奶则因其独特的营养成分，如高含量的不饱和脂肪酸和生物活性因子，特别适合免疫力低下或对牛奶过敏的人群。驴奶是天然低脂肪、低胆固醇，并富含高不饱和脂肪酸的食品，是心血管疾病和高血脂患者的首选乳饮。

2.2 驼奶、驴奶的产业化现状及应用

过去5年，我国小众乳正由“区域特产”向“功

中国乳业线上阅读

能食品”升级：驼乳已率先完成初级产业化——新疆、内蒙古两大优势区2024年泌乳骆驼约7 万峰，占全国泌乳群的70%以上，龙头公司通过“企业+合作社”模式控制80%奶源，2025年总加工能力突破5 万吨，产品矩阵涵盖UHT液态乳、冻干粉、酸奶、冰淇淋及含乳化妆品等种类，市场销售额由2020年104 亿元增至2025年预计200 亿元。食品安全地方标准《DBS 65/010—2023 生驼乳》《DBS 65/011—2023 巴氏杀菌驼乳》《DBS 65/012—2023灭菌驼乳》《DBS 65/013—2023 发酵驼乳》及《DBS 65/014—2023 驼乳粉》等标准已于2024年实施，对蛋白质、脂肪、复原乳酸度及微生物限量作出强制规定，并将维生素C列为附录A参考指标，为后续纳米抗体、生物活性肽等精深加工提供法规依据[69]。而驴乳仍处于科研–概念期——全国泌乳母驴约25 万头，年产鲜奶不足3 万吨，原奶价格60~100 元/kg；产品以冻干粉和手工皂为主，深加工乳酸菌饮料、低敏婴儿配方仍处中试；繁殖瓶颈突出，人工授精受胎率约40%。《T/TDSTIA 049—2025 生驴乳质量分级》《DBS 65/017—2023 生驴乳》《DBS 65/018—2023巴氏杀菌驴乳》《DBS 65/019—2023 驴乳粉》及《DBS 65/025—2023 调制驴乳粉》等标准对生驴乳及衍生产品的蛋白质、脂肪、微生物、污染物、分级术语、取样与检验方法作出了系统规定，但维生素C和体细胞分级等未给出明确规定[69]。综上，驼乳已跨过市场导入期，进入“规模化+高值化”双轮驱动；驴乳需先突破“乳用专门化品种”与“低成本扩繁”两大技术瓶颈，方具备真正产业化条件。

3 生物学特征影响及其生物适应机制

牛奶、驼奶、驴奶的营养成分存在一定差异，可能与其生物学适应性密切相关。奶是哺乳动物在生命初期赖以生存的关键物质[70]，不仅为新生的哺乳动物提供丰富的营养，有助于构建身体组织和维持生理功能，还为幼崽提供充足的能量，满足其快速生长和高代谢率的需求[70]。以及奶中特殊的营养组成和生物活性物质帮助幼崽适应环境，抵御疾病，增强免疫力。然而，奶中营养物质并非一成不变。品种、生存环境等多重因素的差异会导致奶的成分有所不同[71]。气候的变化同样会对奶中营养物质产生影响，炎热的气候可能会使奶中的某些成分发生改变，以适应高温环境对幼崽的需求[71]。

驼奶和驴奶在进化与适应机制方面有显著差异，这些差异主要体现在它们的生理特性和环境适应能力上。通过骆驼的基因组揭示其进化和对沙漠环境的适应性发现，骆驼科和牛科的分化时间为4 270万年前，与马科动物的分化更加久远（图1）。首次发现骆驼科动物出现在北美的晚中新世时期，骆驼科动物的扩展基因中在细胞部分、嗅觉受体活性、铁和免疫相关的基因类别中明显富集，这与其生存环境有着密不可分的关系[4]。骆驼，被称为“沙漠之舟”，具有极强的耐渴和耐高温能力，这归功于其独特的生理机制，例如能够储存大量水分，并且在缺水的情况下通过代谢脂肪来获取能量。骆驼的泌乳期较长，通常为9~18 个月，甚至可以达到24 个月。驼奶因脂肪球较小且含长链不饱和脂肪酸，口感浓郁且营养物质生物利用率更高[72~74]，能够长时间满足骆驼幼崽在极端环境的营养和能量需求，并且驼奶中富含免疫球蛋白，有助于增强免疫力[75]。这些特性使得骆驼能够在极端的沙漠环境中生存。

