



王雯雯,相启森,白艳红. UV-LEDs 技术在食品杀菌保鲜领域中的应用研究进展[J]. 轻工学报,2022,37(1):46-54.

WANG W W, XIANG Q S, BAI Y H. Research advance on the application of ultraviolet light-emitting diodes technology in food sterilization and preservation[J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(1): 46-54.

DOI:10.12187/2022.01.007

UV-LEDs 技术在食品杀菌保鲜领域中的应用研究进展

王雯雯,相启森,白艳红

郑州轻工业大学 食品与生物工程学院/河南省冷链食品质量与安全控制重点实验室,河南 郑州 450001

摘要: 食品在生产和消费环节极易受到微生物污染,严重影响其安全性和品质。紫外发光二极管(Ultraviolet Light-emitting Diodes, UV-LEDs)作为传统紫外汞灯的替代光源,具有波长可调、绿色环保、安全高效等优点。对该技术在食品杀菌保鲜领域的应用、其对食品品质的影响及与其他非热杀菌技术协同杀菌的应用研究进行了综述,认为:UV-LEDs 技术不仅能够有效杀灭食源性致病菌和腐败菌,而且可以较好地保持食品品质,将其与微酸性电解水、Cl₂、超声波等协同使用,可进一步增强其杀菌效果。然而,该技术在应用过程中存在穿透力弱、处理量小等问题,今后应在处理工艺参数优化和装置方面进行深入研究,以期 UV-LEDs 技术在食品安全控制领域中的实际应用提供参考。

关键词: 紫外发光二极管;非热杀菌技术;食品安全;杀菌保鲜

中图分类号: TS201.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2022)01-0046-09

0 引言

随着消费者对食品质量安全要求的不断提高,食品安全已成为社会关注的焦点问题,而由微生物污染引发的食源性疾病严重威胁着消费者健康^[1]。在食品加工产业链中,杀菌是保障食品安全的核心环节,传统的热杀菌技术会对食品的营养和感官品质造成不良影响^[2-3],紫外线(Ultraviolet Light, UV)、超高压、脉冲电场、超声波、高密度 CO₂ 等非热杀菌技术逐渐成为国际食品科学领域新兴的研究方向^[4-5]。

UV 是指波长范围为 10~400 nm 的电磁波辐

射^[6]。根据波长范围的不同,可将用于杀菌的 UV 分为短波紫外线(UVC,波长范围为 200~280 nm)、中波紫外线(UVB,波长范围为 280~320 nm)和长波紫外线(UVA,波长范围为 320~400 nm)^[7]。UV 作为一种非热杀菌技术,已被美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)批准用于果蔬、肉类、水产品、牛奶等多种食品的杀菌保鲜^[8-10]。目前,UV 主要由低压/中压汞灯产生,存在耗能高、易损坏、易产生有毒物质等问题^[11]。近年来,紫外发光二极管(Ultraviolet Light-emitting Diodes, UV-LEDs)作为传统紫外线汞灯的替代光源,已被广泛应用于食品杀菌保鲜、饮用水及食品接

收稿日期:2021-03-29

基金项目:河南省重大公益专项项目(201300110100)

作者简介:王雯雯(1996—),女,河南省信阳市人,郑州轻工业大学硕士研究生,主要研究方向为肉品加工与质量安全控制。
E-mail:1737355088@qq.com

通信作者:白艳红(1975—),女,辽宁省彰武县人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为肉品加工与质量安全控制。
E-mail:baiyanhong@zzuli.edu.cn

触材料消毒等诸多领域^[12-13]。本文将对 UV-LEDs 技术在食品杀菌保鲜领域的应用、其对食品品质的影响,以及与其他非热杀菌技术协同杀菌的应用研究进展进行综述,以期为该技术在食品工业领域的广泛应用提供参考。

1 UV-LEDs 技术概述

UV-LEDs 是指能够发出近紫外光的发光二极管(LED)。LED 是一种可以直接将电能转化为光能的固态半导体器件,其核心部分是一个晶片,由 p 型半导体和 n 型半导体两部分组成,分别连接电源的正极和负极^[14]。p 型半导体中空穴占主导地位, n 型半导体中主要是自由电子。在 p 端和 n 端之间有一个过渡层,称为 p-n 结^[15]。正向电压存在时,电流通过 p-n 结从 p 侧流向 n 侧,此时自由电子与空穴复合,能量以光子形式释放出来,从而产生电致发光现象^[16]。LED 一般在 p-n 结处有一层非常稀薄的材料(量子阱),它可以加快电子和空穴的复合过程,进而提高 LED 发光效率。改变量子阱的组成可使 LED 发出从紫外到红外不同波长的光^[17],通过控制电流大小还可调节光照强度。

