

牛乳加工过程中的微生物控制

王明录, 王秀秀, 张鸿雁*

(山东师范大学生命科学学院, 济南 250014)

摘要: 伴随社会经济的发展和人们饮食习惯的改变, 牛乳及其制品已成为人们日常生活中不可或缺的一部分。牛乳的安全问题一直受到消费者的广泛关注, 微生物污染是牛乳加工过程中最重要的质量影响因素, 因此对其防控显得尤为重要。本文对牛乳中主要的微生物污染类型进行了介绍, 对牛乳生产过程中的质量控制体系建设进行了简要说明, 阐明通过有效的杀菌手段和预防控制体系可极大减少牛乳的微生物污染。并对目前主流的牛乳杀菌方法与技术进行了综述, 简要介绍了几种杀菌手段的杀菌原理以及优缺点, 展示了现代杀菌技术的发展方向。

关键词: 牛乳; 微生物; 杀菌技术; 冷杀菌; 质量控制

Microorganism control in milk processing

WANG Ming-Lu, WANG Xiu-Xiu, ZHANG Hong-Yan*

(College of Life Science, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

ABSTRACT: With the development of social economy and the change of people's dietary habit, milk and its products have become an indispensable part of people's daily life. The safety of milk has been widely concerned by consumers. Microbial contamination is the most important influencing factor in the milk processing. Therefore, it is very significant to prevent and control microbial contamination. This paper introduced that the main types of microbial contamination in milk, briefly described the construction of the quality control system in the milk production process and clarified that effective sterilization methods and preventive control systems which could greatly reduce microbial contamination in milk, reviewed the current mainstream milk sterilization methods and technologies, briefly introduced the sterilization principles, merit and demerit of several sterilization methods, and demonstrated the development direction of modern sterilization technologies.

KEY WORDS: milk; microorganisms; sterilization technology; cold sterilization; quality control

1 引言

牛乳作为一种营养价值高且丰富的天然食品^[1], 是人们生活中必不可少的营养来源^[2], 牛乳及其制品已成为我国国民经济的重要组成部分。乳制品是使用牛乳(或羊乳等)

作为主要原料依据相关标准制作的产品^[3]。在乳制品生产过程中, 微生物防控是十分重要的一步, 而作为主要原料的牛乳的微生物控制是保证牛乳加工过程中不受微生物污染的重要前提^[4]。

随着人们生活水平的提升和生活观念的更新, 人们

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0401101)、国家自然科学基金项目(31871874)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program (2016YFD0401101), and National Natural Science Foundation Project (31871874)

***通讯作者:** 张鸿雁, 教授, 主要研究方向为食品安全检测及乳制品质量控制。E-mail: zhanghongyan@sndu.edu.cn

***Corresponding author:** ZHANG Hong-Yan, Professor, College of Life Science, Shandong Normal University, No.88, Wenhua East Road, Jinan 250014, China. E-mail: zhanghongyan@sndu.edu.cn

对于牛乳的要求已不仅体现在安全方面, 更多的也开始关注营养需求。牛乳杀菌是乳制品生产过程中至关重要的环节, 杀菌不彻底会造成后续的加工过程中微生物大量繁殖, 直接影响产品质量。同时, 杀菌方式也会很大程度地影响牛乳的营养成分、活性因子、风味及颜色^[5,6]。目前常规采用的杀菌方式主要是热杀菌方法, 即采用高温杀灭微生物, 但温度对某些活性成分和营养物质会造成破坏^[7], 对牛乳的理化性质、风味产生不利影响, 并引起牛乳的某些感官品质的下降^[8]。低温长时间的杀菌方式虽然对营养素的损伤较小, 但保存期短且需要冷链储存运输, 非常不便。因此, 选择合适的灭菌方式成为了保证牛乳安全与营养的重要手段。

本文首先介绍了牛乳中常见的微生物污染类群, 其次简要介绍了乳品生产企业的微生物污染防控措施, 后续列举了目前的一些牛乳杀菌技术, 并阐述了其局限性, 通过对相关的冷杀菌技术的综述, 阐述了杀菌技术的发展趋势。本文旨在通过阐明牛乳加工过程中微生物控制的过程性和重要性, 为牛乳加工企业设计合理的微生物控制手段及防控措施提供理论指导, 并阐明创新杀菌工艺的重要性。

