

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241014009

引用格式: 马静, 郭元晟, 嘎日迪, 等. 基于复合膜分离技术对传统酸乳清的综合利用及营养成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 138–146.

MA J, GUO YS, GA RD, *et al.* Comprehensive utilization and nutrient analysis of traditional sour whey based on composite membrane separation technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 138–146. (in Chinese with English abstract).

基于复合膜分离技术对传统酸乳清的综合利用及营养成分分析

马 静¹, 郭元晟¹, 嘎日迪¹, 孙立山³, 李春冬^{1,2}, 呼 日¹, 刘国强¹,
肖 芳¹, 臧心雨¹, 郭 梁^{1,2*}

[1. 锡林郭勒职业学院, 锡林浩特 026000; 2. 锡林郭勒盟食品科学与检测实验中心
(锡林郭勒盟农畜产品检验检测中心), 锡林浩特 026000; 3. 正蓝旗长虹乳制品厂, 锡林浩特 026000]

摘 要: 目的 对传统酸乳清及其产品进行营养成分分析并探究其综合利用价值。**方法** 采用复合膜分离技术, 将传统酸乳清逐级分离成多种成分均一、稳定的乳清产品。以蛋白质、脂肪、肽、矿物质、乳糖等的含量为评价指标, 分析产品的营养特征及可利用方向。**结果** 4种乳清产品: 稀奶油 RQ-1 用于乳的标准化(脂肪含量 47.4 g/100 g); 微滤膜截留液 RQ-3 为高蛋白和多肽饮品(蛋白质含量 3.52 g/100 g; 肽含量 0.92 g/100 g); 超滤膜截留液 RQ-5 为纯多肽型饮品(肽含量 0.87 g/100 g); 反渗透膜截留液 RQ-9 可用于矿物质饮品的开发(灰分含量为 0.88 g/100 g, 检出 5 种常量元素)及乳糖的回收利用(乳糖含量 3.92 g/100 g)。**结论** 传统酸乳清“变废为宝”直接关系到牧民增收, 膜分离方法为其综合利用提供了新的解决方案。

关键词: 膜分离; 传统酸乳清; 综合利用

Comprehensive utilization and nutrient analysis of traditional sour whey based on composite membrane separation technology

MA Jing¹, GUO Yuan-Sheng¹, GA Ri-Di¹, SUN Li-Shan³, LI Chun-Dong^{1,2},
HU Ri¹, LIU Guo-Qiang¹, XIAO Fang¹, ZANG Xin-Yu¹, GUO Liang^{1,2*}

[1. Xilingol Vocational College, Xilinhot 026000, China; 2. Xilingol Food Science and Testing Experimental Center
(Xilingol Agricultural and Animal Products Testing Center), Xilinhot 026000, China;
3. Zhenglanqi Changhong Dairy Factory, Xilinhot 026000, China]

ABSTRACT: Objective To analyze the nutritional components of traditional sour whey and its products and explore its comprehensive utilization value. **Methods** The traditional sour whey was separated step by step into a

收稿日期: 2024-10-14

基金项目: 锡林郭勒盟“揭榜挂帅”项目(XMGD-202302); 2024 年锡林郭勒盟科技计划项目(202409); 锡林郭勒盟博士教学科研项目(XMB202401)

第一作者: 马静(1993—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: 845284419@qq.com

*通信作者: 郭梁(1986—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为生物工程技术开发锡林郭勒野生动植物和微生物资源。E-mail: herdman86@163.com

variety of homogeneous and stable whey products by composite membrane separation technology. The content of protein, fat, peptide, mineral and lactose was used as evaluation index to analyze the nutritional characteristics and availability direction of these products. **Results** Four kinds of whey products: Thin cream RQ-1 for milk standardization (fat content 47.4 g/100 g); microfiltration membrane interception liquid RQ-3 was a high-protein and polypeptide drink (protein content 3.52 g/100 g; peptide content 0.92 g/100 g); ultrafiltration membrane interception liquid RQ-5 was a pure peptide type drink (peptide content 0.87 g/100 g); the reverse osmosis membrane interception liquid RQ-9 could be used for the development of mineral drinks (ash content 0.88 g/100 g, 5 major elements detected) and the recycling of lactose (lactose content 3.92 g/100 g). **Conclusion** “Turning waste into treasure” of traditional sour whey is directly related to the increase of herdsmen’s income. The membrane separation method provides a new solution for its comprehensive utilization.

KEY WORDS: membrane separation; traditional sour whey; comprehensive utilization

0 引 言

传统酸乳清是生产蒙古族传统乳制品时产生的液态副产物。它一般是以鲜乳为原料, 经过滤、传统工艺发酵、凝乳加热、分离收集而得, 属于酸乳清的一种, 其 pH 一般为 4.6 左右^[1]。研究发现一定地理区域内, 传统乳制品发酵过程中具有共同的核心微生物群^[2]。以地处黄金奶源维度的内蒙古锡林郭勒盟为例, 该地的传统乳制品中乳酸菌和酵母菌的含量最高且菌群多样性丰富, 传统酸乳清与传统乳制品的优势菌种一致^[3-4], 产生的质量比可以达到 1:9 甚至是 1:12。根据 2023 年政府公开数据, 锡盟传统乳制品产量突破 5.4 万 t, 产生的传统酸乳清可达近 60 万 t。随着传统乳制品标准体系的完善、区域品牌的建立、加工技术的优化, 传统乳制品的消费市场潜力巨大^[5], 因此传统酸乳清的综合利用十分必要。

传统酸乳清受技术限制及乳清品质不稳定的影响, 一般都当作废液排放或者喂食牲畜, 资源浪费的同时还对环境及水生生物造成严重危害^[6]。手工作坊占锡盟传统乳制品企业的 98.4%左右, 生产工艺依赖传承、经验^[7-8]。部分科研从业者试图改进传统乳制品生产工艺, 探索适合工业生产的危害分析的临界控制点体系。但标准化企业占比低、大龄从业者学习新技术困难^[9-10]。传统酸乳清的品质与原料乳的来源、环境条件、加工工艺等有关。传统乳制品发酵终点的确定全凭经验, 缺乏食品良好操作规范和食品卫生标准操作程序, 而发酵时间的长短、菌种的类型, 都会影响蛋白质、脂肪、乳糖、乳酸等成分含量, 这导致不同厂家、不同批次产生的酸乳清成分变化很大, 对于后续开发均一稳定的产品, 具有一定难度。

