

非热杀菌技术在肉及肉制品中的应用研究进展

刘悦, 贺稚非, 李洪军*, 李芳, 张东
(西南大学食品科学学院, 重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆 400715)

摘要: 肉及肉制品作为人体重要的营养来源, 极易受到微生物污染。传统热杀菌方式虽可有效灭活微生物, 但会对肉及肉制品的营养及感官品质产生不良影响。新型非热杀菌技术可避免传统热杀菌技术造成的食品品质劣变问题, 成为食品领域的研究热点。本文综述非热杀菌技术在食品行业的研究现状、特点及作用机制, 着重讨论其在肉及肉制品中的应用研究进展, 并对非热杀菌技术在肉及肉制品加工中的发展方向进行展望, 以为肉及肉制品保鲜及工业化应用提供一定理论参考。

关键词: 非热杀菌技术; 肉及肉制品; 作用机制; 工业化应用

Advances in the Application of Non-thermal Sterilization Technologies in Meat and Meat Products

LIU Yue, HE Zhifei, LI Hongjun*, LI Fang, ZHANG Dong
(Chongqing Engineering Research Center for Special Food, College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Meat and meat products are important nutrient sources for the human body; however, they are susceptible to microbial contamination. In spite of being able to effectively inactivate microorganisms in meat and meat products, traditional thermal sterilization technologies may cause adverse effects on the nutritional and sensory qualities. Non-thermal food sterilization can avoid the problem of food quality deterioration caused by traditional thermal sterilization so that it has become a research hotspot in the field of food science. This article reviews the current status of the application of non-thermal sterilization technologies in the food industry, as well as their characteristics and mechanisms, focusing on their application in meat and meat products, and discusses future directions in this field. We expect that this review can provide a theoretical basis for the industrial application of non-thermal sterilization technologies in the preservation of meat and meat products.

Keywords: non-thermal sterilization technologies; meat and meat products; mechanism; industrial application

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200824-205

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2020) 10-0088-08

引文格式:

刘悦, 贺稚非, 李洪军, 等. 非热杀菌技术在肉及肉制品中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(10): 88-95.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200824-205. <http://www.rlyj.net.cn>

LIU Yue, HE Zhifei, LI Hongjun, et al. Advances in the application of non-thermal sterilization technologies in meat and meat products[J]. Meat Research, 2020, 34(10): 88-95. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200824-205. <http://www.rlyj.net.cn>

在“健康中国2030”的背景下, 食品与消费者健康之间的关系日益密切, 肉类因富含高质量的蛋白质、脂肪、维生素等营养成分, 成为一种兼备营养和美味的食物受到青睐, 肉制品加工产业成为促进我国经济发展

的支柱产业和提高国民健康水平的动力源泉。根据联合国粮农组织数据统计, 2019年全球肉类总产量达到33 521.4 万t^[1]。肉品虽然营养丰富, 但极易受到致病微生物和腐败菌的污染^[2], 从而引发食品安全问题。因此,

收稿日期: 2020-08-24

基金项目: 国家现代农业(兔)产业技术体系建设专项(CARS-43-E-1);

重庆市特色食品工程技术研究中心能力提升项目(cstc2014pt-gc8001);

研究生产学研协同培养模式的研究与实践项目(yjg20162024);

四川白兔优良种质资源扩繁与健康养殖技术示范推广项目(2020JDZH0029)

第一作者简介: 刘悦(1993—)(ORCID: 0000-0001-8569-5662), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉类科学与酶工程。

E-mail: 1728928735@qq.com

*通信作者简介: 李洪军(1961—)(ORCID: 0000-0002-6835-1822), 男, 教授, 博士, 研究方向为肉类科学与酶工程。

E-mail: 983362225@qq.com

为了确保肉制品的生产安全,食品工业研究开发出多种技术来抑制或杀灭食品中的腐败微生物。目前,国内肉及肉制品灭菌技术还局限于传统热杀菌技术,如高温灭菌,虽能有效灭活有害微生物,确保食品安全性,但高热会引发许多不良反应,导致食品品质劣变,例如肉品营养、感官品质下降等。同样,传统的冷藏和冷冻技术虽然也可抑制微生物生长,在杀菌和防腐方面有很大优势,但通常会对肉及肉制品感官及营养品质产生负面影响,不能满足消费者对肉及肉制品高品质的要求,其使用受到限制。为破解传统灭菌技术带来的诸多问题,目前国际上蓬勃发展的新型非热杀菌技术开始在我国食品加工行业生根发芽,完美契合了我国食品加工业营养健康、安全环保的发展主题。

非热杀菌技术在肉及肉制品加工中的应用不仅能够有效抑制腐败微生物的生长和繁殖,延长货架期,还能达到不改变或最小限度影响肉及肉制品感官品质和营养特性的效果,迎合了消费者对肉及肉制品高品质的追求^[3]。新型非热杀菌技术避免了传统灭菌过程中不良化学反应和产生化学危害物等安全隐患问题的发生,有利于我国肉及肉制品加工行业的战略性发展。近年来,非热杀菌技术在肉及肉制品中的应用已受到越来越多关注,相关研究也不断深入。Bae等^[4]研究冷等离子体技术对3种鲜肉(牛里脊肉、猪肉、鸡胸肉)表面病毒和微生物的灭活效果,并对鲜肉色泽、水分含量及硫代巴比妥酸反应物值等理化指标进行检测,结果表明,病毒灭活率可达99%,肉质及感官性质等相关指标无显著变化。因此,可以在生鲜肉的生产、加工和贮藏过程中考虑此技术,以提高鲜肉的安全性。另外,李霜等^[5]探究高压脉冲电场(pulsed electric fields, PEF)对调理牛肉的杀菌效果,结果显示,PEF对调理牛肉中微生物的致死率达到87.33%,使其货架期延长2 d,且产品的感官品质无显著变化。国内外越来越多研究表明,新型非热杀菌技术在肉及肉制品中具有巨大的应用潜力。

