

# 骆驼乳营养成分及生物学功能研究进展

朱师晨<sup>1</sup>, 韩立华<sup>1</sup>, 陈钢粮<sup>2,3</sup>, 戴瑞彤<sup>1</sup>, 毛学英<sup>1\*</sup>

- (1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 教育部功能乳品重点实验室, 北京 100083;  
2. 新疆双峰骆驼研究院, 阿勒泰 836499; 3. 新疆旺源驼奶实业有限公司, 阿勒泰 836400)

**摘要:** 骆驼乳营养丰富, 含有多种对人类健康至关重要的活性成分, 其蛋白质组成模式优, 不含有易引起过敏反应的 $\beta$ -乳球蛋白, 富含乳铁蛋白、免疫球蛋白、溶菌酶等生物活性物质。不饱和脂肪酸、维生素和矿物质含量丰富, 脂肪消化率高。骆驼乳独特的营养组成赋予其多种生物学功能, 相关研究已证明其具有降血糖、抑菌、降血压、抗氧化、调节肠道菌群等多种生理活性, 且致敏性低。骆驼乳中的免疫球蛋白、乳铁蛋白、溶菌酶等活性成分易在热处理的影响下丧失活性, 因此骆驼乳活性成分和生物学功能的保留程度是确定骆驼乳相关产品热处理技术的重要指标。由于产量与加工技术的限制, 对骆驼乳的利用远低于其潜在价值, 全面了解骆驼乳的营养成分及组成对于明确其生物学功能、保持营养价值、获得理想的骆驼乳产品、开发适应骆驼乳产品的热处理技术至关重要。本文主要对骆驼乳的营养成分、生物学功能和热稳定性进行阐述, 为骆驼乳的开发和利用提供理论基础。

**关键词:** 骆驼乳; 营养成分; 生物学功能; 热稳定性

## Compositions and biological functions of camel milk: A review

ZHU Shi-Chen<sup>1</sup>, HAN Li-Hua<sup>1</sup>, CHEN Gang-Liang<sup>2,3</sup>, DAI Rui-Tong<sup>1</sup>, MAO Xue-Ying<sup>1\*</sup>

- (1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Key Laboratory of Functional Milk Products of Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Xinjiang Bactrian Camel Research Institute, Altay 836499, China; 3. Xinjiang Wangyuan Camel Milk Industrial Co., Ltd., Altay 836400, China)

**ABSTRACT:** Camel milk is rich in nutrients and contains a variety of bioactive compounds that are essential for human health. Its proteins have excellent composition profile, and it does not contain  $\beta$ -lactoglobulin which causes allergies. Camel milk is rich in lactoferrin, immunoglobulin, lysozyme and other bioactive substances. It is also abundant in various unsaturated fatty acids, vitamins and minerals. The fat in camel milk is much easier to digest. Its unique nutritional compositions give camel milk a variety of biological functions. It has been proved that camel milk possesses many biological functions, such as lowering blood glucose, inhibiting bacteria, lowering blood pressure, resisting oxidation, regulating intestinal flora, and low sensitization. Heat-labile components such as immunoglobulin, lactoferrin and lysozyme in camel milk are easy to lose their biological activity after high-intensity heat treatment. Therefore, their retention in camel milk is an important indicator of heat treatment for camel milk products. Due to the limitation of yield and processing technology, the utilization of camel milk is far below its potential value. A comprehensive understanding of the compositions of camel milk is crucial to clarify its biological functions, maintain nutritional value, and develop heat

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871806)、家畜产业技术体系北京市创新团队项目(BAIC05-2023)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31871806), and the Livestock Industry Technology System Beijing Innovation Team (BAIC05-2023)

\*通信作者: 毛学英, 博士, 教授, 主要研究方向为功能乳品方面研究。E-mail: maoxueying@cau.edu.cn

\*Corresponding author: MAO Xue-Ying, Ph.D, Professor, China Agricultural University, No.17, Qinghua East Road, Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: maoxueying@cau.edu.cn

treatment techniques adapted to camel milk products. This review explained the compositions, biological functions and thermal stability of camel milk to provide a theoretical basis for the development and utilization of camel milk.

**KEY WORDS:** camel milk; compositions; biological functions; thermal stability

## 0 引言

骆驼主要生活在炎热干旱地区,被用于包括交通、运输、旅游在内的诸多用途,同时也是肉类和乳类的良好来源<sup>[1]</sup>,且具有一定的医用价值<sup>[2]</sup>。骆驼乳具有悠久的食用历史,素有“沙漠白金”称号,不仅营养丰富,还含有多种生物活性物质。与牛乳相比,骆驼乳的酪蛋白与乳清蛋白比例更接近人乳,且 $\beta$ -酪蛋白( $\beta$ -casein,  $\beta$ -CN)比例较高,易水解成小分子肽,有助于消化吸收<sup>[3]</sup>。同时,不含易致敏的 $\beta$ -乳球蛋白( $\beta$ -lactoglobulin,  $\beta$ -lg),具有较低的致敏性。骆驼乳中饱和脂肪酸和胆固醇含量低,维生素 C 和矿物质(铁、锌、钙等)含量较高<sup>[4]</sup>。除了作为能量和营养来源,骆驼乳已被证明具有降血糖<sup>[5]</sup>、降血压<sup>[6]</sup>、抑菌<sup>[7]</sup>、抗氧化<sup>[8]</sup>、调节肠道菌群<sup>[9]</sup>等生理功能,具有作为功能食品及功能乳基料的潜在价值。热处理作为骆驼乳产品生产过程中必不可少的步骤,对乳中的成分尤其是活性蛋白质,产生一定影响。

在市场价格、产量等因素的限制下,骆驼乳的营养价值未被大众系统地认识,因此本文主要阐述骆驼乳独特的蛋白、脂质等营养组成及其低致敏、降血糖等特殊生物学功能,并就热处理对骆驼乳蛋白质影响的研究现状及相关技术进行综述,为骆驼乳研究及产品开发提供理论基础。

## 1 骆驼乳的基本营养素组成

骆驼乳与牛乳和人乳的基本营养素组成相似,但含量存在较大差异,不同乳的基本营养素组成如表 1<sup>[10-13]</sup>所示。相比于牛乳,骆驼乳的 $\beta$ -酪蛋白、乳铁蛋白(lactoferrin, LF)、不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acids, UFAs)等含量较高, $\kappa$ -酪蛋白( $\kappa$ -casein,  $\kappa$ -CN)含量较低,不含 $\beta$ -乳球蛋白,致敏性较低<sup>[4]</sup>。牛乳的酪蛋白与乳清蛋白比例为 4:1,而骆驼乳中酪蛋白与乳清蛋白的比值接近 1.7:1,更接近人乳的酪蛋白与乳清蛋白比<sup>[14]</sup>。此外,骆驼乳中铁、钙、锌等矿物质含量高于牛乳<sup>[15]</sup>。