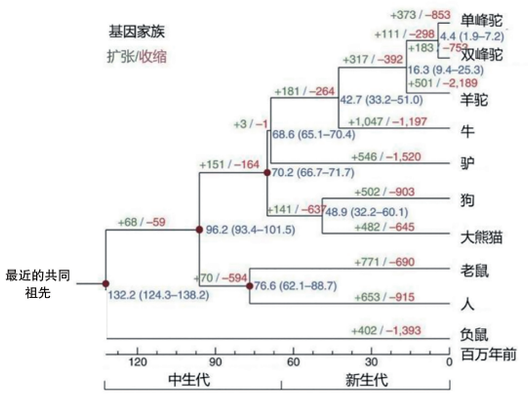


图 1 系统发育基因组学分析 [4]

研究发现，驴的祖先为非洲野驴，从炎热且食物稀少的非洲迁徙而来，并演化为单胃和盲肠发酵草食动物[6]。在这样的进化历程中，驴奶作为驴幼崽生长发育的关键营养来源，也逐渐形成了独特的营养成分以适应恶劣环境。驴奶的低脂肪含量和高乳糖含量，这可能有助于其在特定环境条件下保持较高的耐受性和适应性[76]。低脂肪含量可能有助于在食物资源相对匮乏时，减少对高脂肪食物的依赖，降低因脂肪摄入过多而带来的代谢负担。研究发现，驴奶中虽然脂肪含量低，但不饱和脂肪酸和必需脂肪酸（亚油酸和α－亚麻酸）占比较高。这些脂肪酸在维持细胞的正常结构和功能起着关键作用，能够促进神经系统的发育，确保幼崽的正常发育和成长[51，77]。高乳糖含量则可以提供相对稳定的能量来源，乳糖在体内的代谢过程相对缓慢，能够持续为驴幼崽提供能量，增强其在恶劣环境中的耐受性和适应性[78]。此外，驴奶中含有高浓度的溶菌酶、乳铁蛋白、乳过氧化物酶和硒等成分[79]。溶菌酶能够直接破坏细菌的细胞壁，从而抑制细菌的生长；乳铁蛋白可以结合铁离子，使细菌无法获得生长所需的铁元素，进而抑制细菌繁殖；硒则具有抗氧化作用，能够增强机体的免疫力，同时也可以与细菌结合，抑制其生长[80~82]。这些成分共同作用，提高了驴幼崽的抗病能力，使其在恶劣的环境中能够更好地生存和繁衍。

4 个内部节点上的红色点表示分析中使用的化石校准时间。每个进化谱系的估计分化时间以蓝色显示。括号中的蓝色数字是置信区间。

4 未来研究方向与挑战

牛奶、驼奶和驴奶等畜奶因其在营养成分上的生物学特异性、营养学特异性和功能特异性，及其与健康的紧密联系，成为了研究的热点。随着全球气候变化的加剧，温度升高或干旱等不利条件对乳畜的生产力和生理特性产生显著影响。乳畜在适应气候变化过程中产生的特征性物质，如抗热应激蛋白、抗氧化物质等，成为提高幼崽适应性和生产性能的新策略[83]。在进化的过程中，这些畜奶的特异性成分可能与动物所处环境和生存需求紧密相关。例如，驼奶中的高乳铁蛋白和脂肪可能帮助骆驼在沙漠环境中减少水分损失并提供足够的能量[83]。驴奶中的高溶菌酶含量可能与其较低的代谢率和耐热性有关，这些特征使得驴能在不利条件下生存。适应性特征的形成可能与动物在进化过程中对特定环境的适应有关，是同域哺乳动物适应进化的必然选择之一[84]。因此，深入探究这些畜奶在不同环境压力下的适应性进化机制，深入挖掘畜奶中的活性成分及其对幼崽生长发育的益处并应用具有重要的科学和实践意义。此外，开发利用畜奶特异性成分来改善人类健康和疾病治疗，以及研究通过遗传选择和饲养管理来提高畜奶的营养价值和产量，将成为未来的研究热点。

