

doi:10.11920/xnmdzk.2025.02.002

# 牦牛乳和犏牛乳的凝乳特点及乳清中蛋白质组成

康吉草, 马煜, 廖焕杰, 黄林, 金素钰, 郑玉才

(西南民族大学畜牧兽医学院, 四川成都 610041)

**摘要:**为比较牦牛乳和犏牛乳的凝乳特点,并探索乳清蛋白质组成对凝乳的影响,在麦洼牦牛全乳( $n=5$ )和犏牛( $n=5$ )全乳中加入凝乳酶,观察凝乳并通过离心获得酶乳清,采用等电点沉淀法制备酸乳清,用SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)分析乳清蛋白组成。结果表明,牦牛全乳具有良好的凝乳性能,全部牦牛乳及3个犏牛乳中加入凝乳酶后均能凝乳,而犏牛乳有两个样品需要补加凝乳酶后方能凝乳;乳清蛋白组成分析表明,与酸乳清比,酶乳清中酪蛋白(CN)相对比例极显著降低,其他组分除 $\alpha$ -乳清蛋白( $\alpha$ -La)外均极显著增加( $P<0.01$ );牦牛乳与犏牛乳的乳清蛋白组成差异主要体现在残留的CN以及两种未知的低分子量蛋白质上,其中牦牛两种乳清中的残留CN和酶乳清中的未知蛋白1(可能为 $\kappa$ -酪蛋白巨肽,CGMP)的比例高于犏牛乳清,而酸乳清中的未知蛋白2则相反。凝乳时间长的两个犏牛乳样,其酶乳清蛋白电泳凝胶中,在31.9 kDa处有条带,提示乳清蛋白组成对凝乳有很大影响。研究结果初步表明,牦牛乳的凝乳特性优于犏牛乳,牦牛乳的凝乳时间短可能与乳中更多的 $\kappa$ -酪蛋白被凝乳酶水解有关。

**关键词:**牦牛;犏牛;乳;凝乳;电泳;乳清蛋白;乳腺代谢

中图分类号:S823.91

文献标志码:A

文章编号:2095-4271(2025)02-0127-05

## Coagulation characteristics of yak and cattle-yak milk and protein composition of whey

KANG Jicao, MA Yu, LIAO Huanjie, HUANG Lin, JIN Suyu, ZHENG Yucai

(School of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** This study aimed to compare the curd characteristics of yak milk and cattle-yak milk, as well as to investigate how the composition of whey protein affected curd formation. To achieve this, rennet was added to whole milk samples from Maiwa yaks ( $n=5$ ) and cattle-yaks ( $n=5$ ). The curd was observed, and whey was obtained through centrifugation. Concurrently, acid whey was prepared using the isoelectric precipitation method. Finally, the whey protein composition was analyzed using SDS-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE). The results indicated that yak whole milk displayed good coagulation performance. All yak milk samples and three cattle-yak milk samples coagulated after adding rennet, while two cattle-yak milk samples required additional rennet to achieve coagulation. The analysis of whey protein composition revealed that the relative proportion of casein (CN) in the enzyme whey was significantly lower than that in the acid whey, whereas other components excepting  $\alpha$ -lactalbumin ( $\alpha$ -La), showed significant increases ( $P<0.01$ ). The differences in whey protein composition between yak milk and cattle-yak milk were primarily observed in the residual CN and two unknown low molecular weight proteins. The proportion of residual CN and unknown protein 1 (possibly  $\kappa$ -casein macropeptide, CGMP) in yak whey was higher than that in cattle-yak whey, while the proportion of unknown protein 2 in acid whey showed the opposite trend. Two yak milk samples with longer curd-formation times exhibited a band at 31.9 kDa on the enzyme whey protein electrophoresis gel, suggesting that the composition of whey protein significantly influences curd formation. This study preliminarily demonstrated that the coagulation characteristics of yak milk are superior to those of cattle-yak milk, and the shorter coagulation time of yak milk may be associated with a higher degree of hydrolysis of  $\kappa$ -casein in milk by rennet.

