

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80142

食品非热加工技术研究进展

卫文强^{1,2} 毕菡卿¹ 肖招银² 庞桂兵¹ 李明颖¹ 张 慧^{1,2,3,4}

(1. 大连工业大学机械程与自动化学院, 辽宁 大连 116034; 2. 浙江双友物流器械股份有限公司, 浙江 台州 317600; 3. 海洋食品加工与安全控制全国重点实验室, 辽宁 大连 116034; 4. 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁 大连 116034)

摘要:食品非热加工技术作为食品工业的一类新兴技术愈发受到行业关注,在食品营养安全与品质提升方面发挥重要作用。文章重点阐述了食品非热加工技术的工作原理、作用机制及应用情况,包括高压电场、磁场、超高压、离子体、超声波和辐射6类主流加工技术;探讨了当前食品非热加工技术面临的难题与挑战;展望了这些技术的未来发展趋势。

关键词:食品非热加工技术;高压电场;磁场;超高压;作用机制;发展趋势

Research progress of non-thermal food processing technologies

WEI Wenqiang^{1,2} BI Hanqing¹ XIAO Zhaoyin² PANG Guibing¹ LI Mingying¹ ZHANG Hui^{1,2,3,4}

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China; 2. Zhejiang TOPSUN Logistic Control Co., Ltd., Taizhou, Zhejiang 317600, China; 3. SKL of Marine Food Processing & Safety Control, Dalian, Liaoning 116034, China; 4. National Engineering Research Center of Seafood, Dalian, Liaoning 116034, China)

Abstract: Non-thermal food processing technology, as an emerging technology in the food industry, has increasingly attracted attention and plays an important role in improving food nutrition, safety, and quality. This paper focuses on the working principles, mechanisms of action, and applications of non-thermal food processing technologies, including six mainstream methods, *i.e.*, high-voltage electric field, magnetic field, ultra-high pressure, plasma, ultrasound, and radiation. It also discusses the current difficulties and challenges faced by non-thermal food processing technologies and analyzes their future development trends.

Keywords: non-thermal food processing technology; high-voltage electric field; magnetic field; ultra-high pressure; mechanism; development trend

大食物观新时代背景下,公众对食品安全和营养价值更加关注^[1]。然而,食品中丰富的营养成分极易促进微生物的生长,因此需要借助食品加工技术来抑制或消灭微生物活性,为食品营养与安全提供保障^[2]。传统的食品热加工技术虽可通过高温有效灭活微生物和腐败酶,但易导致食品风味劣化和营养素流失^[3],且此类加工方式往往伴随着高能耗和环境负担。因此,食品品质提升和资源能耗降低的协同改进成为食品加工技术的可持续发展

的重要举措^[4]。

食品非热加工技术作为传统热加工痛点的创新解决方案^[5],通过声学、力学、电气、磁性和光学等物理场效应抑制或灭活微生物,同时最大程度上保留食品的原始营养和口感。其低温处理特性可有效保存食品中的蛋白质、维生素和矿物质等重要营养元素,且能源消耗和环境污染远低于传统热加工技术,契合绿色低碳发展需求^[6]。自高压食品加工概念提出以来,国际食品非热加工技术

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2024YFD2101102);辽宁省教育厅科学技术研究(编号:LJKZZ20220063);国家重点研发计划项目(编号:2022YFD2100603)

通信作者:张慧(1990—),女,大连工业大学讲师,博士。E-mail: zh1226419340@163.com

收稿日期:2025-02-24 **改回日期:**2025-08-08

引用格式:卫文强,毕菡卿,肖招银,等. 食品非热加工技术研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 209-217.

Citation: WEI Wenqiang, BI Hanqing, XIAO Zhaoyin, et al. Research progress of non-thermal food processing technologies[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 209-217.

的研究与应用逐渐拓宽^[7]。中国于 20 世纪 90 年代开启了非热加工技术的研究探索。进入“十一五”规划后,政府在 863 计划现代农业技术领域内专门设立了“食品非热加工技术与装备”的研究项目,标志着中国在该领域的研究进入了快速发展的新阶段。

文章拟全面分析不同食品非热加工技术的工作原理、作用机制及应用,进一步对食品非热加工技术的优势进行总结,并探讨食品非热加工技术所面临的挑战及未来发展趋势,旨在为未来食品非热加工技术的发展提供新思路。

1 食品非热加工技术原理及应用

1.1 高压电场

食品高压电场加工技术主要通过施加高压电场使食品发生物理或生物化学变化,实现杀菌、延长保质期、提高食品品质等多重目标^[8]。该技术按照电场的生成模式主要分为高压静电场和高压脉冲电场两类。高压电场的作用机制主要分为 3 种:① 电穿孔理论认为当细胞处于一定强度的电场中时,细胞膜被压缩形成小孔,出现微小的孔隙,通透性增强,小分子进入细胞,引起细胞体积膨胀(如图 1 所示),最终导致细胞膜破裂^[9];② 电崩解理论认为强电场会对物质的微观结构产生极大的作用力,当外加电场达到临界解体电位差时,其结构逐渐发生崩解,该过程从微观的局部区域扩展至整个物质结构;③ 强电作用产生活性氧和带电粒子,它们具有很强的氧化性,可导致微生物细胞膜破裂,失去物质交换能力,进而突变、老化直至死亡,从而有效抑制食品表面的微生物数量。表 1 概述了高压电场技术在不同食品中的应用。

