

# 母乳、牛乳与主要小品种乳蛋白质组成及乳清蛋白二级结构比较

张永金<sup>1</sup>, 胡艳红<sup>1</sup>, 葛武鹏<sup>1\*</sup>, 丁一<sup>1</sup>, 何锐<sup>2</sup>, 袁亚娟<sup>3</sup>, 冶秀云<sup>1</sup>, 邱亮<sup>1</sup>  
(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 杨凌 712100; 2. 陕西百跃优利士乳业有限公司, 咸阳 712000;  
3. 咸阳市食品药品检验检测中心, 咸阳 712000)

**摘要:** **目的** 对比母乳、牛乳、山羊乳、绵羊乳、驼乳和驴乳的蛋白质组成及乳清蛋白二级结构, 厘清主要加工乳种与母乳的蛋白质差异。 **方法** 通过十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)和傅里叶变换红外光谱法(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)对比各乳种的蛋白质组成和乳清蛋白二级结构。 **结果** 绵羊乳中蛋白质、乳糖、脂肪含量均显著高于母乳、牛乳、山羊乳、驼乳和驴乳( $P < 0.05$ ), 母乳中蛋白质、乳糖、矿物质与驴乳各对应指标均无显著性差异( $P > 0.05$ ); 检测结果母乳酪蛋白:乳清蛋白(C:W)为 38.58:61.42, 牛乳 C:W 为 81.43:18.57, 山羊乳 C:W 为 61.14:38.86, 绵羊乳 C:W 为 68.42:31.58, 驼乳 C:W 为 56.16:43.84, 驴乳 C:W 为 8.91:91.09; 母乳与驼乳均含有较高的乳铁蛋白与血清白蛋白, 几乎不含  $\beta$ -乳球蛋白, 且乳清蛋白的  $\alpha$ -螺旋结构占比较高。 **结论** 母乳与主要加工乳种蛋白质组成与乳清蛋白二级结构不尽相同, 该研究为各种乳源高值化利用和纯度鉴别提供了参考依据。

**关键词:** 母乳; 小品种乳; 乳清蛋白; 蛋白二级结构

## Comparative study on the composition of protein and secondary structure of whey protein in human milk, milk and main small varieties of milk

ZHANG Yong-Jin<sup>1</sup>, HU Yan-Hong<sup>1</sup>, GE Wu-Peng<sup>1\*</sup>, DING Yi<sup>1</sup>, HE Rui<sup>2</sup>,  
YUAN Ya-Juan<sup>3</sup>, YE Xiu-Yun<sup>1</sup>, QIU Liang<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;  
2. Shaanxi Baiyue Youlishi Dairy Industry Co., Ltd., Xianyang 712000, China; 3. Xianyang Food and Drug Inspection and Testing Center, Xianyang 712000, China)

**ABSTRACT: Objective** To compare the composition of protein and secondary structure of whey protein in human, cow, goat, sheep, camel, donkey milk and clarify the differences between human milk and main proceeded milk. **Methods** The composition of protein and secondary structure of whey protein in different milk were investigated by sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). **Results** The content of lactose, fat and protein in sheep milk was significantly higher

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLNY02-09)、咸阳市重点研发计划项目(2021ZDYF-NY-0005)、校企合作项目(C200022001)

Fund: Supported by the Shaanxi Province Key Research and Development Project (2021ZDLNY02-09), the Xianyang City Key Research and Development Project (2021ZDYF-NY-0005), and the School-enterprise Cooperation Project (C200022001)

\*通信作者: 葛武鹏, 教授, 主要研究方向为乳制品加工与营养健康。E-mail: josephge@nwfufu.edu.cn

\*Corresponding author: GE Wu-Peng, Professor, College of Food Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China. E-mail: josephge@nwfufu.edu.cn

than that of human, cow, goat, camel and donkey milk ( $P < 0.05$ ), there was no significant difference in the content of lactose, protein and mineral between human milk and donkey milk ( $P > 0.05$ ). The results showed that the casein:whey protein (C:W) of human milk was 38.58:61.42, the C:W of cow milk was 81.43:18.57, the C:W of goat milk was 61.14:38.86, the C:W of sheep milk was 68.42:31.58, the C:W of camel milk was 56.16:43.84, and the C:W of donkey milk was 8.91:91.09. The content of lactoferrin and serum albumin in human and camel milk was high, they contained no  $\beta$ -lactoglobulin and high ratio of  $\alpha$ -helix structure. **Conclusion** There are differences in the composition of protein and secondary structure of whey protein in human milk and main proceeded milk, which can provide a theoretical basis for high-value utilization and purity identification of different milks.

**KEY WORDS:** human milk; small varieties of milk; whey protein; secondary structure of protein

## 0 引言

乳及乳制品是重要的蛋白质食物资源,在国人饮食中占比越来越大且在全球范围内超过 60 亿人消费乳制品<sup>[1]</sup>,《中国居民膳食指南(2022)》中指出多摄入乳制品对提高膳食质量与免疫力具有关键作用<sup>[2]</sup>。母乳是最合适人体营养需求的食物资源,含有丰富的乳糖、蛋白质、脂肪等营养物质,对生命早期的婴幼儿生长发育至关重要,能充分为婴儿保障营养供给并提高婴儿免疫力<sup>[3]</sup>。牛乳是如今市场上占比最大的乳种,营养丰富,为国人健康提供了强有力的支撑<sup>[4]</sup>。近年来以羊乳为代表的小品种乳异军突起,具有营养全面易吸收、低致敏性、功能因子多样等特点,逐渐进入消费者视野<sup>[5]</sup>。小品种乳主要包括山羊乳、绵羊乳、驼乳、马乳、牦牛乳、驴乳等<sup>[6]</sup>,不断被开发成特色产品以满足消费者的差异化需求。小品种乳因资源珍惜而价格较高,一些不法商人为了获得更高的利润,在小品种乳中掺入牛乳屡有发生,严重影响市场秩序<sup>[7-8]</sup>。因此,采用适当的方式鉴定不同乳源对稳定乳制品市场至关重要。就蛋白质组成而言,山羊乳更接近母乳,主要体现在乳清蛋白占比较大<sup>[9]</sup>,且富含多种短链脂肪酸、维生素、矿物质<sup>[10]</sup>,对大脑、骨骼生长发育发挥着重要作用,且致敏性弱于牛乳<sup>[11]</sup>;绵羊乳中蛋白质含量最高,且含有丰富的低聚糖、生物活性肽等,具有促进肠道蠕动、调节肠道菌群和抗氧化功效<sup>[12-15]</sup>;驼乳蛋白质质量特色鲜明,含有生物活性成分更为多样,主要体现在免疫球蛋白、乳铁蛋白、胰岛素样生长因子和溶菌酶等<sup>[16]</sup>,具有减脂、抗菌和免疫调节特性<sup>[17-19]</sup>。驴乳中乳清蛋白比例高、乳糖含量高、脂肪含量低、营养组成与母乳相似<sup>[20]</sup>,具有抗肿瘤、减轻氧化应激的作用<sup>[21]</sup>。不同乳的蛋白质组成不尽相同,蛋白二级结构往往存在差异,对不同乳的蛋白质组成分析及蛋白二级结构解析有助于乳源鉴定。