膜分离技术在食品工业中应用示例如表 1 所示(各产品类别的应用不仅限于表格中的膜材料及相关操作条件, 表

表 1 分离膜在食品工业中的应用
Table 1 Application of separation membrane in food industry

样品类别	处理方法	主要膜类型 (孔径/分子截留量)	参考操作条件	其他	参考文献
乳清	MF+UF+NF	MF: 陶瓷膜, 孔径 0.2 μm	温度: 25 °C; 跨膜压力: 1.5 bar;	MF: 除脂/除菌	[11]
		UF: 聚醚砜(5 kDa)	温度: 25 °C; 跨膜压力: 1.0~1.4 bar;	UF: 提取乳清蛋白/标准化工艺	[12]
		NF: 聚酰胺(350 Da)	温度: 35 °C; 跨膜压力: 40 bar	NF: 回收乳糖	[13]
饮料	MF+UF	MF: 聚偏二氟乙烯、聚砜、聚醚砜; UF: 300 Da~500 kDa	温度: 20~35 °C; 跨膜压力: 0.5~3 bar	MF: 澄清/除菌/除脂/除蛋白; UF: 澄清/浓缩: 去除单宁、淀粉、纤维素等	[14] [15] [16]
	UF	聚偏二氟乙烯、醋酸纤维素 聚砜(3000 Da)	温度: 45 °C; 转速 500 r/min	UF: 脱胶(去除磷脂)、脱色、脱酸(去除游离脂肪酸)	[17] [18]
食用油	UF	聚砜酰胺(20000 Da)	温度: 30~50 °C; 跨膜压力 1.5~2 bar	UF: 脱胶(去除磷脂)、脱色、脱酸(去除游离脂肪酸)	[19]
	MF	有机微滤膜(0.1 μm)	温度 50 °C; 跨膜压力 1.2 bar	除菌/澄清	[20] [21]
调味料	UF	聚偏二氟乙烯(200 kDa)	跨膜压力 3 bar	除菌/澄清	[22]
	UF	负电荷-聚偏二氟乙烯(8~10 kDa)	温度 0~45 °C; 跨膜压力 0.2~0.8 bar	去除部分有机物/盐/细菌	[23]
	RO	聚酰胺(200 Da)	温度 25 °C; 跨膜压力 6.9 bar	去除有机物/脱盐	[24]

注: 微滤(microfiltration, MF); 超滤(ultrafiltration, UF); 纳滤(nanofiltration, NF); 反渗透(reverse osmosis, RO)。

中示例仅作为实际生产参照)。以压力差为驱动能量,以膜孔径分类的微滤(microfiltration, MF)膜、超滤(ultrafiltration, UF)膜、纳滤(nanofiltration, NF)膜及反渗透(reverse osmosis, RO)膜分离体系在食品工业中应用广泛。膜材料包括成本低、应用广的有机膜和稳定性好、耐用的无机膜。近年来开发的改性膜在亲水性、渗透性、选择性方面表现优秀^[25]。膜分离技术设备自动化程度高,操作简单易学,维修成本低。对从事传统乳制品加工人员的学历、年龄要求不高。其次,膜分离技术分离条件温和,耗能低。膜分离过程对热敏物质友好,较好地保留了乳清中生物活性成分^[26]。再次,膜分离技术的分离度高,分离级别可达 10^{-9} m。传统酸乳清的成分根据分子量的不同进行分离、富集,实现乳的标准化,解决传统酸乳清品质不稳定的问题^[27]。经过 RO 膜分离后,乳清废液可以直接排放或饮用,操作工艺低碳环保。

现阶段,酸乳清应用于乳清蛋白粉、乳清糖、乳清饮料,少量添加于日化产品中^[28-32]。研究的产品种类少,生产成本低,热基工艺致使酸乳清的营养性、功能性大打折扣。对于传统酸乳清的综合利用及系列产品的开发鲜有报道。因此本研究以传统酸乳清为研究对象,结合膜分离技术,对传统酸乳清及其产品进行营养成分分析,旨在深挖传统乳制品资源综合利用潜力,为高效、绿色、优质的乳清产品开发和工业化生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

传统酸乳清,内蒙古自治区锡林郭勒盟正蓝旗地区采集。

MF 膜(0.2 μ m, 陶瓷材质)、UF 膜(10 kDa, 聚醚砜材质)、NF 膜(150~300 Da, 聚酰胺材质)、RO 膜(100 Da, 聚酰胺材质)(重庆佳和过滤技术公司)。

硫酸铜、硫酸钾、氨水、石油醚、无水乙醚、刚果红、亚甲蓝、乙醇、盐酸、5-磺基水杨酸、酒石酸钾钠、氢氧化钠、氯化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、氯化钾、柠檬

酸、三氯乙酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 甲醇(色谱纯, 上海安谱实验科技有限公司); 硝酸(优级纯, 苏州晶瑞化学有限公司); 茚三酮(优级纯, 安徽酷尔生物工程有限公司)。

1.2 仪器与设备

ME204E 型万分之一电子天平、FE38 型电导率仪、FE28 pH 计(美国梅特勒托利多公司); JH-DS2540-3X 型多功能膜过滤设备(重庆佳和过滤技术公司); Avanti J-E 型离心机(贝克曼库尔特公司); DZKW-S-8 型水浴锅(北京永光明公司); MFLC-7/12A 型马弗炉; WGL-125D 型干燥箱(天津泰斯特公司); K9840 型凯氏定氮仪、SH220N 型石墨消解仪(山东海能公司); NexION 2000 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 PE 公司); U3000 型液相色谱仪、Hypersil GOLD 色谱柱(250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μ m)(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); S433D 型氨基酸分析仪(德国 Sykam 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 传统酸乳清的膜分离

采集的蒙古族传统酸乳清离心脱脂后,使用 MF-UF-NF-RO 复合膜分离,上一级截留液作为乳清待分析液,透过液则通入下一级分离膜浓缩分离。膜分离过程如图 1 所示,对得到的各级乳清液编号为: RQ-0~RQ-10。

1.3.2 常规营养成分测定

水分参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中第一法(直接干燥法)液体试样测定方法测定;脂肪参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中第三法 碱水解法测定;蛋白质参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中第一法 凯氏定氮法测定;灰分参照 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中第一法 食品总灰分的测定方法测定;乳糖参照 GB 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》中第一法 直接滴定法测定。

