DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260329001
引用格式: 王湛飞, 周奕杰, 石佳怡, 等. 新型冷杀菌技术在食源性致病菌防控中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 207–218.
Wang Zhanfei, Zhou Yijie, Shi Jiayi, et al. Application progress of novel cold sterilization technology in the prevention and control of foodborne pathogens [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 207–218. (in Chinese with English abstract).

新型冷杀菌技术在食源性致病菌防控中的应用进展

王湛飞[1#], 周奕杰[1#], 石佳怡[1], 宋　蕊[1], 张君怡[1], 李永新[2], 李　涛[2], 王少峰[2], 郝建雄[1*], 吴彤娇[1*]

(1. 河北科技大学食品与生物学院, 石家庄　050018; 2. 石家庄市惠康食品有限公司, 石家庄　050802)

摘　要: 食源性致病菌污染是全球食品安全问题的核心隐患, 其导致的食品腐败变质和食源性疾病, 对人体健康造成严重威胁。传统杀菌方式存在一定的局限性, 传统热杀菌易造成热敏性食品营养价值流失与感官品质劣化, 化学杀菌存在化学残留的风险, 难以满足食品工业领域的高速发展与消费者对高品质食物的需求。冷杀菌技术作为一种新兴的食品加工技术, 能够在保留食品原有营养与风味的同时, 实现对有害微生物的高效灭活。本文概述了常见食源性致病菌的危害, 重点阐述了 4 类新型冷杀菌技术的灭活机制与优势。同时, 本文整合了国内外冷杀菌策略的最新研究进展, 并将新旧杀菌技术进行多维度对比。最后, 本文指出当前研究存在覆盖不全面、协同机制研究不足等问题, 为食品工业微生物控制及技术产业化提供理论支撑。

关键词: 食源性致病菌; 新型冷杀菌技术; 协同杀菌; 杀菌技术对比; 食品微生物控制
中图分类号: TS201.6　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)16–0207–12

Application progress of novel cold sterilization technology in the prevention and control of foodborne pathogens

WANG Zhan-Fei[1#], ZHOU Yi-Jie[1#], SHI Jia-Yi[1], SONG Rui[1], ZHANG Jun-Yi[1], LI Yong-Xin[2], LI Tao[2], WANG Shao-Feng[2], HAO Jian-Xiong[1*], WU Tong-Jiao[1*]

(1. *College of Food and Biology*, *Hebei University of Science and Technology*, *Shijiazhuang* 050018, *China*; 2. *Shijiazhuang Huikang Food Co*., *Ltd.*, *Shijiazhuang* 050802, *China*)

ABSTRACT: Contamination by foodborne pathogens is a core risk in global food safety, and the resulting food spoilage and foodborne illnesses are widely recognized as a serious threat to public health. Currently, traditional sterilization methods have certain limitations. Thermal sterilization frequently causes the loss of nutritional value and deterioration of sensory quality in heat-sensitive foods, while chemical sterilization methods are associated with potential risks of chemical residue. Consequently, these conventional methods hinder the growing consumer demand for

收稿日期: 2026-03-29
基金项目: 驻冀高校重点研发专项(241170132A); 中央引导地方科技发展资金项目(自由探索类基础研究)(236Z7101G)
#王湛飞和周奕杰为共同第一作者

第一作者: 王湛飞(2005—), 男, 主要研究方向为食品安全控制。E-mail: 19080634869@163.com
周奕杰(2005—), 男, 主要研究方向为食品安全控制。E-mail: 15613141553@163.com
***通信作者:** 郝建雄(1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品加工及食品安全控制。E-mail: cauhjx@163.com
吴彤娇(1992—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为功能性水的开发研究及食品安全控制。E-mail: katherine_0827@163.com

high-quality food and the adaptation to the rapid development of the food industry. As an emerging food processing technology, cold sterilization can effectively inactivate harmful microorganisms while preserving the original nutritional value and flavor of food. Therefore, this review systematically outlined the hazards posed by common foodborne pathogens and elaborated on the inactivation mechanisms and principal advantages of 4 kinds of novel cold sterilization technologies. Furthermore, it reviewed the latest research advances in cold sterilization strategies both domestically and internationally, and compared existing and emerging sterilization technologies from multiple perspectives. Finally, this paper identified issues such as incomplete coverage and insufficient research on synergistic mechanisms in current studies, thereby providing theoretical support for microbial control in the food industry and the industrialization of these technologies.

KEY WORDS: foodborne pathogens; novel cold sterilization technology; synergistic sterilization; sterilization technology comparison; microbial control in food

0 引 言

食品安全直接关乎公众身体健康和生命安全。近年来，随着公众生活品质的提高，消费者对食品的安全卫生及口感提出了更高要求。食源性致病菌广泛存在于自然及生产各环节，且致病性强，因此其引起的食品污染已成为全球食品安全领域的核心挑战[1]。常见的食源性致病菌包括致病性埃希氏大肠杆菌(*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、沙门氏菌(*Salmonella* sp.)、单增李斯特菌(*Listeria monocytogenes*)、副溶血性弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*)等。全球每年约 6 亿人因受污染食品患病，死亡 42 万例；我国 2023 年报告暴发事件 6960 起，发病 30237 人，死亡 90 人[2]，上述数据表明食品工业在微生物控制方面仍存在不足。因此，开发绿色、高效的食品杀菌技术已成为食品工业领域的研究热点。

当前，传统热杀菌与化学杀菌虽应用广泛，但均存在局限性：前者易造成营养损失与品质劣变，后者则面临化学残留及毒副作用风险，难以兼顾杀菌效率与食品安全性。冷杀菌技术作为一类新兴的食品加工技术，能够在保留食品原有营养与风味的同时，实现对有害微生物的高效灭活，弥补了传统杀菌技术的不足。基于多种单一冷杀菌技术协同构建的联合杀菌体系的研究与应用，已引起食品有害微生物防控领域的广泛关注，对未来食品行业展现出重要的应用前景。基于此，本综述系统地介绍了以低温等离子体(low-temperature plasma, LTP)、微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water, SAEW)、高压脉冲电场(pulsed electric field, PEF)、超声波(ultrasonic sterilization, US)为代表的 4 种新型冷杀菌技术，并详细阐述了其杀菌机制与优势。根据国内外冷杀菌技术的研究进展，对其在食源性致病菌防控中的具体应用进行综述，客观评价了冷杀菌技术在食品工业领域的局限性，分析了该类新型杀菌体系在食品微生物防控领域所面临的挑战，并对其未来发展提出建议与展望。

1 传统杀菌方式及其弊端

现阶段，我国食品工业仍以传统热杀菌技术为主导[3]。该类技术凭借成熟的工艺体系与可靠的杀菌效果，在多类食品加工中得到广泛应用。常见的传统热杀菌技术包括巴氏杀菌、常压蒸汽灭菌、高温瞬时杀菌、高压蒸汽灭菌等。然而，不同热杀菌方式的适用性与副作用差异显著。低温热处理方式(如巴氏杀菌)虽能较好地保留热敏性食品的营养成分与天然风味，但杀菌效果有限，难以有效灭活耐热致病菌，导致产品保质期较短——以乳制品为例，市售奶制品普遍存在货架期偏短的问题，这增加运输成本并制约销售范围。高温热处理方式虽能获得较高的杀菌率，却易破坏热敏性蛋白结构，致使多数热敏性食品营养成分流失，同时引发产品色泽劣变、质地改变等品质损伤[4−5]。这些缺陷严重影响了食品的营养价值与商品性，降低了消费者的接受度，也限制了热杀菌技术在高品质食品加工中的应用。

除热杀菌外，化学杀菌也是食品防腐与保鲜领域常用的传统手段。该技术通过添加或接触化学或生物杀菌剂，抑制微生物细胞的生理代谢活动，从而实现抑菌或杀菌效果[4]。技术体系成熟且应用广泛，但其主要弊端在于化学残留与潜在的毒副作用。以氯和臭氧为例，二者均为常用的化学消毒剂，但含氯消毒剂(如 84 消毒液)属于强碱性，易与有机物反应生成氯仿、卤代乙酸等具有强致癌性的消毒副产物；高浓度的臭氧对人体黏膜具有强氧化性与刺激性。长期摄入或接触上述残留物可能干扰免疫系统和内分泌系统，构成健康风险[4,6]。这些问题与消费者对“绿色安全食品”的需求相冲突，也在一定程度上推动了新型替代杀菌技术的研究与发展。

