

食源性致病菌的新型灭活技术进展

唐冠宁^{1,2}, 董瑾¹, 刘阳², 张令涛^{3*}

(1. 淄博市检验检测计量研究总院, 山东淄博 255000) (2. 淄博市政府服务中心, 山东淄博 255000)
(3. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122)

摘要:有效控制和灭活食源性致病菌是确保食品微生物安全和消费者健康的重要加工环节。为了改善食品安全问题并延长产品的保质期, 获得更高质量或附加值的产品, 食品工业正在向新兴的热和非热技术转型。这些技术的灭活机制主要通过破坏微生物维持正常生理功能所需的细胞形态和分子结构来实现, 因此明确该作用机理对于技术的工艺优化和应用具有关键意义。本综述概述了几种常见食源性病原体的潜在风险, 着重介绍了几种典型新型技术 - 包括欧姆加热、微波加热、脉冲电场、冷等离子体 - 的应用, 详细阐述了这些技术在细胞和分子水平上的灭活机制, 并指出了目前这些新型技术在食品灭菌加工中存在的问题以及未来发展中将面临的挑战。结论表明, 对热效应和非热效应及其灭活机制的系统分析仍然具有挑战性。虽然不同的食源性病原体在细胞结构、防御和应激机制上有相似之处, 但他们对物理环境的抗性不同。在加工过程中, 很难确定灭活病原体的具体失活靶点。

关键词:食源性致病菌; 新型技术; 热效应; 非热效应; 应用; 灭活机制

文章编号: 1673-9078(2026)4-384-394

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0084

Advances in Novel Inactivation Techniques for Foodborne Pathogens

TANG Guanning^{1,2}, DONG Jin¹, LIU Yang², ZHANG Lingtao^{3*}

(1. Zibo General Research Institute of Inspection and Metrology, Zibo 255000, China) (2. Zibo Government Service Center, Zibo 255000, China) (3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Effective control or inactivation of foodborne pathogens is an important process to ensure product microbiological safety and consumer health. To address food safety issues and extend product shelf-life to obtain high-quality or value-added products, the food industry is adopting emerging thermal and non-thermal technologies. The inactivation mechanism of these technologies is mainly achieved by destroying the cellular morphology and molecular structure required by microorganisms to maintain normal physiological functions. Therefore, clarifying the mechanism of action is important for the process optimization and application of these technologies. This review provides an overview of the potential risks of several common foodborne pathogens, highlights the application of several typical new technologies (ohmic heating, microwave heating, pulsed electric field, cold plasma, etc.), illustrates the inactivation mechanisms of these technologies at the cellular and molecular levels in detail, and indicates the current problems and future challenges of these novel technologies in food sterilization processing. The conclusions suggest that a systematic analysis of thermal and non-thermal effects and their inactivation mechanisms remains a challenge. Although different foodborne pathogens share similarities in cellular structure and defense and stress mechanisms,

引文格式:

唐冠宁,董瑾,刘阳,等.食源性致病菌的新型灭活技术进展[J].现代食品科技,2026,42(4):384-394.

TANG Guanning, DONG Jin, LIU Yang, et al. Advances in novel inactivation techniques for foodborne pathogens [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 384-394.

收稿日期: 2025-01-18; 修回日期: 2025-04-09; 接受日期: 2025-04-15

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX23_2506)

作者简介: 唐冠宁 (1977-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 食品安全检测与监管, E-mail: 1070643846@qq.com

通讯作者: 张令涛 (1996-), 男, 博士研究生, 研究方向: 新型食品加工技术开发及应用, E-mail: ltzhang1119@163.com

they differ in their resistance to the physical environment. It is difficult to identify specific targets for inactivating pathogens during processing.

Key words: foodborne pathogens; novel technology; thermal effect; non-thermal effect; application; inactivation mechanism

食源性致病菌引起的食品污染已成为备受关注的公共卫生问题之一,在世界范围内造成严重的健康危害和巨大的经济损失^[1]。这一问题可能出现在从农田到餐桌的整个食品供应链中的任何环节^[2]。这些致病性病原体包括大肠杆菌 (*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*)、沙门菌 (*Salmonella*)、单增李斯特菌 (*Listeria monocytogenes*) 和蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*) 等。据估计,在世界范围内,因食用受污染或不安全的食品,每年有 6 亿例食源性疾病发生并有 42 万人死亡^[3]。

食品的质量安全与食源性病原体的传播密切相关。因此,确保可接受的微生物失活水平是食品加工中最重要的一环^[4]。目前,传统的热处理仍然广泛应用于商业灭菌。然而,热加工可能会对其它组分或最终产品品质产生负面影响,例如热敏性成分(如维生素 C、酚类)、营养价值、颜色、风味或质地。随着健康观念的转变和对高品质食品需求的增加,消费者愈发青睐天然和最低限度加工的产品^[5,6]。因此,近年来,新型热和非热技术的研究和应用引起了食品学术界和工业界的广泛关注。这些新型技术在保障微生物安全和最少加工之间提供了良好的平衡。然而,大多数研究都是探讨新技术对产品质量、杀菌效果和微生物失活动力学的影响,这些新型加工技术对微生物灭活机制的报道仍然很少。因为灭活机制涉及微生物正常生理状态所需要的细胞形态和分子结构,这对该过程的参数优化和技术应用至关重要。因此,本综述对几种典型的新型热与非热技术进行介绍,并对其在食品灭菌加工中的应用及其灭活机制进行综述,旨在为这些技术的参数优化和工业设计提供有价值的参考。

1 常见食源性病原体的介绍及潜在风险

大肠杆菌为革兰氏阴性杆状菌,可厌氧或好氧生长。在人类和其它动物中,大肠杆菌构成了肠道菌群的一部分,其中大多数无害,但部分致病株可导致腹泻^[7]。根据世界卫生组织的数据,大肠杆菌 O104:H4 的爆发曾给德国造成了 13 亿美元的经济损失^[8]。金黄色葡萄球菌是革兰氏阳性菌的代表,属于葡萄球菌属。金黄色葡萄球菌及其产生的毒素在受污染食品中的传播是诱发食源性疾病的最重要因素之一^[9]。金黄色葡萄球菌和这些毒素能够引起食物中毒或严重疾病^[10]。

美国疾病控制中心估计,每年大约发生 24 万例葡萄球菌引起的食物中毒病例,其原因是食物源中存在细菌或在食品生产、储存或分销过程中处理不当^[11]。沙门菌是一种革兰氏阴性菌,属于肠杆菌科。沙门菌广泛分布在世界各地,能够引起轻微、严重甚至危及生命的感染,已成为食品行业的巨大挑战^[12]。根据欧盟报道,沙门菌病是第二大最常见的胃肠道疾病^[13]。欧洲疾病预防控制中心声称,沙门菌导致了近三分之一的食源性疫情,在 5 146 次报告的疫情中有 48 365 人受到影响^[14]。单核细胞增生李斯特菌是一种普遍存在的杆状革兰氏阳性细菌,属于李斯特菌属,是人类李斯特菌病的主要病原体。在过去的几十年里,李斯特菌病的年发病率在全球范围内呈上升趋势,涉及的食品污染包括乳制品、肉类、蔬菜、海鲜和农产品^[15]。美国疾病控制与预防中心报告称,从 2010 年到 2020 年,美国发生了 20 起李斯特菌病暴发^[16]。蜡样芽孢杆菌是一种杆状、产孢子的革兰氏阳性细菌,通常以芽孢杆菌属的食物致病性而闻名^[17]。蜡样芽孢杆菌可以在恶劣的环境中生存,如在广泛的 pH 和温度范围内保持耐受性,这主要是由于其形成内生孢子的能力以及其在自然界中的广泛存在,这使得防止蜡样芽孢杆菌引起的食品污染非常具有挑战性^[18]。这些研究或统计表明,食源性致病菌在食品中的感染已对人类安全和公共卫生构成严重威胁,其引起的食品安全问题亟待持续关注。

