

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.02.019

李金东, 张忠杰, 祁智慧, 等. 紫外发光二极管(UV-LED)技术对食品微生物灭活应用的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(2): 151-158.
LI J D, ZHANG Z J, QI Z H, et al. Research progress on the application of ultraviolet light-emitting diode (UV-LED) technology for food microbial inactivation[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2): 151-158.

紫外发光二极管(UV-LED)技术 对食品微生物灭活应用的研究进展

李金东¹, 张忠杰^{1,2,3}, 祁智慧^{2,3}, 尹君^{2,3}, 金毅^{2,3}, 唐芳^{2,3}✉

1. 河南工业大学 粮食和物资储备学院, 粮食储藏与安全教育部工程研究中心, 河南省粮食产后减损工程技术研究中心, 河南 郑州 450001;
2. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食储运研究所, 北京 100037;
3. 粮食储运国家工程研究中心, 北京 100037)

摘要: 紫外辐照是一种非热杀菌技术, 汞蒸气紫外灯是现阶段用于食品卫生处理的主要设备, 但受某些因素影响, 汞灯的生产使用将逐渐变少, 被环保节能的紫外发光二极管(UV-LED)取代是一种不可避免的趋势。本文根据UV-LED发光原理和多波长耦合应用的特点, 综述了对微生物灭活的机理、探究了影响灭活效果的因素(波长、紫外剂量和物料特性)、处理食品的灭菌效果以及对部分食品品质的影响, 为UV-LED在食品领域的杀菌处理工艺和设备参数优化提供参考。

关键词: 紫外发光二极管(UV-LED); 微生物灭活; 食品行业; 非热杀菌技术

中图分类号: TS205 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)02-0151-08

网络首发时间: 2024-02-26 17:10:01

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240226.1418.012>

Research Progress on the Application of Ultraviolet Light-emitting Diode (UV-LED) Technology for Food Microbial Inactivation

LI Jin-dong¹, ZHANG Zhong-jie^{1,2,3}, QI Zhi-hui^{2,3}, YIN Jun^{2,3}, JIN Yi^{2,3}, TANG Fang^{2,3}✉

1. School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Engineering Research Center of Grain Storage and Security of Ministry of Education, Henan Provincial Engineering Technology Research Center on Grain Post harvest, Zhengzhou, Henan 450001, China;
2. Institute of Grain Storage and Logistics, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 10037, China
3. National Engineering Research Center of Grain Storage and Logistics, Beijing 10037, China)

Abstract: Ultraviolet (UV) irradiation is a non-thermal sterilization technique, and mercury vapor ultraviolet lamps currently serve as the primary equipment for food hygiene. However, due to some factors, the production

收稿日期: 2023-08-25

基金项目: 高功率深紫外芯片技术和应用装备联合研发(H22030)

Supported by: Collaborative Research and Development of High-power Deep Ultraviolet Chip Technology and Its Application Equipment (No.H22030)

作者简介: 李金东, 男, 1999年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品工程。E-mail: 1277363911@qq.com

通讯作者: 唐芳, 女, 1978年出生, 硕士, 副研究员, 研究方向为粮食微生物。E-mail: tf@ags.ac.cn

and usage of mercury lamps gradually reduced. The inevitable trend has been their replacement by environmentally friendly and energy-efficient ultraviolet light-emitting diodes (UV-LED). This article, based on the principles of UV-LED light emission and the characteristics of multi-wavelength coupling applications, briefly reviewed the mechanisms of microbial inactivation. The factors affecting the inactivation effect (wavelength, UV dose and material characteristics), the sterilization effect of processed foods and the impact on the quality of some foods were explored. The aim was to provide a reference for optimizing the sterilization processes and equipment parameters of UV-LED in the field of food hygiene.

Key words: ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs); microbial inactivation; food industry; non thermal sterilization technology

近年来,随着人民生活水平提高,消费者不仅关注食品卫生安全,且对食品感官特性和营养价值的要求也越来越高。目前已有的食品杀菌技术主要分两类^[1]。一类是传统的热杀菌技术,如巴氏灭菌、超高温灭菌和微波灭菌等。传统的热杀菌技术成熟、杀菌彻底,但能耗大,且会对食品原有风味和营养造成较大影响;另一类是非热杀菌技术,如紫外辐照、臭氧、等离子体、抗生素灭菌等。非热杀菌技术在灭活微生物的同时,可以降低对营养和风味的影响,因此备受关注。部分非热杀菌技术配套设备昂贵,需较高的前期投入,而紫外辐照,具有操作简单、成本低廉、能耗低、对食品品质影响小等优点,在食品行业中的应用引起了人们的极大关注。