2 新型冷杀菌技术作用机制及应用

传统热杀菌技术易导致食品营养成分流失、色泽与质

地劣变，且对热敏性食品适配性较低。化学杀菌技术则存在化学残留问题，对人体健康具有潜在风险。鉴于上述局限性，食品工业对新型杀菌技术的需求日益迫切。

当前，相关领域的研究热点集中于 LTP、SAEW、PEF、US 等新型绿色冷杀菌技术。与传统杀菌技术相比，该类杀菌技术在确保更优杀菌效果的同时，兼具速效、高效、无污染等优势。同时，其对食品的色、香、味及营养成分破坏较小，符合不断变化的市场需求。因此，冷杀菌技术是未来食品安全领域发展的重要方向[4]。

2.1　LTP 杀菌技术

2.1.1　LTP 杀菌技术原理

等离子体由电离气体产生，含有紫外线(ultraviolet, UV)、多种活性离子及激发态原子分子，具备杀菌活性的物质基础[7]。其中，活性氧(reactive oxygen species, ROS)和活性氮(reactive nitrogen species, RNS)被认为是诱导菌体死亡的关键[8]。

LTP 作用机制如图 1 所示，具体分为两方面。(1)利用强氧化性破坏细胞膜、细胞壁，导致内容物泄漏；(2) ROS、RNS 等氧化胞内 DNA、蛋白质及酶，阻碍复制转录，最终导致微生物死亡[9−10]。该技术优势在于其广谱高效的杀菌能力以及低温低损的温和处理方式。该技术主要基于非热机制，在高效灭活多数耐热菌和嗜冷菌的同时，能够较大程度地保留食品原有的营养成分。此外，该项技术还兼具绿色环保、成本低等特点。近年来，相关研究呈增长态势，主要集中在抑制食源性致病菌以及对果蔬、肉类等易腐食品的贮藏保鲜。

2.1.2　LTP 杀菌在食源性致病菌防控中的应用

相关研究表明 LTP 处理对于多种食品中常见的食源性致病菌有显著的致死效果。刘雅夫等[11]发现，LTP 可以有效地减少金黄色葡萄球菌及铜绿假单胞菌的数量。张佳丽等[12]针对铜绿假单胞菌的试验也得出类似结论，同样证实了 LTP 的高效灭活能力。相启森等[13]采用大气压等离子体射流(atmospheric pressure plasma jet, APPJ)装置制备的等离子体活化水(plasma-activated water, PAW)，发现其对沙门氏菌具有良好的杀菌效果。可见，LTP 技术对多种食源性致病菌具有广谱且高效的灭活作用，在食源性致病菌防控方面具有显著效果。

值得注意的是，LTP 技术的杀菌效果受多方面因素影响，例如处理参数、微生物特性、食品表面形状有关[14]。同时，LTP 处理可能对肉制品颜色及感官品质产生不良影响[15−16]。因此，如何在较好地保留产品原有营养价值与风味的基础上，提高杀菌效果，延长产品保质期，将成为 LTP 在肉制品中应用的研究重点。表 1 汇总了几种常见的食源性致病菌经 LTP 处理后的灭菌效果以及该处理对食品品质的影响。

综上，LTP 处理技术可能会诱发肉制品脂质氧化与褪色，且杀菌效果易受食品表面水分和油脂的干扰，因此如何精准调控处理强度成为应用关键。这一高效却难以精准调控的特性，与 SAEW 即时高效但无法长效残留的特点形成互补，为后续两者协同处理提供了可能性。

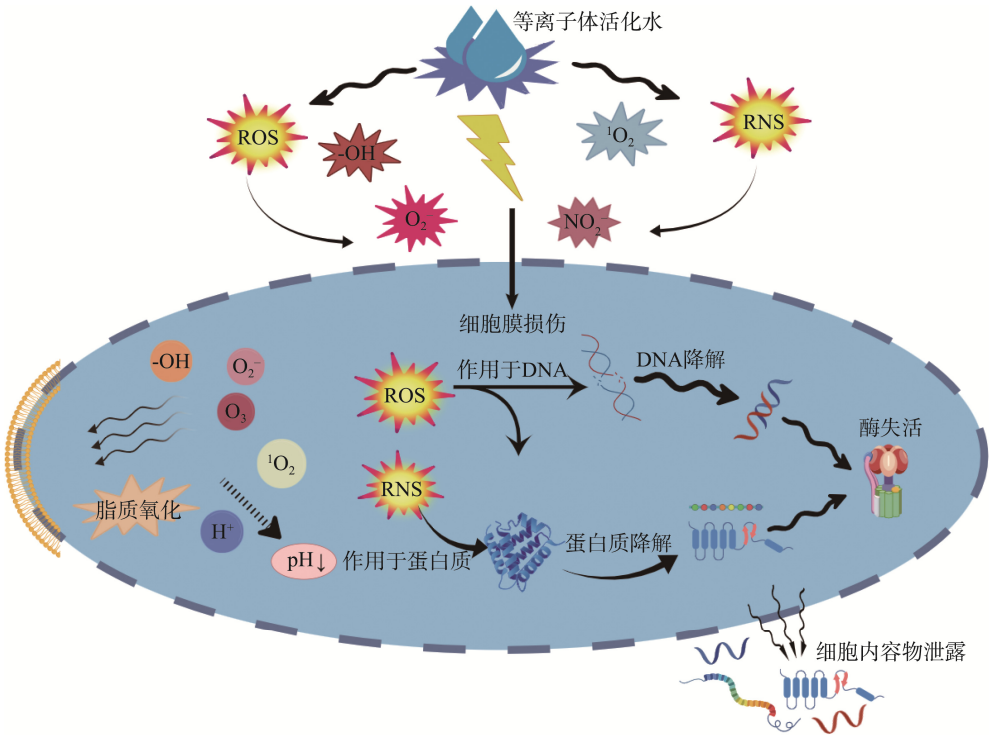


图 1　LTP 杀菌机制图

Fig.1　Diagram of the sterilization mechanism of LTP

2.2 SAEW 杀菌技术

2.2.1 SAEW 杀菌技术原理

SAEW 是通过电解稀盐酸或氯化钠溶液生成的功能性水, 其pH在5.0~6.5, 有效氯质量浓度为10~80 mg/L[20], 具有良好稳定性和低腐蚀性[21]。其杀菌作用机制如图 2 所示。

SAEW 以微生物细胞膜、细胞壁作为攻击靶点, 破坏细胞膜结构, 导致细胞内容物泄漏[22]。同时, 其较低的 pH 环境亦可对微生物细胞膜结构造成损伤, 增加其通透性[23]。当 HClO 扩散至胞内, 会诱导细胞内部产生强氧化性物质(ROS), 对蛋白质、脂质、DNA 等生物大分子造成过氧化损伤, 阻碍其合成[21,23]。进而导致 ATP 酶等代谢酶活性下降, 破坏胞内酶系统平衡, 扰乱细胞正常生理功能, 最终实现杀菌效果[24]。该技术具有环保、无残留、成本低、广谱杀菌能力强等优势, 属于非热杀菌, 能较大限度保留食品色泽风味, 适用于食品加工、医疗及养殖等领域。