目前,国内关于新型非热杀菌技术的应用研究较多,但缺乏较为全面的概括和总结。鉴于此,本文对国内外常用的四大类新型非热杀菌技术的作用机理以及这些技术在肉及肉制品中的应用进行阐述,并对新型非热杀菌技术在肉及肉制品中的发展方向作出展望,以期对新型非热加工技术在肉及肉制品中的工业化应用提供相应的理论支撑。

1 非热杀菌技术概述

1.1 非热杀菌技术定义

传统热加工是处理食物的常用方法,具有灭活腐败微生物和钝化酶的能力^[6]。但热处理可能会导致食品发生

不良理化反应,从而损害食品本身的感官特性,并且可能会降低某些生物活性化合物的含量或生物利用率^[7]。

食品非热杀菌技术,是指无需加热或在低温条件下,借助外部因素作用于食品,通过物理或化学反应使生物分子细胞壁、细胞膜及细胞相关生化功能发生改变,起到杀菌、钝酶及改变食品结构及功能特性的作用,可有效提高食品质量,避免热效应对食品中生物活性化合物的不利影响,既能延长食品的货架期,同时又保持了食品感官品质和营养成分^[8-9]。食品非热杀菌技术属于典型的交叉学科,涉及到物理学、电子学、化学、微生物学和工程技术等多个学科,被誉为本世纪最具潜力的食品加工高新技术。表1总结了传统热处理和非热杀菌新技术的区别。

表1 传统热加工技术与新型非热加工技术的比较

Table 1 Comparison between traditional thermal processing and new non-thermal processing technologies

方法	原理	优点	缺点
传统热处理	主要通过物理处理产生高热效应导致微生物致死、酶失活	有效灭活微生物、钝化酶活性;处理强度大,保质期相对较长	处理温度高,营养成分氧化降解,产生异味;能耗大,处理时间长
非热杀菌新技术	通过非热效应(空化效应、电穿孔理论等)使细胞壁/膜损伤,使胞内物质外泄,造成细胞结构产生可逆/不可逆破坏,导致微生物失活	处理热效应低,最大限度保持食品品质/营养特性;处理时间短,效率高;低能耗、绿色、环保	部分技术作用机制尚不明确;操作过程中变量难以控制;设备昂贵,投资成本高;相关法律法规不完善

1.2 非热杀菌新技术在食品中的应用研究现状

鉴于全球化带来的挑战以及消费者对高品质、高营养食物的多样化需求,食品非热杀菌技术不仅能最大限度保留食品天然品质,还能改善食品功能特性、提高营养价值,成为食品加工行业的焦点及热点。在过去的10年中,食品加工行业已经应用了诸如超高压、超声、辐照等非热杀菌技术^[10]。近年来,高压二氧化碳、冷等离子体、电解水、高压脉冲电场等一些新型非热杀菌技术也被应用到各类食品研究中^[11]。非热杀菌技术创新的重点是不改变或最大程度保留食品本身的品质,可有效提高生产效率,减少能源消耗,符合当今社会绿色、健康的发展理念。基于以上优势,非热处理技术已引起科学界和工业界的广泛关注,诸多研究也证实了非热杀菌新技术对食品感官、理化等品质方面的有效性。

目前,非热杀菌新技术在食品中的应用研究范围比较广泛,包括果蔬^[12]、谷物^[13]、乳蛋^[14]、水产品^[15]以及肉制品^[16]等。研究主要集中于如何在保证食品感官、营养属性的前提下对食品进行杀菌保鲜并延长货架期,并且在冷冻^[17]、解冻^[18]、干燥^[19]、腌制^[20]等食品加工以及降低食品致敏性方面^[21]也显示出其独特优势。图1总结了非热杀菌新技术在食品中的应用。

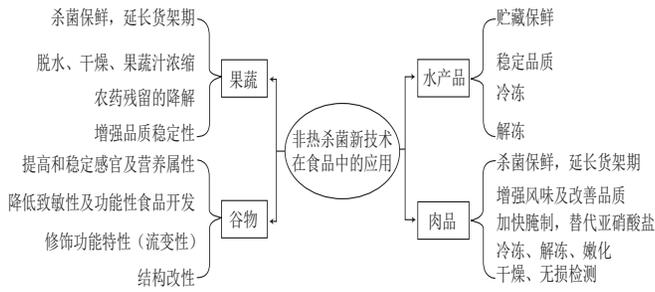


图1 非热杀菌新技术在食品中的应用

Fig. 1 Application of new non-thermal sterilization technologies in foods

尽管国内外专家已经研究证明了非热杀菌新技术的各种潜在用途,但其还存在一定的局限性^[22],仍需不断深入研究,使其达到商业化应用要求。目前,已有学者研究证明将非热杀菌技术与传统热加工技术联合使用效果更佳^[23]。非热杀菌新技术作为一项新型、绿色、环保的加工技术具有广阔的应用前景,是未来食品工业发展的趋势。