表 1 不同来源乳的基本营养素组成  
Table 1 Compositions of different milk

成分	骆驼乳	牛乳	人乳
蛋白质/%	2.15~4.90	2.4~4.5	1.1~1.3
总酪蛋白/(g/L)	22.1~26	24.6~28	2.4~4.2
$\beta$ -酪蛋白/总酪蛋白/%	65	39	64
$\alpha_{s1}$ -酪蛋白/总酪蛋白/%	22	38	12
$\alpha_{s2}$ -酪蛋白/总酪蛋白/%	9.5	10	-
$\kappa$ -酪蛋白/总酪蛋白/%	3.5	13	24
乳清蛋白/(g/L)	9.3	7.3	7.6
$\beta$ -乳球蛋白/(g/L)	-	3.2~3.3	-
$\alpha$ -乳白蛋白/(g/L)	2.01	1.2~1.3	1.9~3.4
血清白蛋白/(g/L)	0.46	0.3~0.4	0.4~0.5
乳铁蛋白/(g/L)	0.02~2.1	0.02~0.5	1.5~2.0
免疫球蛋白/(g/L)	1.5~19.6	0.5~1.0	0.96~1.3
脂肪/%	2.3~6.4	1.0~7.0	3.3~4.7
乳糖/%	2.4~5.8	2.4~5.4	6.8~6.9
矿物质/%	0.72~0.84	0.7~0.8	0.2~0.3
维生素 C/(mg/100 mL)	2400~18400	300~2300	3500~100000
维生素 B <sub>1</sub> /(mg/100 mL)	10~60	28~90	14~17
维生素 B <sub>2</sub> /(mg/100 mL)	42~168	116~202	20~60
维生素 B <sub>3</sub> /(mg/100 mL)	400~770	50~120	147~148
维生素 B <sub>9</sub> /(mg/100 mL)	0.4	1~18	5.2~16
维生素 A/(mg/100 mL)	5~97	17~50	30~200
维生素 D <sub>3</sub> /(mg/100 mL)	0.3~1.6	0.3	0.04~0.1
铁/(mg/100 mL)	0.07~0.37	0.03~0.1	0.04~0.2
锌/(mg/100 mL)	0.19~0.6	0.3~0.55	0.2~0.4
钙/(mg/100 mL)	105~157	112~123	28~34
磷/(mg/100 mL)	58~104	59~119	14~43
钾/(mg/100 mL)	124~179	106~163	53~62

注: -代表无对应数据。

## 1.1 骆驼乳蛋白组成及特性

骆驼乳中各蛋白质的含量受品种、饮食、气候、水源、季节、泌乳时间等因素的影响<sup>[16]</sup>。骆驼乳中酪蛋白和乳清蛋白的比例约为1.7:1<sup>[14]</sup>。酪蛋白(casein, CN)是骆驼乳的主要蛋白质,包括 $\beta$ -CN、 $\alpha_{s1}$ -CN、 $\alpha_{s2}$ -CN和 $\kappa$ -CN,分别占总酪蛋白的65%、22%、9.5%和3.5%<sup>[13]</sup>。乳清蛋白主要包括 $\alpha$ -乳白蛋白( $\alpha$ -lactalbumin,  $\alpha$ -La)、乳铁蛋白、血清白蛋白(serum albumin, SA)、溶菌酶(lysozyme, LZ)、乳过氧化物酶(lactoperoxidase, LPO)和免疫球蛋白(immunoglobulin, IG)等<sup>[16]</sup>。

相比于牛乳,骆驼乳蛋白质的特殊之处在于:(1) $\beta$ -CN含量高。 $\beta$ -CN是骆驼乳的主要酪蛋白,占总酪蛋白含量的65%,高于牛乳(36%)<sup>[17]</sup>。 $\beta$ -CN对消化道蛋白酶的敏感性高于 $\alpha$ -CN,因此骆驼乳的 $\beta$ -CN含量高被认为是其具有较高消化率的主要原因之一<sup>[3]</sup>;(2) $\alpha$ -CN含量低,不含 $\beta$ -lg。 $\alpha$ -CN和 $\beta$ -lg是乳的重要过敏原,其在骆驼乳中含量较低,是骆驼乳致敏性较低的原因<sup>[18]</sup>;(3)富含 $\alpha$ -乳白蛋白、乳铁蛋白、溶菌酶等活性蛋白。 $\alpha$ -乳白蛋白是骆驼乳乳清蛋白中含量最丰富的蛋白质,占乳清蛋白的53%<sup>[19]</sup>,含量约为2.01 g/L,高于牛乳的1.2~1.5 g/L<sup>[20]</sup>。骆驼乳 $\alpha$ -乳白蛋白对PC-3前列腺癌细胞、HepG-2肝癌细胞的生长均具有抑制作用,与油酸形成复合体会增强其对癌细胞的抑制作用<sup>[21]</sup>。骆驼乳中的乳铁蛋白含量是其他畜乳的30~100倍<sup>[12]</sup>,被证明具有抗菌<sup>[22]</sup>、抗氧化<sup>[23]</sup>等活性,其机制包括:乳铁蛋白具有较强的金属离子螯合能力,可剥夺需铁微生物的营养来源;乳铁蛋白中带正电荷的氨基酸可以与某些细菌、病毒、真菌和寄生虫表面的阴离子化合物相互作用,导致细胞裂解<sup>[24]</sup>;与细菌脂多糖结合破坏细菌及其膜的完整性<sup>[25]</sup>。

综上,骆驼乳的蛋白质组成较其他畜乳更接近母乳,且富含 $\alpha$ -乳白蛋白、乳铁蛋白、免疫球蛋白、溶菌酶等重要活性物质,是其发挥抗癌、抗氧化、抑菌等多种生物学功能的基础。

## 1.2 骆驼乳脂肪组成及特性

### 1.2.1 骆驼乳富含不饱和脂肪酸

骆驼乳脂肪含量在1.2%~6.4%之间,平均含量为3.5%±1.0%<sup>[14]</sup>。相比于牛乳,骆驼乳的饱和脂肪酸(saturated fatty acids, SFAs)含量较低,单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acids, MUFAs)和多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFAs)含量较高<sup>[26]</sup>。骆驼乳SFAs占总脂肪酸的46%~66%,低于牛乳(78.33%);骆驼乳MUFAs占脂肪酸总量的5.15%~32.88%,高于其他哺乳动物,主要以油酸为主,其次是棕榈烯酸<sup>[26-27]</sup>;MUFAs可降低血浆低密度脂蛋白胆固醇和总胆固醇含量,防止血小板聚集形成血栓,预防动脉疾病<sup>[28]</sup>。PUFAs占骆驼乳总脂肪酸的2.7%~8.46%,高于牛乳(1.89%),低于母乳(10%~20%),

其中亚麻酸(linoleic acid, LA)和亚油酸(alpha-linolenic acid, ALA)是骆驼乳的主要PUFAs,分别占总脂肪酸的0.17%~3.31%和0.05%~2.16%<sup>[26]</sup>,骆驼乳的亚麻酸含量高于母乳,约为母乳的4~16倍<sup>[29]</sup>。亚油酸含量略高于母乳,是牛乳亚油酸含量的10~13倍<sup>[30]</sup>。此外,骆驼乳的长链脂肪酸含量高于牛乳和母乳<sup>[26]</sup>,具有降低甘油三酯含量、抑制动脉粥样硬化斑块破裂、抑制血小板聚集、抗炎、抗氧化、改善认知障碍等多种作用<sup>[31]</sup>。