现阶段,对乳制品研究集中在牛乳蛋白成分及二级结构的测定,杨博睿等<sup>[22]</sup>发现牛乳蛋白主要由  $\alpha$ -酪蛋白、 $\beta$ -酪蛋白和  $\beta$ -乳球蛋白组成,刘爱成等<sup>[23]</sup>发现牛乳乳清蛋白

中  $\alpha$ -螺旋比例相对较低,  $\beta$ -转角相对比例较高,但对母乳及小品种乳蛋白组成及二级结构方面系统性研究相对缺乏,权威性文献很少。本研究以母乳、牛乳及 4 种典型小品种乳为原料,通过十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳法(sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)和傅里叶变换红外光谱法(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)分析母乳、牛乳、山羊乳、绵羊乳、驼乳和驴乳这 6 种乳的蛋白组成以及乳清蛋白二级结构,探究母乳、牛乳与小品种乳蛋白组成的差异,以期为不同乳源鉴别提供理论依据,也为功能性特色乳制品的开发利用提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

山羊乳、牛乳采自西北农林科技大学养殖试验基地(常乳,产后 1~6 月,  $n=10$ );绵羊乳采自甘肃省金昌市(常乳,产后 1~3 月,  $n=10$ );驼乳采自内蒙古阿拉善右旗某牧场(常乳,产后 1~3 月,  $n=10$ );驴乳来自新疆花旗奶业有限公司(常乳,产后 1~6 月,  $n=10$ );人乳:采集于陕西某医院健康母亲的乳汁,由授乳母亲自愿提供(常乳,分娩后 1~6 月,  $n=6$ );10~180 kDa 预染蛋白 Marker(北京兰博利德商贸有限公司);考马斯亮蓝染色液(上海碧云天生物技术有限公司);2×蛋白质上样缓冲液(北京索莱宝科技有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

Milkyway-S 多功能乳品分析仪(杭州陆恒生物科技有限公司);JY 600C 电泳仪(北京君意东方公司);GE1DOC XR+凝胶成像系统(美国 Bio-rad 公司);Vertex70 傅里叶变换红外光谱仪(德国 BRUKER 公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 乳样基本成分分析

参考吴仪凡等<sup>[24]</sup>的方法,用多功能乳品分析仪分别测定母乳、牛乳、山羊乳、绵羊乳、驼乳、驴乳的乳糖、脂肪、蛋白质、矿物质含量,每个乳样测定 3 次。

### 1.3.2 乳蛋白及乳清蛋白制备

分别取不同乳样 100 mL 进行离心(4°C、6000 r/min、30 min), 重复 3 次, 离心后去除上层脂肪与底层物质, 剩下的即为脱脂乳。脱脂乳用 1 mol/L HCl 调节 pH 至等电点(母乳调节 pH 至 4.3<sup>[24]</sup>, 山羊乳调节 pH 至 4.2<sup>[25]</sup>, 牛乳调节 pH 至 4.6<sup>[26]</sup>, 绵羊乳调节 pH 至 4.2<sup>[27]</sup>, 驼乳调节 pH 至 4.6<sup>[28]</sup>, 驴乳调节 pH 至 4.6<sup>[21]</sup>), 静置 30 min 后进行离心(4°C、8000 r/min、30 min), 重复 3 次, 离心后将上层乳清蛋白溶液进行真空冷冻干燥制得冻干粉, 用于后续实验<sup>[22]</sup>。

### 1.3.3 变性凝胶电泳

参考吴仪凡等<sup>[24]</sup>的方法并加以改进, 将样品的蛋白含量稀释至 2 mg/mL, 并与等量 2×蛋白质上样缓冲液混合, 在沸水中煮 15 min 后冷却, 之后在 6000 r/min、4°C 条件下离心 20 min, 取上清液用于实验。SDS-PAGE 浓缩胶质量分数为 4%, 分离胶质量分数为 12.5%, 标准蛋白质 Marker 上样量为 7 μL, 样品上样量为 5 μL, 设定浓缩胶电压 80 V, 分离胶电压 120 V。电泳结束后, 将凝胶完全浸入考马斯亮蓝染色液中, 在恒温振荡器中摇晃染色 60 min。染色结束后, 将凝胶完全浸入水中脱色, 间隔 0.5、1.0、2.0、8.0 h 换一次水, 直至蛋白条带清晰可见。用凝胶成像系统扫描并通过 Image J 软件进行灰度分析, 按公式(1)计算各中蛋白质的比例:

$$\text{某类蛋白质比例}/\% = \frac{\text{某乳某蛋白质条带灰度值}}{\text{某乳总乳蛋白条带灰度值}} \times 100 \quad (1)$$

### 1.3.4 乳清蛋白二级结构测定

参照刘爱成等<sup>[23]</sup>方法, 采用溴化钾压片法制样并送入检测室内扫描测定(扫描次数 32 次, 分辨率 4 cm<sup>-1</sup>)。测定后使用 OMNIC 8.2 软件对酰胺 I 带(1600~1700 cm<sup>-1</sup>)处理并通过 Peakfit 4.12 软件对所得曲线再处理, 最后根据波段与二级结构关系确定乳清蛋白二级结构组成。

