

非热物理杀菌技术在冷链食品中的应用研究进展

赵松松^{1,2*}, 王宏宇¹, 吴子健³, 刘健宇¹, 方成¹, 戴泉玉⁴

(1. 天津商业大学农业农村部农产品低碳冷链重点实验室, 天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134)
(2. 武汉理工大学船海与能源动力工程学院, 湖北武汉 430070) (3. 天津商业大学天津市食品生物技术重点实验室天津 300134) (4. 中国农村技术开发中心, 北京 100045)

摘要: 冷链食品的低温环境能有效抑制病原微生物的增殖, 但对嗜冷菌等特殊病原菌的抑制及灭活作用有限, 存在食品安全隐患。随着食品非热加工技术的飞速发展, 冷链食品领域的非热物理杀菌技术研究已成为当前热点。非热物理杀菌技术包括辐照、紫外线、臭氧、高压电场、脉冲磁场、低温等离子体处理等。基于其高效杀菌且处理过程中无热效应的特性, 非热物理杀菌技术可有效解决果蔬、生鲜肉品以及奶制品等冷链食品腐败菌的低温消杀及品质损耗减少的挑战。该文重点从作用机理、对细菌微生物的消杀效果以及品质影响等角度, 阐述非热物理杀菌技术在冷链食品中应用的研究进展, 并归纳总结了多种非热物理杀菌技术协同下的应用效果以及发展趋势, 为未来冷链食品的高效安全杀菌技术研发与应用提供参考。

关键词: 冷链食品; 非热物理杀菌; 多技术协同应用; 食品安全

文章编号: 1673-9078(2024)12-417-425

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.12.1421

Research Progress on the Application of Non-thermal Physical Sterilization Technology in Cold Chain Food

ZHAO Songsong^{1,2*}, WANG Hongyu¹, WU Zijian³, LIU Jianyu¹, FANG Cheng¹, DAI Quanyu⁴

(1. Tianjin University of Commerce, Key Laboratory of Low Carbon Cold Chain for Agricultural Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin 300134, China)
(2. China School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China) (3. Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, Tianjin 300134, China)
(4. China Rural Technology Development Center, Beijing 100045, China)

Abstract: The low temperature environment of cold chain food effectively inhibits the proliferation of pathogenic microorganisms, but its inhibition and inactivation effects on special pathogenic bacteria such as psychrophilic bacteria are limited, and there are potential food safety hazards. With the rapid development of non-thermal food processing technology in the food industry, research on non-thermal physical sterilization technologies in the field of cold chain food has currently become a hotspot. Non-thermal physical sterilization methods include irradiation, ultraviolet rays, ozone, high-voltage electric field, pulsed magnetic field, and low-temperature plasma treatment. Based on the characteristics of efficient

引文格式:

赵松松,王宏宇,吴子健,等.非热物理杀菌技术在冷链食品中的应用研究进展[J].现代食品科技,2024,40(12):417-425.

ZHAO Songsong, WANG Hongyu, WU Zijian, et al. Research progress on the application of non-thermal physical sterilization technology in cold chain food [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(12): 417-425.

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2022T150503; 2021M702541); 天津市科技计划重大项目(22ZXJBSN00010); 国家自然科学基金项目(51906178)

作者简介: 赵松松(1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 冷冻冷藏及食品保鲜技术, E-mail: songsongzhao@tjcu.edu.cn

sterilization and no thermal effect during processing, non-thermal physical sterilization technologies can effectively resolve the challenges related to low-temperature bacterial sterilization and quality loss reduction for the cold chain foods such as fruits and vegetables, fresh meat and dairy products. In this paper, a focus is placed on the research progress of the application of non-thermal physical sterilization technologies in cold chain food from the perspectives of the mechanism of action, sanitizing effect on bacteria and microorganisms, and impact on quality. Furthermore, the synergistic application effects and development trends of various non-thermal physical sterilization technologies are summarized herein to provide a reference for the research, development and application of efficient and safe sterilization technologies for cold chain food in the future.

Key words: cold chain food; non-thermophysical sterilization; multi-technology collaborative application; food safety

冷链食品是指在从生产到消费过程中需要保持低温状态的食品。它们需要在整个供应链中保持适宜的温度,以确保食品的品质和安全性^[1]。然而,低温环境可抑制食品中腐败或致病菌的生长繁殖,却无法有效杀灭,温度回升后,部分致病菌仍可继续繁殖;此外,一些嗜冷菌如单增李斯特菌,在低温环境仍可生长繁殖,甚至在 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及更低温度下继续存活^[2]。特别是新冠疫情期间,我国海关在进口冷冻虾、冷冻鸡翅的包装以及冷冻鳕鱼中检验分离出活体新冠病毒^[3,4]。因此,如何解决冷链食品杀菌消毒技术优化,是保障冷链食品安全的关键。

非热杀菌技术,也被称为冷杀菌技术,是指在低温条件下对食品或其他物品进行杀菌处理的方法。相较于传统的热杀菌技术,非热杀菌技术能够在较低的温度下进行,减少了热处理过程对食品的损伤,更好地保留了食品的营养成分、口感、色泽和风味等。此外,冷链食品需要在低温环境下保存,以防止品质的劣变,非热杀菌技术通常能够在较短的处理时间内完成,十分高效节能,并且不产生热污染。