### 1.2.2 骆驼乳脂肪易于消化

骆驼乳脂肪平均含量为3.5%±1.0%<sup>[14]</sup>,以脂肪球的形式存在。乳脂肪球的消化速度与其粒径大小有关,脂肪球体积越小、比表面积越大时,脂质消化速度越快<sup>[32]</sup>。利用扫描电镜观察不同动物乳汁脂肪球,骆驼乳和山羊乳的脂肪球直径相近,分别为2.99  $\mu$ m和3.2  $\mu$ m,小于水牛乳(8.7  $\mu$ m)、牛乳(3.78  $\mu$ m)和绵羊乳(3.76  $\mu$ m)<sup>[33]</sup>。通过体外模拟消化比较不同动物乳脂消化差异,单位体积乳样品(乳脂含量统一调节为3%)的游离脂肪酸释放量顺序为:骆驼乳>山羊乳>牛乳>水牛乳,说明与山羊乳、牛乳和水牛乳相比,骆驼乳脂肪的消化率更高<sup>[34]</sup>。

## 1.3 骆驼乳富含多种维生素和矿物质

骆驼乳含有多种维生素,包括维生素A、C、D、E和B族维生素。骆驼乳的维生素C含量是牛乳的3~5倍,且高于母乳<sup>[35]</sup>。维生素C是人体正常生长发育所必需的营养素,对机体的新陈代谢和健康具有重要作用,具有增强免疫、降低血清胆固醇含量、抗氧化等功能<sup>[36]</sup>。骆驼乳的维生素B<sub>3</sub>含量显著高于牛乳<sup>[37]</sup>。

骆驼乳的矿物质含量平均为0.79%±0.07%,与牛乳相似<sup>[38]</sup>。钙、铁、锌是人的重要微量元素。乳制品是膳食钙的重要来源,骆驼乳的平均钙浓度为2.74 mmol/L,高于牛乳(1.88 mmol/L)<sup>[39]</sup>。骆驼乳的铁含量是牛乳的5~6倍、人乳的2倍<sup>[14]</sup>。铁具有调节免疫细胞增殖和分化的功能,可参与调控免疫细胞的各种免疫效应机制,影响机体免疫系统<sup>[40]</sup>。

## 2 骆驼乳的营养成分赋予其多种生物学功能

### 2.1 降血糖活性

糖尿病是一种由胰岛素代谢障碍或分泌不足引起的,以血糖浓度偏高为特征的慢性代谢性疾病。根据国际糖尿病联合会发布的数据显示,2021年全球糖尿病患者约为5.37亿,占20~79岁人群总人数的10.5%<sup>[41]</sup>。在非洲、亚洲和中东等骆驼资源丰富的地区,人们认为经常食用骆驼乳有助于预防和控制糖尿病。

II型糖尿病是最常见的糖尿病类型,占总患病人数的90%,不健康的饮食方式、久坐缺乏锻炼、肥胖是常见的诱因<sup>[42]</sup>,发病机制包括胰岛素抵抗和胰岛 $\beta$ 细胞功能受损<sup>[43]</sup>。饮用骆驼乳可改善II型糖尿病的相关症状。在伊朗进行的

临床研究发现, II型糖尿病患者每天饮用 500 mL 骆驼乳, 经 8 周后患者的糖化血红蛋白和总胆固醇含量显著下降, 而饮用牛乳无此效果<sup>[44]</sup>。一项随机双盲安慰剂对照实验证明, 食用骆驼乳粉也具有改善 II型糖尿病的作用, II型糖尿病患者连续 4 周补充 10 g 骆驼乳粉(每日 2 次), 其空腹血糖、餐后 2 h 血糖、总胆固醇、抵抗素和脂钙调蛋白-2 的含量均显著降低, 血清中骨分泌蛋白、胰淀粉酶和胰高血糖素样肽-1 含量显著升高<sup>[45]</sup>。此外, 饮用骆驼乳还可以减少糖尿病患者的药物使用量, 一项涉及 40 名使用胰岛素类似物的 II型糖尿病患者的临床研究结果表明, 饮用骆驼乳 3 个月后, 糖化血红蛋白含量显著降低, 空腹血糖显著下降, 患者的药物使用量减少 13.7%<sup>[46]</sup>。

相关研究证实, 发酵骆驼乳、骆驼乳水解物对糖尿病具有明显的改善效果。发酵 48 h 的骆驼乳对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\alpha$ -淀粉酶和脂肪酶均有抑制活性, 且高于同等条件下的发酵牛乳, 鉴定得到具有降血糖特征的肽段 TDVMPQWW、MP、VPYPQ、LPQNIPP<sup>[47]</sup>。链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠连续 8 周补充骆驼乳蛋白水解物 500 mg/(kg·BW), 有效改善空腹血糖和葡萄糖耐量, 血清中总胆固醇(serum total cholesterolo, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)和低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein, LDL-C)水平下降, 具有脂质调节能力, 改善肝功能和氧化应激水平<sup>[48]</sup>。

目前研究表明, 骆驼乳对糖尿病患者具有积极作用, 可改善糖化血红蛋白指数, 有助于降低总胆固醇、甘油三酯水平, 减少患者的胰岛素使用量, 且效果优于牛乳。骆驼乳的降血糖作用与多种机制相关: 骆驼乳在分子水平上影响胰岛素受体功能和胰岛素分泌, 对胰腺细胞的存活、生长和活性具有调节作用, 从而改善糖尿病<sup>[49]</sup>; 骆驼乳清蛋白及其胃蛋白酶消化产物对二肽基肽酶-IV(dipeptidyl peptidase IV, DPP-IV)具有抑制作用, 并激活胰岛素受体, 促进葡萄糖摄取<sup>[50]</sup>; 骆驼乳蛋白可直接作用于胰岛素受体, 从而增强其信号传导<sup>[51]</sup>; 骆驼乳含有的高水平维生素(维生素 A、B<sub>2</sub>、C 和 E)是良好的抗氧化剂, 富含的矿物质(如钠、钾、铜、镁和锌)可去除自由基, 具有抗氧化作用, 缓解糖尿病并发症的发生发展<sup>[52]</sup>。

## 2.2 低致敏性

牛乳蛋白是引起婴幼儿过敏的最主要蛋白质<sup>[53]</sup>, 酪蛋白(特别是  $\alpha$ <sub>S1</sub>-酪蛋白)和  $\beta$ -乳球蛋白是牛乳最主要的致敏原<sup>[18]</sup>。而骆驼乳不含  $\beta$ -乳球蛋白、 $\alpha$ <sub>S1</sub>-酪蛋白占比低的特性与人乳类似, 是骆驼乳致敏性低的主要原因<sup>[18]</sup>。

印度进行的一项前瞻性队列研究对 35 名患有牛乳过敏的儿童进行了调查, 结果表明 80%的儿童饮用骆驼乳后不会发生任何过敏反应<sup>[54]</sup>。对牛乳过敏患者进行牛乳和骆驼乳的食物抗原点刺试验, 结果显示所有患者的全脂牛乳实验呈阳性, 而骆驼乳均呈阴性<sup>[55]</sup>。TALARICO 等<sup>[56]</sup>的研究中, 牛乳过敏儿童饮用不同乳后进行皮肤点刺实验, 与其他哺乳动物的乳相比, 骆驼乳的交叉反应较低。牛乳过敏儿

童对骆驼乳和山羊乳的阳性发生率分别为 18.4%和 63.2%, 提示对牛乳过敏儿童而言, 选择骆驼乳比山羊乳更安全<sup>[57]</sup>。骆驼乳不含  $\beta$ -乳球蛋白是其致敏性较低的最重要原因<sup>[58]</sup>。