2 新型热技术的介绍、应用及灭活机制

2.1 欧姆加热

欧姆加热 (Ohmic Heating, OH) 被定义为电流流经物料时,其内部因电阻而产生热量的过程,也称为电阻加热或焦耳加热^[19]。OH 作为一种新型体积加热技术,其加热速率快而均匀。传统热技术依靠温度梯度将热量传递到物料内部,常导致表面温度高于内部温度,从而降低了传热速率。尤其是对于颗粒状和粘稠物料,传统传热方式难以实现高效的传热。鉴于体积加热能有效地解决这些问题,近年来 OH 在各种食品加工应用中的潜力得到了深入探索^[20]。这些应用涵盖了巴氏杀菌、灭菌和酶失活环节,涉及乳制品、水果和蔬菜等领域。OH 的几种典型的应用如表 1 所示,这些研究证实了 OH 在食品加工中的应用前景^[21-24]。

OH 的灭活机制被认为与常规热处理相似, OH 过程中微生物可能的灭活机制如图 1 所示。然而, 近年来已报道了其非热效应的存在。Tian 等^[25]发现, 与水浴加热(WB)相比, OH 处理的大肠杆菌 O157:H7 细胞膜表现出更多的孔洞或褶皱, 这归因于额外的非热效应。膜完整性和胞内物质的渗漏被认为与膜形态的变化密切相关, 是评估灭活机制最常用的参数之一。在该研究中, 离子、核酸、蛋白等物质的泄露与膜形态的变化一致。另一项研究讨论了 OH 处理对枯草芽孢杆菌内生孢子灭活的机制^[26]。结果表明, 电场的作用靶点主要在孢子的核心, 而不是孢子的外壳和孢子的皮层裂解酶 SleB。外加电场引起的孢子核变化增加了一些孢子核成分对热的敏感性, 这也证明了电场效应和热效应的协同对 OH 杀菌效果至关重要。此外, 具有代谢活性的细菌具有动态和正常的膜电位对其生理至关重要, 膜电位的变化可以从另一个角度说明灭活机制。Cho 等^[27]报道, 在脉冲 OH 处理豆腐中的病原体时, 高电压导致跨膜电位显著去极化。值得注意的是, 革兰氏阳性菌(单核增生乳杆菌)的膜电位变化明显弱于革兰氏阴性菌(大肠杆菌 O157:H7 和鼠伤寒沙门菌), 这可能是由于革兰氏阳性菌对电场的抵抗力更强, 质膜外的厚肽聚糖层使得细菌能够承受热效应引起的膜损伤以及外电场引起的膜电位扰动。关于微生物在 OH 作用下的分子灭活机制的报道相对较

少。一般来说, 食源性病原体对环境胁迫的分子响应受到多个水平的调控, 包括 DNA、RNA、蛋白质功能和代谢水平的调控。先前研究表明, 热处理通过诱导膜、细胞质、核糖体和 DNA 的改变, 特别是蛋白质的错误折叠和聚集, 使大肠杆菌失活^[28]。在热环境胁迫下, 大肠杆菌细胞的抗性系统受热反应基因的调控, 如 sigma E、热休克蛋白和 EvgA 来抵抗这些变化, 随后错误折叠的蛋白质被重新折叠以抵抗热应激。Tian 等^[29]发现 WB 和 OH 处理后, 与脂质代谢相关的主要功能基因均出现上调。这种现象可能与高温作用下细胞膜结构的重塑有关。而参与氨基酸代谢的代谢物下调, 一方面可能是大肠杆菌细胞合成更多的分子伴侣来调节代谢, 从而在环境胁迫下生存。另一方面, 这可能是由于在热休克反应中缺乏 ATP, 而 ATP 是氨基酸合成所需的能量来源^[30]。与 OH 处理下大肠杆菌的结果一致, 氨基酸代谢物和脂质代谢物是金黄色葡萄球菌细胞的主要差异代谢物^[31]。Tian 等^[32]还比较了 OH (10 V·cm⁻¹ 和 5 V·cm⁻¹) 和 WB 处理在相同失活水平下的大肠杆菌蛋白质组变化。与未处理的样品相比, 不同处理下表现出显著的丰度差异。京都基因与基因组百科(KEGG)分析表明, 氨基酸生物合成、乙酸盐和二羧酸盐代谢、甘油磷脂代谢、ABC 转运体和核糖体途径是 OH 处理介导的主要生物途径, 而 WB 处理的主要途径只有核糖体。

表 1 OH和MH在食品巴氏杀菌和质量改进中的典型应用

Table 1 Typical applications of OH and MH in food pasteurization and quality improvement					
处理方式	样品名称	处理参数	主要发现	缺点与不足	参考文献
欧姆加热	甘蔗汁	30~7.8 V·cm ⁻¹ , 60 Hz	总酚含量与新鲜果汁相似; 没有额外的非热效应	颜色感官的轻微差异	[21]
	牛奶	4、8 和 12 V·cm ⁻¹ , 72~75 °C 处理 15 s	对生物活性化合物、功能和流变特性的积极影响; 更高的感官接受度	对脂肪酸产生负面影响	[22]
	哈密瓜汁	100 和 200 V, 110 s	与传统加热相比, 失活速度快, 持续时间短; β-胡萝卜素和酚类化合物保留率高	维生素 C 的保留率低	[23]
	真空包装香肠	230 或 180 V 处理 30 s, 50 Hz	缩短处理时间, 没有改变香肠的化学和感官特性	颜色和质地略有变化	[24]
微波加热	橙汁牛奶饮料	65 和 75 °C 处理 5、30、60 s	褐变指数较低, 活性物质含量较高; 具有较高的抗糖尿病和抗高血压特性	抗坏血酸含量降低; 较长的加工时间降低了类胡萝卜素的含量	[33]
	蔬菜	700 W 处理 0、3、4 或 5 min	消耗的热能少; 改善感官品质, 包括口感、质地、风味和颜色	微波开启后, 失活效果并没有一直增加	[34]
	模型液体: 蒸馏水	70~3 000 W, 2 450 MHz	几何结构参数对流体加热效率有影响; 微波波长和螺杆螺距影响微波能量的利用	非均匀流体加热; 非均匀电磁场分布	[35]
	豆浆	200~300 W, 2 450 MHz	胰蛋白酶抑制剂失活需要相当长的处理时间; 脂氧合酶失活可用二级动力学描述	没有证据表明微波对酶有非热效应	[6]