### 1.3.5 数据处理

研究数据采用 Excel 软件汇总处理, 并用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析、Duncan's 多重比较, 结果以“平均值±标准偏差”表示,  $P < 0.05$  为显著水平。

## 2 结果与分析

### 2.1 乳基本成分差异分析

采用多功能乳品分析仪测定并结合 Duncan's 多重比较分析各类乳中营养成分的差异, 结果如表 1。绵羊乳的乳糖含量、脂肪含量、蛋白质含量、矿物质含量均显著高于母乳、牛乳、山羊乳、驼乳和驴乳( $P < 0.05$ ), 这与魏黎阳等<sup>[29]</sup>的报告一致。母乳的乳糖含量、蛋白质含量、矿物质含量与驴乳均无显著性差异( $P > 0.05$ ), 但母乳的脂肪含量显著高于驴乳( $P < 0.05$ ), 驴乳中未检出脂肪。牛乳的乳糖含量与矿物质含量显著高于山羊乳与驼乳( $P < 0.05$ ), 而驼乳的脂肪含量显著高于牛乳与山羊乳( $P < 0.05$ ), 山羊乳的蛋

白质含量显著高于牛乳与驼乳( $P < 0.05$ )。综上, 6 种乳的营养成分存在显著性差异。

表 1 6 种乳基本成分差异分析(% ,  $n=3$ )  
Table 1 Analysis on the difference of basic constituents of 6 kinds of milk (% ,  $n=3$ )

乳样	乳糖含量	脂肪含量	蛋白质含量	矿物质含量
母乳	3.44±0.01 <sup>c</sup>	0.42±0.02 <sup>c</sup>	3.64±0.01 <sup>b</sup>	0.59±0.01 <sup>c</sup>
牛乳	4.33±0.11 <sup>b</sup>	2.59±0.06 <sup>c</sup>	2.84±0.01 <sup>d</sup>	0.63±0.01 <sup>b</sup>
绵羊乳	4.79±0.01 <sup>a</sup>	5.52±0.01 <sup>a</sup>	5.05±0.01 <sup>a</sup>	0.79±0.01 <sup>a</sup>
山羊乳	3.27±0.06 <sup>d</sup>	1.84±0.10 <sup>d</sup>	3.45±0.06 <sup>c</sup>	0.54±0.01 <sup>d</sup>
驼乳	2.70±0.09 <sup>e</sup>	3.46±0.10 <sup>b</sup>	2.88±0.10 <sup>d</sup>	0.45±0.02 <sup>e</sup>
驴乳	3.46±0.01 <sup>c</sup>	-	3.65±0.01 <sup>b</sup>	0.57±0.01 <sup>c</sup>

注: 同一列中不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), -表示未检出, 下同。

### 2.2 乳蛋白组成分析

酪蛋白:乳清蛋白(C:W)是衡量动物源蛋白质质量的重要指标, 乳清蛋白占比越高, 表明该种乳源蛋白质越容易消化吸收, 母乳 C:W 为 4:6 是“黄金”标准<sup>[3]</sup>。由表 2 看出, 母乳 C:W 为 38.58:61.42, 与“黄金标准”相近, 山羊乳及绵羊乳中乳清蛋白占比更接近母乳, 表明其蛋白质质量较牛乳更优, 驴乳是一种特色鲜明的小品种乳源, 乳清蛋白比例甚至高过母乳, 但不能表明驴乳蛋白质质量更优, 亦即并不是乳清蛋白占比越高越好, 只有与母乳更接近, 才能说该种蛋白质更合适人体营养需求。

表 2 6 种乳酪蛋白与乳清蛋白的相对灰度比例(% ,  $n=3$ )  
Table 2 Relative gray ratio of casein and whey protein and in 6 kinds of milk (% ,  $n=3$ )

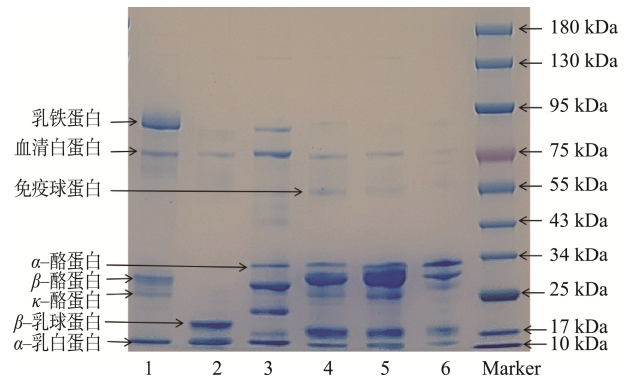
乳样	酪蛋白	乳清蛋白
母乳	38.58±1.01 <sup>e</sup>	61.42±1.01 <sup>b</sup>
牛乳	81.43±0.14 <sup>a</sup>	18.57±0.14 <sup>f</sup>
绵羊乳	68.42±0.44 <sup>b</sup>	31.58±0.44 <sup>c</sup>
山羊乳	61.14±0.48 <sup>c</sup>	38.86±0.48 <sup>d</sup>
驼乳	56.16±0.49 <sup>d</sup>	43.84±0.49 <sup>e</sup>
驴乳	8.91±0.23 <sup>f</sup>	91.09±0.23 <sup>a</sup>

由图 1 可知, 母乳、牛乳、山羊乳、绵羊乳、驼乳和驴乳的蛋白质主要由酪蛋白和乳清蛋白组成, 这与韩静雯等<sup>[30]</sup>的结果一致。总体上, 小分子量蛋白(小于 43 kDa)相对含量高于大分子量蛋白(大于 43 kDa)。

由表 3 可知, 母乳与驼乳均几乎不含有  $\beta$ -乳球蛋白, 且母乳与驴乳的  $\alpha$ -酪蛋白含量均很低, 而牛乳的  $\alpha$ -酪蛋白

含量显著高于其他乳( $P<0.05$ ),  $\alpha$ -酪蛋白和  $\beta$ -乳球蛋白均为致敏蛋白<sup>[31]</sup>, 这也是牛乳更容易引起蛋白质过敏的主要原因。绵羊乳的  $\beta$ -酪蛋白含量显著高于其他乳( $P<0.05$ ),  $\kappa$ -酪蛋白含量仅次于母乳。驴乳的  $\beta$ -乳球蛋白和  $\alpha$ -乳白蛋白含量显著高于其他乳( $P<0.05$ ), 但酪蛋白含量极低。

