

非热杀菌技术在即食肉制品中的应用研究进展

王文洁^{1,2,3}, 赵电波^{1,2,3}, 李 可^{1,2,3}, 李宜圃¹, 白艳红^{1,2,3,*}

(1. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室, 河南 郑州 450000; 3. 河南省食品生产与安全协同创新中心, 河南 郑州 450000)

摘 要: 即食肉制品在生产和消费环节极易受到微生物污染, 严重影响其品质和安全。传统热杀菌技术虽然能有效灭活微生物, 但会对即食肉制品的营养和感官品质产生不良影响。近年来, 非热杀菌技术逐渐受到关注, 该技术处理温度低, 对食品的风味、色泽和营养成分影响较小, 避免了传统热杀菌技术造成的食品品质劣变问题。目前, 在即食肉制品中应用较为广泛的非热杀菌技术主要有超高压、辐照、紫外照射、脉冲光照射和冷等离子体。本文综述上述5种非热杀菌技术对即食肉制品的杀菌作用及其品质的影响, 以期为非热杀菌技术在即食肉制品加工中的应用提供参考。

关键词: 即食肉制品; 非热杀菌技术; 食品品质

Advances in the Application of Non-Thermal Sterilization Technologies to Ready-to-Eat Meat Products

WANG Wenjie^{1,2,3}, ZHAO Dianbo^{1,2,3}, LI Ke^{1,2,3}, LI Yipu¹, BAI Yanhong^{1,2,3,*}

(1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China;
2. Henan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450000, China;
3. Henan Collaborative Innovation Center of Food Production and Safety, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Ready-to-eat meat products are susceptible to microbial contamination during both production and consumption, which has an adverse impact on food quality and safety. The application of traditional thermal sterilization technologies to inactivate microorganisms in ready-to-eat meat products can cause losses of nutritional and sensory qualities. In recent years, non-thermal sterilization technologies have been receiving increasing attention. These technologies are used to inactivate foodborne pathogens at lower processing temperatures without destroying the nutritional and sensory qualities that are usually affected during heat treatment. At present, non-thermal sterilization technologies including ultra-high pressure, irradiation, ultraviolet, pulsed light, and cold plasma are widely used for the processing of ready-to-eat meat products. Therefore, the effects of these five non-thermal sterilization technologies on microbial inactivation in ready-to-eat meat products and their quality are reviewed in this paper, in order to provide useful information for the application of non-thermal sterilization technologies in the processing of ready-to-eat meat products.

Keywords: ready-to-eat meat products; non-thermal sterilization technologies; food quality

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190821-192

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2019) 10-0069-07

引文格式:

王文洁, 赵电波, 李可, 等. 非热杀菌技术在即食肉制品中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2019, 33(10): 69-75.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190821-192. <http://www.rlyj.net.cn>

WANG Wenjie, ZHAO Dianbo, LI Ke, et al. Advances in the application of non-thermal sterilization technologies to ready-to-eat meat products[J]. Meat Research, 2019, 33(10): 69-75. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190821-192. <http://www.rlyj.net.cn>

收稿日期: 2019-08-21

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项 (2016YFD0400403); 河南省重大科技专项 (161100110900); 2018年度省属高校基本科研业务费资助计划项目 (18KYYWF0404)

第一作者简介: 王文洁 (1995—) (ORCID: 0000-0001-7982-3998), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉品加工与质量安全控制。

E-mail: wangwenjie619@163.com

*通信作者简介: 白艳红 (1975—) (ORCID: 0000-0002-2074-0351), 女, 教授, 博士, 研究方向为肉品加工与质量安全控制。

E-mail: baiyanhong212@163.com

即食肉制品包括高热处理和低热处理的非腌制和腌制肉制品^[1], 因其营养、方便、快捷、符合人们快节奏的生活, 使得其需求量不断增加。但是在制作和销售过程中, 由于受外界因素的影响, 即食肉制品易被食源性致病菌污染, 是人类食源性疾病的常见载体^[2]。为提高食品安全性, 通常采用热处理灭活微生物。传统的热杀菌技术虽然能有效灭活微生物, 但是高温会对即食肉制品的营养和感官品质产生不良影响。近几年, 随着生活水平的提高, 消费者对食品品质的需求进一步提高。为避免传统热杀菌技术的局限, 非热杀菌技术越来越受到行业重视, 如超高压、紫外照射、辐照、脉冲光照射和冷等离子体等技术。这些技术不仅能有效控制即食肉制品中微生物的生长, 而且能最大限度地保留食品的营养物质和自然风味, 显示出良好的应用前景。

本文主要探讨超高压处理、辐照、紫外照射、脉冲光照射和冷等离子体等非热杀菌技术在即食肉制品杀菌中的应用及其对即食肉制品品质的影响, 为上述技术在即食肉制品中的应用提供参考。

1 即食肉制品微生物污染现状

微生物污染不仅降低了食品的营养价值与卫生质量, 造成经济损失, 而且极易引起急性或慢性食物中毒, 危害人体健康。根据食源性疾病的爆发监控系统的数据, 2009—2015年美国共爆发5 760例食源性疾病, 导致100 939人患病, 5 699人住院, 145人死亡^[3]。

在切割、切片和重新包装过程中, 即食肉制品可能被微生物二次污染。即食肉制品中常见的致病菌主要包括单增李斯特菌(*Lister monocytogenes*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*) O157:H7、沙门氏菌(*Salmonella*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)等, 其中, *L. monocytogenes*普遍存在, 在4℃条件下也能生长, 且耐受高浓度盐和亚硝酸钠, 是污染即食肉制品最主要的食源性致病菌, 其在欧洲市场切片干香肠中的检出率为10%~20%^[4-5]。

国内外即食肉制品相关微生物污染重大事件如表1所示。

表1 国内外即食肉制品微生物污染事件
Table 1 Status of microbial contamination of ready-to-eat meat products at home and abroad