5 小结

牛奶、驼奶和驴奶各自具有独特的营养特性和健康效应。长期饮用这些乳制品可以在不同程度上促进健康，然而，个体差异和对乳制品的耐受性也应被考虑。对于过敏体质、糖尿病患者或婴儿，驼奶和驴奶可能是更安全的选择。了解每种奶的特性及其对身体的影响，对人们选择合适的饮食至关重要。并且，奶是哺乳动物幼崽生存的基本，深入探究畜奶在不同环境压力下的适应性进化机制，挖掘畜奶中的活性成分及其对幼崽生长发育的益处，具有重要的科学和实践意义。

参考文献

[1] Ho T M，Zou Z，Bansal N. Camel milk：A review of its nutritional value，heat stability，and potential food products[J]. Food Research International，2022，153：110870.

[2] Živkov Baloš M，Ljubojević Pelić D，Jakšić S，et al. Donkey milk：An overview of its chemical composition and main nutritional properties or human health benefit properties[J].

中国乳业线上阅读

Journal of Equine Veterinary Science，2023，121：104225.
[3] Zeng L，Liu H，Tu X，et al. Genomes reveal selective sweeps in kiang and donkey for high-altitude adaptation[J]. Zoological Research，2021，42（4）：450-460.
[4] Wu H，Guang X，Al-Fageeh M B，et al. Camelid genomes reveal evolution and adaptation to desert environments[J]. Nature Communications，2014，5（1）：5188.
[5] Aspri，Maria，Nicole Economou，et al. Donkey milk: An overview on functionality, technology, and future prospects[J]. Food Reviews International，2017，33（3）：316-333.
[6] Geiger M，Hovorka A. Donkeys in development：welfare assessments and knowledge mobilisation[J]. Development in Practice，2015，25（8）：1078.
[7] 王亚君，刘进，国建娜. 不同检测方法对牛奶中蛋白质含量的检测研究[J].中国饲料，2023（8）：86-89.
[8] 刘永峰，张薇，刘婷婷，等. 乳蛋白中乳清蛋白与酪蛋白组成、特性及应用的研究进展[J]. 食品工业科技，2020，41（23）：354-358.
[9] 韦升菊，梁贤威，卢雪芬，等. 水牛奶和乳牛奶常规乳成分及乳脂脂肪酸组成的初步比较研究[J]. 畜牧与兽医，2011，43（10）：41-43.
[10] Nicholl A，Deering K E，Evelegh K，et al. Whole-fat dairy products do not adversely affect adiposity or cardiometabolic risk factors in children in the Milky Way Study：a double-blind randomized controlled pilot study[J]. The American Journal of Clinical Nutrition，2021，114（6）：2025-2042.
[11] 武晶晶，牛巧红. 牛奶中的关键营养成分及其对健康的益处[J]. 健康必读，2024（9）：65-67.
[12] 丹妮. 粗饲料品质对奶牛乳脂脂肪酸组成的影响及其机理研究[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2018.
[13] 申丽娜，王海童，罗雪路，等. 牛奶中脂肪酸与常规营养成分含量的影响因素分析[J]. 中国奶牛，2021（2）：45-51.
[14] 顾小卫，赵国琦，郭鹏，等. 牛奶风味影响因素的研究进展[J]. 乳业科学与技术，2010，33（2）：95-98.
[15] Amores G，Virto M. Total and free fatty acids analysis in milk and dairy fat[J]. Separations，2019，6（1）：14.
[16] 李亚如，许佳翠，蔡耀荣，等.牛奶中乳糖含量的测定[J]. 当代化工，2017，46（5）：1014-1016.
[17] Misselwitz B，Pohl D，Fr ü hauf H，et al. Lactose malabsorption and intolerance：pathogenesis，diagnosis and treatment[J]. United European Gastroenterology Journal，2013，1（3）：151-159.
[18] Gaucheron F. Milk Minerals，Trace Elements，and Macroelements[M]//2013：172-199.
