

驴乳与其他乳营养物质组分差异分析及其开发展望

佟满满 闫素梅*

(内蒙古农业大学 动科学院/动物营养与饲料科学自治区高等学校重点实验室,呼和浩特 010018)

摘要 为比较驴乳与马乳、人乳、牛乳及羊乳营养物质组分差异,并了解驴乳目前的开发现状,本研究整理了相关文献并进行总结分析。结果表明:1)驴乳与人乳最接近。相对于牛乳和羊乳,驴乳具有高乳糖、低乳蛋白、低乳脂、钙磷比平衡、V_C和V_D丰富的特点。溶菌酶含量高是驴乳最大的特点。驴乳中乳清蛋白比例高,且富含对人体有益的n3-PUFA与n6-PUFA。驴乳与马乳较为相近,最大差异在于驴乳蛋白质含量更低,更接近于人乳。而与人乳相比,驴乳最大的不同则在于其更低的乳脂含量。2)驴乳具有抗菌、抗炎、抗氧化、抗肿瘤、防治心血管疾病等生物活性,同时具备良好的加工特性,在各国各民族历史中广泛使用,在民间医用盛行,具有广阔的应用价值和市场潜力。然而,驴乳开发在技术、规模、市场上仍有许多不足,有广泛的发展空间。实现产业规模化,扩大饲养量,提高泌乳量以及尽早地建立健全行业标准是实现驴乳市场潜力需要考虑和解决的问题。综上,驴乳具有很高的营养价值且生物活性丰富,其市场潜力巨大然而发展相对滞后,其研究、开发与推广有待加强。

关键词 驴乳; 营养成分; 生物活性; 开发前景

中图分类号 S822

文章编号 1007-4333(2022)11-0117-13

文献标志码 A

Differences analysis of the nutritional components between donkey milk and other milk and its development prospect

TONG Manman, YAN Sumei*

(Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region,
College of Animal Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract In order to compare the differences in the nutrient composition characteristics of donkey milk, horse milk, human milk, cow milk and goat milk, and understand the current development status of donkey milk, this paper collated relevant literature and made a summary and analysis. The results show that: 1) Donkey milk is the closest to human milk. Compared with cow and goat milk, donkey milk has the characteristics of high lactose, low protein, low fat, balanced calcium to phosphorus ratio, rich VC and VD. High lysozyme content is the greatest feature of donkey milk. Donkey milk has a high proportion of whey protein and it is rich in n3-PUFA and n6-PUFA, which are beneficial to the human body. Donkey milk is similar to horse milk, however, donkey milk has lower protein content and is closer to human milk. Compared with human milk, donkey milk has a lower fat content. 2) Donkey milk has biological activities such as antibacterial, anti-inflammatory, antioxidant, anti-tumor, prevention and treatment of cardiovascular diseases, etc. At the same time, it has good processing characteristics and is widely used in the history of various countries. Donkey milk has broad application value and market potential. However, there are still deficiencies in the technology, scale and market of donkey milk development, and there is a wide space for development. Realizing the scale of the industry, expanding the feeding volume, increasing the milk production and establishing and improving the industry standards as soon as possible are the problems that need to be considered and solved to realize the potential of the

收稿日期: 2021-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160794)

第一作者: 佟满满, 博士研究生, E-mail: nndtmm@163.com

通讯作者: 闫素梅, 教授, 主要从事草食动物营养与免疫研究, E-mail: yansmimau@163.com

donkey milk market. To sum up, donkey milk has high nutritional value and rich biological activity. Its market potential is huge but its development is relatively lagging behind, and its research, development and promotion need to be strengthened.

Keywords donkey milk; nutritional components; biological activity; development prospects

随着社会经济的发展和人们生活水平的提高,国民饮食结构发生了很大的变化,在营养保健方面的要求也越来越高。在乳制品领域,人们不仅满足于常规的牛乳,而开始对羊乳、马乳和驴乳等高营养价值的特色乳更加关注。特色乳数量虽少,却日益成为我国乳类的重要组成部分。作为特色乳类之一,驴乳与人乳最接近,具有诸多保健功效。目前驴乳的产地主要集中在山东、新疆、内蒙古、甘肃和辽宁等,但受驴乳产量和市场接受度的影响,产业发展比较缓慢,同时,驴乳的营养特点和价值并未广泛被消费者了解和认可。

在国内外的历史记载中,驴乳具有很好的保健和药用价值。《本草纲目》记载,“驴乳,冷利、无毒,热频饮之可治气郁,解小儿热毒,不生豆疹”^[1];维吾尔族和蒙古族等少数民族医学中,有用驴乳治疗结核病、肝硬化、胃溃疡、百日咳等疾病的记载^[1]。在希腊的传统中,当母乳不足时,通常用驴乳喂养婴儿,也用其治疗婴幼儿咳嗽^[2]。在意大利,驴乳被认为具有保持年轻和治疗疾病的作用^[3]。

近现代的科学研究表明,驴乳具有抗菌^[4]、抗肿瘤^[5]与抗癌^[6]、抗氧化^[7]、免疫调节^[8]和致敏性低^[9]等生物活性。Lu等^[10]研究表明,驴乳粉对乳清蛋白诱导的小鼠哮喘有预防作用。Kocic等^[11]发现驴乳可下调小鼠的皮肤成纤维细胞中NF- κ B p65的表达,缓解炎症反应,其抗炎活性的物质基础可能是驴乳非酪蛋白生物活性肽。Li等^[12]研究表明,驴乳在II型糖尿病的治疗中有重要作用,其可以提高受损胰岛 β 细胞的生存能力,但不会刺激其胰岛素的分泌,同时也可作用于生糖途径以减少葡萄糖的生成。

然而,尽管驴乳在历史上有较好的使用传统,在疾病治疗方面也显示出一定潜力,但目前对驴乳的研究仍然有限,驴乳详细成分和其相较于其他乳的特点鲜见报道,人们对驴乳缺乏充分而深入的认识。驴乳在传统记载和现代研究中展现出广泛的生物活性,这与其组成成分必然密不可分,其与其他乳在成分上的差异值得研究与探讨。鉴于此,本研究主要针对驴乳的营养成分组成特点进行概述,并与其他

动物的乳进行比较和分析,以期加深人们对驴乳营养成分特点和生物活性的了解,促进驴乳市场的拓展,并为驴乳的进一步研究和开发提供参考。

1 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中的常规营养成分差异分析

驴的妊娠期一般为360 d,泌乳期为150~270 d,整个泌乳期的挤奶量约为250~450 kg^[13],其泌乳量的高低和营养成分的含量受品种、营养、泌乳阶段、环境条件等因素的影响。驴乳为白色、稀薄、带有些许乳香味和甜味的液体,pH为7.14~7.22^[14],高于牛乳;密度为1.025~1.029 g/mL,与牛乳相近^[15]。驴乳主要由水、蛋白质、脂肪、乳糖、矿物质、维生素等成分组成,其组成与牛乳、羊乳差异较大,而与马乳、人乳更为接近(表1)。

