

综述

非热杀菌新技术在保持食品品质方面的应用趋势

孙司卉¹,范婧¹,任丽琨¹,马春敏¹,杨杨¹,边鑫¹,樊永祥²,张娜¹

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院,黑龙江哈尔滨 150028;2. 国家食品安全风险评估中心,北京 100021)

摘要: 杀菌是食品加工过程中不可缺少的一个环节。本文主要介绍目前应用较广泛的4种新型非热杀菌技术,即高密度二氧化碳杀菌、电子束辐照杀菌、脉冲强光杀菌、声动力杀菌的工作原理与应用。新型杀菌技术与传统杀菌相比能更好地保持食品的色泽、风味及营养物质,且更加节能、安全、经济,因此新技术的发展将为不同种类食品选择最适合的杀菌技术及保持食品品质提供参考。

关键词: 食品加工;非热杀菌;技术应用

中图分类号: R155 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8456(2023)06-0961-06

DOI: 10.13590/j.cjfh.2023.06.027

Trends in application of the latest non-thermal sterilization technologies in maintaining food quality

SUN Sihui¹, FAN Jing¹, REN Likun¹, MA Chunmin¹, YANG Yang¹, BIAN Xin¹,
FAN Yongxiang², ZHANG Na¹(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Heilongjiang Harbin 150028, China;
2. China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100021, China)

Abstract: Sterilization is an indispensable part of food processing. This paper discusses the theories and applications of four currently widely used non-thermal sterilization technologies, including dense phase carbon dioxide, electron beam irradiation, pulsed light, and sonodynamic sterilization. Compared with traditional sterilization methods, these four technologies offer advantages in color maintenance, preservation of food flavor and nutrients, economy of energy, enhanced safety, and expense savings. Therefore, the development of new technologies will provide a frame of reference for choosing the most suitable sterilization technique to best maintain the quality of each kind of food.

Key words: Food processing; non-thermal sterilization; technology application

随着社会的发展,人们对食品品质的要求越来越高,包括食品新鲜度、色泽、口感等方面。新鲜度是影响食品品质非常重要的因素,而微生物是影响食品新鲜度最主要的原因之一^[1],因此合理选择杀菌方法是提高食品品质的关键步骤。适合的杀菌方式旨在控制食品中敏感营养成分损失率在最低水平。杀菌技术已广泛应用于食品生产领域,是食

品产业的关键技术,也是有效保存食品营养成分的方法之一^[2]。

杀菌主要分为热杀菌和非热杀菌两大类^[3]。热杀菌主要包括巴氏杀菌、微波杀菌、超高温杀菌等^[4]。热杀菌是通过高温杀死微生物或钝化酶类以保障食品安全^[5-6],同时延长食品保质期。但热杀菌技术的高温会破坏食品中热敏性成分并影响产品色泽和风味等品质,因此,高温条件限制了热杀菌在含热敏成分食品中的应用^[7]。非热杀菌包括常见的超声波杀菌、超高压杀菌等传统技术,以及非热杀菌新技术,如高密度二氧化碳、电子束辐照、脉冲强光和声动力等杀菌新技术^[8-11]。非热杀菌不通过高温加热杀死微生物,又称为冷杀菌^[12]。

针对传统杀菌技术存在的问题,本文综述了近年广泛应用的新型非热杀菌技术,如高密度二氧化碳杀菌、电子束辐照杀菌、脉冲强光杀菌和声动力

收稿日期:2022-03-16

基金项目:黑龙江省“百千万”重大专项(2020ZX08B02);国家自然科学基金(32072258);国家重点研发计划(2021YFD2100902-3);中央财政支持地方高校发展专项资金优秀青年人才支持计划项目(2050205)

作者简介:孙司卉 女 硕士研究生 研究方向为农产品加工及贮藏工程 E-mail:sihui1014@163.com

通信作者:张娜 女 教授 研究方向为谷物蛋白及粮食高值化利用 E-mail:foodzhangna@163.com

杀菌的原理、特点及适用范围等。非热杀菌新技术不仅能保证食品微生物检出率在安全范围内,同时可使食品固有的色泽、风味、质构、营养成分和新鲜程度等得以保持^[8]。这些技术具有简便、安全、高效、经济、节能以及最大限度保持食品原料中热敏性成分等特点,因此可以通过合理选择杀菌技术,实现高效抑菌的同时保持食品品质、延长贮藏期、保证食品安全。

