

非热处理技术控制酸奶后酸化研究进展

Advances in non-thermal treatment techniques to control yogurt post-acidification

牛宇琴¹ 王辰元² 赵培¹ 李树森²

NIU Yu-qin¹ WANG Chen-yuan² ZHAO Pei¹ LI Shu-sen²

刘巨龙² 孙二娜^{2,3} 吴子健¹

LIU Ju-long² SUN Er-na^{2,3} WU Zi-jian¹

(1. 天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津 300384; 2. 蒙牛高科乳制品〔北京〕有限责任公司, 北京 101107; 3. 内蒙古蒙牛乳业〔集团〕股份有限公司, 内蒙古 呼和浩特 011500)

(1. School of Biotechnology of Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300384, China;

2. Mengniu Hi-tech Dairy [Beijing] Co., Ltd., Beijing 101107, China;

3. Inner Mongolia Mengniu Dairy Industry [Group] Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 011500, China)

摘要:后酸化是影响酸奶货架期内感官品质、风味特征与稳定性的最主要因素之一。非热处理技术是控制后酸化的新兴手段,可以在有效控制酸奶后酸化的同时最大限度保持食品原有的营养特性及感官品质。文章综述了乳酸菌的后酸化机制,对高静压、超声波、脉冲电场、CO₂ 处理、辐照等非热处理工艺控制后酸化的机理和最新研究进展进行了阐述,并对非热处理技术后酸控制的未来发展方向进行了展望。

关键词:酸奶;后酸化;非热处理技术;乳酸菌

Abstract: Post-acidification is one of the most important factors affecting the sensory quality, flavor characteristics and stability of yogurt during shelf-life. Non-thermal treatments are novel methods to control post-acidification, which can maintain the original nutritional properties and sensory quality of food to the maximum extent. In this paper, the mechanism of post-acidification of lactic acid bacteria was reviewed. The mechanism and recent research progress of non-heat treatment processes such as ultra-high pressure, ultrasound, pulsed electric field, CO₂ treatment, irradiation were analyzed and provided theoretical guidance for the development and industrial application of non-heat acid control technology.

基金项目:科技部国家重点研发计划(编号:2022YFD2100705)

作者简介:牛宇琴,女,天津商业大学在读硕士研究生。

通信作者:孙二娜(1989—),女,蒙牛高科乳制品(北京)有限责任公司高级工程师,博士。E-mail: sunerna@mengniu.cn
吴子健(1973—),男,天津商业大学教授,博士。

E-mail: wzjian@tjcu.edu.cn

收稿日期:2023-02-17 **改回日期:**2023-05-18

Keywords: yogurt; post-acidification; non-heat treatments; lactic acid bacteria

酸奶含有牛奶的营养和丰富的活性乳酸菌,具有较高的营养价值。研究表明,摄入酸奶可以维持肠道菌群结构平衡^[1-2],促进肠道蠕动^[3],改善便秘及消化不良^[4-5],提高免疫力^[6-8]等。酸奶中的乳酸菌在运输、销售过程中会持续产生乳酸,当乳酸过量积累时会产生刺激性酸味,即后酸化。后酸化会严重影响酸奶品质^[9]。目前市场上的酸奶大多通过发酵后快速冷却和低温贮藏的方式来减缓后酸化过程,其主要机制是通过低温抑制乳酸菌的代谢产酸活性,减缓乳酸的积累。但是中国冷链的基础设施建设不够完善,三四线城市和农村冷链基础较为薄弱,限制了低温酸奶的售卖^[10]。因此,通过工艺处理从源头改善乳制品的后酸化,降低低温酸奶对于冷链系统的依赖从而使其具有更广阔的销售市场,已成为相关科研工作者和乳品企业的研究热点。

酸奶的后酸化控制,一方面要降低乳酸菌在贮藏过程中的产酸能力,另一方面还要保证酸奶中乳酸菌总数能够达到 GB 19302—2010 的要求(10⁶ CFU/mL 以上)。目前控制后酸化的研究方向主要有 3 种,分别为添加防腐剂或抑菌物质等抑制乳酸菌活性,利用诱变育种或基因工程等方法筛选弱后酸发酵菌株,利用工艺处理改善酸奶的后酸化。已有研究发现,通过添加山梨酸钾^[11]、花青素^[12]、细菌素^[13-14]、壳寡糖^[15-16]等防腐剂或天然抑菌成分可以抑制乳酸菌的活性,减少乳酸的产生,从而改善

后酸化。但消费者对于防腐剂的接受程度较低,对潜在安全性的担忧限制了其在乳制品行业中的应用。使用弱后酸菌株是目前实现乳制品弱后酸化的主要方法^[17-18],但目前商业化的弱后酸菌株可选择性较小,其对于脱冷导致的产品后酸化的改善效果有限。

通过工艺处理控制后酸化是指通过工艺处理降低发酵后发酵菌的代谢产酸活性,与其他方法相比具有成本低、稳定性好、适用范围广的特点。研究表明,利用后热处理^[19-20]、欧姆加热^[21-23]、射频^[24]等热处理工艺可延长低温酸奶的保质期,但热处理工艺易造成部分风味物质散失、乳清析出、蛋白变性等问题。文章拟对乳酸菌的产酸机理与耐酸机制进行分析,并阐述利用非热处理进行控制的技术原理与效果,以期为非热处理技术在后酸化控制中的工业化应用提供依据。