紫外光是对电磁波谱中 10~400 nm 辐射的总称^[2],按其波段可以分为:真空波段紫外线(VUV, 10~200 nm)、短波紫外线(UVC, 200~280 nm)、中波紫外线(UVB, 280~320 nm)和长波紫外线(UVA, 320~400 nm)。传统的紫外光是由汞灯产生,低压汞灯(LP)主要波长为 253.7 nm,此波长对微生物有良好的灭活作用,因此被广泛运用在表面消毒、空气消毒以及水消毒。近年来,随着光技术的发展,发光二极管(LED)因具有环保、节能、便携等特点被引入作为新的紫外线光源,受到各界研究学者关注,并已在水消毒、食品表面消毒等方面开展研究。

紫外发光二极管(UV-LED)与汞灯因发光原理不同,在微生物灭活机制、灭活影响因素及对食品影响等方面也存在一定差异。本文重点在这三个方面进行综述,为 UV-LED 在食品行业中的

工业化应用参数优化提供参考。

1 UV-LED 基本情况

1.1 LED 的发光原理

LED 是一种基于半导体材料将电能转化为光能的器件,由 p 型半导体和 n 型半导体组成,当两端施加电压时,可将电信号转化为光信号。正极连接 p 型半导体(空穴),负极连接 n 型半导体(自由电子),在两个半导体之间存在一个过渡层(p-n 结)。存在正向电压时,电流由正极到负极,此时空穴与电子结合,能量从电信号转化为光信号。UV-LED 的应用使半导体材料中第Ⅲ主族氮化物基逐步发展,其中最常见的材料就是氮化镓、氮化铝镓和氮化铝,这些不同的半导体材料会影响 UV-LED 的波长。

1.2 LED 与汞灯的比较

LED 与汞灯相比,LED 具有更多的优势^[3]。发射波长上,LED 是发射单峰值波长的光谱,汞灯是发射连续波长的光谱,其波长范围一般比较大。预热时间上,LED 无需预热可直接工作,汞灯需要长时间预热,造成较大的能耗,这也是汞灯正常使用寿命普遍低于 LED 的原因之一。安全性上,LED 使用的半导体材料安全可靠,而汞灯易破损,存在泄露重金属汞的风险,同时处理不当的废弃汞灯也会导致环境污染。

1.3 LED 技术现状

早期 LED 因强度低、成本高,一直未能实现工业化应用。根据目前市场调研,短波 LED 的外量子效率(发光效率)一般较低,技术难度越大,

对固化材料、器件封装等技术提出了更高要求。随着技术的发展, LED 的外量子效率不断提高。短波氮化铝镓 (AlGaIn) 基深紫外 LED 外量子效率一般小于 20%, 而 365 nm 以上的氮化铝镓 (InGaIn) 基的 LED 外量子效率可达 46%~76%, 且技术相对成熟。目前, UVC-LED 外量子效率远小于 UVA-LED。近几年, 芯片开发者从封装模式上加以改进, 逐渐由单芯片发展到多芯片阵列模块, 因此芯片封装模块输出效率不断提高。

目前应用于空气杀菌的 UV-LED 消毒设备基本参照传统的汞灯进行设计, 而 UVC-LED 与汞灯光源的光谱波长存在一定差异。此外 UV-LED 可以采取多波长耦合的方式进行处理, 因此基于 UV-LED 杀菌消毒的设备条件、工艺参数及效果的研究仍需系统开展。

2 紫外光灭活微生物机制

紫外光可作用于细胞特定结构或成分, 导致微生物失活。DNA 损伤是紫外辐照后导致微生物灭活的最主要因素^[4], 此外, 脂质和蛋白质类生物分子是紫外辐照产生活性氧 (ROS) 的主要作用目标, 氧化损伤后有助于强化微生物灭活作用^[5]。

2.1 对遗传物质的影响

紫外辐照对 DNA 损伤是最显著的, 能阻碍细胞的正常繁殖及新陈代谢, 进而导致细胞死亡。DNA 吸收 UVC 后, 主要生成环丁烷型二聚体 (Cyclobutane Pyrimidine Dimers, CPD)、嘧啶 (6-4) 嘧啶酮光产物 (Pyrimidine 6-4 Pyrimidone Photoproducts, 6-4PP)^[6]等物质, 而细菌孢子 DNA 主要生成孢子光产物 (Spore photoproduct, SP)^[7]。当位于同一侧链上相邻的胸腺嘧啶、胞嘧啶聚合会形成 CPD, 俗称嘧啶二聚体, 通常含有胸腺嘧啶的二聚体最容易出现^[8], 而在细菌孢子中二聚体产生的数量与 SP 相比非常少。根据 Sinha 和 Hader 的研究, CPD 的生成量约为 6-4PP 的 3 倍。由于 6-4PP 修复效率较低, 可能比 CPD 更具有致命性和诱变性^[9]。这些形成的二聚体破坏了微生物的遗传物质组装及正常细胞功能。而细菌孢子产生的 SP 可以通过不同的机制在孢子萌发的前几分钟内进行有效修复, 因此 SP 的致死率远低于