**Keywords:** yak; cattle-yak; milk; curd; electrophoresis; whey protein; mammary gland metabolism

收稿日期:2024-11-26

通信作者:郑玉才(1965-),男,教授,博士,研究方向:牦牛等家畜的泌乳生物化学.E-mail: ycaizhang65@hotmail.com

基金项目:四川省应用基础项目(006JB-117)

牦牛(Yak)及其杂交后代犏牛(Cattle-yak)对高寒、低氧和牧草贫瘠等恶劣生态环境有很好适应能力,是青藏高原及毗邻地区的主要牛种.牦牛乳以其高蛋白、高脂肪,绿色和污染少等特点,成为当地牧民经济收入的重要来源<sup>[1]</sup>,但牦牛产乳期短、产乳量低,不能满足当地乳业发展需求,因此,犏牛乳成为了重要的牦牛乳替代乳源<sup>[2]</sup>.牦牛乳具有不同于普通牛乳的凝乳性能<sup>[3]</sup>,有研究表明,在牦牛全乳中加入凝乳酶后,所有试验样品( $n=38$ )均能凝乳,且个体间凝乳时间差异小,而普通的中国荷斯坦牛乳约有 30% 以上的乳样无法正常凝乳<sup>[4]</sup>,普通牛乳凝乳的巨大个体差异,国外也有报道<sup>[5]</sup>.这些研究揭示牦牛乳加工性能不同于普通牛乳,更适合乳酪生产.

目前有关凝乳的机制,尚不完全清楚,但已有研究表明,有很多因素如温度、pH 值、乳蛋白质含量及盐类成分等能显著影响凝乳效果<sup>[6-7]</sup>.不同动物的乳具有不同的蛋白质组成和物理化学特性,导致它们在凝乳性能上存在显著差异<sup>[8]</sup>.有关牛乳的凝乳机制研究得最多,其凝乳主要通过凝乳酶水解酪蛋白,使酪蛋白分子聚集形成凝块<sup>[9]</sup>.羊乳和牛乳在蛋白质组成上相似,但羊乳凝乳速度更快<sup>[10-11]</sup>.相比之下,骆驼乳的酪蛋白以  $\beta$ -酪蛋白( $\beta$ -CN)为主, $\kappa$ -酪蛋白( $\kappa$ -CN)含量低,具有较高的稳定性和抗凝固特性<sup>[12]</sup>.而与普通牛乳相比,牦牛酪蛋白微团的大小、微团中  $\kappa$ -酪蛋白和磷酸钙含量有所不同<sup>[9-13]</sup>,这或许与其优良的凝乳特性有关.另外,有关犏牛乳的凝乳研究还未见报道,目前还不清楚犏牛乳凝乳与牦牛乳类似,还是具有其亲本普通牛的特点,如果其存在凝乳差异,则牦牛乳和犏牛乳是探索凝乳差异机制的理想材料.

本研究初步比较了牦牛乳和犏牛乳的凝乳特点,并通过乳清蛋白电泳比较了二者凝乳后乳清中的蛋白质组成和含量差异,进而分析它们对凝乳可能产生的影响,以探索凝乳机制,为牦牛乳和犏牛乳的加工提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 乳样采集与处理

于 6 月青草季节在四川省红原县采集当年分娩的泌乳麦洼牦牛( $n=5$ )和犏牛( $n=5$ )的乳样,每头各约 200 mL,冷冻后带回实验室,  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  保存备用. 试

验牦牛或犏牛年龄 8~9 岁,胎次 6~8.乳样按当地管理模式采用清晨手工挤乳的方式采集,所有实验过程符合动物福利和动物保护的相关要求.

全乳室温解冻后,取 2 mL 乳样装入离心管内,以  $10\ 000\times g$  的离心力于  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  离心 10 min,获得下层脱脂乳,再用等电点沉淀法制备乳清<sup>[14]</sup>,该乳清为酸乳清,  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  保存备用.