非热杀菌技术分为化学杀菌与物理杀菌两种,化学杀菌通过利用化学消毒剂喷洒,实现对细菌的灭杀,物理杀菌则利用外加物理场辅助来灭杀细菌微生物。不同的非热杀菌方法适用于不同的产品和杀菌需求,在对冷链食品应用中,化学杀菌可能会出现消毒剂残留以及低温下杀菌效果减弱的问题。因此,通常使用物理杀菌技术,即利用外加物理场如:辐照、紫外线辐射、臭氧消毒、高压电场、脉冲磁场、低温等离子体、超声波及高压等辅助来灭杀冷链食品中细菌微生物(图1)。非热物理杀菌技术可以在不影响食品品质的情况下杀灭细菌和其他微生物,既能满足消费者对安全健康食品需求,又能保留食品的风味与营养成分。适用于各种冷链食品,如生鲜食品、冷冻食品、乳制品、果汁等。本文综述了几种非热物理杀菌技术单独处理或与其他

技术协同处理对细菌的灭活效果及其机理。分析各种非热物理杀菌技术的研究进展,着重讨论其在冷链食品杀菌行业中的应用,为冷链食品中降低细菌污染提供解决方案。

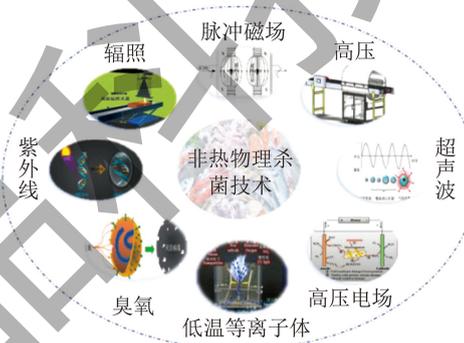


图1 非热物理杀菌技术

Fig.1 Non-thermophysical sterilization technology

1 非热物理杀菌技术

非热物理杀菌技术可以在不对食品进行加热的情况下,对冷链食品及外包装上的微生物进行有效的控制。图2为几种非热物理杀菌技术作用下对细菌微生物影响^[5-8]。相比传统的热物理杀菌方法,非热物理杀菌技术在较低的温度下仍旧可以实现短时高效杀菌,避免了冷链食品贮藏过程中由于微生物污染造成的食品安全问题。这对于一些对温度敏感的食品,如水果、蔬菜、药品等至关重要。此外,非热物理杀菌技术通常是通过物理手段杀菌,不需要使用化学物质,因此不会出现化学残留物造成的二次污染。

1.1 高压电场杀菌技术

高压电场杀菌是利用高压电场的作用对微生物进行灭杀的一种非热杀菌技术。在高压电场的作用下,食品中带电粒子会发生定向移动,进而影响细菌内部物质流动与能量分布,破坏其内环

境。该技术具有杀菌效果显著、高效、低能耗和无污染的优势。目前，高压电场杀菌技术常用的两种电场类型为：高压脉冲电场（High-Voltage Pulsed Electric Field, HVPEF）与高压静电场（High-Voltage Electrostatic Field, HVEF）。

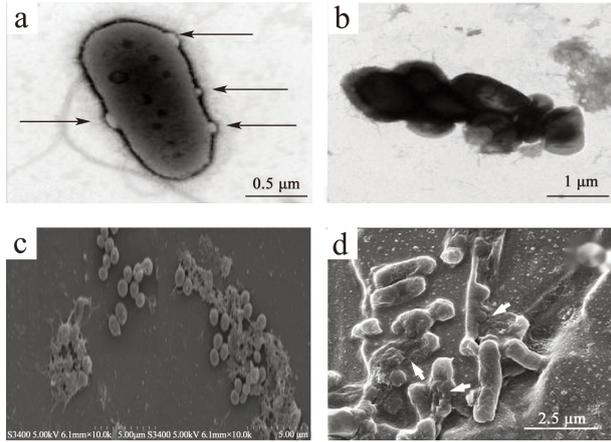


图 2 扫描电镜下不同非热物理技术处理细菌图像

Fig.2 Bacterial images treated by different non-thermophysical techniques under scanning electron microscopy

注：(a) 脉冲磁场处理后大肠杆菌；(b) 超声波处理后大肠杆菌；(c) 脉冲电场处理后的金黄色葡萄球菌；(d) 臭氧处理后大肠杆菌。

当细胞暴露在电场中时，在电场力的作用下使

细胞膜内外的阴阳离子开始移动，并在细胞膜附近重新排列，使细胞膜内外的电势差增大，细胞膜失稳形成小孔。随着细胞膜通透性不断增加，小孔不断扩大，在渗透压的作用下细胞外物质进入细胞内使细胞膨胀，导致细胞膜的破裂，使细菌死亡^[9-11]。

高压电场处理过程中不产生热效应，十分适合热敏性食品的杀菌。其对冷链食品中常见的大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、单增李斯特菌等细菌均有明显的灭杀效果^[12]。

高压电场处理后可以有效延长冷链食品货架期，并减少食品在冷链过程中的污染和交叉感染的风险，可以在不破坏食品品质的情况下杀死细菌、病毒和真菌等微生物，从而保证食品的安全性和卫生性。此外，高压电场与低温联合处理，相比于单独应用高压电场处理或低温处理，对细菌抑制效果更为明显。同时，还能降低所需的电场强度低于单独应用电场时的要求^[19,20]。

1.2 脉冲磁场杀菌技术

脉冲磁场（Pulsed Magnetic Field, PMF）是一种动态磁场，可以在食品加工过程中对细菌快速灭活，且在灭菌过程中，食品的温升不超过 5 °C^[21]。脉冲磁场处理过程中，微生物细胞受到磁场和诱导电场的影响，产生磁性穿孔，导致细菌内物质外流，使细菌死亡^[22]。