初乳中干物质、蛋白质、脂肪、钙、镁和维生素含量远高于常乳,而乳糖较低于常乳^[18];本课题组前期研究表明,产后不同时间对驴乳营养成分有显著的影响,驴初乳中钙、钾、镁、磷、铁、锌等矿物元素含量显著高于常乳^[19];产后2 h的驴初乳中干物质、蛋白质、脂肪及17种单一氨基酸的含量最高,产后6~12 h呈快速下降,之后趋于平缓^[20]。

相对于反刍动物和人,驴乳的水分含量比较高,干物质含量低,为8.8%~11.7%^[16],与马乳相近。乳糖含量高是驴乳的特点之一。驴乳中乳糖的含量5.8~7.4 g/100 mL,与马乳、人乳相近,远高于牛、羊乳^[16]。乳糖是葡萄糖的重要来源,是重要的能量供给,也是早期发育所必需物质。驴乳乳糖含量高,不仅可以适当提高其风味和适口性,还有利于刺激肠道内钙和磷的吸收,促进骨骼中矿物质的积累,预防骨质疏松^[21]。乳糖也是肠道有益微生物生长繁殖的良好底物,有利于维持肠道内微生物区系的稳定^[8]。因此,驴乳尤其适合老人和孩子食用。驴乳蛋白质含量约为1.2~2.0 g/100 mL,接近人乳和马乳,远低于牛、羊乳^[2,16]。驴乳和人乳中较低的蛋白质水平,相对于其他动物乳,带给肾脏的代谢压力较小^[3],同时,驴乳蛋白质水平与人乳相近,使其更适合婴幼儿饮用。

表 1 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳的营养成分及含量

Table 1 Composition and content of donkey, horse, human, cow and goat milk

项目 Item	驴乳 ^[2,14,16] Donkey milk	马乳 ^[14,16] Horse milk	人乳 ^[14,16] Human milk	牛乳 ^[14,16] Cow milk	羊乳 ^[16-17] Goat milk
水分/% Water	88~92	88~91	87~89	87~88	84~88
干物质/% Dry matter	8.8~11.7	9.3~11.6	10.7~12.9	12.5~13.0	11.9~16.3
蛋白质/% Protein	1.2~2.0	1.4~3.2	0.9~1.9	3.0~3.9	3.0~5.2
脂肪/% Fat	0.3~1.8	0.3~4.2	2.1~4.0	3.3~5.4	3.2~5.0
乳糖/% Lactose	5.8~7.4	5.6~7.2	6.3~7.0	4.4~5.6	3.2~5.0
灰分/% Ash	0.3~0.5	0.3~0.5	0.2~0.3	0.7~0.8	0.7~0.9
总能/(kJ/L) Gross energy	1 607~1 803	1 936~2 050	2 843	2 709~2 843	2 802~2 894
pH	7.1~7.2	7.2	7.0~7.5	6.6~6.8	6.4~6.8

2 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中的蛋白质差异分析

2.1 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中乳蛋白组分差异分析

乳蛋白主要有 3 种,分别是酪蛋白、乳清蛋白和

乳脂球膜蛋白。由表 2 可知,与牛乳和羊乳相比,驴乳的总蛋白含量,酪蛋白含量低、乳清蛋白含量高,驴乳中清蛋白占总蛋白的比例高达 50%~65%,是典型的清蛋白乳,与马乳和人乳接近;牛乳和羊乳是典型的酪蛋白乳,酪蛋白占总蛋白的比例达 80%左右,乳清蛋白仅占 20%左右。

表 2 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中蛋白质的含量

Table 2 Protein fractions and content of donkey, horse, human, cow and goat milk

项目 Item	驴乳 ^[2-3,16,22] Donkey milk	马乳 ^[3,16] Horse milk	人乳 ^[3,16] Human milk	牛乳 ^[3,16] Cow milk	羊乳 ^[3,16] Goat milk
总蛋白/(g/100 mL) Total protein	1.2~2.0	1.4~3.2	0.9~1.9	3.0~3.9	3.0~5.2
酪蛋白/(g/100 mL) Casein	0.64~1.03	0.94~1.36	0.24~0.42	2.46~2.80	2.33~4.63
乳清蛋白/(g/100 mL) Whey protein	0.49~0.80	0.74~0.91	0.62~0.83	0.55~0.70	0.37~0.70
非蛋白氮/(g/100 mL) Nonprotein nitrogen	0.046	0.038	0.045	0.027~0.038	0.040~0.061
酪蛋白/总蛋白 Casein/Total protein	0.35~0.50	0.35~0.50	0.35	0.8	0.8
乳清蛋白/总蛋白 Whey/Total protein	0.50~0.65	0.50~0.65	0.65	0.2	0.2
酪蛋白/乳清蛋白 Casein/Whey protein	1.3	1.1	0.4~0.5	4.7	3.5
酪蛋白胶束大小/nm Casein micel	100~330	255	64~80	150~182	260

乳清蛋白乳进入婴幼儿肠道之后形成软凝乳,而酪蛋白乳则形成硬凝乳,软凝乳比硬凝乳更易于消化和吸收。此外,牛乳中含有 20 多种致敏性蛋白,0.5%~3.5%的五岁以下的儿童对牛乳蛋白过敏^[23]。其中牛乳酪蛋白的含量和组成是牛乳蛋白过敏症(CMPA)产生的主要原因之一。研究表明,相对于牛乳,驴乳中酪蛋白不仅含量更低,酪蛋白/乳清蛋白与人乳更接近,而且与人具有更高的同源

性,其一级结构与人乳酪蛋白更为相近,因此婴幼儿对驴乳有非常好的耐受性^[24]。良好的消化吸收特性和低致敏性,可能是世界范围内都有使用驴乳喂养婴儿的记载和传统的原因之一。

2.2 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中乳清蛋白组分差异分析与其生物学活性

乳清蛋白与乳的生物学活性密切相关。乳清蛋白包括 β -乳球蛋白(β -Lg)、 α -乳白蛋白(α -La)、

Lyz、免疫球蛋白(Ig)、血清白蛋白(SA)、乳铁蛋白(Lf)和一些低丰度蛋白质(包括酶、酶抑制剂、金属结合蛋白等)。表3分别用各种乳清蛋白在全

乳中的含量、在乳清蛋白和乳蛋白中的百分比表示了驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中乳清蛋白组分差异。

表3 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳各乳清蛋白组分含量

Table 3 Whey protein fractions and content of donkey, horse, human, cow and goat milk