1.2 磁场

食品磁场加工技术主要利用不同类型的磁场,如静

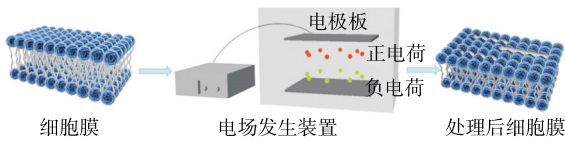


图 1 电穿孔作用机制

Figure 1 Mechanism of electroporation

磁场、振荡磁场、脉冲磁场等,对食品进行处理,以达到改善食品品质、延长保质期、抑制微生物生长等目的^[18]。磁场的作用机制主要有:① 磁场在每个自由基中诱导自旋单重态—三重态跃迁,增加自由基浓度,引起氧化应激进而破坏离子通道,导致细胞形态和不同基因和蛋白质表达的变化^[19];② 改变钙离子通量,使离子通道变形从而改变其活化动力来影响膜通道的性质^[18];③ 直接破坏 DNA 结构^[20];④ 如图 2 所示,磁场可以通过调整食物中水分子的核自旋和电子自旋,使其沿磁场方向排列,减少水分子之间的结合阻力,从而加速冻结速度,并在不破坏细胞膜的情况下形成均匀的小冰晶^[21];⑤ 磁场还能通过改变水分子间的氢键结构,降低水的流动性,抑制冰晶在低温贮藏过程中继续长大,从而维持食品的微观结构稳定^[22]。表 2 概述了磁场技术在不同食品中的应用。

1.3 超高压

食品超高压加工技术(HPP)基于勒夏特列原理和等静力原理^[29],在不加热或仅轻微升温的情况下,利用水或水—油混合液作为介质来传递高压压力,实现对食品进行杀菌保鲜、均质、萃取、脱壳、速冻、解冻处理^[30]。HPP 工作过程(如图 3 所示):预包装食品,即将产品真空包装在合适的柔性材料中(可压缩体积 $\geq 15\%$)^[29,32],然后将带包装食品放入装有加压流体的容器中;加压流体通过泵加压,压力通过真空包装传递到食品上,以最佳的压力—

表 1 高压电场技术在不同食品中的应用

Table 1 Application of high-voltage electric field technology in different foods

电场类型	样品	电场参数	研究结果	文献
静电场	罗非鱼	100~300 kV/m	缓解 ATP 降解,蛋白质变性、脂质氧化和微生物生长,最长延长保质期 2 d	[10]
	猪里脊	10~50 kV/m	更好保持水分状态和颜色,水分损失从 5.7% 下降到 1.7%	[11]
	白菜	4 kV/cm	维持叶绿素和抗坏血酸含量,水迁移率相对降低,微生物数量减少 1.82 log(CFU/g)	[12]
	圣女果	150 kV/m	失重率和变色率分别降低 8.48%~23.00% 和 25.08%~58.57%,提高硬度和维生素 C 含量,增强抗氧化能力	[13]
脉冲电场	太平洋虾	15 kV/cm, 100 ms, 10 Hz	黑化评分和微生物负荷最低,保质期延长 18 d	[14]
	牛肉	0.5~4.0 kV/cm, 5 μ s, 100 Hz	对颜色和蒸煮损失有显著影响,加速牛肉干燥过程	[15]
	牛肉短肋	0.65~0.80 kV/cm, 20 μ s, 50 Hz	脂质和蛋白质氧化水平显著升高,体外蛋白质消化率显著降低,21,42 d 好氧和厌氧微生物数量均低于 10 ² CFU/g	[16]
	葡萄汁	0.85 kV/cm, 45 μ s, 1 kHz	提高果汁产量、抗氧化剂含量和抗氧化活性	[17]

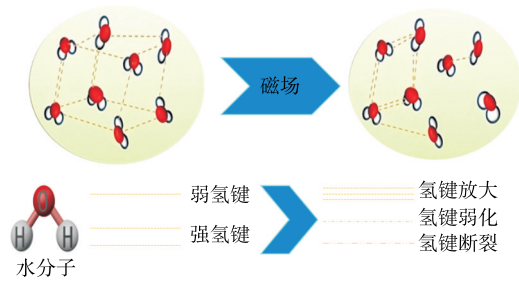


图2 磁场辅助冷冻的过冷现象

Figure 2 Supercooling of magnetic field-assisted freezing

时间组合施加压力,减压后再取出产品。

与传统的热加工技术不同,HPP作用效果均匀^[33],与产品的几何形状和尺寸无关,且不会破坏产品的共价键;

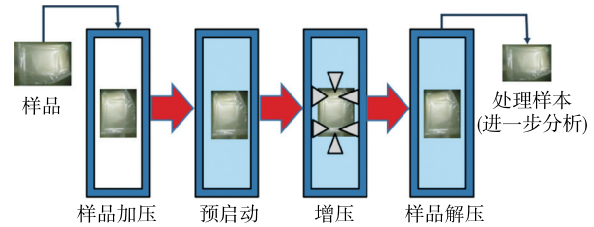
图3 高压处理样本示意图^[31]