1 传统非热杀菌技术

超高压杀菌是以水为介质,对密封容器内施加100~1 000 MPa的压力^[13],该技术不影响食品中的小分子营养成分,如氨基酸、肽、 α -羟基酸、维生素和色素等^[14]。但压力会破坏食品中生物大分子的非共价键,从而影响大分子的理化特性,导致蛋白质变性、酶失活、微生物失活等。此外,由于该技术需要超高压处理仓、增压系统及水系统等设备,这些设备成本较高,所以该技术目前多应用于科学研究中,鲜见工业化使用。

超声波杀菌主要得益于其工作时产生的超声空化作用,超声空化产生的微射流可以在界面之间形成剧烈的机械搅拌效应,使微生物受到剧烈振荡,导致微生物表面和细胞结构破坏,最后内容物泄漏而死亡^[12]。与热杀菌相比,超声波杀菌能较好地保持食品口感,同时减少对热敏成分的破坏^[15]。超声波杀菌率应接近100%,但需要消耗大量能量来完成杀菌,因此单独杀菌成本较高,目前多采用联合杀菌的方式进行,如联合臭氧、微波、激光等技术。

2 非热杀菌新技术

2.1 高密度二氧化碳杀菌技术

高密度二氧化碳杀菌(Dense phase carbon dioxide, DPCD)也称高压二氧化碳杀菌,是近些年新发展起来的可持续技术,在应用中不仅可实现无菌状态,且不会改变食品敏感成分的原始特性^[16]。该技术是利用温度和压力大于CO₂临界点(31.1 °C/7.4 MPa)的超临界CO₂渗透到细胞内^[17-19],降低微生物细胞内pH值,使细胞内酶活性被抑制,同时使蛋白质变性,微生物因细胞裂解而死亡,从而实现杀菌目的(图1)^[20]。与热杀菌相比,DPCD能最大程度保留食品原有风味、色泽及营养成分。与传统非热杀菌(如超高压杀菌,超声波灭菌)相比,具有节能、无噪声、低成本等优点^[21]。DPCD操作温度低,杀菌后CO₂可通过减压的方式完全分离^[22]。在保证安全有效杀菌的基础上,使食品营养、风味、新鲜度等都达到最佳状态,因此被广泛应用。MANZOCCO等^[23]应用DPCD(35 °C/12.0 MPa)处理苹果汁时,发现在不影响苹果汁新鲜度的情况下,该杀菌技术可以使苹果汁内有益成分的破坏率显著降低。ZHAO等^[24]也通过DPCP有效地杀灭破碎番茄果肉中的微生物,同时最大程度保留其颜色和降低香气挥发。但DPCP技术受处理压力、时间、温度等因素影响,如处理不当会导致产品感官品质劣变等,在应用时需控制使用条件。

目前DPCD主要应用于液体(乳制品、蛋制品及果蔬等)食品中,如对牛乳灭菌的同时还可使牛乳中营养成分得以保持^[22],但不适用于固体食品,固体食品会限制CO₂扩散,不但难以起到杀菌作用,