由图 2 可知, 母乳与驼乳均含有较高的乳铁蛋白与血清白蛋白含量, 且几乎不含有  $\beta$ -乳球蛋白。由表 4 可知, 母乳的乳铁蛋白含量显著高于其他乳( $P<0.05$ ), 而驼乳的血清白蛋白与免疫球蛋白显著高于其他乳( $P<0.05$ )。此外, 在 20~23 kDa 左右的分子量下可以清晰地观察驼乳中含有低分子量的免疫球蛋白(immune globulin, IgG), 这与 OMAR 等<sup>[32]</sup>描述一致。综上, 母乳、牛乳、山羊乳、绵羊乳、驼乳和驴乳的蛋白组成存在显著性差异。



注: 1 母乳; 2 驴乳; 3 驼乳; 4 山羊乳; 5 绵羊乳; 6 牛乳。

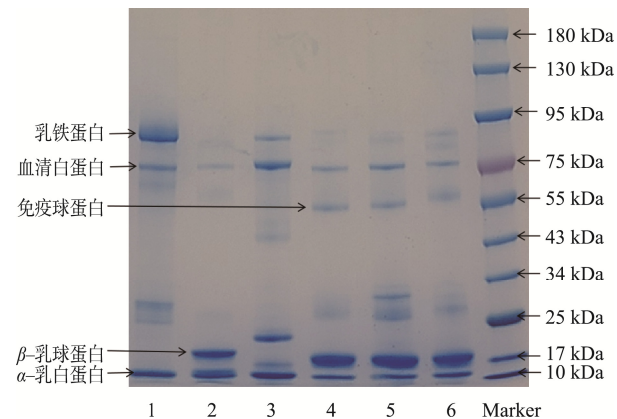
图 1 6 种乳蛋白质的 SDS-PAGE 图

Fig.1 SDS-PAGE of proteins in 6 kinds of milk

表 3 6 种乳蛋白灰度相对比例(% , n=3)

Table 3 Relative gray ratio of proteins in 6 kinds of milk (% , n=3)

乳样	$\alpha$ -酪蛋白	$\beta$ -酪蛋白	$\kappa$ -酪蛋白	$\beta$ -乳球蛋白	$\alpha$ -乳白蛋白
母乳	2.60±0.17 <sup>c</sup>	38.78±0.76 <sup>b</sup>	20.55±0.90 <sup>a</sup>	-	37.90±0.18 <sup>a</sup>
牛乳	31.25±0.30 <sup>a</sup>	21.31±0.19 <sup>d</sup>	6.18±0.42 <sup>c</sup>	29.27±0.41 <sup>c</sup>	8.10±0.10 <sup>e</sup>
绵羊乳	9.56±0.17 <sup>c</sup>	44.20±1.37 <sup>a</sup>	15.33±0.36 <sup>b</sup>	19.76±0.27 <sup>d</sup>	8.49±0.05 <sup>e</sup>
山羊乳	7.83±0.28 <sup>d</sup>	37.07±0.23 <sup>c</sup>	4.62±0.18 <sup>d</sup>	39.30±0.10 <sup>b</sup>	9.93±0.32 <sup>d</sup>
驼乳	13.33±0.70 <sup>b</sup>	37.04±0.32 <sup>c</sup>	3.28±0.15 <sup>e</sup>	-	20.21±0.12 <sup>c</sup>
驴乳	1.78±0.11 <sup>f</sup>	8.23±0.63 <sup>c</sup>	0.95±0.03 <sup>f</sup>	54.83±1.44 <sup>a</sup>	34.22±1.07 <sup>b</sup>



注: 1 母乳; 2 驴乳; 3 驼乳; 4 山羊乳; 5 绵羊乳; 6 牛乳。

图 2 6 种乳乳清蛋白的 SDS-PAGE 图

Fig.2 SDS-PAGE of whey proteins in 6 kinds of milk

### 2.3 乳清蛋白二级结构分析

由图 3 可知, 母乳、牛乳、山羊乳、绵羊乳、驼乳和驴乳乳清蛋白光谱图变化规律大体相同。将原谱图经过 OMNIC 8.2 软件和 Peakfit 4.12 处理, 得到酰胺 I 带拟合效果图 4。原谱图经去基线、去卷积和平滑拟合处理后, 通过各子峰与各二级结构的对应关系, 据峰面积计算并结合 Duncan's 多重比较得出二级结构的相对含量如表 5 所示。其中, 酰胺 I 带谱峰归属为: 1610~1640  $\text{cm}^{-1}$  和 1682~1700  $\text{cm}^{-1}$  为  $\beta$ -折叠; 1640~1650  $\text{cm}^{-1}$  为无规则卷曲; 1650~1660  $\text{cm}^{-1}$  为  $\alpha$ -螺旋; 1661~1681  $\text{cm}^{-1}$  为  $\beta$ -转角<sup>[23]</sup>。

由表 5 可知, 山羊乳、绵羊乳、驼乳、牛乳、驴乳和母乳乳清蛋白的二级结构包括  $\beta$ -折叠、无规则卷曲、 $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -转角组成且相对含量存在差异。母乳的  $\alpha$ -螺旋相对

表 4 6 种乳乳清蛋白灰度相对比例(% , n=3)

Table 4 Relative gray of whey proteins in 6 kinds of milk (% , n=3)