[19] Caroli A，Poli A，Ricotta D，et al. Invited review：Dairy intake and bone health：A viewpoint from the state of the art[J]. Journal of Dairy Science，2011，94（11）：5249-5262.
[20] 孔凡华，杨彦荣，徐卓阳，等.液态乳制品中维生素和矿物质成分分析和比较研究[J]. 中国食物与营养，2023，29（9）：50-55.
[21] Hill T R. Vitamins and minerals in milk：levels and effects of dairy processing[M]//McSweeney P L H，O'Mahony J A，Kelly A L. Advanced Dairy Chemistry：Volume 3：Lactose，Water，Salts and Minor Constituents. Cham：Springer International Publishing，2022：417-455.
[22] Soliman G A. Comparison of chemical and mineral content of milk from human，cow，buffalo，camel and goat in egypt[J]. The Egyptian Journal of Hospital Medicine，2005，21：116-130.
[23] 照日格图，乌尼蒙和，汪治同. 骆驼奶营养成分的测定[J]. 中国畜牧业，2016（7）：51-52.
[24] Seifu E. Recent advances on camel milk：Nutritional and health benefits and processing implications—A review[J]. AIMS Agriculture and Food，2022，7（4）：777-804.
[25] Vincenzetti S，Cammertoni N，Rapaccetti R，et al. Nutraceutical and functional properties of camelids' milk[J]. Beverages，2022，8（1）：12.
[26] 明亮，李雅菲，吕浩迪，等. 不同泌乳期驼乳化学组成及蛋白质组学[J]. 食品科学，2024，45（12）：205-211.
[27] 徐敏，陆东林，罗晓红，等. 新疆双峰驼驼乳化学组成分析：第五届中国奶业大会[C]，中国陕西西安，2014.
[28] Alhaj O A，Altooq N J，Alenezi A F，et al. Camel milk composition by breed，season，publication year，and country：A global systematic review，meta-analysis，and meta-regression[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2022，21（3）：2520-2559.
[29] Shori A B. Camel milk as a potential therapy for controlling diabetes and its complications：A review of in vivo studies[J]. Journal of Food and Drug Analysis，2015，23（4）：609-618.
[30] Shori A B. Camel milk as a potential therapy for controlling diabetes and its complications：A review of in vivo studies[J]. Journal of Food and Drug Analysis，2015，23（4）：609-618.
[31] Fufa D D，Haile A A. Quality and therapeutic aspect of camel milk：A review paper[J]. Journal of Current Research in Food Science，2020，1（1）：37-45.
[32] 斯钦刘颖巴图. 驼奶中氨基酸和人体必需微量金属元素的测定[J]. 宁夏大学学报（自然科学版），1999（1）：67-68.
[33] Benmeziane-Derradji F. Evaluation of camel milk：gross composition-a scientific overview[J]. Tropical animal health and production，2021，53（2）：308.
[34] 陈建兴，叶贵芬，邓林霞，等. 驴奶的主要成分和价值及其

中国乳业线上阅读

在化妆品方面的应用研究进展[J]. 畜牧与饲料科学，2021，42（5）：85–89.

[35] Li Y，Ma Q，Liu G，et al. Effects of donkey milk on oxidative stress and inflammatory response[J]. Journal of Food Biochemistry，2022，46（4）：e13935.

[36] 张岩春，尤娟，罗永康，驴乳蛋白质组成及其与人乳和牛乳的比较[J]. 中国乳业，2008（9）：50–51.

[37] Vincenzetti S，Polidori P，Mariani P，et al. Donkey's milk protein fractions characterization[J]. Food Chemistry，2008，106（2）：640–649.