2 牛乳加工过程中常见的微生物污染

由于牛乳本身营养物质丰富, 为微生物的生长提供了有利条件, 加之其在加工过程中的质量和环境因素控制等问题, 导致其在生产过程中极易受到各种有害微生物的污染^[9]。牛乳中常见的微生物污染包括致病型微生物和腐败型微生物 2 大类。

2.1 致病型微生物

牛乳中致病型微生物种类较多, 主要包括金黄色葡萄球菌^[10]、致病性大肠杆菌^[11]、沙门氏菌^[12]、李斯特氏菌^[13]、蜡样芽孢杆菌^[14,15]等。病畜、病人等细菌携带者可能作为致病性微生物的来源进入原料乳, 如果在生产和加工过程中消毒杀菌不到位, 很容易导致病原菌扩散, 一经食用将导致中毒甚至死亡。

2.2 腐败型微生物

牛乳中可能存在的腐败型微生物主要包括乳酸菌、丙酸菌^[16]、丁酸菌、胨化细菌和脂肪分解菌等。这些微生物会通过分解糖分、蛋白质和脂肪等降低乳制品的营养价值, 影响口感。

3 牛乳加工过程中的微生物防控

3.1 微生物污染的控制措施

3.1.1 牛乳收取、运输、储存过程中的微生物控制

在牛乳加工前的收取、运输和储存过程中首先要进行微生物的防控^[17]。在收取过程中要对收取工具和器皿进行

消毒杀菌处理, 对奶牛的相关部位进行相应的处理以减少微生物的富集与传播。同时工作人员也应严格遵守操作规范, 做好自身的消毒清洁工作^[18]。在运输和储存过程中也应注意容器的清洁卫生, 定期进行消毒杀菌。要减少运输时间并尽可能避光, 牛乳要全程低温储存以抑制微生物的繁殖。

3.1.2 杀菌和罐装阶段的质量控制

牛乳加工过程中各个阶段的微生物控制, 是保证乳制品质量的关键。在牛乳的微生物控制过程中, 杀菌是主要的防治微生物污染的方式。杀菌过程对于后续生产流程的影响很大, 如果杀菌不彻底, 在牛乳良好的营养环境下, 细菌会迅速、大量繁殖, 在后续的加工及罐装等操作流程中极易发生二次污染, 影响产品品质。

3.1.3 建立完善的乳制品质量审核评价及纠偏程序

为了有效提高牛乳产品质量, 减少生产过程中的微生物污染, 需要工厂负责人、产品负责人、质控员等建立健全牛乳生产过程的质量审核评估程序, 严格要求生产过程中的各个阶段的质量控制, 确保牛乳加工过程中微生物的有效防控^[19]。

要建立健全纠偏程序, 处理污染后的乳制品以达到质量要求, 找到微生物污染的原因, 找出污染源并进行相应的处理。若未找出污染源, 应对相关灭菌方法进行改进或使用其他方法进行处理, 同时也可对杀菌仪器进行相应灭菌处理后进行补救。

3.2 牛乳杀菌技术

在牛乳加工过程中, 杀菌是重要的微生物防控手段。杀菌的效果对于后续的生产过程尤为重要, 但不同的杀菌方式将直接影响牛乳及其制品的营养成分及风味等性状。

3.2.1 热杀菌技术

(1) 牛乳传统热杀菌工艺

传统的牛乳加热杀菌主要有以下方法: 低温长时间杀菌(low temperature long time pasteurization, LTLT)^[20]; 高温短时间杀菌(high temperature short time pasteurization, HTST)^[21]; 超高温瞬时灭菌(ultra high temperature treated, UHT)^[22,23]。以上 3 种方法都是利用温度对微生物的致死效果起到杀灭致病菌和大多数非致病菌的作用。其中低温长时间杀菌和高温短时间杀菌都属于巴氏杀菌, 巴氏杀菌在牛乳杀菌工艺中的应用时间最长, 技术最成熟且技术难度低, 目前市面上的鲜牛乳大都采用巴氏杀菌技术^[24]。巴氏杀菌所用的杀菌温度越高所需的时间越短, 但牛乳在巴氏杀菌过程中会发生蛋白变性失活或维生素破坏等可逆或不可逆变化, 影响牛乳的营养和感官特性^[25,26]。