### 1.2 主要试剂和仪器方法

主要试剂:凝乳酶(来源于在米黑毛霉菌中克隆表达的皱胃酶)购自 Sigma-Aldrich 公司;十二烷基硫酸钠(SDS)、四乙基乙二胺(TEMED)、丙烯酰胺等购自 Bio-Rad 公司;过硫酸铵(APS)购自 BOSTER 公司;其余试剂为国产分析纯或生化规格.

主要仪器: Sorvall ST8R 小型台式冷冻离心机(Thermo Fisher Scientific); SP-756P 分光光度计(上海光谱有限公司); Bio-Rad MP3 电泳槽、POWER/PAC3000 电泳仪和 ChemiDoc 凝胶成像仪(Bio-Rad)等.

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 凝乳实验

取 2 mL 全乳样品于塑料离心管中,加入新鲜配制的  $1\text{ mg/mL}$  凝乳酶(Sigma)  $40\ \mu\text{L}$ ,于  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  水浴保温,观察 30 min 内的凝乳情况.凝乳后用玻璃棒捣碎凝固乳,再以  $10\ 000\times g$  的离心力于  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  离心 20 min,获得上层乳清,该乳清为酶乳清,  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  保存备用;对于无法凝乳的样品,保温 30 min 结束后继续补加凝乳酶,同上保温、观察和处理.

#### 1.3.2 乳清中蛋白质含量的测定

采用 Bradford 染料结合法测定酶乳清、酸乳清中的蛋白质含量<sup>[15]</sup>,以牛血清白蛋白(BSA)为标准品.

#### 1.3.3 乳清蛋白的电泳分析

采用分离胶浓度为 12.5% 的 SDS-PAGE 在还原条件下分离酶乳清和酸乳清中的蛋白质,每孔蛋白质上样量为  $5\ \mu\text{g}$ . 电泳后凝胶用考马斯亮蓝 R-250 染色,脱色后用凝胶成像系统拍照,并用相应软件计算乳清蛋白组分的相对含量.

### 1.4 数据处理

实验数据均用  $\bar{X} \pm \text{Se}$  表示.用 image J 软件确定电泳凝胶上主要蛋白条带的灰度值,并用 SPSS (26.0) 对蛋白组分的相对含量进行统计分析,  $F$  检验比较酶乳清与酸乳清、牦牛乳与犏牛乳相同乳清之间的蛋白

组分差异性.

## 2 结果

### 2.1 牦牛乳和犏牛乳的凝乳

全部试验牦牛全乳 ( $n=5$ ) 和 3 头犏牛全乳中加入凝乳酶后 30 min 内均凝乳,但其余两头犏牛乳在该时间内无法凝乳,继续分别补加 10  $\mu\text{L}$  和 20  $\mu\text{L}$  凝乳酶,保温约 40 min 方凝乳.该结果初步表明,牦牛乳比犏牛乳更容易凝乳.

### 2.2 酶乳清与酸乳清中蛋白质含量的比较

使用 Bradford 染料结合法检测酶乳清和酸乳清中的蛋白质含量(图 1),结果表明,酶乳清中蛋白质含量无论是牦牛乳还是犏牛乳,均显著高于酸乳清 ( $P<0.05$ ),牦牛乳与犏牛乳相比,酶乳清或酸乳清中的蛋白质含量均无显著差异.

### 2.3 乳清蛋白电泳

牦牛乳和犏牛乳的乳清蛋白电泳均显示  $\alpha$ -乳清蛋白( $\alpha$ -La)、 $\beta$ -乳球蛋白( $\beta$ -Lg)、酪蛋白(CN)、免疫球蛋白重链(IgG-H)、血清白蛋白(SA)、乳铁蛋白(Lf)等区带(图 2).两种乳清相比,牦牛乳和犏牛乳的酶乳清在分子量 22 kDa~26 kDa 之间均有一组明

显的条带(标注为 UNP 1),而酸乳清中,在  $\alpha$ -La 与  $\beta$ -Lg 之间有一明显的未知条带(标注为 UNP 2,分子量约为 16 kDa),另外在 14.4 kDa 之下也可见一些低分子量蛋白质.值得注意的是,与本研究中的牦牛乳和其他 3 头犏牛乳相比,凝乳时间长的 2 号、4 号犏牛乳样在 31.9 kDa 有条带,其酶乳清中该条带含量差异不明显(图 2B, P2 和 P4 泳道),但其他正常凝乳的犏牛样品中该位置没有蛋白条带出现;而其酸乳清蛋白电泳图谱中,凝乳时间长的样品在该条带的相对含量更高(图 2D, P2 和 P4 泳道).