乳清蛋白组分 Whey protein fractions	驴 ^[4,16,25-27] Donkey	马 ^[4,16,27] Horse	人 ^[4,16,25,27] Human	牛 ^[4,16,25,27] Cow	羊 ^[4,16,28] Goat
乳清蛋白组分含量(占全乳)/(g/100 mL) Whey protein fractions (of milk)					
β-乳球蛋白 β-Lg	0.33	0.26		0.32~0.33	0.15~0.50
α-乳白蛋白 α-La	0.19	0.24	0.19~0.34	0.12~0.13	0.07~0.23
免疫球蛋白 Igs	0.13	0.16	0.10~0.13	0.05~0.10	0.10
血清白蛋白 SA	0.04	0.037	0.04~0.05	0.03~0.04	0.05
乳铁蛋白 Lf	0.007~0.037	0.01~0.20	0.15~0.20	0.002~0.05	0.002~0.02
溶菌酶 Lyz	0.10~0.37	0.05~0.13	0.01~0.09	微量	微量
乳清蛋白组成(占总乳清蛋白)/% Whey protein profile (of total whey protein)					
β-乳球蛋白 β-Lg	29.8	30.7		50.8	54
α-乳白蛋白 α-La	22.6	28.5	40.3	19	23.1
免疫球蛋白 Igs	11.5	19.6	15.5	12.7	15.4
血清白蛋白 SA	6.2	4.4	7.7	6.3	7.7
乳铁蛋白 Lf	4.5	7	26.6	1.6	1.5
溶菌酶 Lyz	21	10.5	5.5	微量	微量
乳清蛋白组成(占乳蛋白)/% Whey protein profile (of milk protein)					
β-乳球蛋白 β-Lg	14.9~19.4	15.4~20.0		10.2	10.8
α-乳白蛋白 α-La	11.3~14.7	14.3~18.5	26.2	3.8	4.6
免疫球蛋白 Igs	5.8~7.5	9.8~12.7	10.1	2.5	3.1
血清白蛋白 SA	3.1~4.0	2.2~2.9	5	1.3	1.5
乳铁蛋白 Lf	2.3~2.9	3.5~4.6	17.3	0.3	0.3
溶菌酶 Lyz	10.5~13.7	5.3~6.8	3.6	微量	微量

驴乳中的β-Lg分为2种类型,是马属动物的独特特征,β-Lg I(80%)和β-Lg II(20%),分子量约18 ku。驴乳中β-Lg的含量为0.33 g/100 mL,和马乳、牛乳相近,而人乳中不存在β-Lg^[16]。β-Lg是牛、羊乳中的主要乳清蛋白,含量在50%(占乳清蛋白)左右,牛乳中的β-Lg是也导致CMPA的原因之一;而驴乳乳清中β-Lg比例则低于30%^[24]。此外,Tidona等^[18]通过体外试验研究发现,驴乳中的β-Lg更容易被人的胃和十二指肠降解,其降解率为70%,是牛乳的两倍以上。而β-Lg在肠道内降解衍

生出的活性肽具有潜在的抗菌活性。

驴乳中α-La含量为0.19 mg/100 mL,略低于人乳和马乳,高于牛、羊乳。这几种乳的α-La均由123个氨基酸残基组成,分子量约为14 ku,且在结构呈现高度的相似性。此外,α-La与C型Lyz有着惊人的氨基酸序列同源性^[29]。α-La是乳中必需氨基酸的主要来源,也与乳腺中乳糖的合成及乳汁分泌密切相关。α-La是一种钙结合蛋白,也可结合少量铁和锌,因而它对钙、铁、锌的吸收有一定的刺激和改善作用^[30]。在两步法体外测试中,95%的驴乳

α -La 经过胃和十二指肠酶未被消化^[22], 它可以相对完整地到达肠道, 刺激黏膜并调整免疫能力, 这与已报道的马、人和牛的乳一样。 α -La 经过胃肠道消化时形成的一些多肽片段, 已被证明具有抗菌和免疫刺激作用^[30], 此外, 其消化产生的某些肽也已被证明可以促进婴儿肠道内双歧杆菌的增殖^[30]。

驴乳中 Lyz 的含量非常高, 约为 0.10 ~ 0.37 mg/100 mL, 高于马乳, 是人乳的 8~10 倍, 而反刍动物乳中 Lyz 只微量存在^[16,26]。Lyz 是一种糖苷水解酶, 能催化细菌细胞壁粘多糖的糖苷键水解, 可抑制多种细菌, 尤其是革兰氏阳性菌, 并具有一定的抗病毒、抗寄生虫和抗真菌的能力^[31]。Huang 等^[32]利用可以高表达人乳 Lyz 的转基因母猪进行试验, 将 60 头非转基因健康仔猪分别分配到对照组和转基因组两组母猪进行哺乳, 而后将每头母猪所带的半数仔猪灌注大肠杆菌, 结果发现, 人乳 Lyz 可以改善仔猪的肠道性能, 提高其对细菌感染的抵抗力, 并有效防治腹泻。驴乳中微生物含量和体细胞数很低, 这与其高浓度的 Lyz 密不可分, 同时其他活性成分, 如 Lf、Igs 和乳过氧化物酶等也发挥了很好的协同作用^[26]。此外, Lyz 具有一定的抗肿瘤的作用^[33]。驴乳中 Lyz 的活性为 4 000~5 000 U/mL^[3]。Tidona 等^[22]研究表明, Lyz 对人类胃肠道酸性环境和消化酶具有很好的抗性, 经过体外模拟的胃和十二指肠后, 仍有 95% 左右不被消化, Martini 等^[26]的研究表明, 驴乳中 Lyz 的活性经过巴氏灭菌后几乎不受影响, 这些都对延长驴乳货架期以及保留其生物活性颇有意义。

驴乳中 Lf 的质量浓度为 0.007~0.037 g/100 mL, 低于马乳和人乳, 高于牛、羊乳^[3]。Lf 是人乳蛋白中的重要组成成分, 比例高达 17.3%, 尽管驴乳蛋白中 Lf 的比例(2.3%~2.9%)低于人乳, 但其仍是牛、羊乳的 10 倍左右。Lf 是一种铁结合蛋白, 具有调节铁稳态和细胞生长, 抗菌和抗病毒以及抑制癌症发展等作用^[4]。革兰氏阳性菌对 Lyz 更敏感, Lf 的存在则可协同 Lyz 加强防御革兰氏阴性菌感染^[32]。Zavaleta 等^[35]研究发现口服复合重组人 Lyz 和 Lf 可以显著减少急性腹泻住院儿童持续腹泻的时间及复发的比例。Lf 对多种革兰氏阴性病原体的抗菌活性的机制可能为 Lf 可创造缺铁环境进而限制微生物的生长, 以及通过与脂多糖氨基端的结合进而影响细菌细胞壁的渗透性, 以便 Lyz 进入细胞内发挥作用^[4]。与 Lyz 不同, 驴乳中的 Lf 很

容易被人的胃和十二指肠消化^[22], 但分解后产生的乳铁蛋白肽也可在小肠中发挥其生物活性。

驴乳中 Igs 的含量为 0.13 g/100 mL, 与人乳相近, 略低于马乳而高于牛、羊乳^[16]。乳中的 Igs 主要有 IgG(IgG1 和 IgG2)、IgA 和 IgM, 它们对于保护新生幼畜(新生儿)肠道粘膜免受病原微生物侵害具有重要意义^[4]。人的母体 Igs 可通过胎盘屏障供给胎儿, 而驴、马、牛、羊的 Igs 不能通过胎盘屏障, 幼畜刚出生时, 免疫系统尚未完善, 只能通过初乳快速获被动免疫^[4]。Igs 在初生幼畜的胃中不被降解, 到达小肠后直接被上皮绒毛细胞胞饮, 进入淋巴和血液发挥作用。驴和马的初乳中 Igs 的主要成分是 IgG, 常乳中占主导地位的则是 IgA; 牛、羊的初乳及常乳中 Igs 的主要成分都是 IgG; 而人的初乳及常乳中 Igs 的主要成分则都是 IgA^[36]。Turini 等^[37]检测了 Amiata 驴 0、6、12 和 24 h 初乳中 IgG 的含量, 其随着时间的增加呈显著性下降, 依次为 89.13、57.54、36.31 和 22.15 mg/mL。Guo 等^[14]研究则发现产后 15~150 d 疆岳驴乳中 Igs 含量在 0.70~1.46 mg/100 mL 范围内。