Figure 3 High-pressure processing sample diagram

在环境温度或更低的温度下加工,即可快速消除微生物至安全水平,且对食品的营养特性或质量造成的损害最小,增强了食品安全性^[34]。HPP在不同食品中的应用见表3。

表2 磁场技术在不同食品中的应用

Table 2 Application of magnetic field technology in different foods

磁场类型	样品	处理条件	研究结果	文献
静磁场	沙门氏菌	200 mT	暴露3~6 h能够起到一定的抑菌效果	[23]
	蓝莓	6 mT	提高了抗氧化酶活性和相关基因的表达量	[24]
振荡磁场	甜瓜	-8.0~8.0 mT, 1 Hz	失水量显著低于冷冻样品,未发现畸变细胞	[25]
	牛肉	10 mT, 30 Hz	延长肉的保质期,在滴漏损失、颜色和细菌增长方面无明显变化,-4℃下,过冷时间延长1周	[26]
	牛油果	4 mT, 50 Hz	有更好的质地特征和感官品质,减少失重和总多酚含量的下降	[22]
	鲫鱼	1~5 mT, 50 Hz	显著提升鲫鱼的保鲜效果并降低能耗	[27]
脉冲磁场	金枪鱼	脉冲磁场	缩短金枪鱼的冷冻时间,减少对金枪鱼组织的破坏	[28]

表3 高压技术在不同食品中的应用

Table 3 Application of high pressure technology in different foods

应用	条件	样品	研究结果	文献
保鲜	600 MPa, 5 min	鲈鱼片	初始菌落减少5 log(CFU/g),轻度和硬度增加,纤维显得融合且更加紧密	[35]
均质	300 MPa	牛乳	减少脂肪球粒径,防止脂肪上浮,达到无菌状态	[36]
杀菌	300~500 MPa, 5 min	牛肉	相对于未经处理,总有氧计数为6.74 log(CFU/g),高压处理仅为3.35 log(CFU/g), pH值延迟降低,抑制脂质氧化	[37]
萃取	300 MPa, 2 min	铁皮石斛	从铁皮石斛原球茎中分离出3种苷类化合物,且化合物具有良好的性能	[38]
脱壳	400 MPa, 10 min	中华绒螯蟹	显著提高得肉率、水分含量、硬度、胶黏性和咀嚼性,可提高蟹粉和蟹黄的IMP含量	[39]
解冻	50~300 MPa	三文鱼	解冻时间缩短了24.15%~57.20%;总水分损失随着压力的升高明显降低,相较于常规解冻方式最大降幅为11%	[40]

1.4 离子体

食品离子体加工技术是通过特定的设备产生包括离子、电子和自由基等多种活性物质的电离气体,将其用于食品加工处理^[41]。冷等离子体是接近室温的等离子体放电与其他类型的非平衡等离子体。常压下产生冷等离子体的常用技术包括电晕放电、介质阻挡放电、射频等离子体和滑动电弧放电^[42]。如图4所示,冷等离子体的主要机制可以概括为:①细胞膜与带电粒子的化学相互作用,高能电子能够与细胞膜上的分子发生碰撞,引发化学反应;

②细胞壁和细胞成分的损伤,带电粒子的轰击直接破坏细胞壁的物理结构,使细胞壁出现裂缝、孔洞等损伤;③紫外线破坏DNA链,DNA吸收紫外线能量后会发生光化学反应,导致DNA链的断裂,对细胞的遗传物质造成严重损伤^[43]。

在大气压下成功生成空间均匀且控制良好的冷等离子体,为冷等离子体在食品加工、表面杀菌和食品加工设备和器具消毒提供了依据。冷等离子体技术在不同食品中的应用见表4。

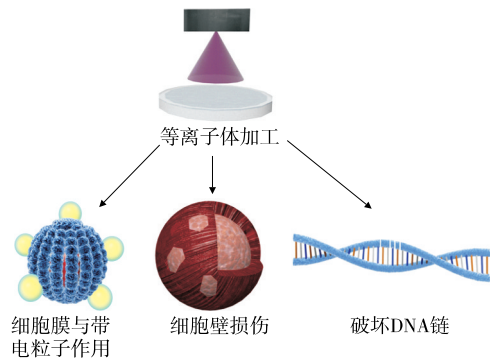


图 4 等离子体处理作用机制
Figure 4 Mechanism of plasma treatment

1.5 超声波

超声波技术是指利用频率>20 kHz的机械波对食品进行处理的技术^[50]。超声波具有频率高、波长短、功率大、穿透力强等特点^[51]。超声波根据能量频率可以分为两类,一类是低能量高频率超声波,其强度<1 W/cm²,频率>100 kHz;第二类被称为高能低频超声,其强度>1 W/cm²,有限频率范围为20~500 kHz^[52]。超声加工的作用机制主要有:① 损伤细胞膜,诱导DNA损伤^[53]。② 超声空化效应。如图5所示,超声空化导致气泡的形成,气

泡逐渐膨胀并最终破裂,使细胞内和细胞质内物质通过受损细胞渗漏,最终消灭细菌^[54]。③ 超声波热效应,超声波使介质中的分子产生振动和摩擦,将一部分超声波的能量转化为热能,使介质的温度升高^[55]。④ 超声波微流效应,微流可以加速物质的扩散和混合,提高化学反应的速率^[56]。

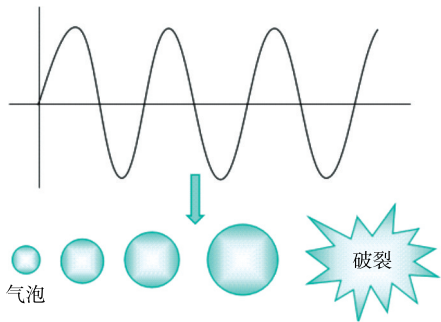


图 5 空化效应
Figure 5 Cavitation effect

在食品加工中,超声波能够产生多种独特的物理和声化学效应^[57],该技术可运用于食品加工的各种操作,例如提取、干燥、过滤、乳化、均质等。超声波技术在不同食品中的应用见表5。