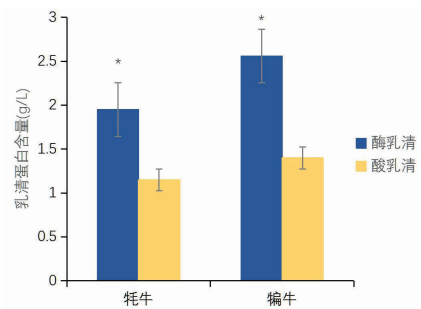


图 1 牦牛乳和犏牛乳清蛋白含量

Fig. 1 Yak and cattle-yak whey protein content

注: \* 表示牦牛乳或犏牛乳的酶乳清与酸乳清相比,差异显著 ( $P<0.05$ ).

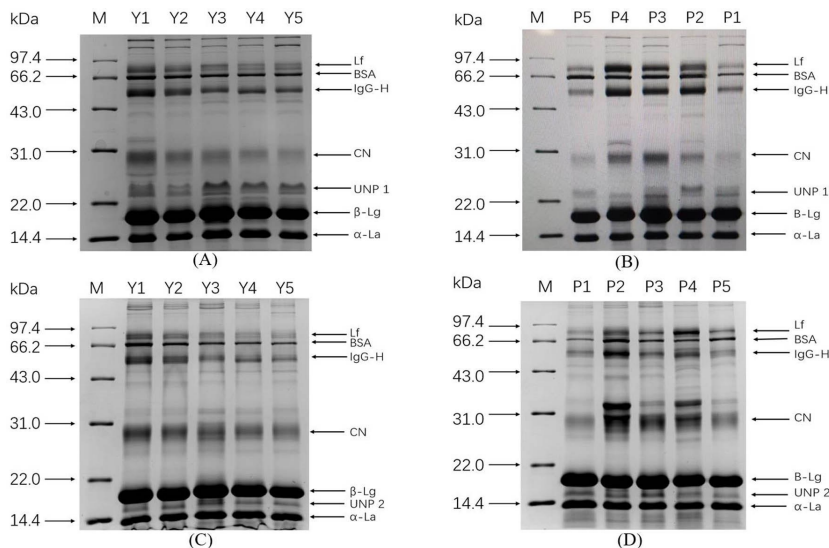


图 2 牦牛乳和犏牛乳的乳清蛋白电泳图

Fig. 2 Comparison of electrophoresis of whey proteins between yak and cattle-yak milk

A: 牦牛酶乳清; B: 犏牛酶乳清; C: 牦牛酸乳清; D: 犏牛酸乳清

M: 蛋白分子量标准; Y1-Y5 和 P1-P5: 分别为 5 个牦牛乳清和犏牛乳清; Lf: 乳铁蛋白; BSA: 牛血清白蛋白;

IgG-H: 免疫球蛋白重链; CN: 酪蛋白; UNP 1/UNP 2: 未知蛋白 1/未知蛋白 2;  $\beta$ -Lg:  $\beta$ -乳球蛋白;  $\alpha$ -La:  $\alpha$ -乳清蛋白

利用 image J 软件分析电泳图谱中蛋白质组分的比例(图 3),与酸乳清相比,酶乳清中 CN 相对比例极

显著降低(表 1),其他组分除  $\alpha$ -La 外均极显著增加 ( $P<0.01$ ).犏牛乳清与牦牛乳清之间的差异蛋白主

要是 CN 和两类未知蛋白,其中酶乳清或酸乳清中 CN 的相对含量,牦牛乳均极显著高于犏牛乳 ( $P < 0.01$ );只存在于酶乳清中未知蛋白 1,牦牛乳亦极显

著高于犏牛乳 ( $P < 0.01$ );而仅存在于酸乳清中未知蛋白 2,牦牛乳则极显著低于犏牛乳 ( $P < 0.01$ ).