相对于牛、羊乳, 驴乳中各种乳清活性蛋白组分与马乳、人乳更为相近, 其 α -La、Lyz、Lf 以及 Igs 含量均高于牛、羊乳, 这是可能驴乳具有如此丰富生物活性的基础之一。驴乳乳清蛋白不仅含量丰富, 且更易于消化和吸收。此外, 驴乳乳清蛋白最大的特点是其非常高的 Lyz 含量, 以及 Lyz 联合 Lf 发挥的抑菌作用。以上均使驴乳乳清蛋白颇具研究意义以及开发价值。

2.3 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中氨基酸组分差异分析

由表 4 可见, 驴乳中氨基酸的总量(1 572 mg/100 g)较低, 与人乳(1 296 mg/100 g)最为相近, 低于马乳(2 359 mg/100 g)、牛乳(3 330 mg/100 g)和羊乳(3 565 mg/100 g)。驴乳、马乳、人乳、牛乳与羊乳的蛋白质中均以谷氨酸比例最高, 亮氨酸、天门冬氨酸、脯氨酸和赖氨酸比例较高, 而半胱氨酸、蛋氨酸和甘氨酸的比例较低。与其他几种乳相比, 驴乳蛋白质中缬氨酸、谷氨酸、丝氨酸和异亮氨酸的含量比较高, 而苏氨酸、半胱氨酸、甘氨酸和酪氨酸的含量较低; 驴乳蛋白质中 18 种单一氨基酸的比例和人乳最为相近。

从乳蛋白氨基酸的平衡性看, 必需氨基酸占总氨基酸的比例(EAA/TEAA)、必需氨基酸占非必

需氨基酸的比例(EAA/NEAA)均以羊乳最高,人乳次之,高于牛乳,高于驴乳和马乳;羊乳与牛乳的限制性氨基酸(蛋氨酸和赖氨酸)比例也较高。驴乳

的支链氨基酸(亮氨酸、缬氨酸、异亮氨酸)、呈味氨基酸(谷氨酸、天冬氨酸、苯丙氨酸、丙氨酸、甘氨酸和酪氨酸)和游离氨基酸(谷氨酸、亮氨酸和精氨酸)

表4 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中氨基酸的含量

Table 4 Amino acid composition of donkey, horse, human, cow and goat milk

项目 Item	mg/100 g				
	驴 ^[16] Donkey	马 ^[16] Horse	人 ^[16] Human	牛 ^[16] Cow	羊 ^[16] Goat
必需氨基酸 EAA					
组氨酸 His	36	56	30	100	98
异亮氨酸 Ile	87	90	75	140	207
亮氨酸 Leu	135	229	131	290	314
赖氨酸 Lys	115	189	81	270	290
蛋氨酸 Met	28	35	23	60	80
苯丙氨酸 Phe	68	111	57	160	155
苏氨酸 Thr	56	101	60	150	240
色氨酸 Try		28	23	50	44
缬氨酸 Val	102	97	78	160	240
非必需氨基酸 NEAA					
丙氨酸 Ala	55	76	52	100	118
精氨酸 Arg	72	123	52	110	119
天冬氨酸 Asp	140	246	108	260	210
半胱氨酸 Cys	7	14	22	20	46
甘氨酸 Gly	19	45	34	60	50
谷氨酸 Glu	358	474	231	770	626
脯氨酸 Pro	138	197	112	320	368
丝氨酸 Ser	98	147	66	160	181
酪氨酸 Tyr	58	101	61	150	179
限制性氨基酸 LAA					
支链氨基酸 BCAA	324	416	284	590	761
呈味氨基酸 DAA	698	1 053	543	1 500	1 338
游离氨基酸 FAA	565	826	414	1 170	1 059
必需氨基酸 EAA	627	936	558	1 380	1 668
非必需氨基酸 NEAA	945	1 423	738	1 950	1 897
总氨基酸 TAA	1 572	2 359	1 296	3 330	3 565
EAA/NEAA	0.66	0.66	0.76	0.71	0.88
EAA/TAA	0.40	0.40	0.43	0.41	0.47

的含量都最接近人乳。

张正翰^[15]通过氨基酸比值系数法发现,驴常乳较牛常乳氨基酸模式的营养更均衡且易于吸收。梁晓帅等^[20]研究了驴初乳与常乳的蛋白质及氨基酸含量与组成,结果表明,产后 2 h 的驴初乳蛋白质及 17 种单一氨基酸的含量最高,之后下降逐渐趋于平缓;且其研究发现,适当增加妊娠后期母驴日粮的蛋白质水平可改善驴乳氨基酸的平衡性。Guo 等^[14]研究表明,驴常乳中大部分氨基酸的含量在整个泌乳期(15~180 d)没有显著性变化。目前关于驴乳氨基酸组

成的相关鲜见报道,仍有待于进一步研究和论证。

3 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中脂肪和脂肪酸组分差异分析

如表 5 所示,驴乳中脂肪含量的变化范围在 0.28~1.82 g/100 g,与马乳接近,远低于人、牛和羊乳。因此,当使用驴乳作为基础乳制作婴幼儿奶粉时,应注意其低脂肪的特点,相应在配方中做出补充。而相对成年人或是对限制脂肪摄入量的人群,驴乳的低脂肪特点则具有优势。

表 5 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中的脂肪酸组成、胆固醇含量和乳脂球直径

Table 5 General fatty acid profile, cholesterol content and fat globule diameter of donkey, horse, human, cow and goat milk

项目 Item	驴 ^[2,16,25,38,40,42] Donkey	马 ^[16,27,39] Horse	人 ^[16,25,38] Human	牛 ^[16,25,38] Cow	羊 ^[16,41] Goat
脂肪/(g/100 g) Fat	0.3~1.8	0.3~4.2	2.1~4.0	3.3~5.4	3.0~7.2
乳脂肪酸组成(占总脂肪酸) Fatty acid profile (of total fatty acids)					
C16:0 棕榈酸/% Palmitic Acid	26.3	22.4	20	14.2	18.1
C18:0 硬脂酸/% Stearic Acid	2.7	0.3~3.0	6.2	14.2	8.5
C18:1 n-9 油酸/% Oleic Acid	17	9.4~31.6	32.6	20.7	20.8
C18:2 n-6 亚油酸/% Linoleic Acid	9.5	3.6~20.3	12.2	2.4	4.4
C18:3 n-3 α -亚麻酸/% ALA	7.25	5.31	1.14	0.48	0.05
C18:3 n-6 共轭亚油酸/% CLA	0.14	0.02~0.10	0.05	0.18	0.62
C20:5 n-3 二十碳五烯酸/% EPA	0.26	0.02	0.12	0.09	0.18
C22:6 n-3 二十二碳六烯酸/% DHA	0.28	0.04	0.4	0.05	0.13
饱和脂肪酸/% SFAs	46.7~67.7	37.5~55.8	39.4~45.0	55.7~72.8	59.9~73.7
单不饱和脂肪酸/% MUFAs	15.3~35.0	18.9~36.2	33.2~45.1	22.7~30.3	21.8~35.9
多不饱和脂肪酸/% PUFAs	14.2~30.5	12.8~51.3	8.1~19.1	2.4~6.3	2.6~5.6
n-3 多不饱和脂肪酸/% n-3 PUFAs	9.5~9.6	8.7~12.0	1.3~2.2	0.78	n/a
n-6 多不饱和脂肪酸/% n-6 PUFAs	11.6~13.1	7.1~11.8	11.2~14.2	2.8	n/a
n-6/n-3 PUFAs	0.9~6.1	0.3~3.5	7.4~8.1	2.1~3.7	4
胆固醇/(mg/100 mL) Cholesterol	0.9~3.0	5.0~8.8	14~20	13.1~31.4	10.7~18.1
乳脂球直径/ μ m Fat globule diameter	1.9	2.0~3.0	4	2.8~4.6	2.6~3.5