1 酸奶的后酸化机理

乳酸菌在代谢过程中会发酵糖类产生乳酸。酸性环境下,乳酸菌可以通过氢离子外排、代谢产生碱性物质中和氢离子等机制来维持细胞内 pH 稳态,保证代谢活性。若介质中 pH 持续降低,超出菌株耐酸范围,细胞内氢离子排外阻力增大,会使细胞内氢离子浓度持续增加,细胞代谢减缓,严重时甚至会造成菌体死亡。乳酸菌产酸机理和耐酸机制的研究有利于解决酸奶后酸化现象。

1.1 乳酸菌的产酸机制

目前,常用的酸奶发酵菌株是嗜热链球菌(*Streptococcus thermophilus*)和保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus*)。酸奶发酵初期,耐酸的嗜热链球菌优先进行生长并产酸,当介质 pH 值降至 5.0 时,耐酸的保加利亚乳杆菌生长速度加快,并逐渐主导乳酸的生成。随着酸奶酸度的降低,负反馈调节抑制了嗜热链球菌的代谢,而保加利亚乳杆菌耐酸性较强,可以通过 H⁺-ATP 酶等机制对胞内 pH 进行调节,维持了细胞内的 pH 稳态,保护乳糖渗透酶(乳糖转运关键酶)、β-半乳糖苷酶(乳糖水解关键酶)、乳酸脱氢酶(将丙酮酸还原为乳酸的关键酶)等产酸相关酶的活性,使保加利亚乳杆菌在发酵结束的酸性条件下仍然持续发酵乳糖产生乳酸^[25],产生后酸化现象。因此,酸奶的后酸化主要是由于保加利亚乳杆菌持续产酸导致的,对后酸化控制措施的开发也应以控制乳酸菌产酸为主要目标。

1.2 乳酸菌的耐酸机制

乳酸菌的酸胁迫应答是一个复杂的体系,包括降低细胞膜的通透性阻挡氢离子进入胞内、利用质子泵排出氢离子、利用特定的生化反应消耗氢离子、启动蛋白质核酸等大分子修复系统等途径综合应对外界环境的酸胁迫(图 1)。其中质子泵(H⁺-ATP 酶)、谷氨酸脱羧酶机制(GAD)、精氨酸脱氨酶途径(ADI)是乳酸菌调节细胞内 pH 稳态的主要机制。

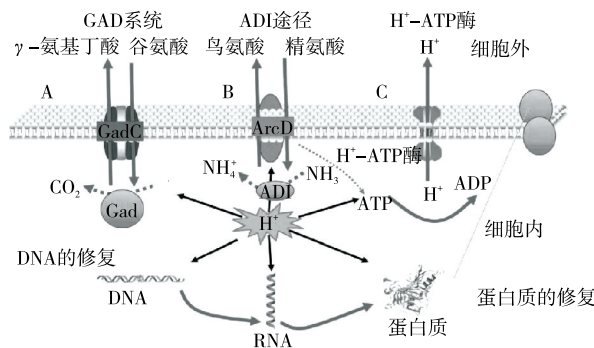


图 1 乳酸菌的抗酸胁迫机制图^[29]

Figure 1 Mechanisms of acid stress resistance in lactic acid bacteria

H⁺-ATPase 是细胞膜的主要蛋白之一,通过 ATP 水解释放的能量将质子排出细胞,维持细胞内的 pH 稳态,确保乳酸菌在酸性环境下进行正常的生命活动^[26]。不同菌株的耐酸能力不同,这与细胞膜上 ATP 酶的数量及活性密切相关。周虹瑾等^[27-28]以筛选的具有 H⁺-ATPase 缺陷型的保加利亚乳杆菌为发酵菌株,制备了弱后酸化的酸奶发酵剂。

GAD 系统主要包括 3 部分:氨基酸通透酶、谷氨酸脱羧酶和谷氨酸-γ 氨基丁酸的反向运输系统。低 pH 条件下,GAD 对菌体内已经产生的谷氨酸进行脱羧反应,消耗质子,从而降低细胞内酸度,同时将生成的碱性 γ-氨基丁酸通过反向运输系统运输至细胞外,降低胞外介质的酸度。

ADI 途径利用精氨酸脱氨酶、鸟氨酸氨甲酰转移酶和氨甲酰酯酶,将精氨酸转变为鸟氨酸、NH₃ 和 CO₂,同时生成 ATP。其中 NH₃ 可以与 H⁺ 反应,进一步使胞内 pH 保持在中性附近。不同菌种间 ADI 途径对乳酸菌耐酸作用的表现不同。

