

酸乳凝胶稳定性改善研究进展

岳娟, 姚晓琳*, 缙青霞, 韦湘滢, 岳健雄, 李丹, 杨丹
(陕西科技大学食品科学与工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 酸乳具有极高的营养价值和保健功能, 而酸乳存在的乳清析出、凝固不良等品质缺陷影响了消费者的感官体验。研究者们通常利用食品大分子修饰凝胶网络形成或诱导乳蛋白凝胶化等方法改善酸乳的凝胶稳定性及感官性能。本文从酸乳的质地缺陷及影响因素、凝胶稳定性改善策略及作用机制、未来发展趋势3个方面进行综述, 以期研究酸乳品质及稳定性改善提供一定的指导。

关键词: 酸乳; 食品大分子; 诱导凝胶化; 稳定性; 未来发展趋势

Advances in Gel Stability Improvement of Yoghurt

YUE Juan, YAO Xiaolin*, GOU Qingxia, WEI Xiangying, YUE Jianxiong, LI Dan, YANG Dan
(School of Food Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Yoghurt has high nutritional value and health-promoting functions; however, its quality defects such as whey syneresis and poor coagulation affect the sensory experience of consumers. Researchers commonly use food macromolecules to improve the gel stability and sensory properties of yoghurt by modifying the formation of gel networks or inducing the gelation of milk protein. In this review, we summarize the texture defects of yogurt, the factors influencing them, and the strategies to improve the gel stability of yogurt as well as the underlying mechanism. Also, we discuss future trends. This review will provide important guidance for improving the quality and stability of yoghurt products.

Keywords: yoghurt; food macromolecules; gelation induction; stability; future trends

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220816-199

中图分类号: TS252.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)13-0253-08

引文格式:

岳娟, 姚晓琳, 缙青霞, 等. 酸乳凝胶稳定性改善研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 253-260. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220816-199. <http://www.spkx.net.cn>

YUE Juan, YAO Xiaolin, GOU Qingxia, et al. Advances in gel stability improvement of yoghurt[J]. Food Science, 2023, 44(13): 253-260. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220816-199. <http://www.spkx.net.cn>

随着消费者对乳制品的需求急剧增加以及消费升级下新品牌、新种类、新口味的大量涌现, 使得我国酸乳市场体量和增速处于全球领先水平^[1]。酸乳包括凝固型和搅拌型两种, 是以生牛/羊乳或乳粉为原料, 经杀菌、发酵后制成的乳制品, 含有高生物价值的蛋白质、脂质和易吸收糖类, 以及种类丰富的维生素和矿物质^[2-3]。乳蛋白包括酪蛋白和乳清蛋白, 是酸乳形成凝胶的基质, 而酪蛋白胶束是构成酸乳凝胶的分子单元。如图1所示, 在酸乳形成过程中, 随着乳酸菌的代谢, 酸乳pH值逐渐降低, 当pH值达到酪蛋白等电点时,

酪蛋白胶束上的电荷分布改变, 静电斥力减小, 胶束趋于凝聚并逐渐凝胶化^[4-5]。

酸乳具有丰富的营养和保健功能, 但酸乳常存在凝固不良、乳清析出等质地缺陷, 影响消费者接受度。因此, 如何提高酸乳的品质和稳定性是酸乳生产中的技术难题。除控制原料乳成分及质量、发酵剂种类及活力、加工工艺等影响因素外^[6], 酸乳品质及稳定性还可通过添加多糖类稳定剂、各种类型的乳源成分和植物蛋白, 以及利用酸、热、盐、酶诱导乳蛋白凝胶化等策略改善(图2)。此外, 在实现酸乳稳态化的基础上, 添加脂质

收稿日期: 2022-08-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32272475; 31871812); 陕西省教育厅服务专项科研计划项目(22JC013)

第一作者简介: 岳娟(1998—)(ORCID: 0000-00003-4084-6863), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品胶体功能化。

E-mail: 1981630230@qq.com

*通信作者简介: 姚晓琳(1982—)(ORCID: 0000-0002-1327-1374), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品胶体功能化。

E-mail: yaoxiaolin1113@163.com

替代物、活性多糖、营养强化剂等可赋予酸乳更高的营养价值和保健功能,有利于酸乳产品的功能化和多元化发展。本文从酸乳质地缺陷及影响因素、酸乳凝胶稳定性改善方法及作用机理、酸乳稳态化的未来发展趋势等方面进行综述,以期对酸乳品质改善和乳制品生产提供理论指导和技术支持。

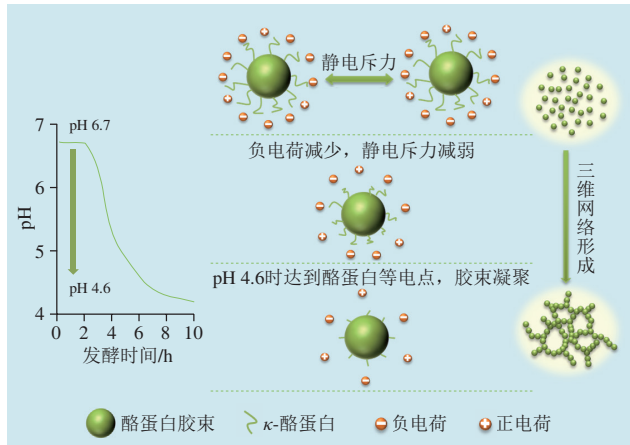


图1 酸乳发酵原理示意图^[4-5]

Fig. 1 Schematic diagram of the fermentation principle of yoghurt^[4-5]

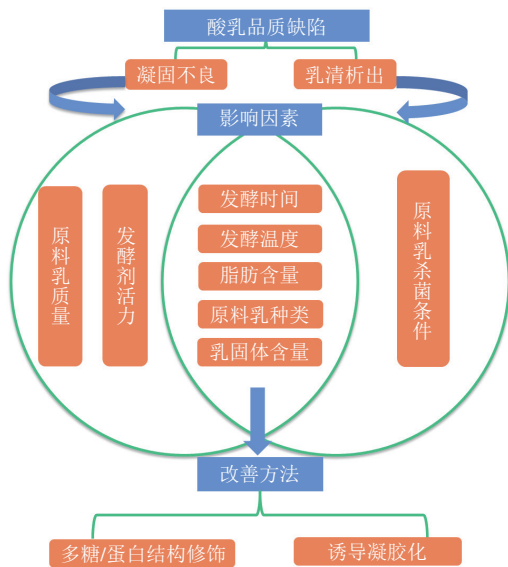


图2 酸乳质地缺陷及其影响因素和改善方法

Fig. 2 Texture defects of yoghurt, their influential factors, and methods for their improvement