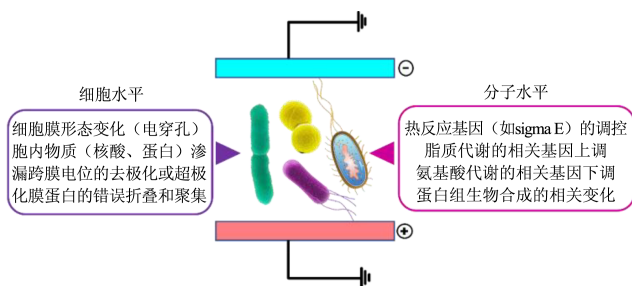


图1 OH处理过程中微生物可能的灭活机制

Fig.1 Possible mechanism of microbial inactivation during

OH treatment

2.2 微波加热

微波是指波长短(1 m~1 mm)、频率高(300 MHz~300 GHz)的电磁波。微波加热(Microwave Heating, MH)技术是利用物料吸收微波能量并将其转化为热量,从而实现物料的整体加热^[36]。与传统加热方式不同,MH是通过受热体内部偶极子分子的高频往复运动,产生“内摩擦热”,促使物料温度迅速上升^[37]。近年来,MH已广泛应用于食品加工,如干燥、烘焙、冷冻、巴氏灭菌和食品保存^[38,39]。表1列举了牛奶、果汁和各种食品的采用微波杀菌具体实例^[6,33-35]。微波杀菌因其加热速度快、加工周期短、操作成本低廉而备受食品加工行业的青睐。尽管MH有诸多优势,但其商业普及仍面临的挑战是温度分布的不均匀性,这可能导致产品加工不足或过热。因此,应加强温控研究,以尽量减少对食品质量和安全的潜在影响。

在MH过程中,绝大部分微波能量被物料吸收并转化为热能,一部分能量被传输,一部分能量被反射^[40]。食品材料的MH主要通过离子传导和偶极子旋转机制实现^[41]。极性分子作为食品物料介电特性的核心载体,其偶极子对交变电磁场的动态响应机制直接决定了微波与物质的相互作用模式。在微生物灭活领域,学界普遍认同微波存在热效应与非热效应的双重机制:前者通过分子摩擦产热实现病原体灭活,该机制已形成完善的理论体系;而后者主张电磁场可直接破坏微生物细胞结构而不依赖温升,这一假说至今仍然存在争议。非热效应可能源于电磁场与食物中特定分子的直接相互作用,其与宏观热效应无关^[42]。值得关注的是,近年同步升温 and 低温冷却的对比实验已经被尝试用来验证非热效应的存在。例如,Shamis等^[43]通过细胞活力实验证明,低于40℃的微波处理对微生物无杀菌效果。然而,扫描电镜分析表明大肠杆菌暴露在微波下的细胞形态与常规加热到40℃的细胞形态有明显不同,这暗示了特定非热效应的存在。因此,MH的灭活机制可以根据细胞损伤的不同程度或类型来解

释^[44]。在细胞水平上,Nguyen等^[45]发现微波诱导的振动可导致细胞膜通透性的改变,这归因于高频振动对膜的机械刺激,进而引发细胞质液的渗漏。Kuznetsov等^[46]证明微波作用于生物体的机制是动态的,生物聚合物表面吸附相的结构转变影响了细胞膜中离子的运输。同样,MH处理通过破坏细胞膜完整性和增加细胞膜通透性来诱导蜡样芽孢杆菌核染色质和蛋白质渗漏^[47]。MH处理在一定条件下可引起细胞可逆或不可逆损伤,最终导致细胞死亡。

细胞内活性氧(ROS)的激活被认为是导致微生物失活的目标之一,其是通过降低抗氧化机制,如谷胱甘肽(GSH)水平而实现的。Shaw等^[48]发现,脉冲MH处理增加了大肠杆菌和金黄色葡萄球菌细胞内ROS水平,并显著降低了GSH水平。微波诱导的ROS产生直接导致GSH水平下降,这对两种病原体都造成了致命损害。此外,暴露于脉冲MH的大肠杆菌中氧化应激基因的表达水平下降,导致DNA损伤,这表明微波诱导的氧化应激介导的DNA损伤也可能是其失活的分子机制之一。Ruediger等^[49]发现弱电磁场的能量不足以破坏DNA中的化学键,这表明遗传毒性效应可能是通过间接机制介导的,如微热过程、氧自由基的产生以及干扰DNA修复过程。综上所述,当前研究虽初步阐明微波非热效应的若干分子路径,但对电磁生物效应中“能量阈值-生物响应”的定量映射关系仍缺乏系统认知,进一步研究微波效应的相关机制对实现MH技术在食品工业中的精准灭菌具有重要意义。

2.3 脉冲电场

脉冲电场(Pulsed Electric Field, PEF)是一种新型的非热加工技术,它利用高电场强度、短脉冲宽度和高脉冲频率,对放置在两个电极之间的液体或半固体样品实施间歇或连续流处理^[50]。特别是,PEF在低温下灭活食源性病原体的潜力使其作为食品工业的非热巴氏杀菌工艺极具吸引力^[51]。近数十年来,大量研究聚焦于PEF巴氏灭菌方法的应用,旨在确定其有效性及与传统热巴氏灭菌方法的等效性。这些研究涵盖PEF处理对微生物失活、产品保质期以及产品理化和营养属性的影响。表2总结了PEF技术在食品巴氏杀菌中的几个典型应用实例^[52-55]。这些案例证实了PEF的非热效应在延长产品保质期、保持产品新鲜度、改善色泽和风味等方面的优势。

普遍认为,PEF的灭活机制是基于细胞膜的电穿孔现象^[56]。该机制可描述为外电场诱导跨膜电位上升,形成亚稳态的亲水微孔,随后改变这些微孔的大小或

数量（消失或产生），从而影响细胞内容物的泄漏，破坏细胞稳态等。相较于酿酒酵母，大肠杆菌表现出更强的 PEF 抗性，而后者在 PEF 处理后细胞表面出现更明显的形态变化，导致细胞内蛋白质和核酸渗漏，膜通透性改变^[57]。已有研究人员探索了金黄色葡萄球菌释放的多种细胞内化合物，如离子、RNA 和蛋白质，以及它们与细胞失活水平、膜修复和孔重封装能力的关联^[58]。虽然其它研究证实了蛋白质和核酸分子的释放率高达 90%，但该研究发现小分子（如 K⁺、Mg²⁺）的泄漏率更高，这意味着小分子的释放是瞬间的，而大分子的释放是一个渐进的过程。PEF 对金黄色葡萄球菌的灭活机制可能与分子量大于 6 KDa 的蛋白的释放有关，而这主要取决于处理时间而非电场强度。另一项研究表明，细胞内 Ca²⁺ 浓度的升高可能是大肠杆菌 ATCC 8099 失活的一个关键因素，这主要是由于 Ca²⁺ 信号阻滞剂通过抑制细胞内 Ca²⁺ 浓度的升高来防止细胞凋亡^[59]。这些结果支持了“电穿孔或膜渗透”的假设，而膜损伤的程度及其与细胞死亡的关系还取决于其它因素，如脉冲持续时间和脉冲幅度。图 2 为电穿孔、电渗透和死细胞比例随脉冲持续时间和电场强度变化的示意图^[56]。因此，阐明 PEF 治疗后发生的