与传统紫外灯相比,UV-LEDs 具有如下优势:其内部由很小的二极管(直径 5~9 mm)组成,结构紧凑且坚固;不需要预热,可以快速开/关机,其能耗和产热量均远低于传统低压汞灯^[14],更适用于低温食品杀菌保鲜;在正常使用条件下,其使用寿命范围为 25 000~100 000 h^[18],远长于传统紫外光源;不会造成环境污染且可回收利用,克服了传统紫外灯含汞而不安全的问题^[19];传统低压汞灯的主要发射波长为 253.7 nm,而 UV-LEDs 可以通过改变半导体材料的类型而改变其波长,其设计更为灵活^[20-22]。

2 UV-LEDs 技术在食品杀菌保鲜领域中的应用

大量研究表明,UV-LEDs 可有效杀灭各种食源性致病菌(金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、大肠杆菌等)和腐败菌(假单胞菌、腐败希瓦氏菌等),对果蔬^[23]、肉品^[24]、水产品^[25]、乳制品^[26]等具有良好的杀菌效果。

2.1 果蔬产品杀菌保鲜及对品质的影响

2.1.1 在果蔬产品杀菌保鲜中的应用 研究^[23,27-34]表明,UV-LEDs 可有效杀灭污染苹果、草莓、菠菜、白蘑菇、橙汁等的有害微生物,并能延长其货架期(见表 1)。V. R. D. Souza 等^[23]研究表明,在(25 ℃或 4 ℃)相同处理条件下,UVC-LEDs(波长为 277 nm)对扩展青霉孢子的杀灭效果均优于低压汞灯(波长为 253.7 nm);要使苹果表面扩展青霉孢子降低超过 2 lg CFU/cm²,所需 UVC-LEDs 处理剂量为 250 mJ/cm²,而所需低压汞灯处理剂量为 1000 mJ/cm²。可见,UVC-LEDs 相较于传统低压汞灯表现出更强的杀菌效能。

2.1.2 对果蔬产品品质的影响 果蔬中的营养物质含量丰富,有益于人体健康。近年来,国内外学者在研究 UV-LEDs 对果蔬产品杀菌保鲜效果的同时,也系统评价了其对果蔬产品品质的影响。M. Aihara 等^[28]研究发现,与未处理组样品相比,在 4 ℃、15 ℃或 30 ℃条件下,UVA-LEDs(波长为 365 nm)处理组卷心菜的品质和维生素 C 含量均未发生显著变化($P>0.05$)。V. R. D. Souza 等^[23]研究发现,与未处理组样品相比,采用 UVC-LEDs(波长为 277 nm)处理苹果并在 4 ℃条件下贮藏 0~12 周,其样品的可滴定酸度、可溶性固形物含量、pH 值等均未发生显著变化($P>0.05$)。Y. F. Zhai 等^[32]研究发现,UVC-LEDs 处理剂量高达 220 mJ/cm²时,橙汁的 pH 值、可滴定酸度、总可溶性固形物含量、澄清度等理化指标均未发生显著变化($P>0.05$),但总酚含量随处理剂量的增加而显著降低($P<0.05$),这可能是由于 UVC-LEDs 处理造成橙汁中酚类化合物降解所致。

在果蔬产品加工过程中,感官品质会直接影响消费者对果蔬产品的接受度。G. Bayku 等^[33]研究发现,与未处理组样品相比,经 UV-LEDs 处理后复合果蔬汁的色泽参数发生了变化($\Delta E=0.94$),但差异不显著($P>0.05$)。Q. S. Xiang 等^[35]研究发现,UVC-LEDs 处理会导致苹果汁的 a^* 值、 b^* 值、总色差等色泽参数和褐变指数发生显著变化($P<0.05$),这可能是由于长时间暴露于 UV 下,样品中的类胡萝卜素、抗坏血酸、多酚等物质发生了氧化或花色苷

表1 UV-LEDs技术在果蔬杀菌保鲜中的应用效果

Table 1 Application effect of UV-LEDs technology in the sterilization and preservation of fruits and vegetables