2 非热处理技术控制酸奶后酸化

一般情况下,商业酸奶的最佳 pH 为 4.4~4.0。通过工艺处理抑制乳酸菌活性,防止酸奶在贮藏过程中产生刺激性酸味,同时保证酸奶的营养价值、良好的风味口感,以及充足的活菌数是后酸化控制研究的重要内容。随着机械化新工艺、新技术的出现,利用非热加工技术控制酸奶后酸化具有均匀、低温、短时的优点,不仅能够最大限度维持食品的营养成分和原始风味,还具有能耗小、无污染、效率高、易控制的特点。高静压、超声波、脉冲电场、CO₂ 处理、辐照技术是目前已证明在后酸化控制中具有一定效果,且具有应用前景的非热加工技术(表 1)。

2.1 高静压技术

高静压(UHP)是将 100~1 000 MPa 的静态液体压力施加于液态或固态食品、生物制品等物料上并保持几秒钟至数分钟,通过改变食品中微生物细胞膜的流动性

表 1 非热工艺处理对功能食品中益生菌的影响

Table 1 Effect of non-thermal process treatment on probiotics in functional foods

工艺	基质	乳酸菌种类	优化后工艺参数	后酸控制效果	参考文献
高静压	低脂酸奶	嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌	200 ~ 300 MPa, 20 ℃, 15 min	贮藏第 20 天,与未处理样品相比,有机酸降低了 29%,有效控制了后酸,活菌数>10 ⁸ CFU/g	[30]
	全脂酸奶	嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌	300 MPa,10~20 ℃,10 min	10 ℃贮藏 15 d,滴定酸度和活菌数无明显变化,无后酸化现象	[31]
	酸奶	嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌	550 MPa,15 min,18 ℃,后添加双歧杆菌和嗜酸乳杆菌	贮藏 4 周,pH 值维持在 4.37~4.41,保持良好的酸味,通过后添加乳酸菌,活菌数维持在 10 ⁶ ~10 ⁷ CFU/g,达到国标要求	[32]
超声波	乳酸菌饮料	罗伊氏乳杆菌	60%功率,6 min,2S 脉冲	15 ℃贮藏 14 d,无明显酸化现象,活菌数>10 ⁷ CFU/g	[33]
	有机大米饮料	植物乳杆菌	80%功率,2 s,脉冲 4 min,重复 3 次	贮藏 11 d 后,乳酸含量从对照组的 105 mg/L 降至 35 mg/L,有效控制后酸化,同时植物乳杆菌活菌数>10 ⁷ CFU/g	[34]
	Ayran (稀释酸奶)	嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌	35 kHz,1~5 min,60 ℃	储存 30 d,可滴定酸度和 pH 值无显著变化, <i>L. bulgaricus</i> 活菌数≤10 ⁵ CFU/g, <i>St. thermophiles</i> 活菌数>10 ⁸ CFU/g,乳酸菌活菌数达到国标要求	[35]
脉冲电场	酸奶	嗜酸乳杆菌 LA-K	电压 5~25 kV,脉冲宽度 3~9 μs,脉冲周期 10 000~30 000 μs	随着 PEF 电压强度的增加,微生物的耐酸性减弱,表明其有改善后酸的潜力	[36]
	酸奶	嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌	24~36 kV,脉冲 20 μs,23~38 ℃	处理后,活菌数从 6.50×10 ⁸ CFU/g 降低至 2.35×10 ⁷ CFU/g,活菌数降低,表明其有改善后酸的潜力	[37]
CO ₂ 处理	乳酸菌饮料	嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌	4 ℃,0.5 kg/cm ²	通过抑制乳酸菌活性,抑制后酸,使产品保质期从 30 d 延长至 4 个月,活菌数略有下降	[38]
辐照	酸奶	嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌、嗜酸乳杆菌	γ 辐照 1~3 kGy	35 ℃贮藏 1 周后,未辐照样品 pH 值低于处理组样品,表现出改善后酸化的潜力;20 ℃贮藏 3 周,1~3 kGy 辐照处理活菌数>10 ⁶ CFU/g	[39]

和渗透性,降低细胞内 α-葡萄糖苷酶、β-葡萄糖醛酸酶、酯酶、酯合成脂肪酶、脂肪酶等酶的活性来影响细胞的糖代谢、脂类代谢等达到抑菌效果^[40]。研究^[30]表明,利用 UHP 处理酸奶,使得乳酸菌负责乳糖代谢的乳糖脱氢酶和 β-半乳糖苷酶失活,减少了酸奶中乳酸的产生;同时 ATP 酶也受到抑制,避免质子梯度的产生和酸液从微生物细胞流出到酸奶中,增加了酸奶的酸度。

UHP 对乳酸菌的抑制作用受诸多因素的影响,包括乳酸菌的种类、压力大小、保压时间、处理温度等。20 ℃、200~300 MPa 的压力处理嗜热链球菌与保加利亚乳杆菌(*m*_{嗜热链球菌}:*m*_{保加利亚乳杆菌} 为 1:1)发酵的低脂酸奶(0.3% 脂肪)15 min,冷藏 20 d 后仍保持初始 pH 值。与未加压处理的样品相比,酸奶的后酸化得到了显著改善。且贮藏期间可以保持乳酸菌数量>10⁸ CFU/g,但当压力≥400 MPa 时,活菌数将降低到 GB 19302—2010 中对发酵