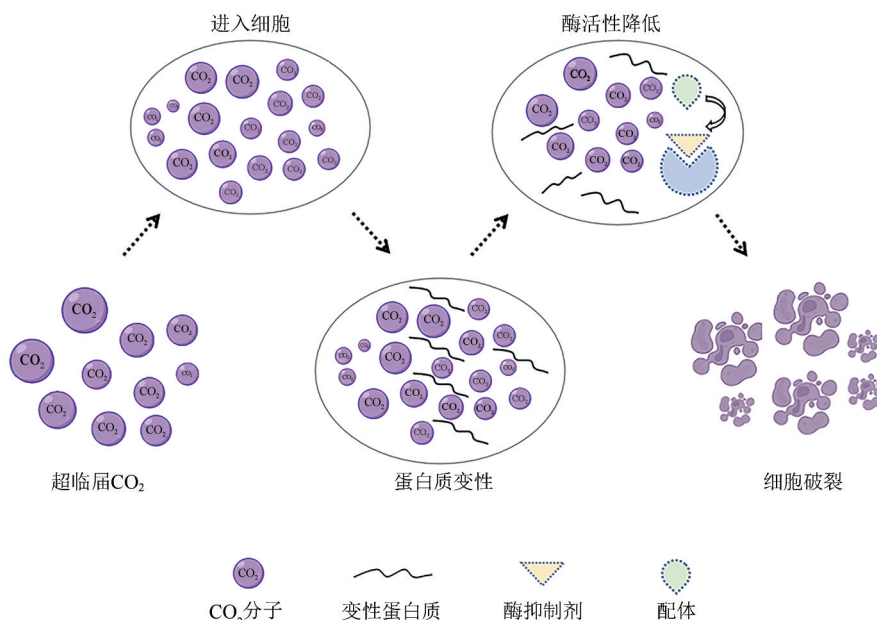


图1 高密度二氧化碳杀菌示意图

Figure 1 Schematic diagram of dense phase carbon dioxide sterilization

还可能对品质产生不良影响。如对猪肉、鸡肉和虾等进行杀菌时其色泽会变差,这与处理过程中温度和压力对蛋白质构象的影响有很大关系^[25]。常见的高密度 CO₂ 间隙卧式装置多用于对鲜切蔬菜杀菌保鲜等方面,主要为超临界状态 CO₂ 结合压力对食品进行杀菌,CO₂ 无毒无害且价格低廉,使该技术在工业中的成本大幅度降低,已经逐渐成为食品加工领域中安全无害的绿色杀菌方法。但其在食品工业的应用中仍存在一些待解决问题,如装置设计、器件研发及处理室的多样化设计等。

2.2 电子束辐照杀菌技术

电子束辐照(Electron beam irradiation, EBI)是利用电子加速器通电后产生高能电子束,诱导细胞基因组及生理生化性质等发生变化,最终导致微生物死亡(图 2)^[9],EBI 所释放的穿透力能够不破坏食品原有感官品质和营养价值,同时对食品表面和内部进行杀菌,作用效果良好^[26]。除 EBI 技术外,常见的辐照杀菌还有 X 射线和 γ 射线辐照技术,但与之相比,EBI 所产生的高能电子束功率易控制,且不需要放射源,不存在放射性污染等问题,食品中蛋白质、糖类、矿物质等损失最小。NAM 等^[27]对柑橘灭菌时,发现 0.4 kGy 的辐照剂量就能抑制微生物生长,并对柑橘中维生素 C 及酚类等热敏成分无显著影响。此外,EBI 还可不破坏外包装对食品进行杀菌。YANG 等^[28]对包装好的生鲜鱼片杀菌以延长保质期且效果显著。辐照剂量是 EBI 的重要影响因素,当辐照剂量增加时,会导致雪花酥的色泽发暗,口感变差^[29]。因此,应用时需选择适合的辐照剂量。与热杀菌相比,EBI 耗能少、易操作、无污染、营养成分损失小。与其他非热杀菌相比(如臭氧处理和短波紫外),该技术可调节,灭菌力强^[30]。基于其多种优点及能最大限度保持食品品质,EBI 技术被广泛应用。



图 2 电子束杀菌示意图

Figure 2 Schematic diagram of electron beam irradiation sterilization

EBI 主要应用于粮油、果蔬、海产品等食品,也应用于化妆品和医疗等领域。如经过辐照的草莓抗氧化性增强,有效改善了采摘后草莓的保存状态,并提高果蔬的抗菌性^[31]。EBI 处理也可减少海产品中有害微生物及致病菌,对保障海产品的食用安全起到重大作用^[32]。该技术也可应用于脱水食品、香辛料及宠物食品等,但由于主要设备加速器

是一种使用人工方法产生高电能的装置,其构造复杂,维修保养的难度较高,因此应用成本较高。目前攻克大型实用规模已经成为降低 EBI 应用成本的技术难点,该技术的解决有望减少 EBI 技术的应用成本,推广该技术在食品工业中的应用。