CPD 或 6-4PP^[10]。这些是孢子抗性强的原因。

微生物细胞中的遗传物质不仅会受到 UVC 波段的影响, 同样也会受到其他波段的影响。当 6-4PP 暴露于 UVA 或 UVB 时, 可转化为杜瓦价异构体 (Dewar valence isomers, DewPP)。细胞分别暴露在 UVB 与 UVC 下研究发现, 在 UVB 中产生的 CPD、6-4PP 和 DewPP 要比在 UVC 中少^[11]。在 UVA 作用下产生的 CPD 远低于在 254 nm 波长产生的, 几乎可以忽略不计。

2.2 对脂质的影响

紫外辐照能产生活性氧 (ROS)。Santos^[12]发现, 活性氧 (ROS) 的产生与紫外波长存在一定关系, 在 UVA 下产生活性氧的水平最高, 可以达到 42.1%, 在 UVC 下产生的活性氧只有 8.2%。ROS 可使细胞膜的脂质双层脂肪酸氧化, 蒸发形成孔洞, 磷脂双层重排, 跨膜离子梯度改变, 造成细胞膜破坏, 进而导致细胞死亡。不饱和脂肪酸因其结构 (含有双键) 比饱和脂质对紫外线更敏感^[13]。Chamberlain^[14]发现紫外辐照过程中, 大肠杆菌细胞膜上的脂质发生了过氧化反应, 该反应的氧化程度与脂肪酸的不饱和度有关, 会随着辐照剂量的增加而增加。

2.3 对蛋白质的影响

紫外辐照会使蛋白质变性导致微生物灭活。携带发色团的蛋白质是与紫外光发生氧化反应的主要物质, 核心结构是组成蛋白质中氨基酸的侧链或是蛋白质自身结合的光敏剂。由于芳香族氨基酸的存在, 蛋白质一般吸收 250~320 nm 波段的紫外光; 还有一些与蛋白质结合的假体基团, 如黄素、血红素^[15]。这些发色团吸收紫外光后发生光氧化反应, 从而产生电离的激发态基团或自由基, 致使部分蛋白质失活导致细胞凋亡。Girard^[7]提出所有氨基酸残基均易氧化, 并且认为半胱氨酸残基中的巯基是蛋白质中最敏感的氧化靶点之一, 从而间接导致蛋白质损伤。当残基发生改变时, 进而发生多个次级变化过程, 导致分子内和分子间位点的破坏。因此蛋白质变性导致失活, 从而功能丧失^[21]。Chevremont 的研究表明^[16], 低紫外剂量下会发生 DNA 修复 (光复活、暗修复),

但 UVA 辐照可使 DNA 修复酶受损, 导致 DNA 无法修复, 因此 UVA 和 UVC 的耦合杀菌处理, 原理上可加强微生物灭活效果。

3 影响 UV-LED 灭活的因素

3.1 波长的影响

波长是紫外线灭活微生物的关键因素。UV-LED 可实现紫外全波段的单波长定制, 不同波长紫外光可发挥不同的作用, 因此, UV-LED 技术发展为不同波长紫外光辐照微生物灭活的精准定性和定量分析提供了可能。

根据 DNA 吸光度关系曲线, 260 nm 处波长表现出最大的吸光度^[17]。在测试的紫外波长中, 260 nm 附近的波长对细菌均有较好的灭活效果, 表明遗传物质在 260 nm 附近有最大紫外吸收。然而, 这并不代表 260 nm 的杀菌效果是最理想的。260 nm 和 280 nm 处均有明显的失活特性。Beck 等^[18]发现 260 nm 辐照对枯草芽孢杆菌、短小芽孢杆菌的灭活率低于 280 nm。经 255、265、285 nm 处理的牛肉汤、牛肉丁中李斯特菌, 最有效的灭活波长是 285 nm^[19]。Oguma 等开展了 265、280 和 300 nm 对几种微生物实现 3 log 灭活效果的研究, 结果表明 280 nm-LED 能以最低能耗达到高效灭活。由此可见, 紫外的微生物灭活效率不仅要考虑波长的影响, 还应考虑不同波长 LED 灯的外量子效率的影响。Aoyagi 研究发现^[20], 280 nm-LED 的外量子效率是 255 nm 处的 10 倍以上, 由此认为 280 nm 更适合于微生物灭活。

除了 UVC 常用于紫外杀菌外, 根据杀菌机理, UVA 具有较强的穿透能力, 同时产生对微生物的脂质和蛋白质造成损伤的活性氧 (ROS)。原理上 ROS 可加强微生物灭活效果, 因此, 近些年不同波长耦合处理微生物成为研究重点。Akgün^[21]使用 267、278 与 368 nm 对大肠杆菌、螺旋芽孢杆菌进行处理, 发现耦合后处理这两种菌的灭活效果不如单波长 267 nm; 也有研究^[22]结果显示, 使用 368 与 267 nm 耦合处理大肠杆菌, 灭活率要优于单波长 267 nm。由于不同波段紫外杀菌机理不同, UVA 和 UVC 波长不同的耦合处理条件(顺序处理或同时处理)会影响杀菌效果。因此, 具