乳的要求^[30]。UHP(200~300 MPa,10 min,10~20 ℃)处理对日本雪印全脂酸奶的质地和活菌数影响不显著,但压力≥400 MPa 时虽然可以控制酸奶的后酸化,但活菌数降低至 10⁴ CFU/g,不符合 GB 19302—2010 中对发酵乳活菌数的要求^[31]。Serra 等^[41]研究发现,在 200, 300 MPa 的压力下制备酸奶,不仅减缓了酸奶的后酸化,还增加了酸奶的黏稠度和持水能力,改善了酸奶的口感和风味。Jankowska 等^[32]研究发现,18 ℃、550 MPa 加压处理酸奶 15 min,可以杀死大多数的保加利亚乳杆菌,从而防止后酸化现象的发生,而嗜热链球菌由 10⁸ CFU/g 降低至 10⁶ CFU/g,同时通过后添加嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus*)和双歧杆菌,可以使酸奶的乳酸菌在保质期内保持在 10⁶~10⁷ CFU/g,符合 GB 19302—2010 中对发酵乳活菌数的要求。这也证明了与嗜热链球菌相比,保加利亚乳杆菌对压力更敏感,为利用

UHP 控制后酸化提供了两种思路:① 采用较温和的高静压处理条件,适量降低酸奶体系中乳酸菌的总量及代谢活性,起到后酸化控制的作用;② 采用较强的高静压处理条件,杀死酸奶中大多数的保加利亚乳杆菌,再通过后添加一定量乳酸菌的方式来保证活菌数。

2.2 超声波技术

超声波技术(US)是通过传声介质的相互作用产生巨大的能量,引起微生物内部空化,造成细胞质出现微流和/或液体喷射现象^[42],产生强大的剪切力,破坏细胞膜中的化学键,产生细胞膜孔,增加细胞膜流动性和通透性。除了这种机械应力外,US 还会通过微泡振荡诱导自由基和 H_2O_2 分子的形成,氧化细胞膜中的脂质,通过化学效应对细胞膜造成破坏。US 技术通过物理和化学效应,使细胞膜产生空腔、微孔、裂缝、气孔等,同时减少细胞膜上 H^+ -ATPase 数量^[43-44],降低乳酸菌的耐酸性,从而达到改善酸奶后酸化的效果。

Racioppo 等^[33]使用超声设备净功率 60% 脉冲 2 s 处理罗伊氏乳杆菌制备的乳酸菌饮料 6 min,可以避免样品的后酸化,同时保证乳酸菌的功能特性。使用 US(净功率 80%)3 次重复处理植物乳杆菌 4 min(2 s 脉冲),贮藏 11 d 后,样品中乳酸含量从对照组的 10^5 mg/L 降至 35 mg/L,有效控制了后酸化,同时活菌数 $>10^7$ CFU/g,满足 GB 19302—2010 的要求^[34]。60 °C、使用 35 kHz 的频率处理嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌发酵的 Ayran(土耳其的一种稀释酸奶)1~5 min,保加利亚乳杆菌的活菌数 $\leq 10^5$ CFU/g,嗜热链球菌活菌数 $>10^8$ CFU/g,表明 US 技术对保加利亚乳杆菌的抑制效果更强,通过减少主要产酸菌株保加利亚乳杆菌的活菌数,控制酸奶的后酸化,使酸奶货架期达 30 d,可滴定酸度和 pH 值均无显著差异,并利用嗜热链球菌确保了乳酸菌活菌数达到国标要求^[35]。

使用 US 技术控制后酸化,必须精确量化和控制工艺参数。当使用低水平 US 技术时,使细胞膜通透性增加,释放了 β -半乳糖苷酶,刺激了乳糖水解和半乳糖转化,提高了乳酸菌的发酵活性,不利于酸奶的后酸化控制^[45-47]。而较高水平的 US 处理,使细胞渗漏严重,进而导致乳酸菌大量死亡。

2.3 脉冲电场

脉冲电场(PEF)是将高电压(15~100 kV/cm)脉冲作用于电极间的食品,能够导致蛋白质构象改变,钝化 β -半乳糖苷酶、乳酸脱氢酶等与乳糖代谢相关的酶,从而减缓乳酸菌产酸,抑制酸奶的后酸化。此外,PEF 还可以通过电渗透作用,将电荷聚集至细胞膜周围,对细胞膜产生压力,改变细胞膜的通透性,抑制乳酸菌正常的生殖代谢活动,减缓酸奶后酸化现象的发生。

PEF 对微生物的影响受电场强度和脉冲持续时间的

影响^[48]。Cueva 等^[36]采用电压 5~25 kV、脉冲宽度 3 μs 、脉冲周期 30 000 μs 处理嗜酸乳杆菌 LA-K(*L. acidophilus* LA-K)。结果显示,随着电压强度的增加,酸奶的 $\text{OD}_{600\text{nm}}$ 值显著降低,乳酸菌活菌数减少,乳酸菌的耐酸耐胆盐能力降低,生长增殖能力减缓,表明 PEF 具有改善酸奶后酸化的能力。Dunn 等^[37]于 23~38 °C 下,使用 24~36 kV 的电压脉冲处理嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌发酵的酸奶 20 μs ,乳酸菌活菌数从 6.50×10^8 CFU/g 降低至 2.35×10^7 CFU/g,表明 PEF 可以抑制乳酸菌的增殖,具备改善酸奶后酸化的能力。

