

紫外线在肉类杀菌保鲜应用中的研究进展

刘骁^{1,2}, 李云菲^{1,2}, 杨茜³, 赵卫东^{1,2}

(1.郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 郑州 450002; 2.河南省冷链食品质量与安全控制重点实验室, 郑州 450002; 3.郑州科技学院 食品科学与工程学院, 郑州 450002)

摘要: **目的** 介绍紫外线在肉类杀菌保鲜中的研究进展, 为紫外线在肉类工业中的推广应用提供理论依据。**方法** 综述紫外线的特性和产生方式, 以及对肉类表面微生物的灭活效果和肉类品质的影响, 探讨紫外线杀菌技术在肉类杀菌保鲜中的应用潜力, 总结分析紫外线的杀菌机制, 并对该技术的研究方向进行展望。**结论** 紫外线能有效杀灭肉类表面的微生物, 同时较好地保持其色泽、pH和质构等理化指标, 其杀菌机制主要与其损伤微生物核酸和蛋白质等结构功能, 以及诱导胞内活性氧产生等有关, 在肉类杀菌保鲜领域具有广阔的应用前景。

关键词: 紫外线; 肉类; 杀菌; 机制

中图分类号: TS201.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)13-0042-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.13.006

Research Progress on Application of Ultraviolet Light in Meat Sterilization and Preservation

LIU Xiao^{1,2}, LI Yun-fei^{1,2}, YANG Xi³, ZHAO Wei-dong^{1,2}

(1.College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2.Henan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450002, China;
3.College of Food Science and Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT: The paper aims to introduce the recent advances of ultraviolet light in meat sterilization and preservation and to provide theoretical foundation for the promotion of ultraviolet light in meat industry. This work presents an overview characteristics and production mode of ultraviolet light. The sterilization effect of ultraviolet light and its influences on quality characteristics of meat are reviewed and the application of ultraviolet light technology in meat sterilization and preservation is also discussed. In addition, the sterilization mechanism and application foreground of ultraviolet light are also well discussed. Ultraviolet can effectively kill the microorganism on the surface of meat, and maintain the physical and chemical indexes of meat such as color and pH. The sterilization mechanism of ultraviolet light is mainly related to its damage to the structure and function of microorganism nucleic acids and proteins, and overproduction of intracellular reactive oxygen species. It has shown great potential application in the meat sterilization and preservation.

KEY WORDS: ultraviolet light; meat; sterilization; mechanism

收稿日期: 2021-02-04

基金项目: 河南省科技攻关项目 (192102110106); 河南省自然科学基金 (202300410497)

作者简介: 刘骁 (1987—), 男, 博士, 郑州轻工业大学讲师, 主要研究方向为肉制品加工与贮藏。

通信作者: 赵卫东 (1959—), 男, 博士, 郑州轻工业大学教授, 主要研究方向为食品加工技术。

肉类因自身营养丰富，在生产、加工和储藏等环节极易被微生物污染，导致其腐败变质，甚至引发食物中毒事件^[1]。传统的肉类保鲜方法包括加热（巴氏杀菌和高温杀菌）、低温（冷冻和冷藏）、降低水分活度（加糖和盐）和添加防腐剂（山梨酸及其钾盐、双乙酸钠、乳酸链球菌素、纳他霉素和单辛酸甘油酯等）等。由于热处理在有效杀灭食品中的有害微生物同时，也对食品热敏性营养成分和感官品质造成不良影响^[2-3]，因此非热杀菌技术是当前食品保鲜领域的研究热点。紫外线（Ultraviolet Light, UV）作为一种非热杀菌技术，具有成本低、处理温度低和环境友好等优点^[4]。研究表明，紫外线能够有效杀灭食品在加工、流通、储存等过程中所污染的有害微生物，并有效延长食品货架期，在食品加工和安全控制领域具有广阔的应用前景。文中综述紫外线的特性和产生方式，以及其对肉类表面微生物的灭活效果和肉类品质的影响，探讨紫外线杀菌技术在肉类杀菌保鲜中的应用潜力，同时总结分析紫外线的杀菌机制，并对该技术的研究方向进行展望，以期紫外线杀菌技术在肉类保鲜中的应用提供参考。