2 非热杀菌技术分类及其作用机理

非热杀菌技术能在较低温度或低热效应状态下,达到与传统热处理相同的杀菌效果,根据非热杀菌技术灭活微生物和钝化酶的原理,将其分为力学类、电学类、磁学类及射线类4类。

2.1 力学类非热杀菌技术

以力学为基础的非热杀菌技术主要是在一定温度和特定时间内,利用压力来改变分子间距,致使微生物形态发生改变,并破坏酶的非共价键,使酶的构象和结构发生变化而失活,是一类高效、多靶点杀菌技术^[24],主要有超高压(ultrahigh pressure, UHP)、高压二氧化碳(high pressure carbon dioxide, HPCD)等非热杀菌技术。

UHP杀菌的关键在于压力与时间。有研究报道,在适度加压范围内,施加的压力越大,处理时间越长,灭菌效果越突出^[25]。一般在100~1 000 MPa压力范围内处理一段时间,基本上都可达到灭活要求,因压力的增大使微生物细胞膜遭到破坏,抑制其活性。对于施加压力的方法,针对不同类型食品,连续性和间歇性施压方法可以达到不同的灭活效果^[26]。UHP已被美国食品和药物管理局正式批准为非热灭菌技术^[27]。

HPCD杀菌效果除压力、时间外,还取决于CO₂的相态(气态、液态、超临界状态)。通过加压使CO₂更好地渗透到细胞中,改变细胞内外部CO₂水平,CO₂在胞内溶解后产生酸化效应,降低细胞内pH值并破坏细胞膜结构,从而导致微生物失活^[28]。有人还提出了HPCD的其他灭菌机制,如化学修饰作用、细胞代谢受阻等导致细胞裂解,也有助于该技术的杀菌功效^[29]。另外,该技术在

使用过程中,CO₂可以循环使用,是一种绿色且可持续的新型食品杀菌技术。

2.2 电学类非热杀菌技术

以电学为基础的非热杀菌技术的作用机理大致可分为2种,一是细胞膜电穿孔机制,由于施加在细胞膜上的电压会导致细胞内外的离子产生电位差,致使细胞产生孔洞,从而导致细胞内物质泄漏,造成微生物的生理代谢终止而死亡^[30]。如PEF杀菌技术。另有研究发现,作为一种新型非热杀菌技术,PEF不光在杀菌方面有一定作用,还被应用于食品冷冻^[31]、解冻^[32]等方面,因其具有热效应低、能耗低、效率高、可保持食品“原汁原味”等特点,在食品保鲜及加工领域具有广阔的应用前景。

二是电解产物理论。通过在具有强氧化还原能力的溶液中施加电压,使阴阳两极产生电位差,电解成一种具有特殊物理和化学性质的溶液,可以改变细胞膜通透性,与胞内物质(DNA、核酸等)结合使之变性,微生物代谢受阻而死亡^[33]。如电解水(electrolyzed water, EW)杀菌技术。相对于传统热杀菌技术、化学消毒剂而言,EW不仅具有杀菌广谱高效、操作简便、无污染、安全、环保等优势,同时还能保持食品天然的物理及营养品质,因此成为目前国内外食品科学研究的热点之一。

2.3 磁学类非热杀菌技术

以磁学为基础的非热杀菌技术主要是指利用一定频率范围内的电磁波将微波能量转换为热量,由瞬时产生的热效应使食品中的细菌死亡,热量的转化取决于食物的介电性能^[34]。另外,依据磁场耦合理论,电磁能与食物中微生物细胞内的蛋白质或DNA等关键分子耦合,使细胞的内部成分被破坏而达到灭菌效果^[35]。目前,在食品工业化方面应用的有微波(microwave, MW)杀菌技术、超声波(ultrasonic, US)杀菌技术等。

MW是指频率300 MHz~300 GHz的电磁波, MW杀菌机制主要有热效应和非热效应2种。热效应机制是指高频电磁能转化为热能,使食品内部的水分蒸发,水分通过内部压力梯度扩散到食品表面,使食品瞬时产生较高温度,达到灭菌效果^[9]。而MW杀菌的非热效应机理尚存在争论,仍需进行深入研究,为其提供更多的启示^[36]。MW杀菌不仅可以有效减少食品中潜在的微生物,确保食品安全,还可以保持食品营养。但MW杀菌技术目前还存在加热不均的现象,因此,未来的研究可以集中在开发新颖的组合处理技术上,以提高处理效率,同时保持产品质量和安全性。

US作为一种有前景的非热杀菌技术,相比传统热处理有独特的优势。US处理产生的空化效应能破坏细胞膜的完整性,导致胞内蛋白质和DNA等分子泄漏,从而达到灭活微生物的效果^[37]。另外,有学者通过细菌代谢组

学进行了系统、深入研究,证实了US通过降低相关代谢酶活性来降低细菌代谢的作用机理^[38]。

2.4 射线类非热杀菌技术

以射线为基础的非热杀菌技术作用机理是运用一定波长范围的电离射线(γ射线、X射线、高能电子束射线)的照射作用,致使微生物细胞内的生物分子化学键断裂或生理结构遭到破坏,从而抑制或杀死微生物,以达到保鲜的目的^[39],是一类经济环保、应用范围广泛的非热杀菌技术,主要包括电子束辐照(electron beam irradiation, EBI)杀菌技术、脉冲光照(pulsed light, PL)技术等。