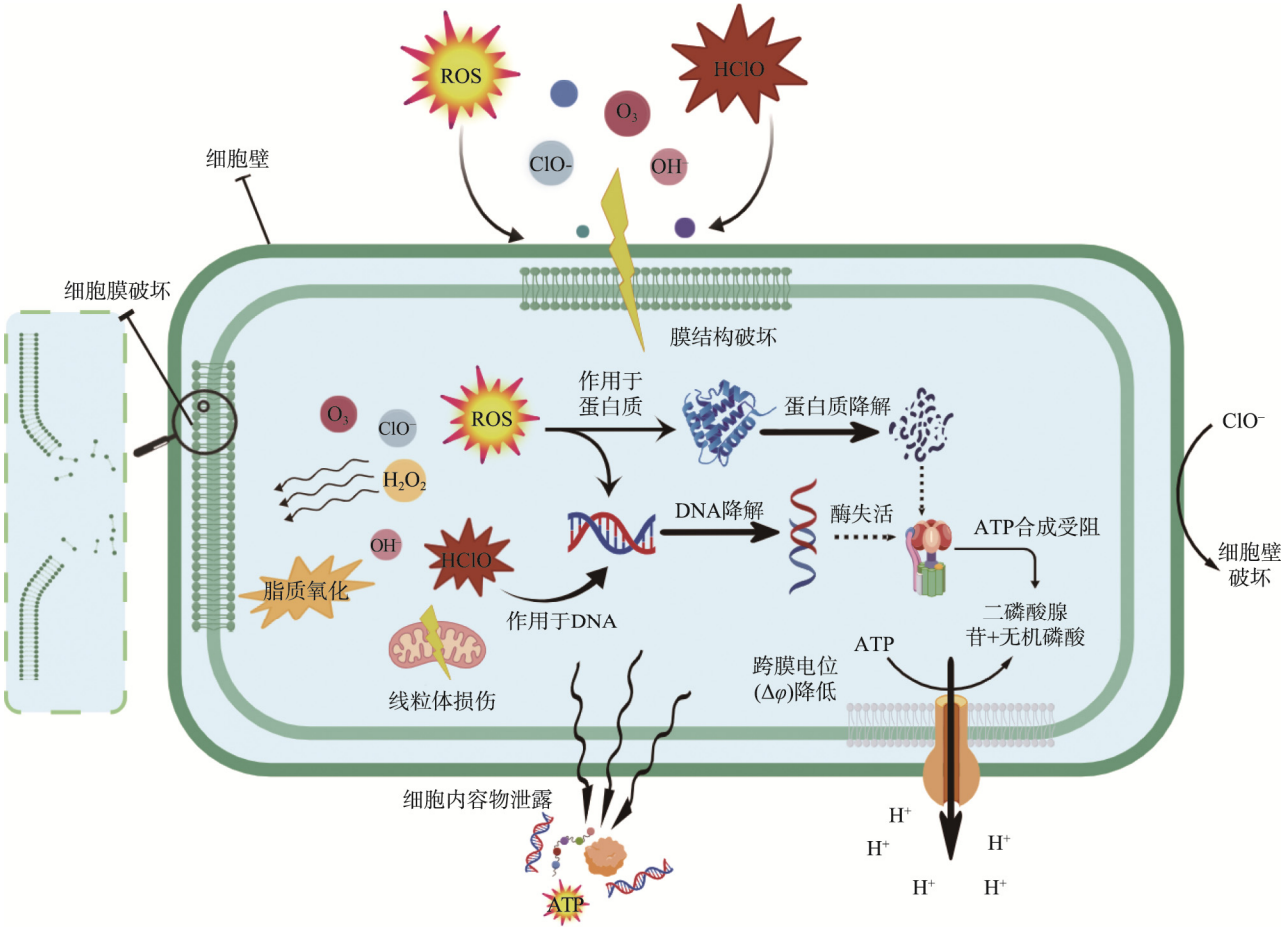
2.2.2 SAEW 杀菌技术在食源性致病菌防控中的应用

刘瑾萱等[25]以冷鲜鸡胸肉为研究对象, 考察了有效氯浓度和处理时间两个变量下 SAEW 对接种空肠弯曲菌的杀灭效果。其结果表明, SAEW 能快速高效地杀灭肌肉表面的空肠弯曲菌, 对肌肉品质的损害性较低。类似的结果在石艺琦[26]研究中得到进一步验证, SAEW 对空肠弯曲菌具有良好的杀灭效果, 且不会对鸡肉的肉色和嫩度产生不良影响。除了禽肉基质外, SAEW 在鸡蛋、海虾等食品表面的应用也取得了类似效果。孙丽娜等[27]研究发现, 在处理时间 1 min、有效氯质量浓度 10 mg/L 的条件下, 鸡蛋表面肠炎沙门氏菌从 6.54 log CFU/g 降至 4.50 log CFU/g。刘阳等[28]则将 SAEW 应用于海虾, 发现有效氯质量浓度10 mg/L下处理10 min, 可使海虾表面副溶血性弧菌菌落数下降 1.6 log CFU/g。综上, SAEW 在食品杀菌处理中具备以下特征: SAEW 对空肠弯曲菌、肠炎沙门氏菌、副溶血性弧菌等多种食源性致病菌均具有杀灭作用。在低温或室温条件下, 经短时间(1~10 min)处理, 可显著降低鸡肉表面空肠弯曲菌、鸡蛋表面肠炎沙门氏菌及海虾表面副溶血性弧菌的菌落数。其作用机制主要包括破坏细胞膜完整性、诱导细胞内容物泄漏及氧化损伤, 最终导致微生物死亡。表 2 汇总了 SAEW 对以上 3 种常见食源性致病菌的灭菌效果及杀菌机制。

表 1 LTP 对食源性致病菌杀菌效果及食品品质影响

Table 1 Bactericidal effects of LTP on foodborne pathogens and its impact on food quality

杀菌对象	关键参数	实验结果	食品品质	文献
鼠伤寒沙门氏菌	采用高压电源Leap100, 以大气空气为工作气体, 在谐振频率 60 kHz、脉冲宽度 50 μs 条件下, 利用带有外部接地电极(ground electrode out, GO)的处理器对初始电导率为 0 S/m 的超纯水, 使用带有内部接地电极(ground electrode in, GI)的反应器对初始电导率为 0.02 S/m、0.2 S/m 的水溶液; 对所有溶液进行 30 min 火花放电处理, 制备 PAW	经 240 s 处理, 3 种 PAW 对鼠伤寒沙门氏菌的菌落减少量分别为: GO (0 S/m) 3.5 log CFU/mL、GI (0.02 S/m) 3.7 log CFU/mL、GI (0.2 S/m) 5.9 log CFU/mL	对牛肉的品质有一定提升, 生牛肉和熟牛肉的嫩度均有所提升, 对牛肉的营养成分无显著影响, 同时能更好地保持牛肉的红色	[17]
大肠杆菌		经 240 s 处理, 3 种 PAW 对大肠杆菌的菌落减少量分别为: GO (0 S/m)处理 360 s 2.5 log CFU/mL、GI (0.02 S/m) 360 s 2.4 log CFU/mL、GI (0.2 S/m) 300 s 4.0 log CFU/mL		
单增李斯特菌、大肠杆菌 O157: H7、鼠伤寒沙门氏菌	采用柔性食品包装(dielectric barrier discharge, DBD)等离子体系统:外层供电电极, 内层 70 mm×70 mm 接地电极, 0.28 mm 聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)介质, 在 15 kHz、峰值 100 W/平均 2 W、大气条件下, 对接种了大肠杆菌 O157: H7、鼠伤寒沙门氏菌和单增李斯特菌的猪臀肉和牛里脊肉分别处理 10 min	经 10 min 处理, DBD 等离子体对猪臀肉中单增李斯特菌、大肠杆菌 O157: H7 和鼠伤寒沙门氏菌的减少量分别为 2.04、2.54、2.68 log CFU/g; 对牛里脊肉分别为 1.90、2.57、2.58 log CFU/g。	对猪肉和牛肉的外观、颜色、异味、整体可接受度均无显著影响, 但是在处理时间 10 min 时猪肉与牛肉味道评分降低, 产生劣变	[18]
布氏弓形菌(BZg74, BZs206)	采用表面介质阻挡放电(surface dielectric barrier discharge, SDBD)系统(峰值电压 6 kV、23 kHz、425 W), 电极-样品距离 4 cm, 在室温下对鲜切胡萝卜丝处理 30 min	布氏弓形菌 BZg74 敏感度较高, 处理 20 min 后菌落数减少大于 2 log CFU/g, 处理 30 min 后降至检测限以下(<10 CFU/g); 布氏弓形菌 BZs206 处理 30 min 后最大减少约 2 log CFU/g; 而大肠杆菌 NCFB555 处理 30 min 仅减少约 1 log CFU/g	胡萝卜 pH 显著降低(从 6.28 降至 5.15), 干物质含量在处理超过 10 min 后显著增加, 但水分活度无较大变化; 颜色发生劣变, 但总类胡萝卜素含量未受显著影响, 过氧化物酶活性被显著抑制	[19]
大肠杆菌				



注：三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)。

图 2　SAEW 杀菌机制图

Fig.2　Diagram of the sterilization mechanism of SAEW

表 2　SAEW 对食源性致病菌杀菌效果及细胞损伤表征

Table 2　Bactericidal effects of SAEW on foodborne pathogens and characterization of cellular damage