SFA 会增加人们罹患心血管疾病的风险,而 PUFA 和必需脂肪酸在预防心血管疾病、自身免疫性疾病和炎症性疾病方面发挥重要作用^[24]。有限的关于乳脂肪组成的研究表明,驴乳和马乳中 SFA 占乳中总脂肪酸的比例比较低,约为 50%,高

于人乳,低于牛、羊乳。人乳和各种动物的乳中 SFA 中均以棕榈酸含量最高,而且驴、马和人乳的含量高于牛、羊乳。驴乳中硬脂酸的比例(2.68%)远低于牛、羊乳(14.2%、8.5%)。驴乳中胆固醇的含量低于牛、羊乳,脂肪酸组成也优于牛、羊乳,对于

PUFA的比例,驴乳中为15.2%~30.5%,与马乳相近,略高于人乳,远高于牛、羊乳(2.4%~6.3%、2.6%~5.6%),尤其是对人体健康颇有有益处的n-3PUFA及n-6PUFA、二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)的比例均远高于牛乳。

驴乳的脂肪球的直径也比较小,平均为1.9 μm,这就意味着乳脂球膜的表面积比较大,可能有利于乳的消化和吸收^[40]。

4 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中的矿物质元素差异分析

由表6可见,驴乳的矿物质元素总量比较低(3 600~3 900 mg/L),与马乳相近,略高于人乳而

低于牛、羊乳。驴乳和马乳中钙、磷的含量约为人乳的3倍,而比牛、羊乳低1.5~2倍。驴乳的钙、磷比平衡,为1.04~1.64。驴乳中铁元素的含量较高,其与和马乳相似,高于人乳、牛乳和羊乳;而锌、锰和碘元素在驴乳、马乳和人乳中含量相近,低于牛、羊乳。

驴乳中矿物质的含量比较低,给肾脏带来的负担比较小。但目前所报道的驴乳的矿物质元素含量差异比较大,这可能与驴的品种、泌乳阶段等差异有关。辉芳等^[19]的研究指出,产后不同时间对驴乳中常量元素和微量元素的含量有显著的影响,大部分矿物质元素会随着泌乳天数的增加而降低, Malacarne等^[13]的研究结果与之相近。

表6 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中矿物质元素的含量

Table 6 Macro minerals and trace element content of donkey, horse, human, cow and goat milk

矿物质元素 Mineral	驴 ^[2,16,19,27,44] Donkey	马 ^[27,43-44] Horse	人 ^[25,42,44] Human	牛 ^[16,43-44] Cow	羊 ^[27,43] Goat
常量元素/(mg/L) Macro minerals					
钙 Ca	330~1 150	500~1 300	230~300	1 120~1 230	850~1 980
磷 P	320~730	200~1 200	130~170	900~1 190	750~1 530
钾 K	240~750	300~800	430~640	1 060~1 630	1 400~2 420
钠 Na	100~270	167~200	110~240	580	280~590
镁 Mg	40~83	40~110	20~30	70~120	100~360
钙/磷 Ca/P	1.04~1.64	1.72	1.76~1.77	1.23	1.52
微量元素/(μg/L) Micro minerals					
铁 Fe	430~2 660	220~1 460	720	300~1 000	200~666
锌 Zn	1 230~3 190	1 830~2 400	1 000~3 000	3 000~5 500	1 980~5 150
铜 Cu	80~300	200~1 000	200~400	52~90	98~428
锰 Mn	3.6	10~50	3~6	58~87	12~235
硒 Se	4.46~16	0.93~8.38	10~20	1.3~9.4	4.5~17.8
钴 Co	0.5	0.6~1.7	0.1~0.2	1.4~2.6	1.1~3.2
碘 I	75	40~127	62	62~509	97~865
总量/(mg/L) Total	3 600~3 900	3 500	2 200	7 600	7 200

5 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳的维生素组分差异分析

相对其他几种乳,驴乳中维生素总体含量比较低(表7)。其中,驴乳中VC含量较高,为2 000~

5 700 μg/100 mL,与马乳相近,虽低于人乳,但远高于牛、羊乳。VC有助于铁的吸收,具有抗氧化作用,对胶原蛋白的形成也至关重要。Liontte等^[45]研究表明,在大鼠饲料中添加驴乳可增加其肝脏线粒体的解偶联功能,提高大鼠的抗氧化和抗炎防御

功能。岳远西等^[7]对驴乳的抗氧化功能和作用机理进行了综述,其高含量的 VC 可能是驴乳抗氧化活性的基础之一。VD 是一种必需营养素,在钙平衡和骨骼代谢中起着至关重要的作用。此外,VD 具有一定的抗癌、抗腹泻和免疫调节特性^[46]。Martini 等^[47]研究了不同季节驴乳中 VD 的含量,发现其含

量很丰富(1.65~2.23 $\mu\text{g}/100\text{ mL}$),约为马乳、牛乳和羊乳的 5~8 倍,是人乳的 15~20 倍;同时,该报道还发现,夏季驴乳中维生素的含量高于冬季,巴氏杀菌对驴乳中 VD 的含量没有显著影响。而驴乳中维生素 A、E、K 的含量则比较低,这也可能与驴的集约化程度低于奶牛、日粮的配合不完善有关。

表 7 驴乳、马乳、人乳、牛乳和羊乳中维生素的含量

Table 7 Vitamin content of donkey, horse, human, cow and goat milk $\mu\text{g}/100\text{ mL}$

维生素种类 Types of vitamin	驴 ^[16,25,47] Donkey	马 ^[16] Horse	人 ^[16] Human	牛 ^[16,25] Cow	羊 ^[16] Goat
维生素 A (VA)	1.7	9.3~34	30~200	32~50	50~68
维生素 D (VD)	1.65~2.23	0.3	0.04~0.1	0.3	0.25
维生素 E (VE)	5.1	26~113	300~800	98~184	—
维生素 K (VK)	n/a	2.9	0.2~1.5	1.1~3.2	—
维生素 C (VC)	2 000~5 700	1 287~8 100	5 000~1 0000	300~2 300	900~1 500
维生素 B ₁ (VB ₁)	21~60	20~40	14~17	28~90	40~68
维生素 B ₂ (VB ₂)	30~90	10~37	20~60	116~202	110~210
维生素 B ₃ (VB ₃)	57~90	70~140	147~178	50~120	187~370
维生素 B ₁₂ (VB ₁₂)	0.11	0.30	0.03~0.05	0.27~0.7	0.06~0.07