EBI是一种新型的物理杀菌技术。与传统放射性同位素(⁶⁰Co或¹³⁷Cs)辐照相比,具有灭菌高效、耗时短且可避免部分食品因同位素辐照产生异味等优势^[40]。EBI杀菌主要与产生的电子有关,存在2种机制:一是电子与微生物直接接触,破坏微生物的结构和活性物质(H⁺、OH⁻等);二是食品中的水分经辐照产生水合电子,导致分子键断裂,从而降低食品中微生物负荷^[41]。电离射线穿透力较强,对食品内部和表面均有很强的杀菌作用,并且在一定程度上能保持食品原有的感官品质和营养价值^[42]。

PL又称高强度光谱脉冲光,主要由动力单元和光源单元组成,利用瞬时脉冲方式(动力)和惰性气体(光源)照射出高能量的广谱脉冲“白光”,通过光化学、光物理效应达到灭菌目的^[43],其发射电磁辐射的波长范围为100~1 100 nm,包括紫外到近红外区域^[11]。PL具有能量高、持续时间短、作用温度低、安全、无污染和易控制的优点^[44],相比于传统热处理技术优势显著,但在实际生产中,由于穿透率低和光学作用等因素的影响,PL杀菌只停留在食品表面。因此,未来研究中应充分发挥与其他新型加工技术的互补优势,进一步扩大PL的应用范围。

表2系统总结了非热杀菌技术的特点及作用机理。

表2 非热杀菌技术的特点及作用机理

Table 2 Characteristics and mechanisms of non-thermal sterilization technologies

类型	非热杀菌技术	主要参数	作用机理	特点	参考文献
力学类	UHP	温度、压力、时间	加压改变分子间距,破坏生物分子的非共价键,使微生物、酶失活	操作简单;不受食品形状和状态影响;可用于包装内灭菌,减少二次污染;商业化应用最成功	[26-27]
	HPCD	压力、温度	尚未明确:高压、高酸、厌氧环境导致微生物失活	CO ₂ 无毒、易获取、环保、能源利用率高	[28]
电学类	PEF	脉冲频率、电场强度、电极间距	电穿孔理论	温度较低或中等;灭菌快;对食品风味、功能特性影响极小	[30-32]
	EW	pH值、氧化还原电位、有效氯浓度	电解产物理论	制备简单;杀菌广谱高效;无残留毒性、对人体无害;环保	[33]

续表2

类型	非热杀菌技术	主要参数	作用机理	特点	参考文献
磁学类	MW	介电特性、频率、时间	热效应/非热效应	处理时间短、方便快捷、能耗低、效率高	[34-36]
	脉冲磁场	脉冲频率、电压、电流、电场强度	磁场耦合理论	温和灭菌,营养/感官特性下降程度较小	[35]
射线类	US	频率、功率、介电特性	空化效应引起机械作用/物化反应,影响微生物细胞结构,导致其分解失活	成本低廉、简便易操作、能效高	[37-38]
	EBI	辐照剂量、水分含量、pH值	直接作用:电离粒子/射线对微生物造成损害;间接作用:与水作用产生活性分子,使细胞失活	处理时间短;可用于包装内灭菌,避免再次污染;环保,不产生化学有毒物质	[40-42]
	PL	闪光次数、光源与样品间距、光源	形成可中断微生物DNA转录和翻译的产物	快速杀菌;减少对营养成分损害;无化学消毒剂残留	[43-44]

3 非热杀菌技术在肉及肉制品中的应用

3.1 非热杀菌技术在鲜肉中的应用

畜、禽肉因含水量高、营养物质含量丰富而容易被微生物污染,极易腐败变质,导致鲜肉品质和营养价值降低,甚至会引发食品安全问题。冷藏和冻藏是鲜肉保鲜、贮藏的常用方法,其原理是低温可抑制腐败微生物的生长、降低酶活性,减缓生化反应的发生,从而达到保鲜效果。但冷藏和冻藏会对鲜肉风味、质地等品质产生一定负面影响,因此,运用新型非热加工技术作为杀菌保鲜手段已经成为必然趋势。目前国内外许多研究已证明新型非热杀菌技术对鲜肉杀菌保鲜有很好的效果。Sheng Xiaowei等^[45]对比评估弱酸性电解水非热杀菌和化学处理方法(0.1 g/100 mL、pH 4.83±0.03茶多酚溶液浸泡)对4℃条件下贮藏牛肉的微生物和货架期的影响,结果显示,弱酸性电解水杀菌技术表现出较强的杀菌作用,并且可将牛肉的货架期延长约8 d,该研究表明,电解水是一种有效且有前途的灭菌手段。Ulbin-Figlewicz等^[46]研究用He、Ar冷等离子体处理对猪肉表面微生物失活及其对肉色泽和pH值的影响,结果表明,处理10 min后,嗜冷菌数和微生物菌落总数分别减少3、2 (lg (CFU/cm²)),酵母菌数和霉菌数分别减少3.0、2.6 (lg (CFU/cm²)),且处理前后猪肉色泽和pH值无显著差异。新型非热杀菌技术不仅对灭活细菌有显著效果,还能杀死鲜肉中的病毒。Bac等^[4]研究证实,用大气压等离子体射流处理牛肉、猪肉、鸡肉3种鲜肉5 min就可使鼠诺如病毒(MNV-1)和甲型肝炎病毒(HAV)数量分别降低99%和90%,并且可以很好地保持肉品质。