体条件和处理效果有待进一步研究, 也为后续波长优化的研究打开了新的思路。

3.2 紫外剂量的影响

紫外剂量是杀菌效果评价的主要指标。Bolton^[23]定义紫外线剂量与紫外线辐射通量、衰减因子、暴露时间和辐射面积相关, 相应的公式如下:

$$D=[(\Phi \times \alpha) \div S] \times t \quad \text{式 (1)}$$

D: 紫外剂量 (mJ/cm²); Φ : 紫外辐射通量 (mW); α : 衰减因子; S: 辐照面积 (cm²); t: 处理时间 (s)。

LP 和 UV-LED 光源存在较大差异, LP 是平行光源, 具有高辐照通量率, 而 UV-LED 是发射漫射光的点光源。大多数 UV-LED 应用仍处于研发阶段, 由于结构和输出功率的差异, LP 的紫外通量的定量方法对 UV-LED 不适用, 这也是有些 UV-LED 研究结果不一致的原因之一。通常定义 UV-LED 点光源系统辐射强度为给定方向立方体内离开点光源的辐射通量。Kheyrandish 等^[24]重新制定了 UV-LED 输出、辐射分布、辐射功率和紫外剂量的协议, 以准确控制和监测 UV-LED 的输出, 确保使用准确可靠的方法评估不同实验和设备中 UV-LED 的一致性。

理论上微生物接收的紫外剂量越大, 灭活率会越高。邓晓丽^[25]将设备的剂量从 40 mJ/cm² 提升到 80 mJ/cm², 结果显示曲霉的灭活率从 0.3 (lg (CFU/mL)) 提升到 2 (lg (CFU/mL)) 以上; Saucedo^[26]发现在 20 °C 时, 苹果汁接收 21.5 J/mL 剂量的孢子灭活率比 7.2 J/mL 的要高出 3.5 (lg (CFU/mL))。在控制相同紫外辐照剂量的前提下, 不同的处理时间与紫外辐射强度会影响微生物灭活效果。研究表明, 使用 275 nm-LED 处理大肠杆菌, 在达到相同的紫外剂量条件下, 高辐射强度和短处理时间比低辐射强度和长处理时间有更高的灭活率。延长处理时间可能会导致微生物聚集, 从而导致失活率下降^[27]。因此, 在控制相同的紫外辐射剂量时, 较大的辐射强度可能会产生更好的灭菌效果。

UV-LED 的紫外剂量与波长具有一定相关

性。短波紫外受加工工艺影响，外量子效率低导致光功率输出较低，因此，波长越短紫外芯片封装的 LED 的辐射通量越低。由公式(1)可知，紫外剂量与辐射通量直接相关，也与波长相关，因此，需结合紫外波长分析紫外剂量的影响。同时在综合考虑能耗、加工成本的前提下，分析不同波长下紫外剂量的杀菌效果。3.1 波长中提到，260 nm 和 280 nm 都是微生物灭活的适宜波长。但在 265 nm 与 280 nm 外量子效率不同，265 nm-LED 灭活微生物消耗的能量约为 280 nm-LED 的一倍，总体来说，280 nm 是在低能耗条件下实现较高灭活效率的优选波长，这与上文的结论一致。

3.3 物料特性的影响

除了紫外波长和剂量，被处理的物料特性也会影响灭活效果。固体物料自身的完整性和光滑度会影响处理效果，Byun^[28]研究了不同表面形态咖啡豆上黄曲霉与寄生曲霉的灭活率，结果显示表面完整咖啡豆上的真菌残留量要小于表面带有裂缝的。还有研究表明金黄色葡萄球菌在不同物料上，灭活率也有所不同，灭活效果依次为不锈钢>罗马番茄和墨西哥胡椒>法兰克福香肠和德国香肠>带壳鸡蛋>生肉和鸡肉^[29]。放置物料的接触材料也会影响微生物的灭活率，相启森^[30]的实验结果证明，对不同食品接触材料的杀菌效果依次为玻璃片>OPP 薄膜>不锈钢片>牛皮纸。固体表面的灭活效果主要取决于表面特性，如疏水性和粗糙度等。

