

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.08.029

LED 光照灭菌技术在果蔬保鲜加工中的应用及其研究

Application and research progress of LED light sterilization technology
in fresh-keeping processing of fruit and vegetables

张雨宸^{1,2,3,4} 谢晶^{1,2,3,4}

ZHANG Yu-chen^{1,2,3,4} XIE Jing^{1,2,3,4}

(1. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 2. 农业部冷库及制冷设备质量监督检验测试中心, 上海 201306; 3. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心〔上海海洋大学〕, 上海 201306; 4. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(1. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 2. Quality Supervision, Inspection and Testing Center for Cold Storage and Refrigeration Equipment, Shanghai 201306, China; 3. Ministry of Agriculture, National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering〔Shanghai Ocean University〕, Shanghai 201306, China; 4. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要: 综述了可见光 LED 灯和紫外 LED 灯的特性、灭菌机理和灭菌效果, 同时介绍了在几种不同光敏剂辅助灭菌情况下可见光 LED 灯和紫外 LED 灯的灭菌效果, 及所使用光敏剂的剂量、效果和作用的菌种。最后提出了 LED 光照灭菌技术存在的问题, 并展望未来发展方向。

关键词: LED 照射; 光敏剂; 果蔬; 食源性致病菌

Abstract: LED is a kind of green and environment-friendly cold light source, which has the advantages of non-toxicity, non-residue and wide application prospects in killing foodborne pathogenic bacteria in fruit and vegetable postharvest by using LED illumination technology. In this paper, the characteristics, sterilization mechanism and sterilization effect of visible and ultraviolet LED lamps were summarized. The sterilization effect of visible and ultraviolet LED lamps assisted by several different photosensitizers, as well as the dosage, effect and strains of the photosensitizers used were also introduced. Finally, the existing problems and the future development direction of LED illumination sterilization technology were proposed.

基金项目: 上海市科技兴农推广项目(编号: 沪农科推字(2018)第 1-2 号); 上海市科委公共服务平台建设项目(编号: 17DZ2293400); 上海市绿叶菜产业体系建设项目

作者简介: 张雨宸, 男, 上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者: 谢晶(1968—), 女, 上海海洋大学教授, 博士。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期: 2019-02-25

Keywords: LED irradiation; photosensitizer; fruits and vegetables; foodborne pathogens

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)是一种利用半导体 PN 结构或类似结构作为发光材料, 能够直接将电转化为各种色彩的可见光以及紫外光等的电磁辐射的半导体发光元件^[1], 具有体积小、可应用范围广、发光效率高、经久耐用等良好特性, 属于典型的绿色照明光源^[2]。在果蔬行业中, 应用 LED 光照技术杀灭果蔬中的致病菌与传统的化学灭菌法相比, 具有无毒无害, 成本低廉, 杀菌同时可提升果蔬自身营养成分等的其他灭菌法无可比拟的优势^[3], 满足了现阶段生产者 and 消费者对绿色环保处理方式的需求, 因此在果蔬的采后处理中有较广泛的应用。现阶段中国微生物源食源性安全问题非常突出^[4], LED 照射处理方法具有丰富的研究价值和广阔应用前景。文章将 LED 分为可见光、紫外两部分, 分别就其特性、优势、机理, 以及杀菌效果进行综述, 指出了当前 LED 在果蔬采后应用中存在的问题, 以期 LED 技术的发展提供帮助。

1 LED 特性及其杀菌机制

根据波长的不同, 可将光分为可见光(400~700 nm)、紫外光(100~400 nm)等。LED 的发光范围广, 光质纯, 可根据发出的光的波长范围不同分为可见

光、紫外 LED。下面分别阐述两种 LED 的特性、杀菌机理和杀菌效果。

1.1 可见光 LED

1.1.1 特性 与传统的荧光灯和高压钠灯相比,LED 灯具有以下优点:① 光电转换效率高,LED 光能利用率高达 80%~90%;② 光质纯,可发射波谱范围广,LED 发射的波谱宽度为±30 nm,可发射光波较狭窄的单色光的同时还可根据需要组合出不同颜色的光源^[2];③ 发热低,

LED 属于冷光源,近距离照射果蔬时不会由于温度过高影响果蔬保鲜效果;④ 绿色环保,LED 是由可回收的原料制成的光源,不含污染元素,且耗电量仅为白炽灯的 1/8、日光灯的 1/2^[5];⑤ 寿命长,LED 使用寿命通常在 10 万 h 以上,远高于传统照明光源^[3];⑥ 体积小,LED 体积比传统光源小,不占用太多的空间,更有利于放置在不同设备仪器中使用;⑦ 启动时间短^[1]。LED 与传统照明光源的优劣势对比见表 1。