1 酸乳质地缺陷及其影响因素

酸乳质地对乳制品工业和消费者具有重要意义,然而在其加工和冷藏过程中会出现乳清析出和凝固不良等质量缺陷,影响消费者的接受度。酸乳中大分子和胶体在一定条件下相互作用,交联形成内部含有大量液体的特殊网状结构,凝胶结构对酸乳凝胶稳定性具有重要

影响,并与原料乳质量、发酵条件、乳固体含量等因素密切相关。

乳清析出是搅拌型酸乳和凝固型酸乳的主要品质缺陷,会导致水溶性营养物质的损失和不良感官特性的产生。当原料乳由牛顿流体转化为半固体/固体产物时,形成的凝胶网络可以通过氢键作用捕获蛋白网络中的乳清,即持水力,与凝胶硬度共同决定了酸乳抗脱水稳定性,较差的酸乳抗脱水稳定性造成乳清析出,与配方不良、乳固体含量低、不适当的发酵时间/温度等因素相关^[7-9];凝固不良是凝固型酸乳的常见品质缺陷,酸乳在出库冷却过程中的轻微振动、二次包装以及运输过程中脱冷、振动均可能导致酸乳凝胶组织破坏和观感不佳^[10-11],主要受原料乳种类及质量、发酵剂活力,发酵条件、乳固体含量等因素共同影响(表1)。

表1 酸乳稳定性的影响因素及结果分析

Table 1 Analysis of factors influencing of yoghurt stability

影响因素	结果分析
原料乳种类	不同种类乳源的理化参数(固形物、蛋白质、脂质等)直接影响酸乳的质地特性和微观结构,如牛乳酸乳和羊乳(山羊乳、绵羊乳)酸乳相比,全脂绵羊乳酸乳表现出更高的硬度、表观黏度和持水力,更细的蛋白质链及更小的酪蛋白颗粒和孔径 ^[12]
原料乳质量	原料乳品质需满足:酸度在18℃以下,杂菌数不高于50万个/mL,总干物质质量分数不低于11.5%;若原料乳中存在残留抗生素、杀菌剂、防腐剂等都会抑制酸乳的发酵 ^[13]
原料乳的杀菌条件	原料乳的最佳杀菌条件为95℃、5 min,温度偏低或时间过短,无法使75%~80%的乳清蛋白变性,而变性乳清蛋白可与酪蛋白形成复合物,容纳更多水分 ^[13]
发酵时间	发酵时间过长引起酸度过高,易破坏乳蛋白形成的胶体结构,导致乳清分离;但发酵时间过短,凝胶结构不能充分形成,同样会导致乳清析出 ^[13]
发酵温度	发酵温度常保持在42~45℃,若温度低于最适温度,乳酸菌活力下降;若温度过高,将会抑制乳酸菌发挥作用,破坏凝胶组织形态并造成乳清析出 ^[13-14]
发酵剂	发酵剂活力弱或接种量太少会造成酸乳凝固性下降,常用发酵剂活力(通过产酸率计算)在0.7%~1.0%之间,若活力低于0.6%时,则不适合酸乳生产 ^[15]
脂肪含量	降低脂肪含量会使得酸乳微观结构孔隙较大、黏度和硬度降低,乳清析出严重,脂肪含量可能是决定其持水力的重要原因 ^[6]
非脂固体含量	酸乳凝胶的物理和感官特性受酸乳总固体含量特别是蛋白质含量的影响,如添加乳蛋白会显著影响酸乳的理化和质构特性,持水力也随之提升 ^[16-17]

2 食品大分子对酸乳凝胶稳定性的改善及作用机制

多糖、蛋白质等食品大分子因含大量羟基而显著增加了其与水分子的亲和力,可充分水化发挥增稠、稳定、胶凝等功能,赋予食品厚实、滑腻的口感^[18-20]。酸乳凝胶的空间网状结构是决定酸乳品质的重要因素。由酪蛋白聚集体组成的蛋白质凝胶易在脱水过程中析出乳清,加入食品大分子一方面可通过稳定蛋白质空间网状结构改善酸乳凝胶特性;另一方面可阻止乳清析出或乳脂絮凝,延长乳制品保质期^[21]。

2.1 多糖对酸乳凝胶稳定性的影响

2.1.1 多糖荷电性对酸乳凝胶稳定性的影响机制

多糖中的阴离子型多糖和非离子型多糖可分别通过不同机制改善酸乳的稳定性。阴离子型多糖表面带负电荷,与酪蛋白胶束表面带正电荷的官能团通过静电相互作用提高凝胶基质稳定性,加强酪蛋白网络并减少脱水,

而非离子型多糖则通过增加连续相黏度稳定酸乳凝胶网络^[6]。随着含量的增加,离子型多糖经历“无影响-桥接-排空失稳”等步骤,可与乳蛋白发生相结合或相分离。非离子型多糖经历“无变化-絮凝-聚合-稳定”等步骤,除淀粉外均与乳蛋白发生相分离。多糖因荷电性不同在酸乳凝胶形成中的稳定机制也不同,致使其微观结构、流变性等凝胶性能存在显著差异^[22]。常用多糖对酸乳凝胶稳定性的影响如表2所示。

表2 多糖对酸乳凝胶稳定性的影响
Table 2 Effects of polysaccharides on the gel stability of yoghurt

来源	代表多糖	电荷类型	性能影响
植物	瓜尔豆胶	非离子型	添加低质量分数(<0.05%)瓜尔豆胶后,持水性和黏附性提高;添加高质量分数(0.1%)瓜尔豆胶后,持水性和黏附性降低 ^[2]
	低甲氧基果胶	阴离子型	改善酸乳的理化、流变学性质和感官风味,乳清析出减少,硬度增加,延长了保质期 ^[2]
微生物	黄原胶	阴离子型	添加低质量分数(<0.1%)或较高质量分数(>0.25%)时,少量乳清析出;质量分数为0.15%时可快速水合,防止乳清析出 ^[24]
	结冷胶	阴离子型	硬度改善明显,乳清析出减少,但黏度则随着添加量的增加而显著下降,不利于口感 ^[25]
海藻	琼脂	非离子型	持水性提高,黏度增加,但凝胶坚硬、脆性高、组织粗糙、表面易收缩、弹性差 ^[26]
	κ -卡拉胶	阴离子型	低质量分数(0.05%)下导致早期的牛乳凝胶化,高质量分数(0.2%)下完全阻止酸乳凝胶化 ^[27]
改性多糖	羧甲基纤维素钠	阴离子型	酸度及硬度随添加量增加呈先上升后下降的趋势;添加量0.09%时,酸乳的酸度、硬度和持水力最佳,口感细腻、风味浓郁、乳清析出少 ^[28]