食品	污染微生物	事件	参考文献
干腌萨拉米	<i>E. coli</i> O157:H7	1994年11—12月, 华盛顿爆发20例食源性疾病	[6]
发酵猪肉萨拉米香肠	<i>E. coli</i> O157:H7	2004年1月, 意大利威尼托爆发3例食源性疾病	[7]
热狗	<i>L. monocytogenes</i>	1998—1999年, 美国11个州爆发至少50例食源性疾病	[8]
熟食火鸡肉	<i>L. monocytogenes</i>	2002年, 美国东北部爆发46例食源性疾病, 其中7例死亡, 3例死胎或流产	[9]
汉堡、披萨、烤饼和烤肉	<i>S. aureus</i>	2005年, 土耳其安卡拉军事自助餐检出率为9.4%	[10]
牛肉干	<i>Salmonella</i>	1995年, 美国新墨西哥州爆发93例食源性疾病	[11]
牛肉干	<i>E. coli</i> O157:H7、 <i>L. monocytogenes</i> 、 <i>S. aureus</i>	1966—2003年, 美国新墨西哥州等地爆发250例食源性疾病	[12]
即食散装熟肉制品	<i>E. coli</i> 、 <i>S. aureus</i>	2014—2016年, 龙岩市检测散装熟肉制品198份, <i>E. coli</i> 和 <i>S. aureus</i> 的检出率分别为34.8%和9.1%	[14]

2 非热杀菌技术应用现状

非热杀菌技术是食品工业新型加工技术, 杀菌条件易于控制, 受外界环境影响较小。在处理过程中, 由于处理温度较低, 有利于保持食品的营养和感官品质, 可以满足消费者对高品质食品的需求, 受到消费者和企业的欢迎。即食肉制品经烹饪或包装后, 可利用非热杀菌技术延长货架期, 提高安全性。目前, 在即食肉制品中应用较为广泛的非热杀菌技术主要包括超高压、辐照、紫外照射、脉冲光照射和冷等离子体技术。

2.1 超高压技术

超高压技术是将100~1 000 MPa的静态液体压力施加于液态或固态食品、生物制品等物料并保持一定时间, 从而起到杀菌、破坏酶及改善物料结构和特性的作用^[15]。在超高压处理过程中, 压力快速、均匀地传递到整个食品, 处理温度远低于热处理温度, 不仅可以防止食品中热敏性成分遭到破坏、抑制褐变反应的发生, 还可以延长食品货架期, 较大程度地保持食品的原风味、色泽和营养价值。但是, 超高压设备的耐压性要求较高, 价格昂贵, 生产成本偏高, 限制了该技术在生产中的广泛应用。

2.1.1 超高压技术在即食肉制品杀菌中的应用

表2 超高压技术在即食肉制品杀菌中的应用
Table 2 Application of ultra-high pressure in sterilization of ready-to-eat meat products

研究对象	污染微生物	处理参数	杀菌效果	参考文献
真空包装切片熟火腿	<i>L. monocytogenes</i>	压力400 MPa, 时间10 min, 温度17℃	处理后于6℃或1℃贮藏42 d, 样品表面 <i>L. monocytogenes</i> 生长受到抑制, 数量明显降低	[17]
干腌火腿	<i>L. monocytogenes</i>	压力600 MPa, 时间9 min	能够完全杀灭接种于干腌火腿表面的 <i>L. monocytogenes</i> , 接种量为4.65 (lg (CFU/g))	[18]
腌制牛肉	<i>S. aureus</i>	压力600 MPa, 时间6 min, 温度31℃	当初始菌落数为3.62 (lg (CFU/g))时, 可将 <i>S. aureus</i> 菌落数降低2.67 (lg (CFU/g))	[19]
罐装熟火腿	<i>E. coli</i>	压力400 MPa, 时间10 min, 温度17℃	处理后24 h内可将 <i>E. coli</i> 菌落数降低4.5 (lg (CFU/g))	[20]
牛肉火腿切片	肠球菌 (Enterococci)	压力500 MPa, 时间5 min, 温度18℃	初始菌落数为3.53 (lg (CFU/g)), 处理后6℃贮藏210 d, 未检测到Enterococci	[21]
热那亚萨拉米香肠	<i>L. monocytogenes</i> 、 <i>E. coli</i> O157:H7、 <i>Salmonella</i> spp.	压力483、600 MPa, 时间5、12 min	483 MPa处理12 min, <i>L. monocytogenes</i> 、 <i>E. coli</i> O157:H7和 <i>Salmonella</i> spp.菌落数分别降低≥5.0、≥5.8、≥2.4 (lg (CFU/g)); 600 MPa处理5 min, 3种菌菌落数分别降低1.5、≥4.7、1.9 (lg (CFU/g))	[22]
切片熏猪肉	<i>E. coli</i>	压力600 MPa, 时间5 min	将处理后的切片熏猪肉4℃贮藏21 d, <i>E. coli</i> 菌落数低于检测限	[23]
低脂五香熏牛肉	<i>L. monocytogenes</i>	压力600 MPa, 时间180 s, 温度20℃	样品经处理后于4℃贮藏91 d, 期间未检测到 <i>L. monocytogenes</i>	[24]

超高压处理对细菌、霉菌和酵母均有灭活作用。在即食肉制品中, 超高压处理能有效杀灭污染火腿、熏牛



肉的致病菌,如*L. monocytogenes*、*S. aureus*、*E. coli*和*Salmonella* spp.等,从而保证即食肉制品的安全并延长货架期。当微生物处于高压条件下时,微生物的细胞膜受到损伤,蛋白质构象改变、酶失活、细胞内pH值降低,从而导致微生物死亡^[16]。影响超高压杀菌效果的因素主要有压力、加压时间、温度、微生物种类和即食肉制品种类等(表2)。