6 总结与展望

6.1 驴乳的成分特点

驴乳最大的特点是其 LYZ 含量非常高,同时,驴乳具有乳糖、乳清蛋白及 PUFA 含量高,酪蛋白和乳脂含量低等特点,并富含钙、磷、VC 和 VD,其与牛、羊乳有很大差异,而与人乳最为接近。驴乳与人乳的成分相近之处包括其蛋白质含量及组成,其乳清蛋白组成,其较高的乳糖含量、PUFA 的比例以及较低矿物质含量等。另外,需要注意的一点是驴乳中乳脂及胆固醇含量较低,这较受成年人或是限制脂肪摄入量的人群欢迎,但当使用其作为基础乳制作婴幼儿奶粉时,应注意其低脂肪的问题。

目前市场上的奶粉主要以牛乳为基础,整体乳业亦以牛乳为主,牛乳的高产是其重要原因之一。从上文的总结可知,驴乳与牛乳在营养成分有很多不同之处,其优劣不能一概而论。但值得提到的是,驴乳成分组成更接近人乳,这就使得其比牛乳更适合人的消化道消化和吸收,尤其是婴幼儿和老人,并且其许多活性物质成分比例均高于牛乳,如 LYZ、

n3-PUFA 与 n6-PUFA 等。牛乳则具有更高的蛋白含量,且由于脂肪含量高,其风味更优。消费者可根据自己的需求和喜好进行选择。

6.2 驴乳的生物活性

驴乳具有抗氧化^[7]、抗炎^[10-11]和免疫调节^[8]、抗肿瘤与抗癌^[5-6]等功能。在体外试验、模型动物以及人体试验的研究表明,驴乳可以诱导一些炎症调节和免疫反应相关的细胞因子和蛋白质的释放,进而发挥免疫调节作用^[9]。Wang 等^[48]发现驴乳寡糖可以促进肠道上皮细胞的成熟,维持肠道上皮细胞稳定,有支持肠道发育的潜力,其影响机制与 p38 通路的激活和细胞周期的阻塞有关。Trinchese 等^[49]在大鼠上的研究则表明,人乳和驴乳可以缓解炎症反应,并可调节葡萄糖和脂质代谢。Mao 等^[5]通过体外试验发现,驴乳乳清成分可以抑制 A549 人肺癌细胞的增殖,有潜在的抗肿瘤作用。驴乳也具有低致敏性。据报道,0.5%~3.5%的五岁以下的儿童对牛乳蛋白过敏^[23],CMPA 已经成为一个广受关注的话题,而患 CMPA 的婴幼儿对驴乳具有很好的耐受性^[50]。驴乳因其低致敏、易消化、与人乳成分相近等特点而

被认为是婴幼儿配方中牛乳的最佳替代品。此外,驴乳中微生物的含量($3.10 \sim 4.09 \lg(\text{CFU}/\text{mL})$)和体细胞总数($4.01 \sim 4.87 \lg(\text{cells}/\text{mL})$)远低于牛乳^[2],梁晓帅^[51]测得驴乳中体细胞总数为 $4.14 \times 10^3 \text{ cells}/\text{mL}$,结果与之相近,说明驴乳具有很好的抗菌活性,这可能与驴乳中丰富的 Lyz 和 Lf 等活性成分有关。近年来,相关驴乳的研究逐渐有增多之势,但驴乳的成分、活性以及二者之间的关联都仍有待于进一步探索。

6.3 驴乳的加工特性

在奶制品生产方面,驴乳微生物含量低、Lyz 含量高,这使得驴乳不易变质,便于保存,货架期较长。驴乳中 Lyz 的活性受加工过程的影响最小,其在低温($85 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下)灭菌和低温冻存下都有很好的稳定性^[52]。尽管驴乳中富含 Lyz,但仍有一定量的乳酸菌,Carminati 等^[53]从驴乳中分离和鉴定出副干酪乳杆菌、短乳杆菌、酸乳杆菌和植物乳杆菌,驴乳中的 Lyz 对这些菌株的生长和酸化活性并不影响,同时,驴乳中较高的乳糖成分利于有益乳杆菌的发酵,因此驴乳是比较好的发酵基础乳。但是,驴乳容易制作软凝乳,不易制成奶酪,而更适合制作酸奶。此外,驴乳具有开发作为天然保鲜剂的潜力,Ozturkoglu-Budak 等^[54]从驴乳中提取出 Lyz 和 Lf,将其应用到牛乳酪的生产中,起到了很好的抗菌和延长保质期的作用。

6.4 驴乳开发现状及展望

虽然驴乳营养价值颇高,生物活性丰富,并具有良好的加工特性,但驴乳的开发仍面对许多问题。驴的泌乳期短,泌乳量较低,日挤奶量一般 $1 \sim 2 \text{ kg}$,与良种奶牛 $20 \sim 40 \text{ kg}$ 的日挤奶量差距甚大,这使得驴乳生产的成本颇高。其次,目前驴乳成本高,售价也比较高,再加上文化、习惯等原因,市场接受度还比较差。此外,国内规模化驴乳生产场稀少,加工技术不成熟,同时相关标准仍有待制定和完善。目前对驴乳营养成分及其影响因素、生物活性和医用价值的研究和报道十分有限,尽管驴乳在史籍中有众多记载,在各国各民族历史中广泛使用,在民间的医用盛行,但对其价值的科学研究和论证相对滞后。

尽管驴乳目前的开发现状不尽人意,驴乳仍然具有广阔的应用价值和市场潜力。驴乳与人乳成分的相近、其丰富的生物活性以及低致敏性使得驴乳在饮用乳品、保健品及婴幼儿奶粉的开发颇受期待,

此外,驴乳美容护肤的功效具有悠久的历史,国外开发的驴乳化妆品,如驴奶香皂、保湿剂、驴奶雪花膏、驴奶面膜等也受到市场普遍欢迎。由此可见,开发驴产业具有很好的社会效益和经济效益。驴乳相关的研究、开发和推广有待加强,如何扩大饲养量,实现产业规模化,提高泌乳量以及尽早地建立健全行业标准是实现驴乳市场潜力需要考虑和解决的问题。

7 小结

驴乳是与人乳最接近的乳。驴乳具有高乳糖、低蛋白、低脂肪、钙磷比平衡、维生素丰富等特点。驴乳为乳清蛋白乳,且富含 Lyz 等生物学活性物质,相对于牛乳和羊乳,驴乳易消化、低致敏,且具有更好的保健功效,如抗菌、抗炎、抗氧化、抗肿瘤、防治心血管疾病等。同时,驴乳具备良好的加工特性,在民间也有着广泛的使用基础,因此驴乳具备良好的开发潜质。然而,目前驴乳开发在技术、规模、市场上仍有很多不足,其相关的研究、开发和推广有待加强,同时也说明驴乳具有广泛的可发展空间。