表 1 HVPEF与HVEF处理对典型食品杀菌品质影响

Table 1 Bactericidal effects of HVPEF and HVEF in several typical foods

电场类型	食品种类	微生物类型	杀菌效果	对食品品质影响	参考文献
HVEF	樱桃番茄	大肠杆菌	果实表面大肠杆菌菌落总数降低 1.44~2.15 lg CFU/g	显著降低樱桃番茄的腐败率；减少果实采后贮藏期乙烯释放量	[11]
	柑桔果实	表皮病原菌	大幅度降低柑桔果实表皮真菌数量 约 3.54 lg CFU/mL	降低了柑桔采后呼吸速率和失重率；提高了葡萄糖和果糖含量与整个贮藏过程中的 IAA 含量，延缓果实衰老。	[12]
	奶酪	微生物总数	奶酪的总活菌数以及有害细菌种类减少，调节了细菌菌落水平结构。	处理后的奶酪水分活度更低；挥发性物质酯类、酸类和酮类都有更好的保留，感官评价中奶酪的滋味和气味评分更高。	[13]
	鲶鱼鱼片	菌落总数	显著降低了黄杆菌和地杆菌数量，贮藏 7 天后，相对于对照组菌落总数减少 1.78 lg CFU/g	降低鲶鱼鱼片贮藏期内的滴水损失与 pH 值，同时，抑制了鱼肉中蛋白质和的脂质氧化。	[14]
HPVEF	原牛乳	菌落总数	场强 35 kV/cm 及脉冲数 2 000 时，灭菌率可达 90.98%	极值条件下使原牛乳游离氨基酸含量增长了 14.09%，保全原牛奶风味的同时增加了原牛乳的营养。	[15]
	葡萄酒	腐败微生物	场强 29 kV/cm 处理，葡萄酒中的腐败菌群减少了 99.9%	促进了酵母细胞的葡萄糖代谢活性、乙醇转化速率。	[16]
	调理牛肉	菌落总数	场强 45 kV/cm、频率 30.5 kHz、处理 7 min，细菌致死率达到 87.33%	处理后调理牛肉的感官品质无显著劣变，货架期延长 2 d	[17]
	果汁	大肠杆菌；鼠伤寒杆菌	场强 35 kV/cm 使大肠杆菌数量减少 6.27 lg CFU/mL，鼠伤寒杆菌数量减少 6.32 lg CFU/mL。		[18]

脉冲磁场能够影响细菌的迁移方向与生长和繁殖进程，细菌的失活效果与脉冲磁场过程参数以及食物的特性息息相关^[23]。通常弱脉冲磁场更能激活和促进细菌生长，而强脉冲磁场可杀死细菌。研究发现^[24]，脉冲磁场中大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的总数随着电压、磁场强度和脉冲数的增加而减少。但当磁场强度和磁场持续时间达到特定值时，灭菌效果显著下降。此外，当脉冲磁场的频率与细菌的固有频率发生共振时，杀菌效果更好；如果所选的频率是细菌的吸收频率，则脉冲磁场会刺激细菌繁殖^[22](见图3)。针对于不同的细菌种类的灭杀效果，相关学者进行了大量研究(表2)。

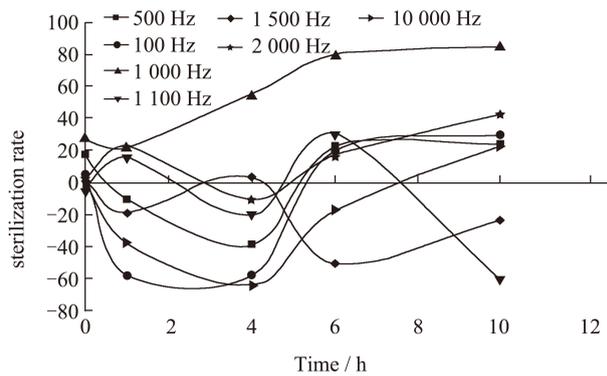


图3 不同频率下脉冲磁场对水中异养细菌的杀菌率

Fig.3 Sterilization rate of heterotrophic bacteria in water by pulsed magnetic fields at different frequencies

当前，脉冲磁场主要应用于果蔬汁、牛奶、啤酒等液体饮品的杀菌过程，因为PMF对食品材料具有深层的渗透能力。通过物料流动，可以增强液体材料的传质效果，有利于彻底灭菌。脉冲磁场应用效果与处理次数及强度息息相关，食品中致病菌数目随着处理次数的增加而减少。Luo等^[31]研究发现，PMF对牛初乳进行处理，可以在维持其营养成分的同时，对细菌灭杀(致死率>99.9%)。

此外，PMF技术与其他技术进行协同也取得了良好的效果。

PMF灭菌技术已被证明是一种省时、环保的生产高质量的方法，在冷链食品杀菌领域具有广阔的应用前景。但脉冲磁场技术的工业化推广还处于研究和发展阶段，尚需进一步的实验和验证。

1.3 低温等离子体杀菌技术

作为一种新兴的冷杀菌技术，低温等离子体在食品冷链杀菌应用中具有重要意义。该技术可以有效抑制冷链食品中微生物的生长和繁殖，还能分解食品表面的农药残留，从而提高食品的安全性和品质。在低温等离子体中，原子、分子和自由基等粒子具有高度活性。当这些活性物质与微生物细胞表面接触时，它们会对细胞膜、蛋白质等生物大分子造成损伤，导致细胞死亡^[32]。