2.1.2 超高压处理对即食肉制品品质的影响

超高压处理只对生物大分子立体结构中的非共价键,如氢键、二硫键和离子键产生影响,对食品成分中的共价键影响很小。此外,由于超高压处理温度较低,能防止食品中热敏性成分被破坏,在低温下使酶失活,从而抑制食品的褐变反应,因此能最大限度地保持其原有风味、色泽和营养价值。Hugas等^[19]对真空包装切片熟制火腿进行600 MPa、6 min的超高压处理,发现致腐微生物的生长显著受到抑制,火腿感官品质在60 d内可保持不变。Mor-Mur等^[25]发现,500 MPa、65 ℃作用5、15 min能使香肠质地和口感更好,多汁、不坚硬,而且色泽无显著变化。Rubio等^[26-27]研究表明,500 MPa、5 min处理条件下,真空包装干腌牛肉和西班牙香肠中的肠球菌、肠杆菌生长受到抑制,产品贮藏期明显延长,同时理化及感官品质未发生显著变化。韩衍青等^[28]采用12 ℃、600 MPa高压处理烟熏切片火腿10 min,在4 ℃贮藏条件下,保质期能延长10周,而且肉制品的脂肪氧化、颜色、水分活度及理化指标和感官指标变化较小。由此可知,在一定的压力范围内,采用超高压处理即食肉制品,在发挥杀菌作用的同时又能较好地保持食品品质,延长贮藏期。

2.2 辐照技术

辐照是利用一定剂量波长极短的电离射线(如 γ 射线、电子束射线和X射线)照射,从而杀死微生物达到保藏、保鲜目的的杀菌技术。辐照具有绿色、环保、经济、应用范围广、能较完整地保留食品中的营养成分和风味物质等优点。辐照穿透力强,对食品表面和内部的微生物均有明显的杀菌效果。然而,由于了解不全面,目前对食品辐照持争议的态度,使得这项技术的发展受到限制。

2.2.1 辐照技术在即食肉制品杀菌中的应用

辐照在完整肉制品及各种包装肉制品的内部杀菌中应用广泛。研究表明,一定剂量的辐照可显著降低火腿、香肠等即食肉制品中的*L. monocytogenes*和产气荚膜梭菌(*Clostridium perfringens*)数量,延长产品货架期。辐照的杀菌机理一般有2种:一方面,电离辐射破坏目标微生物的DNA,并通过抑制DNA合成防止细胞分裂;另一方面,辐射与水分子相互作用产生活性分子,活性分子再与细胞内其他物质作用,最终导致细胞死亡^[29-30]。影

响辐照杀菌的因素主要包括辐射源类型、辐照剂量、微生物种类和食品介质等(表3)。

表3 辐照技术在即食肉制品杀菌中的应用
Table 3 Application of irradiation in sterilization of ready-to-eat meat products

研究对象	污染微生物	处理参数	杀菌效果	参考文献
火腿、烤牛肉、博洛尼亚和法兰克福香肠	<i>L. monocytogenes</i>	辐射源电子束,功率10 kW,剂量1.5、2.5 kGy	1.5 kGy处理烤牛肉和博洛尼亚香肠,菌落数均降低3 (lg (CFU/g)), 2.5 kGy处理火腿和法兰克福香肠,菌落数均降低5 (lg (CFU/g))	[31]
真空包装法兰克福香肠	<i>L. monocytogenes</i>	辐射源 ¹³⁷ Cs,剂量率0.103 kGy/min,温度(4±1) ℃	辐照处理不同品牌的法兰克福香肠, <i>L. monocytogenes</i> 数量降低90%所需要的辐射剂量范围为0.49~0.71 kGy,平均值0.61 kGy	[32]
即食火鸡胸脯卷	<i>L. monocytogenes</i>	辐射源电子束,剂量1 kGy	4 ℃条件下贮藏6周内有效抑制 <i>L. monocytogenes</i> 生长	[33]
即食火鸡火腿	<i>L. monocytogenes</i>	辐射源电子束,剂量1.0~2.5 kGy	使火腿表面 <i>L. monocytogenes</i> 菌落数降低2~5 (lg (CFU/g))	[34]
火腿	<i>L. monocytogenes</i> 、鼠伤寒沙门氏菌(<i>Salmonella typhimurium</i>)	辐射源电子束,剂量0.75~0.90 kGy	<i>L. monocytogenes</i> 菌落数降低2 (lg (CFU/g)), <i>S. typhimurium</i> 菌落数降低1~3 (lg (CFU/g))	[35]
即食牛肚	<i>C. perfringens</i>	γ 辐射,剂量9 kGy	9 kGy辐照结合5 ℃低温贮藏可确保即食牛肚中 <i>C. perfringens</i> 的微生物安全性	[36]

2.2.2 辐照对即食肉制品品质的影响

辐照能够有效杀灭微生物,但是会对即食肉制品的气味、色泽、风味产生一定影响。Zhu等^[37]研究发现,经0~2 kGy辐照后,即食火鸡肠的颜色和硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substance, TBARs)值变化很小,随着辐照剂量的增加,硫磺气味增加。Galán等^[38]用2~4 kGy辐照添加叶酸的即食香肠,结果表明,当辐照剂量在3 kGy以下时,香肠的色泽、质构和感官特性均在可接受范围内,但异味可接受度随辐照剂量的升高而降低。姚钢等^[39]发现,辐照处理未添加防腐剂的香肠有效延长了香肠的保质期;但是,辐照对脂肪有一定的降解作用,脂肪含量随着辐照剂量的增加而降低,水分、蛋白质的变化不稳定,同时香肠的颜色及挥发性气味也明显增强。与此相反,Cabeza等^[40]研究表明,使用≤2 kGy的剂量辐照处理干发酵香肠,香肠的外观、气味和味道变化不显著。因此,在国家规定范围内,控制食品辐照剂量很重要,剂量低不能达到保鲜杀菌的效果,剂量高会影响食品的感官品质,选择合适的辐照剂量是在即食肉制品中使用辐照技术的关键点。