2.3 脉冲强光杀菌技术

脉冲强光杀菌(Pulsed light, PL)主要通过脉冲光源、升压模块、触发模块和储能电容等装置产生脉冲强光,配合强烈光谱(200~1 100 nm)的短脉冲光(102~103 ms),使细胞基因组受到光物理效应(脉冲)作用,使细胞屏障受损,最终微生物死亡(图 3)^[33]。与热杀菌相比,PL 具有简便、重复性好、效率高、能最大程度保持食品品质等优点,与非热杀菌相比,PL 主要利用电能灭菌,不易造成污染^[34],且化学物残留水平最低^[35]。目前,该技术已广泛应用于果蔬、肉类等食品中,PL 技术可杀灭肉类中的腐败菌和病原微生物,抑制果蔬香气挥发及降低营养成分的损失等。2019 年 KOH 等^[36]研究表明 PL 处理可使哈密瓜呼吸速率降低,抑制哈密瓜的香气挥发。赵越^[37]证明 PL 可以保持鲜切白菜原有营养及感官品质。应用 PL 灭菌时需要重点考虑剂量的选择,如超过某种食品对剂量的承受范围,不仅不能起到很好的杀菌效果,还会对该食品品质产生影响。如牛肉、金枪鱼等在高剂量(能量 $\geq 8.4/11.9 \text{ J/cm}^2$)的 PL 处理下,肉色亮度和透明度显著下降,严重破坏食品品质并对感官产生负面影响^[38]。这与食品表面的蛋白质和脂质受到高剂量的脉冲强光,局部过热而发生氧化有较大关系^[39]。KRAMER 等^[40]在研究中用 PL 对绿豆芽进行杀菌,发现仅减少产品表面的活菌数,这是由于光穿透率较低所导致。因此该项技术在日后的发展中,可以考虑与其他杀菌技术联合使用(如臭氧、超声等),改善穿透率低的问题。

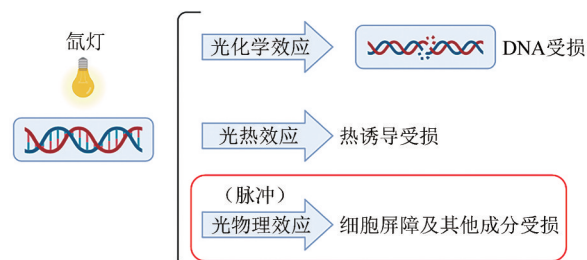


图 3 脉冲强光杀菌示意图

Figure 3 Schematic diagram of pulsed light sterilization

目前 PL 技术已广泛应用于焙烤、海产、果蔬等食品及饮用水中,如经 PL 处理后的新鲜芒果在 6 °C 下贮藏 7 d 左右,其色泽也不会有显著变化^[41],该技术还可以用于改善海洋副产品的品质^[42]。其

在工业应用上也得到普遍认可,如脉冲杀菌系列设备已在乳品饮料、鲜榨果汁、卤制品等食品及医药保健品产业中被不断推广。由于PL主要通过储能电容等设备产生脉冲强光进行灭菌,其电能的消耗主要与脉冲光产生量有关,该项能源成本已被大多数企业及消费者接受。此外,食品表面和内部杀菌不彻底的问题,目前已有学者通过联合其他杀菌技术的方式来弥补PL技术的不足,这也是今后一段时间内亟待解决的技术难点。

2.4 声动力杀菌技术

声动力杀菌是超声产生的空化作用与声敏剂释放的自由基联合使用的一种技术^[43]。该技术是利用超声波较强的穿透力使生物组织内产生空化作用,增大了细胞的通透性,声敏剂因此更易于进入细胞内部^[44],促进自由基释放并与氧接触产生细胞毒性,导致细胞死亡,最终实现杀菌的目的(图4)^[45]。声动力杀菌技术已经成功地应用于癌症以及肿瘤的治疗^[46],该技术操作简单、成本低、靶向性好、穿透力强^[43]。早在1994年,PITT等^[47]就发现以庆大霉素为声敏剂时,与67 kHz的超声联用会产生较强的细菌灭活作用,如大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等致病菌。NAKONECHNY等^[11]在2013年以玫瑰红作为声敏剂时也再次证明,声动力技术对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌等致病菌有较强的灭活作用。BHAVYA和HEBBAR^[48]以姜黄素作为声敏剂对橙汁灭菌时,发现其大肠杆菌菌落总数整体降低3.0个数量级。由此可见,声动力技术具有应用于食品加工产业灭菌的潜能。与其他杀菌技术不同的是,该杀菌过程会产生均质作用^[43]。众所周知,均质可使食品中的液体成分细化,混合均匀,提高食品液体成分的细度和均匀度,增强加工过程中食品的渗透以及食用后肠道的吸收^[49]。此外,声敏剂的选择很重要,如左旋氟沙、环丙沙星、庆大霉素等抗生素会对人体有毒副作用,因此将声动力杀菌技术应用于食品中时,应选择安全无副作用的声敏剂,如玫瑰红、姜黄素等。

