

# 液态羊乳的加工研究进展

郭银萍<sup>1,2</sup>, 张书文<sup>2</sup>, 赵晓璇<sup>2</sup>, 魏妙宏<sup>2</sup>, 逢晓阳<sup>2</sup>, 谢宁<sup>2</sup>, 吕加平<sup>2</sup>, 于景华<sup>1\*</sup>

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300222; 2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

**摘要:** 进入营养健康时代, 消费需求不断升级, 功能、营养、个性化的产品越来越受到重视。羊乳一直是人类营养的重要组成部分, 与牛乳相比, 羊乳的营养价值相对较高, 凝乳的形成更柔软, 乳脂肪小球的比例更高, 致敏性低, 与人乳更接近, 是许多重要营养素的良好膳食来源。除了羊乳的许多有益作用外, 饲养山羊和绵羊的优势, 如动物成本较低、对饲料和水的需求较少及通常不需要大型牲畜所需的专门住房, 也是促进全球羊乳生产改善的原因。然而, 羊乳的热稳定性差, 加工和贮藏过程中容易出现蛋白变性、沉淀、结块等质量缺陷, 常温加工技术仍不成熟、货架期品质稳定性亟待提升。因此, 本文对液态羊乳的加工技术、加工现状以及发展动态进行综述, 为进一步开发常温液态羊乳奠定理论基础。

**关键词:** 液态羊乳; 加工技术; 稳定性; 风味

## Research progress of liquid goat milk processing

GUO Yin-Ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Shu-Wen<sup>2</sup>, ZHAO Xiao-Xuan<sup>2</sup>, WEI Miao-Hong<sup>2</sup>,  
PANG Xiao-Yang<sup>2</sup>, XIE Ning<sup>2</sup>, LV Jia-Ping<sup>2</sup>, YU Jing-Hua<sup>1\*</sup>

(1. School of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;  
2. Institute of Food Science and Technology Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**ABSTRACT:** In the era of nutrition and health, consumer demand is constantly upgrading, and functional, nutritious and personalized products are getting more and more attention. Goat milk has always been an important part of human nutrition, compared with cow's milk, goat milk has relatively high nutritional value, softer curd formation, higher proportion of milk fat globules, low sensitization and closer to breast milk, and it is a good dietary source of many important nutrients. In addition to many beneficial effects of goat milk, the advantages of raising goats and sheep, such as lower animal cost, less demand for feed and water, and usually no special housing for large livestock, are also the reasons to promote the improvement of global goat milk production. However, the thermal stability of goat milk is poor, and protein denaturation, precipitation, caking and other quality defects are easy to occur during processing and storage, the normal temperature processing technology is still immature, and the shelf-life quality stability needs to be improved. Therefore, this paper summarized the processing technology, processing status and development trends of liquid goat milk, so as to lay a theoretical foundation for the further development of normal temperature liquid goat milk.

**KEY WORDS:** liquid goat milk; processing technology; stability; flavor

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600161、2018YFC1604301)、宁夏重点研发计划项目(2021BEF02022)

Fund: Supported by the National Key Research and Development of China (2021YFD1600161, 2018YFC1604301), and the Ningxia Key Research and Development (2021BEF02022)

\*通信作者: 于景华, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为乳品科学与技术。E-mail: yujinghua@tust.edu.cn

\*Corresponding author: YU Jing-Hua, Ph.D, Professor, Tianjin University of Science and Technology, No.29, 13th Street, Economic-technological Development Area, Tianjin 300222, China. E-mail: yujinghua@tust.edu.cn

## 0 引言

目前,市场上消费者可利用的乳资源类有羊乳、人乳、牛乳、水牛乳、驼乳和马乳等,其中羊乳是世界上第三大乳的生产品种,仅次于牛乳和水牛乳<sup>[1]</sup>。随着消费者对羊乳营养价值的了解,羊乳及其制品的市场需求也逐渐增加,而市场上的羊乳制品正逐渐由羊乳粉转向液态羊乳,其中,羊乳粉的市场竞争已日益激烈,但液态羊乳还处于发展期<sup>[2]</sup>,未来很有可能成为羊乳行业的新浪潮。因此,本文旨在讨论羊乳的营养特性、液态羊乳的加工研究现状及热处理对液态羊乳品质的影响,为进一步开发常温液态羊乳奠定理论和技术基础。

## 1 羊乳的营养及功能特性

羊乳在蛋白质、脂肪和乳糖浓度等方面与牛乳的成分相似,但它们之间仍存在差异,羊乳具有高消化性和低过敏性,主要被牛乳不耐受或患有消化系统疾病的人食用。此外,羊乳含有活性成分,如低聚糖、生物活性肽和活性蛋白等,这些活性成分具有调节肠道菌群、减少肠道炎症等功能。因此,羊乳与功能成分的结合是羊乳行业最有前途的研究领域之一。

### 1.1 易消化吸收

与牛乳相比,羊乳易消化吸收,一方面是由于它含有少量的  $\alpha$ s1-酪蛋白,其在胃中形成的凝块细而软,且颗粒大小均匀,易被人体吸收利用,特别适合婴幼儿、中老年人食用<sup>[3]</sup>。INGLINGSTAD 等<sup>[4]</sup>通过对羊乳中乳清蛋白和酪蛋白的消化特性研究发现,羊乳酪蛋白比乳清蛋白更易消化,且消化主要在肠液中进行。YE 等<sup>[5]</sup>采用体外动态胃模拟器,研究了用不同酪蛋白/乳清蛋白比例的羊乳和牛乳制成的配方奶粉的胃消化行为,发现羊乳中酪蛋白胶束组成的不同,可能是羊乳比牛乳凝固度低、蛋白质胃消化快的重要原因。

另一方面是由于羊乳中的脂肪球冷却后不会自然聚集,因为它们缺乏凝集素,而凝集素是牛乳中脂肪球聚集的原因<sup>[6]</sup>,所以羊乳的脂肪球与脂肪酶的接触面积更大,更便于人体消化吸收。此外,与牛乳相比,羊乳的高消化率也与脂肪酸(fatty acid, FA)组成的差异有关,羊乳中的短链脂肪酸(如癸酸、辛酸和己酸)约占所有脂肪酸的 15%~18%,而同样的脂肪酸在牛乳中仅占 5%~9%<sup>[7]</sup>,并且脂肪酶更易攻击短链脂肪酸的酯键。因此,羊乳的脂肪更易消化吸收。