与 US 技术相同,利用 PEF 技术控制酸奶的后酸化现象同样需要精确量化和控制工艺参数。使用较低水平的工艺参数可以通过增加迟缓期和对数生长期细胞膜通透性,提高乳酸菌的发酵活性,促进代谢,缩短发酵时间^[49-50],发酵结束后细胞膜通透性恢复,无法起到抑制乳酸菌持续产酸作用。过高强度的工艺操作会导致细胞膜电穿孔,失去机械透性,造成细胞大量死亡,使乳酸菌活菌数过低,降低酸奶的益生功能。目前 PEF 技术研究主要集中于缩短酸奶发酵时间,对酸奶后酸化的研究需不断优化操作参数和验证,找到最优的试验方案,在确保控制酸奶后酸化的同时保证其益生效果。

2.4 CO_2 处理

高密度 CO_2 (DPCD)可以通过加压 CO_2 或者超临界 CO_2 (通常温度 <60 °C,压强 <50 MPa)的分子效应来抑制酶活、蛋白质变性和杀灭微生物等。 CO_2 分子是非极性分子,在高压状态下,易溶解在微生物细胞膜的脂质双分子层中,萃取细胞膜中的脂类物质,增加膜的流动性和通透性^[51-53]。同时,在压力作用下, CO_2 渗透到微生物细胞内,降低胞内 pH 值,使细胞质暴露在有毒的环境中,钝化糖代谢等相关酶,从而降低乳酸菌产乳酸能力,达到改善酸奶后酸化现象的目的。

4 °C、0.5 kg/cm² 的碳酸处理条件下,嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌发酵的酸奶饮品,虽然在贮藏初期酸度略高于未经处理的,但通过 DPCD 处理抑制乳酸菌活性,减缓了乳酸菌的产酸速率,可以使酸奶保质期延长至 4 个月,而未经 DPCD 处理的样品在 30 d 内持续产酸,最终生成刺激性酸味,影响酸奶品质^[38]。 CO_2 气体成本较低,易于操作,不会对乳的生化质量(酪蛋白、乳清蛋白、碳水化合物、维生素和有机酸)产生不良影响。

2.5 辐照技术

辐照指借助钴-60 所产生的高能量、强穿透性的 γ 射线,使微生物酶活性降低甚至失去活性,抑制微生物的代谢与增殖,从而达到改善酸奶后酸化的目的。随着照射剂量的增大,细胞器被破坏,细胞膜渗透压升高而破裂,造成微生物直接死亡,使酸奶的活菌数达不到国标要求。因此,在降低酶活性的同时,还要保证乳酸菌的存活率。

研究^[39]表明, γ 射线辐照(1~10 kGy)的酸奶可在脱冷状态下不同程度改善后酸化。辐照剂量越大,后酸化改善越明显,但当辐照剂量>3 kGy 时,活菌数显著降低,且会对塑料杯包装酸奶的感官品质产生不良影响。当辐照剂量为 10 kGy 时,酸奶中无活菌。为了保证酸奶中乳酸菌的活菌数,只能选择 0~3 kGy 低剂量的 γ 射线辐照。辐照技术可以在物料有包装的情况下使用,且不会产生残留物。与其他技术相比,其更方便清洁,还具备降低酸奶过敏原性的作用。

3 总结

酸奶因其独特的口感和较高的营养价值备受消费者青睐。但是后酸化现象破坏了保质期内酸奶的品质,制约了酸奶的销售和产业发展。高静压、超声波技术、高密度 CO₂、辐照等非热加工技术可以通过抑制酶的活性、使蛋白质变性和/或改变细胞膜通透性使乳酸菌处于亚致死状态,生理活性降低,乳糖代谢生成的乳酸含量减少,来对后酸化产生效果。高静压技术可以降低保加利亚乳杆菌活菌数,进而有效控制酸奶的后酸化。超声波技术处理采用的功率、频率、处理时间对乳酸菌菌体活性影响较大,因此操作过程中需要精确量化和控制超声波技术的工艺参数。利用高密度 CO₂ 控制酸奶的后酸化物美价廉且安全可靠,但目前研究较少,对不同乳酸菌的抑制效果尚需系统性研究。利用脉冲电场技术改善酸奶后酸化的效率高,但较高的设备要求和生产成本限制了脉冲电场技术的研究与应用。辐照技术方便清洁,由于安全因素导致目前应用较少,需要完善相关法律法规,保证操作人员的防护安全。随着机械智能制造发展以及工艺参数精准化控制研究的不断深入,非热加工技术的单种或多种技术联合使用将在酸奶后酸化控制中发挥重要作用。

参考文献

[1] O'MAHONY L, O'SHEA E, O'CONNOR E M, et al. Older adults and healthcare professionals have limited awareness of the link between the Mediterranean diet and the gut microbiome for healthy aging[J]. *Frontiers in Nutrition* (Lausanne), 2023, 10: 1104238.