表 1 乳清中各蛋白相对含量

Table 1 Relative content of protein component in whey

乳清种类	Lf	BSA	IgG-H	CN	UNP 1	$\beta$ -Lg	UNP 2	$\alpha$ -La
牦牛酶乳清	6.25±0.89**	6.93±0.59**	9.43±1.35**	13.06±3.51**	9.23±0.44	27.61±2.94**		13.38±2.33
酸乳清	4.34±0.55	3.42±0.40	6.18±0.74	24.33±0.57		23.68±0.45	3.67±0.38	10.54±0.63
犏牛酶乳清	9.80±3.34**	8.39±1.50**	11.95±3.06**	11.62±3.55**	7.67±0.80	27.00±5.19**		11.61±2.94
酸乳清	5.53±1.84	4.33±1.20	7.96±1.40	21.64±0.40		22.35±5.10	5.69±0.54	11.57±3.43

注: \*\* 表示牦牛乳或犏牛乳中,酸乳清与酶乳清间差异极显著 ( $P < 0.01$ ).UNP 1 只存在于酶乳清,UNP 2 只存在于酸乳清,因此其比例无法在两种乳清中进行统计比较.

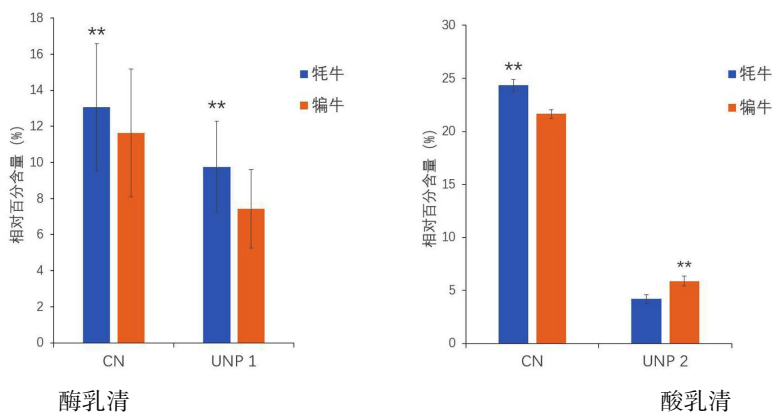


图 3 牦牛乳与犏牛乳的乳清中蛋白质比例显著差异的组分

Fig. 3 Protein proportions with significant differences between yak and cattle-yak milk whey

注: \*\* 表示牦牛乳与犏牛乳比较,差异极显著 ( $P < 0.01$ ).

### 3 讨论

本研究探讨了牦牛乳和犏牛乳的凝乳特性及其乳清蛋白组成,初步获得了两种乳凝乳特点的差异.凝乳是通过处理使乳中蛋白质凝结的过程,是乳酪生产的重要环节之一,一般通过在乳中添加凝乳酶来实现,凝乳产生的乳清蛋白中,有 20%~25% 是  $\kappa$ -酪蛋白巨肽 (Casein glycomacropeptide, CGMP),它是由凝乳酶降解  $\kappa$ -酪蛋白 ( $\kappa$ -CN) 产生的一类含量仅次于  $\beta$ -Lg 和  $\alpha$ -La<sup>[16]</sup> 的含有糖链的多肽<sup>[17]</sup>,在中性条件下,分子量大约为 23 kDa ~ 33 kDa<sup>[18]</sup>.这与本试验中在酶乳清中观察到未知蛋白 1 条带的分子量一致.其比例在牦牛酶乳清中仅次于  $\beta$ -Lg 和  $\alpha$ -La,因此,推测未知蛋白 1 为 CGMP.未知蛋白 2 分子量约为 16 kDa,位于  $\beta$ -Lg 与  $\alpha$ -La 之间,其属性还需研究确定.本试验由于样品数量有限,没有对牦牛乳和犏牛乳的凝乳时间进行仔细的比较,但 2 号、4 号犏牛乳样凝乳时间明显

较长,在相同条件下需要更多的凝乳酶和更长的时间才能凝乳,且二者的乳清蛋白电泳图谱不同于其他个体 (图 2D),提示乳的蛋白质组成可能与凝乳有很大关联.