1 紫外线的特性和产生方法

1.1 紫外线的特性

紫外线是一种电磁波，其波长位于可见光和 X 射线之间。按波长的不同可以分为长波紫外线（UVA，320~400 nm）、中波紫外线（UVB，280~320 nm）、短波紫外线（UVC，200~280 nm）和真空紫外线（VUV，100~200 nm）^[5]。目前市面上销售的紫外线灯多为紫外线汞灯，根据启动后产生汞蒸气压和输出强度的不同分为低压低强度汞灯、低压高强度汞灯和中压高强度汞灯，其中低压高强度汞灯使用最广泛^[6-7]。传统的紫外线汞灯存在寿命短、能耗高、易碎并造成汞污染等问题。近年来，紫外发光二极管（UV Light-Emitting Diodes, UV-LEDs）的应用受到广泛关注。UV-LEDs 可以在杀菌范围（225~300 nm）内发出特定波长的紫外线。与传统紫外汞灯相比，UV-LEDs 具有寿命长、电压低、波长可调和无污染等优点^[8]。

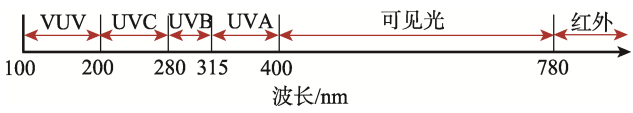


图 1 电磁波谱
Fig.1 Electromagnetic spectrum

1.2 紫外线的产生方式

低压汞灯分为热阴极低压汞灯和冷阴极低压汞灯^[9]。热阴极低压汞灯通过对热阴极加热产生热电

子，在强电场下，加速的热电子与热电离的汞蒸气进行碰撞，产生紫外线。冷阴极低压汞灯在强电场下利用管内残余的阳离子加速轰击阴极，产生的电子在电场中被加速到一定速度后与管内的汞蒸气作用而产生紫外线。两者产生的紫外线主要集中在 253.7 nm。

UV-LEDs 作为半导体发光器件，其核心是一个特殊的 p-n 结，p 型层和 n 型层向中间的有源区注入空穴和电子，电子空穴在有源层复合而产生紫外线。UV-LEDs 常使用氮化镓铝（Al-GaN）作为源层材料，通过调整 Al，Ga，N 的物质的量的比调整发光波长^[10]。紫外线汞灯和 UV-LEDs 的对比见表 1^[11-13]。

表 1 UV-LEDs 和紫外线汞灯的比较
Tab.1 Differences between UV-LEDs and ultraviolet mercury lamp

项目	UV-LEDs	汞灯
光谱分布	窄	宽
有效光效率	高	低
使用寿命	长（> 20 000 h）	短（800~1000 h）
设备尺寸	小	大
能耗	低	高
臭氧	较少	较多
二次污染	不会产生	会产生

2 紫外线在肉类杀菌中的应用

2.1 紫外线对肉类的杀菌作用

2000 年，美国食品药品监督管理局（Food and Drug Administration, FDA）批准紫外线可用于食品、水和饮料的消毒。国内外研究表明，紫外线处理可有效灭活鱼、鸡肉、牛肉等原料肉，以及香肠等肉制品表面的单增李斯特菌（*L. monocytogenes*）、大肠杆菌（*E. coli*）、鼠伤寒沙门氏菌（*S. Typhimurium*）和腐生葡萄球菌（*S. saprophyticus*）等有害微生物（表 2）。

以上研究结果表明，紫外线能够有效杀灭肉类食品表面的微生物，杀菌效果取决于紫外线光源类型和波长、微生物种类、食品的组分及其表面特性（粗糙度、色泽）等因素。为进一步增强其杀菌效果，一般将紫外线与其他技术相结合^[23-24]。Krajnik 等^[25]发现紫外线单独处理仅能够使生鲑鱼片上 *L. monocytogenes* 降低 0.17 lg CFU/g，紫外线与酸性电解水和超声波协同处理后，*L. monocytogenes* 降低了 0.75 lg CFU/g。Degala 等^[14]发现 UVC（24 mJ/cm²）和质量分数为 1% 的柠檬草精油协同处理可以使山羊肉表面的 *E. coli* K12 数量降低 6.66 lg CFU/mL，显著优于 UVC 单独处理组（降低了 1.06 lg CFU/mL）。