表 4 冷等离子体技术在不同食物中的应用
Table 4 Application of cold plasma technology in different foods

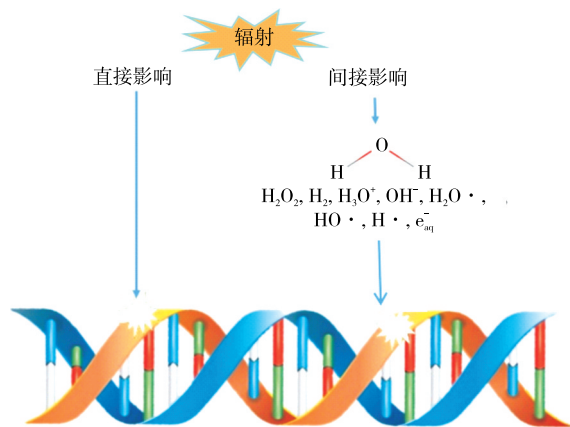
气体类型	处理条件/kV	处理时间/s	样品	研究结果	文献
空气	7	60	蘑菇	菌丝生长速度加快(仅4周),菌丝重量增加两倍	[44]
空气	100	300	鸭胸肉	嗜温菌、嗜冷菌和肠杆菌科的数量分别相比对照组减少1.5,1.4,0.5个对数	[45]
空气	6	1 500	蘑菇	产量提高,灭菌时间缩短,土壤传播病原菌减少,处理25 min后细菌菌落从初始的1.0 ⁹ CFU/mL减少到1.5 ⁸ CFU/mL	[46]
空气	20	300	鸡肉	细菌数量、剪切力和pH值显著降低,感官属性显著改善	[47]
氩气/氧气	6	600	玉米淀粉	有更高的溶解度、透明度、灰分、吸油能力和抗性淀粉	[48]
空气	20	180	羊奶	提高磷酸化程度,增强保水性、溶解度、起泡能力和稳定性	[49]

表 5 超声波技术在不同食品中的应用
Table 5 Application of ultrasound technology in different foods

应用	样品	研究结果	文献
干燥	苹果	提高热传递效率,加速对流干燥	[55]
提取	生物活性化合物	提高提取性能,减少提取时间	[56]
过滤	果汁	渗透通量增加100%,增加膜透性,缩短过滤时间	[58]
乳化	椰子油	液滴尺寸范围为15~43 nm,乳剂稳定性提高	[59]
脱水	虾	预处理15,20 min的脱水时间分别减少15.6%和12.1%,提高虾蛋白质含量	[60]
培育	马铃薯	总产量增加5.7%,商业产量增加5.8%	[61]
解冻	牛肉	加快解冻速度,降低蛋白质和脂质氧化水平,保持肉色稳定性	[62]
油炸	土豆片	平均含水量由49.48%变为60.55%,样品平均轻度指数从63.30变为71.58,减少食品的吸油量	[63]

1.6 辐射

食品辐射加工技术是利用电离辐射对食品进行加工处理的新型加工技术^[64]。辐射的特点是波长短、强度高,能深入穿透食物基质,诱导原子内部离子形成。其对食物的影响可分为初级效应和次级效应^[65]。初级效应涉及微生物细胞、脂质、碳水化合物和氨基酸的高能电子射线直接照射,导致电离和化学变化。次级效应发生在有水存在的情况下^[66],其中辐射和电离会产生各种活性物质与细胞成分相互作用。这些作用共同破坏微生物细胞活动,导致细胞死亡^[67]。辐射的作用机制主要是通过引起细胞物质不同程度的变性来实现^[68]。其中一个主要影响是通过破坏单键和双键并诱导细胞凋亡来直接耗散能量和破坏核苷酸等大分子(图6)。此外,间接放射化学效应在细胞失活中发挥作用,例如,形成的自由基和活性氧可以破坏核酸和其他细胞物质^[69]。辐射技术在不同食品中的应用见表6。



左侧:辐射直接破坏遗传物质DNA或RNA中碱基对之间的结合,导致细胞的生殖死亡;右侧:DNA和其他细胞成分的间接损伤是由水分子断裂产生的自由基和活性氧引起的

图6 辐射对核酸的影响示意图^[69]

Figure 6 Schematic diagram of the effect of radiation on nucleic acids

2 食品非热加工技术面临的问题

2.1 加工工艺

在食品加工领域,不同的非热加工技术在作用机制方面尚未完全明晰。高压电场技术虽被认为通过破坏细胞膜或改变跨膜电位实现杀菌,但其关键作用因子(如电场强度阈值、脉冲频率依赖性)尚未明确;磁场技术对生物大分子的微观作用路径缺乏系统解析;冷等离子体依赖活性氧/氮灭活微生物,但活性物质生成动力学及其靶向作用机制仍需深入探究;辐照引发的食品成分化学转化路径亦未完全阐明。

非热加工技术的工艺参数具有高度耦合性,且其协同效应对不同食品基质的适配规律尚未建立。此外,非热加工技术与其他单元操作(如预处理、包装)的集成化工艺链条研究不足,制约了其工业化应用效率。

2.2 设备方面

非热加工设备的高昂成本限制了技术推广。核心部件(如超高压承压腔体、等离子体电极)的精密制造要求提高了维护费用。目前一些非热加工设备在长时间运行或频繁启停时,可能会出现参数波动的情况,影响加工效果。此外,高压电场非热加工技术的可靠性也有待提高,如电极腐蚀、密封泄漏等问题可能会影响设备的正常运行。