新型非热杀菌技术在鲜肉加工方面也有很大作用,如嫩化^[47]、腌制^[48]、改善风味^[49]等。Bhat等^[50]研究高压PEF处理对牛肉成熟过程中钙蛋白酶活性的影响,发现钙蛋白酶活性、结蛋白和肌钙蛋白-T的水解速率增加,牛肉剪切力减小,且没有观察到高压PEF对牛肉理化性质的显著影响。Suwandy等^[51]用不同频率和压力的高压PEF处

理牛背最长肌,发现肌肉中的蛋白质(肌钙蛋白-T和结蛋白)降解速率加快,剪切力降低19%,牛肉嫩度得到明显改善。另外,新型非热杀菌技术在鲜肉腌制方面也有一定作用。肉类腌制通常包括在新鲜的肉块中添加盐和亚硝酸盐,以改变细胞液渗透压,并通过降低肉的水分活度来增强防腐效果。Mcdonnell等^[48]发现,PEF能够加快NaCl在肉中的渗透速率,使NaCl吸收量增加13%,且对肉的品质影响很小。最近,研究学者还证实新型冷等离子体非热加工技术可以作为替代肉类腌制亚硝酸的天然来源。亚硝酸盐是用于肉类腌制的食品添加剂,可赋予肉类独特的色泽和风味,提高肉品质及安全性^[52]。影响消费者接受度的肉质特征除了感官品质以外,更重要的是食用品质,新型非热杀菌技术在改善鲜肉风味品质方面也有很大作用。曾新安等^[53]研究发现,用频率1 000 Hz、电场强度5 kV/cm的PEF作用于新鲜猪肉10 s,猪肉浸出液中谷氨酸含量增加82.3%,总氨基酸含量增加14.89%,必需氨基酸含量增加12.08%,这一结果强有力地说明PEF非热加工技术可以增强鲜肉鲜味。

3.2 非热杀菌技术在肉制品中的应用

肉制品是指将畜、禽肉经烹制、调味等加工处理制成的成品或半成品,主要分为火腿制品类、香肠制品类、腌腊制品类和干制品类。作为优质蛋白质和多种必需营养素的极佳来源,肉制品对人类营养具有重大贡献。肉制品也成为多种微生物的极佳生长介质,极易被食源性病原体污染,摄入被致病微生物污染的肉制品会导致严重的食源性疾病,甚至死亡,给社会带来巨大的经济负担。因此,迫切需要通过适当的加工方法来提高肉制品的微生物安全性。

近年来,新型非热杀菌技术在肉制品杀菌中的应用受到越来越多的关注。Lis等^[54]研究分别用空气、70% N₂+30% CO₂为载气的常压冷等离子体非热杀菌技术对火腿表面微生物的灭活效果,结果发现,鼠伤寒沙门氏菌菌落数分别减少1.14、1.84 (lg (CFU/g)),单核李斯特菌菌落数分别减少1.02、2.50 (lg (CFU/g))。赵德锐等^[55]研究微酸性电解水非热杀菌技术对切片火腿的杀菌效果,并探讨对火腿品质的影响,结果表明,切片火腿表面菌落总数由1.57 (lg (CFU/g))降至0.97 (lg (CFU/g)),且该技术对火腿感官品质、色泽、质构均无显著影响,表明微酸性电解水技术能够有效控制切片火腿中微生物的安全性并保证其品质不被破坏。Rajkovic等^[56]研究发现,3 J/cm²剂量的脉冲紫外光可有效灭活发酵腊肠表面的致病菌,单核李斯特菌、大肠杆菌O157:H7、鼠伤寒沙门氏菌和金黄色葡萄球菌菌落数分别减少2.24、2.29、2.25、2.12 (lg (CFU/g)),说明脉冲紫外光非热杀菌适用于提高发酵腊肠的微生物安全性和保质期。低感染剂量的病原微生物会在低水分活度(water

activity, a_w)的肉制品中存活较长时间,如大肠杆菌、沙门氏菌等,导致食源性疾病。有研究证实,新型非热杀菌技术对低 a_w 肉制品也有良好的杀菌作用。Schultze等^[57]研究HPCD对牛肉干表面产志贺毒素的大肠杆菌和沙门氏菌的致死效果,结果显示,在5.7 MPa、65 °C条件下处理15 min,所有菌株数量的减少幅度均超过5 (lg (CFU/cm²))。因此,新型非热杀菌技术对肉制品中腐败微生物的抑制和致死有很大应用潜力,还可保持肉制品天然、营养的品质属性,符合当今食品行业的发展趋势。