阴离子型多糖羧甲基纤维素钠可通过静电作用吸附在酪蛋白表面,以改善空间位阻,维持其在酸性条件下的稳定,而未吸附的羧甲基纤维素钠可通过增加体系黏度及减缓酪蛋白胶束的沉降速率,提高酸乳凝胶的稳定性^[29]。果胶对酸乳硬度影响较小,但可增加爽滑度和光泽,酸乳中加入高甲氧基果胶不能形成稳定的酸乳凝胶^[19],而加入低甲氧基果胶时,酸化过程可与酪蛋白胶束形成凝胶并减缓脱水。如图3所示,在酸乳凝胶形成过程中,乳酸的产生使pH值不断降低,酪蛋白胶束上的正电荷数量逐渐增多,当pH值降至酪蛋白等电点(pH 4.6)附近时,低甲氧基果胶的阴离子羧基通过静电作用吸附在酪蛋白胶束表面,果胶分子链间较强的空间斥力可防止酪蛋白胶束的聚集和沉淀,同时可使以酪蛋白胶束为中心的凝胶网络截留更多水分^[30-31]。此外,果胶分子链间的羧基可通过钙桥联结,结合氢键作用促进凝胶网络稳态化^[32]。这使得低甲氧基果胶作为增稠稳定剂在酸乳中广泛使用。

非离子型多糖瓜尔豆胶和刺槐豆胶在含量增加时引起相分离,形成高度紧凑的酪蛋白簇而失去了典型的酪蛋白网络^[19]。随着瓜尔豆胶含量的增加,酸乳凝胶的微观结构变化显著;添加0.05%瓜尔豆胶时,酸乳凝胶孔隙直径大于10 μm ,形成粗糙的酪蛋白网络;当瓜尔豆胶添加量达到0.1%时,酸乳凝胶结构更为紧凑;添加不同含量的刺槐豆胶时酸乳也呈现类似的微观形貌^[22]。在酸乳中

添加经乙酰化或羟丙基化的变性淀粉可增强酪蛋白的网络结构,显著改善其品质,这是由于变性淀粉可吸附在酪蛋白胶束表面,通过静电吸附、空间稳定和渗透作用防止酪蛋白胶束聚集^[33]。

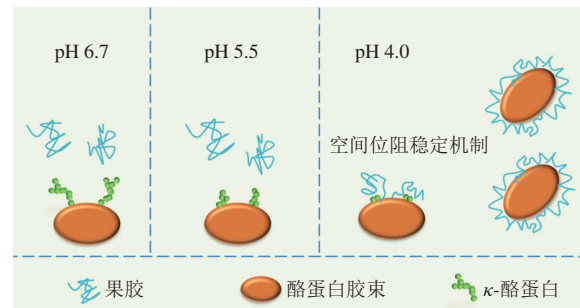


图3 不同pH值下果胶与 κ -酪蛋白在酪蛋白胶束上的吸附示意图^[30-31]

Fig. 3 Schematic diagram of the adsorption of pectin and κ -casein on casein micelles at different pH values^[30-31]

2.1.2 多糖复配对酸乳凝胶稳定性的影响机制

常用的多糖类酸乳稳定剂有果胶、刺槐豆胶、黄原胶、海藻酸钠等,但通常需要较大添加量才能发挥改善酸乳品质的作用,会导致酸乳风味、质地、口感等感官劣变,因此通过多种稳定剂复合使用可有效发挥协同效应,与单一稳定剂相比优势显著。卡拉胶的增稠特性及稳定性能使其成为酸乳的理想稳定剂,但其阳离子是限制卡拉胶与酪蛋白发生相互作用的主要因素,适当组合卡拉胶与含有半乳甘露聚糖的多糖,如瓜尔豆胶和刺槐豆胶等,可促进酸乳凝胶的稳定^[6,34]。海藻酸钠单独用于酸乳中会导致口感黏度大和滑润感较差,而单独使用果胶则需较大添加量才能发挥稳定效果,二者复配使用则可避免单独使用的缺陷,提高酸乳凝胶稳定性,且在 Ca^{2+} 存在下,海藻酸钠与低甲氧基果胶复配具有协同凝胶作用,可使酸乳形成致密、均匀、稳定的网络微结构^[18]。陈宇坤等^[35]向酸乳中加入三赞胶与刺槐豆胶,在添加量0.04%、复配质量比3:7条件下,复配多糖与酪蛋白之间形成的网络结构阻碍了体系中乳清的析出,且两种多糖的分子链与酸乳中酪蛋白、乳清蛋白等大分子链之间互相缠绕,使酸乳黏度增加,凝胶稳定性得到提升。

2.2 蛋白质对酸乳凝胶稳定性的影响

乳基蛋白强化是防止酸乳凝胶结构缺陷、增强酸乳营养的重要手段之一^[36]。乳粉和乳蛋白可显著改善酸乳的质地和营养,其对酸乳的质地影响如表3所示。通常使用脱脂乳粉(skim milk powder, SMP)对乳基总固体含量进行标准化来强化酸乳,但添加SMP的酸乳蛋白质含量较低,乳糖含量较高,多余的乳糖产生极低的酸度,无法维持酸乳质地的长期稳定^[37-38]。乳蛋白含80%酪蛋白和20%乳清蛋白,是乳制品重要的组成部分,具有多种功能特性,是良好的SMP替代物^[39]。研究表明,

常被用于强化酸乳的乳蛋白主要成分为酪蛋白酸钙 (calcium caseinate, CaCn) 或酪蛋白酸钠 (sodium caseinate, NaCn), 其通过增加蛋白质含量改善酸乳黏度, 从而降低酸乳的脱水。CaCn及NaCn的最佳质量浓度控制在1~2 g/100 mL, 添加量过高会导致酸乳过度增稠^[40], 对酸乳品质提升造成负面影响。此外, Ünal等^[41]研究酸乳在添加酪蛋白酸钠-钙 (sodium-calcium caseinate, SCC) 后贮藏28 d的质构特性, 发现添加2% SCC酸乳的硬度比添加等量SMP的酸乳提高40%~73%, SCC对酸乳硬度的提升作用归因于其可形成较大聚集体。Akalin等^[42]也发现SCC强化提高了酸乳的硬度和黏度, 这是因为钙与酪蛋白上的磷酸丝氨酸残基结合, 抑制了乳液中的耗散絮凝。与上述酪蛋白酸盐及SMP相比, 浓缩乳清蛋白 (whey protein concentrate, WPC) 松散多孔的微观结构有利于提高酪蛋白与乳清蛋白的桥接度, 使两者紧密交联, 使酸乳具有更高的黏度和持水性, 凝胶网络高度均匀, 孔隙更小^[43]。