### 1.2 降低致敏性

乳制品中  $\alpha$ s1-酪蛋白是人体主要蛋白质过敏源,羊乳(5.6 g/100 g 酪蛋白)比牛乳(38 g/100 g 酪蛋白)含有更少的

$\alpha$ s1-酪蛋白<sup>[8]</sup>,且牛乳的致敏性还与高含量的  $\beta$ -乳球蛋白有关, $\beta$ -乳球蛋白对肠道水解有很高的抵抗力,在人乳中并没有发现,而在羊乳中含量约为 0.18~0.28 g/100 mL,在牛乳中含量较高,约为 0.4 g/100 mL<sup>[9]</sup>。因此,羊乳可有效降低人体对乳蛋白的过敏。

虽然有研究表明 40%~100%对牛乳蛋白敏感的过敏患者能够耐受羊乳蛋白,且牛乳致敏小鼠的免疫球蛋白 G1 和组胺水平明显高于羊乳致敏小鼠<sup>[10]</sup>,但是羊乳和牛乳酪蛋白的免疫球蛋白 E (immunoglobulin E, IgE)抗体的交叉反应,限制了对牛乳蛋白过敏的人不能选择羊乳产品<sup>[11]</sup>。

### 1.3 改善肠道功能

羊乳中含有与人乳相同的活性因子-表皮生长因子(epidermal growth factor, EGF),EGF 不仅可以促进胃肠上皮细胞的增殖与分化,也可以调控肠道内环境平衡<sup>[12]</sup>。BEDFORD 等<sup>[13]</sup>通过对断奶仔猪饲喂乳酸乳球菌 EGF,结果发现 EGF 不仅可以促进断奶仔猪的肠道发育,还可以提高胃肠道中消化酶活性,并且还能够减轻炎症指数。

与牛乳和绵羊乳相比,山羊乳中的低聚糖与人乳更相似,且山羊乳中低聚糖含量较高,为 2.5~3 g/L,比牛乳中含量高 4~5 倍,并且具有调节肠道菌群、润肠通便的功能<sup>[14]</sup>。羊乳中的低聚糖具有抗感染特性,可作为各种病原体的清除剂受体,也可作为大肠杆菌热稳定肠毒素的抑制剂,并阻断白细胞-内皮细胞相互作用,从而起到抗炎作用<sup>[15]</sup>。LARA 等<sup>[16]</sup>通过研究羊乳中的低聚糖对葡聚糖硫酸钠(dextran sulphate sodium, DSS)诱发结肠炎大鼠的影响,发现羊乳中低聚糖对实验性结肠炎大鼠有抗炎作用,也可以改善大鼠的肠道微生物菌群。因此,在改善肠道功能方面羊乳优于牛乳。

### 1.4 降胆固醇

与牛乳相比,饮用羊乳能提高高密度脂蛋白胆固醇水平,增加粪便中的胆固醇排泄,降低肝脏中的胆固醇沉积<sup>[17]</sup>。张荣欣等<sup>[18]</sup>通过比较不同长度饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸对高胆固醇血症小鼠的血脂和体重的影响,发现癸酸和辛酸不仅可有效降低小鼠的血脂和控制小鼠的体重增加,还可以降低小鼠的血清总胆固醇。KALYAN 等<sup>[19]</sup>用羊乳脂肪和酪蛋白喂食高胆固醇血症的大鼠,发现羊乳中的脂肪和酪蛋白降低了大鼠血浆中胆固醇,增加了粪便中胆固醇的排泄,并表现出抗氧化特性。因此,老年人喝羊乳可有效降低胆固醇和预防老年性疾病。

### 1.5 抗氧化

羊乳中含有生物活性肽、维生素 A 和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)等具有抗氧化特性的功能成分。AHMED 等<sup>[20]</sup>探讨了羊乳中乳清蛋白和酪蛋白经胃蛋白酶水解所释放的多肽的抗氧化活性,结果发现经胃蛋白

酶消化后,羊乳酪蛋白中含有比乳清蛋白更强的抗氧化肽,也具有较高的超氧化物和1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical, DPPH)清除活性。羊乳比牛乳含有更高水平的维生素A,因为羊乳能够将所有胡萝卜素转化为维生素A<sup>[6]</sup>。李钰<sup>[21]</sup>采用邻苯三酚自氧化法研究了不同泌乳期的崂山奶山羊羊乳中SOD的活性特性,结果发现同一泌乳期的羊乳中SOD的活性在不同个体之间差异不显著,初乳中SOD的活性显著高于成熟乳。因此,羊乳可用于抗氧化。

## 2 羊乳产品的生产及加工现状

### 2.1 羊乳产品的生产现状

尽管全球的奶山羊和奶绵羊大部分被加工成肉制品,但山羊乳和绵羊乳的生产和消费同时增加,生产出的鲜羊乳可以制作羊乳酪,在亚洲、非洲则用来加工成液态羊乳和羊乳粉,而我国的羊乳大部分用来加工成羊乳粉,少部分用于生产液态羊乳、羊乳酪和发酵羊乳等<sup>[22]</sup>。

长期以来,乳制品行业一直以牛乳为主,消费者的选择比较单一,而羊乳具有牛乳所缺乏的优点,也可以为消费者提供更多的选择。因此,一些发达国家(如澳大利亚、新西兰、美国等)的研究者开始对羊乳的营养及其活性物质成分的研究现状进行了分析<sup>[23]</sup>。

液态乳制品在乳制品行业内如日中天,其中液态羊乳正处于发展期,各大品牌(如卓牧、牧羊人、顶羊、御宝羊乳、瑞康等)在乳制品市场逐渐发展,其中以陕西、山东产地的液态羊乳品牌较多,如山东的品牌有顶羊、安牧、阳春羊乳等,陕西的品牌有乡迪、草木羊、玉山等;除此之外,还有河南、宁夏、天津等地的品牌<sup>[24]</sup>。

### 2.2 羊乳的加工现状

我国市场上的液态羊乳产品种类较少,根据杀菌方式主要分为常温液态羊乳和巴氏液态羊乳。液态羊乳的品类少是因为羊乳对热处理相当敏感,经高温灭菌处理后的羊乳会产生沉淀,这将成为液态羊乳生产加工过程中的一大技术瓶颈。