2.3 紫外照射和脉冲光照射技术

紫外光(ultraviolet light, UV)是波长100~400 nm的电磁波谱^[41],UV光谱分为4个区域:UV-A(315~400 nm)、UV-B(280~315 nm)、UV-C(200~280 nm)和真空UV(100~200 nm)^[42]。紫外杀菌操作简单、效率高、环境友好、污染小,与热处理相

比,紫外照射不需要热量,对食品营养和感官质量的影响较小。此外,紫外设备的安装成本和加工费用较低,而且不会在产品中留下任何残留物。但是,紫外照射穿透力低,只对食品表面的微生物起到杀菌作用。此外,紫外设备需要相对昂贵的电源和弧光灯,照射强度存在不稳定现象,导致样品照射不均匀,这些因素限制了紫外照射技术的应用。

脉冲光照射是指采用持续时间短、光照强度高的宽谱“白”光脉冲照射物质,以达到杀菌的目的。脉冲光谱包括从紫外到近红外区域的波长范围^[43]。脉冲光峰值能量极高,脉冲持续时间极短,且不含汞和高压气体等污染成分,具有穿透力强、作用温度低、能效高、适配性高、安全和易控制的优点。但是,由于遮光效应以及光的反射、折射和散射等现象的存在,使得脉冲光对深颜色的液体或凹凸不平的表面杀菌效果较差,且杀菌只停留在食品表面。

2.3.1 紫外照射和脉冲光照射在即食肉制品中的应用

表4 紫外照射及脉冲光照射在即食肉制品杀菌中的应用
Table 4 Application of UV and pulsed light in sterilization of ready-to-eat meat products

研究对象	污染微生物	处理参数	杀菌效果	参考文献
发酵香肠切片	<i>E. coli</i> O157:H7、 <i>L. monocytogenes</i> 、 <i>S. typhimurium</i> 、 <i>S. aureus</i>	脉冲UV, 脉冲强度3 J/cm ² , 持续时间300 ms	<i>E. coli</i> O157:H7、 <i>L. monocytogenes</i> 、 <i>S. typhimurium</i> 和 <i>S. aureus</i> 菌落数分别降低2.24、2.29、2.25、2.12 (lg (CFU/g))	[45]
即食切片火腿	<i>L. monocytogenes</i> 、 <i>S. typhimurium</i> 、空肠弯曲杆菌(<i>Campylobacter jejuni</i>)	UV-C, 剂量5 W/m ²	<i>L. monocytogenes</i> 、 <i>S. typhimurium</i> 和 <i>C. jejuni</i> 菌落数降低90%, 所需剂量分别为2.48、2.39、2.18 J/m ² ; 当在8 000 J/m ² , 菌落数分别降低2.74、2.02、1.72 (lg (CFU/g))	[46]
即食干腌肉制品	<i>L. monocytogenes</i> 、 <i>S. typhimurium</i>	脉冲光, 在250 ms内传输, 剂量11.9 J/cm ²	菌落数最大减少量1.5~1.8 (lg (CFU/g))	[5]
真空包装熟火腿和博洛尼亚香肠	<i>L. monocytogenes</i>	脉冲光, 剂量8.4 J/cm ²	真空包装熟火腿和博洛尼亚香肠中 <i>L. monocytogenes</i> 菌落数分别降低1.78、1.11 (lg (CFU/cm ²))	[47]
即食切片火腿	<i>E. coli</i> O157:H7、 <i>S. typhimurium</i> 、 <i>L. monocytogenes</i>	UV; 输出功率16 W; 辐射强度1.85 mW/cm ² ; 时间70 s	处理后, <i>E. coli</i> O157:H7、 <i>S. typhimurium</i> 和 <i>L. monocytogenes</i> 菌落数分别降低1.52、1.73、1.55 (lg (CFU/g))	[48]
法兰克福香肠	<i>L. monocytogenes</i>	脉冲UV, 时间5、15、30、45、60 s, 距离5、8、13 cm	非真空包装和真空包装法兰克福香肠的 <i>L. monocytogenes</i> 菌落数分别降低0.3~1.9、0.1~1.9 (lg (CFU/cm ²))	[49]
维也纳香肠	无害李斯特菌(<i>Listeria innocua</i>)	脉冲光, 剂量9.4 J/cm ² , 脉冲宽度360 μs	菌落数降低(1.37±0.30) (lg (CFU/根)), 4℃冷藏48 h后, 菌落数降低(4.03±0.15) (lg (CFU/根))	[50]

研究证实,紫外照射和脉冲光照射均能有效杀灭香肠、火腿等即食肉制品中的*L. monocytogenes*、*S. typhimurium*和*E. coli* O157:H7等,从而延长即食肉制品的保质期。当微生物处在紫外线中时,紫外区域中的光子能量通常足以引发生物分子中的光化学反应。紫外照射导致微生物的DNA形成胸腺嘧啶二聚体,使微生物失活^[42]。紫外照射杀菌效果主要受到照射强度、处理时间、微生物和食品种类等的影响。