2.2 紫外线处理对肉类品质的影响

国内外学者在研究紫外线对肉类杀菌作用的同时,重点评价了紫外线处理对肉类色泽、风味和营养

特性等品质的影响,见表3。

2.2.1 紫外线处理对肉类感官品质的影响

感官指标是肉类品质指标中最直观的指标之一,

表 2 紫外线在肉类杀菌中的应用
Tab.2 Application of ultraviolet light in meat sterilization

研究对象	微生物类型	紫外线产生方式	杀菌效果	参考文献
山羊肉	<i>E. coli</i> K12	汞灯 (254 nm)	经 UVC (144 mJ/cm ²) 处理后,接种于山羊肉表面的 <i>E. coli</i> K12 数量降低了 1.18 lg CFU/mL	[14]
三文鱼片	<i>L. monocytogenes</i>	汞灯 (253.7 nm)	冷鲜三文鱼片和烟熏三文鱼片经 UVC (0.6 J/cm ²) 处理后,鱼肉表面的 <i>L. monocytogenes</i> 分别降低了 0.7, 0.9 lg CFU/mL, 鱼皮表面的 <i>L. monocytogenes</i> 分别降低了 1.3, 1.1 lg CFU/mL	[15]
法兰克福香肠	<i>L. monocytogenes</i>	汞灯 (254 nm)	经 UVC (2 J/cm ²) 处理后,接种于法兰克福香肠表面的 <i>L. monocytogenes</i> 减少了 0.97 lg CFU/mL	[16]
鸡胸肉	<i>C. jejuni</i> <i>L. monocytogenes</i> <i>S. enterica</i>	汞灯 (254 nm)	鸡胸肉表面 <i>C. jejuni</i> 、 <i>L. monocytogenes</i> 和 <i>S. enterica</i> 经 UVC (5 kJ/m ²) 处理后,数量由处理前的 6~7 lg CFU/g 分别降低了 1.26, 1.29 和 1.19 lg CFU/g	[17]
牛肉	<i>E. coli</i>	汞灯 (254 nm)	经 UVC (3.9 J/cm ²) 处理后,牛肉表面的 <i>E. coli</i> 数量减少了 1.0 lg CFU/mL	[18]
鸡胸肉	<i>S. saprophyticus</i>	汞灯 (254 nm)	经 UVC (60 mJ/cm ²) 处理后,接种到鸡胸肉表面的 <i>S. saprophyticus</i> 降低了 0.4 lg CFU/g	[19]
鸡肉	<i>C. jejuni</i>	UVC-LEDs (265 nm)	UVC-LEDs 处理 1 min (20.4 mJ/cm ²) 和 3 min (61.2 mJ/cm ²) 后,鸡肉表面 <i>C. jejuni</i> 分别降低 2.0, 3.1 lg CFU/mL	[20]
金枪鱼片	<i>S. Typhimurium</i> <i>L. monocytogenes</i> <i>E. coli</i> O157:H7	UVC-LEDs (275 nm)	经 UVC-LED 处理 (4000 mJ/cm ²) 后,接种于金枪鱼片表面的 <i>S. Typhimurium</i> 、 <i>L. monocytogenes</i> 和 <i>E. coli</i> O157:H7 分别减少 1.31, 1.86, 1.77 lg CFU/cm ²	[21]
香肠	<i>E. coli</i> O157:H7 <i>S. Typhimurium</i> <i>L. monocytogenes</i>	UVC-LEDs (280 nm)	香肠经 UVC-LEDs (21.6 mJ/cm ²) 处理后表面 <i>E. coli</i> O157:H7、 <i>S. Typhimurium</i> 和 <i>L. monocytogenes</i> 减少了 1.0~1.6 lg CFU/mL	[22]