#### 2.2.1 常温液态羊乳

常温液态羊乳是对液态羊乳进行瞬时杀菌处理,杀菌速度快、效果好,不仅能减少活性成分的损失、保持产品天然风味,同时还大大延长了常温液态羊乳产品的保质期,打破了常温羊乳易变质的限制。但是,由于羊乳中蛋白质和酪蛋白含量较低(分别为1200和900 mg/kg),钙和磷酸盐含量也较低(分别为2200和1300 mg/kg),这对其胶束体系有显著影响,导致羊乳的热稳定性较差<sup>[25]</sup>。

改变pH、添加盐(磷酸盐或柠檬酸盐)或使用膜技术(例如改变乳清蛋白与酪蛋白的比例)可以减少热不稳定性的问题。ZHAO等<sup>[26]</sup>研究了热处理和稳定盐对羊乳的物理

化学特性、蛋白质结构和盐平衡的影响,结果发现与不添加稳定盐的超高温羊乳相比,稳定盐的加入增加了超高温羊乳上清液中钙和磷含量,并降低了沉淀物的含量、蛋白质粒径和球状蛋白质结构。LI等<sup>[27]</sup>通过比较不同pH(6.5、6.9、7.3、7.7)和热处理温度(65、85、105、125 °C/15 s)对羊乳的蛋白结构和功能的影响,结果发现pH为7.7时羊乳蛋白质的热稳定性最差,除了pH为6.9的羊乳外,不同pH下乳蛋白质的表面疏水性在85 °C时达到最大值。RENHE等<sup>[28]</sup>通过微滤(microfiltration, MF)去除部分乳清蛋白对乳浓缩物的热稳定性的影响,将胶束酪蛋白浓缩物与使用超滤(ultrafiltration, UF)获得的对照浓缩物进行比较,结果发现MF滞留物比相应的UF对照表现出更高的热稳定性,在UF中加热后酪蛋白胶束的平均直径增加,而在MF浓缩物中没有。但是,实际生产中由于法规要求,UHT羊乳中不得添加任何乳化盐、乳化剂和稳定剂。

#### 2.2.2 巴氏杀菌羊乳

巴氏杀菌羊乳是经过较温和的热处理方法(普通巴氏杀菌法:65 °C/30 min)加工而成的羊乳,营养损失少、口感好,但保质期短(4 °C,保存3~6 d),难以满足消费者的需求<sup>[29]</sup>;而超巴氏杀菌(121 °C/5 s)的杀菌效果可达到99%以上,有效控制乳中的微生物含量,延长货架期<sup>[30]</sup>。但是,羊乳的热稳定性比牛乳弱,加工温度(85 °C/15 s和121 °C/5 s)过高易引起品质劣变,特别是某些热敏性营养成分(维生素、乳铁蛋白等)发生变化,导致其营养价值及功能性成分受到影响<sup>[31-32]</sup>,而低温长时巴氏杀菌(65 °C/30 min)对羊乳的理化特性影响最小<sup>[33]</sup>。

BURSOVA<sup>[34]</sup>研究了巴氏杀菌羊乳和牛乳在不同贮藏温度(8 °C和24 °C)下小肠结肠炎耶尔森菌的生长潜力,结果发现无论储存温度如何,经过巴氏消毒的羊乳和牛乳都是小肠结肠炎耶尔森氏菌生长和增殖的良好环境。杨姗姗等<sup>[35]</sup>分别采用低温长时巴氏杀菌(62、65、68 °C; 20、25、30、35 min)和高温短时巴氏杀菌(72、75、80、83、85 °C; 15、20、30 s)对牛乳进行热处理,并分析两种热处理对牛乳风味品质的影响,结果发现,低温长时巴氏杀菌有利于鲜味氨基酸的产生,高温短时杀菌使乳中苦味氨基酸的含量增加,甜味氨基酸的含量在75 °C/20 s时达到最大值,但基本不随杀菌条件的改变发生变化。徐姝等<sup>[36]</sup>以脱脂羊乳为对象,比较高温短时巴氏杀菌(72 °C/15 s)、1.4 μm和0.8 μm孔径微滤、紫外处理对微生物和活性蛋白的影响,发现1.4 μm处理微滤技术能有效地截留羊乳中的芽孢和体细胞,也可以保留羊乳中的乳铁蛋白、免疫球蛋白、乳过氧化物酶等活性成分。BALTHAZAR等<sup>[37]</sup>研究了高强度超声波(104 W/6 min)对鲜羊乳和冷冻储存半脱脂羊乳中微生物(乳酸菌和金黄色葡萄球菌)的影响,发现高强度超声波对有氧中性细菌的微生物灭活与高温短时巴氏杀菌(high temperature short time pasteurization, HTST)达到一样的效

果。因此,需要对原料乳进行严格的管控,也可以将微滤或超声和巴氏杀菌技术结合运用到实际生产中,以延长液态羊乳制品的保质期。

### 3 热处理对液态羊乳的理化性质、活性成分、风味物质的影响

热处理使得羊乳的加工特性差,在热加工过程中会发生一系列的理化反应,如风味变化、营养物质损失、蛋白质变性等,造成羊乳体系的不稳定和品质的改变,制约了羊乳制品加工的工业化发展进程。常见的羊乳热处理方式如表 1 所示<sup>[33,38-39]</sup>。

表 1 常见的羊乳热处理方式  
Table 1 Common heat treatment methods of goat milk

热处理工艺	处理温度/°C	处理时间
低温长时巴氏杀菌	65	30 min
高温短时巴氏杀菌	75、85	15 s
超巴氏杀菌	121	5 s
超高温瞬时杀菌	137	7 s

#### 3.1 热处理对液态羊乳的理化性质和稳定性的影响

热处理确保了乳制品的微生物安全性,但会引发美拉德反应,修改蛋白质并生成美拉德产物,如糠氨酸和 5-羟甲基糠醛。此外,原料乳在加热后还会发生许多其他的物理化学变化,如对乳化特性的破坏、乳清蛋白变性、酪蛋白水解、蛋白质糖基化、非酶褐变以及乳糖降解。

叶彤等<sup>[40]</sup>研究巴氏杀菌(65、75、85、95 °C/30 min)对羊乳的色值变化、水解程度、蛋白种类和表面形貌的影响,发现温度增加容易导致蛋白质变性程度增加,表现为羊乳褐变程度加深。赵丽丽等<sup>[41]</sup>通过研究热处理和稳定盐对羊乳理化性质、蛋白质结构和盐平衡的影响,结果发现加入稳定性盐可以提高上清液中钙和磷的含量,降低了超高温羊乳的沉淀量、蛋白质粒度和球状蛋白结构,从而提高羊乳的热稳定性。