致死性行为、亚致死性损伤和非致死性可逆渗透性之间的联系至关重要。在分子机制方面，PEF 处理下大肠杆菌 MG1655 的转录组学分析表明，上调基因主要包括细胞色素氧化酶基因和琥珀酸脱氢酶基因^[60]。细胞色素氧化酶是产生质子动力的必需基因，琥珀酸脱氢酶参与三羧酸（TCA）循环和呼吸电子传递链，表明细胞质膜相关成分和功能的响应被激活。下调基因主要参与氨基酸的生物合成和代谢过程。Liu 等^[61]研究了 PEF 处理下大肠杆菌细胞的蛋白质组学反应，功能分析表明这些蛋白主要参与调控细胞膜完整性、各种代谢过程和应激反应。值得注意的是，上调最多的蛋白质主要是与 TCA 循环相关的几种酶，这与转录组分析中涉及 TCA 循环的基因表达上调的发现一致。TCA 循环发生在脂肪酸 β -氧化的下游，并在功能上与其相关。在 PEF 引起的细胞应激下，脂质过氧化被认为是一种公认的现象。此外，PEF 处理可诱导鼠伤寒沙门菌氧化损伤，降低其膜流动性，上调细胞色素氧化酶基因（cyoA、cyoB 和 cyoC）的表达，这与减轻氧化损伤的修复机制有关^[62]。上述发现深化了对 PEF 诱导微生物失活机制的理论认知，假设的 PEF 灭活机制如图 3 所示。

表 2 PEF和CP在食品巴氏杀菌和质量改进中的典型应用

Table 2 Typical applications of PEF and CP in food pasteurization and quality improvement					
处理方式	样品名称	处理参数	主要发现	缺点与不足	参考文献
脉冲电场	羊奶	20、25、30、35 和 40 kV·cm ⁻¹ ，5、7、10 和 13 μ s	保留维生素 A（ β -胡萝卜素）和 b 族维生素（硫胺素、烟酸等）；大肠杆菌的最大对数减少量为 3.87 log CFU/mL	失活水平未达到 USFDA 推荐的最低减少量	[52]
	释迦果	25、50、100 kV·cm ⁻¹ ，600 μ s 和 278 Hz 处理 30 min	抑制褐变长达 18 d；减少 27% 的硬度损失和组织软化；延迟成熟相关的变化	过度的 PEF 处理引起氧化应激	[53]
	猕猴桃-胡萝卜汁	22.22~55.56 kV·cm ⁻¹ 处理 2 400~4 800 μ s.	抗坏血酸和酚类化合物的变化较低；改善了果汁的浑浊度	仅 43.03% 的 PME 失活	[54]
	母乳	15 kV，6 000 pulses，20 Hz or 50 Hz	溶菌酶、乳铁蛋白、免疫球蛋白的保留率较高	失活效果低于超高温	[55]
等离子体	母羊奶	70 V 处理 120 s	消除羊奶膻味，改善羊奶风味	可能产生不良的挥发性风味化合物	[63]
	牛奶	40~80 V，15~120 s，2 $\pm$ 0.2 A	降低了牛奶的胶束大小；改变了它们的结构性质和理化指标（颜色、粘度、pH 值等）	高强度 CP 处理的样品过氧化值较高	[64]
	蜂花粉	40、50、60 kV 处理 2、4、6 或 10 min	促进蜂花粉中酚类化合物的释放，影响其抗氧化活性	诱导氧化应激和损伤，尤其是脂质氧化	[65]
	苹果酒	20 kV 点火电压和 2 kV 弧降电压	导致大肠杆菌数量减少 5 倍；果汁性质的仅有微小变化（白度、pH 值或可滴定酸度）	在处理后的样品中检测到臭氧和过氧化氢	[66]

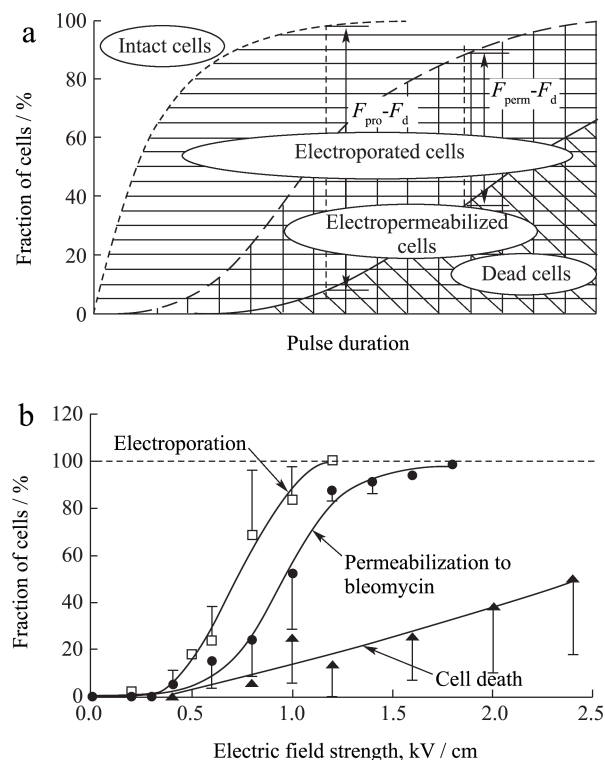


图2 PEF处理过程中电穿孔 (F_{por})、电渗透 (F_{perm}) 和死细胞 (F_d) 的比例对脉冲持续时间和电场强度的依赖性示意图

Fig.2 Schematic diagram of dependence of the ratio of electroporation (F_{por}), electroporation (F_{perm}), and dead cells (F_d) on pulse duration and electric field intensity during PEF treatment

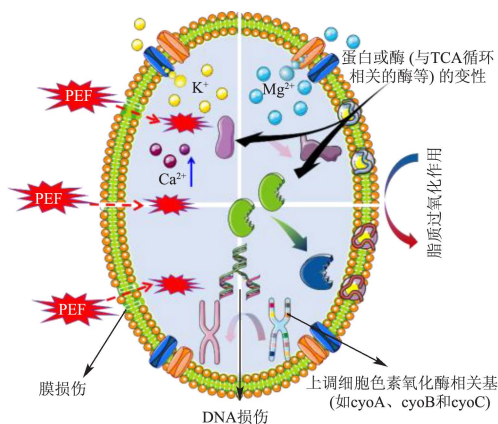


图3 PEF处理过程中微生物可能的灭活机制

Fig.3 Possible mechanism of microbial inactivation during PEF treatment

2.4 低温等离子体

等离子体常被认为是固体、液体和气体之外的第四种物质状态，它是一种部分或完全电离的气体混合物，包括电子、离子、自由基、原子、分子和光子等

活性物质^[67]。冷等离子体 (Cold Plasma, CP) 可以通过在两个电极间引入载气 (如空气、氧气、氦气或氮气) 来实现^[68]。多年来，CP 处理一直被认为是保持农产品质量同时灭活微生物的有效技术手段。该技术具有许多优点，包括高效灭菌、加工时间短、能耗低以及改善食品的物理化学或功能特性^[69]。表2列举了CP技术在微生物灭活和产品质量提升方面的典型应用^[63-66]。然而，作为一种新型的非热技术，它仍然面临若干挑战，例如体积大和不规则食品的不完全灭菌、等离子体与食品成分相互作用的安全性、高脂乳制品中活性氧诱导氧化的形成等问题^[70,71]。因此，深入了解CP的失活机理有利于加速技术成熟，为其商业化应用奠定基础。