表 3 紫外线对肉类品质的影响
Tab.3 Effects of ultraviolet light on the quality of meat

研究对象	紫外线类型	实验结果	参考文献
猪肉	UVC	与未处理组相比,经剂量为 408 或 2040 mJ/cm ² 紫外线处理后,猪肉色泽参数 (<i>L</i> *值、 <i>a</i> *值和 <i>b</i> *值), pH 值, 脂质氧化水平, 以及氧合肌红蛋白、高铁肌红蛋白与脱氧肌红蛋白的比例均未发生显著变化	[5]
山羊肉	UVC	山羊肉经紫外线 (100 μW/cm ² , 0~12 min) 处理, 并于 4 °C 贮藏 24 h 后, 与未处理组相比, 其 <i>L</i> *值、 <i>a</i> *值和 <i>b</i> *值无显著变化, 脂质过氧化值显著降低	[14]
鸡肉	UVC	鸡肉和鸡皮经紫外线 (32.9 mW·s/cm ²) 处理 100 s, 并于 4 °C 贮藏 0~12 d, 随着贮藏时间的延长, 其色泽 (<i>L</i> *值、 <i>a</i> *值和 <i>b</i> *值) 和脂肪酸组成均未发生显著变化	[26]
鸡胸肉	UVC	经紫外线 (300 mJ/cm ²) 处理, 并于 4 °C 贮藏 7 d 后, 鸡胸肉 <i>L</i> *值增加, <i>a</i> *值降低, <i>b</i> *值增加, 与对照组相比无显著差异	[27]
鸡肉法兰克福香肠	脉冲 UV	经 2.7 J/cm ² 和 24.2 J/cm ² 的脉冲紫外线处理后, 未包装和真空包装鸡肉法兰克福香肠的脂质氧化值无显著变化; 随着照射剂量的增大, Δ <i>L</i> *和 Δ <i>a</i> *均减小, Δ <i>b</i> *增大	[28]
火腿	脉冲 UV	与对照组相比, 经脉冲 UV (0.14 J/cm ²) 处理, 火腿的脂质氧化值 (OSI) 显著升高, 水分含量和硬度显著降低	[29]
火腿冷鲜鸡肉	脉冲 UV	与未处理组相比, 经紫外线 (0.56~3.6 J/cm ²) 处理后的火腿和冷鲜鸡肉的整体可接受性和 <i>L</i> *值、 <i>a</i> *值和 <i>b</i> *值均无显著变化	[30]

也是决定消费者购买意愿的重要指标。宋晓彬等^[31]研究发现, 肉类色泽主要取决于存在于肌纤维肌浆中的肌红蛋白含量和氧化程度, 以及肌纤维的组成。由表 3 可知, 紫外线处理剂量较低对肉类色泽和整体可接受度无显著性影响, 剂量较高可使肉类的 a^* 值降低, 即呈现出更多的暗红色^[32]。与此同时, 高剂量紫外线处理对其水分含量和硬度也有显著的影响。Fan 等^[21]采用 UVC-LED (275 nm) 处理金枪鱼片, 结果表明, 当辐射剂量达到 4000 mJ/cm² 时, 金枪鱼鱼片的 pH 值、持水性、质构和色泽均未发生显著变化。

2.2.2 紫外线处理对肉类营养价值的影响

肉类富含高生物价值蛋白质、必需氨基酸、B 族维生素、铁、锌、硒等, 因能补充人体所必需的营养元素而被消费者青睐。肉类中因含有较高浓度的不饱和脂肪酸、金属催化剂和其他促氧因子, 使其极易被氧化, 失去其新鲜度, 因此控制肉类表面微生物的同时降低其氧化程度可有效延长其货架期^[33]。Reichel 等^[5]发现, 与未处理组相比, 经剂量为 408 mJ/cm² 紫外线处理后, 猪肉的脂质氧化水平, 以及氧合肌红蛋白、高铁肌红蛋白和脱氧肌红蛋白的比例均未发生显著变化。Wambura 等^[29]研究表明, 经高剂量的紫外线处理后, 火腿的脂质氧化值显著增大。为进一步减少对其肉类品质的影响, 可以将紫外线与其他技术协同使用。Monteiro 等^[34]发现, 将紫外线和高静水压协同作用可以有效降低紫外线造成的罗非鱼片脂质氧化。