热处理对乳蛋白的糖基化程度和结合位点有较大影响,随着热处理程度的增加,糖基化蛋白和位点的数量增加。ZHANG 等<sup>[42]</sup>比较了热处理对牛乳蛋白的糖基化程度和结合位点的影响,生牛乳中的 14 种糖化蛋白上有 47 个结合位点,热处理后 UHT 牛乳(135 °C/5 s)中的糖化蛋白数量和位点数量显著增加,49 个糖化蛋白中有 166 个结合位点;

生牛乳和 UHT 牛乳检测到的糖化程度最高的蛋白质是血清白蛋白,其在生牛乳和超高温灭菌牛乳中分别含有 9 个和 23 个位点。KHAN 等<sup>[43]</sup>报道了巴氏杀菌(65 °C/30 min)和煮沸(1 min)的牛乳和牛乳中游离脂肪酸(free fatty acid, FFA)的释放,其短链和中链脂肪酸的浓度根据脂肪酸增加了 2%~100%,而不饱和长链脂肪酸(C<sub>18:1</sub>~C<sub>18:3</sub>)的浓度随不饱和程度和热处理程度的增加而减少 5%~50%。TARI 等<sup>[44]</sup>将不同 pH (6.5, 6.7 和 6.9)的液体乳蛋白浓缩物(milk protein concentrate, MPC)在 85 °C/5 min 或 125 °C/15 s 条件下进行热处理,在不同的 pH 下,两种热处理均导致乳清蛋白大量变性,在 4 °C 贮藏期间,发现与 125 °C/15 s 的样品相比,经 85 °C/5 min 处理的样品黏度较高,且酸诱导凝胶性显著提高了凝胶硬度。

#### 3.2 热处理对液态羊乳的风味物质的影响

羊乳的味道难以使大多数消费者接受的原因如下:一方面可能是与羊角间腺所分泌的脂质和羊所生活的外部环境有关<sup>[7]</sup>,另一方面羊乳散发出较浓的膻味,与短链游离脂肪酸如己酸 C6:0、辛酸 C8:0 和癸酸 C10:0 有较强的相关性<sup>[45]</sup>(见表 2)。据报道,羊乳中的膻味主要来自于饲养环境,公羊导致的膻味大于母羊,公羊和母羊一起饲喂会增加羊乳中的膻味,故实际养殖过程中应该分羊圈饲养。另外,热处理会导致羊乳中的脂肪酸动态组成发生变化进而影响山羊乳的膻味程度,因此,需要选择好羊乳的热处理温度。

孙马龙<sup>[46]</sup>发现不同热处理(65、85、95、105、115 °C)使羊乳中的中链脂肪酸含量减少,短链脂肪酸含量增加,长链脂肪酸含量变化不大,但羊乳的整体膻味程度下降,且 75 °C 以下的热处理能使羊乳达到良好的脱膻效果。与羊乳相比,牛乳的风味更容易让消费者接受,但是牛乳经过热处理后,味道会变得与生牛乳不同。JO 等<sup>[47]</sup>通过研究高温短时巴氏杀菌(78 °C/15 s)和超巴氏杀菌(140 °C/2.3 s)牛乳在 4 °C 下冷却和贮藏后,再在第 0、3、7 和 14 d 进行风味和风味化学的差异分析,结果发现与高温短时巴氏牛乳相比,超巴氏杀菌牛乳具有明显的熟化风味和硫磺风味、奶香气活性物质的多样性较大,两种乳的风味强度在贮藏 14 d 后都有所下降,所以热处理和储存时间都会影响香气活性物质的分布。

#### 3.3 热处理对液态羊乳中活性成分的影响

羊乳除含有蛋白、脂肪、乳糖、矿物质等基本营养组分外,还含有胰岛素、免疫球蛋白和溶菌酶等生物活性物质,这些生物活性物质通常具有热敏性。

表 2 羊乳中游离脂肪酸与膻味强度的相关性分析  
Table 2 Correlation between free fatty acids and goat flavor for goat's milk

游离脂肪酸	C2:0	C4:0	C6:0	C8:0	C10:0	C12:0	C14:0	C16:0
相关系数	0.31	0.43	0.80**	0.60**	0.82**	0.33	0.49*	0.44*

注: \*表示  $P < 0.05$ ; \*\*表示  $P < 0.01$ 。

羊乳在 65 °C 下热处理 30 min 和 85 °C 下热处理 15 s, 提高了乳清蛋白的粒径、浊度、zeta 电位和表面疏水性, 从而确保了乳清蛋白有良好的乳化活性指数、持水性、起泡性和泡沫稳定性<sup>[48]</sup>。AKYILMAZ 等<sup>[49]</sup>发现原料乳经过 72 °C、15 s 的热处理会导致免疫球蛋白的活性损失 10%~30%, 而 UHT 处理(138 °C/4 s)和蒸发处理破坏了免疫球蛋白在乳中的大多数活动。COSENTINO 等<sup>[50]</sup>发现冷凝和巴氏杀菌对乳中溶菌酶的浓度和抗菌活性均无影响, 经热处理的乳中表现出耐溶菌酶的莫氏杆菌除外, 溶菌酶对部分革兰氏阳性菌株和革兰氏阴性菌株均表现出与人工合成抗生素相似的抗菌活性。热处理最大限度地减少了细菌负荷, 但也导致蛋白质生物活性的大量损失, 如, 巴氏杀菌可使乳铁蛋白、免疫球蛋白和溶菌酶的免疫保护功能降低 80%, 这可能导致新生儿的免疫功能低下<sup>[51]</sup>。

YANG 等<sup>[52]</sup>报道称重构的脱盐牛乳清粉中的低聚糖在等于或低于 100 °C 的温度下热处理 120 min 是稳定的, 这一发现表明低聚糖在加工过程中会持续存在。RIAHI 等<sup>[53]</sup>共分析了 160 个样品(40 个高脂和 40 个低脂商业巴氏杀菌牛乳样品, 以及 40 个高脂和 40 个低脂 UHT 商业牛乳样品), 发现巴氏杀菌牛乳和 UHT 牛乳在雌二醇(estradiol, EZ)水平方面没有差异, 但与低脂牛乳相比, 高脂肪样品的 E2 水平略高。MANN 等<sup>[54]</sup>探讨了热处理(60 °C/60 min)对牛初乳中免疫球蛋白 G (immunoglobulin G, IgG)和免疫球蛋白 A (immunoglobulin A, IgA)、胰岛素、胰岛素样生长因子 I (insulin-like growth factor I, IGF-I)的影响, 发现与生初乳相比, 热处理样品中 IgA 的浓度降低为 8.5%, 而 IgG 浓度没有因热处理而改变, 胰岛素的浓度下降了 22%, IGF-I 下降了 10%。