CP 处理对食源性病原体的失活作用涉及多种机制，包括活性物质、带电粒子、紫外线辐射以及臭氧与细胞成分的相互作用。Gan 等^[72]发现 CP 处理后产生的 ROS 攻击细胞包膜和 / 或细胞内成分，ROS 可同时攻击微生物细胞被膜的磷脂双分子层与胞内核酸-蛋白质复合体。与这些发现一致，Han 等^[73]认为革兰氏阴性菌的细胞包膜是 ROS 的主要靶点，而革兰氏阳性菌的胞内成分是 ROS 的主要部位。在革兰氏阴性菌中，ROS 与细胞成分的相互作用会破坏细胞包膜，并对细胞内物质 DNA 等造成损伤。相反，在革兰氏阳性细菌中，发现 ROS 直接破坏细胞内成分，而无需穿透细胞，这也揭示了菌体结构差异导致的 ROS 作用路径分异。CP 对沙门菌细胞膜的损伤主要表现为细胞膜的脂质过氧化^[74]。除了膜结构外，CP 处理还会对关键代谢酶或相关蛋白产生负面影响，导致致病菌失活。例如，CP 处理可诱导大肠杆菌中的膜蛋白 YgaP 和胞内蛋白 Swc7 过表达，导致二级和三级结构发生变化^[75]。值得注意的是，膜蛋白 YgaP 比胞内蛋白 Swc7 对 CP 处理更敏感，Swc7 诱导的膜蛋白修饰是大肠杆菌致死的决定性因素。Ranjbar 等^[76]研究了 CP 诱导的氧化应激对糖酵解代谢产物的影响，发现细菌在氧化应激下会激活抗氧化机制，表现为 NAD 转氢酶、葡萄糖氧化酶和富马酸还原酶的表达增加。此外，Fu 等^[77]通过评估肠链球菌和单核增生乳杆菌的呼吸酶活性，揭示了 CP 处理的灭活机制。CP 处理对两种病原菌的呼吸酶均有显著的抑制作用，其中己糖激酶和琥珀酸脱氢酶分别与单核增生乳杆菌和肠炎链球菌的生长密切相关，这表明破坏正常有氧呼吸引起的细胞死亡是 CP 灭活机制的重要组成部分。然而，由于涉及细胞和分子水平的复杂机制，目前很难确定哪种机制在灭活过程中起主导作用，但这些机制的协同效应可用于描述 CP 处理的潜在作用机制^[78]。

3 其它新型热与非热技术的介绍、应用及灭活机制

其它热技术包括射频加热和红外加热等。射频加热是一种功能强大的介质加热技术，类似于微波加热^[79]。两种技术的区别在于频率范围和电磁频谱区域。射频加热的原理是频率为 1~300 MHz 的电磁波通过离子极化或偶极子旋转产生热量^[80]。其优点是穿透深度高，可对生物大分子进行定向加热。红外是波长范围为 0.78~1 000 μm 的电磁波谱，介于紫外线和微波之间。加热原理是食物中的原子或分子吸收的红外能量引起振动状态或旋转运动^[81]。不同于射频加热和微波加热，红外线的低穿透意味着只能表面加热。其它新型非热技术包括紫外线照射、超声处理、超高压处理等。紫外线辐射是指利用 100~400 nm 范围内的紫外线作用于食品，可分为 UV-A (320~400 nm)、UV-B (280~320 nm) 和 UV-C (200~280 nm)^[82]。其中 UV-C 被认为对微生物具备有效的杀伤作用，在食品加工中常用。美国食品和药物管理局已批准 UV-C 辐射用于果汁的巴氏杀菌，主要是因为该波段具有独特的杀菌特性^[83]。超声作为一种很有前途的保存技术，可分为低强度超声 (20~100 kHz) 和高强度超声 (5~10 MHz)，功率为 10~1 000 $\text{W}(\text{cm}^2)^{-1}$ ，原理是超声波在液体介质中产生压力和温度梯度，从而产生微气泡；微泡与液体分子之间的机械冲击会破坏微生物细胞^[84]。超高压通常指的是高静水压，其在 400~600 MPa 下可以有效地灭活大多数致病菌。在此过程中，超高压的杀菌效果是直接或间接压缩的结果，而热效应极低。

基于以往的研究，射频加热的灭活机制仍被认为是热效应^[85]。这种热效应机制是基于微生物细胞的产热速率比其它介质更快这一事实；然后以较低的升温

速率对细胞进行热破坏^[86]。这是因为射频的能量可以被微生物中的蛋白质和 DNA 直接吸收并转化为热量，从而导致不良的细胞结构变化或分子功能障碍。例如，Cui 等^[87]观察到，射频处理与传统热处理类似，对细胞的结构变化和致死率没有非热效应。然而，两种处理在分子水平上的基因表达略有不同。微生物在红外加热、紫外线 (DNA 损伤) 和微波加热下的灭活机制可能还需要考虑非热效应^[81]。紫外线辐射的杀菌机制是由于微生物 DNA 和 RNA 吸收紫外线光子的倾向以及 DNA 和 RNA 中嘧啶分子的二聚化。紫外线辐射也会导致 DNA 螺旋结构扭曲^[82]。这种变化会导致核酸复制的紊乱，最终引发微生物的死亡。另一方面，超声处理的杀菌机制主要是空化效应^[88]。超声处理过程中，温度和压力梯度作用下的空化气泡产生微流和剪切应力，导致细胞膜破裂和细胞基质挤压，导致细胞解体。超声过程中由空化效应引起的机械冲击和通过水分子产生自由基也是诱导致病菌失活的机制之一。超高压的灭活机制是高压破坏微生物细胞中蛋白质、核酸和脂质的非共价键，诱导细胞膜损伤和蛋白质变性^[89]。Mok 等^[90]证明超高压处理机械破坏枯草芽孢杆菌孢子的孢子外壳 (内外膜)，增加了其对溶菌酶和 H_2O_2 的敏感性，导致孢子外壳中的二硫键被破坏。此外，高压会抑制蛋白质合成和微生物核糖体的变化。超高压的低温处理过程及其对共价键的轻微影响有助于在此处理后的食品中保留营养和生物活性成分。表 3 和表 4 对比并总结了热与非热技术的灭活机制以及关键特点的异同点，结果表明热技术以热效应为主，但 OH 和 MH 存在非热效应 (电场 / 振动) 的辅助增强作用；非热技术通过物理或化学途径直接破坏细胞结构，分子机制涉及氧化应激、代谢通路调控；协同效应普遍存在 (如 OH 的热 - 电场、CP 的 ROS- 紫外线)，需通过参数优化实现高效低损处理。