杀菌对象	关键参数	实验结果	作用机制	文献
空肠弯曲菌	4 ℃, pH 5.0~6.5，有效氯质量浓度为 25、50、75 和 100 mg/L，拍打振荡 2 min	经 2 min 处理后，鸡肉表面接种的空肠弯曲菌分别下降了 1.99、2.34、2.41、2.55 log CFU/g	空肠弯曲菌菌体形态改变，细胞膜破裂，导致胞内核酸和蛋白质大量泄漏，线粒体破损，ATP 水平和线粒体膜电位均显著下降	[25]
肠炎沙门氏菌	室温下，pH 6.35~6.54，处理时间 1 min，有效氯质量浓度 10 mg/L	鸡蛋表面肠炎沙门氏菌经处理后，从原始菌落 6.54 log CFU/g 降至 4.50 log CFU/g	肠炎沙门氏菌的细胞膜通透性提高，完整性遭到破坏，导致细胞内容物泄漏及 ROS 上升，最终诱导细胞死亡	[27]
副溶血性弧菌	有效氯质量浓度 10 mg/L，处理时间 10 min	经处理 10 min 后，海虾表面接种的副溶血性弧菌菌落数下降了 1.6 log CFU/g	副溶血性弧菌的细胞膜完整性遭到破坏，造成了蛋白质、DNA 等内容物的泄漏，导致细胞死亡	[28]

然而，该技术的应用存在若干限制，有效成分次氯酸易分解，有效氯浓度在短期内显著下降[29]。因此，通常需要使用前即时配制，难以实现商品化和远程配送。SAEW 中的活性物质会与食品中的有机物质接触后迅速消耗，缺乏残留抑菌能力，易造成二次污染[30]。上述特性限制了其在需要长效保藏或连续无菌加工的食品场景中的应用。因此，未来研究应针对 SAEW 储藏运输困难及无法持续作用的问题开展改进与完善。同时，该技术无法长效残留的缺陷限制了其工业化应用，这一不足也促使研究者寻求与物理场联用以提升活性成分的渗透率。

2.3 PEF 杀菌技术

2.3.1 PEF 杀菌技术原理

PEF 杀菌是新型非热杀菌技术之一，主要通过破坏微生物细胞膜结构实现杀菌，其中电穿孔与电崩解假说的相关研究较为广泛[31]。电穿孔假说认为，PEF 可通过施加短时、高强度的脉冲电场，在临界场强下诱导微生物细胞膜发生不可逆电穿孔，使细胞膜丧失选择透过性，造成细胞内外物质交换失衡、代谢紊乱及细胞呼吸代谢受抑制，最终实现高效杀菌[32−33]。杀菌机制如图 3 所示。

电崩解假说与电穿孔假说原理类似，该假说通过对细胞膜结构及生理功能造成不可逆损伤，引起细胞内容物泄漏，破坏细胞正常代谢，进而导致微生物死亡[34−35]。该技术具有效率高、低能耗、高营养保留率等优点[35]，适用于热敏性食品，在桃汁、牛奶等液态食品中应用广泛。

2.3.2 PEF 杀菌技术在食源性致病菌防控中的应用

马斯芮等[35]利用 PEF 技术处理金黄色葡萄球菌菌悬液，实验条件为：电压 22 kV，脉冲宽度 2 μs，脉冲频率 100 Hz，处理时间 30~150 s。结果表明，细菌致死率随处理时间的延长而升高。当处理时间为 150 s 时，金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的菌落数分别下降 2.5 和 3.5 个对数，杀菌率超过 99%。Walter 等[36]将相同技术应用于全脂牛奶，在温度 55 ℃、电场强度 35 kV/cm、处理时间 40 μs 的条件下，大肠杆菌活菌数降低 6 log CFU/mL。由此可见，PEF 技术能够降低金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等食源性致病菌的数量，其杀菌效果在一定范围内随处理时间的延长而增强。在特定处理条件下，该技术可使全脂牛奶中的大肠杆菌活菌数显著减少。同时，该技术在杀菌过程中可保留乳制品中的维生素、部分乳蛋白的生物活性或结构以及脂肪球的完整性。

然而，该技术亦存在一定局限性：设备造价较高，限制了其工业化应用；技术参数需根据不同微生物的结构、大小及其他影响杀菌效率的因素进行优化[37]。后续研究可围绕开发低成本的高压脉冲电源和电场预处理装置、建立参数优化模型，以及探索该技术与天然抗菌物质的协同增效作用等方向展开[38]。

综上，PEF 在液态均质食品中杀菌效果卓越且营养保留度高，但其对固态食品适应性较差，且设备投资高昂。与前述化学氧化型技术不同，PEF 属于物理破壁型，其特点与随后介绍的 US 技术形成应用场景的互补关系。

2.4 US 杀菌技术

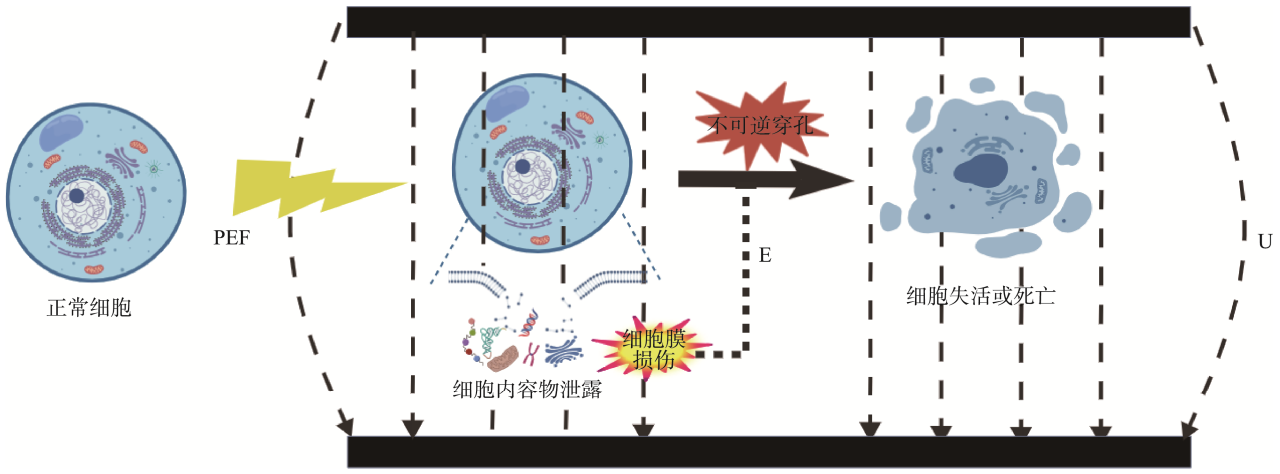
2.4.1 US 杀菌技术原理

US 杀菌技术是指向食品施加频率超过 20 kHz 的机械波，具有强穿透性及方向性等特点。该技术利用 US 在液体中产生的局部瞬时高温高压(high temperature and high pressure, HTHP)变化，破坏微生物的细胞膜结构[4]。具体杀菌机制如图 4 所示。

US 通过产生纵波改变液体中的压力，诱发空穴效应并产生空化泡。这些空化泡随 US 振动周期性地膨胀与收缩。在破裂瞬间产生局部高温(>5000 K)、高压(>100 MPa)、冲击波以及微射流等物理效应[39−40]。上述效应对细胞膜及细胞壁造成不可逆损伤，导致细胞内容物泄漏及胞内酶构象改变。同时 HTHP 会导致周围水分子裂解，产生自由基等高能活性微粒，氧化生物大分子的同时破坏细菌生长环境，从而实现杀菌[40−41]。该技术穿透性强、覆盖范围广，可对食品深层同步杀菌且保留营养，目前，US 杀菌技术的相关研究主要集中于果蔬汁、牛乳、酱油等食品体系[42]。

2.4.2 US 杀菌技术在食源性致病菌防控中的应用

Bai 等[43]采用 US 技术处理金黄色葡萄球菌菌悬液，分别在 60 kHz、430 kHz 和 1.12 MHz 频率下处理 2 min。结果表明，金黄色葡萄球菌的灭活效率分别为 5.05、4.55