表3 乳基蛋白强化对酸乳凝胶稳定性的影响

强化形式	重要成分	效果
乳粉	SMP	与未强化酸乳相比, 凝胶强度及持水性能有所增强, 但大量SMP会使其呈现粉状口感 ^[6]
	酪乳粉	添加1%~2%酪乳粉可抑制乳清分离, 降低酸度, 增强酸乳风味; 添加4%酪乳粉可改善低脂酸乳的结构性质 ^[44]
酪蛋白及其衍生物	酪蛋白胶束	较小尺寸酪蛋白胶束所强化的酸乳具有更高的储能模量 (G') 和硬度 ^[45]
	NaCn	显著降低pH 5附近的缓冲能力, 弹性好, 网络结构相对粗糙松散 ^[46]
乳蛋白	CaCn	增加持水性能力较弱, 提高硬度, 酸乳呈现出致密且粗糙的网络结构 ^[43]
	WPC	增加持水性的效果强于CaCn, 呈现出良好的网状结构, 气孔较小 ^[43,47]
乳清蛋白	乳清蛋白分离物 (whey protein isolate, WPI)	WPI添加量与酸乳黏度成正比, 与其硬度成反比, 酸乳流变性能及微观结构得到改善 ^[9]
	聚合乳清蛋白	促进凝胶网络形成, 持水性比添加WPC的酸乳高5.3%, 硬度较低, 但绝对黏度和黏度指数较高 ^[7]

明胶是控制酸乳脱水效果最显著的胶体之一^[48]。在添加明胶的样品中, 明胶与酪蛋白基质相互作用, 连接酪蛋白和乳蛋白链, 构建复杂的蛋白网络, 更有效地保留水相, 从而减少乳清析出^[49]。在酸乳中添加1.0%明胶后, 明胶与乳蛋白通过相互作用形成孔径小、均匀致密且坚固的网状结构, 能有效地保留水相, 减少乳清析出^[50]。

近年来基于宗教信仰、饮食习惯、素食主义及动物蛋白资源短缺等因素, 利用高质量可再生的植物蛋白替代动物蛋白已引起较多关注, 如谷物蛋白, 豆类蛋白等^[51-52]。豆类蛋白因其高蛋白品质成为植物性酸乳的重要来源, 添加大豆分离蛋白可使酸乳持水性由56.37%增至83.42%, 凝胶硬度显著提高, 这归因于牛乳热处理后变性大豆蛋白聚集形成凝胶网络, 有助于改善酸乳凝胶

稳定性^[53]。此外, 采用绿豆和豌豆蛋白等替代动物蛋白进行植物基酸乳生产, 不仅可提供充足的营养, 而且为消费者提供了更加广泛的选择^[54-56]。疏水作用和二硫键是维持豌豆蛋白和绿豆蛋白酸乳凝胶结构的主要分子间作用力, 而离子键和氢键对凝胶结构的作用较小。疏水相互作用的贡献归因于发酵过程中豌豆蛋白和绿豆蛋白分子结构展开, 疏水基团暴露形成疏水聚集体, 构建了稳定的网络结构^[52,57-58]。发酵过程中游离巯基含量的下降标志着二硫键的形成, 表明二硫键也在稳定酸乳凝胶结构中发挥作用。绿豆蛋白基酸乳的硬度、持水性和咀嚼性显著高于豌豆蛋白基酸乳, 表明绿豆蛋白基酸乳具有更好的凝胶质地, 有利于延长产品货架期^[59]。

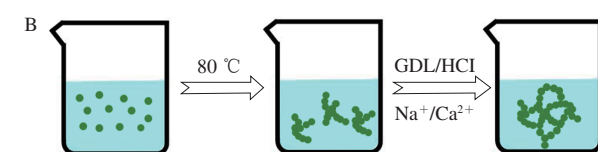
2.3 蛋白-多糖复合对酸乳凝胶稳定性的影响机制

单一蛋白质和多糖添加量过高会导致乳制品的理和感官特性发生很大变化, 产生负面影响。如酪蛋白加入过多时, 其较乳清蛋白占比过高, 制备的酸乳屈服应力和 G' 减小, 发酵时间延长, 微观结构更加粗糙, 硬度、黏度及持水力等指标降低^[60-62]。蛋白-多糖复配是解决上述问题的常用方法, 能有效防止单一稳定剂含量过大造成的感官劣变。然而蛋白和多糖复合能否有效增加酸乳的硬度、黏度、持水性等结构特性取决于蛋白质与多糖间的相互作用, 二者在静电相互作用下可发生可溶/不可溶性复合凝聚或隔离型相分离^[63-64], 并受分子质量、添加量、温度、pH值、离子强度等多种因素影响^[65]。Gyawali等^[66]使用0.05%果胶和1% WPC制备酸乳, 发现用果胶与WPC制成的酸乳具有更高的持水力, 这归因于果胶和WPC间的相互作用有助于酪蛋白胶束间形成刚性的三维网络, 阻止水分流动。Pang Zhihua等^[67]研究黄原胶/刺槐豆胶、卡拉胶和淀粉与WPI、NaCn和SMP的组合在酸乳凝胶中作为明胶替代品的潜力, 发现添加除卡拉胶外的多糖和WPI形成的凝胶强度更强, 持水性也更高; WPI和刺槐豆胶组合在稠度、可塑性和黏度方面的效果与明胶相似, 在厚重感和黏稠感方面的感官评分高于明胶。然而, WPI与卡拉胶组合使用时, WPI对酸乳凝胶的强化作用消失, 高度硫酸化的卡拉胶和乳蛋白间的相互作用可阻止酪蛋白和WPI间的相互作用^[68]。NaCn或WPI与淀粉的组合应用也出现类似现象, 这归因于多糖未能整合到凝胶网络中, 并抑制WPI-酪蛋白相互作用及酪蛋白聚集^[67,69-70]。

3 酸乳凝胶稳定性改善的其他方式及作用机制

研究表明, 酸乳凝胶除可通过添加多糖、蛋白质等大分子物质改善其稳定性外, 还可通过热、盐、酸、酶等方式诱导乳蛋白聚集, 进而使乳蛋白发生凝胶化, 显著影响酸乳的品质。1) 热诱导。未加热牛乳的酸乳网络较开放, 多孔结构较多, 而加热牛乳的酸乳网络较致密,