3 紫外线杀菌机制

目前普遍认为紫外线杀菌机制主要与其损伤微生物核酸和蛋白质等结构功能, 诱导胞内活性氧产生等有关 (图 2)。

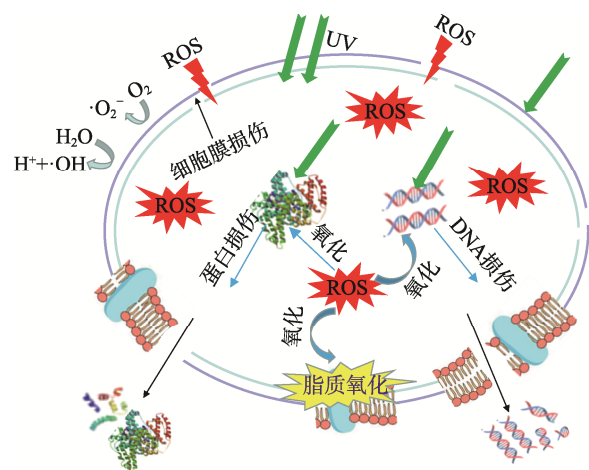


图 2 UV 灭活微生物机制

Fig.2 Mechanisms of microorganisms inactivation by UV

3.1 紫外线对微生物核酸的影响

紫外线的杀菌机制主要是对微生物核酸的损伤。细胞核中 DNA 和 RNA 吸收高能量的 UVC 后, 跃迁到强氧化活性的激发态, 引发一系列反应^[35]。其会诱导相邻核苷酸形成双分子或二聚物。相邻的嘧啶分子, 尤其是胸腺嘧啶的二聚作用是紫外线引起的最普遍的光化学损害, 其主要光产物包括环丁烷嘧啶二聚体 (Cyclobutane Pyrimidine Dimers, CPD) 和嘧啶-嘧啶酮^[36—38]。Hamamoto 等^[39]研究发现, 经过 UVC 处理的大肠杆菌 DH5 α 细胞内的 CPD 含量为对照组的 4.4 倍。CPD 会阻碍 DNA 聚合酶和 RNA 聚合酶 II 在 DNA 双螺旋上的结合, 从而阻止 DNA 的转录和复制。另一种反应是核酸吸收紫外线后跃迁到激发态时产生的高能电子传递给 O₂, -OH 等, 并形成 ¹O₂, ·OH 和 H₂O₂ 等活性氧, 从而引起 DNA 分子链断裂等损伤, 进而影响 DNA 的复制, 最终导致微生物死亡^[40]。

3.2 紫外线破坏微生物蛋白质的结构和功能

紫外线失活机制可能与其破坏蛋白质结构和功能有关。组成蛋白质中的色氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸和组氨酸等氨基酸残基因其结构富含芳香环或杂环对 UVB 有强吸收作用^[41]。吸收 UVB 后, 色氨酸、酪氨酸等氨基酸转变为具有强氧化性的激发态, 使氨基酸极易发生开环或与其他物质结合, 造成蛋白质分子空间结构的改变, 使其失去原有的活性功能, 从而扰乱微生物的新陈代谢^[42]。此外, 紫外线处理过程中产生的活性氧也会攻击蛋白质, 造成氨基酸残基的氧化修饰和蛋白质三级结构的改变, 破坏微生物的正常生理机能, 从而造成微生物的死亡^[43]。经紫外线处理后, 细胞膜的渗透性增加。Xu 等^[44]推测细胞膜渗透性的改变可能是由于细胞膜中磷脂上的氨基酸和细胞壁上的肽聚糖的快速氧化。

3.3 紫外线对微生物细胞内活性氧的影响

紫外线产生的活性物质被认为是发挥杀菌作用的主要因素。紫外线通过激活核黄素、色氨酸和卟啉等小分子, 产生单线态氧 (¹O₂)、过氧化氢 (H₂O₂) 和羟基自由基 (·OH) 等活性组分^[45—47]。研究表明, 上述活性物质会加速细胞的氧化应激, 引发细胞膜脂质过氧化, 增加细胞膜通透性, 从而导致胞内物质释放等^[48]。同时上述活性物质还能够扩散到细胞内, 进一步氧化蛋白质和核酸等生物大分子。此外, Song 等^[49]发现, UVA 处理产生的·OH 损害了细胞的自我修复能力, 进而限制了细胞的光复活现象。Wang 等^[50]发现, 经过 UVC 处理后, 大肠杆菌 O157:H7 细胞内的活性氧为对照组的 5.1 倍, 向大肠杆菌 O157:H7 菌悬液中加入活性氧清除剂 (过氧化氢酶和甘露醇分别清除 H₂O₂ 和·OH) 后可显著抑制大肠杆菌的失活。

4 结语

近年来,紫外线作为一种非热加工技术,能有效杀灭肉类表面的微生物,同时较好地保持色泽、pH等理化指标,在肉类杀菌保鲜领域具有广阔的应用前景。该技术目前还存在着一些问题。首先,由于紫外线穿透力弱,对于深入肉类组织内部的细菌,其灭菌效果相对较弱,因此可以与其他技术(酸性电解水、高静水压等)联用,以提高其杀菌效率,进而更有效地提高肉类产品的安全性。其次,由于高剂量紫外线处理产生的活性氧会加速肉类脂肪的氧化,对肉类风味产生不良影响,因此可采用添加天然抗氧化剂等方法延迟脂肪氧化。在今后的工作中,应重点加强紫外线与其他技术相结合的作用效果,以及从分子组学和蛋白组学层面解释其作用机理等方面的基础研究,从而推动紫外线在食品工业中的应用。