低温等离子体通过释放高能电子和活性氧等物质，可破坏微生物细胞结构，降低食品中病原菌数量，从而提高食品安全性。研究发现^[33]，在12 kV电压、5 Hz频率下，仅需60~90 s处理即可使蓝莓中总需氧菌及霉菌分别减少0.34~1.24 lg CFU/g和0.57~0.87 lg CFU/g。Wang等^[34]采用21 kV处理苹果汁30 min，使苹果汁中酵母(罗氏合糖菌)降低了5.6 lg CFU/g，同时保持理化特性不变。徐慧倩等^[35]研究发现，在南美白对虾冷藏期间，采用低温等离子体短时处理，可以有效减缓南美白对虾的腐败变质，同时对南美白对虾的质构特性、色泽保持的效果也有明显的提升。王小媛等^[36]以苹果汁为原材料，对比了低温等离子体与热杀菌处理对果汁品质的影响，发现等离子体和热处理后均可完全灭杀细菌，但等离子体处理使可溶性固形物含量最高增加17.73%，总酚和黄酮含量能较好保持，而热处理使黄酮含量最大降低6.34%。

表2 不同强度下脉冲磁场杀菌效果

Table 2 Sterilization effect of pulsed magnetic field under different intensity

细菌种类	处理条件	显著结果	参考文献
大肠杆菌 ATCC 8099	场强: 2.5 T, 脉冲数: 20, 温度: 30 °C	大肠杆菌 8099 的存活率显著降低 (18.3%)	[25]
大肠杆菌 O157: H7	场强: 8 T, 脉冲数: 20	经3次PMF处理后, 最低残余率为28.38%	[26]
枯草芽孢杆菌 6633	场强: 3.3 T, 脉冲数: 30	最低存活率为33.87%, 细菌细胞的形态改变, 细胞膜的通透性增加	[27]
格雷李斯特菌	场强: 2.5 T, 脉冲数: 25	细胞膜受损, 发现细胞内Ca ²⁺ 荧光强度与菌落数量之间存在显著的负相关	[28]
铜假单胞菌	场强: 0.5 T, 频率: 0.7 Hz, 持续时间: 1 h	抑制细菌细胞生长	[29]
灰石磁螺旋体	场强: 125 mT, 脉冲数: 400	趋磁细菌活细胞悬液中存在轻度细胞完整性损伤, 出现囊样细胞和异常磁小体链	[30]

此外,低温等离子体还能分解食品表面农药残留,降低农药含量。Sarangapani等^[37]应用介质阻挡放电技术,在80 kV电压下,对蓝莓处理5 min,对吡啶胺降解效果达80.18%,吡虫啉为75.62%,且不影响蓝莓质量参数。然而,其在食品工业中的应用也存在着某些局限性。虽然对食物表面有良好的杀菌效果,但食物的厚度较大时,对深层细菌的杀菌效果不好;若加工时间等因素控制不佳,食品的颜色、pH值等也可能发生改变^[38]。

低温等离子体技术在冷链食品中的应用具有广泛的前景,有助于提高食品的品质、安全性和保质期,降低食品冷链过程中的损耗和污染。但目前仍处于初步阶段,需要进一步研究和技术优化。

1.4 辐照杀菌技术

辐照是一种常用的非热杀菌方法,可在冷链食品中应用,有效减少食品中的微生物数量,延长冷链食品的货架期。辐照杀菌技术机理为:射线直接作用于细菌蛋白质、脂类和核酸,使其发生断裂、交联、降解等一系列化学反应。同时,辐照使细胞中水分子分解,产生水合电子、氢原子、羟基自由基、过氧化氢等带电物质作用于生物大分子,导致其结构破坏,从而杀死细菌^[39,40]。

辐照杀菌技术具有高效、便捷、无污染等特点,其在冷链食品中如冰冻畜禽肉有着广泛应用。并且低温工况下应用,不但可以增强辐照杀菌效果、减少辐照剂量还能更好的维护食品贮藏期的品质,延缓其贮藏期腐败劣化进程^[41,42]。沈阿倩等^[43]在低温下应用⁶⁰Co- γ 射线对油塔子进行处理,不但灭杀了油塔子表面的细菌,而且后续低温贮藏期间也抑制了油塔子酸价和过氧化值的升高。通常辐照处理真空包装的冷鲜畜禽肉时,剂量与食品的品质有一定关系,发现不高于7 kGy剂量的辐照作用对肉类的感官品质、嫩度及滴水损失影响较小;但7 kGy剂量辐照会降低肉类色差值以及嫩度^[44]。

另外,对于冷冻食品的杀菌处理时,细菌会对辐照产生一定的抗性。处理顺序也对辐照剂量以及杀菌效果造成一定影响。Nereus等^[45]通过探究冷藏及冷冻(4、-20℃)工艺下辐照处理对鸡肝中空肠弯曲杆菌的影响,发现辐照前对鸡肝冷冻处理,会增加空肠弯曲杆菌的辐照抗性,相对于常温组需要更大的辐照剂量才能使空肠弯曲杆菌数量低于检测限。但是,将鸡肝先用辐照技术处理,后置于低温环境下贮藏,不但可以起到良好的杀菌效果,而且