超高温瞬时灭菌也称商业灭菌, 目前市面上的常温液态乳大都采用该种灭菌方式。该种灭菌乳较为新鲜, 便于携带, 保质期也较长, 但也会存在营养损失^[27]和个别灭菌不彻底的现象。

(2)现代热杀菌技术

现代热杀菌技术主要还是利用温度对牛乳中的微生物进行杀灭,但采用了更为先进的杀菌工艺,如微波^[28]、电磁波^[29]、红外线^[30]等杀菌技术。上述技术的使用可明显节省杀菌时间、提高热传导效率及节约能源且设备占地面积小也便于控制^[31]。由于采用热杀菌原理,上述工艺设备也会面临牛乳杀菌过程中的蛋白质变性或其他营养素损失^[32],且也会面临加热不均匀及介质选择性等问题。

3.2.2 非热杀菌技术

非热杀菌是指在杀菌过程中食品温度不升高或升高很低的一种安全、高效的杀菌方法。非热杀菌技术是基于保持食品功能成分的生理活性以及保持色、香、味及营养成分的前提下,设计研究出的各种杀菌技术的合称。目前,国内的牛乳生产仍以巴氏杀菌和超高温瞬时灭菌为主^[33],虽然也有相关企业引进国外先进技术并进行改进应用于自身产品生产,但相关技术还不够成熟,也阻碍了实际生产中的应用。

(1)超高压杀菌

超高压技术(ultra-high pressure, UHP)是指在室温或温和加热条件下利用 100~1000 MPa 的压力处理食品,以达到杀菌的目的。超高压杀菌技术是以加在水等液体上的压力作为媒介传递压力,通过高压使细胞的形态发生不可逆的变化,从而达到杀菌目的。一般在牛乳杀菌过程中,400 MPa 压力下处理 10~30 min 即可杀死所有的非芽孢菌^[34]。

超高压杀菌技术在美国、日本、欧洲已取得了长足的发展,且采用相关技术的灭菌乳也已上市。目前相关的工作也仍在进行中,Espejo 等^[35]研究了采用超高压均质灭活牛乳中的芽孢,且效果良好;Roig-Sagues 等^[36]也对静水压和超高压均质处理评价了牛乳中细菌的杀灭效果。碍于技术和成本因素,牛乳的超高压灭菌还处于高速发展阶段,但相信在技术成熟后会大规模应用于牛乳杀菌过程中。

(2)脉冲电场杀菌

脉冲电场(pulsed electric fields, PEF)杀菌^[37,38]是以高电压(10~50 kV)脉冲下产生的脉冲电场及脉冲磁场对牛乳进行处理,使微生物的细胞膜产生破裂以及阻断细胞内的代谢及生化反应起到杀灭细菌的作用。实验证明脉冲电场可以对多种微生物活体细胞产生较好的杀灭作用,Bermudez-Aguirre 等^[39]验证了脉冲电场对牛乳中大肠杆菌等的良好杀灭效果;Sepulveda 等^[40]也验证了脉冲电场可以延长牛乳的保存期。脉冲电场杀菌对牛乳的营养素、颜色以及口感的影响较小^[41],可以较大程度地保留牛乳原有的营养和风味,其原理与高温短时杀菌的原理基本相同^[42],且已经应用于食品加工过程中的微生物控制阶段。

(3)高密度二氧化碳杀菌

高密度二氧化碳(dense phase carbon dioxide, DPCD)

杀菌^[43]是利用亚临界或者超临界(温度 < 60 °C, 压强 < 50 MPa)的 CO₂ 与牛乳接触,通过高压强场下 CO₂ 对微生物的细胞以及细胞膜造成破坏,使微生物细胞内成分泄露而失活^[44]。Liao 等^[45]采用高密度二氧化碳使牛乳中的微生物失活,达到了杀菌的效果。超临界 CO₂ 具有的液体和气体的双重性质决定了其在牛乳杀菌中的优异性能及良好的应用前景。由于 CO₂ 独特的挥发性以及惰性和经济效益,可以避免牛乳中的热敏成分失活,且其成本相比超高压杀菌要低很多。目前该技术在国内外也已获得了长足发展^[46,47],将来会更广泛地应用于牛乳生产加工中。