UV-LEDs 波长/nm	研究对象	微生物种类	处理剂量/ ($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)	杀菌保鲜效果	参考文献
277	苹果	扩展青霉 (<i>Penicillium expansum</i>)	250	苹果表面的扩展青霉孢子降低了 $2.8 \lg \text{CFU}/\text{cm}^2$	[23]
272~293	草莓	灰葡萄孢菌 (<i>Botrytis cinerea</i>)	25.92	经 UV-LEDs 处理后,于 5 °C 条件下贮藏 9 d, 草莓表面未发现有灰葡萄孢菌生长; 与未处理组样品相比,UV-LEDs 处理可使样品贮藏期延长 3 d	[27]
365	卷心菜	大肠杆菌 DH5 α (<i>Escherichia coli</i> DH5 α)	67.5	卷心菜表面的大肠杆菌 DH5 α 降低 $3.23 \lg \text{CFU}/\text{g}$	[28]
240~280	菠菜	大肠杆菌 O157:H7(<i>E. coli</i> O157:H7)、鼠伤寒沙门氏菌 (<i>Salmonella typhimurium</i>) 和单增李 斯特菌(<i>Listeria monocytogenes</i>)	21.6	菠菜表面的大肠杆菌 O157:H7、 鼠伤寒沙门氏菌和单增李斯特菌均降低了 $2.4\sim 2.6 \lg \text{CFU}/\text{g}$	[29]
280	香菜	鼠伤寒沙门氏菌和大肠杆菌 O157:H7	300	香菜表面的鼠伤寒沙门氏菌和大肠杆菌 O157:H7 分别降低了 $1.1 \lg \text{CFU}/\text{g}$ 和 $1.0 \lg \text{CFU}/\text{g}$	[30]
280	白蘑菇	大肠杆菌 O157:H7 和 鼠伤寒沙门氏菌	2100	白蘑菇表面的大肠杆菌 O157:H7 和 鼠伤寒沙门氏菌分别降低了约 $2 \lg \text{CFU}/\text{mL}$ 和 $1.5 \lg \text{CFU}/\text{mL}$	[31]
275	橙汁	脂环酸芽孢杆菌 (<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>)	220	橙汁中脂环酸芽孢杆菌的营养细胞 及其芽孢分别减少了 $6.04 \lg \text{CFU}/\text{mL}$ 和 $2.49 \lg \text{CFU}/\text{mL}$	[32]
280	复合果汁	大肠杆菌 K12(<i>E. coli</i> K12)	30.86	复合果汁中大肠杆菌 K12 减少了 $3.44 \lg \text{CFU}/\text{mL}$	[33]
280	苹果汁	大肠杆菌 K12	771.6	苹果汁中大肠杆菌 K12 减少了 $4.4 \lg \text{CFU}/\text{mL}$	[34]

发生了光降解^[36]。

2.2 对肉制品杀菌保鲜及品质的影响

2.2.1 在肉制品杀菌保鲜中的应用

原料肉及肉制品在储存、运输、销售等过程中极易发生微生物污染,从而造成其营养价值和感官品质的降低,甚至引发食源性疾病^[37]。研究证实,UV-LEDs对生鲜鸡肉^[38]、熟食肉片^[29]、即食香肠^[31]等具有良好的杀菌效果。P. N. Haughton等^[38]研究发现,经UVA-LEDs(波长为395 nm,剂量为9 J/cm²,照射距离为3 cm)处理5 min后,生鲜鸡肉表面的空肠弯曲杆菌(*Campylobacter jejuni*)降低了2.62 lg CFU/g。D. K. Kim等^[29]研究发现,经UVC-LEDs(波长为240~280 nm,剂量为21.6 mJ/cm²)处理后,熟食肉片表面的大肠杆菌O157:H7、鼠伤寒沙门氏菌和单增李斯特菌分别降低了1.1 lg CFU/cm²、1.5 lg CFU/cm²和1.6 lg CFU/cm²。类似地,D. K. Kim等^[31]研究发现,经

连续UVC-LEDs处理后,即食香肠表面的大肠杆菌O157:H7、鼠伤寒沙门氏菌和单增李斯特菌分别减少了2.0 lg CFU/g、1.5 lg CFU/g和2.0 lg CFU/g。