储藏过程中鸡肝中空肠弯曲杆菌的数量仍可进一步减少。

辐照是一种可行的非热物理杀菌方法,在冷链食品中应用,可以提高食品的安全性,同时保持食品的质地和营养价值。但在应用过程中,要根据使用工况确定合适的处理剂量和时间,以避免辐照对某些食品成分和质地产生负面影响。

1.5 紫外杀菌技术

紫外线辐射可以在短时间内完成杀菌处理,这对于冷链食品的生产和加工过程非常重要,可以减少生产时间和提高生产效率。同时,延长冷链食品的保质期,提高食品的安全性。在处理过程中,短波紫外线对细菌内部的遗传物质的分子结构造成影响,诱使细菌中的部分氨基酸和核酸产生光化学反应,导致生物体的DNA生物活性被改变,生物体丧失复制、繁殖能力,从而导致细菌的死亡。

例如:15 W紫外灯在移动包装材料上方20 mm位置垂直照射5.6 s,即可完全灭活表面的细菌^[46]。石英型紫外杀菌灯(强度 $\geq 90 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)只需照射90 s后,即可灭杀炼乳空桶99.9%的细菌^[47]。另外,紫外线的杀菌效率与照射时间以及剂量相关。然而,高剂量照射虽然可以更有效地杀灭细菌,但长时间暴露在高剂量紫外线下,食物中的营养物质,如维生素和氨基酸,会遭到破坏或降解,导致营养价值的损失。在冰箱及对冷链食材处理过程中需要控制剂量。胡海梅等^[48]在冰箱中加入波长为275 nm的深紫外光灯进行杀菌研究,发现灭杀冰箱内99%的大肠杆菌需要60 min,延长了处理时间,也保证了冰箱内储藏食品的安全性。新冠疫情期间,光莆电子公司研发的安盾冷链智控消毒防疫系统采用新型UVC杀菌技术,能在常温或-20℃的条件下,在6~10 s内对货物表面完成360°无死角的消杀,对新冠病毒的灭菌率可达到99.9%。

紫外线辐射技术在冷链食品中应用,可以提高食品的安全性和保鲜度。但是,紫外线辐射在杀菌过程中对微生物的杀灭效果会受到多种因素的影响,如处理时间、辐射距离和微生物的种类等。在应用紫外线辐射于冷链食品时,需要根据不同的产品和杀菌需求确定合适的处理参数,以确保杀菌效果。

1.6 臭氧杀菌技术

臭氧是一种具有极强氧化能力的气体,可与细

菌细胞壁中的部分蛋白质发生氧化还原反应，使细菌细胞壁通透性增加，细胞内物质流出，细菌分解死亡^[49,50]。在食品冷链应用中，不但能够有效地减少冷链食品中的微生物数量，提高食品的安全性。同时，臭氧凭借强氧化性能消除冷链食品中的异味和污染物，提高食品的品质和口感，在冷链中已有广泛应用。

例如：对装载进境冷冻食用动物产品的集装箱进行臭氧杀菌，可使冷藏集装箱内动物产品外包装纸箱表面微生物的杀灭率达到 99.7%^[46]。此外，将臭氧运用在果蔬冷链贮藏过程中，还可以抑制果蔬的呼吸作用，减少乙烯气体的生成，抑制果蔬的成熟过程维持其新鲜品质。如在低温贮藏过程中使用低剂量的臭氧对苹果进行连续处理，有效控制鲜苹果上的李斯特菌数量的同时延缓果实成熟^[7]。Tabakoglu 等^[51]在低温贮藏黑桑葚实验中也得到类似的结论，其中相比于其他样品储存于臭氧环境下的黑桑葚肠杆菌科细菌数目更低，质量损失率更小，抗坏血酸水平更高。在冷链食品中，将臭氧用于冷库等生鲜食品低温储藏场所，可以保障食品安全和延长食品货架期。

2 非热物理杀菌技术联合应用

在实际应用中，单一非热物理杀菌技术可能需要较长时间或较高能量消耗才能达到理想的杀菌效果，此外，部分细菌、病毒或孢子可能对某一杀菌技术有一定的抵抗性，进而无法完全灭杀细菌。因此，通常需要综合运用多种非热杀菌技术进行联合应用。非热杀菌技术联合应用是指将多种非热物理杀菌方法结合互补，以提高冷链食品的安全性和保鲜性。其不仅能克服单一杀菌技术的局限性，而且在联合应用过程中能够产生协同效应，使细菌的灭活效果大于各技术单独应用时杀菌的总和^[52]。已有研究表明^[53-58]，紫外线与臭氧、超声波与脉冲电场、高压与超声、脉冲电场与低温等离子体、超声波与臭氧、低温等离子体与臭氧（见图 4b）以及局部电场与臭氧^[58]等技术的联用可以提高杀菌效果，同时，不影响冷链食品的质地和营养成分。紫外线与臭氧联合应用时，可以产生协同效应，紫外辐射激活氧气生成臭氧，臭氧吸收紫外辐射形成紫外臭氧反应体系，提高杀菌效果，抑制细菌对单一抗性抗性的形成，以确保杀菌效果的长期稳定性（见图 4a）。Epelle 等^[53]研究了紫外线与臭氧协同系统对大肠杆

菌、金黄色葡萄球菌等细菌在不同基质表面的灭杀效果，发现紫外线与臭氧产生了良好的协同效果，臭氧的渗透性可以弥补紫外光穿透性差的问题。同时，紫外光的应用减少了杀菌过程中臭氧的使用剂量。