表 1 LED 与荧光灯和高压钠灯的优缺点对比

Table 1 Advantages and disadvantages of LED, fluorescent lamp and high-pressure sodium lamp

指标	LED	荧光灯	高压钠灯	参考文献
光谱范围	可发射各类较纯的单色光、UV 以及混合白光	发光范围广,波段混杂	发光范围广,波段混杂	Denbaars 等 ^[6]
尺寸	体积小(2~5 cm)可以组装成不同的尺寸、形状和大小	较笨重	较笨重	D'Souza 等 ^[1]
光效	多光混合白光 LED:100~150 lm/W,预计将在 2020 年达到 250 lm/W	45~80 lm/W	65~150 lm/W	D'Souza 等 ^[1]
启动时间	几乎无延迟	需要 3 min 左右预热	需要 10 min 左右预热	Nelson 等 ^[7]
使用寿命	10 万 h	1 万~1.7 万 h	1 万~1.7 万 h	Nelson 等 ^[7]
坚固程度	几乎不受机械力影响	灯泡易碎	灯泡易碎	Dutta 等 ^[8]

1.1.2 杀菌机理 LED 照射灭活部分食源性致病菌的途径主要有光动力学灭活和光催化灭活 2 种^[9]。Kim 等^[10]研究发现在 400~450 nm 波段内,LED 在波长峰值为 405 nm 时对致病菌抑制效果最好,其机理是通过破坏细菌细胞膜的损伤达到杀菌目的,而非对 DNA 的破坏。可见光 LED 的杀菌方法根据目前的研究主要分为添加光敏剂和不添加光敏剂 2 种类型。在未添加任何化合物的情况下,经 LED 发射出的 405 nm 等的特定波段的光线照射后,可借助细菌内源性粪卟啉产生激发态氧,进而由激发态氧破坏细菌组织结构,从而达到灭菌效果^[11]。而在添加光敏剂的情况下,由光敏剂将 LED 光的能量转移到氧分子上,形成激发态氧从而灭菌。2 种灭菌方法都可以有效灭菌,相比而言,未添加光敏剂往往要照射 7 h 以上才能达到灭菌的效果,添加光敏剂后通常只需 10~20 min,因此加入光敏剂更加节能;不过光敏剂大多为色素,将光敏剂涂抹在果蔬表面会影响感官和消费者购买欲。两者共同优势为:应用 LED 照射食源性致病菌相较于添加化学物质灭菌更加绿色环保,且处理效果受温度影响小,为低温灭菌方法提供了新的选择。总之,应用在食品行业的灭菌技术在考虑经济成本的同时,技术本身的安全性更应放在首位。

1.1.3 可见光 LED 照射对食源性致病菌的影响 目前研究发现 LED 对食源性致病菌具有良好的杀菌作用。Endarko 等^[12]使用 405 nm LED 光,照射达到 185 J/cm² 剂量时,可以减少 5 lg CFU/g 的单核增生李斯特菌和其

他种类的李斯特菌数量,并发现 405 nm 等的波段杀菌效果最佳。Kumar 等^[13]使用 460 nm LED 光,分别在 4, 10, 25 °C 温度下,照射蜡样芽孢杆菌、单核增生李斯特菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌 O157:H7、铜绿假单胞菌及伤寒沙门氏菌 6 种细菌,均有效减少了细菌数量。例如,金黄色葡萄球菌在照射 7 h 后数量最少,蜡样芽孢杆菌照射 9 h 后数量减少 3 lg CFU/g。并且细菌中的 11-脱氧皮质醇、放线酰胺素、助间型霉素、酪胺、壳二糖等维持生命活动的物质均在 LED 光照射下得到了有效控制;并发现 LED 灭菌效果受温度影响较小,可以在不同温度条件下较广泛的使用。Josewin 等^[14]用 405,460 nm 波长的蓝光在 4 °C 下,以辐照剂量为 1 210 J/cm² 的条件下或 20 °C, 5 356 J/cm² 的条件下,能够较好地哈密瓜表面初始浓度为 4 lg CFU/cm² 的李斯特菌和沙门氏菌杀灭。Wilborn 等^[15]结合波长为 405 nm 的蓝光和 880 nm 的红光辐照金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌,结果显示:在 20 J/cm² 的辐照剂量下,铜绿假单胞菌和金黄色葡萄球菌分别能够减少 93.8% 和 72.0%。