[38] 王帅，陈贺，康露，等. 驴乳的特色化学组分和营养价值[J]. 新疆畜牧业，2017（7）：22–23.

[39] 陆东林，张丹凤，刘朋龙，等. 驴乳的营养价值和开发利用[J]. 乳业科学与技术，2006（6）：267–268.

[40] Johel Galo Salgado M，Rocha Silva A，Oliveira De Souza C，et al. Days in milk alters the milk fatty acid profile of grazing donkeys：A preliminary study[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition，2021，105（6）：1173–1178.

[41] Li L，Liu X，Guo H. The nutritional ingredients and antioxidant activity of donkey milk and donkey milk powder[J]. Food Sci Biotechnol，2018，27（2）：393–400.

[42] Martini M，Altomonte I，Tric ò D，et al. Current Knowledge on Functionality and Potential Therapeutic Uses of Donkey Milk[J]. Animals，2021，11（5）：1382.

[43] Vincenzetti S，Santini G，Polzonetti V，et al. Vitamins in Human and Donkey Milk：Functional and Nutritional Role[J]. Nutrients，2021，13（5）：1509.

[44] 黄一凡，郭尚伟，段小波，等. 基于ICP–MS对驴奶中无机元素分布特征的相关性分析和主成分分析[J]. 中国乳品工业，2016，44（11）：12–16.

[45] 岳如玉. 牛乳乳清蛋白差异蛋白质组学的研究[D]. 大连：大连海洋大学，2024.

[46] Seligsohn D，Nyman A，Younan M，et al. Subclinical mastitis in pastoralist dairy camel herds in Isiolo，Kenya：Prevalence，risk factors，and antimicrobial susceptibility[J]. Journal of Dairy Science，2020，103（5）：4717–4731.

[47] Cimmino F，Catapano A，Villano I，et al. Invited review：Human，cow，and donkey milk comparison：Focus on metabolic effects[J]. Journal of Dairy Science，2023，106（5）：3072–3085.

[48] G ó mez–Cort é s P，Ju á rez M，de la Fuente M A. Milk fatty acids and potential health benefits：An updated vision[J]. Trends in Food Science & Technology，2018，81：1–9.

[49] Lionetti L，Cavaliere G，Bergamo P，et al. Diet supplementation with donkey milk upregulates liver mitochondrial uncoupling，reduces energy efficiency and improves antioxidant and antiinflammatory defences in rats[J]. Molecular Nutrition & Food Research，2012，56（10）：1596–1600.

[50] Massouras T，Triantaphyllopoulos K A，Theodossiou I. Chemical composition，protein fraction and fatty acid profile of donkey milk during lactation[J]. International Dairy Journal，2017，75：83–90.

[51] Martini M，Altomonte I，Salari F. Amiata donkeys：fat globule characteristics，milk gross composition and fatty acids[J]. Italian Journal of Animal Science，2014，13（1）：3118.

[52] 马龙，苏德奇，姬凤彩，等. 鲜驴奶的保健功效研究[J]. 食品科学，2008（5）：423–426.

[53] 伍佰鑫，龙云，罗阳，等. 骆驼乳蛋白肽抗氧化应激研究[J]. 中国乳业，2019（4）：93–95.

[54] Guo H Y，Pang K，Zhang X Y，et al. Composition，Physiochemical properties，nitrogen fraction distribution，and amino acid profile of donkey milk[J]. Journal of Dairy Science，2007，90（4）：1635–1643.

[55] Yvon S，Schwebel L，Belahcen L，et al. Effects of thermized donkey milk with lysozyme activity on altered gut barrier in mice exposed to water–avoidance stress[J]. Journal of Dairy Science，2019，102（9）：7697–7706.

[56] Giacometti F，Bardasi L，Merialdi G，et al. Shelf life of donkey milk subjected to different treatment and storage conditions[J]. Journal of Dairy Science，2016，99（6）：4291–4299.