表 3 热与非热技术的灭活机制和关键特点对比			
Table 3 Comparison of inactivation mechanisms and key characteristics of thermal and non-thermal technologies			
技术分类	技术名称	灭活机制	关键特点
热技术	欧姆加热 (OH)	热效应: 电阻产热使蛋白质变性、膜损伤 非热效应: 电场诱导膜电位去极化、细胞膜穿孔、核成分敏感性增强	体积加热均匀快速, 电场与热协同作用
	微波加热 (MH)	热效应: 偶极子摩擦产热导致蛋白质聚集 非热效应: 高频振动改变膜通透性, ROS 诱导氧化损伤 (DNA 断裂、GSH 水平下降)	穿透性加热, 但温度分布不均; 热与非热效应共存争议
	射频加热	纯热效应: 离子极化产热导致蛋白质 /DNA 变性	穿透深度高, 无明确非热效应证据
非热技术	脉冲电场 (PEF)	非热主导: 电穿孔导致膜通透性改变, 胞内物质泄漏 分子机制: TCA 循环基因上调、氨基酸代谢基因下调, 氧化损伤	低温处理保留营养, 膜损伤程度依赖电场强度与脉冲时间
	低温等离子体 (CP)	非热主导: ROS/RNS 攻击细胞膜 (脂质过氧化)、破坏酶活性 协同机制: 紫外线辐射破坏 DNA、带电粒子干扰代谢	多机制协同 (活性物质 + 物理效应), 革兰氏菌作用靶点差异
	紫外线	非热主导: DNA 嘧啶二聚化阻断复制	仅表面处理, 依赖波长与剂量
	超声	非热主导: 空化效应机械破坏细胞膜, 自由基氧化损伤	需液体介质, 参数敏感性高
	超高压	非热主导: 破坏非共价键 (膜结构、蛋白质构象)	低温保留营养, 对孢子效果有限

表 4 热与非热灭活技术的核心机制对比分析

Table 4 Comparative analysis of the core mechanisms of thermal and non-thermal inactivation technologies		
维度	热技术（OH/MH）	非热技术（PEF/CP）
能量来源	外部热能输入（电阻产热 / 电磁波产热）	非热能形式（电场 / 等离子体活性物质）
主要靶点	蛋白质变性、膜受热损伤	膜结构破坏（电穿孔 / 氧化）、遗传物质损伤
分子响应	热休克蛋白上调、脂质代谢重组	TCA 循环基因激活、抗氧化系统抑制
温度依赖	灭活效果与温度正相关	低温下仍有效，可能伴随微弱升温
菌种差异性	革兰氏阳性菌（厚肽聚糖层）更耐热	革兰氏阴性菌（薄外膜）对电场 / 氧化更敏感
协同效应	OH 中电场增强热敏感性，MH 中热与电磁振动协同	PEF 中电渗透与化学损伤协同，CP 中 ROS 与紫外线协同

4 展望与挑战

近年来，依托尖端科技的新型食品加工技术不断涌现，旨在延长产品的保质期，并在不影响营养成分和感官特性的前提下解决生产力难题，并提升生产效率。尽管这些技术已取得显著进展，但在实际食品应用和大规模工业实施方面仍面临诸多挑战。限制其商业化的主要因素包括高昂的投资成本、缺乏必要的监管批准以及工艺参数控制的不确定性。此外，不同国家或地区对这些新技术的接受程度也存在差异。例如，脉冲电场和冷等离子体在欧洲比较流行，而微波加热在世界范围内具有重要的商业价值。对于新型热加工技术而言，深入解析食品成分中的传热模式以及非热效应与热效应之间的协同灭活机制仍是一项艰巨任务。尽管这些技术在灭菌效果和质量改善方面展现出较大的工业应用潜力，但仍存在一些问题需要解决，例如欧姆加热中的电极腐蚀和化学污染，微波加热的传热不均等。对于新的非热技术，更需全面评估设备的安全性能和产品的保质期，因为非热效应下致病菌的亚致死损伤是常见的。因此，有必要对这些非热技术的灭活机制进行建模和系统评估，从而为后续灭菌工艺及其他相关应用的优化设计提供坚实的理论依据。

参考文献

[1] 周道荣,刘师,杨继梅.浅析食品微生物污染防控新策略与技术创新[J].现代食品,2024,30(8):145-147.

[2] 戈永慧.食源性疾病防控现状及对策[J].食品安全导刊,2024, 12:30-33.

[3] LEE H, YOON Y. Etiological agents implicated in foodborne illness world wide [J]. Food Science of Animal Resources, 2021, 41(1): 1-7.

[4] BIRANJIA-HURDOYAL S, LATOUCHE M C. Factors affecting microbial load and profile of potential pathogens and food spoilage bacteria from household kitchen tables [J]. The Canadian Journal of Infectious Diseases, 2016, 2016: 3574149.

[5] PAN Y, SUN D, HAN Z. Applications of electromagnetic fields for nonthermal inactivation of microorganisms in foods: An overview [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 13-22.

[6] KUBO M T K, DOS REIS B H G, SATO L N I, et al. Microwave and conventional thermal processing of soymilk: Inactivation kinetics of lipoxygenase and trypsin inhibitors activity [J]. LWT, 2021, 145: 111275.

[7] CROXEN M A, LAW R J, SCHOLZ R, et al. Recent advances in understanding enteric pathogenic *Escherichia coli* [J]. Clinical Microbiology Reviews, 2013, 26(4): 822-880.

[8] YANG S, LIN C, ALJUFFALI I A, et al. Current pathogenic *Escherichia coli* foodborne outbreak cases and therapy development [J]. Archives of Microbiology, 2017, 199(6): 811-825.

[9] KRONING I S, IGLESIAS M A, SEHN C P, et al. *Staphylococcus aureus* isolated from handmade sweets: Biofilm formation, enterotoxigenicity and antimicrobial resistance [J]. Food Microbiology, 2016, 58: 105-111.

[10] ONICIUC E, ARIZA-MIGUEL J, BOLOCAN A, et al. Foods from black market at EU border as a neglected route of potential methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* transmission [J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 209: 34-38.

[11] KOTZEKIDOU P. Microbiological examination of ready-to-eat foods and ready-to-bake frozen pastries from university canteens [J]. Food Microbiology, 2013, 34(2): 337-343.

[12] BAJPAI V K, BAEK K, KANG S C. Control of Salmonella in foods by using essential oils: A review [J]. Food Research International, 2012, 45(2): 722-734.

[13] EHUWA O, JAISWAL A K, JAISWAL S. Salmonella, food safety and food handling practices [J]. Foods, 2021, 10(5): 907.

[14] ECDC. Salmonella the Most Common Cause of Foodborne Outbreaks in the European Union [R]. European Centre for Disease Prevention and Control, 2019-12-12. <https://www.efsa.europa.eu/en/news/salmonella-most-common-cause-foodborne-outbreaks-european-union#related-topics>

[15] GELBÍČOVÁ T, ZOBANÍKOVÁ M, TOMÁŠTÍKOVÁ Z, et al. An outbreak of listeriosis linked to turkey meat products in the Czech Republic, 2012–2016 [J]. Epidemiology and Infection, 2018, 146(11): 1407-1412.

[16] CDC. List of selected multistate foodborne outbreak investigations [R]. Centers for Disease Control and Prevention, 2020. <https://www.cdc.gov/foodsafety/outbreaks/multistate-outbreaks/outbreaks-list.html>.

[17] SOLEIMANI M, HOSSEINI H, PILEVAR Z, et al. Prevalence, molecular identification and characterization of *Bacillus cereus* isolated from beef burgers [J]. Journal of Food Safety, 2018, 38(1): e12414.