## 2.3 降血压活性

研究发现, 高盐饮食诱导的高血压大鼠以 5 mL/kg 剂量灌胃骆驼乳 4 周后, 血压升高、脉搏快等不良症状得以改善, 血浆总胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白胆固醇水平显著降低, 下调了高盐饮食诱导引起的血糖、血清胰岛素水平和胰岛素抵抗指数的升高, 骆驼乳补充组对各指标的改善效果与正常饮食组、药物治疗组(二甲双胍+硝苯地平)相比无显著性差异<sup>[6]</sup>。给予自发性高血压小鼠脱脂发酵骆驼乳(80、240、1200 mg/kg), 2 h 后即可观察到降低收缩压的作用并持续至 8 h, 高剂量(1200 mg/kg)的发酵脱脂骆驼乳与卡托普利(50 mg/kg)的效果类似。高血压小鼠饮用 20 d 后, 其体重、血压有效降低, 心率改善, 血浆中 ACE 酶活性降低<sup>[59]</sup>。

血管紧张素 I-转换酶(angiotension I-converting enzyme, ACE)是一种调节血压的二肽羧基肽酶, 骆驼乳的降血压活性与其释放的 ACE 酶抑制肽有关。利用鼠李糖乳杆菌分别发酵牛乳和骆驼乳, 可释放牛乳和骆驼乳 ACE 酶抑制肽, 且发酵骆驼乳的 ACE 酶抑制活性强于发酵牛乳<sup>[60]</sup>。利用蛋白酶 K 水解骆驼乳酪蛋白, 经分离纯化得到 ACE 抑制肽(半数抑制浓度为 36  $\mu$ g/mL), 表明骆驼乳酪蛋白是 ACE 酶抑制肽的潜在来源<sup>[61]</sup>。骆驼乳完整酪蛋白和  $\beta$ -酪蛋白经胃蛋白酶酶解后, ACE 酶抑制活性均较酶解前显著增强, 这可能与骆驼乳  $\beta$ -酪蛋白氨基酸组成密切相关, 骆驼乳  $\beta$ -CN 的一级序列中脯氨酸含量最高, 占总氨基酸的 17%, 可作为降血压药物的天然来源<sup>[62]</sup>。ACE 酶含有 3 个活性位点区域, 被认为是主要的活性残基, 其中包括区域 S1 的 Ala<sub>354</sub>、Glu<sub>384</sub> 和 Tyr<sub>523</sub>, 区域 S2 的 Gln<sub>281</sub>、His<sub>353</sub>、Lys<sub>511</sub>、His<sub>513</sub> 和 Tyr<sub>520</sub> 以及区域 S1' 的 Glu<sub>162</sub>。骆驼乳蛋白经木瓜蛋白酶酶解后, 鉴定得到多条肽段, 分子对接结果表明多肽 SHSPLAGFR、LTMPQWW、CLSPLQMR 和 CLSPLQFR 能够与 ACE 酶的活性位点结合, 发挥 ACE 酶抑制活性<sup>[63]</sup>。

## 2.4 抗氧化活性

乳清蛋白(特别是乳铁蛋白)、酪蛋白及其生物活性肽是骆驼乳的主要抗氧化成分<sup>[64]</sup>。骆驼乳可减轻肝炎、癌症等患者的氧化应激反应<sup>[8,65]</sup>, 还可以通过抑制丝裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinase, MAPK)、核因子  $\kappa$ B (nuclear factor kappa-B, NF- $\kappa$ B)和 PI3K/Akt/eNOS 信号通路, 缓解氧化应激, 减少细胞凋亡<sup>[8,66-67]</sup>。用骆驼乳处理四氯化碳所致氧化应激的大鼠肝细胞, 其抗氧化基因表达显著上升, 过氧化氢酶(catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶和谷胱甘肽转移酶水平高于未经骆驼乳处理组, 提示骆驼乳可降低四氯化碳引起的氧化应激<sup>[8]</sup>。骆驼乳经蛋白酶消化、分离获得的多肽可显著增加 HepG2 细胞的 CAT 和 SOD 基因

表达,表明骆驼乳消化产生的生物活性肽具有抗氧化和自由基清除功能<sup>[68]</sup>。

## 2.5 调节肠道菌群

近年来,食物、疾病和肠道菌群之间的相互作用被广泛研究。肠道菌群组成和功能变化与机体的物质和能量代谢、肠道屏障、免疫功能和炎症等密切相关<sup>[69]</sup>。食物的营养物质可被不同的微生物选择性利用,调节肠道菌群的组成和结构,肠道菌群产生的代谢产物,如短链脂肪酸(short-chain fatty acids, SCFA)、胆汁酸、胆碱、脂多糖等,也可以通过各种信号通路影响宿主健康<sup>[70]</sup>。

评估骆驼乳对肠道菌群的影响可为骆驼乳功能活性的研究提供依据。给小鼠以 10 mL/kg 的剂量灌胃骆驼乳 4 周后,肠道中异杆菌属、阿克曼氏菌属和双歧杆菌属的丰度升高<sup>[71]</sup>,罗姆布茨菌、乳酸杆菌、绿脓杆菌和脱硫弧菌丰度减少。饮用骆驼乳可缓解如牛乳过敏、结肠炎、酒精性肝损伤、肠道菌群紊乱等多种健康问题。牛乳蛋白致敏小鼠的肠道黏膜结构明显改变,淋巴细胞浸润明显,绒毛萎缩,乳酸菌丰度降低。致敏小鼠饲喂骆驼乳一周后,绒毛的外观和结构恢复至正常状态,乳酸菌丰度增加,肠杆菌及厌氧菌减少,表明骆驼乳具有恢复肠道屏障、保护肠道黏膜、改善过敏引起的肠道菌群改变等功能<sup>[72]</sup>。灌胃 10 mL/kg 的骆驼乳对葡聚糖硫酸钠诱导的小鼠结肠炎具有保护作用,即改善体重减轻和结肠缩短、降低炎症因子的表达、抑制肠上皮细胞凋亡、减轻结肠组织损伤、维持肠道屏障功能,同时骆驼乳通过增加肠道菌群多样性、增加有益菌的丰度、减少拟杆菌属和志贺氏菌属的数量,有效调节结肠炎小鼠的肠道菌群<sup>[73]</sup>。骆驼乳可以显著提高慢性酒精性肝损伤小鼠结肠肠道菌群的丰度,调整肠道菌群结构:在门水平上,显著提高拟杆菌门的丰度,降低厚壁菌门的丰度;属水平上,显著提高副拟杆菌属、拟杆菌属、阿克曼菌属的丰度。因此,骆驼乳可作为调节肠道菌群的功能性乳制品,预防慢性酒精性肝损伤引起的肠道屏障功能障碍<sup>[74-75]</sup>。