## 4 非热处理技术对液态羊乳的理化特性的影响

由于传统的热处理方法存在一定的局限性, 因此需要研究新型的非热处理技术来保证乳制品的感官品质及营养价值, 延长乳的货架期, 进而满足人们的生活需求。近年来, 关于非热处理技术的研究数量迅速增加, 这些新型技术包括超高压均质(ultra-high pressure homogen, UHPH)、超声和膜分离等。

### 4.1 超声处理对液态羊乳的理化特性的影响

超声波通过液态食品材料传播高强度和高频率的声波, 造成周期性的高、低压力循环。在低压时可以形成真空气泡, 而在高压时则会剧烈坍塌, 坍塌导致温度和压力迅速而显著地升高, 最终导致液体食物中的颗粒发生剧烈碰撞<sup>[1]</sup>。超声在乳制品行业的应用包括延长乳制品的保质期、均质化、颗粒粒径减小、改善均匀性、凝乳性和持水性等。

与生羊乳和巴氏杀菌羊乳(95 °C/10 min)相比, 经过超声处理(20 kHz, 4000 W, 5~15 min)的羊乳, 其黏度、色

差、酪蛋白胶束和脂肪球粒径降低, 使发酵羊乳制品具有较低的脱水率、较高的黏度和较优的感官品质<sup>[55]</sup>; 超声处理可使牛乳蛋白(乳清蛋白浓缩物和乳清蛋白分离物)的粒径减小、蛋白质的构象发生变化、溶解度增加、乳化性能、起泡性能、凝胶性能和持水性能得到改善、黏度增加<sup>[56]</sup>。ZHAO 等<sup>[57]</sup>研究了超声预处理(800 W, 0~20 min)在凝乳酶诱导凝固前对山羊乳的影响, 与未处理的山羊乳与牛乳作对比, 发现经超声处理的羊乳随超声时间的延长颗粒粒径减小、可溶性磷和钙的含量增加、乳清蛋白含量减少, 凝胶硬度、凝固强度、稳定性系数、内聚力、持水能力(water holding capacity, WHC)等值均呈下降趋势。SUN 等<sup>[58]</sup>研究了超声处理[20 kHz, (43±3.4) W/cm<sup>2</sup>, 0、3、6、9、12 min]对单磷酸酯(monophosphoryl lipid, MPL)和 MPC 的粒径、分子量、微观结构和溶解度的影响, 发现超声处理可显著减小蛋白质的粒径, 引起蛋白质结构的展开, 从而使 MPL 和 MPC 的溶解度从 36%和 32%提高到 85.88%和 97.5%, 超声时间对 MPL 和 MPC 的分子量都没有影响。

### 4.2 超高压均质处理对液态羊乳的理化特性的影响

超高压均质是通过高达 400 MPa 的动态压力和高达 150 °C 的温度, 在高压、高温、剪切、高强度、高剪切、高压空穴现象和冲击下, 提供更高质量和更长保质期的商业无菌乳<sup>[59]</sup>。

经过超高压处理后的羊乳, 其蛋白质沉降系数发生改变、pH、可溶性钙、磷含量和黏度降低, 以及在储存结束时酪蛋白的水合度降低, 使得酪蛋白胶束粉的溶解度、乳化性和起泡性显著提高<sup>[60]</sup>。AMADOR 等<sup>[61]</sup>证明了在 UHPH 条件下, 牛乳中维生素 B<sub>2</sub> 的损失水平(分别在 45 °C 或 85 °C、300 MPa 时损失 0%和 13.4%)低于 UHT 牛乳(在 138 °C/4 s 时损失 17.3%)。TOUHAMI 等<sup>[62]</sup>研究了碱化(pH 为 8.5 和 10.5)和 UHPH 对生脱脂牛乳和巴氏杀菌(72 °C 20 s)脱脂牛乳中酪蛋白(casein, CN)的影响, 结果发现使用 UHPH 处理, 可以在较低的碱性 pH (10.5)下实现 CN 胶束的完全再分散。WU 等<sup>[63]</sup>研究了超高压(0、200、300、400、500、600 MPa, 5 min)处理对发酵牛乳(fermented milk, FM)品质的影响, 发现与 FM 相比, 超高压处理的发酵牛乳(ultra high pressure fermented milk, UHPFM)的游离氨基酸含量高、黏度高、酸度高、咸味和涩味显著增加, 甜度和丰富度显著下降。

### 4.3 膜分离处理对液态羊乳的理化特性的影响

膜分离技术是通过滤膜在一定温度、压力下除去乳中的杂质、细菌等, 不仅能耗低, 而且避免了高温加热, 鲜乳几乎保持原有风味, 根据滤膜孔径大小可以分为: 微滤膜、超滤膜、纳滤膜、反渗透膜等<sup>[64]</sup>。膜分离可以将乳制品成分进行浓缩、分离、富集和分离, 在制造奶粉、液态乳和乳饮料方面的应用主要是浓缩和去除乳糖。

PAUL 等<sup>[1]</sup>将 MF (1.4  $\mu\text{m}$  陶瓷膜)和双重均质化(250 和 400 MPa)结合到传统的超高温灭菌牛乳中, 结果发现微滤可延缓酪蛋白胶束形成凝胶或沉积物的速度, 而双重均质化延缓了超高温灭菌牛乳中奶油和脂肪的凝聚, 降低了脂肪球的平均直径。THOMAS 等<sup>[65]</sup>研究了低温(4、8、12  $^{\circ}\text{C}$ )微滤过程中加工温度对蛋白质过滤性能、污垢和分配的影响, 发现在 4  $^{\circ}\text{C}$  下进行微滤导致初始通量降低, 但最终在加工过程中渗透通量下降较慢, 还会导致最低程度的可逆和不可逆结垢, 但会在整个微滤过程中渗透液中  $\beta$ -酪蛋白浓度下降最低。MORTEN 等<sup>[66]</sup>研究了添加氯化钙和葡萄糖- $\delta$ -内酯对反渗透牛乳浓缩物的黏度影响, 发现添加氯化钙、葡萄糖- $\delta$ -内酯或其组合可以降低储存过程中的黏度积聚, 但延长储存期取决于热处理强度和浓缩物的 pH。SIMON 等<sup>[67]</sup>比较了 MF 膜与氧化铝(aluminium oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、氧化钛(titanium oxide,  $\text{TiO}_2$ )和氧化锆(zirconium oxide,  $\text{ZrO}_2$ )作为选择性材料的膜在 10 和 55  $^{\circ}\text{C}$  下对乳蛋白分馏过程中过滤性能的影响, 发现 MF 膜的过滤性能不仅取决于孔径, 而且还取决于孔径分布的宽度和膜电荷, 选择性材料的膜在 55  $^{\circ}\text{C}$  条件下微滤性能更好。