(4)辐照杀菌

辐照杀菌(irradiation sterilize)是利用 X 射线、γ 射线的辐照来杀灭牛乳中的微生物^[48,49]。利用高能射线对微生物的强烈杀灭作用以及极强的穿透效果,通过制作的钴及铯等辐照装置对牛乳中的微生物进行杀灭。这些高能射线可以对细胞核内的 DNA 造成损伤,并且可以通过产生的活性粒子杀伤细胞,因此它的细胞损伤能力极强。Ham 等^[50]研究了辐照对牛乳中的微生物的影响,证明了对此方法的有效性。目前研究表明辐照杀菌方法对牛乳的营养损失相对较少,且操作简单、可大规模处理、无残留、节约能源,是一种较为安全有效的杀菌手段^[51],目前已有较多的辐照杀菌食品出现在市场上。但也有相关研究表明辐照强度的控制对牛乳中的成分以及颜色等会造成一定的影响^[52],且包装材料的不同也会影响辐照效果。因此,该方法在牛乳杀菌中的应用还有待技术进步。

4 结 论

牛乳在加工过程中,极易受到微生物的污染,在一定程度上降低了牛乳的营养价值,也可因致病菌的大量繁殖对人体的健康产生严重的损害,因此牛乳加工过程中的微生物防控显得十分的重要。这就要求牛乳生产企业不断完善相应的防控体系的建设,以提高产品合格率及管理水平。在牛乳杀菌领域,非热杀菌由于对牛乳的营养成分影响较小,越来越受到消费者的青睐。因此牛乳生产企业应革新杀菌技术与工艺,在出色完成牛乳杀菌任务的同时减少营养素的损失,以满足人们日益增长的牛乳营养与质量要求。目前,中国的乳制品生产行业的杀菌技术同国外先进水平尚有一定的差距,由于日本等发达国家不断创新,引领着牛乳非热杀菌的先进技术与方向,中国企业应不断学习国际先进技术并自主创新,开发适合本公司需求的杀菌技术及工艺,在具有良好灭菌效果的前提下最大限度地保留牛乳原有营养成分及风味与口感,不断满足广大消费者的需求。