注：U 为两极板之间的电压；E 为两极板之间的电场强度。

图 3 PEF 杀菌机制图

Fig.3 Diagram of the sterilization mechanism of PEF

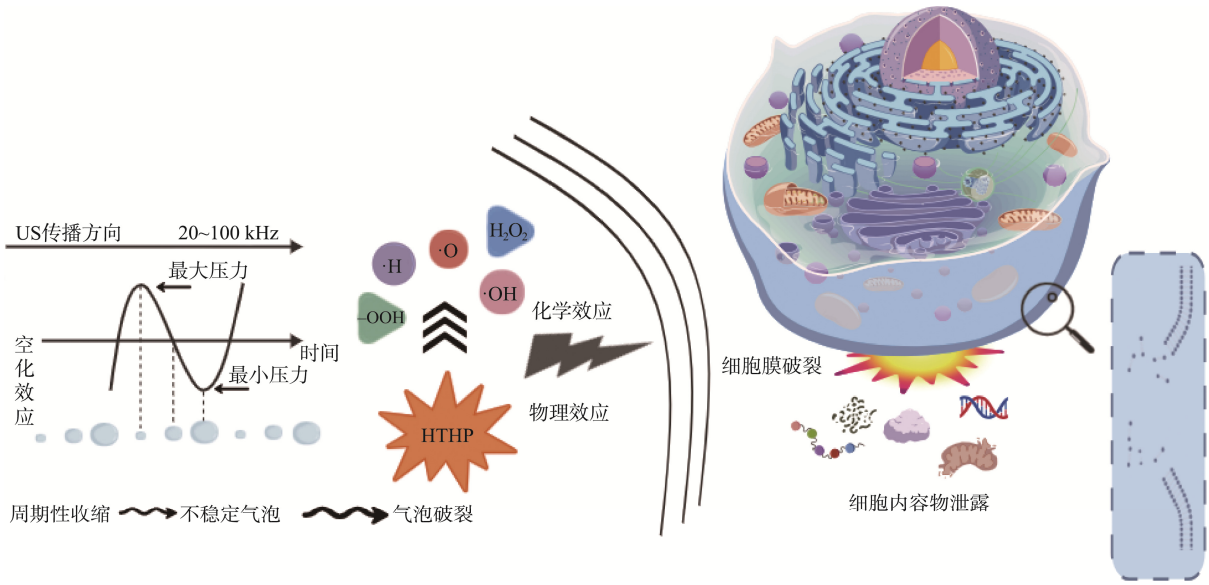


图 4　US 杀菌机制图

Fig.4　Diagram of the sterilization mechanism of US

和 4.86 log CFU/mL。Sarkinas 等[44]在 600 W 功率下进行 US 处理，前 10 min 蜡样芽孢杆菌的菌群数量减少 3.4±0.4 个对数单位；处理 10 min 杆菌营养细胞减少 2.75±1.17 个对数单位，结果具有统计学显著性。其研究表明，US 处理可从细菌悬浮液中去除 1.59~3.4 log 的革兰氏阳性菌及革兰氏阴性菌的营养细胞。上述研究表明，US 技术在不同频率或功率条件下能够降低金黄色葡萄球菌、蜡样芽孢杆菌、大肠杆菌等食源性致病菌的数量，显现出了良好的杀菌能力。

尽管该技术具备上述优势，但仍存在一定局限性：(1) US 设备购置及维护成本较高，限制了其工业化应用；(2)穿透深度受杀菌对象性质及介质的影响[45]，可能导致能量衰减，从而降低杀菌效率。未来应着力开发低成本、模块化超声设备，采用多频、聚焦或脉冲模式以增强穿透能力、降低能量衰减，并探索与电场等技术的协同联用，进一步提高杀菌效率。

此外，食源性致病菌的细胞结构差异可在一定程度上影响冷杀菌技术的选择。以氧化机制为核心的 LTP、SAEW 依赖于其产生的活性微粒的强氧化性，对革兰氏阴性菌(大肠杆菌、沙门氏菌)的脂多糖外膜的氧化损伤较革兰氏阳性菌更为显著，从而获得较高的灭菌效率[46−47]。例如，LTP 可使沙门氏菌活菌数减少 4.22 log CFU/mL。以机械物理作用为主的 US、PEF，则对具有厚肽聚糖层的革兰氏阳性菌(金黄色葡萄球菌、单增李斯特菌)的杀菌效果更强，其中 PEF 可使金黄色葡萄球菌数减少 2.5 log CFU/mL，效果显著[35]。然而，上述趋势并非绝对，实际杀菌效果受参数设置、菌株状态、食品基质等多方面因素影响，更多可能情况仍有待研究。

3　新型冷杀菌联合协同体系研究现状

目前，国内外研究者通过将两种及以上冷杀菌技术进行组合联用，开发出了具有增效作用的协同杀菌技术。李坤等[48]将 SAEW 与超高压杀菌技术联合应用于三七块茎表面大肠杆菌杀灭，并通过并行联合杀菌协同增效分析证实当 SAEW 质量浓度为 34.25 mg/mL，料液比 1:31.28 (g:mL)，超高压压强 400.00 MPa，并行处理 6.79 min 情况下，联合杀菌响应面响应值 $\Delta I>0$，并达到理论最大。证明在相同工艺参数强度下，并行联合技术杀菌效果大于两种单一技术杀菌效果之和，并行联合技术有“1+1>2”的协同增效作用。高晴等[49]则将 SAEW 与 US 杀菌技术联合，探究该技术对鲜切生菜表面大肠杆菌的杀灭效果，并通过量化分析证明：相同条件下 SAEW-US 并行联合处理鲜切生菜杀菌效果比单独使用 SAEW 处理效果更好，表现出明确的增效杀菌效果。Nguyen 等[50]考察了低频、低强度 US、食品级抗氧化剂以及两者联合(先加抗氧化剂后立即超声)处理大肠杆菌 O157:H7 培养液。对比单一处理与协同处理的效果后证实，先添加抗氧化剂再立即超声的方案杀菌效果最佳，从而提出了一种新型协同杀菌技术。该技术对食品中单增李斯特菌和大肠杆菌这两种具有代表性的革兰氏菌杀灭效果显著提升。Li 等[51]将 US 与 UV 杀菌技术联合探究其对大肠杆菌的灭活效果。通过比较相同条件下各组的菌落计数(CFU)发现：单独 UV 处理组和单独 US 处理组处理后的 CFU 分别为 515.89±69.06 和 726.33±137.17，而联合组仅 312.00±70.54 CFU(较未处理组 930±156.99 CFU 降低 66.5%)。联合组的杀菌效果显著优于任一单独组，证明了 US 与 UV 杀菌之间存在协同增效效果。上述研究表明，利用不同技术的作用机制互补，可以提升杀菌效率，并减少单一技术的应用局限。

多种技术联用的协同杀菌策略已成为目前食品领域

研究重点之一。表 3 就近年来不同冷杀菌技术的协同组合及杀菌效果进行汇总。

由表 3 可知, 根据技术组合的性质, 当前冷杀菌协同技术可归纳为物理-物理、物理-化学两大类型, 均基于“弱处理强度+强穿透/强氧化”的搭配逻辑, 通过机制互补实现增效。其中, 物理-物理协同包括 LTP+UV、US+UV; 物理-化学协同包括 SAEW+US、SAEW+LTP。此外, SAEW 因其绿色低成本、法规接受度高, 在上述协同组合中应用较为广泛。

然而上述两类体系增效机制存在差异。物理-物理协同是通过破坏细胞膜屏障, 提高 UV 的胞内损伤效率, 从而实现协同增效。物理-化学协同通过物理处理强化传质过程, 并结合活性粒子与化学杀菌组分的协同氧化效应, 增强 SAEW 的杀菌效果。

现有组合仍存在一定的局限性: 品质方面, 高剂量处理可引起食品色泽劣变、汁液流失与部分营养成分氧化降解。在法规方面, LTP 直接应用于食品的国家标准尚未完善。总体而言, 当前研究仍处于实验室阶段, 工业化工艺参数及长期安全性评价尚需进一步研究。

最后, 为更直观地展现传统杀菌技术与新型冷杀菌及其协同杀菌技术的核心差异, 下文从作用机制、作用条件、杀菌效果等多个维度进行梳理, 具体对比见表 4。

表 3 新型冷杀菌协同技术组合及应用效果

Table 3 New combinations of cold sterilization synergistic technologies and their application results