乳样	乳铁蛋白	血清白蛋白	免疫球蛋白	$\beta$ -乳球蛋白	$\alpha$ -乳白蛋白
母乳	53.36±0.86 <sup>e</sup>	12.61±0.48 <sup>c</sup>	7.39±0.41 <sup>f</sup>	-	26.64±0.14 <sup>b</sup>
牛乳	10.72±0.32 <sup>c</sup>	10.76±0.18 <sup>d</sup>	16.29±0.34 <sup>b</sup>	47.85±0.99 <sup>c</sup>	15.38±0.55 <sup>e</sup>
绵羊乳	5.14±0.70 <sup>d</sup>	14.98±0.32 <sup>b</sup>	14.54±0.48 <sup>c</sup>	50.59±0.39 <sup>b</sup>	14.75±0.19 <sup>d</sup>
山羊乳	5.28±0.06 <sup>d</sup>	9.03±0.12 <sup>c</sup>	11.62±0.20 <sup>d</sup>	56.77±0.48 <sup>a</sup>	17.31±0.23 <sup>c</sup>
驼乳	12.22±0.35 <sup>b</sup>	37.11±1.85 <sup>a</sup>	23.59±1.92 <sup>a</sup>	-	27.08±0.28 <sup>b</sup>
驴乳	3.11±0.15 <sup>e</sup>	7.17±0.05 <sup>f</sup>	9.27±0.25 <sup>c</sup>	48.40±0.45 <sup>c</sup>	32.04±0.41 <sup>a</sup>

含量显著高于驴乳、牛乳、绵羊乳和山羊乳( $P<0.05$ ), 仅次于驼乳; 驼乳和绵羊乳  $\beta$ -折叠相对含量无显著差异( $P>0.05$ ), 且显著高于山羊乳、牛乳、驴乳和母乳( $P<0.05$ )。山羊乳的  $\beta$ -转角相对含量显著高于其他乳( $P<0.05$ ), 驼乳几乎不含有无规则卷曲结构。

$\alpha$ -螺旋是蛋白质肽链主链骨架借助氢键, 绕着假象的中心轴, 卷曲形成的一种周期性螺旋状的蛋白质二级结构<sup>[33]</sup>。 $\alpha$ -螺旋的稳定性主要依靠氢键的维持。氢键的断裂, 使  $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -折叠结构向无规则卷曲和  $\beta$ -转角转化。 $\alpha$ -螺旋是球状蛋白质构象中的常见形式, 较多的  $\alpha$ -

螺旋对人体有利。由表 5 可知, 母乳乳清蛋白的  $\alpha$ -螺旋比例高,  $\beta$ -折叠比例低, 这与张熙桐等<sup>[34]</sup>结果一致。驼乳乳清蛋白的  $\alpha$ -螺旋相对含量最高,  $\beta$ -转角相对含量低, 因此驼乳的乳清蛋白二级结构更加接近于母乳。绵羊乳清蛋白  $\beta$ -转角相对含量最低, 有利于人体吸收利用。牛乳和山羊乳清蛋白的  $\alpha$ -螺旋相对含量很低,  $\beta$ -转角相对含量很高, 在人体中吸收利用效率较低。山羊乳、绵羊乳、驼乳、牛乳、驴乳和母乳的乳清蛋白各二级结构存在差异, 导致不同品种乳中蛋白质存在不同的营养特性和加工性能。

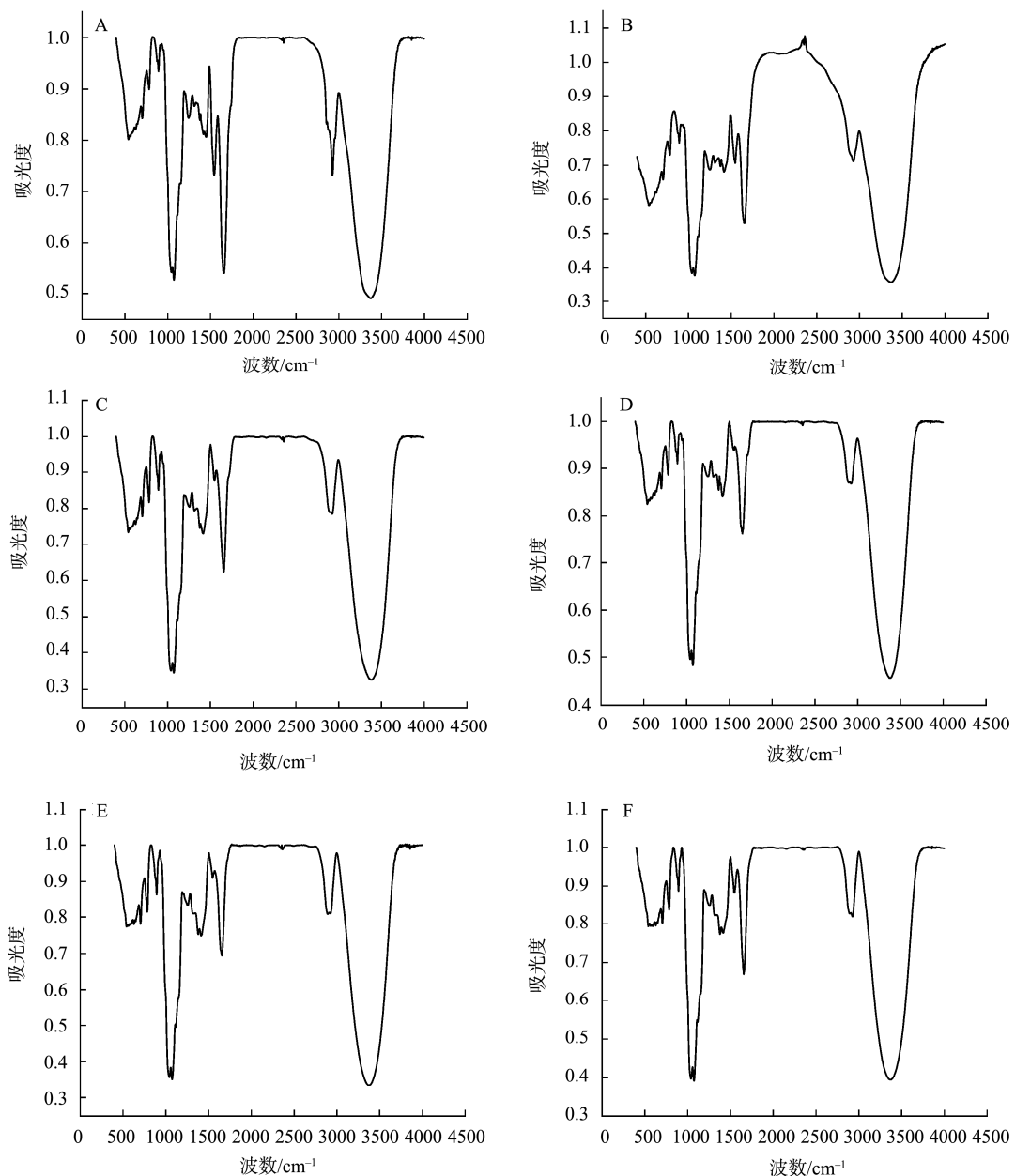


图 3 绵羊乳(A)、山羊乳(B)、驼乳(C)、牛乳(D)、驴乳(E)以及母乳(F)乳清蛋白二级结构光谱图

Fig.3 Secondary structure spectrograms of whey protein in sheep milk (A), goat milk (B), camel milk (C), cow milk (D), donkey milk (E) and human milk (F)