参考文献:

- [1] YANG S, SADEKUZZAMAN M, HA S D. Reduction of *Listeria Monocytogenes* on Chicken Breasts by Combined Treatment with UV-C Light and Bacteriophage ListShield[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 86: 193—200.
- [2] GONZALEZ-RIVAS P A, CHAUHAN S S, HA M, et al. Effect of Heat Stress on Animal Physiology, Metabolism, and Meat Quality: A Review[J]. Meat Science, 2019, 162: 108025.
- [3] AHMED O M, PANGLOLI P, HWANG C, et al. The Occurrence of *Listeria Monocytogenes* in Retail Ready-to-Eat Meat and Poultry Products Related to the Levels of Acetate and Lactate in the Products[J]. Food Control, 2015, 52: 43—48.
- [4] LI Mei-lin, LI Xiao-an, HAN Cong, et al. UV-C Treatment Maintains Quality and Enhances Antioxidant Capacity of Fresh-Cut Strawberries[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 156: 11945.
- [5] REICHEL J, KEHRENBURG C, KRISCHEK C, et al. Inactivation of *Yersinia Enterocolitica* and *Brochothrix Thermosphacta* on the Pork by UVC Irradiation[J]. Meat Science, 2019, 158: 107909.
- [6] KIM D K, KIM S J, KANG D H. Bactericidal Effect of 266 to 279 nm Wavelength UVC-LEDs for Inactivation of Gram Positive and Gram Negative Foodborne Pathogenic Bacteria and Yeasts[J]. Food Research International, 2017, 97: 280—287.
- [7] 曹小兵, 陈磊, 冉崇高, 等. 紫外线杀菌产品在消毒杀菌领域的应用研究[J]. 中国照明电器, 2020(4): 6—10.
CAO Xiao-bing, CHEN Lei, RAN Chong-gao, et al. Research on the Application of Ultraviolet Disinfection Products in the Field of Disinfection and Sterilization[J]. China Light & Lighting, 2020(4): 6—10.
- [8] GORA S L, RAUCH K D, ONTIVEROS C C, et al. Inactivation of Biofilm-Bound *Pseudomonas Aeruginosa* Bacteria Using UVC Light Emitting Diodes (UVC LEDs)[J]. Water Research, 2019, 151: 193—202.
- [9] 文尚胜, 左文财, 周悦, 等. 紫外线消毒技术的研究现状及发展趋势[J]. 光学技术, 2020, 46(6): 664—670.
Wen Shang-sheng, Zuo Wen-cai, Zhou Yue, et al. Research Status and Development Trend of Ultraviolet Disinfection Technology[J]. Optical Technique, 2020, 46(6): 664—670.
- [10] 闫建昌, 孙莉莉, 王军喜, 等. 紫外发光二极管发展现状及展望[J]. 照明工程学报, 2017, 28(1): 1—4.
YAN Jian-chang, SUN Li-li, WANG Jun-xi, et al. Development Status and Prospects of UV LED[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2017, 28(1): 1—4.
- [11] OLIVEIRA B R, BARRETO CRESPO M T, PEREIRA V J. Small but Powerful: Light-Emitting Diodes for Inactivation of *Aspergillus* Species in Real Water Matrices[J]. Water Research, 2020, 168: 115108.
- [12] SHOLTES K A, LOWE K, WALTERS G W, et al. Comparison of Ultraviolet Light-Emitting Diodes and Low-Pressure Mercury-Arc Lamps for Disinfection of Water[J]. Environmental technology, 2016, 37(17): 2183—2188.
- [13] RATTANAKUL S, OGUMA K. Inactivation Kinetics and Efficiencies of UV-LEDs against *Pseudomonas Aeruginosa*, *Legionella Pneumophila*, and Surrogate Microorganisms[J]. Water Research, 2018, 130: 31—37.
- [14] DEGALA H L, MAHAPATRA A K, DEMIRCI A, et al. Evaluation of Non-Thermal Hurdle Technology for Ultraviolet-Light to Inactivate *Escherichia Coli* K12 on Goat Meat Surfaces[J]. Food Control, 2018, 90: 113—120.
- [15] HOLCK A, LILAND K A, CARLEHÖG M, et al. Reductions of *Listeria Monocytogenes* on Cold-Smoked and Raw Salmon Fillets by UV-C and Pulsed UV Light[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 50: 1—10.
- [16] SOMMERS C H, COOKE P H, FAN X, et al. Ultraviolet Light (254 nm) Inactivation of *Listeria Monocytogenes* on Frankfurters that Contain Potassium Lactate and Sodium Diacetate[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(3): 114—119.
- [17] CHUN H H, KIM J Y, LEE B D, et al. Effect of UV-C Irradiation on the Inactivation of Inoculated Pathogens and Quality of Chicken Breasts during Storage[J]. Food Control, 2010, 21: 276—278.
- [18] CORRÊA T Q, BLANCO K C, GARCIA É B, et al. Effects of Ultraviolet Light and Curcumin-Mediated Photodynamic Inactivation on Microbiological Food