## 3 骆驼乳的热稳定性

热处理是乳制品加工中的重要步骤,有效延长产品保质期的同时保持其营养特性。热处理过程中水分的蒸发使蛋白质、脂肪和总固形物浓度增加,不同程度地导致蛋白质变性、交联等复杂变化<sup>[76]</sup>。随着加热强度增加,变性的乳清蛋白会与其他蛋白质分子发生交联,其中赖氨酸残基与乳糖发生美拉德反应,形成高分子聚集体,影响乳的营养和感官特性<sup>[77]</sup>。与牛乳和牛水乳相比,骆驼乳在高温(100~140°C)下的热稳定性较差<sup>[78]</sup>,骆驼乳在其天然 pH 下进行 121°C/15 min 强度的热处理会导致蛋白质变性沉淀<sup>[79]</sup>。骆驼乳特殊的成分组成及特性导致其热稳定性不同于其他乳,因此为开发适应骆驼乳产品的热处理技术,研究骆驼乳成分的热稳定性及其在热处理过程中的功能活性十分必要。

## 3.1 热处理对骆驼乳蛋白质的影响

乳的热稳定性是确定加工热处理强度的重要参数<sup>[80]</sup>。蛋白质是骆驼乳营养价值及发挥生物学功能的重要基础,骆驼乳中的免疫球蛋白、乳铁蛋白、溶菌酶等活性成分易受热处理、干燥等加工条件的影响<sup>[81]</sup>,因此骆驼乳活性成分和生物学功能的保留程度是确定骆驼乳相关产品热处理技术的重要指标。

### 3.1.1 热处理对骆驼乳酪蛋白的影响

酪蛋白是乳中最丰富的蛋白质,在乳中以酪蛋白胶束(casein micelles, CMs)的形式存在。CMs 主要由钙、磷酸盐和酪蛋白组成。 $\kappa$ -CN 位于 CMs 的表面,对胶束的稳定性起着至关重要的作用<sup>[82]</sup>。骆驼乳酪蛋白的稳定性高于乳清蛋白,80°C 热处理 60 min 对骆驼乳的乳清蛋白有显著影响,而酪蛋白在相同的加热条件下保持完整<sup>[83]</sup>。相比于生骆驼乳,经过 63°C/30 min 和 90°C/15 min 热处理的骆驼乳平均酪蛋白胶束减小, $\alpha_{S1}$ -酪蛋白、 $\alpha_{S2}$ -酪蛋白和  $\beta$ -酪蛋白的相对丰度均下降<sup>[84]</sup>。骆驼乳  $\kappa$ -酪蛋白对高温敏感,在高于 100°C/1 min 的热处理强度下完全丧失, $\alpha$ -CN 和  $\beta$ -CN 的热稳定性强于  $\kappa$ -酪蛋白<sup>[85]</sup>。骆驼乳酪蛋白中富含色氨酸、酪氨酸、赖氨酸、组氨酸和蛋氨酸,其酪蛋白及水解物可以清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基,发挥抗氧化活性<sup>[86]</sup>。骆驼乳酪蛋白在 100°C 加热 3 min 后, $\alpha$ -CN 和  $\beta$ -CN 含量降低,自由基清除活性显著下降,说明其中的抗氧化活性成分降解<sup>[87]</sup>。

### 3.1.2 热处理对骆驼乳乳清蛋白的影响

$\alpha$ -La 是骆驼乳的主要乳清蛋白,热变性温度约为 73.8°C<sup>[88]</sup>,80°C 热处理 30 min 后由于变性、聚集等作用导致含量下降<sup>[85]</sup>,90°C 加热 5 min 导致 33% 的骆驼乳  $\alpha$ -La 变性<sup>[89]</sup>,经 144°C/5 s 热处理可使骆驼乳中 65% 的  $\alpha$ -La 变性<sup>[81]</sup>。LZ、LF 和 IgG 是骆驼乳中重要的活性蛋白,发挥抗菌、抗氧化等多种生物学功能,其耐热性: LZ>LF>IgG<sup>[90]</sup>。65°C/30 min 加热强度对骆驼乳 LZs 和 LFs 无显著影响,但 IgGs 活性显著丧失,75°C/30 min 加热处理使骆驼乳 IgG 的活性丧失率为 68.7%,85°C/30 min 使 LF 活性全部丧失,此强度下 LZs 活性丧失率为 56%<sup>[90]</sup>。

## 3.2 骆驼乳的热处理

目前,乳制品生产中基于热处理杀菌方式主要有两种:超高温灭菌(ultra-high temperature, UHT)和巴氏杀菌。UHT 能够有效杀灭多种病原菌和孢子<sup>[91]</sup>,但导致骆驼乳中 65% 的  $\alpha$ -La 变性,还破坏多种其他活性成分,发生蛋白质沉淀<sup>[81]</sup>。为实现 UHT 骆驼乳商业化,如何使得经 UHT 处理后的骆驼乳蛋白质保持稳定是关键,已有研究通过增加  $\kappa$ -CN 含量、添加磷酸盐或钙离子螯合剂减少钙含量以增加 UHT 骆驼乳的热稳定性<sup>[92]</sup>。巴氏杀菌分为高温短时巴氏杀菌(high-temperature short-time, HTST)和低温长时巴氏杀菌(low-temperature long-time, LTLT)。HTST 杀菌条件为 72~85°C 下杀菌 15 s,而 LTLT 的杀菌条件为 60°C 下杀菌至

少 30 min。骆驼乳清蛋白在超过 63°C 的温度下变性<sup>[93]</sup>, 易在加工设备中形成残留物, 积累在清洁不足的加工设备中, 携带更多的腐败细菌, 并带来产品的不良风味<sup>[94]</sup>。使用 LTLT 杀菌的骆驼乳易形成蒸煮味<sup>[95]</sup>。目前, 巴氏杀菌是骆驼乳制品的主要杀菌方法, LTLT 在保证驼乳制品安全性的同时, 更好保留免疫球蛋白、乳铁蛋白等活性物质<sup>[96]</sup>。适应于骆驼乳的热处理方法仍待探究。

## 4 总 结

骆驼乳是均衡营养的良好来源, 其成分较牛乳更接近于母乳。高含量的  $\beta$ -酪蛋白和不饱和脂肪酸、富含乳铁蛋白、溶菌酶、免疫球蛋白等生物活性物质, 不含致敏的  $\beta$ -乳球蛋白等特点使骆驼乳备受青睐。骆驼乳在预防和改善多种疾病方面表现出多种生理活性, 尤其是改善糖尿病和高血压的相关症状、抑菌、抗氧化、调节肠道微生物等功能。骆驼乳的营养价值及生物学功能使得骆驼乳及其衍生产品在功能食品的开发中具有广泛的应用前景。热处理作为加工的重要环节, 对骆驼乳的物理化学性质及营养成分产生一定影响, 骆驼乳相关产品的热处理技术得到广泛重视。随着研究的深入, 骆驼乳相关制品的种类及功能呈现多元、广泛、综合性的发展趋势, 骆驼乳的营养和健康价值逐步显现, 相关加工工艺也将愈发完备。