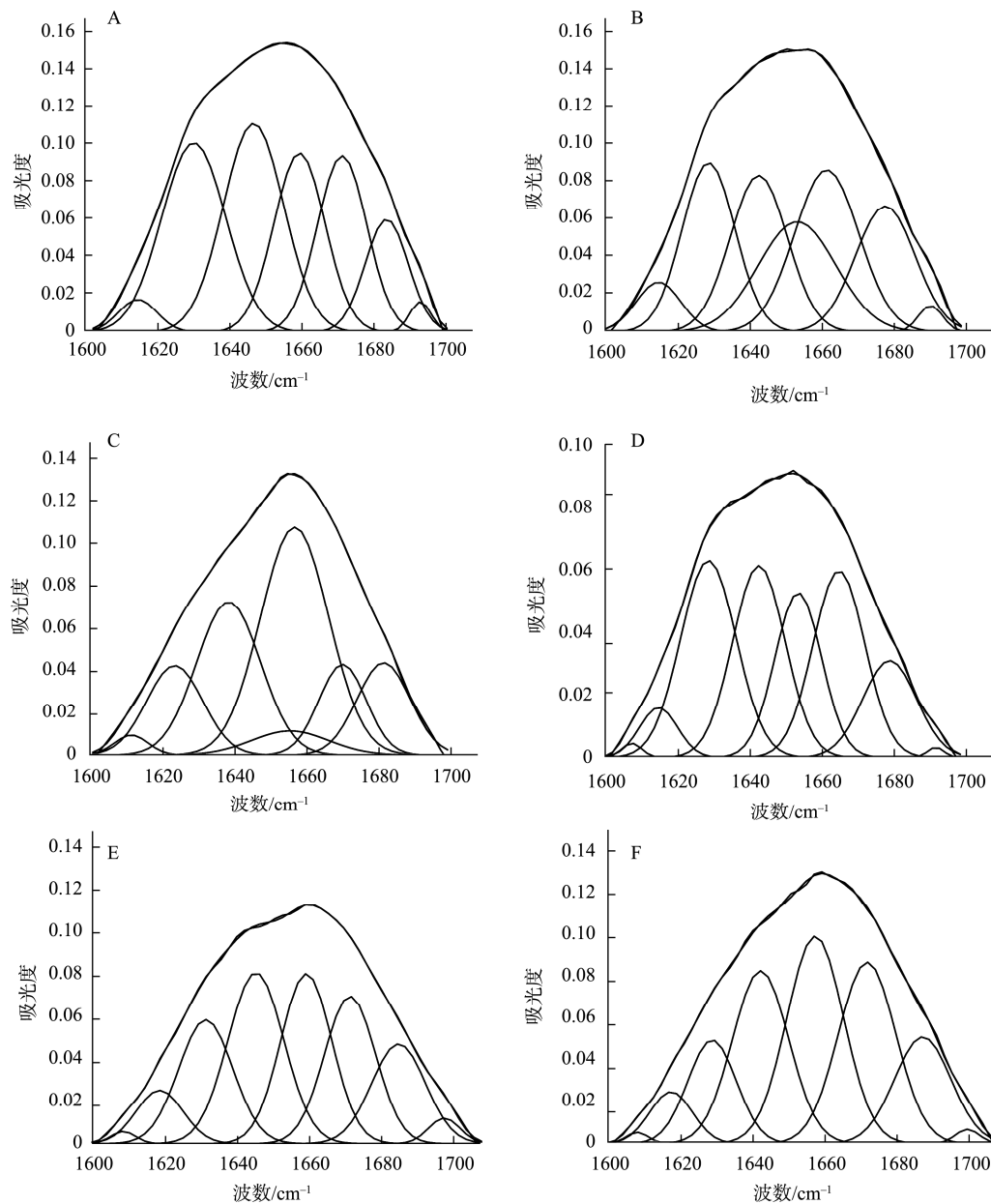


图4 绵羊乳(A)、山羊乳(B)、驼乳(C)、牛乳(D)、驴乳(E)以及母乳(F)乳清蛋白酰胺I带拟合效果

Fig.4 Amide I band curve-fitting results for whey protein in sheep milk (A), goat milk (B), camel milk (C), cow milk (D), donkey milk (E) and human milk (F)

表5 6种乳乳清蛋白蛋白酰胺I带分析结果(% , n=3)

Table 5 Analysis results of whey protein amide I bands of 6 kinds of milk (% , n=3)

乳样	二级结构相对含量			
	$\alpha$ -螺旋	$\beta$ -折叠	无规则卷曲	$\beta$ -转角
母乳	26.17±0.58 <sup>b</sup>	18.54±0.56 <sup>d</sup>	23.09±1.90 <sup>ab</sup>	32.93±0.36 <sup>b</sup>
牛乳	16.57±0.16 <sup>d</sup>	29.83±0.93 <sup>b</sup>	21.49±0.43 <sup>abc</sup>	32.11±0.34 <sup>bc</sup>
山羊乳	18.07±0.03 <sup>d</sup>	25.09±0.03 <sup>c</sup>	18.85±0.03 <sup>c</sup>	38.00±0.03 <sup>a</sup>
绵羊乳	18.11±0.44 <sup>d</sup>	39.72±1.44 <sup>a</sup>	24.71±0.82 <sup>a</sup>	17.46±0.18 <sup>c</sup>
驼乳	41.07±0.22 <sup>a</sup>	37.03±0.24 <sup>a</sup>	-	21.90±0.03 <sup>d</sup>
驴乳	22.79±1.86 <sup>c</sup>	22.28±1.89 <sup>c</sup>	21.38±0.45 <sup>bc</sup>	31.73±0.56 <sup>c</sup>