2.2.2 对肉制品品质的影响

有研究^[38]表明,经UVA-LEDs处理后,鸡肉的 a^* 值及其品质均未发生显著变化($P>0.05$);在距离10 cm的条件下处理3 min后,鸡肉的 b^* 值升高而 L^* 值降低($P<0.05$);但较短时间处理未对鸡肉色泽造成显著不良影响。与此同时,A. B. Soro等^[24]研究发现,采用UV-LEDs(波长为280 nm)处理鸡胸肉片并置于4 °C条件下储存7 d,未对鸡胸肉的色泽、质构(硬度、弹性、黏结性、胶黏性和咀嚼性)和pH值造成不良影响。

2.3 在其他食品杀菌保鲜中的应用

2.3.1 在面粉杀菌保鲜中的应用

谷物是人类重要的营养来源,但其在生产、加工、储存等环节极易被真菌和霉菌毒素污染,对人体健康造成威胁^[39]。

S. Subedi 等^[40]研究发现,与未处理组样品相比,在 25 ℃、相对湿度 75%条件下,经 UV-LEDs(波长分别为 275 nm、365 nm 和 395 nm)处理 60 min 后,小麦面粉中沙门氏菌分别降低了 1.07 lg CFU/g、2.42 lg CFU/g 和 3.67 lg CFU/g;面粉含水量降低,面筋蛋白发生了氧化,面筋二级结构也发生了变化;在 275 nm 波长下处理 60 min 后,面粉色泽未发生显著变化,但在 365 nm 和 395 nm 波长下处理 60 min 后,面粉色泽发生了显著改变,且 395 nm 波长处理对面粉的增白效果最佳。L. H. Du 等^[41]研究发现,经脉冲 UV-LEDs(波长为 395 nm)处理 60 min 后,小麦面粉中沙门氏菌降低了 2.91 lg CFU/g;此外,面筋弹性增强,这可能是由于形成的二硫键引起了面筋蛋白的聚合。以上结果表明,UV-LEDs 处理不仅能有效杀灭面粉中的有害微生物,而且能够改善色泽、弹性等理化特性。

2.3.2 在水产品杀菌保鲜中的应用 鱼、虾、贝类等水产品含水量高且富含蛋白质、多不饱和脂肪酸等营养物质,在运输、加工和储存过程中极易发生腐败变质,甚至产生有毒物质,危害人体健康^[42]。L. M. Fan 等^[25]研究发现,采用 UVC-LEDs(波长为 275 nm,剂量为 4000 mJ/cm²)处理生鲜金枪鱼片,可使鼠伤寒沙门氏菌、单增李斯特菌和大肠杆菌 O157:H7 分别降低 1.31 lg CFU/cm²、1.86 lg CFU/cm² 和 1.77 lg CFU/cm²,金枪鱼片的 pH 值、持水力、肌红蛋白含量、质构、色泽等指标均未发生显著变化($P>0.05$),但脂质氧化水平升高。这可能是因为 UVC-LEDs 处理下产生的 H₂O₂、·O₂⁻、·OH 等活性氧可以诱导脂质发生氧化^[43]。因此,在今后的研究中应系统优化 UV-LEDs 的处理工艺参数,在保证杀菌保鲜效果的前提下避免对水产品品质造成不良影响。

2.3.3 在乳制品杀菌保鲜中的应用 乳制品富含维生素、蛋白质、矿物质等多种营养物质,在生产加工过程中易受霉菌、酵母、细菌等微生物污染。S. J. Kim 等^[26]研究发现,与未处理组样品相比,经 UVC-LEDs(波长为 266 nm~279 nm,剂量为 3 mJ/cm²)处理后,奶酪切片表面的大肠杆菌 O157:H7、鼠伤寒沙门氏菌和单核增生李斯特菌降低了约 2.2~4.8 lg CFU/g;奶酪的 a* 值、b* 值、L* 值等色泽参数

均发生了轻微变化($P>0.05$)。

综上所述,UV-LEDs 处理可有效杀灭食品表面微生物,但由于处理参数(处理波长、照射时间、照射距离等)及食品本身特性(如表面粗糙度、表面疏水性等)的不同,UV-LEDs 处理也可能会对食品品质造成一定程度的不良影响。

3 UV-LEDs 协同杀菌技术研究进展

研究^[44-45]发现,食物本身特性、微生物类型、处理参数等均可能影响 UV-LEDs 的杀菌效果。为增强 UV-LEDs 对微生物的杀灭效果,可将其与微酸性电解水、Cl₂、超声波等协同使用。