[18] RAHNAMA H, AZARI R, YOUSEFI M H, et al. A systematic review

- and meta-analysis of the prevalence of *Bacillus cereus* in foods [J]. Food Control, 2023, 143: 109250.
- [19] MAKROO H A, RASTOGI N K, SRIVASTAVA B. Ohmic heating assisted inactivation of enzymes and microorganisms in foods: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 451-465.
- [20] JAFARPOUR D, HASHEMI S M B. Ohmic heating application in food processing: Recent achievements and perspectives [J]. Foods and Raw Materials, 2022, 10(2): 216-223.
- [21] RODRIGUES N P, BROCHIER B, DE MEDEIROS J K, et al. Phenolic profile of sugarcane juice: Effects of harvest season and processing by ohmic heating and ultrasound [J]. Food Chemistry, 2021, 347: 129058.
- [22] ROCHA R S, SILVA R, GUIMARÃES J T, et al. Possibilities for using ohmic heating in Minas Frescal cheese production [J]. Food Research International, 2020, 131: 109027.
- [23] HASHEMI S M B, GHOLAMHOSSEINPOUR A, NIAKOUSARI M. Application of microwave and ohmic heating for pasteurization of cantaloupe juice: microbial inactivation and chemical properties [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(9): 4276-4286.
- [24] INMANEE P, KAMONPATANA P, PIRAK T. Ohmic heating effects on *Listeria monocytogenes* inactivation, and chemical, physical, and sensory characteristic alterations for vacuum packaged sausage during post pasteurization [J]. LWT, 2019, 108: 183-189.
- [25] TIAN X, SHAO L, YU Q, et al. Evaluation of structural changes and intracellular substance leakage of *Escherichia coli* O157:H7 induced by ohmic heating [J]. Journal of Applied Microbiology, 2019, 127(5): 1430-1441.
- [26] SCHOTTROFF F, PYATKOVSKYY T, REINEKE K, et al. Mechanisms of enhanced bacterial endospore inactivation during sterilization by ohmic heating [J]. Bioelectrochemistry, 2019, 130: 107338.
- [27] CHO E, KIM S, KANG D. Inactivation kinetics and membrane potential of pathogens in soybean curd subjected to pulsed ohmic heating depending on applied voltage and duty ratio [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2020, 86(14): e620-e656.
- [28] MORGAN G J, BURKHARDT D H, KELLY J W, et al. Translation efficiency is maintained at elevated temperature in *Escherichia coli* [J]. Journal of Biological Chemistry, 2018, 293(3): 777-793.
- [29] TIAN X, YU Q, YAO D, et al. New insights into the response of metabolome of *Escherichia coli* O157:H7 to ohmic heating [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1-12.
- [30] LI S, HU X, ZHAO H, et al. Quantitative analysis of cellular proteome alterations of *Pseudomonas putida* to naphthalene-induced stress [J]. Biotechnology Letters, 2015, 37(8): 1645-1654.
- [31] SHAO L, LIU Y, ZHAO Y, et al. Integrated transcriptomic and metabolomic analysis of the global response of *Staphylococcus aureus* to ohmic heating [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2021, 74(17): 102870.
- [32] TIAN X, YU Q, WU W, et al. International journal of food microbiology comparative proteomic analysis of *Escherichia coli* O157:H7 following ohmic and water bath heating by capillary-HPLC-MS/MS [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 285(17): 42-49.
- [33] MARTINS C P C, CAVALCANTI R N, ROCHA R S, et al. Microwave heating impacts positively on the physical properties of orange juice-milk beverage [J]. International Journal of Dairy Technology, 2022, 75(1): 129-138.
- [34] CHO W, CHUNG M. Improving the quality of vegetable foodstuffs by microwave inactivation [J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29(1): 85-91.
- [35] ZHANG Y, YANG H, YAN B, et al. Continuous flow microwave system with helical tubes for liquid food heating [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 294: 110409.
- [36] 郑先哲,张雨涵,刘成海,等.微波技术在食品和农产品加工中应用研究进展[J].农业工程学报,2024,40(6):14-28.
- [37] SALAZAR-GONZÁLEZ C, SAN MARTÍN-GONZÁLEZ M F, LÓPEZ-MALO A, et al. Recent studies related to microwave processing of fluid foods [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(1): 31-46.
- [38] VALERO A, CEJUDO M, GARCÍA-GIMENO R M. Inactivation kinetics for *Salmonella enteritidis* in potato omelet using microwave heating treatments [J]. Food Control, 2014, 43: 175-182.
- [39] LU Y, TURLEY A, DONG X, et al. Reduction of *Salmonella enterica* on grape tomatoes using microwave heating [J]. International Journal of Food Microbiology, 2011, 145(1): 349-352.
- [40] SUHAG R, DHIMAN A, DESWAL G, et al. Microwave processing: A way to reduce the anti-nutritional factors (ANFs) in food grains [J]. LWT, 2021, 150: 111960.
- [41] ORSAT V, RAGHAVAN G S V, KRISHNASWAMY K. 5-Microwave technology for food processing: an overview of current and future applications [M]. The Microwave Processing of Foods (Second Edition), 2017.
- [42] HERRERO M A, KREMSNER J M, KAPPE C O. Nonthermal microwave effects revisited: on the importance of internal temperature monitoring and agitation in microwave chemistry [J]. The Journal of Organic Chemistry, 2008, 73(1): 36-47.
- [43] SHAMIS Y, TAUBE A, MITIK-DINEVA N, et al. Specific electromagnetic effects of microwave radiation on *Escherichia coli* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(9): 3017-3022.
- [44] ZHANG Z, WANG J, HU Y, et al. Microwaves, a potential treatment for bacteria: A review [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 888266.
- [45] NGUYEN T H P, SHAMIS Y, CROFT R J, et al. Erratum: 18GHz electromagnetic field induces permeability of Gram-positive cocci [J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 13507.
- [46] KUZNETSOV D B, ORLOVA E V, NESCHISLYAEV V A, et al. Epitaxy of the bound water phase on hydrophilic surfaces of biopolymers as key mechanism of microwave radiation effects on living objects [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2017, 154: 40-47.
- [47] CAO J X, WANG F, LI X, et al. The influence of microwave sterilization on the ultrastructure, permeability of cell membrane and expression of proteins of *Bacillus cereus* [J]. Front Microbiol, 2018, 9: 1870.
- [48] SHAW P, KUMAR N, MUMTAZ S, et al. Evaluation of non-thermal effect of microwave radiation and its mode of action in bacterial cell