## 参考文献

- [1] FAYE B. Role, distribution and perspective of camel breeding in the third millennium economies [J]. *Emir J Food Agric*, 2015, 27(4): 318–327.
- [2] KULA J. Medicinal values of camel milk [J]. *Int J Vet Sci Res*, 2016, 2(1): 18–25.
- [3] EL-AGAMY EI. Bioactive components in camel milk [J]. *Bioact Comp Milk Dairy Prod*, 2009, 107: 159–192.
- [4] HINZ K, O'CONNOR PM, HUPPERTZ T, *et al.* Comparison of the principal proteins in bovine, caprine, buffalo, equine and camel milk [J]. *J Dairy Res*, 2012, 79(2): 185–191.
- [5] ALKURD R, HANASH N, KHALID N, *et al.* Effect of camel milk on glucose homeostasis in patients with diabetes: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Nutrients*, 2022, 14(6): 1245–1269.
- [6] MAINASARA AS, ISA SA, DANDARE A, *et al.* Blood pressure profile and insulin resistance in salt-induced hypertensive rats treated with camel milk [J]. *Mediterr J Nutr Meta*, 2016, 9(1): 75–83.
- [7] ABUSHELLABI A, AL-RUMAITHI HO, OLAIMAT AN, *et al.* Inhibitory effect of camel milk on *Cronobacter sakazakii* [J]. *J Food Saf*, 2017, 37(4): 12343.
- [8] ARAB HH, SALAMA SA, MAGHRABI IA. Camel milk ameliorates 5-fluorouracil-induced renal injury in rats: Targeting MAPKs, NF- $\kappa$ B and PI3K/Akt/eNOS pathways [J]. *Cell Physiol Biochem*, 2018, 46(4): 1628–1642.
- [9] YOUCEF N, SAMIA A, WAFAA D, *et al.* Camel milk modulates  $\alpha$ -lactalbumin induced changes in the gut microbiota in a murine model of cow's milk allergy [J]. *South Asian J Exp Biol*, 2021, 11(6): 710–715.
- [10] KONUSPAYEVA GS. Health and environmental benefits of camel products: Camel milk composition and nutritional value [M]. Hershey: IGI Global, 2020.
- [11] MOHAMED H, JOHANSSON M, LUNDH A, *et al.* Caseins and  $\alpha$ -lactalbumin content of camel milk (*Camelus dromedarius*) determined by capillary electrophoresis [J]. *J Dairy Sci*, 2020, 103(12): 11094–11099.
- [12] MOHAMED H, RANASINGHE M, AMIR N, *et al.* A study on variability of bioactive proteins in camel (*Camelus dromedarius*) milk: Insulin, insulin-like growth factors, lactoferrin, immunoglobulin G, peptidoglycan recognition protein-I, lysozyme and lactoperoxidase [J]. *Int J Dairy Technol*, 2022, 75(2): 289–297.
- [13] MOHAMED H, NAGY P, AGBABA J, *et al.* Use of near and mid infra-red spectroscopy for analysis of protein, fat, lactose and total solids in raw cow and camel milk [J]. *Food Chem*, 2021, 334: 127436.
- [14] HAILU Y, HANSEN EB, SEIFU E, *et al.* Functional and technological properties of camel milk proteins: A review [J]. *J Dairy Res*, 2016, 83: 422–429.
- [15] AHAMAD SR, RAISH M, AHMAD A, *et al.* Potential health benefits and metabolomics of camel milk by GC-MS and ICP-MS [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2017, 175(2): 322–330.
- [16] IDREES EM, ISHAG IA, EISA MO. Factors affecting chemical properties of camel milk [J]. *Scientia*, 2016, 16(2): 49–53.
- [17] MATI A, SENOUSI-GHEZALI C, ZENNIA SSA, *et al.* Dromedary camel milk proteins, a source of peptides having biological activities-A review [J]. *Int Dairy J*, 2017, 73: 25–37.
- [18] ZHAO S, PAN F, CAI S, *et al.* Secrets behind protein sequences: Unveiling the potential reasons for varying allergenicity caused by caseins from cows, goats, camels, and mares based on bioinformatics analyses [J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(3): 2481.
- [19] ZHAO D, BAI Y, NIU Y. Composition and characteristics of Chinese Bactrian camel milk [J]. *Small Ruminant Res*, 2015, 127: 58–67.
- [20] OMAR A, HARBOURNE N, ORUNA-CONCHA MJ. Quantification of major camel milk proteins by capillary electrophoresis [J]. *Int Dairy J*, 2016, 58: 31–35.
- [21] UVERSKY VN, EL-FAKHARANY EM, ABU-SERIE MM, *et al.* Divergent anticancer activity of free and formulated camel milk  $\alpha$ -lactalbumin [J]. *Cancer Invest*, 2017, 35(9): 610–623.
- [22] SOLEIMANI S, ZIBAEI S, ANVARI M. Evaluation of the effect of lactoferrin obtained from lactoferrin on *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* bacteria [J]. *Biol J Microorganism*, 2022. <https://doi.org/10.22108/bjm.2022.132468.1445>
- [23] HABIB HM, IBRAHIM WH, SCHNEIDER-STOCK R, *et al.* Camel milk lactoferrin reduces the proliferation of colorectal cancer cells and exerts antioxidant and DNA damage inhibitory activities [J]. *Food Chem*, 2013, 141(1): 148–152.
- [24] KANWAR JR, ROY K, PATEL Y, *et al.* Multifunctional iron bound lactoferrin and nanomedicinal approaches to enhance its bioactive functions [J]. *Molecules*, 2015, 20(6): 9703–9731.
- [25] ALMEHDAR HA, ABD EN, MATTAR EH, *et al.* Exploring the mechanisms by which camel lactoferrin can kill *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* and *Shigella sonnei* [J]. *Peer J*, 2023, 11: 14809.
- [26] BAKRY IA, YANG L, FARAG MA, *et al.* A comprehensive review of the composition, nutritional value, and functional properties of camel milk fat [J]. *Foods*, 2021, 10(9): 2158.
- [27] ZOU X, HUANG J, JIN Q, *et al.* Lipid composition analysis of milk fats from different mammalian species: Potential for use as human milk fat substitutes [J]. *J Agric Food Chem*, 2013, 61(29): 7070–7080.
- [28] VIRTANEN JK, MURSU J, TUOMAINEN TP, *et al.* Dietary fatty acids and risk of coronary heart disease in men: The kuopio ischemic heart disease risk factor study [J]. *Arterioscl Throm Vas*, 2014, 34(12): 2679–2687.
- [29] WEI W, JIN Q, WANG X. Human milk fat substitutes: Past achievements