对于液体物料，不仅浑浊度会影响灭菌效果，液体的流速、液体厚度、温度以及 pH 值也会影响效果。Farrell^[31]提出紫外光对液体的消毒效果

取决于样品的浑浊度及紫外光通过样品的透射率，Barut^[32]的实验结果验证了这一点，饮品中固状颗粒物含量不同，含颗粒物较少的饮品中酵母菌灭活率更高，可能在辐射过程中悬浮颗粒会对微生物细胞起到遮挡作用。Franz^[33]的实验表明，在 2 L/h 流速下经过紫外光处理的苹果汁带菌量要低于静态处理的检测值；当液体厚度从 1.5 cm 上升到 3 cm 时，大肠杆菌的灭活率下降了 28%^[34]；当水温从 5 °C 上升到 30 °C 时，灭活率从原来的 77.71% 上升到 84.50%；冯俊生^[35]的实验得出 pH=7 水溶液载体对大肠杆菌的灭活率要高于 pH=5 与 pH=9 的水溶液载体。

4 UV-LED 对食品的影响

4.1 处理食品的杀菌效果

近年来 UV-LED 展现了良好的灭菌效果（如表 1）。Kim^[36]使用 280 nm-LED 对菠菜叶片进行照射，表面的细菌减少 2.4~2.6 log，AIHARA^[37]使用 UVA-LED 照射蔬菜表面，上面的细菌减少了 3.23 log。Nyhan 等^[38]研究了 UV-LED 对粉状固体上的微生物灭活效果，经过 270 nm-LED 照射 40 s 可以减少胡椒粉中 1~1.5 log 的大肠杆菌，而在洋葱粉上的大肠杆菌可以减少 2.5 log，认为物料粒度的大小导致灭活效果出现差异；对于肉介质上的微生物灭活效果与前两种固体介质相比要略差，Kim^[36]使用 280 nm-LED 对熟食肉片中的三种细菌作用发现，与蔬菜照射相同时间，而细菌的灭活数却相差 1 log 以上；Haughton^[39]使用近紫外（395 nm-LED）照射生鸡肉上的空肠弯曲杆菌 3 min，使其灭活 2.21 log。

表 1 UV-LED 对食品中微生物的灭活效果

Table 1 The inactivation effect of UV-LED on microorganisms in food

处理对象	紫外光类型/波长	时间	目标微生物	减少的微生物数量	参考文献
白菜	UVA-LED (365 nm)	90 min	大肠杆菌	3.23 logCFU/g	[39]
菠菜表面	UVC-LED (280 nm)	14 s	鼠伤寒门沙氏菌、大肠杆菌、李斯特菌	2.4~2.6 logCFU/g	[36]
熟食肉片				1~1.6 logCFU/g	
生鸡肉	UVA-LED (395 nm)	3 min	空肠弯曲杆菌	2.21 logCFU/g	[38]
水		2 min		3 logCFU/mL	
盐水	UVC-LED (281 nm)	0.19 s	大肠杆菌	2 logCFU/mL	[40]
混合饮料 (MB)	UVC/UVA-LED (280 nm/365 nm)		大肠杆菌 K12	4 logCFU/mL	[41]
苹果汁	UVC-LED (280 nm)	40 min	大肠杆菌 K12	4.4 logCFU/mL	[21]

在水中照射 2 min, 可以使其中的空肠弯曲杆菌的灭活值达到 3 log 以上。Popović^[40]使用 281 nm-LED 处理含有大肠杆菌的盐水发现, 流动的盐水在设备中停留 0.19 s 可以使其灭活 2 log, 而紫外剂量仅为 11.6 mJ/cm²。固体物料和液体物料灭活效果存在较大差异, 主要是因为紫外光可以穿透液体找到液体内部的微生物, 而对固体物料中只能处理到表面的微生物, 如 3.3 中论述, 受固体表面特性影响较大。

4.2 灭活处理对食品品质的影响

紫外辐照效果不仅要考虑目标食品微生物灭活效果, 同时也需考虑 UV-LED 处理后对品质的影响。不同食品需关注的指标有所不同(见表 2)。

表 2 UV-LED 照射对食品质量指标的影响
 Table 2 The effect of UV-LED irradiation on food quality indicators

处理对象	对食品质量指标的影响	参考文献
番茄	PG 酶含量显著降低	[48]
卷心菜	对外观色泽没有显著影响	[49]
混合饮料	类胡萝卜素下降 71.3%、颜色参数略有差异	[41]
橙汁	理化指标无显著变化、总酚含量降低、出现色差	[42]
奶酪	对奶酪质量基本没有影响	[43]
金枪鱼肉	质地参数均无显著变化、对脂质有略微影响	[44]

用紫外辐照处理饮品的应用较多。饮品中不仅存在微生物, 同时存在大量营养物质。合理的紫外辐照工艺参数, 既要考虑杀菌又要考虑尽可能减少营养物质损失。Baykuş^[41]发现经 280、365 和 280/365 nm 处理的混合果蔬饮料, 在不同辐照时间下, 饮料颜色几乎没有变化, 但类胡萝卜素保留量比热处理的要多。Zhai 等^[42]用 275 nm-LED 处理橙汁, 橙汁的 pH、可滴定酸度、总可溶性固体和澄清度都没有显著变化。然而, 其中的总酚含量随着通量的增加而降低, 且在高通量处理后会引起明显的色差。