目前有关凝乳的机制尚不完全清楚.当前主流观点认为,凝乳是凝乳酶通过水解  $\kappa$ -CN 中的 Phe<sub>105</sub>-Met<sub>106</sub> 肽键,生成  $\kappa$ -酪蛋白巨肽和副  $\kappa$ -CN,进而促进副  $\kappa$ -CN 聚集形成三维凝胶的过程,这一过程受到多种因素的影响<sup>[19]</sup>.凝乳的关键是凝乳酶对  $\kappa$ -CN 的水解作用<sup>[17]</sup>,并受  $\beta$ -Lg 含量和不同基因型的影响<sup>[20-21]</sup>.牦牛  $\beta$ -Lg 遗传变异体不同于犏牛<sup>[15]</sup>,牦牛的  $\beta$ -Lg 为 EE 型,而犏牛为杂合型 (AE 或 BE),但本试验中牦牛与犏牛  $\beta$ -Lg 的相对蛋白含量没有显著差异.此外,牦牛  $\kappa$ -CN 遗传变异体也不同于普通牛,部分个体存在 4 个氨基酸的重复序列<sup>[22]</sup>,可能与其凝乳特性有关,但  $\kappa$ -CN 的差异无法解释全部试验牦牛乳均容易凝乳的事实<sup>[4]</sup>,可能涉及更多其他的因素.牦牛乳中脂肪、

蛋白质和钙等成分含量显著高于普通牛乳,且其乳酪产量高出普通牛 1.67 倍,且具有良好的凝乳性能,而普通牛乳的凝乳时间差异很大,郑玉才等人研究了 20 个普通牛乳样,其中有 7 个无法凝乳<sup>[4]</sup>,这可能与牦牛乳中的酪蛋白含量高且酪蛋白微团尺寸较大有关<sup>[23]</sup>。犏牛作为牦牛与黄牛的杂交后代,其乳产量显著高于牦牛,但乳蛋白和乳脂肪含量低于牦牛<sup>[2]</sup>。通过乳清蛋白电泳,有助于发现牦牛乳与犏牛乳的组成差异,以探究其凝乳机制。

本试验通过对牦牛乳和犏牛乳的凝乳特性及乳清中蛋白质组成的比较,得出牦牛乳在凝乳特性和蛋白质组成上与犏牛乳存在显著差异,牦牛乳更易凝乳,并且乳清中残留 CN 和 UNP 1(可能为 CGMP)的含量更高,UNP 1 极显著高于犏牛酶乳清(图 2A),提示有更多的  $\kappa$ -CN 被水解,促进了凝乳。但牦牛乳与犏牛乳中  $\kappa$ -CN 含量以及组成结构是否存在差异,仍需要进一步研究。这些结果为后续研究犏牛乳的凝乳特性、机制及利用提供了重要参考。