协同杀菌类型	技术组合	处理参数	实验结果	增效机制	文献
物理-物理协同	LTP 协同 222 nm UV 技术	SDBD(固定电流 10 A, 电压 300 V), UV(照射距离 16.4 cm 处理时间 150 s, 处理后保持时间为 120 s)	初始菌落总数和初始假单胞菌数的减少量分别可达 1.03 log CFU/g 和 0.90 log CFU/g, 均高于单独处理; 在此条件下, 处理组猪肉的菌落总数在 9 d 内始终未超过国际限量标准, 而单独处理组则已超过国际限量标准, 表明其具有显著的微生物抑制作用	LTP 通过活性粒子(ROS、RNS)对微生物细胞壁及细胞膜造成不可逆损伤, 在膜表面制造“微小穿孔”, 从而增加细胞膜通透性, 导致细胞内容物泄漏; 同时, 通透性的增强使 UV 更易进入细胞, 造成遗传物质损伤及转录合成受阻, 最终诱导微生物死亡	[52]
物理-物理协同	US 协同 UV 技术	US(频率 20000 Hz, 功率 200 W), UV(功率 8 W, 波长 253.7 nm, 照射距离 6 cm), 时长 0~180 s	180 s 内, 大肠杆菌 O157: H7 减少 8.31 log CFU/mL, 效果优于单独处理, 杀菌效果显著	US 产生的空化效应对微生物细胞壁及细胞膜造成不可逆损伤, 导致细胞膜通透性增加、内容物泄漏, 同时促进 UV 线进入细胞内部, 进而引起 DNA 过氧化损伤, 导致微生物死亡	[53]
物理-化学协同	SAEW 协同 US	在 25、35、45 ℃条件下联合处理 15 min	鲜切生菜表面大肠杆菌菌落总数从 6.90 log CFU/g 分别降至为 2.33、2.35、1.49 log CFU/g	US 振荡及其空化作用能够促进 SAEW 活性成分的渗透, 并提升其杀菌效能, 最终诱导微生物死亡	[49]
物理-化学协同	SAEW 协同 LTP	功率 320 W, 浸泡时间 20 min, 活化时间 5 min	联合处理、SAEW 和 LTP 组样品在第 8 d 的菌落总数为 7.09、7.47 和 6.98 log CFU/g, 联合处理组表现出最优的抑菌效果	前者借助活性粒子(ROS 及 RNS), 对微生物细胞壁及细胞膜造成不可逆损伤, 促使 SAEW 迅速渗入细胞内部, 进而对细胞大分子造成氧化损伤, 同时, LTP 产生的活性微粒与 HClO 发挥协同氧化作用, 进一步破坏细胞结构, 从而增强整体杀菌能力	[54]

表 4 新旧杀菌技术机制对比

Table 4 Comparison of the mechanisms of old and new sterilization technologies

对比维度	传统热杀菌技术	新型冷杀菌技术	新型协同杀菌技术	文献
代表技术	巴氏杀菌、高温杀菌	LTP、SAEW、US、PEF	SAEW 协同 US 杀菌	[4]
核心作用机制	以蒸汽、热水等为热介质, 通过热传导与对流传递热量, 实现杀菌和钝化酶活性的目的	采用等离子体与 HClO 等化学活性物质以及高压冲击波、高压电场等非热物理杀菌手段, 实现杀菌目的	US 振荡与空化作用能够促进 SAEW 活性成分的渗透, 并提升其杀菌效果	[55–56]
杀菌效果	杀菌效果取决于温度与处理时间。75 ℃巴氏杀菌处理 10 min 使金黄色葡萄球菌菌落数较处理前(初始菌落数为 8.10 log CFU/mL)降至 4.69 log CFU/mL; 而 80 ℃处理 10 min 可使其完全失活	在固定条件下, LTP 对红花籽油/火龙果浆乳液中细菌的杀菌率为 98.20%; 随着工作电压升高到 500 V, PEF 处理使大肠杆菌和金黄色葡萄球菌数量分别下降了 5.32 log CFU/g、4.77 log CFU/g	鲜切生菜表面大肠杆菌菌落总数从 6.90 log CFU/g 分别降至为 2.33、2.35、1.49 log CFU/g	[49,57–59]

表 4(续)

对比维度	传统热杀菌技术	新型冷杀菌技术	新型协同杀菌技术	文献
对食品品质的影响	热敏性食品营养成分流失, 色泽劣变、质地改变等品质劣化	较好地保留食品原有的色泽、口感、风味, 特定条件下能使部分食品的感官性质得到一定提升, 对食品的品质的负面影响显著低于传统热杀菌技术	确保高效杀菌的同时, 进一步减轻对食品品质的不良影响, 避免单一技术因过度处理可能导致的食品品质劣变	[60]
局限性	能耗较高, 伴随严重的产品品质与营养成分流失、废气排放问题, 工艺控制难度较大	成本较高, 现研发阶段难以实现大规模生产, 工艺较为复杂, 单一技术部分病菌杀伤力有限	协同杀菌机制探究尚浅, 多技术联用的工艺参数有待进一步优化, 工艺流程复杂, 成本高, 大规模上市困难	-

注: -表示该部分无相关参考文献被引用。

由上述对比分析可知, 传统杀菌技术虽凭借发展历史早, 工艺体系成熟等优势, 目前仍占据主导地位, 但其杀菌强度与食品品质保留难以兼顾、环境能耗大等弊端, 使其难以满足当前食品工业高质量发展及市场对高品质食品的需求, 这一现状在一定程度上推动了以 LTP 与 SAEW 为代表的新型冷杀菌技术的研发与应用。该类技术以低温常压、无化学残留为核心优势, 在不损害食品营养价值的同时实现杀菌。而基于以上技术构建的协同杀菌体系, 有望成为食品微生物控制领域的重点研究方向之一。未来对于该领域的研究可尝试从以技术为核心转向以食品体系为核心, 根据致病菌细胞结构及污染场景选择相应技术, 并建立以“品质保持-杀菌效率-产业可放大性-法规可接受性”为评价标准的应用框架, 以推动冷杀菌技术从实验室研究走向工业化规模化应用。

4　结束语

长期以来, 食源性致病菌污染始终是威胁公众身体健康的重要公共卫生问题。本文概述了致病性埃希氏大肠杆菌等 5 种常见食源性致病菌的生物学特点及其对当今食品安全的威胁。同时, 阐述了传统热杀菌技术导致的食品营养流失与品质劣变问题, 以及传统化学杀菌技术存在的残留风险等固有不足。此外, 系统总结了 LTP、SAEW、PEF、US 等新型冷杀菌技术的核心特性与应用优势。

综合国内外相关研究成果发现, 当前新型冷杀菌技术的研究尚未覆盖各类食品体系及常见食源性致病菌, 且在多种新型冷杀菌技术的协同作用机制与应用场景拓展方面有待进一步研究。对于未来研究可聚焦于以下方面: (1)深化对新型冷杀菌技术装置的进一步研究, 确定多技术联用及工艺参数; (2)进一步探究其对各类食品的杀菌机制以及对感官品质的影响, 明确不同杀菌技术的核心应用场景; (3)促进食品行业向“绿色化、可持续化、健康化”发展。后续研究应进一步开发协同杀菌技术, 为食品安全防控提供技术支撑, 并为食品工业的高质量发展提供理论依据, 同时, 需深化新型冷杀菌技术对多种致病菌的适配性研究, 以推动食品行业的可持续发展。

参考文献

[1] 赵甜甜, 杨莲莲. 食品中微生物污染的来源、危害及防控措施[J]. 现代食品, 2025(20): 127–129.
Zhao Tiantian, Yang Lianlian. The sources, hazards and control measures of microbial contamination in food [J]. Modern Food, 2025(20): 127–129.

[2] 范鹏辉, 李红秋, 褚遵华, 等. 2023 年中国大陆食源性疾病暴发监测结果分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(10): 1199–1208.
Fan Penghui, Li Hongqiu, Chu Zunhua, et al. Analysis of foodborne diseases outbreak surveillance in China’s Mainland, 2023 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(10): 1199–1208.

[3] Chiozzi V, Agriopoulou S, Varzakas T. Advances, applications, and comparison of thermal (pasteurization, sterilization, and aseptic packaging) against non-thermal (ultrasounds, UV radiation, ozonation, high hydrostatic pressure) technologies in food processing [J]. Applied Sciences, 2022, 12(4): 2202.

[4] 王潇栋, 孔阳芷, 张艳玲, 等. 杀菌技术的作用机制及在食品领域中的应用[J]. 中国酿造, 2022, 41(2): 1–8.
Wang Xiaodong, Kong Yangzhi, Zhang Yanling, et al. Mechanism of sterilization technology and its application in food field [J]. China Brewing, 2022, 41(2): 1–8.

[5] 余健霞, 侯鹏飞, 王淑霞, 等. 不同灭菌方式对桃汁色泽、成分和风味的影响[J]. 食品科技, 2025, 50(2): 43–52.
Yu Jianxia, Hou Pengfei, Wang Shuxia, et al. Effect of different sterilization methods on color, composition and flavor of peach juice [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(2): 43–52.

[6] Mandal D. Food preservative chemistry: effects and side effects [J]. Journal of the Indian Chemical Society, 2019, 96(12): 1519–1528.