此外,当前非热加工设备往往只针对特定的食品或加工工艺进行设计,缺乏通用性。例如,脉冲电场技术对于处理液态的、电导率相对较高且成分较为均匀的食品有较好的杀菌效果,但固体食品的物理性质和结构特点使得脉冲电场在其中的传播和作用受到限制,难以达到与液体食品相同的效果。

2.3 安全方面

长期亚致死处理可能诱导耐受性菌株。微生物在经过多次高压处理后,可能会逐渐适应这些处理条件,从而降低非热加工技术的杀菌效果。对于采用包装进行非热加工技术处理的加工方式,非热加工技术可能会引起包

表6 辐射技术在不同食品中的应用

Table 6 Application of radiation technology in different foods

辐射类型	剂量/kGy	样品	研究结果	文献
X射线	0.5~11.0	沙门氏菌	水分活度影响X射线在低水分食品中灭活沙门氏菌的效果	[70]
电子束辐射	1~10	培根	颜色保持稳定,高于1 kGy的剂量使样品的黏结性和弹性均有所降低	[71]
	2~6	牛肉饼	辐射处理相对于对照组好氧平板菌数、霉菌、酵母菌数以及总大肠菌群显著降低,感官方面无差异	[72]
伽马射线	5~20	薄膜	膜的强度和拉伸应力分别降低2.8,6.9 MPa,断裂伸长率降低169.5%	[73]
	8~50	苹果种子	增加表面疏水性(708.66~1 740.66),改变蛋白质二级结构, α -螺旋(11.52%~10.43%)、 β 折叠(60.82%~60.13%)和无规卷曲(16.82%~16.19%)减少, β 转角(10.79%~13.22%)增加	[74]
	3~9	油菜籽	辐射后蛋白质回收率为(39.08±3.01)%,抗营养物质减少和功能特性增加	[75]

装材料的化学变化。在高电场、高磁场、高压等极端环境下,包装材料的性能可能会发生变化,包装材料中的有毒物质可能会迁移到食品中,进而影响食用者的身体健康。

3 食品非热加工技术的发展趋势

3.1 技术创新与融合

单一的非热加工技术可能存在一定的局限性,未来将出现多种非热加工技术的联合使用^[76]。例如,将高压处理与脉冲电场技术相结合,在高压作用下,细胞膜会变得更加脆弱,使得脉冲电场的电穿孔效应更为显著,从而增强杀菌效果。两者协同作用能够提高食品的加工质量和效率。非热加工技术还可能与其他领域的技术相融合,如纳米技术可以用于开发新型的包装材料或添加剂,提高非热加工食品的质量和稳定性。

3.2 设备智能化与自动化

随着人工智能和自动化技术的不断发展,非热加工设备将越来越智能化。设备可以通过传感器实时监测加工过程中的各种参数,并根据预设的程序自动调整加工参数,确保加工效果的稳定性和一致性。同时,智能化设备还可以实现故障自诊断和预警,提高设备的可靠性和安全性。非热加工技术将逐渐实现从单机操作向自动化生产线的转变。自动化生产线可以实现食品的连续加工,提高生产效率,降低人工成本^[77]。

3.3 标准与法规完善

随着非热加工技术的广泛应用,相关的质量标准和法规将不断完善。各国政府和国际组织将制定更加严格的质量标准和安全规范,以确保非热加工食品的质量和安全性。非热加工技术的法规认可将进一步加强,这将有助于该技术在食品行业的推广应用。政府部门将加强对非热加工技术的安全性评估和监管,同时也会鼓励企业采用非热加工技术,提高食品的质量和安全性。

3.4 绿色环保可持续

非热加工技术本身具有能耗低、污染少的特点,但仍有进一步提高能源效率的空间。未来的非热加工设备将采用更加节能的设计和技术,如通过调整参数,在保证食品质量和安全性的前提下,降低能源消耗和对环境的影响。设计新型的超高压设备,采用先进的密封技术和压力传递系统,减少能量损失;优化高压电场设备的电极结构和电源设计,提高电能利用率;改进超声波设备的换能器和控制系统,降低能源消耗。

4 总结

食品非热加工技术能够有效杀灭食品中的不良微生物,较大程度地还原食品风味并保留营养物质,减少热能的消耗,降低温室气体的排放,在净菜、预制菜、功能食品、极端环境食品保障等新兴领域展现出广阔的应用前景。但引入非热加工技术的同时还应考虑与食物相关的

安全性因素,进一步完善相关标准;高效、绿色、智能便捷、普适度高的食品非热加工技术有助于推动食品加工产业的升级,提高中国食品产业的核心竞争力,促进食品行业的可持续发展。这与中国的创新驱动发展战略、保障食品安全战略、可持续发展战略和健康中国战略思想高度契合。