多孔结构数量较少,如图4A所示^[71]。这是由于热处理过程中,在共价和疏水相互作用下形成了乳蛋白复合物,改善了酸乳的微观结构^[60]。酸乳制作中预加热可控制细菌生长,此时乳清蛋白发生变性,空间结构展开,暴露出 β -乳球蛋白的游离巯基(-SH),通过 β -乳球蛋白和 κ -酪蛋白间的巯基-二硫键(-SH/S-S)交换反应,形成酪蛋白胶束复合物或可溶性乳清蛋白/ κ -酪蛋白复合物,该复合物是决定酸乳质构特性的关键因素^[60,72-75]。热诱导增强了二硫键和疏水作用,导致出现更紧密的蛋白质网络,将更多的水固定在凝胶网络中^[76-77]。2)盐诱导。在pH 7.0下加热蛋白溶液形成乳球蛋白聚集体,再引入盐离子形成凝胶,称为冷凝胶化^[78]。如图4B所示,利用 Ca^{2+} 和 Na^+ 诱导乳清蛋白聚集体的凝胶化,有助于屏蔽静电斥力^[79]。3)酸诱导。使用葡糖酸- δ -内酯(gluconolactone, GDL)和HCl进行酸诱导,使用GDL可在不搅拌的情况下降低pH值,降低静电斥力从而形成均匀的凝胶;GDL诱导酸化的时间较长,用HCl酸化可提高凝胶速率^[79]。4)酶诱导。氧化还原酶、乳过氧化物酶和转移酶是诱导乳蛋白交联最重要的酶类^[80-81]。微生物谷氨酰胺转氨酶(microbial transglutaminase, MTGase)处理后酸乳持水力和黏度增加,结构均匀,具有理想的质地,提高了酸乳凝胶稳定性,这是因为MTGase可催化蛋白质侧链中谷氨酰胺残基与赖氨酸间发生共价交联,使凝胶结构致密,提高酸乳的凝胶强度^[82]。由辣根过氧化物酶、葡萄糖氧化酶和葡萄糖组成的三元体系可诱导全牛乳中有限的蛋白质交联,并抑制细菌生长。葡萄糖氧化酶催化葡萄糖生成 H_2O_2 ,经辣根过氧化物酶诱导酪蛋白分子间发生交联,故交联后制得的酸乳形成致密的网络结构,提高了酸乳的持水力、黏弹性、硬度和黏附性^[83]。5)化学诱导。化学诱导是改善酸乳结构的重要方法,与酶法改性相比能够显著改善酸乳质地。温研^[83]研究了添加阿魏酸和过氧化物酶对酸乳的影响,发现阿魏酸和酶共同作用对酸乳质地改善效果优于单一处理方式,阿魏酸和酶均可交联酪蛋白,乳蛋白聚集程度更大,对品质改善更加明显。



A.热诱导对酸乳凝胶稳定性作用机制^[71]; B.盐诱导/酸诱导过程示意图^[79]。

图4 热、盐、酸等方式改善酸乳凝胶稳定性的作用机制

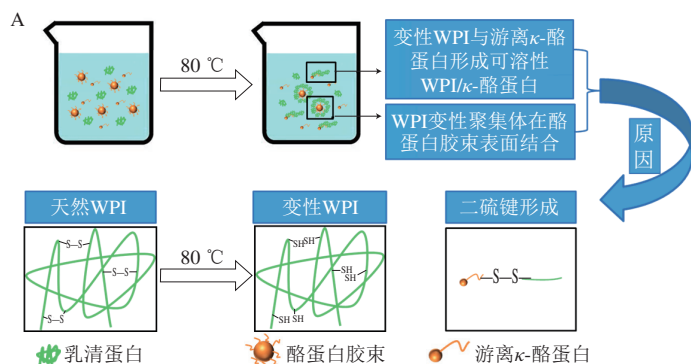
Fig. 4 Mechanism of the improvement of the gel stability of yoghurt by heat, salt and acid induction

4 酸乳稳态化的未来发展趋势

酸乳是世界范围内最受欢迎的乳制品之一,为迎合消费者对酸乳营养及功能的多元化需求,研究者逐渐聚焦于活性多糖、脂质替代及营养强化对酸乳质地和品质的影响。酸乳不仅可以改善肠道菌群,还可作为活性物质载体^[84],这为功能型酸乳的研发提供了理论支撑。有研究者将沙棘多糖^[85]、黑木耳多糖^[86]、槐花多糖/银耳多糖复配^[87]添加至酸乳中,发现不仅能够降低酸乳在贮藏期间的乳清分离、提高酸乳稳定性,还能赋予其多糖的特殊风味,应用潜力巨大。脱脂酸乳常存在黏度低、质地差和脱水收缩等品质问题^[88],因此,脂质替代是功能型脱脂酸乳的重要研究方向。除了变性淀粉、菊糖、WPI等可作为脂质替代物外,乳液凝胶也可添加至低脂食品中以改善产品的感官和质地^[89]。李红娟等^[90]将WPI-黄油乳液凝胶微粒加入酸乳中,对WPI热处理使其暴露更多疏水基团和反应位点,通过微观结构分析发现,酪蛋白易与WPI-黄油乳液凝胶微粒发生交联,形成更加紧密的网络结构,从而增强持水力。这为乳液凝胶应用于脱脂酸乳中作为脂质替代物提供了新思路。此外,添加如植物甾醇、牛磺酸、矿物质、维生素、 ω -3脂肪酸等营养成分,对所制备营养强化型酸乳的结构稳定效果较不明显^[91]。如强化矿物质铁(25 mg/kg)和 VD_3 (1 000 IU)对酸乳持水力、黏度和感官特性无显著影响,可用于营养素缺乏改善^[92-93],是营养强化食品的有益补充。

5 结语

本文立足于酸乳在形成过程中易出现品质缺陷问题,从酸乳质地缺陷及影响因素、酸乳凝胶稳定性改善方法及作用机理等方面的研究进行综述,旨在为实现凝胶性能良好、乳清析出少、组织结构紧密的酸乳凝胶体系构建提供理论参考。现有研究表明,在酸乳中加入食品大分子能增强其凝胶网络结构,可有效减少乳清析出、改善凝胶质地、提高酸乳稳定性,而开发含活性多糖、脂质替代物和营养强化剂的酸乳,以满足消费者对营养及功能的多元化需求且不影响酸乳优良质地,有利于酸乳制品产业得到长足稳定的发展。



参考文献:

- [1] 冯策. 聚焦中国酸奶市场 还有多少芳华可以绽放[J]. 乳品与人类, 2021(3): 12-21. DOI:10.3969/j.issn.1671-5071.2021.03.003.
- [2] 胡姝敏, 赵臻, 巩燕妮. 浅谈发酵乳的发展及创新趋势[J]. 中国乳业, 2020(10): 74-76. DOI:10.16172/j.cnki.114768.2020.10.025.
- [3] 许龙, 张冬洁, 李洪亮, 等. 酸奶发展的研究进展[J]. 农产品加工, 2019(12): 87-89. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2019.06.064.
- [4] 李荣华, 徐红华, 温其标. 乳成分对酸奶凝胶微观结构和流变学性质的影响[J]. 中国乳品工业, 2007, 35(1): 27-30. DOI:10.3969/j.issn.1001-2230.2007.01.006.
- [5] 文峰, 王稳航, 沈登莱. 乳酪蛋白胶束结构及其凝胶形成机制概述[J]. 食品研究与开发, 2004, 25(2): 29-32. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2004.02.010.
- [6] ARAB M, YOUSEFI M, KHANNIRI E, et al. A comprehensive review on yogurt syneresis: effect of processing conditions and added additives[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 12: 1-10. DOI:10.1007/s13197-022-05403-6.
- [7] EL BOUCHIKHI S, EL ALAOUY Y, IBRAHIMI A, et al. Syneresis investigations of lacto-fermented sodium caseinate in a mixed model system[J]. BMC Biotechnology, 2019, 19(1): 1-10. DOI:10.1186/s12896-019-0539-1.
- [8] GILBERT A, RIOUX L E, ST-GELAIS D, et al. Characterization of syneresis phenomena in stirred acid milk gel using low frequency nuclear magnetic resonance on hydrogen and image analyses[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105907. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.105907.
- [9] BIERZUŃSKA P, CAIS-SOKOLIŃSKA D, YIĞIT A. Storage stability of texture and sensory properties of yogurt with the addition of polymerized whey proteins[J]. Foods, 2019, 8(11): 548. DOI:10.3390/foods8110548.
- [10] 范淑玲, 赵畅, 张丽. 浅谈如何控制酸乳的品质[J]. 中外企业家, 2020(2): 232.
- [11] 李梦怡. 二次凝固型酸奶的工艺及其影响因素的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017: 13.
- [12] VIANNA F S, CANTO A C V C S, COSTA-LIMA B, et al. Milk from different species on physicochemical and microstructural yoghurt properties[J]. Ciência Rural, 2019, 49: 154-162. DOI:10.1590/0103-8478cr20180522.
- [13] 王毅, 陈勇, 王梅, 等. 凝固型酸乳的质量缺陷及控制[J]. 畜牧兽医杂志, 2013, 32(3): 41-43. DOI:10.3969/j.issn.1004-6704.2013.03.017.
- [14] ARAB M, RAZAVI S H, HOSSEINI S M, et al. Production and characterization of functional flavored milk and flavored fermented milk using microencapsulated canthaxanthin[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 114: 108373. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108373.
- [15] DAI S, CORKE H, SHAH N P. Utilization of konjac glucomannan as a fat replacer in low-fat and skimmed yogurt[J]. Journal of Dairy Science, 2016, 99(9): 7063-7074. DOI:10.3168/jds.2016-11131.
- [16] KRZEMINSKI A, GROBHABLE K, HINRICHS J. Structural properties of stirred yoghurt as influenced by whey proteins[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(10): 2134-2140. DOI:10.1016/j.lwt.2011.05.018.
- [17] DELIKANLI B, OZCAN T. Improving the textural properties of yogurt fortified with milk proteins[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(5): e13101. DOI:10.1111/jfpp.13101.
- [18] 侯团伟, 张虹, 毕艳兰, 等. 食品胶体的凝胶机理及协同作用研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 347-353. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201423067.
- [19] GYAWALI R, IBRAHIM S A. Effects of hydrocolloids and processing conditions on acid whey production with reference to Greek yogurt[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 56: 61-76. DOI:10.1016/j.tifs.2016.07.013.
- [20] ABBASTABAR B, AZIZI M H, ADNANI A, et al. Determining and modeling rheological characteristics of quince seed gum[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 259-264. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.05.026.
- [21] 王微, 赵新淮. 几种增稠剂对凝固型酸乳质地及微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2007, 28(8): 201-202. DOI:10.3969/j.issn.1002-0306.2007.08.061.
- [22] PANG Z, DEETH H, BANSAL N. Effect of polysaccharides with different ionic charge on the rheological, microstructural and textural properties of acid milk gels[J]. Food Research International, 2015, 72: 62-73. DOI:10.1016/j.foodres.2015.02.009.
- [23] KHUBBER S, CHATURVEDI K, THAKUR N, et al. Low-methoxyl pectin stabilizes low-fat set yoghurt and improves their physicochemical properties, rheology, microstructure and sensory liking[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 111: 106240. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106240.
- [24] 陈琼, 赵旭东, 闫薇薇, 等. 复配稳定剂对火龙果酸奶品质影响研究[J]. 通化师范学院学报, 2022, 43(4): 93-100. DOI:10.13877/j.cnki.cn22-1284.2022.04.014.
- [25] 沈玲, 韩梅, 于鹏. 亲水胶体对凝固型酸乳影响的研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(6): 1-4. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2013.06.001.
- [26] 安定, 张秋俊, 倪辉, 等. 琼脂复配开发酸奶稳定剂的研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(15): 219-222; 233. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.15.039.
- [27] CLARK S, MICHAEL M, SCHMIDT K A. Rheological properties of yogurt: effects of ingredients, processing and handling[M]// JOYNER S H. Rheology of semisolid foods. Switzerland: Springer, 2019: 203-229. DOI:10.1007/978-3-030-27134-3_7.
- [28] 蒋寒, 陈炼红, 张岩. 新型复合稳定剂对凝固型牦牛酸奶品质特性的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(11): 210-214.
- [29] 杜柏桥. 羧甲基纤维素钠(CMC)与酪蛋白的相互作用及其稳定酸性乳体系机理的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 123.
- [30] TROMP R H, DE KRUIF C G, VAN EIJK M, et al. On the mechanism of stabilisation of acidified milk drinks by pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(4): 565-572. DOI:10.1016/j.foodhyd.2003.09.005.
- [31] WUSIGALE, LIANG L, LUO Y C. Casein and pectin: structures, interactions, and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 391-403. DOI:10.1016/j.tifs.2020.01.027.
- [32] LAURENT M A, BOULENGUER P. Stabilization mechanism of acid dairy drinks (ADD) induced by pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(4): 445-454. DOI:10.1016/S0268-005X(03)00028-6.
- [33] CUI B, LU Y, TAN C, et al. Effect of cross-linked acetylated starch content on the structure and stability of set yoghurt[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 576-582. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.07.018.
- [34] TANG M, ZHU Y, LI D, et al. Rheological, thermal and microstructural properties of casein/*k*-carrageenan mixed systems[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113: 108296. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108296.
- [35] 陈宇坤, 乐袁通宇, 胡国华. 三赞胶和刺槐豆胶复配及其在酸奶中的应用[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 166-170.
- [36] BRUZANTIN F P, DANIEL J L P, DA SILVA P P M, et al. Physicochemical and sensory characteristics of fat-free goat milk yogurt with added stabilizers and skim milk powder fortification[J].