[57] Meena S，Meena G S，Gautam P B，et al. A comprehensive review on donkey milk and its products：Composition，functionality and processing aspects[J]. Food Chemistry Advances，2024，4：100647.

[58] Li A，He H，Chen Y，et al. Effects of donkey milk on UVB–induced skin barrier damage and melanin pigmentation：A network pharmacology and experimental validation study[J]. Frontiers in Nutrition，2023，10（9）：112198.

[59] Wang J，Lei B，Yan J，et al. Donkey milk oligosaccharides influence the growth–related characteristics of intestinal cells and induce G2/M growth arrest via the p38 pathway in HT–29 cells[J]. Food & Function，2019，10（8）：4823–4833.

[60] 翟宝菊，肖辉，李莉. 鲜驴奶体内抑瘤作用的实验研究[J]. 新疆医科大学学报，2011，34（3）：274–278.

[61] 褚楚，张依，向世馨，等.山羊奶、牦牛奶、马奶和驼奶中营养成分含量的比较研究[J].中国奶牛，2022（3）：34–39.

[62] 揭良，苏米亚. 小品种特色乳营养成分研究进展[J]. 乳业科学与技术，2021，44（6）：58–62.

[63] Zou X，Huang J，Jin Q，et al. Lipid composition analysis of milk fats from different mammalian species：potential for use

中国乳业线上阅读

as human milk fat substitutes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2013，61（29）：7070–7080.

[64] 冯梦雅，崔莉，刘健康，等. 骆驼乳的营养价值及在预防疾病中的应用与作用机制研究进展[J]. 食品科学，2022，43（11）：392–401.

[65] 李墨翰，刘爱成，赵闪闪，等. 驴乳营养成分研究进展[J]. 乳业科学与技术，2022，45（6）：42–49.

[66] Bordonaro S，Dimauro C，Criscione A，et al. The mathematical modeling of the lactation curve for dairy traits of the donkey (Equus asinus) [J]. Journal of Dairy Science，2013，96（6）：4005–4014.

[67] Malacarne M，Criscione A，Franceschi P，et al. New Insights into Chemical and Mineral Composition of Donkey Milk throughout Nine Months of Lactation[J]. Animals（Basel），2019，9（12）：1161.

[68] Ballard O，Morrow A L. Human Milk Composition：Nutrients and Bioactive Factors[J]. Pediatric Clinics of North America，2013，60（1）：49–74.

[69] 关于发布《食品安全地方标准生驼乳》（DBS65 010–2017）等10项食品安全地方标准的公告[J].新疆畜牧业，2017，32（8）：10–27.

[70] 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

[71] 张一涵，余诗强，蒋林树，等.影响奶牛乳成分因素的研究进展[J].中国乳业，2021（12）：53–62.

[72] Meena S，Rajput Y S，Sharma R. Comparative fat digestibility of goat，camel，cow and buffalo milk[J]. International Dairy Journal，2014，35（2）：153–156.

[73] 赵晓璇. 驼乳营养组及热加工对产品品质影响的研究[D]. 北京：中国农业科学院，2023.

[74] Hailu Y，Hansen E B，Seifu E，et al. Functional and technological properties of camel milk proteins：a review[J]. Journal of Dairy Research，2016，83（4）：422–429.

[75] Idrees E，Ishag I，Eisa M O. Factors affecting chemical properties of camel milk[J]. Scientia Agriculturae，2016，16（2）：49–53.

[76] Innocente N，Parpinel M，Rinaldi A，et al. Composition and nutritional value of donkey milk[M]//nuñez m，de renobales m. special issue of the international dairy federation idf international symposium on sheep，goat and other non–cow milk，2020.

[77] Ren W，Sun M，Shi X，et al. Effects of roughage on the lipid and volatile–organic–compound profiles of donkey milk[J]. Foods，2023，12（11）：2231.

[78] Jones H F，Butler R N，Moore D J，et al. Developmental changes and fructose absorption in children：effect on malabsorption testing and dietary management[J]. Nutrition Reviews，2013，71（5）：300–309.