[2] KONG C, LI Z, MAO Y, et al. Probiotic yogurt blunts the increase of blood pressure in spontaneously hypertensive rats via remodeling of the gut microbiota[J]. *Food & Function*, 2021, 12(20): 9 773-9 783.

[3] 段云峰, 蔡峰, 律娜, 等. 益生菌促进胃肠道健康的机制及应用[J]. *微生物学报*, 2022, 62(3): 836-847.

DUAN Y F, CAI F, LU N, et al. The mechanism and application of probiotics in promoting gastrointestinal health [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(3): 836-847.

[4] 陈家伦, 张万祥, 甘聃. 益生菌组合物对慢传输型便秘的改善作用[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(11): 95-100.

CHEN J L, ZHANG W X, GAN D. Alleviation of slow transit

constipation by probiotics complex [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(11): 95-100.

[5] LIU X R. Gut microbiota alterations from different *Lactobacillus* probiotic-fermented yoghurt treatments in slow-transit constipation [J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 38: 110-118.

[6] 黎雨晴, 汪泽坤, 杨恩东, 等. 单一或复合益生菌对小鼠免疫机能的影响[J]. *生物化工*, 2022, 8(3): 19-23.

LI Y Q, WANG Z K, YANG E D, et al. Effects of single and multiple strains of probiotics on immune function of mice [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2022, 8(3): 19-23.

[7] MAZZIOTTA C, TOGNON M, MARTINI F, et al. Probiotics mechanism of action on immune cells and beneficial effects on human health[J]. *Cells*, 2023, 12(1): 184.

[8] DI MARTINO L, OSME A, GHANNOUM M, et al. A novel probiotic combination ameliorates crohn's disease-like ileitis by increasing short-chain fatty acid production and modulating essential adaptive immune pathways [J/OL]. *Inflammatory Bowel Diseases*. (2023-01-28) [2023-02-04]. <https://doi.org/10.1093/ibd/izac284>.

[9] GUAN C, CHEN X, ZHAO R, et al. A weak post-acidification *Lactobacillus helveticus* UV mutant with improved textural properties[J]. *Food Sci Nutr*, 2021, 9(1): 469-479.

[10] 王蕾, 王赛. 基于模糊层次分析法的我国乳制品冷链物流发展影响因素分析[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2022(10): 1-8.

WANG L, WANG S. Analysis of influencing factors on cold chain logistics of dairy products in China based on FAHP method [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022(10): 1-8.

[11] 张小涛, 章伟锋. 山竹风味酸乳研制及其后酸化的防治措施研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(5): 36-42.

ZHANG X T, ZHANG W F. Preparation, evaluation and control measures of post-acidification of mangosteen fruit yogurt [J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(5): 36-42.

[12] 那治国, 高悦露, 唐敬思, 等. 蓝靛果花青素对乳酸菌生长及酸奶后酸化的影响[J]. *中国酿造*, 2020, 39(11): 147-152.

NA Z G, GAO Y L, TANG J S, et al. Effect of anthocyanin from *Lonicera caerulea* on lactic acid bacteria growth and yoghurt post-acidification [J]. *China Brewing*, 2020, 39(11): 147-152.

[13] BAI X, HAN M, YUE T, et al. Control of post-acidification and shelf-life prediction of apple juice fermented by *Lactobacillus* [J]. *Food Control*, 2022, 139: 109076.

[14] YUE Y, WANG S, LU X, et al. Analysis of the complete genome sequence of *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* with post-acidification capacity and its influence on yogurt in storage [J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 105(2): 1 058-1 071.

[15] 纪小敏, 王婷婷, 王宗继, 等. 壳寡糖对酸乳后酸化及贮藏稳定性的影响[J]. *中国乳品工业*, 2016, 44(6): 4-7.

JI X M, WANG T T, WANG Z J, et al. Effect of chitooligosaccharide addition on postacidification and storage stability of yogurt [J]. *China Dairy Industry*, 2016, 44(6): 4-7.