[7] Waghmare R. Cold plasma technology for fruit based beverages: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 60–69.

[8] 吴小兰, 王娟, 门华清, 等. 非热杀菌新策略: 低温等离子体在食品生物膜清除中的研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(22): 341–352.
Wu Xiaolan, Wang Juan, Men Huaqing, et al. New non-thermal sterilization strategies: research progress on low temperature plasma in the removal of food biofilms [J]. Food Science, 2025, 46(22): 341–352.

[9] 禹石磊, 李小宁, 张海红. 低温等离子体杀菌处理鲜食黄花菜对其品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(10): 62–69.
Yu Shilei, Li Xiaoning, Zhang Haihong. Effect of low-temperature plasma sterilization on quality of fresh daylily [J]. Food Research and

Development, 2025, 46(10): 62–69.

[10] 康超娣, 相启森, 赵电波, 等. 冷等离子体在肉品安全控制领域应用研究进展[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 280–284.
Kang Chaodi, Xiang Qisen, Zhao Dianbo, et al. Recent research progress on applications of cold plasma for safety control of meat product [J]. The Food Industry, 2019, 40(5): 280–284.

[11] 刘雅夫, 符腾飞, 刘宸成, 等. 低温等离子体对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的杀菌效果及动力学特性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 127–135.
Liu Yafu, Fu Tengfei, Liu Chencheng, et al. Bactericidal efficacy and kinetics of cold plasma against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Modern Food Science & Technology, 2021, 37(12): 127–135.

[12] 张佳丽, 周明, 张攻孜, 等. 低温等离子体对铜绿假单胞菌毒力因子的作用研究[J]. 解放军医学院学报, 2025, 46(2): 173–178, 216.
Zhang Jiali, Zhou Ming, Zhang Gongzi, et al. Effects of low temperature plasma on virulence factors of *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Academic Journal of Chinese Pla Medical School, 2025, 46(2): 173–178, 216.

[13] 相启森, 张嵘, 杜桂红, 等. 等离子体活化水对沙门氏菌的灭活作用及机制研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 138–143.
Xiang Qisen, Zhang Rong, Du Guihong, et al. Inactivation effects and mechanisms of plasma-activated water against S. typhimurium [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 138–143.

[14] 张关涛, 张东杰, 李娟, 等. 低温等离子体技术在食品杀菌中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 417–426.
Zhang Guantao, Zhang Dongjie, Li Juan, et al. Advances in the application of cold plasma technology in food sterilization [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12): 417–426.

[15] Wang Xiaoting, Wang Zhaobin, Zhuang Hong, et al. Changes in color, myoglobin, and lipid oxidation in beef patties treated by dielectric barrier discharge cold plasma during storage [J]. Meat Science, 2021, 176: 108456.

[16] Yong H I, Lee H, Park S, et al. Flexible thin-layer plasma inactivation of bacteria and mold survival in beef jerky packaging and its effects on the meat's physicochemical properties [J]. Meat Science, 2017, 123: 151–156.

[17] Barrales Astorga J, Hadinoto K, Cullen P, et al. Effect of plasma activated water on the nutritional composition, storage quality and microbial safety of beef [J]. LWT, 2022, 154: 112794.

[18] Jayasena D D, Kim H J, Yong H I, et al. Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes [J]. Food Microbiology, 2015, 46: 51–57.

[19] Cellini B, Zadeh F S, Molina-Hernandez J B, et al. Application of cold plasma on fresh cut carrots for the inactivation of *Arcobacter* spp., an emerging food-borne zoonotic pathogen [J]. Food Research International, 2026, 237: 119413.

[20] 堀田国元, 郭永明. 酸性电解水的基础、应用及发展动向[J]. 中国护理管理, 2008, 8(4): 7–11.
Ku Tianguoyuan, Guo Yongming. Foundation, application and development trend of acidic electrolyzed water [J]. Chinese Nursing Management, 2008, 8(4): 7–11.

[21] 薛婧琳, 刘慧, 甘慧萍, 等. 微酸性电解水在食品杀菌保鲜中的应用分析[J]. 现代食品, 2024, 30(2): 63–66.
Xue Jinglin, Liu Hui, Gan Huiping, et al. Application analysis of slightly acidic electrolyzed water in food sterilization and preservation [J]. Modern Food, 2024, 30(2): 63–66.

[22] 戴晓泽, 王超, 刘青青, 等. 微酸性电解水在食品保鲜中的应用研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2025, 54(1): 89–99.
Dai Xiaoze, Wang Chao, Liu Qingqing, et al. Research progress on the application of slightly acidic electrolyzed water in food preservation [J]. Subtropical Plant Science, 2025, 54(1): 89–99.

[23] 程博, 张宏博, 康宁波, 等. 微酸性电解水在采后果蔬保鲜中的作用机理及研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(9): 395–404.
Cheng Bo, Zhang Hongbo, Kang Ningbo, et al. Research progress on application of slightly acidic electrolytic water in postharvest preservation of fruits and vegetables [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(9): 395–404.

[24] 吕银德, 赵俊芳, 姜长生, 等. 微酸性电解水在蔬菜采后保鲜中的应用研究进展[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(6): 6–13.
Lv Yinde, Zhao Junfang, Jiang Changsheng, et al. Research progress on the application of slightly acicic electrolyzed water in postharvest vegetable preservation [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2025, 38(6): 6–13.

[25] 刘瑾萱, 马泽豪, 刘敏, 等. 微酸性电解水对空肠弯曲菌的杀菌效果及对鸡肉的保鲜作用[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(23): 31–37.
Liu Jinxuan, Ma Zehao, Liu Min, et al. Sterilization effect of slightly acidic electrolytic water on *Campylobacter jejuni* and the preservation of chicken [J]. Food Research and Development, 2025, 46(23): 31–37.

[26] 石艺琦. 微酸性电解水对鸡肉中空肠弯曲菌的杀灭特性及保鲜研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021: 34–43.
Shi Yiqi. Inactivation characteristics and preservation of slightly acidic electrolyzed water on *Campylobacter jejuni* in chicken [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021: 34–43.

[27] 孙丽娜, 李裕卫, 刘昌林, 等. 微酸性电解水对肠炎沙门氏菌的杀菌机制初探[J]. 食品工业科技, 2023, 44(9): 146–152.
Sun Lina, Li Yuwei, Liu Changlin, et al. A preliminary on the bactericidal mechanism of slightly acidic electrolyzed water on *Salmonella* enteritidis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(9): 146–152.

[28] 刘阳, 王程可苡, 杨宇, 等. 低浓度微酸性电解水对纯培养及海虾中副溶血性弧菌与腐败希瓦氏菌的杀灭作用[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(4): 51–58.
Liu Yang, Wang Chengkeyi, Yang Yu, et al. Bactericidal effect of low concentration slightly acidic electrolyzed water on *Vibrio parahaemolyticus* and *Shewanella putrefaciens* in pure culture and shrimp [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(4): 51–58.

[29] 和劲松, 祁凡雨, 叶章颖, 等. 微酸性电解水储藏和杀菌过程中有效氯衰减的动力学模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 263–270.
He Jinsong, Qi Fanyu, Ye Zhangying, et al. Decay kinetics model of available chlorine in slightly acidic electrolyzed water in storage and disinfection process [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 263–270.

[30] 周然, 刘源, 谢晶, 等. 电解水对冷藏河豚鱼肉质构及品质变化的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 365–369.
Zhou Ran, Liu Yuan, Xie Jing, et al. Effects of electrolyzed water on texture and quality of obscure puffer fish (*Takifugu obscurus*)during cold storage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

Engineering, 2011, 27(10): 365–369.

[31] 孙炳新, 王月华, 冯叙桥, 等. 高压脉冲电场技术在果蔬汁加工及贮藏中的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(4): 147–154.
Sun Bingxin, Wang Yuehua, Feng Xuqiao, et al. Advances on application of high voltage pulsed electric field in fruit and vegetable juice processing and storage [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(4): 147–154.

[32] 何雨灵, 林大为, 王楠, 等. 中温辅助下高压脉冲电场协同香草醛对树莓汁杀菌效果与品质的影响[J]. 食品与营养科学, 2025(3): 458–469.
He Yuling, Lin Dawei, Wang Nan, et al. Effect of high voltage pulsed electric field synergised with vanillin on the bactericidal effect and quality of raspberry juice assisted by medium temperature [J]. Hans Journal of Food and Nutrition Science, 2025(3): 458–469.