## 5 结束语

目前, 液态羊乳产业还处于发展阶段, 而羊乳企业的当务之急是先做好基础产品和培养消费习惯, 再进一步地开发高端产品, 还是有很大机会可以成为乳制品行业中的重要支柱产业, 但是羊乳中的蛋白活性高、稳定性差, 对生产工艺和加工技术的要求更加严格, 在常温下比牛乳更易变质, 而采用高温灭菌, 羊乳的分子不稳定, 很容易造成产品保质期内蛋白质沉淀, 从而影响产品风味口感和品质安全。所以, 乳制品企业在开拓液态羊乳市场的同时, 需要做到: (1)重视加工工艺、技术创新升级, 使用巴氏杀菌、瞬时灭菌等杀菌技术保障羊乳安全性的前提下, 同时可以结合超声、超高压和膜过滤等技术保证液态羊乳产品的风味口感、新鲜、营养和品质; (2)做好基础产品如纯羊乳、酸羊乳、羊乳乳酸菌饮料, 而低温产品还不多见, 因此, 未来液态羊乳可能也需要逐渐向低温产品拓展, 并从口味做出改变, 比如在酸羊乳、乳酸菌饮料等产品上丰富口味, 不断进行产品升级, 满足多元化的消费需求。

## 参考文献

- PAUL LHM, JOHN PM. Encyclopedia of dairy science third edition [M]. California: Academic Press, 2022.
- 高佳媛, 邵玉宇, 王毕妮, 等. 羊奶及其制品的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2017, 45(1): 34–38.  
GAO JY, SHAO YY, WANG BN, *et al.* Advances in the study of sheep's milk and its products [J]. Chin Dairy Ind, 2017, 45(1): 34–38.
- MAATHUIS A, HAVENAAR R, HE T, *et al.* Protein digestion and quality of goat and cow milk infant formula and human milk under simulated infant conditions [J]. J Pediatr Gastroenterol Nutr, 2017, 65(6): 661–666.
- INGLINGSTAD RAE, DEVOLD TG, ERIKSEN EK, *et al.* Comparison of the digestion of caseins and whey proteins in equine, bovine, caprine and human milks by human gastro intestinal enzymes [J]. Dairy Sci Technol, 2010, 90(5): 549–563.
- YE AQ, CUI J, ELIZABETH C, *et al.* Dynamic *in vitro* gastric digestion of infant formulae made with goat milk and cow milk: Influence of protein composition [J]. Int Dairy J, 2019, 97: 76–85.
- JOHN WF. Encyclopedia of dairy science second edition [M]. California: Academic Press, 2011.
- CLARK S, GARCIA MB. A 100-year review: Advances in goat milk research [J]. J Dairy Sci, 2017, 100(12): 10026–10044.
- 顾浩峰, 张富新, 梁蕾, 等. 山羊奶与牛奶和人奶营养成分的比较[J]. 食品工业科技, 2012, 33(8): 369–373.  
GU HF, ZHANG FX, LIANG L, *et al.* Comparison of nutritional components of goat milk, milk and human milk [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(8): 369–373.
- VERHOECKX KCM, VISSERS YM, BAUMERT JL, *et al.* Food processing and allergenicity [J]. Food Chem Toxicol, 2015, 80: 223–240.
- KAPILA R, KAVADI PK, KAPILA S. Comparative evaluation of allergic sensitization to milk proteins of cow, buffalo and goat [J]. Small Rumin Res, 2013, 112(1–3): 191–198.
- JIRILLO F, MARTEMUCCI G, ALESSANDRO AG, *et al.* Ability of goat milk to modulate healthy human peripheral blood lymphomonocyte and polymorphonuclear cell function: *In vitro* effects and clinical implications [J]. Curr Pharm Des, 2010, 16(7): 870–876.
- 雷飞艳, 云丹, 王毕妮, 等. 加工方式对羊乳表皮生长因子(EGF)浓度的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(3): 186–190.  
LEI FY, YUN D, WANG BN, *et al.* Effect of processing method on the concentration of sheep's milk epidermis growth factor (EGF) [J]. Food Ferment Ind, 2017, 43(3): 186–190.
- BEDFORD A, CHEN T, HUYNH E, *et al.* Epidermal growth factor containing culture supernatant enhances intestine development of early-weaned pigs *in vivo*: Potential mechanisms involved [J]. J Biotechnol, 2015, 196–197: 9–19.
- SILANIKOVE N, LEITNER G, MERIN U, *et al.* Recent advances in exploiting goat's milk: Quality, safety and production aspects [J]. Small Rumin Res, 2010, 89(2–3): 110–124.
- BOEHM G, STAHL B. Oligosaccharides from milk [J]. J Nutr. 2007, 137(3): 847–849.
- LARA VF, DEBRAS E, NIETO A, *et al.* Oligosaccharides isolated from goat milk reduce intestinal inflammation in a rat model of dextran sodium sulfate-induced colitis [J]. Clin Nutr, 2006, 25(3): 477–488.
- MEENA S, RAJPUT YS, SHARMA R, *et al.* Effect of goat and camel milk vis a vis cow milk on cholesterol homeostasis in hypercholesterolemic rats [J]. Small Rumin Res, 2019, 171: 8–12.
- 张荣欣, 李婧, 刘钊, 等. 不同脂肪酸对高胆固醇血症小鼠体质量和血脂的影响[J]. 解放军医学院学报, 2014, 35(3): 247–250, 279.  
ZHANG RX, LI J, LIU Z, *et al.* Effects of different fatty acids on body mass and blood lipids in mice with hypercholesterolemia [J]. Acad J Chin PLA Med School, 2014, 35(3): 247–250, 279.
- KALYAN S, MEENA S, KAPILA S, *et al.* Evaluation of goat milk fat and goat milk casein fraction for anti-hypercholesterolaemic and antioxidative