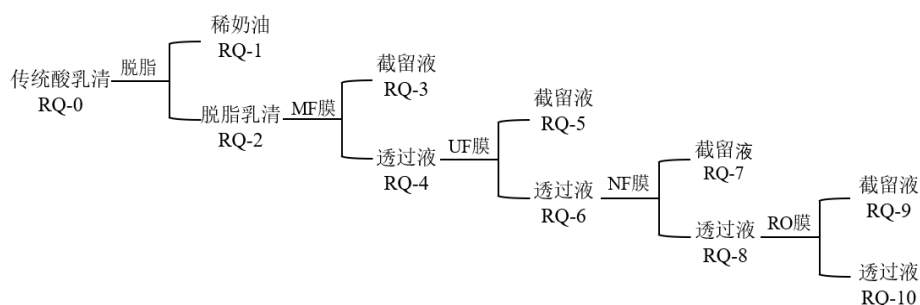


图 1 膜系统浓缩分离过程

Fig.1 Concentration and separation process of membrane system

1.3.3 金属元素的测定

参照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中第一法 电感耦合等离子体质谱法测定。

1.3.4 肽含量的测定

滤液中小分子蛋白的测定: 称 5 g 乳清液, 用 15%三氯乙酸定容至 50 mL。将大分子蛋白沉淀后, 滤液以 8000 r/min, 离心 5 min。上清液按 GB 5009.5—2016 中凯氏定氮法测定, 得到滤液中小分子蛋白的含量。

滤液中游离氨基酸的测定: 取经三氯乙酸处理, 离心 (8000 r/min, 5 min) 后的滤液 1 g 稀释至 10 mL, 经过 0.22 μm 的微孔过滤膜过滤后, 于氨基酸分析仪上测定滤液中游离氨基酸的含量。

乳清产品肽含量为滤液中小分子蛋白含量减去滤液中游离氨基酸含量。

1.3.5 乳酸含量的测定

试样制备: 样液高速离心(12000 r/min, 5 min)后, 称取 1 g 上清液于 15 mL 离心管, 加入 0.01 mol/L 盐酸 8 mL, 用水定容 10 mL 后, 离心(12000 r/min, 5 min)取上清液过滤, 滤液供液相色谱仪分析。检测条件: 流动相 A 为甲醇; 流动相 C 为磷酸缓冲盐(phosphate buffer saline, PBS)缓冲溶液(称取 8.00 g 氯化钠、1.20 g 磷酸氢二钠、0.20 g 磷酸二氢钾、0.20 g 氯化钾, 用 900 mL 水溶解后, 用盐酸调节 pH 至 2.7, 再加水至 1000 mL, 经过膜、超声脱气后使用); 流速为 0.50 mL/min; 液相色谱柱为 Hypersil GOLD (250 mm×4.6 mm, 5 μm); 柱温 35 °C; 进样量 10 μL; 洗脱条件: 0.00~3.00 min, 99.0% C; 9.00~11.00 min, 95.0% C; 12.00~30.00 min, 99.0% C。

1.4 数据处理

采用 SPSS 23.0 软件进行分析, 实验数据以平均值±标准偏差表示。根据单因素方差分析法中的 Duncan 比较法进行显著性分析($P<0.05$)。采用 GraphPad Prism 8 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 膜分离过程参数

传统酸乳清脱脂处理后, 去除稀奶油层得到脱脂乳清。脱脂乳清依次通过 MF 膜、UF 膜、NF 膜、RO 膜, 记录各级截留液、过滤液的质量。通过控制膜分离过程参数, 可以调整各级乳清分离液的浓缩比、营养指标等。乳清通过膜过滤设备过程中, 记录过膜时间、膜通量、膜压力等信息见表 2。

2.2 感官性状分析

乳清液 RQ-0~RQ-10 如图 2 所示。传统酸乳清 RQ-0, 为黄绿色乳浊液, 微酸。瓶底有少量白色沉淀, 这是由于凝乳不完全, 分离的传统酸乳清中含有一些蛋白颗粒; RQ-1 为离心得到的稀奶油, 呈半固态、乳白色, 具有乳香味, 微酸, 质地均匀, 组织细腻; RQ-2、RQ-3 为均匀的乳黄色乳浊液, 经 MF 膜浓缩后的 RQ-3 浊度更高, 微酸; RQ-4~RQ-9 为黄绿色透明液体, 其中 RQ-9 的颜色最深, RQ-10 为无色透明的液体。这是由于 RO 膜的分子孔径最小, 仅有水分子通过, 乳清中的色素均被截留。其澄清度为 RQ-4>RQ-3、RQ-6>RQ-5、RQ-8>RQ-7、RQ-10>RQ-9。

2.3 乳清分离液的干物质含量

图 3 为乳清分离液的干物质含量, 可明显看出 RQ-1 的干物质含量显著高于其他乳清分离液($P<0.05$), 原因是 RQ-1 的主要成分为脂肪, 属于半固态稀奶油, 组织状态与其他乳清分离液完全不同, 干物质含量高达 51.6 g/100 g。其他液态乳清分离液中, MF 膜截留液 RQ-3 干物质含量为 6.45 g/100 g, 与 RQ-0 的干物质含量差异不显著($P>0.05$), 即 RQ-3 还原了 RQ-0 中几乎大部分的营养物质。同时根据图 3 还可明显看出, 干物质含量 RQ-3>RQ-4、RQ-5>RQ-6、RQ-7>RQ-8、RQ-9>RQ-10, 即 MF 膜、UF 膜、NF 膜、RO 膜的截留液的干物质含量均大于透过液, 符合复合膜浓缩

表 2 膜分离过程参数表
Table 2 Parameter table of membrane separation process

样品编号	样品名称	膜类型	质量/kg	过膜时间/h	膜通量/(L/h)	膜压力/MPa
RQ-2	脱脂乳清	/	200.0	/	/	/
RQ-3	MF 截留液	MF 膜	21.7	8.0	450~180	0.20
RQ-4	MF 透过液		161.5			
RQ-5	UF 截留液	UF 膜	14.4	1.5	2500~2350	0.35
RQ-6	UF 透过液		144.4			
RQ-7	NF 截留液	NF 膜	28.0	3.0	2100~2000	0.80
RQ-8	NF 透过液		113.6			
RQ-9	RO 截留液	RO 膜	17.3	1.5	2000~1800	1.00
RQ-10	RO 透过液		95.0			