参考文献

- [1] WANG S, ZHANG L, WANG H, et al. Magnetic field: a non-thermal technology in food processing[J]. Food Control, 2024, 166: 110692.
- [2] WANG K W, ZHAO Y, XU L, et al. Health outcomes of 100% orange juice and orange flavored beverage: a comparative analysis of gut microbiota and metabolomics in rats[J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100454.
- [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): 2 202.
- [4] WONG B, MUCHANGI K, QUACH E, et al. Characterisation of Korean rice wine (makgeolli) prepared by different processing methods[J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100420.
- [5] 陈林林, 宋佳琪, 李伟, 等. 非热加工技术对淀粉结构特性影响的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 380-393.
CHEN L L, SONG J Q, LI W, et al. Research progress on the effect of non-thermal processing technology on the structural properties of starch[J]. Food Science, 2023, 44(7): 380-393.
- [6] MARIUTTI L R B, REBELO K S, BISCONSIN-JUNIOR A, et al. The use of alternative food sources to improve health and guarantee access and food intake[J]. Food Research International, 2021, 149: 110709.
- [7] 廖小军. 果蔬汁非热加工技术进展[J]. 饮料工业, 2002, 5(6): 4-7.
LIAO X J. Review of non-thermal processing for fruit and vegetable juices[J]. The Beverage Industry, 2002, 5(6): 4-7.
- [8] 白嘉鑫, 董同力嘎, 格日勒图, 等. 低压静电场辅助冻藏对羊肝品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 114-122.
BAI J X, TUNGALAG D, GERELT B, et al. Effect of low-voltage electrostatic field-assisted freezing on sheep liver quality [J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 114-122.
- [9] 齐梦圆, 刘卿妍, 石素素, 等. 高压电场技术在食品杀菌中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 284-292.
QI M Y, LIU Q Y, SHI S S, et al. Recent progress in the application of high-voltage electric field technology in food sterilization[J]. Food Science, 2022, 43(11): 284-292.
- [10] KO W C, YANG S Y, CHANG C K, et al. Effects of adjustable

- parallel high voltage electrostatic field on the freshness of tilapia (*Oreochromis niloticus*) during refrigeration[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 151-157.
- [11] HU R, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Novel assistive technologies for efficient freezing of pork based on high voltage electric field and static magnetic field: a comparative study[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 80: 103087.
- [12] ZHANG X J, ZHANG M, LAW C L, et al. High-voltage electrostatic field-assisted modified atmosphere packaging for long-term storage of pakchoi and avoidance of off-flavors[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 79: 103032.
- [13] ZHAO Y X, LI L C, GAO S D, et al. Postharvest storage properties and quality kinetic models of cherry tomatoes treated by high-voltage electrostatic fields[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 176: 114497.
- [14] AHMAD SHIEKH K, BENJAKUL S, QI H, et al. Combined hurdle effects of pulsed electric field and vacuum impregnation of Chamuang leaf extract on quality and shelf-life of Pacific white shrimp subjected to high voltage cold atmospheric plasma[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 28: 100660.
- [15] BEŇO F, ŠKORPILOVÁ T, POHŮNEK V, et al. Effect of pulsed electric field treatment on beef cuts properties: Tenderness, colour, drip loss, pH, electrical conductivity, water activity, cooking losses, drying[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 89: 103482.
- [16] KARKI R, OEY I, BREMER P, et al. Effect of chilled storage on the quality, *in-vitro* protein digestibility, and microbial growth of sous vide processed beef short ribs pre-treated with pulsed electric field (PEF) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 89: 103485.
- [17] LI Y Y, PADILLA-ZAKOUR O I. Evaluation of pulsed electric field and high-pressure processing on the overall quality of refrigerated Concord grape juice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 198: 116002.
- [18] MIÑANO H L A, DE SOUSA SILVA A C, SOUTO S, et al. Magnetic fields in food processing perspectives, applications and action models[J]. Processes, 2020, 8(7): 814.
- [19] GHODBANE S, LAHBIB A, SAKLY M, et al. Bioeffects of static magnetic fields: oxidative stress, genotoxic effects, and cancer studies[J]. BioMed Research International, 2013, 2013 (1): 602987.
- [20] QIAN J Y, ZHOU C S, MA H L, et al. Biological effect and inactivation mechanism of bacillus subtilis exposed to pulsed magnetic field: morphology, membrane permeability and intracellular contents[J]. Food Biophysics, 2016, 11(4): 429-435.
- [21] ALABI K P, OLALUSI A P, ISA J, et al. Supercooling phenomenon of magnetic field-assisted freezing and its impacts on quality preservation of frozen fruits and vegetables [J]. Food Biophysics, 2024, 19(4): 833-844.
- [22] WANG T, JIN Y M, YANG N, et al. Effect of magnetic field with different dimensions on quality of avocado puree during frozen storage[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(3): 1 698-1 707.
- [23] MAY A E, SNOUSSI S, BEN MILOUD N, et al. Effects of static magnetic field on cell growth, viability, and differential gene expression in Salmonella[J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2009, 6(5): 547-552.
- [24] 杨茜. 静磁场处理对采后蓝莓果实贮藏品质的调控作用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023: 20-50.
- YANG X. Study on the regulation of static magnetic field treatment on the storage quality of postharvest blueberry fruit [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023: 20-50.
- [25] HER J Y, KANG T, HOPTOWIT R, et al. Oscillating magnetic field (OMF) based supercooling preservation of fresh-cut honeydew melon[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(3): 779-785.
- [26] KANG T, HOPTOWIT R, JUN S. Effects of an oscillating magnetic field on ice nucleation in aqueous iron-oxide nanoparticle dispersions during supercooling and preservation of beef as a food application[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(11): e13525.
- [27] 李佳林, 梁超, 黄青. 均匀交变磁场对鲫鱼肉冷冻保鲜效果的影响[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 37-41.
- LI J L, LIANG C, HUANG Q. Effect of uniform alternating magnetic field on freezing and freshness-keeping of crucian carp meat[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2023, 47(6): 37-41.
- [28] OKUDA K, KAWAUCHI A, YOMOGIDA K. Data of the freezing curves of tuna blocks with or without the weak oscillating magnetic fields[J]. Data in Brief, 2020, 31: 105852.
- [29] LIMA V, PINTO C A, SARAIVA J A. The dependence of microbial inactivation by emergent nonthermal processing technologies on pH and water activity[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 89: 103460.
- [30] GOKUL NATH K, PANDISELVAM R, SUNIL C K. High-pressure processing: effect on textural properties of food- a review[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 351: 111521.
- [31] SORIANO CUADRADO B, PEÑAS SANJUAN A, RODRÍGUEZ LÓPEZ J, et al. Effect of high-pressure treatments on the properties of food packaging materials with or without antimicrobials[J]. Polymers, 2022, 14(24): 5 535.
- [32] DHENG R, RINALDI M, RODOLFI M, et al. Modification of structural characteristics of vegetables by high-pressure processing: a review[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103407.
- [33] 石硕, 李清昕, 额尔敦巴雅尔, 等. 高静压技术对鲜切荒漠肉苁蓉品质及苯乙醇苷提取量的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 137-148.
- SHI S, LI Q X, EERDUN B Y E, et al. Effect of high