UV-LED 处理固体食品表面微生物也展示了强大的潜力。研究的食品包括肉制品、乳制品、水果和蔬菜。在使用 UVC-LED 对含有大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌和李斯特菌切片奶酪进行杀菌处理的研究中发现, 使用波长为 266~279 nm 可以使

菌落数减少且对奶酪质量没有影响^[43]。Fan 等^[44]用 UVC-LED (高达 4 000 mJ/cm²) 处理生金枪鱼片, 在质地参数上与对照组没有显著差异, 包括硬度、弹性、内聚性、粘性、咀嚼性和弹性, 但会导致样品中脂质氧化水平升高。Soro 等^[45]用 280+300 nm 紫外线照射处理鸡肉切块 6 min, 发现脂肪酸上升 0.1%~0.2%。但由于 LED 发射的光能与光敏化合物反应, 在乳制品中能诱导产生不良的风味^[46]。在肉类品质感官实验中, 当脉冲紫外光能量超过 2.1 J/cm² 会导致肉类品质恶化^[47]。

紫外光还可使食品中一些特定的活性物质失活或钝化, 从而实现延长保质期的目的, 例如番茄中的 PG 酶^[48]。因此, 紫外处理工艺条件的优化, 既要考虑杀菌效果延长保质期, 也要考虑食品的感官、质地、营养成分等质量指标保留在合理范围内。

5 结论与展望

UV-LED 作为一种用于液体和固体表面消毒的潜在非热技术, 过去十多年一直备受关注。近些年, UV-LED 外量子效率、封装方式及使用寿命等方面取得了巨大进展, 成本也大幅降低, 使其在食品行业杀菌消毒方面具有极大优势, 替代传统紫外灯成为必然趋势。但这项技术要广泛应用于食品行业, 仍需开展大量的研究工作。

UV-LED 处理食品微生物仍处于实验室研究阶段, 且有些研究结果不一致, 因此规范 UV-LED 输出、辐射分布、辐射功率和紫外线剂量的检测和评估方法, 对设备参数的优化及效果评价具有十分重要的意义。此外应深入研究多波长组合的效果。虽然 UV-LED 可以有效灭活多种食源性致病菌, 但由于 DNA 的自我修复机制, 可能会提高细胞存活率。为了克服微生物的适应性应激反应, 需要进一步研究探索不同波长组合和处理顺序对目标微生物 DNA 修复机制和微生物灭活率的影响, 阐明各种组合在减少处理时间和降低能耗方面的可能性。还应该在 UV-LED 对食品外观、质量、营养成分等指标的影响方面深入开展研究。高紫外剂量杀菌处理在延长保质期的同时也可能引起食品各项指标的负面变化, 影响消费者的接

受度。因此,未来应积极探索多波长组合杀菌处理工艺参数,为其工业化应用提供支撑。

参考文献:

- [1] KOUTCHMA T. Chapter 4-Validation of light-based processes [M]//Koutchma T. Validation of Food Preservation Processes Based on Novel Technologies. Press, 2022: 113-167.
- [2] PRASAD A, DU L, ZUBAIR M, et al. Applications of Light-Emitting Diodes (LEDs) in Food Processing and Water Treatment [J]. Food Engineering Reviews, 2020, 12(3): 268-289.
- [3] 彭洋, 陈明祥, 罗小兵. 深紫外 LED 封装技术现状与展望[J]. 发光学报, 2021, 42(4): 542-559.
PENG Y, CHEN M X, LUO X B. Status and perspectives of deep ultraviolet LED packaging technology[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(4): 542-559.
- [4] EZZATPANAH H, GÓMEZ LÓPEZ V M, KOUTCHMA T, et al. New food safety challenges of viral contamination from a global perspective: Conventional, emerging, and novel methods of viral control[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(2): 904-941.
- [5] HINDS L M, O'DONNELL C P, AKHTER M, et al. Principles and mechanisms of ultraviolet light emitting diode technology for food industry applications[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 56: 102153.
- [6] IKEHATA H, MORI T, DOUKI T, et al. Quantitative analysis of UV photolesions suggests that UVB radiation produces cyclobutane pyrimidine dimers more mutagenic than UVC in mouse skin[J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2018, 17(4): 404-413.
- [7] GIRARD P M, FRANCESCO S, POZZEBON M, et al. UVA-induced damage to DNA and proteins: direct versus indirect photochemical processes[J]. Journal of physics. Conference series, 2011, 261(1): 12002-12010.
- [8] RASTOGI R P, RICHA, KUMAR A, et al. Molecular Mechanisms of Ultraviolet Radiation-Induced DNA Damage and Repair[J]. Journal of nucleic acids, 2010, 2010: 592932-592980.
- [9] GAYÁN E, CONDÓN S, ÁLVAREZ I. Biological aspects in food preservation by ultraviolet light: a review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(1): 1-20.
- [10] SETLOW P. Spores of Bacillus subtilis: their resistance to and killing by radiation, heat and chemicals[J]. Journal of applied microbiology, 2006, 101(3): 514-525.
- [11] SETLOW P. Resistance of spores of Bacillus species to ultraviolet light[J]. Environmental and molecular mutagenesis, 2001, 38(2-3): 97-104.
- [12] SANTOS A L, OLIVEIRA V, BAPTISTA I, et al. Wavelength dependence of biological damage induced by UV radiation on bacteria[J]. Archives of Microbiology, 2013, 195(1): 63-74.
- [13] SMITH H L, HOWLAND M C, SZMODIS A W, et al. Early stages of oxidative stress-induced membrane permeabilization: a neutron reflectometry study[J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, 131(10): 3631-3638.
- [14] CHAMBERLAIN J, MOSS S H. Lipid peroxidation and other membrane damage produced In escherichia coli K1060 by near-uv radiation and deuterium oxide[J]. Photochemistry and Photobiology, 1987, 45: 625-630.
- [15] WATSON R, GIBBS N K, GRIFFITHS C, et al. Damage to skin extracellular matrix induced by UV exposure[J]. Antioxid Redox Signal, 2014, 21(7): 1063-1077.
- [16] CHEVREMENT A C, FARNET A M, COULOMB B, et al. Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution of urban wastewaters[J]. Science of The Total Environment, 2012, 426: 304-310.
- [17] LI X, CAI M, WANG L, et al. Evaluation survey of microbial disinfection methods in UV-LED water treatment systems[J]. Science of The Total Environment, 2019, 659: 1415-1427.
- [18] BECK S E, RYU H, BOCZEK L A, et al. Evaluating UV-C LED disinfection performance and investigating potential dual-wavelength synergy[J]. Water Research, 2017, 109: 207-216.
- [19] MCSHARRY S, KOOLMAN L, WHYTE P, et al. Inactivation of listeria monocytogenes and salmonella typhimurium in beef broth and on diced beef using an ultraviolet light emitting diode (UV-LED) system[J]. LWT, 2022, 158: 113150.
- [20] AOYAGI Y, TAKEUCHI M, YOSHIDA K, et al. Inactivation of bacterial viruses in water using deep ultraviolet semiconductor light-emitting diode[J]. Journal of environmental engineering (New York, N.Y.), 2011, 137(12): 1215-1218.
- [21] AKGÜN M P, ÜNLÜTÜRK S. Effects of ultraviolet light emitting diodes (LEDs) on microbial and enzyme inactivation of apple juice[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 260: 65-74.
- [22] NYANGARESI P O, RATHNAYAKE T, BECK S E. Evaluation of disinfection efficacy of single UV-C, and UV-A followed by UV-C LED irradiation on Escherichia coli, B. spizizenii and MS2 bacteriophage, in water[J]. Science of The Total Environment, 2023, 859: 160256.
- [23] BOLTON J R, LINDEN K G. Standardization of methods for fluence (UV Dose) determination in bench-scale UV experiments [J]. Journal of environmental engineering (New York, N.Y.), 2003, 129(3): 209-215.
- [24] KHEYRANDISH A, TAGHIPOUR F, MOHSENI M. UV-LED radiation modeling and its applications in UV dose determination for water treatment[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2018, 352: 113-121.
- [25] 邓晓丽. 紫外灭活地下水供水系统中丝状真菌的光复活特性与控制[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019: 29-30.
DENG X L. Photoreactivation of fungi in groundwater following UV inactivation and their control[D]. Xian: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019: 29-30.
- [26] SAUCEDA-GÁLVEZ J N, TIÓ-COMA M, MARTINEZ-GARCIA M, et al. Effect of single and combined UV-C and