注: /表示无此项, 下同。

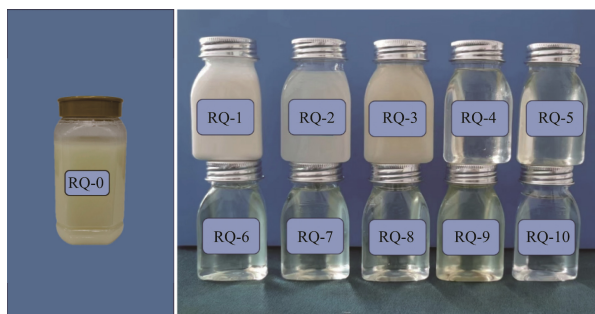
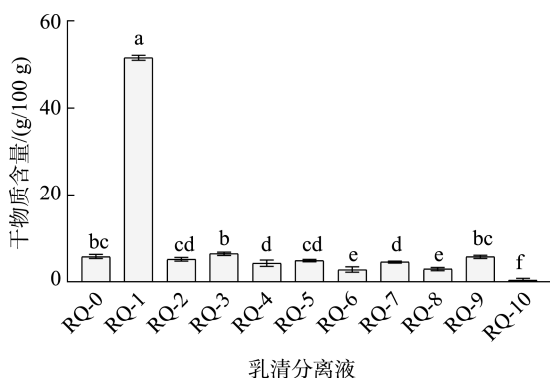


图 2 膜分离后得到的乳清分离液

Fig.2 Whey separation liquid obtained after membrane separation



注：不同小写字母表示具有显著性差异($P < 0.05$)，图 4-9 同。

图 3 乳清分离液的干物质含量

Fig.3 Dry matter content of each whey separation liquid

分离的规律。另外干物质含量越高，澄清度也越低。这与乳清液感官性状分析的结论一致。此外，RO 膜透过液 RQ-10 干物质含量为 0.01 g/100 g，显著低于其他乳清分离液($P < 0.05$)。利用 RO 膜的这一性质，可应用于乳清加工流程的终端水处理，有利于环境保护和能源的再利用。

2.4 乳清分离液的脂肪含量

由结果得出，乳清液的脂肪含量特征明显。RQ-1 的脂肪含量最高为 47.4 g/100 g，从乳清液 RQ-4 开始，均未检出脂肪。即说明乳清原液 RQ-0 经过离心分离，脱去了大部分脂肪，而微滤膜则完全阻止了脂肪分子通过，达到了完全除脂的目的。分离出的稀奶油 RQ-1，还可以用于乳的标准化，根据添加量来调整牛乳中脂肪所占的百分比。另外，乳清液 RQ-2、RQ-3 与传统酸乳清 RQ-0 的脂肪含量差异性不显著($P > 0.05$)，脂肪使得乳清的口感更细腻，从感官上乳清液 RQ-2、RQ-3 与传统酸乳清 RQ-0 的口感更为贴近。另外，RQ-0、RQ-2、RQ-3 脂肪含量分别为 0.52、0.06、0.41 g/100 g。根据 GB 28050—2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》要求，均属于低脂肪产品。

2.5 乳清分离液的蛋白质含量

乳清蛋白是丰富的活性肽来源，是评价乳清液营养

成分最重要的指标。乳清蛋白中包括 β -乳球蛋白、 α -乳白蛋白、免疫球蛋白、乳铁蛋白、乳过氧化物酶、牛血清蛋白、糖巨肽等生物活性成分，其中关键组分表征为 β -乳球蛋白、 α -乳白蛋白及免疫球蛋白^[33]。如图 4 所示，RQ-3 乳清分离液蛋白含量最高为 3.52 g/100 g，显著高于其他乳清液($P < 0.05$)，其蛋白含量是传统酸乳清 RQ-0 (0.82 g/100 g) 的 4.3 倍。这是因为实验中 MF 膜孔径为 0.2 μm ，大分子蛋白被 MF 膜截留。另外乳清液 RQ-5、RQ-9 中的蛋白含量较高，UF 膜截留液 RQ-5 与传统酸乳清 RQ-0 蛋白含量差异性不显著($P > 0.05$)。根据凯氏定氮法测定原理，图 4 中测得的各蛋白质含量是根据氮元素折算的结果。事实上每种分离液中的蛋白质含量仅是一个折算值，从分子量上来看 RQ-3 > RQ-5 > RQ-7 > RQ-9。GB 19301—2020《食品安全国家标准 生乳》中理化指标要求，蛋白质的含量需 ≥ 2.8 g/100 g。由此可以看出 RQ-3 乳清液属于高蛋白产品，蛋白含量高于一般牛奶中蛋白含量。值得注意的是，乳清中含有的蛋白质分子量较小，在抗氧化、抗高血压、降血脂、抗菌、抗肿瘤等方面，更具生物学价值。因此，开发 RQ-3 为高蛋白乳清饮品。

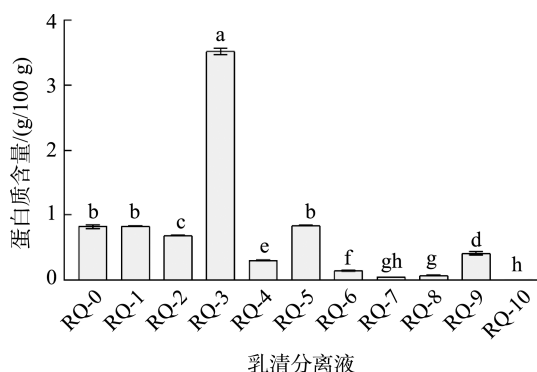


图 4 乳清分离液的蛋白质含量

Fig.4 Protein content of each whey separation liquid

2.6 乳清分离液的肽含量

由图 5 可知，从含量上看，乳清液 RQ-3 和 RQ-5 肽含量显著高于 RQ-7 和 RQ-9 ($P < 0.05$)，但 RQ-3 和 RQ-5、RQ-7 和 RQ-9 之间没有显著性差异($P > 0.05$)。结合各截留液中蛋白质含量，可计算出 RQ-3、RQ-5、RQ-7、RQ-9 中肽含量占总蛋白质含量的百分比分别为：26.1%、100%、100%、100%。即 RQ-3 中所含肽含量占总蛋白含量的 1/4，而 RQ-5、RQ-7、RQ-9 中总蛋白含量均为肽。肽含量上，RQ-3、RQ-5 的肽含量较高(分别为 0.92 g/100 g 和 0.87 g/100 g)，且差异性不显著($P > 0.05$)。RQ-7、RQ-9 的肽含量分别为 0.38 g/100 g 和 0.40 g/100 g，差异性不显著($P > 0.05$)。从分子量来看，4 种乳清截留液肽分子量为：RQ-3 > RQ-5 > RQ-7 > RQ-9。肽一般分为二肽、三肽、低聚肽、多肽几种。分子量的大小，与氨基酸的聚合度有关。乳源性生物活性肽，已被证明在抗