3.1 与微酸性电解水协同处理

微酸性电解水(Slightly Acidic Electrolytic Water, SAEW)是一种高效、无色无味且对人体和环境无害的消毒剂,已被美国、日本等国家批准在某些食品表面直接使用^[46]。Y. R. Jiang 等^[30]研究发现,SAEW 与 UV-LEDs 协同处理可以有效杀灭污染香菜叶的鼠伤寒沙门氏菌和大肠杆菌 O157:H7。经 SAEW(有效氯质量浓度为 60 mg/L,洗涤时间为 5 min)和 UV-LEDs(功率为 240 μW/cm²,照射时间为 30 min)单独处理后,香菜叶表面的鼠伤寒沙门氏菌分别降低约 1.85 lg CFU/g 和 1.15 lg CFU/g,大肠杆菌 O157:H7 分别降低约 1.87 lg CFU/g 和 1.22 lg CFU/g。而在相同条件下,经 SAEW 与 UV-LEDs 协同处理后,香菜叶表面的鼠伤寒沙门氏菌和大肠杆菌 O157:H7 分别降低约 2.72 lg CFU/g 和 2.42 lg CFU/g。这可能是由于 SAEW 与 UV-LEDs 协同处理增强了对细菌细胞膜的损伤,使细胞膜通透性增加,进而提高了杀菌效果^[47]。此外,SAEW 与 UV-LEDs 协同处理可以延长香菜的储藏期,且未对其色泽、质地、气味等造成不良影响。

3.2 与 Cl₂ 协同处理

作为一种新型杀菌方法,UV-LEDs 与 Cl₂ 协同处理已用于饮用水的净化消毒。G. Q. Li 等^[48]研究发现,UV-LEDs(波长为 265 nm,剂量为 125 mJ/cm²)与 Cl₂ 协同处理可使枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)芽孢降低 4.9 lg CFU/mL,显著高于 Cl₂ 单独处理组(芽孢降低不足 0.1 lg CFU/mL)和 UVC-

LEDs单独处理组(芽孢降低了3.1 lg CFU/mL)。这可能是因为在UV-LEDs与Cl₂协同处理过程中形成的·OH等活性氧会破坏细菌孢子外膜,加速Cl⁻向内膜扩散,从而提高对枯草芽孢杆菌芽孢的杀灭效果^[49]。

3.3 与超声波协同处理

鉴于UV-LEDs穿透能力有限,将其与超声波(Ultrasound, US)协同处理可提高灭菌效果。X. Q. Zhou等^[50]研究发现,经UVC-LEDs(剂量为30 mJ/cm²)单独处理后,水中的大肠杆菌降低了3.70 lg CFU/mL;在相同处理剂量下,经US和UVC-LEDs依次处理后,大肠杆菌降低了4.92 lg CFU/mL,且上述协同处理不会促进大肠杆菌发生光修复。这可能是由于US的机械效应使细菌脱团,从而使更多的细胞暴露在UVC处理条件下。此外,US的空化作用、机械效应、热效应等也会对细胞壁产生破坏作用,进而增强UVC-LEDs对大肠杆菌的杀灭效果^[51]。

3.4 与其他抗菌剂协同处理

一些抗菌剂也可用于增强UV-LEDs的杀菌效果。例如,阿魏酸是一种广泛存在于植物中的酚酸类物质,具有良好的抗菌活性^[52]。A. Shirai等^[53]研究发现,阿魏酸(质量浓度为100 mg/L)协同处理显著增强了UVA-LEDs(剂量为1 J/cm²)对菊糖芽孢乳杆菌(*Sporolactobacillus inulinus*)、肠炎沙门氏菌(*Salmonella enteritidis*)、枯草芽孢杆菌等的杀灭效果。在初始菌落数为5 lg CFU/mL时,经阿魏酸(质量浓度为100 mg/L)单独处理后,菊糖芽孢乳杆菌降低了3.15 lg CFU/mL;UVA-LEDs(剂量为1 J/cm²)单独处理杀菌效果不明显,而与阿魏酸协同处理后,菊糖芽孢乳杆菌菌落数降低到检测限以下,其原因可能是在UV照射下,阿魏酸异构化成顺式异构体,可直接损伤细菌细胞膜^[54]。