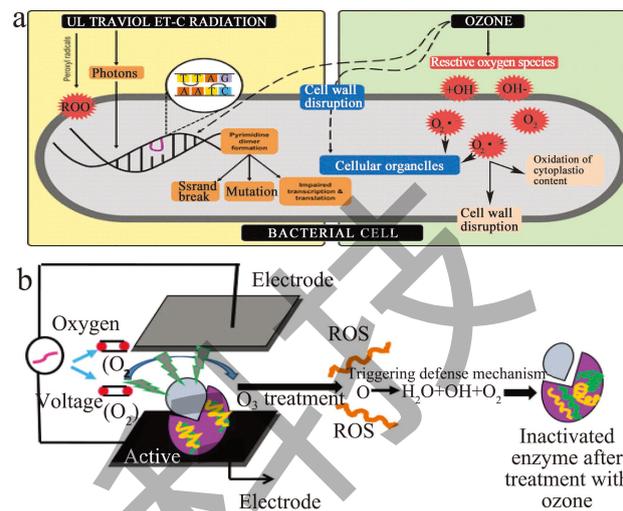


图 4 多技术协同杀菌

Fig.4 Multi-technology collaborative sterilization

注：(a) 臭氧和紫外线灭活细菌细胞的机制；(b) 臭氧和低温等离子体灭活细菌机制。

超声波与脉冲电场的联合应用时，超声波增加了细菌细胞膜的通透性，使脉冲电场更容易进入细胞内部，加强脉冲电场的杀菌效果。Aadil 等^[54]对西柚汁应用超声和脉冲电场协同处理，发现二者协同可以有效抑制西柚汁中的细菌生长繁殖，且效果优于单独使用超声或脉冲电场处理。

然而，非热物理杀菌技术进行协同是一个非常复杂的过程，联用时需要确定合适的处理顺序、剂量和时间，并根据具体情况进行调整和优化。因为，多种技术的联合不仅会产生协同效应，还可能会出现加性效应。例如 Pyatkovskyy 等^[55]对非致病性无害李斯特菌悬浮液进行了高压（HPP）、脉冲电场（PEF）和超声处理的组合研究。发现连续应用高压和脉冲电场处理主要呈现加性效应，两者同时作用时，会呈现协同效应，增强杀菌效果。此外，高压和超声处理的组合，在高压处理后进行超声处理时表现出协同效应，而在超声处理后进行高压处理时表现出加性效应。此外，两种技术的协同效果的强弱也与应用的顺序有关，Zhang 等^[56]研究发现，虽然脉冲电场与低温等离子体联合应用会出现协同效果，但是当首先用低温等离子体处理样品时，观察到显著的协同抗菌效果。当首先用脉冲电场处理

样品时,仅观察到轻微的协同作用。原因可能是等离子体处理后细菌悬浮液的酸化可能是支持暴露于脉冲电场诱导的后续反应机制。需要注意的是,在实际应用中,不同非热物理杀菌技术的组合应该考虑技术之间的相容性和适用性,以及对食品的适用性和安全性。以及联合应用也可能增加操作复杂性和成本,需要进行综合考虑实际情况进行合理的选择和平衡。

综上所述,非热物理杀菌技术的联用可以充分发挥各种技术的优势,进一步提高冷链食品的杀菌效果,延长食品的保质期,保持冷链食品的质地和营养成分,对于未来冷链安全领域的发展具有重要的意义。当前,非热杀菌技术的协同应用在食品工业中仍处于研究和发展阶段,后续需要更多的实验去验证不同杀菌技术联用时的相容性和可能产生的相互作用。

3 结论

非热物理杀菌技术可以在低温条件下对食品进行处理,在不改变食品品质的前提下,有效地杀灭微生物。本文综述了冷链食品领域的非热物理杀菌技术的研究进展,并对其在解决冷链食品的细菌污染问题方面的应用进行了重点探讨。

(1) 对于单一非热物理杀菌技术,能有效解决微生物污染问题,并提高食品的安全性和品质。其中,辐照、紫外线与臭氧杀菌技术在食品冷链行业已有较为广泛的应用,高压电场与脉冲磁场杀菌技术的应用正在兴起。然而,非热杀菌技术研究尚不成熟,仍有许多技术问题需要解决如:非热杀菌技术在不同环境条件下的杀菌效果存在一定的波动性,以及一些非热杀菌技术的设备和材料成本较高,限制了其在产业化应用中的推广和应用范围。

(2) 解决单一物理场杀菌的局限性,多种非热杀菌技术协同应用,可以使多技术优势互补,杀菌效率远超单一杀菌技术。同时,降低对食品品质的影响。例如,辐照与紫外线的联合使用以提高杀菌效果;臭氧与高压电场的组合可以实现低浓度臭氧杀菌,多技术协同研究将进一步推动非热物理杀菌技术在冷链食品中的应用。但多技术的协同过程具有复杂性,当前研究还处于初级阶段,有着很大的研究发展空间。

(3) 非热物理杀菌技术在未来有着广阔的发展前景。今后可以从以下几个方面加以改进提升,以

更好地实现非热杀菌技术的产业化应用。首先,进一步优化非热杀菌技术的操作参数、设备设计和材料选择,提高稳定性和效果一致性,降低成本,缩短处理时间。其次,结合不同的非热杀菌技术,形成多技术协同的杀菌方案,提高杀菌效果和减少副作用。最后,在研发非热杀菌技术时需要更多地考虑对食品质量和营养的影响,保证杀菌效果的同时尽量减少负面影响。