[33] Yun Ou, Zeng Xinan, Brennan C S, et al. Effect of pulsed electric field on membrane lipids and oxidative injury of *Salmonella* typhimurium [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 17(8): 1374.

[34] 张元元, 赵欢欢, 李国锋, 等. 高压脉冲电场对果胶杆菌的杀菌效果及其致死动力学研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 162–171.
Zhang Yuanyuan, Zhao Huanhuan, Li Guofeng, et al. Study on bactericidal effect and lethal dynamics of high pulsed electric field on *Pectobacterium carotovorum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 162–171.

[35] 马斯芮, 刘君驰, 田野, 等. 高压脉冲电场非热加工技术对鲜榨梨汁的杀菌保鲜效果研究[J]. 高电压技术, 2025, 51(6): 2934–2944.
Ma Sirui, Liu Junchi, Tian Ye, et al. Study on the effect of pulsed electric field non-thermal processing technology on the sterilization and preservation of freshly squeezed pear juice [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2934–2944.

[36] Walter L, Knight G, Ng S Y, et al. Kinetic models for pulsed electric field and thermal inactivation of *Escherichia coli* and *Pseudomonas fluorescens* in whole milk [J]. International Dairy Journal, 2016, 57: 7–14.

[37] 王淑杰, 赵子瑞, 李文龙, 等. 高压脉冲电场技术在食品加工及保藏中的应用[J]. 农业工程, 2022, 12(2): 63–67.
Wang Shujie, Zhao Zirui, Li Wenlong, et al. Application of pulsed electric field technology in food processing and preservation [J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(2): 63–67.

[38] 徐梦洁, 刘霞. 非热物理杀菌技术在冷链食品中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(17): 144–152.
Xu Mengjie, Liu Xia. Progress of research on the application of non-thermal physical sterilization technology in cold chain food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(17): 144–152.

[39] 芦姝羽, 黑俊肖, 黄现青, 等. 超声波与光及其协同杀菌技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 493–504.
Lu Shuyu, Hei Junxiao, Huang Xianqing, et al. Systematic review of ultrasound, light and their synergistic technologies in food sterilization [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 493–504.

[40] 樊丽华, 侯福荣, 马晓彬, 等. 超声波及其辅助灭菌技术在食品微生物安全控制中的应用[J]. 中国食品学报, 2020, 20(7): 326–336.
Fan Lihua, Hou Furong, Ma Xiaobin, et al. The application of ultrasound and assistant sterilization technologies in food microbiological control: a review [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(7): 326–336.

[41] Serpe L, Giuntini F. Sonodynamic antimicrobial chemotherapy: first steps towards a sound approach for microbe inactivation [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2015, 150: 44–49.

[42] 张照勇. 超声波及其辅助灭菌技术在食品微生物安全控制中的应用[J]. 中国食品工业, 2023(9): 55–57, 96.
Zhang Zhaoyong. Application of ultrasonic wave and its auxiliary sterilization technology in food microbial safety control [J]. China Food Industry, 2023(9): 55–57, 96.

[43] Bai Yun, Zhou Yuanhang, Chang Ruiting, et al. Investigating synergism and mechanism during sequential inactivation of *Staphylococcus aureus* with ultrasound followed by UV/peracetic acid [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 462: 132609.

[44] Sarkinas A, Sakalauskiene K, Raisutis R, et al. Inactivation of some pathogenic bacteria and phytoviruses by ultrasonic treatment [J]. Microbial Pathogenesis, 2018, 123: 144–148.

[45] Piyasena P, Mohareb E, McKellar R C. Inactivation of microbes using ultrasound: a review [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 87(3): 207–216.

[46] 马良军, 王佳媚, 黄明明, 等. 不同处理条件对介质阻挡放电低温等离子体杀菌效果及影响机理研究[J]. 微生物学报, 2019, 59(8): 1512–1521.
Ma Liangjun, Wang Jiamei, Huang Mingming, et al. Sterilization by dielectric barrier discharge low temperature plasma under different treatment conditions [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2019, 59(8): 1512–1521.

[47] Zang Y T, Bing S, Li Y J, et al. Efficacy of slightly acidic electrolyzed water on the microbial safety and shelf life of shelled eggs [J]. Poultry Science, 2019, 98(11): 5932–5939.

[48] 李坤, 张俊磊, 申羽婷, 等. 微酸性电解水和超高压并行联合对三七块茎表面大肠杆菌杀菌效果研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 223–233.
Li Kun, Zhang Junlei, Shen Yuting, et al. Study on synergistic effects of slightly acidic electrolyzed water and ultra-high pressure parallel on *Escherichia coli* on the surface of *Panax notoginseng* tubers [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2025, 16(1): 223–233.

[49] 高晴, 刘培红, 冉苒, 等. 微酸性电解水-超声波并行联合处理对鲜切生菜表面大肠杆菌杀菌效果的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(11): 210–216.
Gao Qing, Liu Peihong, Ran Ran, et al. Bactericidal effect of combined slightly acidic electrolyzed water and ultrasonic treatment against *Escherichia coli* on fresh-cut lettuce [J]. Food Science, 2024, 45(11): 210–216.

[50] Nguyen Huu C, Rai R, Yang Xu, et al. Synergistic inactivation of bacteria based on a combination of low frequency, low-intensity ultrasound and a food grade antioxidant [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 74: 105567.

[51] Li Chen, Yan Han, Feng Wei, et al. Sterilization effect of power airborn ultrasound combined with ultraviolet radiation on bacteria [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 122: 107594.

[52] 宋金鸽, 袁海渡, 章建浩, 等. 低温等离子体协同紫外处理对冰鲜猪肉的保鲜效果[J/OL]. 食品工业科技, 2026-02-02. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080307.
Song Jinge, Yuan Haidu, Zhang Jianhao, et al. Preservation effects of low-temperature plasma combined with UV treatment on chilled pork [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026-02-02. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080307.

[53] 李芹, 吴雨豪, 周建伟, 等. 超声波联合紫外杀菌在椰子水中的应用

[J]. 现代食品科技, 2025, 41(10): 241–252.
Li Qin, Wu Yuhao, Zhou Jianwei, et al. Application of ultrasound combined with ultraviolet sterilization to coconut water [J]. Modern Food Science & Technology, 2025, 41(10): 241–252.

[54] 朱文慧, 谭桂芝, 步营, 等. 低温等离子体耦合微酸性电解水对三文鱼的保鲜作用[J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 228–238.
Zhu Wenhui, Tan Guizhi, Bu Ying, et al. Preservation effect of cold plasma application combination with slightly acidic electrolyzed water on salmon [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(2): 228–238.

[55] 李梦颖, 李建科, 何晓叶, 等. 食品加工中的热杀菌技术和非热杀菌技术[J]. 农产品加工(学刊), 2013(16): 109–113.
Li Mengying, Li Jianke, He Xiaoye, et al. Thermal and non-thermal sterilization technologies in food processing [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2013(16): 109–113.

[56] Sango D M, Abela D, McElhatton A, et al. Assisted ultrasound applications for the production of safe foods [J]. Journal of Applied Microbiology, 2014, 116(5): 1067–1083.

[57] 芦姝羽, 黄现青, 赵梦雨, 等. 光辅助巴氏杀菌对牛乳中金黄色葡萄球菌的杀菌机制及动力学分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(21): 167–175.
Lu Shuyu, Huang Xianqing, Zhao Mengyu, et al. Mechanism and kinetic analysis of light-assisted pasteurization treatment on *Staphylococcus aureus* in milk [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(21): 167–175.

[58] 陈涛, 王华民, 靳学远. 红花籽油/火龙果浆乳液的低温等离子体杀菌及贮藏稳定性[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 119–124.
Chen Tao, Wang Huamin, Jin Xueyuan. Low temperature plasma sterilization and storage stability of safflower seed oil/dragon fruits juice emulsion [J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 119–124.

[59] Zhu Ning, Wang Yanli, Zhu Yue, et al. Design of a treatment chamber for low-voltage pulsed electric field sterilization [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 42: 180–189.

[60] 孙司卉, 范婧, 任丽琨, 等. 非热杀菌新技术在保持食品品质方面的应用趋势[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(6): 961–966.
Sun Sihui, Fan Jing, Ren Likun, et al. Trends in application of the latest non-thermal sterilization technologies in maintaining food quality [J]. Chinese Journal of Food Hygiene , 2023, 35(6): 961–966.

(责任编辑: 安香玉 曹岱琳)