- Journal of Dairy Science, 2016, 99(5): 3316-3324. DOI:10.3168/jds.2015-10327.
- [37] ALKOBEISI F, VARIDI M J, VARIDI M, et al. Quinoa flour as a skim milk powder replacer in concentrated yogurts: effect on their physicochemical, technological, and sensory properties[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(4): 1113-1125. DOI:10.1002/fsn3.2771.
- [38] JØRGENSEN C E, ABRAHAMSEN R K, RUKKE E O, et al. Processing of high-protein yoghurt: a review[J]. International Dairy Journal, 2019, 88: 42-59. DOI:10.1016/j.idairyj.2018.08.002.
- [39] HASHIM M A, NADTOCHII L A, MURADOVA M B, et al. Non-fat yogurt fortified with whey protein isolate: physicochemical, rheological, and microstructural properties[J]. Foods, 2021, 10(8): 1762. DOI:10.3390/foods10081762.
- [40] 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. DOI:10.3168/jds.2018-15524.
- [41] ÜNAL G Ü, AKALIN A S. Influence of fortification with sodium-calcium caseinate and whey protein concentrate on microbiological, textural and sensory properties of set-type yoghurt[J]. International Journal of Dairy Technology, 2013, 66(2): 264-272. DOI:10.1111/1471-0307.12016.
- [42] AKALIN A S, UNAL G, DINKCI N, et al. Microstructural, textural, and sensory characteristics of probiotic yogurts fortified with sodium calcium caseinate or whey protein concentrate[J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(7): 3617-3628. DOI:10.3168/jds.2011-5297.
- [43] BARAKAT H, MOHAMED A, GEMIEL D G, et al. Microstructural, volatile compounds, microbiological and organoleptical characteristics of low-fat buffalo milk yogurt enriched with whey protein concentrate and Ca-caseinate during cold storage[J]. Fermentation, 2021, 7(4): 250. DOI:10.3390/fermentation7040250.
- [44] ZHAO L, FENG R, REN F, et al. Addition of buttermilk improves the flavor and volatile compound profiles of low-fat yogurt[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 98: 9-17. DOI:10.1016/j.lwt.2018.08.029.
- [45] JØRGENSEN C E, ABRAHAMSEN R K, RUKKE E O, et al. Fractionation by microfiltration: effect of casein micelle size on composition and rheology of high protein, low fat set yoghurt[J]. International Dairy Journal, 2017, 74: 12-20. DOI:10.1016/j.idairyj.2016.11.018.
- [46] DAMIN M R, ALCÂNTARA M R, NUNES A P, et al. Effects of milk supplementation with skim milk powder, whey protein concentrate and sodium caseinate on acidification kinetics, rheological properties and structure of nonfat stirred yogurt[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(10): 1744-1750. DOI:10.1016/j.lwt.2009.03.019.
- [47] ATALLAH A A, MORSY O M, GEMIEL D G. Characterization of functional low-fat yogurt enriched with whey protein concentrate, Ca-caseinate and spirulina[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 1678-1691. DOI:10.1080/10942912.2020.1823409.
- [48] YOUSEFI M, JAFARI S M. Recent advances in application of different hydrocolloids in dairy products to improve their techno-functional properties[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 88: 468-483. DOI:10.1016/j.tifs.2019.04.015.
- [49] ANDIÇ S, BORAN G, TUNÇTÜRK Y. Effects of carboxyl methyl cellulose and edible cow gelatin on physico-chemical, textural and sensory properties of yoghurt[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2013, 15(2): 245-251.
- [50] EVERETT D W, MCLEOD R E. Interactions of polysaccharide stabilisers with casein aggregates in stirred skim-milk yoghurt[J]. International Dairy Journal, 2005, 15(11): 1175-1183. DOI:10.1016/j.idairyj.2004.12.004.
- [51] KLOST M, DRUSCH S. Structure formation and rheological properties of pea protein-based gels[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 622-630. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.03.030.
- [52] YANG X, SU Y, LI L. Study of soybean gel induced by *Lactobacillus plantarum*: protein structure and intermolecular interaction[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 119: 108794. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108794.
- [53] VITAL A C, ITODA C, HOKAZONO T Y, et al. Use of soy as a source of protein in low-fat yogurt production: microbiological, functional and rheological properties[J]. Research, Society and Development, 2020, 9(11): e779119472. DOI:10.33448/rsd-v9i11.9472.
- [54] SEMBA R D, RAMSING R, RAHMAN N, et al. Legumes as a sustainable source of protein in human diets[J]. Global Food Security, 2021, 28: 100520. DOI:10.1016/j.gfs.2021.100520.
- [55] GAO Z, SHEN P, LAN Y, et al. Effect of alkaline extraction pH on structure properties, solubility, and beany flavor of yellow pea protein isolate[J]. Food Research International, 2020, 131: 109045. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109045.
- [56] LEVY R, OKUN Z, DAVIDOVICH-PINHAS M, et al. Utilization of high-pressure homogenization of potato protein isolate for the production of dairy-free yogurt-like fermented product[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106442. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106442.
- [57] YANG M, LI N, TONG L, et al. Comparison of physicochemical properties and volatile flavor compounds of pea protein and mung bean protein-based yogurt[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112390. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112390.
- [58] YANG X, KE C, LI L. Physicochemical, rheological and digestive characteristics of soy protein isolate gel induced by lactic acid bacteria[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 292: 110243. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2020.110243.
- [59] KLOST M, GIMÉNEZ-RIBES G, DRUSCH S. Enzymatic hydrolysis of pea protein: interactions and protein fractions involved in fermentation induced gels and their influence on rheological properties[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105793. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.105793.
- [60] ZHAO L L, WANG X L, TIAN Q, et al. Effect of casein to whey protein ratios on the protein interactions and coagulation properties of low-fat yogurt[J]. Journal of Dairy Science, 2016, 99(10): 7768-7775. DOI:10.3168/jds.2020-20040.
- [61] GILBERT A, RIOUX L E, ST-GELAIS D, et al. Smoothing temperature and ratio of casein to whey protein: two tools to improve nonfat stirred yogurt properties[J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(10): 10485-10499. DOI:10.3168/jds.2020-20040.
- [62] LESME H, RANNOU C, FAMELART M H, et al. Yogurts enriched with milk proteins: Texture properties, aroma release and sensory perception[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 98: 140-149. DOI:10.1016/j.tifs.2020.02.006.
- [63] GHASEMI S, JAFARI S M, ASSADPOUR E, et al. Production of pectin-whey protein nano-complexes as carriers of orange peel oil[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 177: 369-377. DOI:10.1016/j.carbpol.2017.09.009.
- [64] GHASEMI S, JAFARI S M, ASSADPOUR E, et al. Nanoencapsulation of *D*-limonene within nanocarriers produced by pectin-whey protein complexes[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 152-162. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.09.030.