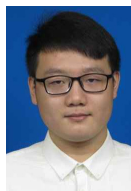
参考文献

- [1] Palupi E, Jayanegara A, Ploeger A, *et al.* Comparison of nutritional quality between conventional and organic dairy products: a meta-analysis [J]. *J Sci Food Agric*, 2012, 92(14): 2774–2781.
- [2] 陈多珍, 吴梦, 杨洋, 等. 非热杀菌技术在乳制品中的应用研究进展 [J]. *包装与食品机械*, 2020, 38(1): 68–72.
- Chen DZ, Wu M, Yang Y, *et al.* Advances in the application research of non-thermal sterilization technology in dairy products [J]. *Packag Food Mach*, 2020, 38(1): 68–72.
- [3] 蔡金文, 潘迎春, 唐金泉, 等. 乳及乳制品消毒杀菌技术研究进展 [J]. *山东工业技术*, 2016, (17): 274–275.
- Cai JW, Pan YC, Tang JQ, *et al.* Research progress on disinfection and sterilization of milk and dairy products [J]. *Shandong Ind Technol*, 2016, (17): 274–275.
- [4] 蔡树东, 赵维芯. 乳制品中微生物污染及其防控措施研究 [J]. *饮料工业*, 2017, 20(2): 71–73.
- Cai SD, Zhao WX. Study on microbial contamination of dairy and the prevention measures [J]. *Bever Ind*, 2017, 20(2): 71–73.
- [5] Zabbia A, Buys EM, De-Kock HL. Undesirable sulphur and carbonyl flavor compounds in UHT milk: A review [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2012, 52(1–3): 21–30.
- [6] Liu CC, Caroe C, Qin ZH, *et al.* Comparative study on quality of whole milk processed by high hydrostatic pressure or thermal pasteurization treatment [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2020, 127: 109370.
- [7] Kamath S, Huppertz T, Houlihan A, *et al.* The influence of temperature on the foaming of milk [J]. *Int Dairy J*, 2008, 18(10–11): 994–1002.
- [8] Obeid S, Guyomarc'h F, Tanguy G, *et al.* The adhesion of homogenized fat globules to proteins is increased by milk heat treatment and acidic pH: Quantitative insights provided by AFM force spectroscopy [J]. *Food Res Int*, 2020, (129): 108847.
- [9] Ward LR, Van-Schaik E, Samuel J, *et al.* Reduction in microbial infection risks from raw milk by electron beam technology [J]. *Radiat Phys Chem*, 2020, (168): 108567.
- [10] Chieffi D, Fanelli F, Cho GS, *et al.* Novel insights into the enterotoxigenic potential and genomic background of *Staphylococcus aureus* isolated from raw milk [J]. *Food Microbiol*, 2020, (90): 103482.
- [11] Sancak YC, Sancak H, Isleyici O, *et al.* Presence of *Escherichia coli* O157 and O157:H7 in raw milk and Van herby cheese [J]. *Bullet Vet I Pulawy*, 2015, 59(4): 511–514.
- [12] Omar D, Al-Ashmawy M, Ramadan H, *et al.* Occurrence and PCR identification of *Salmonella* spp. from milk and dairy products in Mansoura, Egypt [J]. *Int Food Res J*, 25(1): 446–452.
- [13] Mahmoodi MM. Occurrence of *Listeria monocytogenes* in raw milk and dairy products in Noorabad, Iran [J]. *J Anim Veter Adv*, 2010, 9(1): 16–19.
- [14] Aklilu E, Atiqah NR. Non-haemolytic enterotoxigenic *Bacillus cereus* strains from raw and pasteurized milk and milking utensils in Kelantan, Malaysia [J]. *Int Food Res J*, 2017, 24(1): 401–405.
- [15] Di Pinto A, Bonerba E, Bozzo G, *et al.* Occurrence of potentially enterotoxigenic *Bacillus cereus* in infant milk powder [J]. *Eur Food Res Technol*, 2013, 237(2): 275–279.