- Safety: a Study in Meat and Fruit[J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 2020, 20: 101678.
- [19] SOMMERS C, SHEEN S, SCULLEN O J, et al. Inactivation of *Staphylococcus Saprophyticus* in Chicken Meat and Purge Using Thermal Processing, High Pressure Processing, Gamma Radiation, and Ultraviolet Light (254 nm)[J]. Food Control, 2017, 75: 78—82.
- [20] MOAZZAMI M, FERNSTRÖM L L, HANSSON I. Reducing *Campylobacter Jejuni*, *Enterobacteriaceae* and Total Aerobic Bacteria on Transport Crates for Chickens by Irradiation with 265-nm Ultraviolet Light (UV-C LED)[J]. Food Control, 2021, 119: 107424.
- [21] FAN L M, LIU X, DONG X P, et al. Effects of UVC Light-Emitting Diodes on Microbial Safety and Quality Attributes of Raw Tuna Fillets[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 139: 110553.
- [22] KIM D K, KANG D H. Inactivation Efficacy of a Sixteen UVC LED Module to Control Foodborne Pathogens on Selective Media and Sliced Deli Meat and Spinach Surfaces[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 130: 109422.
- [23] ZENG F Z, CAO S, JIN W B, et al. Inactivation of Chlorine-Resistant Bacterial Spores in Drinking Water Using UV Irradiation, UV/Hydrogen Peroxide and UV/Peroxymonosulfate: Efficiency and Mechanism[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243: 118666.
- [24] AL-MAMUN M R, KADER S, LSLAM M S, et al. Photocatalytic Activity Improvement and Application of UV-TiO₂ Photocatalysis in Textile Wastewater Treatment: A Review[J]. Journal of Environment Chemical Engineering, 2019, 7(5): 103248.
- [25] MIKŠ-KRAJNÍK M, JAMES FENG L X, BANG W S, et al. Inactivation of *Listeria Monocytogenes* and Natural Microbiota on Raw Salmon Fillets Using Acidic Electrolyzed Water, Ultraviolet Light or/and Ultrasounds[J]. Food Control, 2017, 74: 54—60.
- [26] ISOHANNI P M I, LYHS U. Use of Ultraviolet Irradiation to Reduce *Campylobacter Jejuni* on Broiler Meat[J]. Poultry Science, 2009, 88(3): 661—668.
- [27] LYON S A, FLETCHER D L, BERRANG M E. Germicidal Ultraviolet Light to Lower Numbers of *Listeria Monocytogenes* on Broiler Breast Fillets[J]. Poultry Science, 2007, 86(5): 964—967.
- [28] 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): 431—439.
- [29] 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.
- [30] KRAMER B, WUNDERLICH J, MURANYI P. Inactivation of *Listeria Innocua* on Packaged Meat Products by Pulsed Light[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 21: 100353.
- [31] 宋晓彬, 袁倩, 刘树军, 等. 不同月龄和部位羊肉中一磷酸腺苷激活蛋白激酶活性与肉类质的关系[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 17—20.
- SONG Xiao-bin, YUAN Qian, LIU Shu-jun, et al. Correlation between AMPK Activity and Meat Quality of Lamb Meat for Different Ages and Parts[J]. Food Science, 2014, 35(11): 17—20.
- [32] 薛盼盼, 章海风, 李旭, 等. 对三粉公驴不同部位肉类质的测定分析[J]. 食品科学 2021, 3(19): 1—12.
- XUE Pan-pan, ZHANG Hai-feng, LI Xu, et al. Determination and Analysis of Meat Quality in Different Parts of "Three Pink" Maledonkeys[J]. Food Science, 2021, 3(19): 1—12.
- [33] 类红梅, 罗欣, 毛衍伟, 等. 天然抗氧化剂的功能及其在肉与肉制品中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 267—277.
- LEI Hong-mei, LUO Xin, MAO Yan-wei, et al. A Review of the Functions and Application of Natural Antioxidants in Meat and Meat Products[J]. Food Science, 2020, 41(21): 267—277.
- [34] MONTEIRO M L G, ELIANE T M, ROSENTHAL A, et al. Synergistic Effect of Ultraviolet Radiation and High Hydrostatic Pressure on Texture, Color and Oxidative Stability of Refrigerated Tilapia Fillets[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(9): 4474—4481.
- [35] SUN Z, BLATCHLEY E R. Tetrahemes as a Challenge Organism for Validation of Ballast Water UV Systems[J]. Water Research, 2017, 121: 311—319.
- [36] RAVANAT J L, DOUKI T. UV and Ionizing Radiations Induced DNA Damage, Differences and Similarities[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2016, 128: 92—102.
- [37] RASTOGI R P, SINGH S P, INCHAROENSAKDI A, et al. Ultraviolet Radiation-Induced Generation of Reactive Oxygen Species, DNA Damage and Induction of UV-Absorbing Compounds in the Cyanobacterium *Rivularia sp* HKAR-4[J]. South African Journal of Botany, 2014, 90: 163—169.
- [38] HALL A, SIMS L M, BALLANTYNE J. Assessment of DNA Damage Induced by Terrestrial UV Irradiation of Dried Bloodstains: Forensic Implications[J]. Forensic Science International: Genetics, 2014, 8: 24—32.
- [39] HAMAMOTO A, MORI M, TAKAHASHI A, et al. New Water Disinfection System Using UVA Light-Emitting[J]. Journal of Applied Microbiology, 2007, 103(6): 2291—2298.
- [40] YAGURA T, SCHUCH A P, GARCIA C C, et al. Direct Participation of DNA in the Formation of Singlet Oxygen and Base Damage under UVA Irradiation[J]. Free Radical Biology & Medicine, 2017, 108: 86—93.
- [41] BITER A B, POLLET J, CHEN W H, et al. A Method to Probe Protein Structure from UV Absorbance Spec-