参考文献

- [1] SHA Y S, HUA W S, CAO H F, et al. Properties and encapsulation forms of phase change material and various types of cold storage box for cold chain logistics: A review [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55(PA): 105426.
- [2] SALDIVAR J C, DAVIS M L, JOHNSON M G, et al. *Listeria monocytogenes* adaptation and growth at low temperatures: mechanisms and implications for foodborne disease [J]. *Food and Feed Safety Systems and Analysis*, 2018: 227-248.
- [3] CHEN W J, CHEN C L, CAO Q et al. Time course and epidemiological features of COVID-19 resurgence due to cold-chain food or packaging contamination [J]. *Biomedical Journal*, 2022, 45(3): 432-438.
- [4] DOREMALEN N V, BUSHMAKER T, MORRIS D H, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1 [J]. *New England Journal of Medicine*, 2020, 382(16): 1564-1567
- [5] QI M Y, ZHAO R Q, LIU Q Y, et al. Antibacterial activity and mechanism of high voltage electrostatic field (HVEF) against *Staphylococcus aureus* in medium plates and food systems [J]. *Food Control*, 2021, 120: 107566.
- [6] LIN L, WANG X L, CUI H Y. Synergistic efficacy of pulsed magnetic fields and Litsea cubeba essential oil treatment against *Escherichia coli* O157: H7 in vegetable juices [J]. *Food Control*, 2019, 106: 106686.
- [7] SHENG L N, SHEN X Y, SU Y, et al. Effects of 1-methylcyclopropene and gaseous ozone on *Listeria innocua* survival and fruit quality of Granny Smith apples during long-term commercial cold storage [J]. *Food Microbiology*, 2022, 102: 103922.
- [8] FAILOR K C, SILVER B, YU W, et al. Biofilm disruption and bactericidal activity of aqueous ozone coupled with ultrasonic dental scaling [J]. *Jada Foundational Science*, 2022, 1: 100003.
- [9] 让一峰,陈晓婵,田一雄,等.高压脉冲电场强化杀菌对哈密瓜汁品质的影响[J].*食品研究与开发*,2019,40(17):105-109.
- [10] 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.
- [11] 杨智超,曹阳,沈超怡.基于高压静电场处理的樱桃番

- 茄果实贮藏期生理品质及其代谢[J].食品科学,2021,42(21):168-176.
- [12] 吴珏,谢文华,徐淑婷,等.高压静电场处理对椪柑采后贮藏性的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2020,46(1):64-73,82.
- [13] 李坤学.高压静电场处理奶酪对其品质的影响[D].晋中:山西农业大学,2022.
- [14] HUANG H, SUN W Q, XIONG G Q, et al. Effects of HVEF treatment on microbial communities and physicochemical properties of catfish fillets during chilled storage [J]. LWT, 2020, 131: 109667.
- [15] 汤真,俞承豪,师灿辉等.基于脉冲电场处理技术低温原牛乳灭菌系统研究[J].自动化与仪器仪表,2020(7):26-30.
- [16] 王辉,薛淑花,刘小花等.高压电场在葡萄与葡萄酒加工中的应用及研究进展[J].中外葡萄与葡萄酒,2022(5):100-105.
- [17] 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.
- [18] MENDES-OLIVEIRA G, JIN T Z, CAMPANELLA O H. Modeling the inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella typhimurium* in juices by pulsed electric fields: the role of the energy density [J]. Journal of Food Engineering, 2020, 282: 110001
- [19] 沈俊.空间电场协同低温对鲑鱼保鲜效果及机理研究[D].舟山:浙江海洋大学,2023.
- [20] WEI S, CHEN T, HOU H W, et al. Recent advances in electrochemical sterilization [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2023: 117419.
- [21] LI W, MA H L, HE R H, et al. Prospects and application of ultrasound and magnetic fields in the fermentation of rare edible fungi [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76(1), 105613.
- [22] GUO L, AZAM S, GUO Y, et al. Germicidal efficacy of the pulsed magnetic field against pathogens and spoilage microorganisms in food processing: An overview [J]. Food Control, 2021(1): 108496.
- [23] GAO X T, LIU Z A, ZHAO J D. The sterilization effect of cooperative treatment of high voltage electrostatic field and variable frequency pulsed electromagnetic field on heterotrophic bacteria in circulating cooling water[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2018, 108(5): 052017.
- [24] LIU T, MA H. Experimental study on sterilization of pulsed electromagnetic field [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis Chinese, 2006, 39(4): 54-57.
- [25] HE R H, MA H L, WANG H L. 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.
- [26] LIN L, WANG X L, HE R H, et al. Action mechanism of pulsed magnetic field against *E.coli* O157: H7 and its application in vegetable juice [J]. Food Control, 2019, 95: 150-156.
- [27] 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.
- [28] WU P, QU W J, ABDUALRAHMAN M A Y, et al. Study on inactivation mechanisms of *Listeria grayi* affected by pulse magnetic field via morphological structure, Ca^{2+} transmembrane transport and proteomic analysis [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(9): 2049-2057.
- [29] ALI F M, OSORIS W G, SERAG N, et al. Healing of guinea pig injures contaminated with *Pseudomonas aeruginosa* by using 0.7 Hz square pulsed magnetic field (new method) [J]. Int J Curr Res Med Sci, 2016, 2(5): 6-11.
- [30] MICLAUS S, BARBU-TUDORAN L, MOISESCU C, et al. Pulsed magnetic fields may affect the ultrastructure of live bacteria cells containing endogenous magnetosome chains [J]. European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2019, 6(8): 1-10.
- [31] LUO X, Ma H, GAO, M. Sterilization test colostrums by pulse magnetic field [J]. China Dairy Industry, 2004, 32(8), 22-23.
- [32] ZHANG J C, DU Q J, YANG Y X, et al. Research progress and future trends of low temperature plasma application in food industry: A review [J]. Molecules, 2023, 28(12): 4714.
- [33] JI Y R, HU W Z, LIAO J, et al. Effect of atmospheric cold plasma treatment on antioxidant activities and reactive oxygen species production in postharvest blueberries during storage [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 12: 1842-1851.
- [34] WANG Y, WANG Z R, ZHU X, et al. Application of electrical discharge plasma on the inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* in apple juice [J]. LWT, 2020, 121, 108974
- [35] 徐慧倩,严金红,唐玲玲,等.低温等离子体对南美白对虾冷藏期间品质保持的效果[J].现代食品科技,2021,37(4): 116-123,138.
- [36] 王小媛,牛涵,靳学远,等.杜仲籽油苹果汁饮料低温等离子体和热杀菌的比较分析[J].现代食品科技,2022,38(9): 206-214.
- [37] CHAUTANYA S, O'TOOLE G, CULLEN P J, et al. Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 44: 235-241.
- [38] YONG H I, KIM H J, PARK S, et al. Evaluation of pathogen inactivation on sliced cheese induced by encapsulated

- atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma [J]. Food Microbiol, 2015, 46, 46-50.
- [39] MUNIR M T, FEDERIGHI M. Control of food borne biological hazards by ionizing radiations [J]. Foods, 2020, 9(7): 878-900.
- [40] 洪奇华,王梁燕,孙志明,等.辐照技术在肉制品加工保鲜中的应用[J].核农学报,2021,35(3):667-673.
- [41] 倪珊.超高压、辐照杀菌对镇江肴肉贮藏期间品质的影响[J].食品工业科技,2023,44(15):362-369.
- [42] 徐彦瑞.籽瓜汁电子束辐照杀菌技术及设备的研究[D].兰州:甘肃农业大学,2020
- [43] 沈阿倩,黄文书,利通,等.⁶⁰Co- γ 射线辐照对油塔子杀菌效果及品质的影响[J].食品与机械,2020,36(9):158-163.
- [44] 陈佩瑶,刘寅欣,李肖梁.不同辐照剂量对冷链包装畜禽肉品质的影响[J].食品工业,2022,43(3):165-169.
- [45] NEREUS W G IV, ABDUL-WAKEEL A, SCULLEN O J, et al. The evaluation of gamma irradiation and cold storage for the reduction of *Campylobacter jejuni* in chicken livers [J]. Food Microbiology, 2019, 82: 249-253.
- [46] 李晓燕,孟庆瑶,赵宜范,等.生鲜食品冷链过程中消毒杀菌技术的研究进展[J].食品工业科技,2021,42(11):414-418
- [47] 张微微,孙艳辉,韦海阳,等.紫外线照射对炼乳空桶杀菌效果及其动力学研究[J].食品与机械,2019,35(4):108-112.
- [48] 胡海梅,张宇佳.深紫外杀菌及应用于冰箱技术研究[J].家电科技,2020(S1):47-49.
- [49] PANDISELVAM R, SUBHASHINI S, PRIYA E P, et al. Ozone based food preservation: a promising green technology for enhanced food safety [J]. Ozone: Science & Engineering, 2019, 41(1): 17-34.
- [50] CHENG G, LI Z, SUN L M, et al. Application of microwave/electrodeless discharge ultraviolet/ozone sterilization technology in water reclamation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 138: 148-156.
- [51] TABAKOGLU N, KARACA H. Effects of ozone-enriched storage atmosphere on postharvest quality of black mulberry fruits (*Morus nigra* L) [J]. LWT, 2018, 92: 276-281.
- [52] XIN Q, ZHANG X W, LI Z J, et al. Sterilization of oil-field re-injection water using combination treatment of pulsed electric field and ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2009, 16(1): 1-3.
- [53] EMMANUEL I E, ANDREW M, MICHAEL C, et al. Application of ultraviolet-C radiation and gaseous ozone for microbial inactivation on different materials [J]. Acs Omega, 2022, 7(47): 43006-43021.
- [54] RANA M A, ZENG X A, HAN Z, et al. Combined effects of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and microbial quality of grapefruit juice [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(2): e13507.
- [55] TARAS I P, MYKOLA V S, HUSSEIN M M, et al. Effects of combined high pressure (HPP), pulsed electric field (PEF) and sonication treatments on inactivation of *Listeria innocua* [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 233: 49-56.
- [56] ZHANG Q, ZHUANG J, WOEDTKE T V, et al. Synergistic antibacterial effects of treatments with low temperature plasma jet and pulsed electric fields [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(10): 610-256.
- [57] MAYOOKHA V P, PANDISELVAM R, KOTHAKOTA A, et al. Ozone and cold plasma: emerging oxidation technologies for inactivation of enzymes in fruits, vegetables, and fruit juices [J]. Food Control, 2023, 144: 109399.
- [58] ZHOU J F, WANG T, XIE X. Locally enhanced electric field treatment (LEEFT) promotes the performance of ozonation for bacteria inactivation by disrupting the cell membrane [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(21): 14017-14025.