### 3 结 论

本研究对母乳、牛乳和小品种乳的营养成分、蛋白质组成和乳清蛋白二级结构进行检测分析, 就蛋白比例而言, 驴乳中酪蛋白含量低, 乳清蛋白含量高, 可用 C:W 值区别驴乳与其他乳源; 在蛋白组成方面, 牛乳中  $\alpha$ -酪蛋白含量高; 驼乳几乎不含有  $\beta$ -乳球蛋白, 而母乳不含有  $\beta$ -乳球蛋白与  $\alpha$ -酪蛋白, 因此可以通过  $\alpha$ -酪蛋白与  $\beta$ -乳球蛋白对牛乳、驼乳和母乳进行鉴别;  $\beta$ -折叠和  $\beta$ -转角结构分别在绵羊乳和山羊乳中比例最高, 可视为上述两种乳的标志性蛋白二级结构。本研究为国内乳品蛋白研究提供参考数据, 为小品种乳高值化利用及真伪鉴定提供参考。

### 参考文献

- [1] 李文斐, 张磊, 宋宇轩, 等. 绵羊、山羊和牛乳的营养成分比较分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 286–291.  
LI WF, ZHANG L, SONG YX, *et al.* Comparative analysis of nutritional components of sheep, goat and milk [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(24): 286–291.
- [2] 阴明杰, 吴丹. 论牛奶的营养价值与健康的密切关系[J]. 畜牧兽医科技信息, 2021, (4): 95–96.  
YIN MJ, WU D. On the close relation between milk's nutritional value and health [J]. *Anim Husb Vet Sci Technol Inform*, 2021, (4): 95–96.
- [3] 周文姬, 黄晓睿, 林倩清, 等. 不同母乳处理方法对母乳营养成分的影响[J]. 国际医药卫生导报, 2021, 27(13): 1959–1962.  
ZHOU WJ, HUANG XR, LIN QQ, *et al.* Effects of different breast milk treatments on the nutrition composition of breast milk [J]. *Int Med Health Rev*, 2021, 27(13): 1959–1962.
- [4] 孙璐, 崔占鸿. 牛乳溯源研究进展[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2022, 52(1): 50–55.  
SUN L, CUI ZH. Progress of cow milk traceability [J]. *Chin Qinghai J Anim Vet Sci*, 2022, 52(1): 50–55.
- [5] 任建存. 我国特色乳制品的营养功效与产业发展[J]. 中国乳业, 2021, (8): 34–39.  
REN JC. Nutritional efficacy and industrial development characteristic dairy products of China [J]. *China Dairy Ind*, 2021, (8): 34–39.
- [6] 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.  
JIE L, SU MY. Progress in research on nutritional composition of milk from minor dairy animals [J]. *Dairy Sci Technol*, 2021, 44(6): 58–62.
- [7] 付尚辰, 李玲, 郑卫民, 等. 掺假羊乳及其制品中牛乳的检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(8): 3000–3007.  
FU SC, LI L, ZHENG WM, *et al.* Research progress on adulteration detection technology of cow milk in goat milk and its products [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(8): 3000–3007.
- [8] 谢碧秀. 原料乳掺假检验技术研究进展[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(7): 101–102, 111.  
XIE BX. Research progress on raw milk adulteration inspection technology [J]. *Rural Econ Sci Technol*, 2020, 31(7): 101–102, 111.
- [9] RESTANI P, BALLABIO C, LORENZO CD, *et al.* Molecular aspects of milk allergens and their role in clinical events [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2009, 395(1): 47–56.
- [10] 李婧妍, 安乐, 韩波, 等. 羊乳制品中掺杂牛乳鉴别技术研究进展[J]. 中国乳品工业, 2021, 49(5): 6.  
LI JY, AN L, HAN B, *et al.* Recent advances in identification techniques of cow milk adulteration in goat milk products [J]. *China Dairy Ind*, 2021, 49(5): 6.
- [11] 姜玉池, 赵怡晴, 谢奎, 等. 山羊乳与牛乳配方乳粉的致敏性比较[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 96–104.  
JIANG YC, ZHAO YQ, XIE K, *et al.* Comparative study on the allergenicity of goat and bovine milk formula powders [J]. *Food Sci*, 2022, 43(7): 96–104.
- [12] WELSH G, RYDER K, BREWSTER J, *et al.* Comparison of bioactive peptides prepared from sheep cheese whey using a food-grade bacterial and a fungal protease preparation [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2017, 52(5): 1252–1259.
- [13] BOUDRY GL, HAMILTON MK, CHICHLOWSKI M, *et al.* Bovine milk oligosaccharides decrease gut permeability and improve inflammation and microbial dysbiosis in diet-induced obese mice [J]. *J Dairy Sci*, 2017, 100(4): 2471.
- [14] WELSH G, RYDER K, BREWSTER J, *et al.* Comparison of bioactive peptides prepared from sheep cheese whey using a food-grade bacterial and a fungal protease preparation [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2017, 52(5): 1252–1259.
- [15] ALBENZIO M, SANTILLO A, MARINO R, *et al.* Identification of peptides in functional Scamorza ovine milk cheese [J]. *J Dairy Sci*, 2015, 98(12): 8428–8432.
- [16] 陆范璟, 江龙, 陆东林. 驼初乳的营养成分浅析[J]. 中国乳业, 2020, (5): 81–83.  
LU FJ, JIANG L, LU DL. Nutritional composition of camel colostrum [J]. *China Dairy Ind*, 2020, (5): 81–83.
- [17] 杨晓宇, 陈锦屏, 张富新. 初乳中免疫球蛋白的研究进展[J]. 食品科学, 2006, (10): 582–588.  
YANG XY, CHEN JP, ZHANG FX. Research progress on the immunity globulin of colostrums [J]. *Food Sci*, 2006, (10): 582–588.
- [18] 李言言, 刘阿华, 王毅, 等. 山羊乳酪蛋白单克隆抗体的制备与鉴定[J]. 动物医学进展, 2019, 40(11): 4.  
LI YY, LIU AH, WANG Y, *et al.* Preparation and identification of monoclonal antibody against goat casein [J]. *Prog Vet Med*, 2019, 40(11): 4.
- [19] 王慧, 方洛云, 熊北海, 等. 牛乳生物活性成分及其研究进展[J]. 中国乳业, 2018, (8): 6.  
WANG H, FANG LY, XIONG BH, *et al.* Bioactive components and their research progress of cow milk [J]. *China Dairy Ind*, 2018, (8): 6.
- [20] 许晶辉, 王朝霞, 张富新, 等. 驴乳和马乳蛋白质组分及其消化特性[J]. 乳业科学与技术, 2020, 43(5): 1–7.  
XU JH, WANG ZX, ZHANG FX, *et al.* Composition and digestion characteristics of proteins in donkeys' milk and mares' milk [J]. *Dairy Sci Technol*, 2020, 43(5): 1–7.
- [21] 樊雨梅, 帖航, 解晓, 等. 驴乳粉蛋白的特性、结构与组成分析[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 221–227.  
FAN YM, TIE H, XIE X, *et al.* Analysis of characteristics, structure and composition of protein in donkey milk powder [J]. *Food Sci*, 2020, 41(12): 221–227.
- [22] 杨博睿, 张富新, 邵玉宇, 等. 牛乳、羊乳和人乳中的蛋白质组成及消