- tra[J]. Analytical Biochemistry, 2019, 587(15): 113450.
- [42] 孙丽. UVB 对南极小球藻生理活性的影响[D]. 南昌: 江西师范大学, 2010: 20—45.
- SUN Li. Effect of UVB on Physiological Activevess of *Chlorella Vulgaris* Antarctic Strain[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2010: 20—45.
- [43] BERNEY M, WEILENMANN H U, IHSEN J, et al. Specific Growth Rate Determines the Sensitivity of *Escherichia Coli* to Thermal, UVA, and Solar Disinfection[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72(4): 2586—2593.
- [44] XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, XU Peng-cheng, et al. Mechanisms of Ultraviolet Disinfection and Chlorination of *Escherichia Coli*: Culturability, Membrane Permeability, Metabolism, and Genetic Damage[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 65: 356—366.
- [45] IKEHATA H, ONO T. The Mechanisms of UV Mutagenesis[J]. Journal of Radiation Research, 2011, 52: 115—125.
- [46] LIU J, ZHU H Z, PREMNAUTH G, et al. UV Cell Stress Induces Oxidative Cyclization of a Protective Reagent for DNA Damage Reduction in Skin Explants[J]. Free Radical Biology & Medicine, 2019, 134: 133—138.
- [47] ROWE L A, DEGTAREVA N, DOETSCH P W. DNA Damage-Induced Reactive Oxygen Species (ROS) Stress Response in *Saccharomyces Cerevisiae*[J]. Free Radical Biology & Medicine, 2008, 45: 1167—1177.
- [48] OU Hua-se, GAO Nai-yun, DENG Yang, et al. Inactivation and Degradation of *Microcystis Aeruginosa* by UV-C Irradiation[J]. Chemosphere, 2011, 85(7): 1192—1198.
- [49] SONG K, MOHSENI M, TAGHIPOUR F. Mechanisms Investigation on Bacterial Inactivation Through Combinations of UV Wavelengths[J]. Water Research, 2019, 163: 114875.
- [50] WANG Q Y, LEONG W F, ELIAS R J, et al. UV-C Irradiated Gallic Acid Exhibits Enhanced Antimicrobial Activity via Generation of Reactive Oxidative Species and Quinone[J]. Food Chemistry, 2019, 287: 303—312.