- and current trends [J]. *Prog Lipid Res*, 2019, 74: 69–86.
- [30] TENG F, WANG P, YANG L, *et al.* Quantification of fatty acids in human, cow, buffalo, goat, yak, and camel milk using an improved one-step GC-FID method [J]. *Food Anal Method*, 2017, 10(8): 2881–2891.
- [31] KAUR KK, ALLAHBADIA G, SINGH M. Synthesis and functional significance of poly unsaturated fatty acids (PUFA's) in body [J]. *Acta Sci Nutr Health*, 2018, 2(4): 43–50.
- [32] BERTON A, ROUVELLAC S, ROBERT B, *et al.* Effect of the size and interface composition of milk fat globules on their *in vitro* digestion by the human pancreatic lipase: Native versus homogenized milk fat globules [J]. *Food Hydrocolloid*, 2012, 29(1): 123–134.
- [33] EL-ZEINI HM. Microstructure, rheological and geometrical properties of fat globules of milk from different animal species [J]. *Pol J Food Nutr Sci*, 2006, 56(2): 147–154.
- [34] MEENA S, RAJPUT YS, SHARMA R. Comparative fat digestibility of goat, camel, cow and buffalo milk [J]. *Int Dairy J*, 2014, 35(2): 153–156.
- [35] STAHL T, SALLMANN HP, DUEHLMEIER R, *et al.* Selected vitamins and fatty acid patterns in dromedary milk and colostrums [J]. *J Camel Pract Res*, 2006, 13(1): 53–57.
- [36] CARR AC, MAGGINI S. Vitamin C and immune function [J]. *Nutrients*, 2017, 9(11): 1211–1235.
- [37] FAYE B, KONUSPAYEVA G, BENGOUNI M. Vitamins of camel milk: A comprehensive review [J]. *J Camelid Sci*, 2019, 12: 17–32.
- [38] MOSTAFIDI M, MOSLEHISHAD M, PIRAVIVANAK Z, *et al.* Evaluation of mineral content and heavy metals of dromedary camel milk in Iran [J]. *Ciencia Tecnol Alime*, 2016, 36(4): 717–723.
- [39] ZOU Z, DULEY JA, COWLEY DM, *et al.* Comprehensive biochemical and proteomic characterization of seasonal Australian camel milk [J]. *Food Chem*, 2022, 381: 132297.
- [40] HASCHKA D, HOFFMANN A, WEISS G. Iron in immune cell function and host defense [C]. *Seminars in Cell & Developmental Biology*. Academic Press, 2021.
- [41] SUN H, SAEEDI P, KARURANGA S, *et al.* IDF diabetes atlas: Global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045 [J]. *Diabetes Res Clin Pract*, 2022, 183: 109119.
- [42] BELLOU V, BELBASIS L, TZOULAKI I, *et al.* Risk factors for type 2 diabetes mellitus: An exposure-wide umbrella review of meta-analyses [J]. *PLoS One*, 2018, 13(3): 0194127.
- [43] RODEN M, SHULMAN GI. The integrative biology of type 2 diabetes [J]. *Nature*, 2019, 576(7785): 51–60.
- [44] MARGDARINEJAD M, SANAGOO A, MOHAMMAD ZF, *et al.* Effect of camel milk in comparison with cow milk on blood glucose and lipid profile in patients with type 2 diabetes: A randomized clinical trial [J]. *J Nurse Midwifery Sci*, 2021, 8(1): 9–15.
- [45] ZHENG Y, WU F, ZHANG M, *et al.* Hypoglycemic effect of camel milk powder in type 2 diabetic patients: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. *Food Sci Nutr*, 2021, 9(8): 4461–4472.
- [46] FALLAH Z, EJTAHED HS, MIRMIRAN P, *et al.* Effect of camel milk on glycaemic control and lipid profile of patients with type 2 diabetes: Randomised controlled clinical trial [J]. *Int Dairy J*, 2020, 101: 104568.
- [47] KHAKHARIYA R, SAKURE AA, MAURYA R, *et al.* A comparative study of fermented buffalo and camel milk with anti-inflammatory, ACE-inhibitory and anti-diabetic properties and release of bio active peptides with molecular interactions: *In vitro*, *in silico* and molecular study [J]. *Food Biosci*, 2023, 52: 102373.
- [48] KILARI BP, MUDGIL P, AZIMULLAH S, *et al.* Effect of camel milk protein hydrolysates against hyperglycemia, hyperlipidemia, and associated oxidative stress in streptozotocin (STZ)-induced diabetic rats [J]. *J Dairy Sci*, 2021, 104(2): 1304–1317.
- [49] AYOUB MA, PALAKKOTT AR, ASHRAF A, *et al.* The molecular basis of the anti-diabetic properties of camel milk [J]. *Diabetes Res Clin Pract*, 2018, 146: 305–312.
- [50] ASHRAF A, MUDGIL P, PALAKKOTT A, *et al.* Molecular basis of the anti-diabetic properties of camel milk through profiling of its bioactive peptides on dipeptidyl peptidase IV (DPP-IV) and insulin receptor activity [J]. *J Dairy Sci*, 2021, 104(1): 61–77.
- [51] ABDULRAHMAN AO, ISMAEL MA, AL-HOSAINI K, *et al.* Differential effects of camel milk on insulin receptor signaling-toward understanding the insulin-like properties of camel milk [J]. *Front Endocrinol*, 2016, 7: 4.
- [52] OZTURK A, BALTACI AK, MOGULKOC R, *et al.* Effects of zinc deficiency and supplementation on malondialdehyde and glutathione levels in blood and tissues of rats performing swimming exercise [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2003, 94: 157–166.
- [53] FLOM JD, SICHERER SH. Epidemiology of cow's milk allergy [J]. *Nutrients*, 2019, 11(5): 1051–1059.
- [54] EHLAYEL MS, HAZEIMA KA, AL-MESAIFRI F, *et al.* Camel milk: An alternative for cow's milk allergy in children [C]. *Allergy and asthma proceedings*. Allergy and Asthma Proceedings, 2011.
- [55] RUBINO M, MAZZA GA, RUBINO S, *et al.* Camel milk: A possible alternative to infant formulas for patients with allergy to cow milk proteins [J]. *Digest Liver Dis*, 2014, 46: 116.
- [56] TALARICO V, MAZZA G, RUBINO M, *et al.* Camel milk: A possible alternative for children with cow's milk allergy? [J]. *Minerva Pediatr (Torino)*, 2019, 73(4): 289–293.
- [57] EHLAYEL M, BENER A, HAZEIMA K, *et al.* Camel milk is a safer choice than goat milk for feeding children with cow milk allergy [J]. *Int Schol Res Not*, 2011, 391641: 1–5.
- [58] MARYNIAK NZ, STAGE MH, BALLEGAARD ASR, *et al.* Camel milk cannot prevent the development of cow's milk allergy—a study in brown norway rats [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2023, 67(2): 2200359.
- [59] YAHYA MA, ALHAJ OA, AL-KHALIFAH AS. Antihypertensive effect of fermented skim camel (*Camelus dromedarius*) milk on spontaneously hypertensive rats [J]. *Nutr Hosp*, 2017, 34(2): 416–421.
- [60] MOSLEHISHAD M, EHSANI MR, SALAMI M, *et al.* The comparative assessment of ACE-inhibitory and antioxidant activities of peptide fractions obtained from fermented camel and bovine milk by *Lactobacillus rhamnosus* PTCC 1637 [J]. *Int Dairy J*, 2013, 29(2): 82–87.
- [61] RAHIMI M, GHAFFARI SM, SALAMI M, *et al.* ACE-inhibitory and radical scavenging activities of bioactive peptides obtained from camel milk casein hydrolysis with proteinase K [J]. *Dairy Sci Technol*, 2016, 96(4): 489–499.
- [62] SALAMI M, MOOSAVI-MOVAHEDI AA, MOOSAVI-MOVAHEDI F, *et al.* Biological activity of camel milk casein following enzymatic digestion [J]. *J Dairy Res*, 2011, 78(4): 471–478.
- [63] MUDGIL P, BABY B, NGOH YY, *et al.* Molecular binding mechanism and identification of novel anti-hypertensive and anti-inflammatory bioactive peptides from camel milk protein hydrolysates [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 112: 108193.
- [64] KHAN MZ, XIAO J, MA Y, *et al.* Research development on anti-microbial and antioxidant properties of camel milk and its role as an anti-cancer and anti-hepatitis agent [J]. *Antioxidants*, 2021, 10(5): 788–803.
- [65] KRISHNANKUTTY R, ISKANDARANI A, THERACHYIL L, *et al.* Anticancer activity of camel milk via induction of autophagic death in human colorectal and breast cancer cells [J]. *Asian Pac J Cancer Prev*,