1.2 紫外 LED

1.2.1 特性 紫外光根据波长的不同分为 UV-A(315~400 nm)、UV-B(280~315 nm)和 UV-C(100~280 nm)。紫外 LED 通常指发光中心波长在 400 nm 以下的 LED^[16]。由于短波长光线杀菌效果更好,所以紫外杀菌在果蔬采后处理中有着广泛的应用^[17]。现阶段研究发现 UV-A 可以结合光敏剂,作为非加热型灭菌法紫外光使

用紫外发光二极管(UV LED)发射紫外光,相较于传统的采取汞蒸气放电方式获取的紫外光光子能量更大,且本身更环保。UV LED直径<5 mm,寿命在10万h以上,比紫外灯寿命长100倍,具有响应速度快,可靠性高,寿命长,单色性好等优势^[18]。

1.2.2 杀菌机理 传统方法主要采取UV-C杀菌^[19],但结合光敏剂后,发现UV-A杀菌也十分有效^[20]。其杀菌机理分别如下。

(1) UV-C:细菌DNA在吸收紫外线能量后,2个相互临近的嘧啶会形成嘧啶二聚体,致使密码子错乱,DNA无法在转录中有效表达,进而导致mRNA无法合成有效的生存所需的蛋白质和酶,最终达到灭菌的效果^[21-22]。核酸会吸收光谱范围在240~280 nm的紫外线,且对260 nm的紫外线吸收最为强烈^[23],Kim等^[24]研究发现从266~279 nm波段的UV-C LED对食源性革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌灭菌主要作用于DNA,且以265 nm波长段最有效。因此在单独使用紫外照射技术杀菌时,UV-C(200~280 nm)杀菌效果最好。UV-C对食源性致病菌DNA破坏的同时,也会对其细胞膜造成损伤,从而达到灭菌目的^[25]。

(2) UV-A:UV-A在激发光敏剂后,激发态的光敏剂会将能量传递给周围的氧气产生活性氧,使细菌细胞的细胞壁等部位发生毒性反应,从而达到细胞损伤、坏死的目的^[26]。

1.2.3 UV LED对食源性致病菌的影响 Kim等^[25]使用254 nm的UV-C在25℃下连续照射1 min,生菜表面的O157:H7大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌和李斯特菌,分别降低了1.45,1.35,2.12 lg CFU/g,但在4℃的试验条件下仅分别降低了0.31,0.57,1.16 lg CFU/g的细菌数量。Adhikari等^[27]在使用254 nm的UV-C以0.92 kJ/m²的剂量下连续辐照60 s,分别将苹果和梨表面的O157:H7大肠杆菌数量降低了2.9,2.1 lg CFU/mL。经8,12 min的UV-C照射后能分别减少草莓和覆盆子表面2.0,1.1 lg CFU/mL的O157:H7大肠杆菌数量。光照剂量3.75 kJ/m²时,254 nm UV-C照射能减少苹果表面1.6 lg CFU/mL的单核增生李斯特菌,并且梨、哈密瓜和草莓表面单增李斯特菌数量分别在254 nm UV-C照射光照剂量11.9 kJ/m²时减少1.7,1.0,1.0 lg CFU/g的细菌数量。Yun等^[28]使用光照剂量47 mJ/cm²的UV-C照射杏表面的O157:H7大肠杆菌和沙门氏菌,能迅速减少0.9~1.5 lg CFU/g的细菌数量。但过量的紫外照射在杀菌的同时也会对果蔬本身造成损伤,例如周伟^[5]研究表明采后处理过程中,过量的UV-C照射会加快上海青品质劣变。因此在杀菌的同时应当控制紫外光的使用剂量。

综上所述,LED灭菌效果显著,有诸多优势:①相较于传统的低温杀菌法无残留,绿色环保。②在保证杀灭

细菌的同时,可以通过调节果蔬自身生理活动来延长保质期。例如:李宁等^[29]在4℃低温条件下使用红蓝复合光处理西兰花延长了保质期(10~15 d),也较好地保持了西兰花外观。③可以提升蔬菜品质,例如,Zhan等^[30]在7℃温度下使用强度为2 000 lux的光照射鲜切芹菜,使其总酚值明显高于存储于黑暗条件下的鲜切芹菜。但也存在一些劣势:堆放高度有限,光的穿透性弱,例如在LED照射处理西兰花时,接受到光照的西兰花保鲜效果更好,故试验时只能单层摆放^[31]。在实际应用中是否需要每层蔬菜上都设LED,如此是否会增加成本,以及经济效益如何等都有待进一步研究。