脉冲光照射杀菌机制主要取决于3种作用方式,分别为光化学作用、光热作用和光物理作用。光化学作用指微生物经脉冲光照射后,其DNA会吸收紫外波段的能量(200~280 nm)而裂解,结构发生改变,形成胸腺嘧啶二聚体,阻碍DNA的复制和细胞分裂,扰乱微生物自身的新陈代谢和遗传,导致细胞死亡及孢子钝化。光热作用是指材料受光照射后,光子能量与晶格相互作用,振动加剧,温度升高。脉冲光是一种广谱光,其中的近红外光能辐射能量,可使细胞表面局部升温至50~150℃,破坏细菌细胞壁,使细胞液蒸发,破坏细胞结构,导致细菌死亡。光物理作用指脉冲光的穿透性和瞬时冲击能力能够破坏细胞壁和其他细胞成分,导致细胞死亡^[44]。影响脉冲光照射杀菌的因素主要有样品形态、初始菌落数、输入电压、脉冲宽度、脉冲频率、脉冲次数和脉冲距离等(表4)。

2.3.2 紫外照射和脉冲光照射对即食肉制品品质的影响

目前,关于紫外线照射和脉冲光照射对即食肉制品品质的影响说法尚不统一。Wambura等^[51]研究表明,随着脉冲紫外线照射处理时间的延长,切片火腿氧化稳定性降低程度更高,处理时间和距离对样品颜色和质地产生不良影响。Ganan等^[5]发现,用11.9 J/cm²脉冲光照射处理即食干腌肉制品Salchichón后,贮藏30 d未发现感官变化,将同样的处理作用于即食干腌肉制品Loin,发现处理后Loin的感官品质发生变化,但是这些变化在贮藏期间消失。采用0.7、2.1、4.2、8.4 J/cm²的脉冲光处理真空包装熟火腿时,火腿TBARs值非常低,色泽在熟肉制品正常范围内,8.4 J/cm²的脉冲光处理不影响火腿的感官品质^[52]。与仅采用真空包装相比,脉冲光和真空包装协同作用将火腿的保质期延长30 d,但是脉冲光未能延长真空包装博洛尼亚切片香肠的保质期,而且剂量高于2.1 J/cm²的脉冲光处理对产品感官特性产生负面影响^[47]。综上所述,即食肉制品的感官品质与即食肉制品的种类、照射剂量和处理时间有关。此外,将紫外和脉冲光照射与其他传统技术(如冷藏、加热、真空包装等)结合,可以延长即食肉制品的货架期。

2.4 冷等离子体技术

等离子体是一种准中性气体,被称为物质的第4种状态,一般由气体放电产生^[52-53],其含有各种活性粒子,如电子、离子、自由基、亚稳态激发物质和真空紫外线辐射^[54]。作为一种新兴的绿色灭菌技术,冷等离子体具有高效、温度低、耗时短、效率高和无污染等优点。可是,由于受样品形状的影响,等离子体技术存在处理不均匀的问题。

2.4.1 冷等离子体技术在即食肉制品中的应用

冷等离子体能够有效杀灭牛肉干、火腿等即食肉制品中的致病菌,如*L. monocytogenes*、*S. typhimurium*和



E. coli O157:H7等, 延长即食肉制品货架期。在冷等离子体作用下, 微生物受到臭氧和活性物质的氧化, 以及自由基和带电粒子的攻击, 细胞或DNA遭到破坏后死亡^[55-56]。影响冷等离子体杀菌的因素主要包括工艺参数(如等离子体产生方式、载气类型、频率、输入电压和接触距离)、环境因素(如相对湿度、pH值、样品性质)和微生物种类(表5)。

表5 冷等离子体在即食肉制品杀菌中的应用
Table 5 Application of cold plasma in sterilization of ready-to-eat meat products

研究对象	污染微生物	等离子体源	处理参数	杀菌效果	参考文献
意大利风干牛肉	<i>L. innocua</i>	DBD等离子体	电压27 kV, 频率278 kHz, 功率15.5、31、62 W, 时间2、5、10、20、60 s, 气体O ₂ +Ar	菌落数降低(0.8±0.4)~(1.6±0.5) (lg (CFU/g))	[57]
火腿	<i>L. monocytogenes</i>	APPJ	电压2 kV, 频率50 kHz, 时间2 min, 气体N ₂ +O ₂ 、He、N ₂ 、He+O ₂	菌落数降低1.94~6.52 (lg (CFU/g))	[58]
牛肉干	<i>S. aureus</i>	DBD等离子体	功率200 W, 时间2 min, 气体Ar	处理2 min, 菌落数降低3~4 (lg (CFU/g))	[59]
压片火腿	<i>L. monocytogenes</i>	常压等离子体	功率75、100、125、150 W, 频率13.56 MHz, 时间120 s, 气体He (10 L/min)	75、100、125 W处理120 s后, 菌落数分别降低0.25~1.73 (lg (CFU/g))	[60]
牛肉干	<i>L. monocytogenes</i> 、 <i>S. typhimurium</i>	FTDBD等离子体	功率最高100 W, 平均2 W, 频率15 kHz, 时间2.5~10 min, 气体空气	处理10 min后, <i>L. monocytogenes</i> 和 <i>S. typhimurium</i> 菌落数均降低2~3 (lg (CFU/g))	[13]
卷火腿片	<i>S. typhimurium</i> 、 <i>L. monocytogenes</i>	常压等离子体	电压10 kV, 频率2 kHz, 时间20 min, 气体空气或N ₂ +CO ₂	以空气或N ₂ +CO ₂ 为载气处理火腿片, <i>S. typhimurium</i> 菌落数分别降低1.14、1.84 (lg (CFU/g)), <i>L. monocytogenes</i> 菌落数分别降低1.02、2.55 (lg (CFU/g))	[61]

注: DBD. 介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge); APPJ. 常压等离子体射流 (atmospheric-pressure plasma jet); FTDBD. 薄层介质阻挡放电 (flexible thin-layer dielectric barrier discharge)。