- [16] 付红岩, 姚晶, 金惠玉, 等. 壳寡糖功能性绿茶酸奶的研制[J]. 食品工业科技, 2013, 34(14): 220-223.
- FU H Y, YAO J, JIN H Y, et al. Study on chito-oligosaccharide function green tea yoghurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(14): 220-223.
- [17] ZHANG S, LI D Y, ZHANG X, et al. Global transcriptomic analysis of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* ATCC11842 reveals the role of LDB_RS05285 in the post-acidification of yogurt[J]. Food & Function, 2021, 12(19): 9 077-9 086.
- [18] 王成凤, 李柏良, 岳莹雪, 等. 弱后酸化保加利亚乳杆菌 KLDS1.1011 的筛选及其全基因组注释研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 103-110.
- WANG C F, LI B L, YUE Y X, et al. Screening of a weakly post-acidified *Lactobacillus bulgaricus* KLDS1.1011 and its genome-wide annotation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6): 103-110.
- [19] ZHANG C, YANG L, GU R, et al. Mild heat stress limited the post-acidification caused by *Lactobacillus rhamnosus* hsryfm 1301 in fermented milk[J]. Biotechnology Letters, 2019, 41(4/5): 633-639.
- [20] 杨新尧, 康志远. 后热处理工艺对酸奶贮藏过程中后酸化控制的影响[J]. 中国乳品工业, 2019, 47(8): 58-60.
- YANG X Y, KANG Z Y. Effect of heat treatment on yoghurt post acidification control during shelf life[J]. China Dairy Industry, 2019, 47(8): 58-60.
- [21] ROURAY W, MISHRA H N. Scientific and technical aspects of yogurt aroma and taste: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2011, 10(4): 208-220.
- [22] SUN H X, MASUDA F, KAWAMURA S, et al. Effect of electric current of ohmic heating on nonthermal injury to *Streptococcus thermophilus* in milk[J]. Journal of Food Process Engineering, 2011, 34: 878-892.
- [23] PEREIRA R N, TEIXEIRA J A, VICENTE A A, et al. Ohmic Heating for the dairy industry: A potential technology to develop probiotic dairy foods in association with modifications of whey protein structure[J]. Current Opinion in Food Science, 2018, 22: 95-101.
- [24] SIEFARTH C, TRAN T B, MITTERMAIER P, et al. Effect of radio frequency heating on yoghurt, I: Technological applicability, shelf-life and sensorial quality[J]. Foods, 2014, 3(2): 318-335.
- [25] 刘飞, 焦月华, 郭文奎, 等. 弱后酸化保加利亚乳杆菌突变株与亲本菌株 H^+ -ATPase 基因的相似性比较[J]. 食品工业科技, 2013, 34(15): 127-130.
- LIU F, JIAO Y H, GUO W K, et al. Comparison of similarity of H^+ -ATPase coding gene between wild strain and mutant strain with low post-acidification of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(15): 127-130.
- [26] KASHKET E R. Stoichiometry of the H^+ -ATPase of *Escherichia coli* cells during anaerobic growth[J]. Febs Letters, 1983, 154(2): 343-346.
- [27] 周虹瑾, 霍向东, 赵丹, 等. 常压室温等离子体诱变选育抗后酸化的乳酸菌[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(23): 112-117.
- ZHOU H J, HUO X D, ZHAO D, et al. Screening of lactic acid bacteria with anti-postacidification by atmospheric and room temperature plasma mutagenesis[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(23): 112-117.
- [28] 宋菲菲, 林凯, 蔡婷, 等. 弱化 F_1F_0 -ATP 酶植物乳杆菌的突变分析及其作为益生添加物在四川泡菜中的应用探索[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2015, 34(5): 97-102.
- SONG F F, LIN K, CAI T, et al. Reduced F_1F_0 -ATPase mutation analysis of *Lactobacillus plantarum* and its application in Sichuan pickle as probiotics adjunct[J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2015, 34(5): 97-102.
- [29] 黄俊, 张祥, 尤玉如, 等. 酸奶后酸化控制措施的研究进展[J]. 微生物学通报, 2016, 43(3): 663-670.
- HUANG J, ZHANG X, YOU Y R, et al. Advances in controlling post-acidification in yogurt[J]. Microbiology China, 2016, 43(3): 663-670.
- [30] BEGOÑA D A, M P C, ROSARIO G. Characteristics of stirred low-fat yoghurt as affected by high pressure[J]. International Dairy Journal, 2000, 10(1/2): 105-111.
- [31] TANAKA T, HATANAKA K. Application of hydrostatic pressure to yoghurt to prevent its after-acidification[J]. Journal of the Japanese Society for Food Science & Technology, 1992, 39(2): 173-177.
- [32] JANKOWSKA A, WISNIEWSKA K, REPS A. Application of probiotic bacteria in production of yoghurt preserved under high pressure[J]. High Pressure Research, 2005, 25(1): 57-62.
- [33] RACIOPPO A, CORBO M R, PICCOLI C, et al. Ultrasound attenuation of lactobacilli and bifidobacteria: Effect on some technological and probiotic properties[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 243: 78-83.
- [34] BEVILACQUA A, CASANOVA F P, PETRUZZI L, et al. Using physical approaches for the attenuation of lactic acid bacteria in an organic rice beverage[J]. Food Microbiology, 2016, 53: 1-8.
- [35] ERKAYA T, BAŞLAR M, ŞENGÜL M, et al. Effect of thermosonication on physicochemical, microbiological and sensorial characteristics of ayran during storage[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 23: 406-412.
- [36] CUEVA O A. Pulsed electric field influences on acid tolerance, bile tolerance, protease activity and growth characteristics of *Lactobacillus acidophilus* LA-K[D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2009.
- [37] DUNN J E, PEARLMAN J S. Methods and apparatus for extending the shelf life of fluid food products: US4695472[P]. 1987-09-22.
- [38] CHOI H S, KOSIKOWSKI F V. Sweetened plain and flavored carbonated yogurt beverages[J]. Journal of Dairy Science, 1985, 68