- properties in hypercholesterolaemic rats [J]. *Int Dairy J*, 2018, (84): 23–27.
- [20] AHMED S, TAWFIK EB, LAILA ME, *et al.* Identification of potent antioxidant bioactive peptides from goat milk proteins [J]. *Food Res Int*, 2015, (74): 80–88.
- [21] 李钰. 羊乳中超氧化物歧化酶活性的影响因素研究及应用[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2016.
- LI Y. Study on influencing factors and application of superoxide dismutase activity in goat milk [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2016.
- [22] 王建国, 赵宝玉. 世界及我国奶山羊产业发展现状及趋势分析[J]. *中国畜牧杂志*, 2021, 57(3): 180–186.
- WANG JG, ZHAO BY. Analysis of the current situation and trend of the development of milk goat industry in the world and China [J]. *Chin J Anim Sci*, 2021, 57(3): 180–186.
- [23] 侯军伟. 中国羊乳市场机会解析[J]. *中国乳业*, 2019, (8): 59–62.
- HOU JW. Analysis of opportunities in China sheep's milk market [J]. *China Dairy*, 2019, (8): 59–62.
- [24] 杜占凤. 羊乳制品领跑细分品类市场潜力被快速挖掘[J]. *乳品与人类*, 2021, (3): 4–11.
- DU ZF. Sheep dairy leading segment market potential is being quickly tapped [J]. *Dairy Hum*, 2021, (3): 4–11.
- [25] WANG Q, ZHU Y, WANG J. Comparative study on the heat stability of goat milk and cow milk [J]. *Indian J Anim Res*, 2016, 50(4): 610–613.
- [26] ZHAO LL, ZHANG SW, LU J, *et al.* Effects of heat treatment and stabilizing salts supplementation on the physicochemical properties, protein structure and salts balance of goat milk [J]. *Food Sci Technol*, 2020, 132: 109878.
- [27] LI XY, CHENG M, LI J, *et al.* Change in the structural and functional properties of goat milk protein due to pH and heat [J]. *J Dairy Sci*, 2020, 103(2): 1337–1351.
- [28] RENHE IRT, CORREDIG M. Effect of partial whey protein depletion during membrane filtration on thermal stability of milk concentrates [J]. *J Dairy Sci*, 2018, 101(10): 8757–8766.
- [29] 王喜波, 张安琪, 王玉莹, 等. 巴氏杀菌和超巴氏杀菌对牛乳清蛋白结构及热稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 307–313.
- WANG XB, ZHANG ANQ, WANG YY, *et al.* Effects of pasteurization and hyperbaric sterilization on the structure and thermal stability of bovine whey protein [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2019, 35(6): 307–313.
- [30] 张安琪, 王玉莹, 李瑞, 等. 超巴氏杀菌对牛奶酪蛋白微观结构及凝聚性质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 106–110.
- ZHANG ANQ, WANG YY, LI R, *et al.* Effects of hyperbaric sterilization on microstructure and condensed properties of bovine cheese protein [J]. *Food Sci*, 2020, 41(3): 106–110.
- [31] LIU HY, IRINA B, MIKE W, *et al.* Kinetic modelling of the heat stability of bovine lactoferrin in raw whole milk [J]. *J Food Eng*, 2020, 280: 109.
- [32] DEETH HC, LEWIS MJ. High temperature processing of milk and milk products [M]. New Jersey: Wiley Black Well, 2017.
- [33] 吴仪凡, 宋宇轩, 张艳, 等. 不同巴氏杀菌处理对绵羊乳热加工特性的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(17): 5886–5890.
- WU YF, SONG YX, ZHANG Y, *et al.* Effects of different pasteurization treatments on the thermal processing properties of sheep's milk [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(17): 5886–5890.
- [34] BURSOVA S. Growth potential of yersinia enter in pasteurized cow's and goat's milk stored at 8 °C and 24 °C [J]. *Food Control*, 2017, 73(B): 1415–1419.
- [35] 杨姗姗, 丁瑞雪, 史海粟, 等. 热处理条件对巴氏杀菌乳风味品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(24): 131–136.
- YANG SS, DING RX, SHI HS, *et al.* Effects of heat treatment conditions on flavor and quality of pasteurized milk [J]. *Food Sci*, 2020, 41(24): 131–136.
- [36] 徐姝, 刘大松, 李志宾, 等. 巴氏杀菌、微滤及紫外处理对羊乳中菌落数与活性蛋白的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(15): 150–156.
- XU S, LIU DS, LI ZB, *et al.* Effects of pasteurization, microfiltration and ultraviolet treatment on the number of colonies and active proteins in sheep's milk [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(15): 150–156.
- [37] BALTHAZAR CF, SANTILLO A, GUIMARAES JT, *et al.* Ultrasound processing of fresh and frozen semi-skimmed sheep milk and its effects on microbiological and physical-chemical quality [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 51: 241–248.
- [38] 张颖, 闫慧明, 彭德举, 等. 常见热杀菌方式对关中羊乳品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(8): 26–30, 36.
- ZHANG Y, YAN HM, PENG DJ, *et al.* Effects of heat sterilization methods on Guanzhong goat milk quality [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(8): 26–30, 36.
- [39] 康鹏, 雷晓民, 葛武鹏, 等. 不同巴氏杀菌处理对绵羊乳总蛋白及乳清蛋白二级结构的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(23): 9219–9225.
- KANG P, LEI XM, GE WP, *et al.* Effects of different pasteurization treatments on secondary structure of total protein and whey protein in sheep milk [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(23): 9219–9225.
- [40] 叶彤, 聂聪怡, 李林强. 羊乳巴氏杀菌条件的筛选[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(8): 152–157.
- YE T, NIE CY, LI LQ. Screening of sheep's milk pasteurization criteria [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(8): 152–157.
- [41] 赵丽丽, 吕加平. 羊乳热稳定性及凝胶特性的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- ZHAO LL, LV JP. Study on the thermal stability and gel properties of sheep's milk [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [42] ZHANG YM, YI SN, LU J, *et al.* Effect of different heat treatments on the Maillard reaction products, volatile compounds and glycation level of milk [J]. *Int Dairy J*, 2021, 123: 105182.
- [43] KHAN IT, NADEEM M, IMRAN M, *et al.* Antioxidant capacity and fatty acids characterization of heat-treated cow and buffalo milk [J]. *Lipids Health Dis*, 2017, 16(1): 163.
- [44] TARI NR, ZAFIR G, ANILDA G, *et al.* Effect of pH and heat treatment conditions on physicochemical and acid gelation properties of liquid milk protein concentrate [J]. *J Dairy Sci*, 2021, 104(6): 6609–6619.
- [45] 艾对, 张富新, 李延华, 等. 羊奶短中链脂肪酸与羊奶膻味关系的研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(6): 113–116.
- AI D, ZHANG FX, LI YH, *et al.* Study on the relationship between short and medium chain fatty acids and mutton flavor of goat milk [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(6): 113–116.
- [46] 孙马龙. 山羊乳物理脱膻方法的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2016.
- SUN ML. Study on the method of physical deodorization of goat's milk [D]. Yantai: Yantai University, 2016.