声动力杀菌是光动力衍生发展起来的新技术,主要依赖于超声产生的声能杀菌,因此更加安全且成本低。该技术多应用于医疗方面,在食品产业中应用较少,这主要与声敏剂的副作用及工业化灭菌的条件等技术发展滞后有关。

3 展望

非热杀菌技术在食品加工过程中与热杀菌相比更安全高效,同时还可以保留食品的感官及营养成分,并且在工业中的应用简便、节能、环保。可根

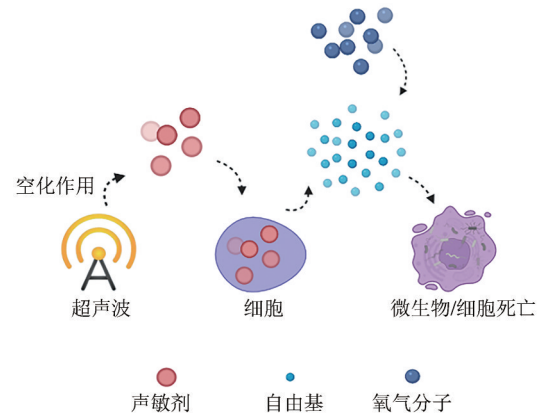


图4 声动力杀菌示意图

Figure 4 Schematic diagram of sonodynamic sterilization

据不同杀菌技术的特点有针对性地选择并应用于各类食品,最大程度地保持食品品质。

除此之外,越来越多的新型非热杀菌技术已被研究并有待于在食品工业中推广,如低温等离子杀菌技术具有安全、高效、不易残留等优势^[50];酸性电解水杀菌技术对环境友好、对人体无毒副作用、腐蚀性小^[51];各种具有针对性的杀菌技术,如针对家畜动物肉类中的噬菌体杀菌^[52];还有将不同种类的非热杀菌方式联合使用使杀菌保鲜效果加倍的栅栏杀菌等。这些杀菌技术安全环保,但也存在许多亟待解决的问题,如噬菌体制剂不能与化学消毒剂一同使用、低温等离子体对食品的穿透性较低以及工业化成本较高等问题^[52]。新技术工业化应用时,成本作为投产的重要因素之一而被企业关注。新型杀菌技术设备装置较为复杂,导致工业化成本较高,在未来的研究中,可通过改良杀菌设备,优化灭菌参数或增加自动化处理来减少企业成本,同时对食品安全性提供更多支持。

为进一步拓宽食品工业杀菌技术领域,还需更多学者进行深入研究,使未来杀菌技术在高效灭菌的同时仍可保持安全、无污染、低成本等优势,以实现延长食品保质期,减少食品中营养损失等目的。为保证食品安全及工业化提供理论支持,最终的工业化应用才是科学研究的意义。

参考文献

- [1] VARALAKSHMI S. A review on the application and safety of non-thermal techniques on fresh produce and their products[J]. LWT, 2021, 149: 111849.
- [2] WANG Q J, LI Y F, SUN D W, et al. Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: Principles and applications [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(13): 2285-2298.
- [3] MORRIS C, BRODY A L, WICKER L. Non-thermal food processing/preservation technologies: A review with packaging