3.5 多波长UV-LEDs协同处理

与杀菌能力较强的UVC-LEDs相比,UVA-LEDs的输出功率更高、穿透能力更强、成本更低,因此通过优化不同波长UV-LEDs的组合,可显著提高杀菌效果^[55]。K. Song等^[56]研究了不同波长UV-LEDs组合对水中微生物的灭活效果,发现UVC-LED(波长为265 nm,剂量为4.2 mJ/cm²)单独处理可使大

肠杆菌(ATCC 11229)减少1.8 lg CFU/mL,UVB-LED(波长为285 nm,剂量为15.3 mJ/cm²)单独处理可使大肠杆菌减少2.8 lg CFU/mL,而当这两种波长组合在一起同时处理或先后处理时,均可导致大肠杆菌减少约4.6 lg CFU/mL。这与A. Green等^[57]的研究结果一致。这种多波长的协同杀菌效应取决于所使用UV-LEDs的波长范围、组合方式、微生物类型等因素^[56]。

4 结论与展望

本文综述了UV-LEDs技术在食品杀菌保鲜领域中的应用研究进展。认为UV-LEDs具有能耗低、污染小、波长可调、安全高效等优势,在食品杀菌保鲜领域具有广阔的应用前景。但UV-LEDs穿透能力较弱,影响了其对固体食品等的处理效果,而将其与其他杀菌技术协同使用可以增强杀菌效果。因此,在今后的工作中,应根据待处理样品性质,系统优化UV-LEDs处理工艺参数或其他杀菌技术协同使用,从而在有效杀灭微生物的同时最大限度保持食品的营养组分和感官品质。此外,目前UV-LEDs研究多集中于实验室研究阶段,UV-LEDs装置普遍存在处理量小、自动化程度低等问题,今后应重点研发满足食品生产实际需求的UV-LEDs装置,以推动UV-LEDs技术在食品微生物安全控制领域的实际应用。

参考文献:

- [1] SANLIER N, SORMAZ Ü, GÜNEŞ E. The effect of food safety education on food safety knowledge, attitudes, behaviors of individuals who work in food and beverage departments in Turkey[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2020, 22: 100259.
- [2] MOSTAFIDI M, SANJABI M R, SHIRKHAN F, et al. A review of recent trends in the development of the microbial safety of fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103: 321-332.
- [3] YANG P Q, RAO L, ZHAO L, et al. High pres-

- sure processing combined with selected hurdles: Enhancement in the inactivation of vegetative microorganisms [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 19 (2): 311-331.
- [4] 樊丽华,侯福荣,马晓彬,等. 超声波及其辅助灭菌技术在食品微生物安全控制中的应用 [J]. *中国食品学报*, 2020, 20(7): 326-336.
- [5] BOURKE P, ZIUZINA D, BOEHM D, et al. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production [J]. *Trends in Biotechnology*, 2018, 36(6): 615-626.
- [6] PEDRÓS-GARRIDO S, CONDÓN-ABANTO S, CLEMENTE I, et al. Efficacy of ultraviolet light (UV-C) and pulsed light (PL) for the microbiological decontamination of raw salmon (*Salmo salar*) and food contact surface materials [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 50: 124-131.
- [7] SEOK J H, HA J W. Synergistic mechanism and enhanced inactivation exhibited by UVA irradiation combined with citric acid against pathogenic bacteria on sliced cheese [J]. *Food Control*, 2021, 124(3): 107861.
- [8] KOUTCHMA T, POPOVIC V, ROS-POLSKI V, et al. Effects of ultraviolet light and high-pressure processing on quality and health-related constituents of fresh juice products [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2016, 15(5): 844-867.
- [9] GEVEKE D J. Inactivation of yeast and bacteria using combinations of radio frequency electric fields and ultraviolet light [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44 (4): e14385.
- [10] TATIANA K. Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2009, 2 (2): 138-155.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] HAUGHTON P N, LYNG J G, CRONIN D A, et al. Efficacy of UV light treatment for the microbiological decontamination of chicken, associated packaging, and contact surfaces [J]. *Journal of Food Protection*, 2011, 74(4): 565-572.
- [14] GHATE V S, NG K S, ZHOU W, et al. Antibacterial effect of light emitting diodes of visible wavelengths on selected foodborne pathogens at different illumination temperatures [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2013, 166 (3): 399-406.
- [15] D'SOUZA C, YUK H G, KHOO G H, et al. Application of light-emitting diodes in food production, postharvest preservation, and microbiological food safety [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(6): 719-740.
- [16] 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.
- [17] 王恺,孙小卫,郑凡凯,等. 量子点发光二极管; CN201921091313.7 [P]. 2020-01-07.
- [18] GUPTA S D, JATOTHU B. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis [J]. *Plant Biotechnology Reports*, 2013, 7(3): 211-220.
- [19] HAMAMOTO A, MORI M, TAKAHASHI A, et al. New water disinfection system using UVA