- [65] PROTTE K, BALINGER F, WEISS J, et al. Establishing the biopolymer ratio of whey protein-pectin complexes before and after thermal stabilisation[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 554-562. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.11.015.
- [66] GYAWALI R, IBRAHIM S A. Addition of pectin and whey protein concentrate minimises the generation of acid whey in Greek-style yogurt[J]. Journal of Dairy Research, 2018, 85(2): 238-242. DOI:10.1017/S0022029918000109.
- [67] PANG Zhihua, DEETH H, PRAKASH S, et al. Development of rheological and sensory properties of combinations of milk proteins and gelling polysaccharides as potential gelatin replacements in the manufacture of stirred acid milk gels and yogurt[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 169: 27-37. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.08.007.
- [68] HEMAR Y, HALL C E, MUNRO P A, et al. Small and large deformation rheology and microstructure of κ -carrageenan gels containing commercial milk protein products[J]. International Dairy Journal, 2002, 12(4): 371-381. DOI:10.1016/S0958-6946(02)00032-8.
- [69] ROBERTS S A, KASAPIS S, DE SANTOS LÓPEZ I. Textural properties of a model aqueous phase in low fat products. Part 1: alginate, caseinate and starch in isolation, and in starch containing binary mixtures[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2000, 35(2): 215-226. DOI:10.1046/j.1365-2621.2000.00362.x.
- [70] SANDOVAL-CASTILLA O, LOBATO-CALLEROS C, AGUIRRE-MANDUJANO E, et al. Microstructure and texture of yogurt as influenced by fat replacers[J]. International Dairy Journal, 2004, 14(2): 151-159. DOI:10.1016/S0958-6946(03)00166-3.
- [71] MAHOMUD M S, KATSUNO N, ZHANG L, et al. Physical, rheological, and microstructural properties of whey protein enriched yogurt influenced by heating the milk at different pH values[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(6): e13236. DOI:10.1111/jfpp.13236.
- [72] MATUMOTO-PINTRO P T, RABIEY L, ROBITAILLE G, et al. Use of modified whey protein in yoghurt formulations[J]. International Dairy Journal, 2011, 21(1): 21-26. DOI:10.1016/j.idairyj.2010.07.003.
- [73] MAHOMUD M, HAQUE M A, AKHTER N, et al. Effect of milk pH at heating on protein complex formation and ultimate gel properties of free-fat yoghurt[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(5): 1969-1978. DOI:10.1007/s13197-020-04708-8.
- [74] OZCAN T, HORNE D S, LUCEY J A. Yogurt made from milk heated at different pH values[J]. Journal of Dairy Science, 2015, 98(10): 6749-6758. DOI:10.3168/jds.2015-9643.
- [75] ASADUZZAMAN M, MAHOMUD M S, HAQUE M E. Heat-induced interaction of milk proteins: impact on yoghurt structure[J]. International Journal of Food Science, 2021, 2021: 5669917. DOI:10.1155/2021/5669917.
- [76] MAHOMUD M S, KATSUNO N, ZHANG L, et al. Physical, rheological, and microstructural properties of whey protein enriched yogurt influenced by heating the milk at different pH values[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(6): e13236. DOI:10.1111/jfpp.13236.
- [77] LAKEMOND C M M, VAN VLIET T. Acid skim milk gels: the gelation process as affected by preheating pH[J]. International Dairy Journal, 2008, 18(5): 574-584. DOI:10.1016/j.idairyj.2007.11.001.
- [78] AKO K, NICOLAI T, DURAND D. Salt-induced gelation of globular protein aggregates: structure and kinetics[J]. Biomacromolecules, 2010, 11(4): 864-871. DOI:10.1021/bm9011437.
- [79] KHARLAMOVA A, CHASSENIEUX C, NICOLAI T. Acid-induced gelation of whey protein aggregates: kinetics, gel structure and rheological properties[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 263-272. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.02.043.
- [80] CHANG C H, KONG B H, ZHAO X H. Quality attributes of the set-style yoghurt from whole bovine milk as affected by an enzymatic oxidative cross-linking[J]. CyTA-Journal of Food, 2014, 12(3): 249-255. DOI:10.1080/19476337.2013.837963.
- [81] MOKOONLALL A, SYKORA L, PFANNSTIEL J, et al. A feasibility study on the application of a laccase-mediator system in stirred yoghurt at the pilot scale[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 119-127. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.03.027.
- [82] GHARIBZAHEDI S M T, CHRONAKIS I S. Crosslinking of milk proteins by microbial transglutaminase: utilization in functional yogurt products[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 620-632. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.10.138.
- [83] 温研. 牛乳的过氧化物酶处理对凝固型酸奶和干酪品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011: 23.
- [84] DEMIRKOL M, TARAKCI Z. Effect of grape (*Vitis labrusca* L.) pomace dried by different methods on physicochemical, microbiological and bioactive properties of yoghurt[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 770-777. DOI:10.1016/j.lwt.2018.07.058.
- [85] 周勇, 李伟, 彭祺菲, 等. 沙棘多糖对发酵乳凝胶特性的影响及沙棘多糖酸奶工艺优化[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(7): 26-31. DOI:10.19827/j.issn1001-2230.2020.07.006.
- [86] WANG J, LIU B, QI Y, et al. Impact of *Auricularia cornea* var. *Li* polysaccharides on the physicochemical, textual, flavor, and antioxidant properties of set yogurt[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 206: 148-158. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2022.02.141.
- [87] TANG R, LU Y, HOU C, et al. Co-supplementation of flos sophorae extract with *Tremella fuciformis* polysaccharides improves physicochemical, textural, rheological, and antioxidant properties of low-fat yogurts[J]. Journal of Food Quality, 2020, 2020: 2048756. DOI:10.1155/2020/2048756.
- [88] ARYANA K J, OLSON D W. A 100-year review: yogurt and other cultured dairy products[J]. Journal of Dairy Science, 2017, 100(12): 9987-10013. DOI:10.3168/jds.2017-12981.
- [89] LIANG X, MA C, YAN X, et al. Structure, rheology and functionality of whey protein emulsion gels: effects of double cross-linking with transglutaminase and calcium ions[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105569. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105569.
- [90] 李红娟, 刘婷婷, 邹璇, 等. 乳清蛋白-黄油乳液凝胶对低脂酸奶理化特性及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7): 71-77. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025857.
- [91] SLOAN A E. The top 10 functional food trends: the next generation[J]. Food Technology, 2002, 56: 32-57.
- [92] MOSTAFAI R, MOHAMMADI R, NACHVAK S M, et al. Fortified yogurt with vitamin D as a cost-effective food to prevent diabetes: a randomized double-blind clinical trial[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 42: 137-145. DOI:10.1016/j.jff.2018.01.001.
- [93] JALAL AGHDASIAN A, ALIZADEH A, SOOFI M. Development of iron and vitamin D₃ fortified low-fat synbiotic yogurt as a potential substrate for *Lactobacillus acidophilus* and *Bifidobacterium lactis*: evaluation of physicochemical and sensory properties during the storage time[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16: 2718-2725. DOI:10.1007/s11694-022-01377-3.