菌、抗氧化、抗血栓、有益骨骼健康方面有一定功能性^[34]。因此, 可将 RQ-3、RQ-5 开发成多肽型功能性饮品, 其差别是 RQ-3 中除了肽还含有一部分蛋白质, 而 RQ-5 为纯肽型的乳清饮品。

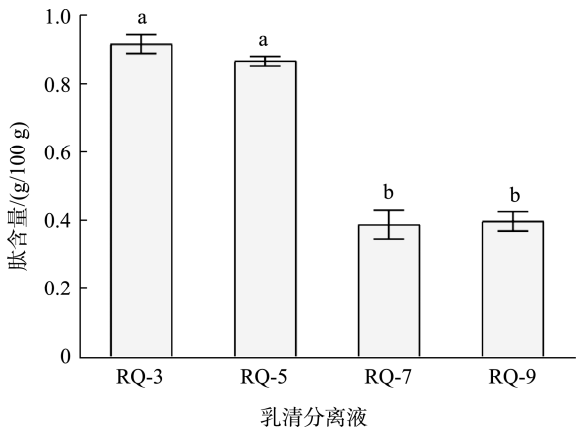


图 5 乳清分离液的肽含量
Fig.5 Peptide content of each whey separation liquid

2.7 乳清分离液的游离氨基酸含量

由表 3 可知, RQ-3 的游离氨基酸种类丰富且含量最高, 10 种游离氨基酸的总含量为 826.8 mg/kg。蛋氨酸和赖氨酸作为必需游离氨基酸, 在 MF 膜截留液中的含量较高, 因此 RQ-3 可以作为很好的营养补充饮品。另外, RQ-3 中含量最高的蛋氨酸磺, 也来源于蛋氨酸。有研究表明, 蛋氨酸、蛋氨酸磺这一类含硫氨基酸在抗氧化、抗化学致癌物等方面有一定作用。因此 RQ-3 具备一定的功能性^[35]。另外, 游离氨基酸的种类及含量与乳清截留液的风味也有密不可分的关联^[36]。从呈味特征上分类, RQ-3、RQ-7 中同时含有鲜味氨基酸(Cys-A、Lys)、甜味氨基酸(His)、芳香族氨基酸(Tyr)及苦味氨基酸(Met、Met-s) 4 种, 而 RQ-5 缺少芳香族氨基酸, RQ-9 缺少芳香族氨基酸和甜味氨基酸。

从营养价值及风味丰度上, RQ-3 优于其他乳清截留液。

2.8 乳清分离液的灰分及元素含量

乳清液经水浴蒸干、碳化、灰化后, 得到的白色粉末即为灰分。如图 6 所示, 灰分的量 RQ-3>RQ-2、RQ-5>RQ-4、RQ-9>RQ-8, 即 MF 膜、UF 膜、RO 膜浓缩后乳清液灰分的量大于浓缩前灰分的量。而 NF 膜浓缩后灰分的量小于浓缩前灰分的量(RQ-7<RQ-6), 另外 NF 膜截留液 RQ-7 与透过液 RQ-8 的灰分含量差异不显著 ($P>0.05$)。即说明 NF 膜的浓缩比低于其他 3 种分离膜, 选择的 NF 膜截留性能与 UF 膜差别不大。RO 反渗透膜截留了乳清液 RQ-8 中近乎所有的无机成分, 因此乳清分离液 RQ-9 的灰分含量最高, 为 0.88 g/100 g, 显著高于其他各级乳清液的灰分的含量($P<0.05$)。各乳清液中灰分的量远小于婴幼儿配方食品(乳基液态产品)灰分限量。因此, 乳清饮品不会对婴幼儿肾脏代谢带来负担, 同时通过图 7 可以看出, RQ-9 含有钾、钠、磷、钙、镁 5 种常量元素, 可调节人体矿物质平衡, 有助于防止骨质疏松、结直肠癌腺瘤发生的风险^[37-38]。综上, 考虑开发乳清液 RQ-9 为矿物质饮品。

2.9 乳清分离液的乳糖含量

由图 8 可知, RQ-1、RQ-3、RQ-4、RQ-5、RQ-8、RQ-10 乳糖含量均小于 2 g/100 g, 根据 GB 29050—2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》中分类, 以上乳清分离液均为低乳糖等级, 可以减缓乳糖不耐症的发生^[39]。由透过液和传统酸乳清的浓度, 可计算出乳糖通过 MF 膜、UF 膜、NF 膜、RO 膜的转移率分别为 41.72%、57.01%、35.11%、0.75%, 即说明: MF 膜、UF 膜、NF 膜可以允许乳糖分子通过, 对乳糖的截留率不高, RO 膜对乳糖的截留率高。RQ-9 的乳糖含量为 3.92 g/100 g, 显著高于其他乳清分离液($P<0.05$), 可以选择 RQ-9 乳清液用于乳糖的回收^[40]。回收的乳糖一方面添加到食品中用于调配营养成分比例; 另一方面, 回收的乳糖在糖果、人造奶油、烘焙食品、生物制药方面均有一定应用。

表 3 乳清分离液的游离氨基酸含量(mg/kg)
Table 3 Content of free amino acids in whey separation liquid (mg/kg)