- [47] JO Y, BENOIST DM, BARBANO DM, *et al.* Flavor and flavor chemistry differences among milks processed by high-temperature, short-time pasteurization or ultra-pasteurization [J]. *J Dairy Sci*, 2018, 101(5): 3812–3828.
- [48] ZHAO X, CHENG M, ZHANG XX, *et al.* The effect of heat treatment on the microstructure and functional properties of whey protein from goat milk [J]. *J Dairy Sci*, 2020, 103(2): 1289–1302.
- [49] AKYILMAZ MK, OZER B, BULAT T, *et al.* Effect of heat treatment on micronutrients, fatty acids and some I bioactive components of milk [J]. *Int Dairy J*, 2021, 126: 105231.
- [50] COSENTINO C, LABELLA C, ELSHAFIE HS, *et al.* Effects of different heat treatments on lysozyme quantity and antimicrobial activity of jenny milk [J]. *J Dairy Sci*, 2016, 99(7): 5173–5179.
- [51] LIMA HK, WAGNER GM, PERRIN MT, *et al.* Bacteria and bioactivity in holder pasteurized and shelf-stable human milk products [J]. *Curr Dev Nutr*, 2017, 1(8): e001438.
- [52] YANG BY, ZHANG MH, ZHAO JY, *et al.* Development and validation of UPLC method for quantitative determination of major bovine milk oligosaccharides and their heat stability [J]. *Int Dairy J*, 2022, 126: 105005.
- [53] RIAHI ZB, HEIDARZADEGAN M, BADIBOSTAN H, *et al.* Determination of 17 $\beta$ -estradiol in commercial pasteurized and sterilized milk samples in Mashhad, Iran [J]. *J Food Sci Technol*, 2019, 56: 4795–4798.
- [54] MANN S, CURONE G, CHANDLER TL, *et al.* Heat treatment of bovine colostrum: I. Effects on bacterial and somatic cell counts, immunoglobulin, insulin, and IGF-I concentrations, as well as the colostrum proteome [J]. *J Dairy Sci*, 2020, 103(10): 9368–9383.
- [55] ABDELGHANEY ESR. 热超声对山羊乳理化及凝胶特性的影响规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.  
ABDELGHANEY E. Study on the influence of thermal ultrasound on goat emulsification and gel properties [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [56] SAJAD S, FARDIN J, MEHRDAD M, *et al.* Effects of ultrasound on the techno-functional properties of milk proteins: A systematic review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 83: 105938.
- [57] ZHAO LL, ZHANG SW, HANKIE U, *et al.* Effect of ultrasound pretreatment on rennet-induced coagulation properties of goat's milk [J]. *Food Chem*, 2014, 165: 167–174.
- [58] SUN Y, YU XX, HUSSAIN M, *et al.* Influence of milk fat globule membrane and milk protein concentrate treated by ultrasound on the structural and emulsifying stability of mimicking human fat emulsions [J]. *Ultrason Sonochem*, 2022. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2021.105881
- [59] LUCIA V, MASSIMO P, SERGIY S, *et al.* Life cycle assessment of emerging technologies: The case of milk ultra-high pressure homogenization [J]. *J Clean Prod*, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.059
- [60] NASSAR KS. 超高压处理改善羊乳及其酪蛋白胶束的理化和流变特性[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.  
NASSAR K. Ultra-high pressure treatment improves the physical and fluid properties of sheep's milk and its casein gel beam [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [61] AMADOR EGG, GALLARDO CJJ, NYKANEN H, *et al.* Effect of ultra-high-pressure homogenization on hydro- and liposoluble milk vitamins [J]. *Food Res Int*, 2015, 77: 49–54.
- [62] TOUHAMI S, MARCINIAK A, DOYEN A, *et al.* Effect of alkalization and ultra-high-pressure homogenization on casein micelles in raw and pasteurized skim milk [J]. *J Dairy Sci*, 2022. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20700>
- [63] WU N, ZHAO Y, WANG YR, *et al.* Effects of ultra-high pressure treatment on angiotensin-converting enzyme (ACE) inhibitory activity, antioxidant activity, and physicochemical properties of milk fermented with *Lactobacillus delbrueckii* QS306 [J]. *J Dairy Sci*, 2022, 3(105): 183–1847.
- [64] INCECCO PD, ROSI V, CABASSI G, *et al.* Microfiltration and ultra-high-pressure homogenization for extending the shelf-storage stability of UHT milk [J]. *Food Res Int*, 2018, 107: 477–485.
- [65] THOMAS CF, FRANCESCA B, ALAN LK, *et al.* The influence of temperature on filtration performance and fouling during cold microfiltration of skim milk [J]. *Sep Purif Technol*, 2021, 262: 118256.
- [66] MORTEN VC, LEIF HS, LILIA A. Control of viscosity by addition of calcium chloride and glucono- $\delta$ -lactone to heat treated skim milk concentrates produced by reverse osmosis filtration [J]. *Int Dairy J*, 2021, 114: 104916.
- [67] SIMON S, ANDREAS M, MARTIN H, *et al.* Effects of selective layer properties of ceramic multi-channel microfiltration membranes on the milk protein fractionation [J]. *Sep Purif Technol*, 2021, 259: 118050.

(责任编辑: 张晓寒 郑 丽)

## 作者简介



郭银萍, 硕士, 主要研究方向为乳品科学与技术。

E-mail: guoyinpinyin@163.com



于景华, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为乳品科学与技术。

E-mail: yujinghua@tust.edu.cn