- (3): 613-619.
- [39] HAM J S, JEONG S G, LEE S G, et al. Quality of irradiated plain yogurt during storage at different temperatures [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2009, 22(2): 289-295.
- [40] 王蓉蓉, 孙传范, 王婷婷, 等. 超高压杀菌机制研究进展[J]. 高压物理学报, 2012, 26(6): 700-708.
- WANG R R, SUN C F, WANG T T, et al. Researchon mechanism of ultra-high presssure sterilization[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(6): 700-708.
- [41] SERRA M, TRUJILLO A J, GUAMIS B, et al. Evaluation of physical properties during storage of set and stirred yogurts made from ultra-high pressure homogenization-treated milk [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(1): 82-91.
- [42] MACIULEVICIUS M, TAMOŠIŪNAS M, JAKŠTYS B, et al. Investigation of microbubble cavitation-induced calcein release from cells in vitro[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2016, 42(12): 2 990-3 000.
- [43] EWE J, WAN ABDULLAH W, BHAT R, et al. Enhanced growth of lactobacilli and bioconversion of isoflavones in biotin-supplemented soymilk upon ultrasound-treatment [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19(1): 160-173.
- [44] LENTACKER I, DE COCK I, DECKERS R, et al. Understanding ultrasound induced sonoporation: Definitions and underlying mechanisms[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2014, 72: 49-64.
- [45] PITT W G, ROSS S A. Ultrasound increases the rate of bacterial cell growth[J]. Biotechnology Progress, 2003, 19(3): 1 038-1 044.
- [46] OJHA K S, MASON T J, O DONNELL C P, et al. Ultrasound technology for food fermentation applications [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34: 410-417.
- [47] NGUYEN T M P, LEE Y K, ZHOU W. Stimulating fermentative activities of bifidobacteria in milk by highintensity ultrasound[J]. International Dairy Journal, 2009, 19(6/7): 410-416.
- [48] NIELSEN H B, SONNE A, GRUNERT K G, et al. Consumer perception of the use of high-pressure processing and pulsed electric field technologies in food production[J]. Appetite, 2009, 52(1): 115-126.
- [49] LOGHAVI L, SASTRY S K, YOUSEF A E. Effect of moderate electric field frequency and growth stage on the cell membrane permeability of *Lactobacillus acidophilus* [J]. Biotechnol Prog, 2009, 25(1): 85-94.
- [50] CHANOS P, WARNCKE M C, EHRMANN M A, et al. Application of mild pulsed electric fields on starter culture accelerates yogurt fermentation[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(3): 621-630.
- [51] TAMBURINI S, ANESI A, FERRENTINO G, et al. Supercritical CO₂ induces marked changes in membrane phospholipids composition in *Escherichia coli* K12[J]. The Journal of Membrane Biology, 2014, 247(6): 96530.
- [52] TAMBURINI S, BALLARINI A, FERRENTINO G, et al. Comparison of quantitative PCR and flow cytometry as cellular viability methods to study bacterial membrane permeabilization following supercritical CO₂ treatment[J]. Microbiology (Reading, England), 2013, 159(6): 1 056-1 066.
- [53] GARCIA-GONZALEZ L, GEERAERD A H, MAST J, et al. Membrane permeabilization and cellular death of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Saccharomyces cerevisiae* as induced by high pressure carbon dioxide treatment[J]. Food Microbiology, 2009, 27(4): 541-549.

(上接第 47 页)

- [9] 黄子敬, 王晓玲, 杨钦沾, 等. 超高效液相色谱—串联质谱法同时测定畜禽肉中磺胺类、喹诺酮类、硝基咪唑类兽药残留 [J]. 分析试验室, 2014, 33(10): 1 184-1 188.
- HUAGN Z J, WANG X L, YANG Q Z, et al. Determination of sulfonamides, quinolones and nitroimidazoles in meat by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2014, 33(10): 1 184-1 188.
- [10] 许先猛, 张增帅, 郭俊花, 等. 苹果多酚提取和纯化关键技术研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 211-213.
- XU X M, ZHANG Z S, GUO J H, et al. Research progress on the extration and purification technology of apple polyphenols [J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 211-213.
- [11] 张亚瑾, 焦阳. 冷冻和解冻技术在水产品中的应用研究进展 [J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 215-221.
- ZHANG Y J, JIAO Y. Research status and prospect of freezing and thawing technologies of aquatic products[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 215-221.

(上接第 233 页)

- [55] LI S, HU Y W. Pathogenesis of uteroplacental acute atherosclerosis: An update on current research[J]. American Journal of Reproductive Immunology, 2021, 85(6): e13397.
- [56] TRESSERRA-RIMBAU A, RIMM E B, MEDINA-REMÓN A, et al. Inverse association between habitual polyphenol intake and incidence of cardiovascular events in the PREDIMED study [J]. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 2014, 24(6): 639-647.
- [57] SUN L J, MIAO M. Dietary polyphenols modulate starch digestion and glycaemic level: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 60(4): 541-555.
- [58] BELCARO G, CESARONE M R. Prevention of progression of early subclinical atherosclerosis in women: A pilot registry[J]. Medical & Clinical Research, 2022, 7(4): 45-50.
- [59] CAO A H, WANG J, GAO H Q, et al. Beneficial clinical effects of grape seed proanthocyanidin extract on the progression of carotid atherosclerotic plaques[J]. Journal of Geriatric Cardiology: JGC, 2015, 12(4): 417-423.