	名称	缩写	RQ-3	RQ-5	RQ-7	RQ-9
1	丙氨酸	Ala	5.8±0.4	/	/	/
2	天门冬氨酸	Asp	67.0±4.2	/	/	/
3	磺基丙氨酸	Cys-A	58.6±2.8	17.0±1.4	6.4±0.9	3.8±0.2
4	半胱氨酸	Cys	36.5±0.7	/	/	/
5	甘氨酸	Gly	24.2±1.0	/	/	/
6	组氨酸	His	51.6±1.6	18.6±2.4	39.0±2.1	/
7	赖氨酸	Lys	85.0±2.1	13.6±2.4	45.8±4.5	/
8	蛋氨酸	Met	87.0±5.0	/	19.0±3.0	/
9	蛋氨酸磺	Met-s	392.0±8.1	78.4±3.5	256.4±13.6	12.0±4.2
10	苏氨酸	Tyr	19.0±2.2	/	24.2±1.4	/

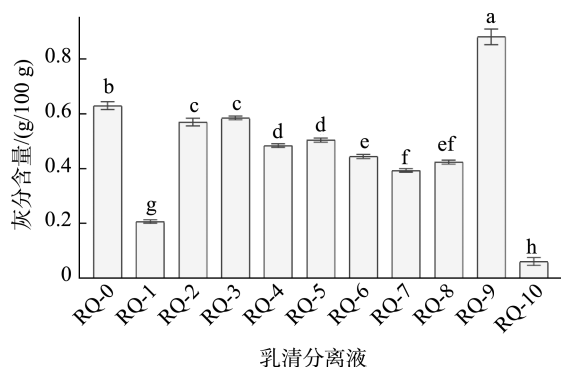


图 6 乳清分离液的灰分含量

Fig.6 Ash content of each whey separation liquid

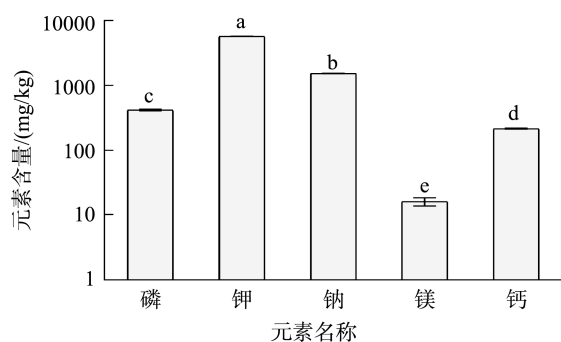


图 7 乳清分离液 RQ-9 的元素含量

Fig.7 Element content of whey separation liquid RQ-9

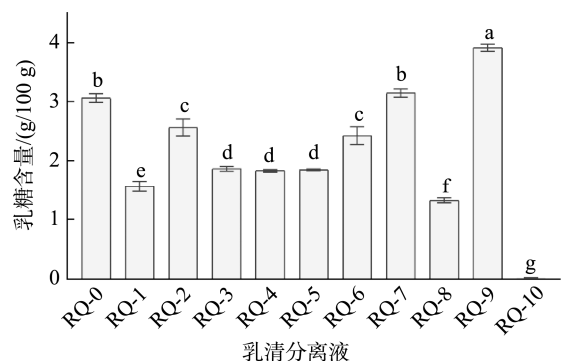


图 8 乳清分离液的乳糖含量

Fig.8 Lactose content of each whey separation liquid

2.10 乳清分离液的乳酸含量

如图 9 所示,各乳清截留液中乳酸的含量为 RQ-3>RQ-9>RQ-5>RQ-7,其中 RQ-3 乳酸含量为 0.36 g/100 g,显著高于其他乳清截留液($P<0.05$); RQ-5、RQ-7 乳酸含量相当,差异性不显著($P>0.05$)。由此可以看出, MF 膜截留了乳清液中的大部分乳酸,而 RO 膜可以完全截留乳酸分子。另外乳酸作为酸乳中最主要的有机酸,4 种乳清截留液乳酸含量在 0.15~0.36 g/100g 之间,乳酸含量适宜,还有酸度调节的空间,产品感官上可接受。因此,一方面乳酸可以作为酸度调节剂,指示发酵程度。如甜乳清未经发酵,

其酸味来源于酸味剂(无机酸)。而酸乳清中除了乳酸外,还有甲酸、乙酸、柠檬酸等,在口感层次上较为丰富;另一方面,乳酸还是一种天然的防腐剂,与其他有机酸起到一定的协同作用,可以破坏细胞结构,抑制细菌生长。因此,4 种乳清截留液不仅口感丰富,同时均有一定的抑菌能力,不易变质^[41]。

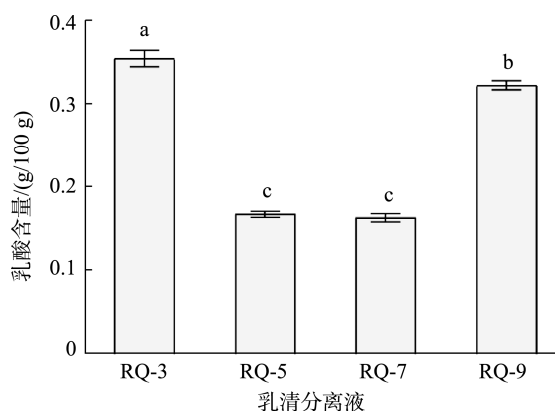


图 9 乳清分离液的乳酸含量

Fig.9 Lactic acid content of whey separation liquid

3 结论与讨论

传统酸乳清是生产传统乳制品时产生的液态副产物,复合膜分离的各级乳清分离液理化指标,与膜材料、操作条件、浓缩比等均有一定的关系。本研究得到的 4 种乳清产品,经营养成分分析得出: RQ-1, 脂肪含量占比近 50%。因此可以开发用于乳的标准化,提高牛乳的脂肪占比; RQ-3 为高蛋白、肽,富含 10 种 4 类特征风味游离氨基酸,营养成分丰富的乳清饮品; RQ-5 为纯肽饮品, MF 膜去除了大分子蛋白,更易吸收,具有一定的功能性;乳清液 RQ-9 中灰分和乳糖含量显著高于其他乳清液,可将 RQ-9 开发成矿物质饮品,调节人体矿物质平衡,或是对 RQ-9 进行喷雾干燥,回收的乳糖用于食品加工、生物制药等方面。RO 膜为复合膜分离技术的最后一级, RQ-10 可直接排放或饮用,低碳环保。复合膜分离技术,打破了传统酸乳清品质不稳定、开发利用难现状。系列乳清产品的开发不仅增加了乳清产品类目,为充分利用传统乳制品资源奠定了基础,同时解决了传统酸乳清直接排放带来的环境污染问题。另外,传统酸乳清产量巨大,原料供应充足,具备工业化生产的可能性。21 世纪以来,功能性产品市场潜力巨大,生物活性肽成为研究热点^[42]。本研究仅对肽总量进行测定,未来可通过构建适配体传感器法、凝胶电泳法、液相色谱-串联质谱法等,针对具体功能性蛋白、生物活性肽的种类、含量进行检测分析^[43]。或是在现有的系列乳清产品的基础上进行调配,增加产品风味、香型。为了保证评价的客观性,可利用电子鼻、电子舌、气相色谱-