- inactivation [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 14003.
- [49] RUEDIGER H W. Genotoxic effects of radiofrequency electromagnetic fields [J]. Pathophysiology, 2009, 16(2): 89-102.
- [50] 王思敏.中强脉冲电场处理室多物理场耦合仿真与蓝莓果汁杀菌效果研究[D].北京:北京林业大学,2022.
- [51] SALDAÑA G, ÁLVAREZ I, CONDÓN S, et al. Microbiological aspects related to the feasibility of PEF technology for food pasteurization [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(11): 1415-1426.
- [52] MOHAMAD A, ABDUL KARIM SHAH N N, SULAIMAN A, et al. Pulsed electric field of goat milk: Impact on *Escherichia coli* ATCC 8739 and vitamin constituents [J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(9): e13779.
- [53] CHANG C, YANG Y, GAVAHIAN M, et al. Prolonging the shelf-life of atemoya (*Annona cherimola* × *Annona squamosa*) using pulsed electric field treatments [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 88: 103458.
- [54] ZIAIIFAR A M, DEZYANI A, MOKHTARI Z, et al. Response surface optimization of pulsed electric field processed kiwi-carrot juice: enzyme inactivation and evaluation of physicochemical and nutritional properties [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(1): 489-499.
- [55] ZHANG J, GHASEMI N, ZARE F, et al. Nanosecond pulsed electric field treatment of human milk: Effects on microbiological inactivation, whey proteome and bioactive protein [J]. Food Chemistry, 2023, 406: 135073.
- [56] SAULIS G. Electroporation of cell membranes: the fundamental effects of pulsed electric fields in food processing [J]. Food Engineering Reviews, 2010, 2(2): 52-73.
- [57] TAO X, CHEN J, LI L, et al. Influence of pulsed electric field on *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(7): 1416-1427.
- [58] FREIRE V, LATTANZIO G, ORERA I, et al. Component release after exposure of *Staphylococcus aureus* cells to pulsed electric fields [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102838.
- [59] HE R, MA H, WANG H. Inactivation of *E. coli* by high-intensity pulsed electromagnetic field with a change in the intracellular Ca^{2+} concentration [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2014, 28(4): 459-469.
- [60] CHUECA B, PAGÁN R, GARCÍA-GONZALO D. Transcriptomic analysis of *Escherichia coli* MG1655 cells exposed to pulsed electric fields [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 29: 78-86.
- [61] LIU Z, ZHAO L, ZHANG Q, et al. Proteomics-based mechanistic investigation of *Escherichia coli* inactivation by pulsed electric field [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1-16.
- [62] YUN O, ZENG X, 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.
- [63] WANG S, ZHANG J, LI G, et al. Changes of bacterial microbiota and volatile flavor compounds in ewe milk during dielectric barrier discharge cold plasma processing [J]. Food Research International, 2022, 159: 111607.
- [64] WU X, LUO Y, ZHAO F, et al. Influence of dielectric barrier discharge cold plasma on physicochemical property of milk for sterilization [J]. Plasma Processes and Polymers, 2021, 18(1): 1900219.
- [65] CHEN M, YANG X, JI Z, et al. Combined treatment of drying, ethanol, and cold plasma for bee pollen: Effects on microbial inactivation and quality attributes [J]. Food Bioscience, 2024, 57: 103542.
- [66] OZEN E, KUMAR G D, MISHRA A, et al. Inactivation of *Escherichia coli* in apple cider using atmospheric cold plasma [J]. International Journal of Food Microbiology, 2022, 382: 109913.
- [67] 刘非凡,温纪平,展小彬,等.冷等离子体处理在食品中的应用研究进展[J].食品研究与开发,2024,45(12):181-188.
- [68] 牛力源,张殿鹤,马云芳,等.冷等离子体技术灭活细菌芽孢的研究进展[J].食品工业科技,2024,45(11):81-387.
- [69] BOURKE P, ZIUZINA D, BOEHM D, et al. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production [J]. Trends in Biotechnology, 2018, 36(6): 615-626.
- [70] CHIZOBA EKEZIE F, SUN D, CHENG J. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 69: 46-58.
- [71] COUTINHO N M, SILVEIRA M R, ROCHA R S, et al. Cold plasma processing of milk and dairy products [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 74: 56-68.
- [72] GAN Z, FENG X, HOU Y, et al. Cold plasma jet with dielectric barrier configuration: Investigating its effect on the cell membrane of *E. coli* and *S. cerevisiae* and its impact on the quality of chokeberry juice [J]. LWT, 2021, 136: 110223.
- [73] HAN L, PATIL S, BOEHM D, et al. Mechanisms of inactivation by high-voltage atmospheric cold plasma differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, 82(2): 450-458.
- [74] KANG J H, BAI J, MIN S C. Inactivation of indigenous microorganisms and salmonella in Korean rice cakes by in-package cold plasma treatment [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(7): 3360.
- [75] ZHANG H, MA J, SHEN J, et al. Roles of membrane protein damage and intracellular protein damage in death of bacteria induced by atmospheric-pressure air discharge plasmas [J]. RSC Advances, 2018, 8(38): 21139-21149.
- [76] RANJBAR S, SHAHMANSOURI M, ATTRI P, et al. Effect of plasma-induced oxidative stress on the glycolysis pathway of *Escherichia coli* [J]. Computers in Biology and Medicine, 2020, 127: 104064.
- [77] FU T, LIU Y, WANG J. Salmonella enteritidis and Listeria monocytogenes: inactivation effect and aerobic respiratory limitation of cold plasma treatment [J]. Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2022, 17(3): 243-253.
- [78] ZHAO Y, SHAO L, JIA L, et al. Subcellular inactivation mechanisms of *Pseudomonas aeruginosa* treated by cold atmospheric plasma and application on chicken breasts [J]. Food Research International, 2022, 160: 111720.
- [79] LIAN F, SUN D, CHENG J, et al. Improving modification of structures and functionalities of food macromolecules by novel thermal

- technologies [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129(3): 327-338.
- [80] HASSAN A B, VON HOERSTEN D, MOHAMED AHMED I A. Effect of radio frequency heat treatment on protein profile and functional properties of maize grain [J]. Food Chemistry, 2019, 271: 142-147.
- [81] RIFNA E J, SINGH S K, CHAKRABORTY S, et al. Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: Recent advances [J]. Food Research International, 2019, 126(12): 108654.
- [82] BHATTACHARJEE C, SAXENA V K, DUTTA S. Novel thermal and non-thermal processing of watermelon juice [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 93: 234-243.
- [83] TREMARIN A, BRANDÃO T R S, SILVA C L M. Inactivation kinetics of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in apple juice submitted to ultraviolet radiation [J]. Food Control, 2017, 73: 18-23.
- [84] BI X, WANG X, CHEN Y, et al. Effects of combination treatments of lysozyme and high power ultrasound on the *Salmonella typhimurium* inactivation and quality of liquid whole egg [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 60: 104763.
- [85] KOU X, LI R, HOU L, et al. Identifying possible non-thermal effects of radio frequency energy on inactivating food microorganisms [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 269: 89-97.
- [86] MARRA F, ZHANG L, LYNG J G. Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(4): 497-508.
- [87] CUI B, SUN Y, WANG K, et al. Pasteurization mechanism on the cellular level of radio frequency heating and its possible non-thermal effect [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2022, 78: 103026.
- [88] PENG Y, ZHANG Z, WANG M, et al. Inactivation of harmful *Anabaena flos-aquae* by ultrasound irradiation: Cell disruption mechanism and enhanced coagulation [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69: 105254.
- [89] LÓPEZ-GÓMEZ A, FERNÁNDEZ P S, PALOP A, et al. Food safety engineering: an emergent perspective [J]. Food Engineering Reviews, 2009, 1(1): 84-104.
- [90] MOK J H, SUN Y, PYATKOVSKYY T, et al. Mechanisms of *Bacillus subtilis* spore inactivation by single- and multi-pulse high hydrostatic pressure (MP-HHP) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 81: 103147.