2 光敏剂辅助LED照射对食源性致病菌的影响

光敏剂是指在光化学反应中能够吸收光子,并将能量传递给特定分子使其参与化学反应,但本身不参与化学反应的一类物质^[32]。在果蔬采后处理中应用较广的光敏剂主要为卟啉类化合物及其衍生物^[33]。其作用机理为光敏剂在吸收光子能量后,激发态的光敏剂使周围氧气转化为活性氧(ROS),进而使细菌细胞的细胞壁等部位发生毒性反应,从而达到细胞损伤、坏死的目的^[26]。目前使用较为广泛的光敏剂有金丝桃素、姜黄素、叶绿素等。下面分类介绍各类光敏剂及其使用效果。

2.1 使用叶绿素及其衍生物等作为光敏剂

叶绿素是由1个卟啉环和脂肪烃侧链构成,具有良好的光吸收的物质^[34]。王小情等^[35]以1 mL 10⁻⁵ mol/L叶绿素钠镁盐作光敏剂,使用400~415 nm的LED灯,在光照强度最大为1 250 lux的情况下光照荔枝清液10 min后,杀灭了4.5 lg CFU/g的金黄色葡萄球菌,但当用同样方法处理荔枝浊液时,发现固体颗粒的存在会大大降低叶绿素的光动力杀菌效果,仅减少了0.14 lg CFU/g的金黄色葡萄球菌,说明在应用LED处理的过程中,应注意光的穿透性不强,确保需消毒物体能够直接接受到光照,以达到较好的灭菌效果。Luksiene等^[36]使用叶绿酸钠作为光敏剂,蜡样芽孢杆菌ATCC 12826和单核细胞增生李斯特氏菌ATCC 7644及其耐热菌株蜡样芽孢杆菌SV90和单核细胞增生李斯特氏菌56LY经405 nm光照杀菌后,可减少食品包装材料表面7 lg CFU/mL的细菌。Buchovec等^[37]使用1.5 × 10⁻⁵ mol/L浓度叶绿素作为光敏剂,使用405 nm波段的可见光照射120 min,光照剂量达到46.1 J/cm²时,可减少2.05 lg CFU/mL的肠道沙门氏菌。Buchovec等^[37]还发现使用叶绿素作为光敏剂,高功率紫外脉冲可有效杀灭革兰氏阴性菌。

2.2 使用姜黄素作为光敏剂

姜黄素是一种从姜黄根茎发现的多酚化合物,本身呈鲜黄色,在传统上食品工业中用作天然着色剂或作为

膳食补充剂^[38-39],作为光敏剂使用时具有高效、低毒^[40]、低成本等特点。姜黄素在光辐射下会转化为激发态并增强自身的抗菌活性^[41]。姜黄素的光激发可以促使 ROS 的形成,例如单线态氧,通过该类物质可以氧化损伤微生物进而达到灭活微生物的目的。最近的研究^[42]还表明,除 ROS 外,姜黄素的受光照激发还可以生成自由基,并对细菌 DNA 造成严重损伤。据许川山等^[43]研究,姜黄素在 200~230 nm 和 400~450 nm 波段处各有一吸收峰值,其中可见光区内的最大吸收峰值在 425 nm 处,荧光最大激发波长在 425 nm 处。作为光敏剂辅助 LED 杀菌时受温度影响较小。例如 Penha 等^[44]使用姜黄素作为光敏剂,光照剂量为 278 J/cm² 时可将金黄色葡萄球菌数量减少 3.5 lg CFU/mL,当光照剂量继续增强到 417 J/cm² 时,金黄色葡萄球菌完全失活;大肠杆菌在光照剂量达到 278 J/cm² 时数量显著减少,在到达 417 J/cm² 时完全失活;嗜水气单胞菌在光照剂量达到 139 J/cm² 时数量显著减少,在达到 417 J/cm² 时完全失活。Oliveira 等^[20]使用姜黄素结合 UV-A 对大肠杆菌 O157:H7 和 *innocua* 李斯特菌进行照射杀菌处理发现该方式比单纯的可见光照射处理更加有效。