- hydrostatic pressure technology on quality and phenylethanoid glycoside extraction amount of freshly cut desert cistanche[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 137-148.
- [34] RUSSO G L, LANGELOTTI A L, TORRIERI E, et al. Emerging technologies in seafood processing: an overview of innovations reshaping the aquatic food industry[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(1): e13281.
- [35] TSIRONI T, ANJOS L, PINTO P I S, et al. High pressure processing of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets and tools for flesh quality and shelf life monitoring[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 262: 83-91.
- [36] 艾正文, 徐致远, 叶景锦. 动态高压处理对牛乳中生物活性物质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 210-214, 222.
- AI Z W, XU Z Y, YE J J. Effects of dynamic high-pressure processing on bioactive components of milk[J]. Food & Machinery, 2023, 39(7): 210-214, 222.
- [37] LEE H, SHAHBAZ H M, YANG J, et al. Effect of high pressure processing combined with lactic acid bacteria on the microbial counts and physicochemical properties of uncooked beef patties during refrigerated storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): e15345.
- [38] ZHANG W, ZHANG Y J, WANG J Y, et al. Combined ultrahigh pressure extraction and high-speed counter-current chromatography for separation and purification of three glycoside compounds from *Dendrobium officinale* protocorm [J]. Molecules, 2021, 26(13): 3 934.
- [39] 李彩璐. 超高压协同冷冻处理对克氏原螯虾脱壳效果和品质影响研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2023: 8-42.
- LI C L. Study on the effect of ultra-high pressure co-freezing treatment on the shucking effect and quality of *Procambarus clarkii*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2023: 8-42.
- [40] 李立. 超高压解冻对三文鱼水分迁移及肌原纤维蛋白变性的影响[J]. 包装工程, 2024, 45(21): 174-182.
- LI L. Effects of high pressure thawing on water migration and myofibrillar degeneration of salmon[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(21): 174-182.
- [41] WALDEN R, GOSWAMI A, SCALLY L, et al. Nonthermal plasma technologies for advanced functional material processing and current applications: opportunities and challenges[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(5): 113541.
- [42] 孙慧莹, 李萌萌, 卫可怡, 等. 冷等离子体对谷物品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 427-437.
- SUN H Y, LI M M, WEI K Y, et al. Research progress on effects of cold plasma on cereal quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 427-437.
- [43] KAUR S, KUMAR Y, SINGH V, et al. Cold plasma technology: reshaping food preservation and safety[J]. Food Control, 2024, 163: 110537.
- [44] AGUN L D, AHMAD N, REDZUAN N, et al. Spawn treatment by cold plasma for increase mushroom germination and production[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 884(1): 012004.
- [45] MOUTIQ R, MISRA N N, MENDONÇA A, et al. In-package decontamination of chicken breast using cold plasma technology: microbial, quality and storage studies[J]. Meat Science, 2020, 159: 107942.
- [46] AGUN L, AHMAD N, REDZUAN N, et al. Sterilization of oyster mushroom crop residue substrate by using cold plasma technology[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 39: 903-906.
- [47] ABDEL-NAEEM H H S, EBAID E M S M, KHALEL K H M, et al. Decontamination of chicken meat using dielectric barrier discharge cold plasma technology: the effect on microbial quality, physicochemical properties, topographical structure, and sensory attributes[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 165: 113739.
- [48] BAHMANPOUR H, ASEFI N, ALIZADEH A, et al. Assessment of the impact of cold plasma technology on physicochemical properties of corn starch flour and the associated modified corn starch incorporated into milk dessert [J]. Heliyon, 2024, 10(17): e37399.
- [49] ZHANG J Y, SONG J Q, WANG S S, et al. The casein in sheep milk processed by cold plasma technology: Phosphorylation degree, functional properties, oxidation characteristics, and structure[J]. Food Chemistry, 2024, 457: 140140.
- [50] 屈岩峰, 向岚, 陈田鹏, 等. 超声辅助红松籽油酶法脱胶工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 170-175.
- QU Y F, XIANG L, CHEN T P, et al. Optimization of the process of Korean pine seed oil enzymatic degumming by ultrasound-assisted method and its antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 170-175.
- [51] DONG W, STOMACKIN G, LIN X H, et al. Distortion product otoacoustic emissions: sensitive measures of tympanic-membrane perforation and healing processes in a gerbil model [J]. Hearing Research, 2019, 378: 3-12.
- [52] RANA A. Ultrasonic processing and its use in food industry: a review[J]. International Journal of Chemical Studies, 2017, 5 (6): 1 961-1 968.
- [53] RATHNAKUMAR K, JAIN S, AWASTI N, et al. Ultrasonic processing: effects on the physicochemical and microbiological aspects of dairy products[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2024, 44(8): 1 638-1 652.
- [54] MAJID I, AHMAD NAYIK G, NANDA V. Ultrasonication and food technology: a review[J]. Cogent Food & Agriculture, 2015, 1(1): 1071022.
- [55] KOWALSKI S J, MIERZWA D, STASIAK M. Ultrasound-