非热杀菌技术不仅能有效控制肉制品中的腐败微生物,保证肉制品安全,还对肉制品的理化特性有一定作用。Szerman等^[58]研究不同压力的密相二氧化碳处理对羔羊香肠理化特性的影响,结果发现,随着压力的增加和时间的延长,羊肉香肠内部和表面的亮度值、黄度值增加,剪切力、硬度、咀嚼性也出现增加趋势。另有研究表明,处理过程中施加的压力和温度会影响蛋白质分子的相互作用和构象,从而导致蛋白质变性和聚集^[59]。力学类非热处理可能会修饰肉类蛋白质,导致蛋白质之间的相互作用以及凝胶状结构的形成,从而影响肉制品的理化特性。另外,新型非热杀菌技术在改善和增强肉制品品质和风味等方面也有一定作用。游离氨基酸和脂肪酸对肉制品风味的形成至关重要。Pérez-Santaescolástica等^[60]对比研究热处理组(C组)和US非热辅助处理组(US组)对干腌火腿中游离氨基酸和挥发性风味物质的影响,研究发现,US组干腌火腿游离氨基酸含量(6 691.5 mg/100 g)比C组(6 067.5 mg/100 g)高624 mg/100 g,总挥发性化合物含量无显著差异。Ojha等^[61]研究不同超声频率和干燥时间对牛肉干脂肪酸谱的影响,结果表明,超声波处理对牛肉干脂肪酸谱具有显著影响,饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸含量增加,多不饱和脂肪酸含量降低。有报道,饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸能赋予肉制品更好的风味^[62]。Mahendran等^[63]综述了脉冲光非热杀菌技术的原理以及其对肉制品感官及品质方面影响的研究进展,指出该技术可以防止或减少传统热处理对肉制品中营养物质和生物活性化合物的不良影响,并且在火腿、腊肠等肉制品中得到验证。综上所述,非热杀菌技术在肉制品中的应用范围越来越广,可以作为替代传统热杀菌的一项新型安全健康的杀菌技术。

4 结语

目前,我国正处于经济发展模式转型和战略性结构调整的关键阶段,传统的热加工技术已不能满足消费者对肉及肉制品“高营养”、“高品质”的需求,食品加工技术也随着食品消费结构和消费需求不断升级,新型



非热杀菌技术便成为肉及肉制品加工领域的一大热点。食品非热杀菌新技术能在杀灭腐败微生物、延长肉制品货架期的基础上保持食品原有品质，为肉类加工行业的发展注入新动力，使得肉制品加工行业的高科技应用日新月异。

作为一种低能耗、低污染的绿色环保加工技术，食品非热杀菌新技术的开发应用破解了传统热杀菌技术存在的诸多问题，未来发展不容小觑。但是有些技术仍然处于实验研究阶段，不能在实际生产中规模化、商业化应用，主要原因如下：1) 相关技术的作用机制研究尚不深入；2) 机械设备规模大，价格昂贵；3) 相关食品法律法规不健全。因此，研究人员需系统、深入、科学地进行相关基础理论探讨和技术应用研究，加强国内外交流与合作，不仅需要自主创新，更应该全面扩大开放，合作共赢，推进绿色、环保、有效的非热杀菌技术在肉及肉制品加工中的转化和应用，增强我国肉及肉制品加工产业的国际竞争力。

参考文献：

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and agriculture organization statistic[EB/OL]. [2020-05-25]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.
- [2] PANEA B, RIPOLL G. Quality and safety of meat products[J]. *Foods*, 2020, 9(6): 803. DOI:10.3390/foods9060803.
- [3] MISRA N N, KOUBAA M, ROOHINEJAD S, et al. Landmarks in the historical development of twenty first century food processing technologies[J]. *Food Research International*, 2017, 97: 318-339. DOI:10.1016/j.foodres.2017.05.001.
- [4] BAE S C, PARK S Y, CHOE W, et al. Inactivation of murine norovirus-1 and hepatitis A virus on fresh meats by atmospheric pressure plasma jets[J]. *Food Research International*, 2015, 76: 342-347. DOI:10.1016/j.foodres.2015.06.039.
- [5] 李霜, 李诚, 陈安均, 等. 高压脉冲电场对调理牛肉杀菌效果的研究[J]. *核农学报*, 2019, 33(4): 722-731. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.04.0722.
- [6] HERNANDEZ-HERNANDEZ H M, MORENO-VILET L, VILLANUEVA-RODRIGUEZ S J. Current status of emerging food processing technologies in Latin America: novel non-thermal processing[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 58: 102233. DOI:10.1016/j.ifset.2019.102233.
- [7] MORENO-VILET L, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ H M, VILLANUEVA-RODRÍGUEZ S J. Current status of emerging food processing technologies in Latin America: novel thermal processing[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 50: 196-206. DOI:10.1016/j.ifset.2018.06.013.
- [8] BHATTACHARJEE C, SAXENA V K, DUTTA S. Novel thermal and non-thermal processing of watermelon juice[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2019, 93: 234-243. DOI:10.1016/j.tifs.2019.09.015.
- [9] GUO Qiushan, SUN Dawen, CHENG Junhu, et al. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2017, 67: 236-247. DOI:10.1016/j.tifs.2017.07.007.
- [10] HUANG H W, WU S J, LU J K, et al. Current status and future trends of high-pressure processing in food industry[J]. *Food Control*, 2017, 72: 1-8. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.07.019.
- [11] 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.
- [12] SILVA E K, MEIRELES M A A, SALDAÑA M D A. Supercritical carbon dioxide technology: a promising technique for the non-thermal processing of freshly fruit and vegetable juices[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2020, 97: 381-390. DOI:10.1016/j.tifs.2020.01.025.
- [13] BAHRAMI N, BAYLISS D, CHOPE G, et al. Cold plasma: a new technology to modify wheat flour functionality[J]. *Food Chemistry*, 2016, 202: 247-253. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.01.113.
- [14] GUNTER-WARD D M, PATRAS A, BHULLAR M S, et al. Efficacy of ultraviolet (UV-C) light in reducing foodborne pathogens and model viruses in skim milk[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(2): e13485. DOI:10.1111/jfpp.13485.
- [15] AL-QADIRI H M, AL-HOLY M A, SHIROODI S G, et al. Effect of acidic electrolyzed water-induced bacterial inhibition and injury in live clam (*Venerupis philippinarum*) and mussel (*Mytilus edulis*)[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 231: 48-53. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.012.
- [16] ATHAYDE D R, MARTINS FLORES D R, DA SILVA J S, et al. Application of electrolyzed water for improving pork meat quality[J]. *Food Research International*, 2017, 100: 757-763. DOI:10.1016/j.foodres.2017.08.009.
- [17] ZHANG Mingcheng, XIA Xiufang, LIU Qian, et al. Changes in microstructure, quality and water distribution of porcine *Longissimus* muscles subjected to ultrasound-assisted immersion freezing during frozen storage[J]. *Meat Science*, 2019, 151: 24-32. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.01.002.
- [18] RAHBARI M, HAMDAMI N, MIRZAEI H, et al. Effects of high voltage electric field thawing on the characteristics of chicken breast protein[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 216: 98-106. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.08.006.
- [19] MENON A, STOJCESKA V, TASSOU S A. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2020, 100: 67-76. DOI:10.1016/j.tifs.2020.03.014.
- [20] 刘梦, 杨震, 史智佳, 等. 超声辅助腌制处理对牛肉干干燥及理化特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(21): 121-126. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181204-046.
- [21] DONG Xin, WANG Jin, RAGHAVAN V. Critical reviews and recent advances of novel non-thermal processing techniques on the modification of food allergens[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020. DOI:10.1080/10408398.2020.1722942.
- [22] PRIYADARSHINI A, RAJAURIA G, O'DONNELL C P, et al. Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(19): 3082-3101. DOI:10.1080/10408398.2018.1483890.
- [23] KUBO M T, SIGUEMOTO É S, FUNCIA E S, et al. Non-thermal effects of microwave and ohmic processing on microbial and enzyme inactivation: a critical review[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2020, 35: 36-48. DOI:10.1016/j.cofs.2020.01.004.