- light-emitting diodes [J]. Journal of Applied Microbiology, 2007, 103(6) : 2291–2298.
- [20] HINDS L, 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(C) : 102–153.
- [21] 范林林, 左进华, 高丽朴, 等. LED 应用于蔬菜保鲜领域的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45(8) : 89–92, 97.
- [22] KEBBI Y, MUHAMMAD A I, SANT'ANA A S, et al. Recent advances on the application of UV-LED technology for microbial inactivation: Progress and mechanism [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(6) : 3501–3527.
- [23] SOUZA V R D, POPOVI V, WARRINER K, et al. A comparative study on the inactivation of *Penicillium expansum* spores on apple using light emitting diodes at 277 nm and a low-pressure mercury lamp at 253.7 nm [J]. Food Control, 2019, 110(C) : 107039.
- [24] SORO A B, WHYTE P, BOLTON D J, et al. Application of a LED-UV based light technology for decontamination of chicken breast fillets: Impact on microbiota and quality attributes [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145 : 111297.
- [25] 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, 2020, 139 : 110553.
- [26] 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, 2015, 82(1) : 11–17.
- [27] BRITZ S, GASKA I, SHTURM I, et al. Deep ultraviolet (DUV) light-emitting diodes (LEDs) to maintain freshness and phytochemical composition during postharvest storage [C] // Lasers & Electro-optics. In Proceedings of the CLEO; 2013. San Jose: San Jose Convention Center, 2013: 9–14.
- [28] AIHARA M, LIAN X, SHIMOHATA T, et al. Vegetable surface sterilization system using UVA light-emitting diodes [J]. Journal of Medical Investigation, 2014, 61(3/4) : 285–290.
- [29] 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.
- [30] JIANG Y R, AI C M, LIAO X Y, et al. Effect of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) and ultraviolet light illumination pretreatment on microflora inactivation of coriander [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 132 : 109898.
- [31] KIM D K, KANG D H. Elevated inactivation efficacy of a pulsed UVC light-emitting diode system for foodborne pathogens on selective media and food surfaces [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2018, 84(20) : e01340–18.
- [32] ZHAI Y F, TIAN J L, PING R N, 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, 2020, 27(4) : 334–343.
- [33] BAYKU G, PELVAN A M, SEVCAN U. 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, 2020,