[79] Massouras T，Bitsi N，Paramithiotis S，et al. Microbial profile antibacterial properties and chemical composition of raw donkey milk[J]. Animals，2020，10（11）：2001.

[80] Zhang X Y，Zhao L，Jiang L，et al. The antimicrobial activity of donkey milk and its microflora changes during storage[J]. Food Control，2008，19（12）：1191–1195.

[81] Min S，Harris L J，Krochta J M. Antimicrobial effects of lactoferrin，lysozyme，and the lactoperoxidase system and edible whey protein films incorporating the lactoperoxidase system against salmonella enterica and escherichia coli O157：H7[J]. Journal of Food Science，2005，70（7）：m332–m338.

[82] Yao Y，Chen Z，Zhang H，et al. Selenium–GPX4 axis protects follicular helper T cells from ferroptosis[J]. Nature Immunology，2021，22（9）：1127–1139.

[83] 李超颖，张娟，卿德刚，等.骆驼乳营养成分及生物活性研究进展[J].食品工业科技，2014，35（23）：387–391，396.

[84] Olson–Manning C F，Wagner M R，Mitchell–Olds T. Adaptive evolution：evaluating empirical support for theoretical predictions[J]. Nature Reviews Genetics，2012，13（12）：867–877.

Research Progress on the Nutritional Characteristics and Adaptive Evolution of Milk，Camel Milk，and Donkey Milk

REN Wei，MENG Lu，WANG Jiaqi，ZHENG Nan*

Ministry of Agriculture and Rural Affairs –Key Laboratory of Quality & Safety Control for Milk and Dairy Products，Ministry of Agriculture and Rural Affairs –Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Dairy Products，Beijing 100193

中国乳业线上阅读

Abstract：As the significance of dairy diversity and nutritive value garners increased attention，research into bovine milk，camel milk，and donkey milk has progressed with depth. The nutritional profile and characteristic constituents of dairy products are pivotal metrics for dairy quality assessment. This comprehensive review elucidated the distinct nutritional attributes and health implications of bovine milk，camel milk，and donkey milk，examining the proteins，lipids，mineral and vitamin compositions，and bioactive components. Furthermore，it explored the nexus between the characteristic constituents of milk，mechanisms of biological evolution，environmental adaptability，and their potential beneficial effects on the growth and development of offspring. This investigation furnished the dairy sector with novel theoretical insights and holds substantial significance for the innovation of dairy products with enhanced nutritional and functional profiles.

Keywords：milk；nutritional composition；characteristic constituents；adaptive evolution

▲上接70页

Abstract：[Objective] To address the loss of heat-sensitive active components during dairy processing，a "Native Temperature-controlled Active Freshness-locking Technology" was developed to maximize the retention of active ingredients in dairy products.[Method] A comparative analysis was conducted between conventional processing（80 °C pasteurization + 90 °C concentration） and the Native Temperature-controlled Active Freshness-locking Technology （72 °C pasteurization +75 °C concentration）. The changes in active components，including immunoglobulins，α-lactalbumin，β-lactoglobulin，lactoferrin，β-casein，lactoperoxidase，and alkaline phosphatase，were systematically evaluated.[Result] The new technology significantly improved the retention of lactoferrin and immunoglobulins. The content of both components in pasteurized milk was 1.38 times higher than that in conventional processing，while the immunoglobulin content in milk powder reached three times that of conventional processing. The retention rate of lactoferrin was approximately 35%，and lactoperoxidase retention in milk powder was about 5%. The alkaline phosphatase activity met the high-quality milk standard （≤350 mU/L）. The contents of α-lactalbumin，β-lactoglobulin，and β-casein were unaffected by the processing technology.[Conclusion] The Native Temperature-controlled Active Freshness-locking Technology effectively preserves heat-sensitive active components while meeting food safety requirements，providing a feasible technical approach for the production of high-activity dairy products.

Keywords：Native Temperature-controlled Active Freshness-locking Technology；active components；immunoglobulin；lactoferrin；lactoperoxidase；China Excellent Milk Project

中国乳业线上阅读