2.4.2 冷等离子体对即食肉制品品质的影响

冷等离子体虽然能有效杀灭即食肉制品中的微生物, 但对品质的影响并不一致。Kim等^[59]利用射频大气压等离子体处理牛肉干5 min, 结果表明, 牛肉干中脂肪酸含量无显著变化, 处理时间0~10 min时, 牛肉干色泽(亮度值(*L**)、红度值(*a**)、黄度值(*b**)、 ΔE)和剪切力均无显著变化。随着DBD等离子体处理功率和处理时间的增加, 牛肉干TBARs值显著高于对照组样品, 但是增加量仅为0.1~0.4 mg/kg, 未检测到异味^[57]。也有研究表明, 采用大气压等离子体处理培根, 培根*L**减小^[62]。Yong等^[63]将等离子体处理后的溶液作为腰肉火腿中亚硝酸盐的替代物, 发现与亚硝酸钠水溶液相比, 等离子体活化水处理组火腿*a**增加, *b**、*L**和脂质氧化情况没有明显差异。综上可知, 冷等离子体处理对即食

肉制品的色泽影响不一致, 这可能与等离子体的产生方式和即食肉制品种类有关。因此, 在今后的研究中需进一步优化放电功率、载气、处理时间等参数, 有效控制冷等离子体处理对即食肉制品品质造成的不良影响。

3 结 语

超高压处理、辐照、紫外照射、脉冲光照射和冷等离子体技术对即食肉制品有良好的杀菌效果, 但是对其营养和感官品质的影响因即食肉制品种类、形态和处理工艺条件等的不同而存在差异。此外, 非热杀菌技术也存在设备价格昂贵和技术参数不完善等问题, 目前多集中于实验室研究。因此, 在今后的工作中, 首先需要进行基础研究, 理解设备作用机理; 其次, 研发新设备, 加快工业化应用; 最后, 将非热杀菌技术与其他技术(温热、冷藏、抗菌剂等)协同使用, 改善非热杀菌技术自身的缺点, 取长补短, 从而推动非热杀菌技术在即食肉制品加工中的应用。

参考文献:

- [1] RAY B, BHUNIA A. Fundamental food microbiology[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013: 194-197. DOI:10.1201/b16078.
- [2] KUKLECI E, SMULDERS F J M, HAMIDI A, et al. Prevalence of foodborne pathogenic bacteria, microbial levels of hygiene indicator bacteria, and concentrations of biogenic amines in ready-to-eat meat products at retail in the Republic of Kosovo[J]. Journal of Food Protection, 2019, 82(7): 1135-1140. DOI:10.4315/0362-028X.JFP-19-060.
- [3] DEWEY-MATTIA D, MANIKONDA K, HALL A J, et al. Surveillance for foodborne disease outbreaks: United States, 2009—2015[J]. MMWR Surveillance Summaries, 2018, 67(10): 1-11. DOI:10.15585/mmwr.ss6710a1.
- [4] SOFOS J N, GEORNARAS I. Overview of current meat hygiene and safety risks and summary of recent studies on biofilms, and control of *Escherichia coli* O157:H7 in nonintact, and *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat, meat product[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 151-156. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.04.015.
- [5] GANAN M, HIERRO E, HOSPITAL X F, et al. Use of pulsed light to increase the safety of ready-to-eat cured meat products[J]. Food Control, 2013, 32(2): 512-517. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.01.022.
- [6] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). *Escherichia coli* O157: H7 outbreak linked to commercially distributed dry-cured salami: Washington and California, 1994[J]. MMWR Morbidity and Mortality Weekly Report, 1995, 44(9): 157-160. DOI:10.1001/jama.1995.03520370023012.
- [7] CONEDERA G, MATTIAZZI E, RUSSO F, et al. A family outbreak of *Escherichia coli* O157 haemorrhagic colitis caused by pork meat salami[J]. Epidemiology and Infection, 2007, 135(2): 311-314. DOI:10.1017/S0950268806006807.
- [8] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Update: multistate outbreak of listeriosis: United States, 1998—1999[J]. MMWR Morbidity and Mortality Weekly Report, 1999, 47(51/52): 1117-1118. DOI:10.1001/jama.281.4.317-jwr0127-3-1.