- implications[J]. *Packaging Technology and Science*, 2007, 20(4): 275-286.
- [4] 杨蓓蓓. 食品加工杀菌技术研究综述[J]. *食品安全导刊*, 2020(27): 162.
- YANG B B. A review of research on food processing and sterilization technology[J]. *China Food Safety Magazine*, 2020(27): 162.
- [5] WIMALARATNE S K, FARID M M. Pressure assisted thermal sterilization [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2008, 86(4): 312-316.
- [6] WANG H, YANG Z W, SONG F, et al. Effects of heat treatment on changes of respiration rate and enzyme activity of Ivory mangoes during storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(1): e12737.
- [7] 王玉军. 食品加工中的非热杀菌技术[J]. *黑龙江粮食*, 2009(6): 52-53.
- WANG Y J. Non thermal sterilization technology in food processing[J]. *Heilongjiang Grain*, 2009(6): 52-53.
- [8] OMAR A K M, TENGKU NORSALWANI T L, ASMAH M S, et al. Implementation of the supercritical carbon dioxide technology in oil palm fresh fruits bunch sterilization: A review[J]. *Journal of CO2 Utilization*, 2018, 25: 205-215.
- [9] XIE L, SOLHAUG K A, SONG Y, et al. Modes of action and adverse effects of gamma radiation in an aquatic macrophyte *Lemna minor*[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 680: 23-34.
- [10] FENG D L, SHI J D, SUN D. Inactivation of microalgae in ballast water with pulse intense light treatment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 90(1-2): 299-303.
- [11] NAKONECHNY F, NISNEVITCH M, NITZAN Y, et al. Sonodynamic excitation of rose Bengal for eradication of gram-positive and gram-negative bacteria [J]. *BioMed Research International*, 2013, 2013: 684930.
- [12] LI X, FARID M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 182: 33-45.
- [13] SÁNCHEZ-MORENO C, PLAZA L, DE ANCOS B, et al. Impact of high-pressure and traditional thermal processing of tomato purée on carotenoids, vitamin C and antioxidant activity [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(2): 171-179.
- [14] OEY I, LILLE M, VAN LOEY A, et al. Effect of high-pressure processing on colour, texture and flavour of fruit- and vegetable-based food products: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2008, 19(6): 320-328.
- [15] JIANG Q Y, ZHANG M, XU B G. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 69: 105261.
- [16] RIBEIRO N, SOARES G C, SANTOS-ROSALES V, et al. A new era for sterilization based on supercritical CO₂ technology [J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2020, 108(2): 399-428.
- [17] 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*, 2010, 27(4): 541-549.
- [18] HOSSAIN M S, NORULAINI N A N, NAIM A Y A, et al. Utilization of the supercritical carbon dioxide extraction technology for the production of deoiled palm kernel cake [J]. *Journal of CO2 Utilization*, 2016, 16: 121-129.
- [19] HOSSAIN M S, SANTHANAM A, NIK NORULAINI N A, et al. Clinical solid waste management practices and its impact on human health and environment-A review[J]. *Waste Management*, 2011, 31(4): 754-766.
- [20] GARCIA-GONZALEZ L, GEERAERD A H, SPILIMBERGO S, et al. High pressure carbon dioxide inactivation of microorganisms in foods: the past, the present and the future [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2007, 117(1): 1-28.
- [21] 钟烈洲. 超声波对现榨苹果汁的品质影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- ZHONG L Z. Effect of ultrasound on qualities of squeezed fresh apple juice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [22] 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 D Z, WU M, YANG Y, et al. Advances in the application research of non-thermal sterilization technology in dairy products [J]. *Packaging and Food Machinery*, 2020, 38(1): 68-72.
- [23] MANZOCCO L, PLAZZOTTA S, SPILIMBERGO S, et al. Impact of high-pressure carbon dioxide on polyphenoloxidase activity and stability of fresh apple juice [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 85: 363-371.
- [24] ZHAO W T, SUN Y T, CHENG Y R, et al. Effect of high-pressure carbon dioxide on the quality of cold- and hot-break tomato pulps [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(7): e13959.
- [25] VAN DER PLANCKEN I, VAN LOEY A, HENDRICKX M E G. Changes in sulfhydryl content of egg white proteins due to heat and pressure treatment[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(14): 5726-5733.
- [26] FELICIANO C P. High-dose irradiated food: Current progress, applications, and prospects[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2018, 144: 34-36.
- [27] NAM H A, RAMAKRISHNAN S R, KWON J H. Effects of electron-beam irradiation on the quality characteristics of mandarin oranges (*Citrus unshiu* (Swingle) Marcov) during storage[J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 338-345.
- [28] YANG Z, WANG H Y, WANG W, et al. Effect of 10 MeV E-beam irradiation combined with vacuum-packaging on the shelf life of Atlantic salmon fillets during storage at 4 °C [J]. *Food Chemistry*, 2014, 145: 535-541.
- [29] 古明亮, 张朝林, 高鹏. 电子束辐照对雪花酥杀菌效果及感官品质的影响[J]. *现代面粉工业*, 2020, 34(4): 12-15.
- GU M L, ZHANG C L, GAO P. Effects of electron beam irradiation on germicidal efficacy and sensory quality of snowflake crisp [J]. *Modern Flour Milling Industry*, 2020, 34