参考文献 References

- [1] 彭珊珊. 乳杆菌发酵驴奶性能及其两者复配对小鼠免疫力及肠道菌群影响的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013
Peng S S. Studies of fermentation of donkey milk with Lactobacillus and co-effect of the complex on the immune system and intestinal flora in mice[D]. Nanchang: Nanchang University, 2013 (in Chinese)
- [2] 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
- [3] Martini M, Altomonte I, Licitra R, Salari F. Nutritional and nutraceutical quality of donkey milk[J]. *Journal of Equine Veterinary Science*, 2018, 65: 33-37
- [4] Brumini D, Criscione A, Bordonaro S, Vegarud G E, Marletta D. Whey proteins and their antimicrobial properties in donkey milk: A brief review[J]. *Dairy Science & Technology*, 2016, 96(1): 1-14
- [5] Mao X Y, Gu J N, Sun Y, Xu S P, Zhang X Y, Yang H Y, Ren F Z. Anti-proliferative and anti-tumour effect of active components in donkey milk on A549 human lung cancer cells [J]. *International Dairy Journal*, 2009, 19(11): 703-708
- [6] Esener O, Balkan B, Armutak E, Uvez A, Yildiz G,

- Hafizoglu M, Yilmazer N, Gurel-Gurevin E. Donkey milk kefir induces apoptosis and suppresses proliferation of Ehrlich ascites carcinoma by decreasing iNOS in mice[J]. *Biotechnic & Histochemistry*, 2018, 93(6): 424-431
- [7] 岳远西, 闫素梅. 驴乳的抗氧化功能及作用机理[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(7): 3639-3644
- Yue Y X, Yan S M. Antioxidative function and mechanism of donkey milk[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(7): 3639-3644 (in Chinese)
- [8] Yvon S, Olier M, Leveque M, Jard G, Tormo H, Haimoud-Lekhal D A, Peter M, Eutamène H. Donkey milk consumption exerts anti-inflammatory properties by normalizing antimicrobial peptides levels in Paneth's cells in a model of ileitis in mice[J]. *European Journal of Nutrition*, 2018, 57(1): 155-166
- [9] Martini M, Altomonte I, Tricò D, Lapenta R, Salari F. Current knowledge on functionality and potential therapeutic uses of donkey milk[J]. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, 2021, 11(5): 1382
- [10] Lu Y, Zhou Y T, Lin Y Y, Li W S, Tian S S, Hao X H, Guo H Y. Preventive effects of donkey milk powder on the ovalbumin-induced asthmatic mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2021, 84: 104603
- [11] Kocic H, Langerholc T, Kostic M, Stojanovic S, Najman S, Krstic M, Nescic I, Godic A, Wollina U. The regenerative potential of donkey and human milk on the redox-sensitive and proliferative signaling pathways of skin fibroblasts [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020, 2020: 5618127
- [12] Li Y, Fan Y M, Shaikh A S, Wang Z D, Wang D L, Tan H N. Dezhou donkey (*Equus asinus*) milk a potential treatment strategy for type 2 diabetes[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2020, 246: 112221
- [13] Malacarne M, Criscione A, Franceschi P, Bordonaro S, Formaggioni P, Marletta D, Summer A. New insights into chemical and mineral composition of donkey milk throughout nine months of lactation[J]. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, 2019, 9(12): 1161
- [14] Guo H Y, Pang K, Zhang X Y, Zhao L, Chen S W, Dong M L, Ren F Z. Composition, physicochemical properties, nitrogen fraction distribution, and amino acid profile of donkey milk[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(4): 1635-1643
- [15] 张正翰. 驴乳与牛乳理化性质及乳清蛋白质差异性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019
- Zhang Z H. Study on physicochemical properties and whey protein difference of donkey milk and bovine milk [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [16] Claeys W L, Verraes C, Cardoen S, de Block J, Huyghebaert A, Raes K, Dewettinck K, Herman L. 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
- [17] 艾鑫, 王银, 张富新, 邵玉宇, 王毕妮. 不同泌乳期羊乳的理化特性及其酶凝固特性[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(12): 71-74
- Ai X, Wang Y, Zhang F X, Shao Y Y, Wang B N. Physicochemical of goat milk and its coagulation characteristics by chymosin[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(12): 71-74 (in Chinese)
- [18] Uniacke-Lowe T, Fox P F. Equid milk: Chemistry, biochemistry and processing[M]. 2nd ed. In: Simpson B K, Food Biochemistry and Food Processing. Quebec: Wiley-Blackwell, 2012: 491-530
- [19] 辉芳, 尹国琳, 岳远西, 赵艳丽, 郭晓宇, 张玲, 史彬林, 闫素梅. 泌乳驴产后不同时间的血清和乳中矿物元素含量变化规律的研究[J]. *饲料研究*, 2020, 43(12): 96-100
- Hui F, Yin G L, Yue Y X, Zhao Y L, Guo X Y, Zhang L, Shi B L, Yan S M. Variation research in serum and milk mineral content of lactating donkeys at different times after parturition[J]. *Feed Research*, 2020, 43(12): 96-100 (in Chinese)
- [20] 梁晓帅, 沈亚军, 齐敬宇, 郝颖, 李胤豪, 赵艳丽, 郭晓宇, 史彬林, 闫素梅. 妊娠后期饲料蛋白质水平对母驴初乳与常乳中蛋白质、脂肪和氨基酸含量的影响[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(5): 2815-2826
- Liang X S, Shen Y J, Qi J Y, Hao Y, Li Y H, Zhao Y L, Guo X Y, Shi B L, Yan S M. Effects of dietary protein level of female donkeys during late gestation on protein, fat and amino acid contents in colostrum and regular milk[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(5): 2815-2826 (in Chinese)
- [21] Areco V, Rivoira M A, Rodriguez V, Marchionatti A M, Carpentieri A, Tolosa de Talamoni N. Dietary and pharmacological compounds altering intestinal calcium absorption in humans and animals[J]. *Nutrition Research Reviews*, 2015, 28(2): 83-99
- [22] Tidona F, Criscione A, Devold T G, Bordonaro S, Marletta D, Vegarud G E. Protein composition and micelle size of donkey milk with different protein patterns: Effects on digestibility[J]. *International Dairy Journal*, 2014, 35(1): 57-62
- [23] Koletzko S, Niggemann B, Arato A, Dias J A, Heuschkel R, Husby S, Mearin M L, Papadopoulou A, Rummel F M,