- [24] 马亚琴, 贾蒙, 成传香, 等. 超高压诱导食品中微生物失活的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(22): 268-275. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021890.
- [25] HUANG H W, LUNG H M, YANG B B, et al. Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing[J]. Food Control, 2014, 40: 250-259. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.12.007
- [26] 刘杨铭, 卢士玲, 王庆玲. 超高压杀菌对酱卤肉制品的影响研究进展[J]. 肉类研究, 2017, 31(8): 55-59. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201708011.
- [27] ADEBO O A, MOLELEKOA T, MAKHUYELE R, et al. A review on novel non-thermal food processing techniques for mycotoxin reduction[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020. DOI:10.1111/ijfs.14734.
- [28] RIBEIRO N, SOARES G C, SANTOS-ROSALES V. A new era for sterilization based on supercritical CO₂ technology[J]. Journal of Biomedical Materials Research, 2020, 108(2): 399-428. DOI:10.1002/jbm.b.34398.
- [29] GARCIA-GONZALEZ L, GEERAERD A H, SPILIMBERGO S, et al. High pressure carbon dioxide inactivation of microorganisms in foods: the past, the present and the future[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 117(1): 1-28. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2007.02.018.
- [30] 张艳慧, 胡文忠, 刘程惠, 等. 光电杀菌技术在鲜切果蔬保鲜中应用的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 309-313. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190627-359.
- [31] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, LE-BAIL A. Effect of freezing under electrostatic field on the quality of lamb meat[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 37: 68-73. DOI:10.1016/j.ifset.2016.07.028.
- [32] JIA Guoliang, LIU Hongjiang, NIRASAWA S, et al. Effects of high-voltage electrostatic field treatment on the thawing rate and post-thawing quality of frozen rabbit meat[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 41: 348-356. DOI:10.1016/j.ifset.2017.04.011.
- [33] CHEN Yihui, XIE Huilin, TANG Jinyan, et al. Effects of acidic electrolyzed water treatment on storability, quality attributes and nutritive properties of longan fruit during storage[J]. Food Chemistry, 2020, 320: 126641. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126641.
- [34] 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. DOI:10.1002/jsfa.9660.
- [35] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave food processing: a review[J]. Food Research International, 2013, 52(1): 243-261. DOI:10.1016/j.foodres.2013.02.033.
- [36] 张柔佳, 王易芬, 栾东磊. 微波加工过程中食品温度分布规律及其均匀性研究[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 270-278. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.014993.
- [37] ARVANITOYANNIS I S, KOTSANOPOULOS K V, SAVVA A G. Use of ultrasounds in the food industry: methods and effects on quality, safety, and organoleptic characteristics of foods: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(1): 109-128. DOI:10.1080/10408398.2013.860514.
- [38] AL-HILPHY A R, AL-TEMIMI A B, AL RUBAIY H H M, et al. Ultrasound applications in poultry meat processing: a systematic review[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(5): 1386-1396. DOI:10.1111/1750-3841.15135.
- [39] LUO Wei, CHEN Anjun, CHEN Min, et al. Comparison of sterilization efficiency of pulsed and continuous UV light using tunable frequency UV system[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2014, 26: 220-225. DOI:10.1016/j.ifset.2014.10.002.
- [40] PILLAI S D, SHAYANFAR S. Electron beam technology and other irradiation technology applications in the food industry[J]. Topics in Current Chemistry, 2017, 375(1): 249-268. DOI:10.1007/978-3-319-54145-7_9.
- [41] KHANEGHAH A M, MOOSAVI M H, OLIVEIRA C A F, et al. Electron beam irradiation to reduce the mycotoxin and microbial contaminations of cereal-based products: an overview[J]. Food and Chemical Toxicology, 2020, 143: 111557. DOI:10.1016/j.fct.2020.111557.
- [42] FELICIANO C P. High-dose irradiated food: current progress, applications, and prospects[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 144: 34-36. DOI:10.1016/j.radphyschem.2017.11.010.
- [43] 张瑞雪, 张文桂, 管峰, 等. 脉冲强光在食品工业中的研究和应用进展[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 305-312. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201723048.
- [44] ARTIGUEZ M L, DE MARANON I M. Inactivation of spores and vegetative cells of *Bacillus subtilis* and *Geobacillus stearothermophilus* by pulsed light[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 28: 52-58. DOI:10.1016/j.ifset.2015.01.001.
- [45] SHENG Xiaowei, SHU Dengqun, TANG Xiajun, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water on the microbial quality and shelf life extension of beef during refrigeration[J]. Food Science and Nutrition, 2018, 6(7): 1975-1981. DOI:10.1002/fsn.3.779.
- [46] ULBIN-FIGLEWICZ N, BRYCHCY E, JARMOLUK A. Effect of low-pressure cold plasma on surface microflora of meat and quality attributes[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2015, 52(2): 1228-1232. DOI:10.1007/s13197-013-1108-6.
- [47] YEUNG C K, HUANG S C. Effects of ultrasound pretreatment and ageing processing on quality and tenderness of pork loin[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2017, 5(11): 809-816. DOI:10.12691/jfnr-5-11-3.
- [48] MCDONNELL C K, ALLEN P, CHARDONNEREAU F S, et al. The use of pulsed electric fields for accelerating the salting of pork[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(2): 1054-1060. DOI:10.1016/j.lwt.2014.05.053.
- [49] CHOI Y M, RYU Y C, LEE S H, et al. Effects of supercritical carbon dioxide treatment for sterilization purpose on meat quality of porcine *Longissimus dorsi* muscle[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(2): 317-322. DOI:10.1016/j.lwt.2007.02.020.
- [50] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Pulsed electric field operates enzymatically by causing early activation of calpains in beef during ageing[J]. Meat Science, 2019, 153: 144-151. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.03.018.
- [51] SUWANDY V, CARNE A, VAN DE VEN R, et al. Effect of pulsed electric field on the proteolysis of cold boned beef *M. Longissimus lumborum* and *M. Semimembranosus*[J]. Meat Science, 2015, 100: 222-226. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.10.011.
- [52] SARANGAPANI C, PATANGE A, BOURKE P, et al. Recent advances in the application of cold plasma technology in foods[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2018, 9: 609-629. DOI:10.1146/annurev-food-030117-012517.