- (4): 12-15.
- [30] 周任佳, 乔勇进, 王海宏, 等. 高能电子束辐照对鲜切哈密瓜生理生化品质的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(2): 300-305, 323.
ZHOU R J, QIAO Y J, WANG H H, et al. Effect of high-energy electron beam irradiation on physiological quality of fresh-cut Hami melon [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(2): 300-305, 323.
- [31] YOON Y S, KIM J K, LEE K C, et al. Effects of electron-beam irradiation on postharvest strawberry quality [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14665.
- [32] GAUTAM R K, VENUGOPAL V. Electron beam irradiation to control biohazards in seafood [J]. Food Control, 2021, 130: 108320.
- [33] MANDAL R, MOHAMMADI X, WIKTOR A, et al. Applications of pulsed light decontamination technology in food processing: an overview [J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3606.
- [34] 段振华. 现代高新灭菌技术及其在食品工业中的应用研究 [J]. 中国食物与营养, 2006, 12(9): 28-30.
DUAN Z H. Modern high tech sterilization technology and its application in the food industry [J]. Food and Nutrition in China, 2006, 12(9): 28-30.
- [35] ANSARI I A, DATTA A K. An overview of sterilization methods for packaging materials used in aseptic packaging systems [J]. Food and Bioproducts Processing, 2003, 81(1): 57-65.
- [36] KOH P C, NORANIZAN M A, KARIM R, et al. Sensory quality and flavour of alginate coated and repetitive pulsed light treated fresh-cut cantaloupes (*Cucumis melo* L. Var. *Reticulatus* Cv. *Glamour*) during storage [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(5): 2563-2575.
- [37] 赵越. 鲜切油麦菜、白菜脉冲强光与气调包装联合保鲜研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
ZHAO Y. The synergism of pulsed light combined with modified atmosphere packaging on preservation study of fresh-cut lettuce and Chinese cabbage [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [38] HIERRO E, GANAN M, BARROSO E, et al. Pulsed light treatment for the inactivation of selected pathogens and the shelf-life extension of beef and tuna carpaccio [J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 158(1): 42-48.
- [39] HOLCK A, LILAND K H, CARLEHÖG M, et al. Reductions of *Listeria monocytogenes* on cold-smoked and raw salmon fillets by UV-C and pulsed UV light [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 50: 1-10.
- [40] KRAMER B, WUNDERLICH J, MURANYI P. Pulsed light decontamination of endive salad and mung bean sprouts in water [J]. Food Control, 2017, 73: 367-371.
- [41] ALMEIDA LOPES M M, SILVA E O, LAURENT S, et al. The influence of pulsed light exposure mode on quality and bioactive compounds of fresh-cut mangoes [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(8): 2332-2340.
- [42] CHEIGH C I, HWANG H J, CHUNG M S. Intense pulsed light (IPL) and UV-C treatments for inactivating *Listeria monocytogenes* on solid medium and seafoods [J]. Food Research International, 2013, 54(1): 745-752.
- [43] 邱建清, 李世洋, 叶倩文, 等. 声动力技术在食品杀菌领域的研究进展 [J]. 食品科学, 2020, 41(19): 245-252.
QIU J Q, LI S Y, YE Q W, et al. Recent progress in sonodynamic technology in the field of food sterilization [J]. Food Science, 2020, 41(19): 245-252.
- [44] TRENDOWSKI M. The promise of sonodynamic therapy [J]. Cancer Metastasis Reviews, 2014, 33(1): 143-160.
- [45] MIŠÍK V, RIESZ P. Free radical intermediates in sonodynamic therapy [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2000, 899(1): 335-348.
- [46] PAN X T, WANG H Y, WANG S H, et al. Sonodynamic therapy (SDT): A novel strategy for cancer nanotheranostics [J]. Science China Life Sciences, 2018, 61(4): 415-426.
- [47] PITT W G, MCBRIDE M O, LUNCEFORD J K, et al. Ultrasonic enhancement of antibiotic action on gram-negative bacteria [J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 1994, 38(11): 2577-2582.
- [48] BHAVYA M L, HEBBAR H U. Sono-photodynamic inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in orange juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 57: 108-115.
- [49] MARSZALEK K, WOŹNIAK Ł, KRUSZEWSKI B, et al. The effect of high pressure techniques on the stability of anthocyanins in fruit and vegetables [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(2): 277.
- [50] WAGHMARE R. Cold plasma technology for fruit based beverages: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 60-69.
- [51] ZHANG C L, CAO W, HUNG Y C, et al. Disinfection effect of slightly acidic electrolyzed water on celery and cilantro [J]. Food Control, 2016, 69: 147-152.
- [52] MOYE Z D, WOOLSTON J, SULAKVELIDZE A. Bacteriophage applications for food production and processing [J]. Viruses, 2018, 10(4): 205.