- [16] Chaia AP, Zarate G. Dairy *Propionibacteria* from milk or cheese diets remain viable and enhance propionic acid production in the mouse cecum [J]. *Lait*, 2005, 85(1–2): 85–98.
- [17] 王雪妮. 乳制品生产过程中微生物污染的控制措施 [J]. *食品安全导刊*, 2019, (12): 114.
- Wang XN. Control measures of microbial contamination during dairy production [J]. *China Food Saf Magaz*, 2019, (12): 114.
- [18] 赵诗杨, 李研东, 韩雪. 微生物与牛乳制品安全与控制措施 [J]. *今日畜牧兽医*, 2017, (5): 7–8.
- Zhao SY, Li YD, Han X. Safety and control measures for microbe and milk products [J]. *Animal Husband Vet Today*, 2017, (5): 7–8.
- [19] 薛书红, 刘玉凤. 乳及乳制品中微生物污染及其控制 [J]. *食品安全导刊*, 2016, (36): 24.
- Xue SH, Liu YF. Microbial contamination and control in milk and dairy products [J]. *China Food Saf Magaz*, 2016, (36): 24.
- [20] Spilimbergo S. Milk pasteurization at low temperature under N2O pressure [J]. *J Food Eng*, 2011, 105(1): 193–195.
- [21] Lu Q, Piyasena P, Mittal GS. Modeling alkaline phosphatase inactivation in bovine milk during high-temperature short-time pasteurization [J]. *Food Sci Technol Int*, 2001, 7(6): 479–485.
- [22] Karlsson MA, Langton M, Innings F, *et al.* Short communication: Variation in the composition and properties of Swedish raw milk for ultra-high-temperature processing [J]. *J Dairy Sci*, 2017, 100(4): 2582–2590.
- [23] Pujol L, Albert I, Johnson NB, *et al.* Potential application of quantitative microbiological risk assessment techniques to an aseptic-UHT process in the food industry [J]. *Int J Food Microbiol*, 2013, 162(3): 283–296.
- [24] 王亚丽. 简析鲜乳的杀菌技术 [J]. *黑龙江科技信息*, 2012, (6): 20.
- Wang YL. A brief analysis of fresh milk sterilization technology [J]. *Heilongjiang Sci Technol Inform*, 2012, (6): 20.
- [25] 闫宁环, 陈伟, 吴秋波, 等. 不同杀菌方式对牛乳中热敏性成分的影响研究 [J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(9): 137–140.
- Yan NH, Chen W, Wu QB, *et al.* Research of heat sensitive composition in milk with different mode of sterilization [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(9): 137–140.
- [26] 韩荣伟, 王加启, 郑楠. 热处理对牛乳成分的变化影响及热损标识物的选择 [J]. *中国食物与营养*, 2011, 17(7): 22–29.
- Han RW, Wang JQ, Zheng N. The influence of heat treatment on the composition of milk and the selection of heat loss markers [J]. *Food Nutr China*, 2011, 17(7): 22–29.
- [27] 陈伟, 史玉东, 陈云, 等. 浸入式杀菌对牛乳中热敏性成分的影响 [J]. *中国乳品工业*, 2015, 43(11): 48–50.
- Chen W, Shi YD, Chen Y, *et al.* Research of heat sensitive composition in milk with the mode of immersion sterilization [J]. *China Dairy Ind*, 2015, 43(11): 48–50.
- [28] 肖森鑫, 张仲欣, 张玉先. 牛乳中微生物的微波致死特性实验研究 [J]. *食品与药品*, 2005, (1): 48–51.
- Xiao NX, Zhang ZX, Zhang YX. Study on characters of sterilization of microorganism of milk by microwave heating [J]. *Food Med*, 2005, (1): 48–51.
- [29] 王德东, 徐雪萌, 李孝忠. 电磁波杀菌在无菌包装中应用的探讨 [J]. *包装与食品机械*, 2004, (4): 39–42.
- Wang DD, Xu XM, Li XZ. The discuss on the application of electromagnetic wave for sterilization in aseptic packaging [J]. *Packag Food Mach*, 2004, (4): 39–42.
- [30] 张心龙, 顾祥云, 张名. 双开门消毒柜臭氧层与远红外线层杀菌效果