### 参考文献

- [1] LI A L, LIU C, HAN X T, et al. Tibetan plateau yak milk: A comprehensive review of nutritional values, health benefits, and processing technology[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 20: 100919.
- [2] 杨璐瑜,熊显荣,海卓,等.乳用犏牛与牦牛产奶量和乳品质的对比分析[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(5): 474-479.
- [3] 谈婷,罗毅皓,孙万成,等.牦牛乳蛋白多态性对奶酪凝乳特性的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2024, 43(06): 40-49.
- [4] 郑玉才,钟光辉,王永,等.牦牛乳的凝乳性质研究[J]. *西南民族学院学报(自然科学版)*, 2001, 27(2): 216-220.
- [5] POULSEN N A, BERTELSEN H P, JENSEN H B, et al. The occurrence of noncoagulating milk and the association of bovine milk coagulation properties with genetic variants of the caseins in 3 Scandinavian dairy breeds. [J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(8): 4830-4842.
- [6] YANG M X, YE A Q, YANG Z, et al. Pepsin-induced coagulation of casein micelles: Effect of whey proteins and heat treatment [J]. *Food Chemistry*, 2023, 402: 134214.
- [7] PRIYASHANTHA H, LUNDH A. Graduate student literature review: Current understanding of the influence of on-farm factors on bovine raw milk and its suitability for cheesemaking [J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(11): 12173-12183.
- [8] BITTANTE G, AMALFITANO N, BERGAMASCHI M, et al. Composition and aptitude for cheese-making of milk from cows, buffaloes, goats, sheep, dromedary camels, and donkeys [J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(3): 2132-2152.
- [9] AMARO-HERNANDEZ J C, OLIVAS G I, ACOSTA-MUNIZ C H, et al. Chemical interactions among caseins during rennet coagulation of milk [J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(2): 981-989.
- [10] FERRAGINA A, CIPOLAT-GOTET C, CECCHINATO A, et al. Prediction and repeatability of milk coagulation properties and curd-firming modeling parameters of ovine milk using Fourier-transform infrared spectroscopy and Bayesian models [J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(5): 3526-3538.
- [11] VACCA G M, PAZZOLA M, DETTORI M L, et al. Modeling of coagulation, curd firming, and syneresis of milk from Sarda ewes [J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(4): 2245-2259.
- [12] Mbye M, Ayyash M, Abu-Jdayil B, et al. The texture of camel milk cheese: Effects of milk composition, coagulants, and processing conditions [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 868320.
- [13] ZHANG Y, REN F Z, WANG P J, et al. The influence of yak casein micelle size on rennet-induced coagulation properties [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(1): 327-333.
- [14] LI Y F, LI S J, ZHAO X W, et al. Novel insights into whey protein among Yak, Yellow Cattle, and Cattle-Yak milk [J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 22: 101384.
- [15] 王丽婷,金素钰,黄林,等.用高效液相色谱法比较牦牛和犏牛乳中两种乳清蛋白含量[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2023, 49(04): 355-359.
- [16] OLSEN W, LIANG N J, DALLAS D C. Macrophage-immunomodulatory actions of bovine whey protein isolate, glycomacropeptide, and their in vitro and in vivo digests [J]. *Nutrients*, 2023, 15(23): 4942.
- [17] KAYIHURA J F. Extent of kappa-casein hydrolysis during renneting of bovine milk: A critical assessment of the analytical and estimation approaches [J]. *Food Science & Nutrition*, 2024, 12(3): 1399-1412.
- [18] TIEU S, HARTE F. Effect of mild thermal and pH changes on the sol-gel transition in skim milk [J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(10): 7926-7939.
- [19] ZHANG X T, TAO L Q, WEI G, et al. Plant-derived rennet: Research progress, novel strategies for their isolation, identification, mechanism, bioactive peptide generation, and application in cheese manufacturing [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 65(3): 11-13.
- [20] AMALFITANO N, CIPOLAT-GOTET C, CECCHINATO A, et al. Milk protein fractions strongly affect the patterns of coagulation, curd firming, and syneresis [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(4): 2903-2917.
- [21] BONFATTI V, DE FREITAS D R, LUGO A, et al. Effects of the detailed protein composition of milk on curd yield and composition measured by model micro-cheese curd making of individual milk samples [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(9): 7863-7873.
- [22] 刘妍君,杜倩男,周凡莉,等.九龙公牦牛  $\kappa$ -酪蛋白 CSN3 基因两个位点的多态性研究 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2021(11): 127-130.
- [23] ZHANG J, YANG M, CAI D Y, et al. Composition, coagulation characteristics, and cheese making capacity of yak milk [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 103(2): 1276-1288.