质谱仪对风味指标进行测定和分析。对乳清系列产品的包装、运输、贮藏条件进行实验,延长产品的保质期,提高经济效益。

参考文献

- [1] ROCHA-MENDOZA D, KOSMERL E, KRENTZ A, *et al.* Invited review: Acid whey trends and health benefits [J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(2): 1262–1275.
- [2] GUO L, XU W, LI C, *et al.* Comparative study of physicochemical composition and microbial community of Khoormog, Chigee, and Airag, traditionally fermented dairy products from Xilin Gol in China [J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(3): 1564–1573.
- [3] 滕香旭. 传统发酵乳制品中菌群多样性分析及乳酸菌的分离鉴定[D]. 大连: 大连工业大学, 2016.
- TENG XX. Microflora analysis of traditional fermented dairy products and the isolation and identification of lactic acid bacteria [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016.
- [4] 郑伟, 康连和, 刘鹏斌, 等. 内蒙古锡林郭勒盟酸乳清中酵母菌的分离鉴定[J]. *畜牧与饲料科学*, 2023, 44(3): 103–108.
- ZHENG W, KANG LH, LIU PB, *et al.* Isolation and identification of yeasts from sour whey in Xilin Gol League, Inner Mongolia [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2023, 44(3): 103–108.
- [5] 王立立. 锡林郭勒盟民族传统乳制品发展情况分析[J]. *现代食品*, 2021(18): 62–64, 67.
- WANG LL. Analysis on the development of national traditional dairy products in Xilingol League [J]. *Modern Food*, 2021(18): 62–64, 67.
- [6] ASUNIS F, CARUCCI A, GIOANNIS G, *et al.* Combined biohydrogen and polyhydroxyalkanoates production from sheep cheese whey by a mixed microbial culture [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 322: 116149.
- [7] 齐·赛喜雅拉图, 韩成福. 内蒙古自治区地方特色奶制品高质量发展研究——以锡林郭勒盟为例[J]. *中国乳业*, 2023(12): 10–15.
- QI-SSYL T, HAN CF. Research on high quality development of local characteristic dairy products in Inner Mongolia Autonomous Region-taking Xilin Gol League as an example [J]. *China Dairy*, 2023(12): 10–15.
- [8] 雅梅, 哈斯其木格, 陈永福, 等. 内蒙古传统乳制品产业发展现状调研报告[J]. *中国乳品工业*, 2016, 44(7): 28–30.
- YA M, HA SQMG, CHEN YY, *et al.* Survey report of Inner Mongolian traditional dairy industry [J]. *China Dairy Industry*, 2016, 44(7): 28–30.
- [9] 伊茹盖. 蒙古族奶豆腐传统加工工艺改进及生产中 HACCP 的应用探索[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- YI RG. The improvement of the Mongolian hurood's traditional processing technology and application exploration of HACCP in production [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [10] 朱建军, 肖芳. 蒙古族传统乳制品生产中乳清蛋白工业化生产[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(21): 148–149.
- ZHU JJ, XIAO F. Industrialization production of the whey protein in the Mongolian traditional dairy production [J]. *Food Research Development*, 2014, 35(21): 148–149.
- [11] SOUZA RR, BERGAMASCO R, COSTA SC, *et al.* Recovery and purification of lactose from whey [J]. *Chemical Engineering & Processing*, 2010, 49(11): 1137–1143.
- [12] CASADO-COTERILLO C, DIAZ-GURIDI P, OTERO JA, *et al.* Modeling of lactic acid rejection from lactose in acidified cheese whey by nanofiltration [J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106(7): 4533–4544.
- [13] 刘鲁杰, 王刚, 赵黎明, 等. 膜分离技术在低分子糖类辅料制备中的应用[J]. *化学试剂*, 2024, 46(9): 134–142.
- LIU LJ, WANG G, ZHAO LM, *et al.* Separation and purification of low-molecular-weight sugar pharmaceutical excipients by membrane separation [J]. *Chemical Reagents*, 2024, 46(9): 134–142.
- [14] ROSALAM S, JAMILAH S, DUDUKU K. Recent developments of membrane technology in the clarification and concentration of fruit juices [J]. *Food Engineering Reviews*, 2023, 15(3): 420–437.
- [15] BHATTACHARJEE C, SAXENA VK, DUTTA S. Fruit juice processing using membrane technology: A review [J]. *Innovative Food Science Emerging Technologies*, 2017, 43: 136–153.
- [16] 金振宇, 杨宏志. 中空纤维超滤膜澄清蓝莓果汁工艺研究[J]. *食品与机械*, 2014, 30(5): 260–264.
- JIN ZY, YANG HZ. Optimization of hollow fiber on ultrafiltration in membrane clarification for blueberry juice by response surface methodology [J]. *Food & Machinery*, 2014, 30(5): 260–264.
- [17] 叶展, 徐勇将, 刘元法. 食用植物油制取与精炼技术研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(6): 1–12.
- YE Z, XU YJ, LIU YF. Research progresses on technologies for edible vegetable oil's preparation and refining [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(6): 1–12.
- [18] 傅冰. 茶油精炼中有机膜最佳过滤条件的研究[J]. *湖南农业科学*, 2013(21): 74–76.
- FU B. The optimal filtering condition of organic membrane in the camellia oil refining process [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013(21): 74–76.
- [19] RAFE A, RAZAVI SMA, HADDAD KMH. Refining of crude canola oil using PSA ultrafiltration membrane [J]. *International Journal of Food Engineering*, 2012, 8(2): 1–23.
- [20] 邱晓曼, 张耀, 陈程鹏, 等. 膜分离技术及其在发酵调味品行业的应用[J]. *中国调味品*, 2021, 46(3): 166–170.
- QIU XM, ZHANG Y, CHEN CP, *et al.* Membrane separation technology and its application in fermented condiment industry [J]. *China Condiment*, 2021, 46(3): 166–170.
- [21] 孙晔, 姚磊, 赵黎明. 酱油膜澄清过滤污染机理研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(5): 65–70.
- SUN Y, YAO L, ZHAO LM. Study of membrane fouling mechanism in soy sauce clarification [J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(5): 65–70.
- [22] 文志州. 不同截留分子质量超滤膜在米醋澄清中的应用研究[J]. *中国酿造*, 2016, 35(4): 65–68.
- WEN ZZ. Application research of ultrafiltration membrane with different molecular weight cut-off in rice vinegar clarification [J]. *China Brewing*, 2016, 35(4): 65–68.
- [23] 张平允, 刘慧杰, 倪奔, 等. PVDF 荷负电功能超滤膜组件饮用水深度处理工艺[J]. *净水技术*, 2019, 38(12): 74–78, 85.
- ZHANG PY, LIU HJ, NI B, *et al.* Technological process of negatively charged PVDF functional UF membrane module for drinking water advanced treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(12): 74–78, 85.
- [24] 魏永, 姚维昊, 桂波, 等. 超低压反渗透处理太湖水的中试分析[J]. *给水排水*, 2018, 54(12): 11–16.