- 化特性研究[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(8): 6.
- YANG BR, ZHANG FX, SHAO YY, *et al.* Study on the composition and digestive properties of protein in cow milk, goat milk and breast milk [J]. *China Dairy Ind*, 2020, 48(8): 6.
- [23] 刘爱成, 李墨翰, 张正翰, 等. 牛乳、驴乳乳清蛋白二级结构及其功能对比研究[J]. 乳业科学与技术, 2021, 44(3): 6–11.
- LIU AIC, LI MH, ZHANG ZH, *et al.* Comparative study on secondary structure and function of whey protein in bovine milk and donkey milk [J]. *Dairy Sci Technol*, 2021, 44(3): 6–11.
- [24] 吴仪凡, 葛武鹏, 刘凯茹, 等. 绵羊乳与其他乳种营养成分及乳清蛋白组分差异性分析[J]. 乳业科学与技术, 2019, 42(6): 1–5.
- WU YF, GE WP, LIU KR, *et al.* Analysis of nutritional composition and whey protein composition of sheep milk: A comparison with milk from humans and other mammals [J]. *Dairy Sci Technol*, 2019, 42(6): 1–5.
- [25] 童伟, 李志成, 熊清权, 等. 牛乳酪蛋白抗氧化乳基料的制备及其分离纯化[J]. 食品科学, 2013, 34(6): 33–36.
- TONG W, LI ZC, XIONG QQ, *et al.* Preparation, isolation and purification of dairy ingredients with antioxidant activity from milk casein [J]. *Food Sci*, 2013, 34(6): 33–36.
- [26] 张艳, 葛武鹏, 宋宇轩, 等. 绵羊乳酪蛋白血管紧张素转换酶抑制肽的制备与鉴定[J]. 乳业科学与技术, 2021, 44(3): 19–23.
- ZHANG Y, GE WP, SONG YX, *et al.* Preparation and characterization of angiotensin converting enzyme inhibitory peptide from sheep casein [J]. *Dairy Sci Technol*, 2021, 44(3): 19–23.
- [27] 刘宸, 王学清, 豆智华, 等. 新疆双峰驼乳酪蛋白血管紧张素转化酶抑制肽的酶法制备和抑制特性[J]. 乳业科学与技术, 2021, 44(3): 24–30.
- LIU C, WANG XQ, DOU ZH, *et al.* Enzymatic preparation and activity evaluation of angiotensin converting enzyme inhibitory peptide from Xinjiang betrian camel milk casein [J]. *Dairy Sci Technol*, 2021, 44(3): 24–30.
- [28] MOATSOU G, SAKKAS L. Sheep milk components: Focus on nutritional advantages and biofunctional potential [J]. *Small Ruminant Res*, 2019, 180(C): 86–99.
- [29] 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, 2022. <https://www.spkx.net.cn/CN/>
- WEI LY, ZHANG JK, CHEN Y. Research progress on nutritional components and biological functions of different milk [J]. *Food Sci*, 2022. <https://www.spkx.net.cn/CN/>
- [30] 韩静雯, 李国辉, 王道兵, 等. 乳制品中主要乳蛋白检测技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(22): 288–294.
- HAN JW, LI GH, WANG DB, *et al.* Research progress on nutritional components and biological functions of different milk [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(22): 288–294.
- [31] EL-AGAMY EI. The challenge of cow milk protein allergy [J]. *Small Rum Res*, 2007, 68(1–2): 64–72.
- [32] OMAR A, HARBOURNE N, ORU ACMJ. Quantification of major camel milk proteins by capillary electrophoresis [Z]. 2016.
- [33] 赵赣. 关于蛋白质二级结构  $\alpha$ -螺旋中氢键构成的准确表述[J]. 生物学通报, 2019, 54(5): 1–2.
- ZHAO G. Discussion on predictive expression of h-bond formation in  $\alpha$ -helix in the protein secondary structure [J]. *Bull Biol*, 2019, 54(5): 1–2.
- [34] 张熙桐, 关博元, 孔繁华, 等. 人乳、牛乳、羊乳中乳清部分氨基酸组成及乳清蛋白中蛋白质二级结构的对比[J]. 食品科学, 2017, 38(24): 107–112.
- ZHANG XT, GUAN BY, KONG FH, *et al.* Comparative study of amino acid composition and secondary structure of whey proteins in human milk, cow milk, and goat milk [J]. *Food Sci*, 2017, 38(24): 107–112.

(责任编辑: 韩晓红 郑 丽)

## 作者简介



张永金, 硕士研究生, 主要研究方向为乳品科学。

E-mail: 1062025269@qq.com



葛武鹏, 教授, 主要研究方向为乳制品加工与营养健康。

E-mail: josephge@nwfufu.edu.cn