- 调查[J]. 现代预防医学, 2001, (4): 480-492.
- Zhang XL, Gu XY, Zhang M. Investigation on the sterilization effect of ozone layer and far infrared layer in double-door disinfection cabinet [J]. Mod Prev Med, 2001, (4): 480-492.
- [31] 肖森鑫, 张仲欣. 牛乳微波杀菌工艺试验研究[J]. 中国乳品工业, 2005, (5): 21-23.
- Xiao NX, Zhang ZX. Study on milk sterilization procedure by microwave heating [J]. China Dairy Ind, 2005, (5): 21-23.
- [32] 张仲欣, 赵振峰. 微波加热杀菌对牛乳品质的影响[J]. 农业工程技术, 2007, (7): 36-39.
- Zhang ZX, Zhao ZF. Effect of microwave heating sterilization on milk quality [J]. Agric Eng Technol, 2007, (7): 36-39.
- [33] 郭晓峰. 杀菌技术对乳制品生产的影响[J]. 食品安全导刊, 2016, (33): 64-65.
- Guo XF. The influence of bactericidal technology on dairy production [J]. China Food Saf Magaz, 2016, (33): 64-65.
- [34] Gao YL, Qiu WF, Wu D, *et al.* Assessment of clostridium perfringens spore response to high hydrostatic pressure and heat with nisin [J]. Appl Biochem Biotech, 2011, 164(7): 1083-1095.
- [35] Espejo GGA, Hernandez-Herrero MM, Juan B, *et al.* Inactivation of *Bacillus* spores inoculated in milk by ultra high pressure homogenization [J]. Food Microbiol, 2014, (44): 204-210.
- [36] Roig-Sagues AX, Velazquez RM, Montealegre A, *et al.* Fat content increases the lethality of ultra-high-pressure homogenization on *Listeria monocytogenes* in milk [J]. J Dairy Sci, 2009, 92(11): 5396-5402.
- [37] Fernandez-Molina JJ, Barbosa-Canovas GV, Swanson BG. Skim milk processing by combining pulsed electric fields and thermal treatments [J]. J Food Process Pres, 2005, 29(2-6): 291-306.
- [38] Lee GJ, Han BK, Choi HJ, *et al.* Inactivation of *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae*, and *Lactobacillus brevis* in low-fat milk by pulsed electric field treatment: A pilot-scale study [J]. Korean J Food Sci Animal, 2015, 35(6): 800-806.
- [39] Bermudez-Aguirre D, Dunne CP, Barbosa-Canovas GV. Effect of processing parameters on inactivation of *Bacillus cereus* spores in milk using pulsed electric fields [J]. Int Dairy J, 2012, 24(1): 13-21.
- [40] Sepulveda DR, Gongora-Nieto MM, Guerrero JA, *et al.* Production of extended-shelf life milk by processing pasteurized milk with pulsed electric fields [J]. J Food Eng, 2006, 89(10): 3739-3748.
- [41] Yu LJ, Ngadi M, Raghavan GSV. Effect of temperature and pulsed electric field treatment on rennet coagulation properties of milk [J]. J Food Eng, 2009, 95(1): 115-118.
- [42] Halpin RM, Cregenzan-Alberti O, Whyte P, *et al.* Combined treatment with mild heat, manothermosonication and pulsed electric fields reduces microbial growth in milk [J]. Food Control, 2013, 34(2): 364-371.
- [43] Bi XF, Wang YT, Zhao F, *et al.* Sublethal injury and recovery of *Escherichia coli* O157:H7 by high pressure carbon dioxide [J]. Food Control, 2015, (50): 705-713.
- [44] Erkmn O. Effects of high-pressure carbon dioxide on *Escherichia coli* in nutrient broth and milk [J]. Int J Food Microbiol, 2001, 65(1-2): 131-135.
- [45] Liao HM, Zhong K, Liao XJ, *et al.* Inactivation of microorganisms naturally present in raw bovine milk by high-pressure carbon dioxide [J]. Int J Food Sci Tech, 2016, (29): 337-353.
- [46] 韩冰, 谢宏, 张德权. 牛奶高密度 CO₂ 杀菌效果及杀菌动力学研究[J]. 食品科技, 2010, 35(5): 67-71, 76.
- Han B, Xie H, Zhang DQ. Inactivation and inactivation kinetics of bacteria in milk treated by dense phase CO₂ [J]. Food Sci Technol, 2010, 35(5): 67-71, 76.
- [47] 谢宏, 韩冰, 张德权. 高密度 CO₂ 在牛奶杀菌中的应用研究[J]. 食品工业, 2010, 31(2): 83-86.
- Xie H, Han B, Zhang DQ. Research on dense phase CO₂ using in sterilization of milk [J]. Food Ind, 2010, 31(2): 83-86.
- [48] Odueke OB, Farag KW, Baines RN, *et al.* Irradiation applications in dairy products: A review [J]. Food Bioprocess Tech, 2016, 9(5): 751-767.
- [49] Lloyd ML, Hod N, Jayaraman J. Inactivation of cytomegalovirus in breast milk using ultraviolet-C irradiation: Opportunities for a new treatment option in breast milk banking [J]. PLoS One, 2016, 8(11): e0161116.
- [50] Ham JS, Shin JH, Noh YB, *et al.* Chemical and microbiological quality, capillary electrophoresis pattern, and rennet coagulation of UHT-treated and irradiated milk [J]. Food Sci Food Biotechnol, 2008, 17(1): 58-65.
- [51] 黎金琴. 牛奶紫外线杀菌设备的设计[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(25): 7137-7139.
- Li JQ. A design of ultraviolet sterilizing equipment for milk [J]. Comput Knowl Technol, 2010, 6(25): 7137-7139.
- [52] Ahmad MI, Al-Qawasmeh KA, Nusair SD, *et al.* Stability of antibodies and proteins in camel whey powder treated by Gamma-irradiation during radurisation process [J]. Emir J Food Agric, 2018, 30(8): 654-659.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



王明录, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全快速检测。

E-mail: w_ml2020@163.com



张鸿雁, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全检测及乳制品质量控制。

E-mail: zhanghongyan@sndu.edu.cn