- Staiano A, Schäppi M G, Vandenplas Y. Diagnostic approach and management of cow's-milk protein allergy in infants and children; ESPGHAN GI Committee practical guidelines[J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 2012, 55(2): 221-229
- [24] Cunsolo V, Saletti R, Muccilli V, Gallina S, di Francesco A, Foti S. Proteins and bioactive peptides from donkey milk: The molecular basis for its reduced allergenic properties[J]. *Food Research International*, 2017, 99: 41-57
- [25] Aspri M, Economou N, Papademas P. Donkey milk: An overview on functionality, technology, and future prospects [J]. *Food Reviews International*, 2017, 33(3): 316-333
- [26] Martini M, Salari F, Licitra R, la Motta C, Altomonte I. Lysozyme activity in donkey milk [J]. *International Dairy Journal*, 2019, 96: 98-101
- [27] Salimei E, Fantuz F. Equid milk for human consumption[J]. *International Dairy Journal*, 2012, 24(2): 130-142
- [28] Qin Y S, Jiang H, Wang C F, Cheng M, Wang L L, Huang M Y, Zhao Q X, Jiang H H. Physicochemical and functional properties of goat milk whey protein and casein obtained during different lactation stages[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(4): 3936-3946
- [29] López-Expósito I, Pellegrini A, Amigo L, Recio I. Synergistic effect between different milk-derived peptides and proteins[J]. *Journal of Dairy Science*, 2008, 91(6): 2184-2189
- [30] Lönnnerdal B, Erdmann P, Thakkar S K, Sauser J, Destaillets F. Longitudinal evolution of true protein, amino acids and bioactive proteins in breast milk: A developmental perspective [J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2017, 41: 1-11
- [31] Ragland S A, Criss A K. From bacterial killing to immune modulation: Recent insights into the functions of lysozyme[J]. *PLoS Pathogens*, 2017, 13(9): e1006512
- [32] Huang G P, Li X Q, Lu D, Liu S, Suo X, Li Q Y, Li N. Lysozyme improves gut performance and protects against enterotoxigenic *Escherichia coli* infection in neonatal piglets [J]. *Veterinary Research*, 2018, 49(1): 20
- [33] Lee W, Ku S K, Na D H, Bae J S. Anti-inflammatory effects of lysozyme against HMGB1 in human endothelial cells and in mice[J]. *Inflammation*, 2015, 38(5): 1911-1924
- [34] Šarić L Ć, Šarić B M, Mandić A I, Torbica A M, Tomić J M, Cvetković D D, Okanović D G. Antibacterial properties of Domestic Balkan donkeys' milk [J]. *International Dairy Journal*, 2012, 25(2): 142-146
- [35] Zavaleta N, Figueroa D, Rivera J, Sanchez J, Alfaro S, Lönnnerdal B. Efficacy of a rice based oral rehydration solution containing human recombinant lactoferrin and lysosyme in children with acute diarrhea: P102 [J]. *Pediatric Research*, 2006, 60(5): 639
- [36] Veronesi M C, Dall'Ara P, Gloria A, Servida F, Sala E, Robbe D. IgG, IgA, and lysozyme in Martina Franca donkey jennies and their foals[J]. *Theriogenology*, 2014, 81(6): 825-831
- [37] Turini L, Bonelli F, Nocera I, Battaglia F, Meucci V, Panzani D, Mele M, Sgorbini M. Evaluation of jennies' colostrum: IgG concentrations and absorption in the donkey foals. A preliminary study[J]. *Heliyon*, 2020, 6(8): e04598
- [38] Gastaldi D, Bertino E, Monti G, Baro C, Fabris C, Lezo A, Medana C, Baiocchi C, Mussap M, Galvano F, Conti A. Donkey's milk detailed lipid composition [J]. *Frontiers in Bioscience (Elite Edition)*, 2010, 2(2): 537-546
- [39] Uniacke-Lowe T, Fox P F. Milk | equid milk [M]. In: Fuquay, John W, eds. *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Amsterdam: Elsevier, 2011: 518-529
- [40] Martini M, Altomonte I, Salari F. Amiate donkeys: Fat globule characteristics, milk gross composition and fatty acids [J]. *Italian Journal of Animal Science*, 2014, 13(1): 3118
- [41] 张宇, 王立娜, 张宏达, 李晓东, 冷友斌, 巩燕妮, 蒋士龙. 母乳、牛乳及山羊乳脂脂肪酸组成的差异分析[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(4): 21-26
- Zhang Y, Wang L N, Zhang H D, Li X D, Leng Y B, Gong Y N, Jiang S L. Difference analysis of fatty acid composition of breast milk, bovine milk and goat milk [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(4): 21-26 (in Chinese)
- [42] Altomonte I, Salari F, Licitra R, Martini M. Donkey and human milk: Insights into their compositional similarities[J]. *International Dairy Journal*, 2019, 89: 111-118
- [43] 高玓玲. 内蒙古四种家畜乳常量与微量元素测定及特征分析 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017
- Gao D L. Determination on macro and trace minerals of four livestock milk of Inner Mongolia and studies on minerals profile [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [44] Fantuz F, Ferraro S, Todini L, Mariani P, Piloni R, Salimei E. Essential trace elements in milk and blood serum of lactating donkeys as affected by lactation stage and dietary supplementation with trace elements [J]. *Animal*, 2013, 7(11): 1893-1899
- [45] Lionetti L, Cavaliere G, Bergamo P, Trinchese G, de Filippo C, Gifuni G, Gaita M, Pignalosa A, Donizzetti I, Putti R, di Palo R, Barletta A, Mollica M P. 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
- [46] Vincenzetti S, Santini G, Polzonetti V, Pucciarelli S, Klimanova Y, Polidori P. Vitamins in human and donkey milk: Functional and nutritional role[J]. *Nutrients*, 2021, 13(5): 1509
- [47] Martini M, Altomonte I, Licitra R, Salari F. Short communication: Technological and seasonal variations of vitamin D and other nutritional components in donkey milk [J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(10): 8721-8725
- [48] Wang J X, Lei B B, Yan J Y, Li J Q, Zhou X S, Ren F Z, Guo H Y. 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
- [49] Trinchese G, Cavaliere G, de Filippo C, Aceto S, Prisco M, Chun J T, Penna E, Negri R, Muredda L, Demurtas A, Banni S, Berni-Canani R, Mattace Raso G, Calignano A, Meli R, Greco L, Crispino M, Mollica M P. Human milk and donkey milk, compared to cow milk, reduce inflammatory mediators and modulate glucose and lipid metabolism, acting on mitochondrial function and oleylethanolamide levels in rat skeletal muscle[J]. *Frontiers in Physiology*, 2018, 9: 32
- [50] Mori F, Sarti L, Barni S, Pucci N, Belli F, Stagi S, Novembre E. Donkey's milk is well accepted and tolerated by infants with cow's milk food protein-induced enterocolitis syndrome: A preliminary study[J]. *Journal of Investigational Allergology & Clinical Immunology*, 2017, 27(4): 269-271
- [51] 梁晓帅. 日粮 NDF/NFC 对泌乳驴产乳性能、血液生化指标及乳中氨基酸与脂肪酸组成的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021
- Liang X S. Effects of dietary NDF/NFC on lactation performance, blood biochemical indices and milk amino acid and fatty acid profile of lactating donkeys[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [52] Ozturkoglu-Budak S. Effect of different treatments on the stability of lysozyme, lactoferrin and β -lactoglobulin in donkey's milk[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2018, 71(1): 36-45
- [53] Carminati D, Tidona F, Fornasari M E, Rossetti L, Meucci A, Giraffa G. Biotyping of cultivable lactic acid bacteria isolated from donkey milk[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2014, 59(3): 299-305
- [54] Ozturkoglu-Budak S, Akal H C, Bereli N, Cimen D, Akgonullu S. Use of antimicrobial proteins of donkey milk as preservative agents in Kashar cheese production [J]. *International Dairy Journal*, 2021, 120: 105090

责任编辑: 秦梅