- 67: 102572.
- [34] 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.
- [35] XIANG Q S, FAN L M, ZHANG R, et al. Effect of UVC light-emitting diodes on apple juice; Inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* and determination of quality [J]. *Food Control*, 2019, 111(C):107082.
- [36] GUERRERO-BELTRA J A, WELTI-CHANES J, BARBOSA-CANOVAS G V. Ultraviolet-C light processing of grape, cranberry and grapefruit juices to inactivate *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2009, 32(6): 916-932.
- [37] 刘悦, 贺稚非, 李洪军, 等. 非热杀菌技术在肉及肉制品中的应用研究进展[J]. *肉类研究*, 2020, 34(10): 88-95.
- [38] HAUGHTON P N, GRAU E G, LYNG J, et al. Susceptibility of *Campylobacter* to high intensity near ultraviolet/visible 395±5 nm light and its effectiveness for the decontamination of raw chicken and contact surfaces [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 159(3): 267-273.
- [39] 龚蕾, 韩智, 程慧, 等. 谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物的检测及污染规律分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(4): 307-312.
- [40] SUBEDI S, DU L H, PRASAD A, et al. Inactivation of *Salmonella* and quality changes in wheat flour after pulsed light-emitting diode (LED) treatments [J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2020, 121: 166-177.
- [41] DU L H, PRASAD A J, GANZLE M, et al. Inactivation of *Salmonella* spp. in wheat flour by 395 nm pulsed light emitting diode(LED) treatment and the related functional and structural changes of gluten [J]. *Food Research International*, 2020, 127(C): 108716.
- [42] 蓝蔚青, 刘琳, 孙晓红, 等. 酸性电解水发生机理及在水产领域中的应用研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(4): 294-298.
- [43] KEKLIK N M. Treatment of pastirma with pulsed UV light; Modeling of staphylococcus aureus inactivation and assessment of quality changes [J]. *Food Science and Technology International*, 2019, 26(2): 185-198.
- [44] KIM D K, KANG D H. Effect of surface characteristics on the bactericidal efficacy of UVC LEDs [J]. *Food Control*, 2020, 108(C):106869.
- [45] LEE H, JIN Y, HONG S. Understanding possible underlying mechanism in declining germicidal efficiency of the UV-LED reactor [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology*, 2018, 185:136-142.
- [46] YE Z Y, WANG S, CHEN T, et al. Inactivation mechanism of *Escherichia coli* induced by slightly acidic electrolyzed water [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):6279.
- [47] BING S, ZANG Y T, LI Y J, et al. The synergistic effects of slightly acidic electrolyzed water and UV-C light on the inactivation of *Salmonella enteritidis* on contaminated eggshells [J]. *Poultry Science*, 2019, 98(12): 6914-6920.
- [48] LI G Q, HUO Z Y, WU Q Y, et al. Synergistic effect of combined UV-LED and chlorine treatment on *Bacillus subtilis* spore inactivation [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 1233-1240.
- [49] MIN C, GANDHI A, HWANG T M, et al. Investigating synergism during sequential inactivation of MS-2 phage and *Bacillus subtilis* spores with UV/H₂O₂ followed by free chlorine [J]. *Water Research*, 2011, 45(3): 1063-1070.
- [50] ZHOU X Q, LI Z F, LAN J R, et al. Kinetics of inactivation and photoreactivation of *Escherichia*

- coli* using ultrasound-enhanced UV-C light-emitting diodes disinfection [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 35: 471–477.
- [51] ZHOU X, GUO H, LI Z, et al. Experimental study on the disinfection efficiencies of a continuous-flow ultrasound/ultraviolet baffled reactor [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 27: 81–86.
- [52] DE PAIVA L B, GOLDBECK R, DOS SANTOS W D, et al. Ferulic acid and derivatives: Molecules with potential application in the pharmaceutical field [J]. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2013, 49(3): 395–411.
- [53] SHIRAI A, WATANABE T, MATSUKI H. Inactivation of foodborne pathogenic and spoilage microorganisms using ultraviolet-A light in combination with ferulic acid [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2017, 64(2): 96.
- [54] GRAF E. Antioxidant potential of ferulic acid [J]. *Free Radical Biology & Medicine*, 1992, 13(4): 435–448.
- [55] SHIRAI A, KAJIURA M, OMASA T. Synergistic photobactericidal activity based on ultraviolet-A irradiation and ferulic acid derivatives [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2015, 91(6): 1422–1428.
- [56] SONG K, TAGHIPOUR F, MOHSENI M. Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 1103–1110.
- [57] GREEN A, POPOVIC V, PIERSCIANOWSKI J, et al. Inactivation of *Escherichia coli*, *Listeria* and *Salmonella* by single and multiple wavelength ultraviolet-light emitting diodes [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 47: 353–361.

Research advance on the application of ultraviolet light-emitting diodes technology in food sterilization and preservation

WANG Wenwen, XIANG Qisen, BAI Yanhong

College of Food and Bioengineering/He'nan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Food is easily contaminated by microorganism during production and consumption, which causes serious adverse effect on its safety and quality. As an alternative source of traditional ultraviolet mercury lamp, ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) have many advantages, such as adjustable wavelength, environmentally friendly, safe and efficient. This paper aimed to review the application of UV-LEDs in the field of food sterilization and preservation, its influence on food quality and its application progress in collaboration with other non-thermal sterilization technologies. The results indicated that UV-LEDs could not only effectively sterilize foodborne pathogenic bacteria and spoilage bacteria, but also could well maintain the quality of food products. The bactericidal effect could be further enhanced when it is used in combination with other technologies such as slightly acidic electrolytic water, Cl_2 and ultrasound. However, UV-LEDs have some disadvantages, such as weak penetration and small processing capacity. More attention should be paid to the optimization of processing parameters and equipment development in the future. This paper provides reference for the practical application of UV-LEDs in the field of food safety control.

Key words: ultraviolet light-emitting diodes; non-thermal sterilization technologies; food safety; sterilization and preservation

(责任编辑:杨晓娟)