- WEI Y, YAO WH, GUI B, *et al.* A pilot analysis for the treatment of Taihu Lake water by ultra-low pressure reverse osmosis membrane [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 54(12): 11–16.
- [25] 徐超. 掺杂聚乙二醇/壳聚糖的PVDF膜制备及自来水厂过滤性能研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2022.
- XU C. Preparation of PVDF membrane doped with polyethylene glycol/chitosan and its filtration performance in waterworks [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2022.
- [26] 刘江超, 王丹. 膜分离技术综述[J]. *当代化工研究*, 2023(3): 16–18.
- LIU JC, WANG D. Review of membrane separation technology [J]. *Modern Chemical Research*, 2023(3): 16–18.
- [27] LE TT, CABALTICA AD, BUI VM. Membrane separations in dairy processing [J]. *Journal of Food Research and Technology*, 2014, 2(1): 1–14.
- [28] 朱建军. 蒙古族传统乳制品生产中乳清粉的开发利用[J]. *农产品加工*, 2019(7): 71–72, 75.
- ZHU JJ. Development and utilization of whey powder in Mongolian traditional dairy products production [J]. *Farm Products Processing*, 2019(7): 71–72, 75.
- [29] 张海霞. 野生黑果枸杞营养价值、功能特性及其乳清饮料的开发[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- ZHANG HX. Nutritive value and functional characteristic of wild *Lycium ruthenicum* and the development of its whey beverage [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [30] YANG Y, WANG H, SHUANG Q, *et al.* Novel insights into flavor formation in whey fermented wine: A study of microbial metabolic networks [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 197: 115911.
- [31] 策力格尔. 酸马奶味乳清奶糖的配方、工艺优化及品质特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- CE LGE. Study on the formula, process optimization and quality characteristics of koumiss whey candy [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [32] ESTIKOMAH SA, HANIFA D, WIRANITA RT, *et al.* Preparation and antimicrobial activity of solid soap from kefir cheese wastewater [C]. England: IOP Publishing, 2024.
- [33] PATEL S. Functional food relevance of whey protein: A review of recent findings and scopes ahead [J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 19: 308–319.
- [34] 赵烜影, 刘振民, 雍靖怡, 等. 乳源生物活性肽研究进展[J]. *乳业科学与技术*, 2021, 44(6): 51–57.
- ZHAO XY, LIU ZM, YONG JY, *et al.* Progress in research on milk-derived bioactive peptides [J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2021, 44(6): 51–57.
- [35] 梅端果, 方芳, 蒲小春. 特殊医学用途配方食品中含硫氨基酸测定方法的研究[J]. *食品安全导刊*, 2022(28): 107–110.
- MEI DG, FANG F, PU XC. Study on determination of sulfur amino acids in formula food for special medical use [J]. *China Food Safety Magazine*, 2022(28): 107–110.
- [36] 王全利, 何四云, 贺习耀, 等. 酸奶发酵过程中游离氨基酸含量的分析[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(13): 3137–3140.
- WANG QL, HE SY, HE XY, *et al.* Change of free amino acids in fermentation of yoghurt [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(13): 3137–3140.
- [37] 高玢玲. 内蒙古四种家畜乳常量与微量元素测定及特征分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- GAO DL. Determination on macro and trace minerals of four livestock milk of Inner Mongolia and studies on minerals profile [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [38] CORMICK G, BELIZAN JM. Calcium intake and health [J]. *Nutrients*, 2019, 11(7): 1606.
- [39] 向雪松, 韩军花. 乳糖不耐受与科学饮奶专家共识[J]. *卫生研究*, 2024, 53(5): 689–693.
- XIANG XS, HAN JH. Lactose intolerance and scientific milk drinking expert consensus [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2024, 53(5): 689–693.
- [40] 石文奎. 基于膜分离技术乳清浓缩液的特性及乳清蛋白饮料研发[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- SHI WK. Characteristics of whey concentrate based on membrane separation technology and development of whey protein beverage [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [41] 宁亚维, 张东春, 付浴男, 等. 乳酸菌源苯乳酸与乳酸对食源性致病菌的协同抑菌机制[C]. 中国食品科学技术学会, 2022.
- NING YW, ZHANG DC, FU YN, *et al.* Synergistic antibacterial mechanism of lactic acid bacteria sourced phenyllactic acid and lactic acid against food-borne pathogens [C]. Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022.
- [42] 娄肖肖, 马洪鹏, 邵伟, 等. 乳清蛋白酶解制备的生物活性肽的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(15): 1–7.
- LOU XX, MA HP, SHAO W, *et al.* Research progress on biological activity of whey protein [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(15): 1–7.
- [43] 贺彦爽, 李腾飞, 冯子如, 等. 乳制品中功能性蛋白适配体传感器的构建及其在检测中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(16): 1–7.
- HE YS, LI TF, FENG ZR, *et al.* Constructions and applications of aptasensors for functional proteins detection in dairy products [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(16): 1–7.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)