- 2018, 19(12): 3501–3509.
- [66] ARAB HH, SALAMA SA, MAGHRABI IA. Camel milk attenuates methotrexate-induced kidney injury via activation of PI3K/Akt/eNOS signaling and intervention with oxidative aberrations [J]. *Food Funct*, 2018, 9(5): 2661–2672.
- [67] ARAB HH, SALAMA SA, ABDELGHANY TM, *et al.* Camel milk attenuates rheumatoid arthritis via inhibition of mitogen activated protein kinase pathway [J]. *Cell Physiol Biochem*, 2017, 43(2): 540–552.
- [68] HOMAYOUNI-TABRIZI M, SHABESTARIN H, ASOODEH A, *et al.* Identification of two novel antioxidant peptides from camel milk using digestive proteases: Impact on expression gene of superoxide dismutase (SOD) in hepatocellular carcinoma cell line [J]. *Int J Pept Res Ther*, 2016, 22(2): 187–195.
- [69] 王椰, 刘亚琴, 郑欣雨, 等. 叔丁基对苯二酚对小鼠肠道菌群的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(23): 7507–7515.  
WANG Y, LIU YQ, ZHENG XY, *et al.* Effects of tert-butyl hydroquinone on intestinal microbiota in mice [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 12(23): 7507–7515.
- [70] MCKENZIE C, TAN J, MACIA L, *et al.* The nutrition-gut microbiome-physiology axis and allergic diseases [J]. *Immunol Rev*, 2017, 278(1): 277–295.
- [71] WANG Z, ZHANG W, WANG B, *et al.* Influence of bactrian camel milk on the gut microbiota [J]. *J Dairy Sci*, 2018, 101(7): 5758–5769.
- [72] YOUCEF N, SAMIA A, WAFAA D, *et al.* Camel milk modulates  $\alpha$ -lactalbumin induced changes in the gut microbiota in a murine model of cow's milk allergy [J]. *South Asian J Exp Biol*, 2021, 11(6): 710–715.
- [73] HE J, GUO KJ, CHEN Q, *et al.* Camel milk modulates the gut microbiota and has anti-inflammatory effects in a mouse model of colitis [J]. *J Dairy Sci*, 2022, 105(5): 3782–3793.
- [74] 白路平, 乔向宇, 海勒, 等. 骆驼乳对慢性酒精性肝损伤小鼠肠道菌群的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(1): 78–87.  
BAI LP, QIAO XY, HAI L, *et al.* Effect of camel milk on the intestinal microbiota in mice with chronic alcoholic liver injury [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2022, 22(1): 78–87.
- [75] MING L, QI B, HAO S, *et al.* Camel milk ameliorates inflammatory mechanisms in an alcohol-induced liver injury mouse model [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 1–11.
- [76] SAKKAS L, MOUTAFI A, MOSCHOPOULOU E, *et al.* Assessment of heat treatment of various types of milk [J]. *Food Chem*, 2014, 159: 293–301.
- [77] SINGH H, HAVEA P. Advanced dairy chemistry: Thermal denaturation, aggregation and gelation of whey proteins [M]. California: Aspen Publishers, 2003.
- [78] SAGAR SP, MEHTA BM, WADHWANI K, *et al.* Evaluation of camel milk for selected processing related parameters and comparisons with cow and buffalo milk [J]. *Int J Health*, 2016, 3: 27–37.
- [79] RAYNAL-LJUTOVAC K, PARK YW, GAUCHERON F, *et al.* Heat stability and enzymatic modifications of goat and sheep milk [J]. *Small Ruminant Res*, 2007, 68: 207–220.
- [80] HO TM, ZOU Z, BANSAL N. Camel milk: A review of its nutritional value, heat stability, and potential food products [J]. *Food Res Int*, 2022, 153: 110870.
- [81] OMAR A, HARBOURNE N, ORUNA-CONCHA MJ. Effects of industrial processing methods on camel skimmed milk properties [J]. *Int Dairy J*, 2018, 84: 15–22.
- [82] REHAN F, AHMED N, GUPTA M. Casein nanomicelle as an emerging biomaterial-A comprehensive review [J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2019, 179: 280–292.
- [83] FELFOUL I, JARDIN J, GAUCHERON F, *et al.* Proteomic profiling of camel and cow milk proteins under heat treatment [J]. *Food Chem*, 2017, 216: 161–169.
- [84] HAN R, SHI R, YU Z, *et al.* Distribution and variation in proteins of casein micellar fractions response to heat-treatment from five dairy species [J]. *Food Chem*, 2021, 365: 130640.
- [85] CLEMENT CD. Effect of heat treatment on camel milk proteins [D]. UAE: United Arab Emirates University, 2018.
- [86] FARDET A, ROCK E. *In vitro* and *in vivo* antioxidant potential of milks, yoghurts, fermented milks and cheeses: A narrative review of evidence [J]. *Nutr Res Rev*, 2018, 31(1): 52–70.
- [87] HAMOUDA M, SBOUI A, SALHI I, *et al.* Effect of heat treatment on the antioxidant activities of camel milk alpha, beta and total caseins [J]. *Cell Mol Biol*, 2022, 68(7): 194–199.
- [88] LAJNAF R, PICART-PALMADE L, CASES E, *et al.* The foaming properties of camel and bovine whey: The impact of pH and heat treatment [J]. *Food Chem*, 2018, 240: 295–303.
- [89] GENENE A, HANSEN EB, ESHETU M, *et al.* Effect of heat treatment on denaturation of whey protein and resultant rennetability of camel milk [J]. *LWT*, 2019, 101: 404–409.
- [90] HATTEM HE. Effect of heat treatments and seasons of the year on the protective proteins in milk of different animals [J]. *Egypt J Agric Res*, 2017, 95: 287–297.
- [91] ANEMA SG. Age gelation, sedimentation, and creaming in UHT milk: A review [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2019, 18(1): 140–166.
- [92] KARLSSON MA, LUNDH A, INNINGS F, *et al.* The effect of calcium, citrate, and urea on the stability of ultra-high temperature treated milk: A full factorial designed study [J]. *Foods*, 2019, 8: 418.
- [93] BENABDELKAMEL H, MASOOD A, ALANAZI I, *et al.* Proteomic profiling comparing the effects of different heat treatments on camel (*Camelus dromedarius*) milk whey proteins [J]. *Int J Mol Sci*, 2017, 4(18): 721.
- [94] KONUSPAYEVA G, FAYE B. Recent advances in camel milk processing [J]. *Animals*, 2021, 11(4): 1045.
- [95] TAY T, CHUA Y. High temperature short time (HTST) camel milk pasteurization pilot plant [Z]. 2015.
- [96] OSELU S, EBERE R, ARIMI JM. Camels, camel milk, and camel milk product situation in Kenya in relation to the world [J]. *Int J Food Sci*, 2022, 2022: 1–15.

(责任编辑: 张晓寒 郑 丽)

## 作者简介



朱师晨, 硕士研究生, 主要研究方向为功能乳品方面研究。

E-mail: zhusc0910@163.com



毛学英, 博士, 教授, 主要研究方向为功能乳品方面研究。

E-mail: maoxueying@cau.edu.cn