- assisted convective drying of apples at different process conditions[J]. Drying Technology, 2017, 35(8): 939-947.
- [56] DZAH C S, DUAN Y Q, ZHANG H H, et al. The effects of ultrasound assisted extraction on yield, antioxidant, anticancer and antimicrobial activity of polyphenol extracts: a review[J]. Food Bioscience, 2020, 35: 100547.
- [57] 毛琪琪, 罗扬, 王姜林, 等. 双翅六道木嫩叶果胶超声波辅助酶法提取及结构表征[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 18-23.
- MAO Q Q, LUO Y, WANG J L, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction and structural characterization of pectin from the tender leaves of *Abelia macrotera*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 18-23.
- [58] NAJI O, AL-JUBOORI R A, BOWTELL L, et al. Direct contact ultrasound for fouling control and flux enhancement in air-gap membrane distillation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 61: 104816.
- [59] SARHEED O, SHOUQAIR D, RAMESH K V R N S, et al. Formation of stable nanoemulsions by ultrasound-assisted two-step emulsification process for topical drug delivery: effect of oil phase composition and surfactant concentration and loratadine as ripening inhibitor[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2020, 576: 118952.
- [60] CASTAÑEDA-LÓPEZ G G, ULLOA J A, ROSAS-ULLOA P, et al. Ultrasound use as a pretreatment for shrimp (*Litopenaeus vannamei*) dehydration and its effect on physicochemical, microbiological, structural, and rehydration properties[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): e15366.
- [61] PSZCZÓŁKOWSKI P, SAWICKA B. Ultrasound application in potato cultivation: potential for enhanced yield and sustainable agriculture[J]. Sustainability, 2024, 16(1): 108.
- [62] LIU J M, LI X F, GENG F, et al. Ultrasound-assisted improvement of thawing quality of Tibetan pork by inhibiting oxidation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 110: 107029.
- [63] SALEHI F, GHAZVINEH S, AMIRI M. Effect of basil seed gum coating and ultrasound pretreatment on frying time, oil uptake, hardness, color indexes, and sensory properties of potato slices[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 110: 107035.
- [64] CHU Z J, WANG H S, DONG B. Research on food preservation based on antibacterial technology: progress and future prospects[J]. Molecules, 2024, 29(14): 3 318.
- [65] MAZHAR A, EL-HANSI N S, SHAFAA M W, et al. Radiation sterilization of liposomes: a literature review[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2024, 218: 111592.
- [66] SONG H Y, KIM K I, HAN J M, et al. Ionizing radiation technology to improve the physicochemical and biological properties of natural compounds by molecular modification: a review[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 194: 110013.
- [67] WEI Q, MEI J, XIE J. Application of electron beam irradiation as a non-thermal technology in seafood preservation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 169: 113994.
- [68] 欧阳梦云, 李文革, 曹胜, 等. 电子束辐照对不同植物油制备的辣椒油类胡萝卜素和辣椒素类物质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 95-101.
- OUYANG M Y, LI W G, CAO S, et al. Effects of electron beam irradiation on carotenoids and capsaicinoids in pepper oils prepared by different plant oils[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 95-101.
- [69] MUNIR M T, FEDERIGHI M. Control of foodborne biological hazards by ionizing radiations[J]. Foods, 2020, 9(7): 878.
- [70] STEINBRUNNER P J, LIMCHAROENCHAT P, SUEHR Q J, et al. Effect of food structure, water activity, and long-term storage on X-ray irradiation for inactivating salmonella enteritidis PT30 in low-moisture foods[J]. Journal of Food Protection, 2019, 82(8): 1 405-1 411.
- [71] NUNES DE SÁ A P, NEGRÃO B G, NABESHIMA E H, et al. Effect of ionizing radiation on traditional and bacon "farofa" [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2021, 179: 109109.
- [72] TOLENTINO M, DIANO G, ABRERA G, et al. Electron beam irradiation of raw ground beef patties in the Philippines: microbial quality, sensory characteristics, and cost-analysis[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2021, 186: 109536.
- [73] MOHAMED T M, SAYED A, MAHMOUD G A. Tuning of the properties of polyvinyl alcohol/polyacrylamide film by phytic acid and gamma radiation crosslinking for food packaging applications[J]. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2023, 62(7): 866-876.
- [74] AHMAD SOFI S, RAFIQ S, MAJID D, et al. Irradiation-induced modifications of apple seed protein isolate: exploring techno-functional, structural, thermal, and morphological characteristics[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2024, 225: 112139.
- [75] XIONG C, ZOU X, PHAN C W, et al. Enhancing the potential of rapeseed cake as protein-source food by γ -irradiation[J]. Bioscience Reports, 2024, 44(3): BSR20231807.
- [76] 马亚琴, 李楠楠, 张震. 脉冲电场技术应用于果蔬汁杀菌的研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 308-315.
- MA Y Q, LI N N, ZHANG Z. Advances in application of pulsed electric field in fruit and vegetable juice sterilization[J]. Food Science, 2018, 39(21): 308-315.
- [77] 廉伟, 陈涛, 廉士军. 食品加工的自动化控制技术[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 255.
- LIAN W, CHEN T, LIAN S J. Automation control technology in food processing[J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 255.