- [9] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Outbreak of Listeriosis: Northeastern United States, 2002[J]. MMWR Morbidity and Mortality Weekly Report, 2002, 51(42): 950-951. DOI:10.1001/jama.288.18.2260.
- [10] AYCICEK H, CAKIROGLU S, STEVENSON T H. Incidence of *Staphylococcus aureus* in ready-to-eat meals from military cafeterias in Ankara, Turkey[J]. Food Control, 2005, 16(6): 531-534. DOI:10.1016/j.foodcont.2004.04.005.
- [11] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Outbreak of salmonellosis associated with beef jerky: New Mexico[J]. MMWR Morbidity and Mortality Weekly Report, 1995, 44(42): 785-788. DOI:10.1001/jama.1995.03530210023010.
- [12] BENKERROUM N. Traditional fermented foods of North African countries: technology and food safety challenges with regard to microbiological risks[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2013, 12(1): 54-89. DOI:10.1111/j.1541-4337.2012.00215.x.
- [13] 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.09.016.
- [14] 李士荣, 金建潮, 袁丹芳, 等. 2014—2016年龙岩市即食散装熟肉制品风险监测分析[J]. 河南预防医学杂志, 2017, 28(12): 952-953. DOI:10.13515/j.cnki.hnjpm.1006-8414.2017.12.024.
- [15] 赵永强, 张红杰, 李来好, 等. 水产品非热杀菌技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(11): 394-399. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.11.071.
- [16] 刘勤华, 马汉军. 超高压杀菌技术在低温肉制品保鲜中的应用[J]. 肉类工业, 2013(3): 52-56. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2013.03.017.
- [17] AYMERICH T, JOFRÉ A, GARRIGA M, et al. Inhibition of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* by natural antimicrobials and high hydrostatic pressure in sliced cooked ham[J]. Journal of Food Protection, 2005, 68(1): 173-177. DOI:10.4315/0362-028X-68.1.173.
- [18] CAMPUS M. High pressure processing of meat, meat products and seafood[J]. Food Engineering Reviews, 2010, 2(4): 256-273. DOI:10.1007/s12393-010-9028-y.
- [19] HUGAS M, GARRIGA M, MONFORT J M. New mild technologies in meat processing: high pressure as a model technology[J]. Meat Science, 2002, 62(3): 359-371. DOI:10.1016/S0309-1740(02)00122-5.
- [20] GARRIGA M, AYMERICH M T, COSTA S, et al. Bactericidal synergism through bacteriocins and high pressure in a meat model system during storage[J]. Food Microbiology, 2002, 19(5): 509-518. DOI:10.1006/fmic.2002.0498.
- [21] RUBIO B, MARTÍNEZ B, GARCIA-CACHAN M D, et al. Effect of high pressure preservation on the quality of dry cured beef "Cecina de Leon"[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2007, 8(1): 102-110. DOI:10.1016/j.ifset.2006.08.004.
- [22] PORTO A. Evaluation of fermentation, drying, and/or high pressure processing on viability of *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* spp. and *Trichinella spiralis* in raw pork and Genoa salami[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 140(1): 61-75. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2010.02.008.
- [23] OLMO A D, CALZADA J, NUÑEZ M. Effect of high pressure processing and modified atmosphere packaging on the safety and quality of sliced ready-to-eat "lacón", a cured-cooked pork meat product[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2014, 26: 134-142. DOI:10.1016/j.ifset.2014.03.003.
- [24] HAYMAN M M, BAXTER I, O'RIORDAN P J, et al. Effects of high-pressure processing on the safety, quality, and shelf life of ready-to-eat meats[J]. Journal of Food Protection, 2004, 67(8): 1709-1718. DOI:10.4315/0362-028X-67.8.1709.
- [25] MOR-MUR M, YUSTE J. High pressure processing applied to cooked sausage manufacture: physical properties and sensory analysis[J]. Meat Science, 2003, 65(3): 1187-1191. DOI:10.1016/S0309-1740(03)00013-5.
- [26] RUBIO B, MARTÍNEZ B, GARCÍA-CACHÁN M D, et al. Effect of high pressure preservation on the quality of dry cured beef Cecina de Leon[J]. Innovative Food Science Emerging Technologies, 2007, 8(1): 102-110. DOI:10.1016/j.ifset.2006.08.004.
- [27] RUBIO B, MARTÍNEZ B, GARCÍA-CACHÁN M D, et al. The effects of high pressure treatment and of storage periods on the quality of vacuum-packed "salchichón" made of raw material enriched in monounsaturated and polyunsaturated fatty acids[J]. Innovative Food Science Emerging Technologies, 2007, 8(2): 180-187. DOI:10.1016/j.ifset.2006.09.005.
- [28] 韩衍青, 张秋勤, 徐幸莲, 等. 超高压处理对烟熏切片火腿保质期的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 305-311. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.054.
- [29] 李斌, 杨秦, 肖洪, 等. 辐照对食品品质的影响及辐照食品的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(4): 4-6. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2019.04.002.
- [30] TAHERGORABI R, MATAK K E, JACZYNSKI J. Application of electron beam to inactivate *Salmonella* in food: recent developments[J]. Food Research International, 2012, 45(2): 685-694. DOI:10.4315/0362-028X-67.8.1709.
- [31] FOONG S C, GONZALEZ G L, DICKSON J S. Reduction and survival of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat meats after irradiation[J]. Journal of Food Protection, 2004, 67(1): 77-82. DOI:10.4315/0362-028X-67.1.77.
- [32] SOMMERS C H, THAYER D W. Survival of surface-inoculated *Listeria monocytogenes* on commercially available frankfurters following gamma irradiation[J]. Journal of Food Safety, 2000, 20(2): 127-137. DOI:10.1111/j.1745-4565.2000.tb00293.x.
- [33] ZHU M J, MENDONCA A, ISMAIL H A, et al. Fate of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat turkey breast rolls formulated with antimicrobials following electron-beam irradiation[J]. Poultry Science, 2009, 88(1): 205-213. DOI:10.3382/ps.2007-00386.
- [34] ZHU M J, MENDONCA A, ISMAIL H A, et al. Impact of antimicrobial ingredients and irradiation on the survival of *Listeria monocytogenes* and the quality of ready-to-eat Turkey ham[J]. Poultry Science, 2005, 84(4): 613-620. DOI:10.1093/ps/84.4.613.
- [35] FU A N H, SEBRANEK J G, MURANO E A. Survival of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella typhimurium* and quality attributes of cooked pork chops and cured ham after irradiation[J]. Journal of Food Science, 1995, 60(5): 1001-1005. DOI:10.1111/j.1365-2621.1995.tb06279.x.
- [36] PARRYHANSON A, HALL A, MINNAAR A, et al. Use of γ -irradiation to reduce *Clostridium perfringens* on ready-to-eat bovine tripe[J]. Meat Science, 2008, 78(3): 194-201. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.06.010.
- [37] ZHU M J, LEE E J, MENDONCA A, et al. Effect of irradiation on the quality of Turkey ham during storage[J]. Meat Science, 2004, 66(1): 63-68. DOI:10.1016/S0309-1740(03)00014-7.
- [38] GALÁN I, GARCÍA M L, SELGAS M D. Irradiation is useful for manufacturing ready-to-eat cooked meat products enriched with folic acid[J]. Meat Science, 2011, 87(4): 330-335. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.11.007.