- ultra-high pressure homogenisation treatments on inactivation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores in apple juice[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 60: 102299.
- [27] SONG K, MOHSENI M, TAGHIPOUR F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review[J]. *Water Research*, 2016, 94: 341-349.
- [28] BYUN K H, PARK S Y, LEE D U, et al. Effect of UV-C irradiation on inactivation of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* and quality parameters of roasted coffee bean (*Coffea arabica* L) [J]. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 2020, 37(3): 507-518.
- [29] SOMMERS C H, SITES J E, MUSGROVE M. ultraviolet light (254 nm) inactivation of pathogens on foods and stainless-steel surfaces[J]. *Journal of Food Safety*, 2010, 30(2): 470-479.
- [30] 相启森, 董闪闪, 范刘敏, 等. 紫外发光二极管对食品接触材料的杀菌动力学及影响因素[J]. *食品科学*, 2022, 43(5): 17-25. XIANG Q S, DONG S S, FAN L M, et al. Bactericidal kinetics of Ultraviolet C light-emitting diodes against bacteria on food contact materials and factors influencing it[J]. *Food Science*, 2022, 43(5): 17-25.
- [31] FARRELL C, HASSARD F, JEFFERSON B, et al. Turbidity composition and the relationship with microbial attachment and UV inactivation efficacy[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 624: 638-647.
- [32] BARUT GÖK S. UV-C treatment of apple and grape juices by modified UV-C reactor based on dean vortex technology: microbial, physicochemical and sensorial parameters evaluation [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 14(6): 1055-1066.
- [33] FRANZ C M A P, SPECHT I, CHO G, et al. UV-C-inactivation of microorganisms in naturally cloudy apple juice using novel inactivation equipment based on Dean vortex technology[J]. *Food Control*, 2009, 20(12): 1103-1107.
- [34] 夏冠英炫. 新型紫外线水消毒灯的杀菌效果及其影响因素研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018: 7-10. XIA G Y X. Study on the bactericidal effect and influencing factors of a new type of ultraviolet water disinfection lamp[D]. Qingdao: Qingdao University, 2018: 7-10.
- [35] 冯俊生, 蔡晨, 姚海祥, 等. 紫外联合过硫酸盐杀灭水中大肠杆菌[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(8): 1847-1856. FENG J S, CAI C, YAO H Y, et al. Inactivation effect of *Escherichia coli* by ultraviolet combined with persulfate[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(8): 1847-1856.
- [36] KIM D, KANG D. Inactivation efficacy of a sixteen UVC LED module to control foodborne pathogens on selective media and sliced deli meat and spinach surfaces[J]. *LWT*, 2020, 130: 109422
- [37] AIHARA M, LIAN X, SHIMOHATA T, et al. Vegetable surface sterilization system using UVA light-emitting diodes[J]. *J Med Invest*, 2014, 61(3-4): 285-290.
- [38] NYHAN L, PRZYJALGOWSKI M, LEWIS L, et al. Investigating the use of ultraviolet light emitting diodes (UV-LEDs) for the inactivation of bacteria in powdered food ingredients[J]. *Foods*, 2021, 10(4): 797.
- [39] HAUGHTON P N, GRAU E G, LYNG J, et al. Susceptibility of *Campylobacter* to high intensity near ultraviolet/visible 395±5nm light and its effectiveness for the decontamination of raw chicken and contact surfaces[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 159(3): 267-273.
- [40] POPOVIĆ V, KOUTCHMA T. Characterizing the performance of a continuous-flow UV-LED system for treatment of juices and beverages using multiple wavelengths[J]. *Food Engineering Reviews*, 2021, 13(3): 686-695.
- [41] BAYKUŞ G, AKGÜN M P, UNLUTURK S. Effects of ultraviolet-light emitting diodes (UV-LEDs) on microbial inactivation and quality attributes of mixed beverage made from blend of carrot, carob, ginger, grape and lemon juice[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 67: 102572.
- [42] ZHAI Y, TIAN J, PING R, et al. Effects of ultraviolet-C light-emitting diodes at 275 nm on inactivation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* vegetative cells and its spores as well as the quality attributes of orange juice[J]. *Food Science and Technology International*, 2021, 27(4): 334-343.
- [43] KIM S J, KIM D K, KANG D H. Using UVC light-emitting diodes at wavelengths of 266 to 279 nanometers to inactivate foodborne pathogens and pasteurize sliced cheese[J]. *Applied and environmental microbiology*, 2016, 82(1): 11-17.
- [44] FAN L, LIU X, DONG X, et al. Effects of UVC light-emitting diodes on microbial safety and quality attributes of raw tuna fillets[J]. *LWT*, 2021, 139: 110553.
- [45] SORO A B, HARRISON S M, WHYTE P, et al. Impact of ultraviolet light and cold plasma on fatty acid profile of raw chicken and pork meat[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 114: 104872.
- [46] CHANG A C, DANDO R. Exposure to light-emitting diodes may be more damaging to the sensory properties of fat-free milk than exposure to fluorescent light[J]. *Journal Of Dairy Science* 2018, 101(1): 154-163.
- [47] HIERRO E, GANAN M, BARROSO E. Pulsed light treatment for the inactivation of selected pathogens and the shelf-life extension of beef and tuna carpaccio[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 158(1): 42-48.
- [48] PIZARRO-OTEÍZA S, SALAZAR F. Effect of UV-LED irradiation processing on pectolytic activity and quality in tomato (*Solanum lycopersicum*) juice[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 80: 103097.
- [49] LEE J Y, YANG S Y, YOON K S. Control measures of pathogenic microorganisms and shelf-life extension of fresh-cut vegetables[J]. *Foods*, 2021, 10(3): 655. 