- [53] 曾新安, 高大维, 李国基, 等. 高压电场肉类增鲜效果研究[J]. 食品科学, 1997, 18(4): 37-40.
- [54] LIS K A, BOULAABA A, BINDER S, et al. Inactivation of *Salmonella typhimurium* and *Listeria monocytogenes* on ham with nonthermal atmospheric pressure plasma[J]. Public Library of Science, 2018, 13(5). DOI:10.1371/journal.pone.0197773.
- [55] 赵德银, 高薇珊, 谭雷妹, 等. 微酸性电解水对宣威火腿切片杀菌效果的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(10): 4059-4065. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2016.10.034.
- [56] RAJKOVIC A, TOMASEVIC I, DE MEULENAER B, 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.
- [57] SCHULTZE D M, COUTO R, TEMELLI F, et al. Lethality of high-pressure carbon dioxide on Shiga toxin-producing *Escherichia coli*, *Salmonella* and surrogate organisms on beef jerky[J]. International Journal of Food Microbiology, 2020, 321: 108550. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108550.
- [58] SZERMAN N, RAO W L, LI X, et al. Effects of the application of dense phase carbon dioxide treatments on technological parameters, physicochemical and textural properties and microbiological quality of lamb sausages[J]. Food Engineering Reviews, 2015, 7(2): 241-249. DOI:10.1007/s12393-014-9092-9.
- [59] MESSENS W, CAMP J V, HUYGHEBAERT A. The use of high pressure to modify the functionality of food proteins[J]. Trends in Food Science and Technology, 1997, 8(4): 107-112. DOI:10.1016/S0924-2244(97)01015-7.
- [60] PÉREZ-SANTAESCOLÁSTICA C, CARBALLO J, FULLADOSA E, et al. Application of temperature and ultrasound as corrective measures to decrease the adhesiveness in dry-cured ham. Influence on free amino acid and volatile compound profile[J]. Food Research International, 2018, 114: 140-150. DOI:10.1016/j.foodres.2018.08.006.
- [61] OJHA K S, HARRISON S M, BRUNTON N P, et al. Statistical approaches to access the effect of *Lactobacillus sakei* culture and ultrasound frequency on fatty acid profile of beef jerky[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 57: 1-7. DOI:10.1016/j.jfca.2016.12.007.
- [62] 王娟娟, 周昌瑜, 王冲, 等. 超声波技术在肉品加工中的应用以及对肉品风味前体物质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 320-323; 335. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.053.
- [63] MAHENDRAN R, RAMANAN K R, BARBA F J, et al. Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life[J]. Trends in Food Science and Technology, 2019, 88: 67-79. DOI:10.1016/j.tifs.2019.03.010.