- [39] 姚钢, 蒋继成, 卫光, 等. ^{60}Co - γ 射线辐照保鲜无防腐剂香肠机理与理化指标预测[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(8): 139-141. DOI:10.3969/j.issn.1003-7241.2018.08.033.
- [40] CABEZA M C, DE LA HOZ L, VELASCO R, et al. Safety and quality of ready-to-eat dry fermented sausages subjected to E-beam radiation[J]. Meat Science, 2009, 83(2): 320-327. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.05.019.
- [41] KOUTCHMA T. Challenges of UV light processing of low UVT foods and beverages[C]// Conference on Laser Beam Shaping XI. San Diego, CA, International Society for Optics and Photonics, 2010: 77890H. DOI:10.1117/12.860259.
- [42] KEKLIK N M, KRISHNAMURTHY K, DEMIRCI A. Microbial decontamination in the food industry[M]. Woodhead Publishing, 2012: 344-369. DOI:10.1533/9780857095756.2.344.
- [43] LI X, FARID M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 182: 33-45. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.02.026.
- [44] 杜艳, 陈复生. 脉冲光在食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 177-182. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2018.08.035.
- [45] RAJKOVIC A, TOMASEVIC I, MEULENAER B D, et al. The effect of pulsed UV light on *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium*, *Staphylococcus aureus*, and staphylococcal enterotoxin A on sliced fermented salami and its chemical quality[J]. Food Control, 2017, 73: 829-837. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.09.029.
- [46] CHUN H, KIM J, CHUNG K, et al. Inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica* serovar *typhimurium*, and *Campylobacter jejuni* in ready-to-eat sliced ham using UV-C irradiation[J]. Meat Science, 2009, 83: 599-603. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.07.007.
- [47] HIERRO E, BARROSO E, LD L H, et al. Efficacy of pulsed light for shelf-life extension and inactivation of *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat cooked meat products[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2011, 12(3): 275-281. DOI:10.1016/j.ifset.2011.04.006.
- [48] HA J W, KANG D H. Enhanced inactivation of food-borne pathogens in ready-to-eat sliced ham by near-infrared heating combined with UV-C irradiation and mechanism of the synergistic bactericidal action[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2015, 81(1): 2-8. DOI:10.1128/AEM.01862-14.
- [49] KEKLIK N M, DEMIRCI A, PURI V M. Inactivation of *Listeria monocytogenes* on unpackaged and vacuum-packaged chicken frankfurters using pulsed UV-light[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(8): M431-M439. DOI:10.1111/j.1750-3841.2009.01319.x.
- [50] UESUGI A R, MORARU C I. Reduction of *Listeria* on ready-to-eat sausages after exposure to a combination of pulsed light and nisin[J]. Journal of Food Protection, 2009, 72(2): 347-353. DOI:10.4315/0362-028X-72.2.347.
- [51] WAMBURA P, VERGHESE M. Effect of pulsed ultraviolet light on quality of sliced ham[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(10): 2173-2179. DOI:10.1016/j.lwt.2011.05.016.
- [52] TSENG S, ABRAMZON N, JACKSON J O, et al. Gas discharge plasmas are effective in inactivating *Bacillus* and *Clostridium* spores[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 93(6): 2563-2570. DOI:10.1007/s00253-011-3661-0.
- [53] MIR S A, SHAH M A, MIR M M. Understanding the role of plasma technology in food industry[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(5): 1-17. DOI:10.1007/s11947-016-1699-9.
- [54] ŞEN Y, BAĞCI U, GÜLEÇ H A, et al. Modification of food-contacting surfaces by plasma polymerization technique: reducing the biofouling of microorganisms on stainless steel surface[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(1): 166-175. DOI:10.1007/s11947-009-0248-1.
- [55] BRANDENBURG R, LANGE H, WOEDTKE T V, et al. Antimicrobial effects of UV and VUV radiation of nonthermal plasma jets[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(6): 877-883. DOI:10.1109/TPS.2009.2019657.
- [56] LAROUCSI M, LEIPOLD F. Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2004, 233(1): 81-86. DOI:10.1016/j.ijms.2003.11.016.
- [57] RØD S K, HANSEN F, LEIPOLD F, et al. Cold atmospheric pressure plasma treatment of ready-to-eat meat: inactivation of *Listeria innocua* and changes in product quality[J]. Food Microbiology, 2012, 30(1): 233-238. DOI:10.1016/j.fm.2011.12.018.
- [58] LEE H J, JUNG H, CHOE W, et al. Inactivation of *Listeria monocytogenes* on agar and processed meat surfaces by atmospheric pressure plasma jets[J]. Food Microbiology, 2011, 28(8): 1468-1471. DOI:10.1016/j.fm.2011.08.002.
- [59] KIM J S, LEE E J, CHOI E H, et al. Inactivation of *Staphylococcus aureus* on the beef jerky by radio-frequency atmospheric pressure plasma discharge treatment[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2014, 22(4): 124-130. DOI:10.1016/j.ifset.2013.12.012.
- [60] SONG H P, KIM B, CHOE J H, et al. Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes*[J]. Food Microbiology, 2009, 26(4): 432-436. DOI:10.1016/j.fm.2009.02.010.
- [61] LIS K A, BOULAABA A, BINDER S, et al. Inactivation of *Salmonella typhimurium* and *Listeria monocytogenes* on ham with nonthermal atmospheric pressure plasma[J]. PLoS One, 2018, 13(5): e0197773. DOI:10.1371/journal.pone.0197773.
- [62] KIM B, YUN H, JUNG S, et al. Effect of atmospheric pressure plasma on inactivation of pathogens inoculated onto bacon using two different gas compositions[J]. Food Microbiology, 2011, 28(1): 9-13. DOI:10.1016/j.fm.2010.07.022.
- [63] YONG H I, PARK J, KIM H J, et al. An innovative curing process with plasma-treated water for production of loin ham and for its quality and safety[J]. Plasma Processes and Polymers, 2017, 15(2): 1700050. DOI:10.1002/ppap.201700050.