2.3 使用其他光敏剂

除叶绿素和姜黄素光敏剂外,还有使用金丝桃素、ZnO 纳米粒子等作为光敏剂辅助 LED 照射,效果同样显著。Aponiene 等^[45]使用金丝桃素作为光敏剂,先将果蔬在 0.1 μmol/L 金丝桃素中处理 60 min,再用 585 nm 光照射,剂量 9.2 J/cm² 时,可去除果蔬表面 4.4 lg CFU/mL 的蜡样芽孢杆菌。Aponiene 等^[38]使用 ZnO 纳米粒子作为光敏剂,使用剂量 5 × 10⁻⁴ mol/L,405 nm 波段光照 10 min,当光照剂量达到 380 kJ/m² 时,可减少 7 lg CFU/mL 的大肠杆菌。Ercan 等^[46]发现单独使用 9.53 kJ/m² 剂量的 UV-A 仅能减少 3.9 lg CFU/mL 的细菌数量,而结合 ZnO 后可以杀灭 6 lg CFU/mL 的细菌数。Oliveira 等^[47]使用 UV-A 结合没食子酸和乳酸可以使大肠杆菌 O157:H7 细菌数减少(4.7 ± 0.5) lg CFU/mL,而单独使用 UV-A 照射仅减少不到 1 lg CFU/g 的细菌数。

总之,相比光照处理的 10~20 h 的时间,添加光敏剂之后仅需 10~60 min 就可以达到灭菌效果,具有缩短加工时长,节约能源消耗的优势。目前常用的光敏剂如叶绿素、姜黄素等来源广泛,价格低廉,生产成本低,具有较高的应用价值;但叶绿素、姜黄素等本身都是色素,涂抹在果蔬表面上难免会影响果蔬感官和消费者购买欲望,甚至有些光敏剂是低毒的^[37],应避免食用。故在实际生产中应当权衡选择是否使用光敏剂,防止降低生产成本反而导致销售量受影响或者增加食品安全风险。

3 结论

使用光敏剂的情况下,LED 光照射可以高效杀灭细

菌,且光照剂量小,与单纯地使用光照相比较节约能源,尽管可食用光敏剂本身绿色环保,但大多数光敏剂(例如叶绿素、姜黄素等)都有颜色,涂抹在食品上会影响感官以及消费者购买欲望。相比之下,在未添加光敏剂情况下的 LED 光照射杀灭果蔬采后细菌的方法,可以不改变果蔬外观颜色,且在光照杀菌的同时,可见光本身就可以对采后的果蔬有一定的生命活动的促进作用,因此该处理方式相较于传统的单纯杀菌的处理方式有一举两得的优势。例如,使用 300 lx 蓝光 LED 光照处理蜜橘果实可以有效改善其着色等^[48]。此外,LED 光照对果蔬中一些主要营养成分的含量变化也有影响,如叶黄素和胡萝卜素等^[49],因此也需研究 LED 光照对果蔬自身品质的作用。总之,LED 光处理是一种有效的果蔬采后处理技术,能有效地杀灭果蔬表面的致病微生物,减少食源性致病菌的风险;同时也可以杀灭致腐菌等其他菌种^[19]。

今后 LED 技术的应用前景主要有:① 目前的 LED 技术研究大多停留在实验室阶段,且所用到的设备多为定制或实验者自建,标准化生产的 LED 设备有待开发,例如如何将可调的 LED 灯置入零售终端货架、冰箱、冷库中,进而形成一个简便、有效的蔬菜保鲜方式仍待解决。② 结合人工智能技术,在贮存运输装置中通过可编程控制器实现对 LED 光的调节,模拟太阳光环境,使得贮运中的果蔬依然保持很好的活性有待研发。③ 如何将 LED 技术与其他保鲜技术联合应用于采后果蔬的保鲜,如气调与 LED 光照保鲜联合使用、低温贮藏与 LED 联合使用等,使其能够得到更佳的且经济绿色的保鲜效果仍待进一步研究。④ 如何弥补 LED 使用中的不足,因可见光穿透性差,处理果蔬的堆放高度受限,例如在处理西兰花试验过程中只有接受到光照的西兰花杀菌效果更好,故在试验过程中只能单层摆放。在实际生产中为保证保鲜效果可能需要每层蔬菜架上都摆一层 LED 灯,其经济效益、成本都有待进一步论证。

参考文献

[1] 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 & Food Safety*, 2015, 14(6): 719-740.

[2] 阎瑞香. 低温条件下不同 LED 光源对芦笋颜色变化的影响[C]//第六届中国冷冻冷藏新技术、新设备研讨会. 北京: 中国制冷空调工业协会, 2013: 194-198.

[3] MANZOCCO L, QUARTA B, DRI A. Polyphenoloxidase inactivation by light exposure in model systems and apple derivatives[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2009, 10(4): 506-511.

[4] 王希杰. 我国食品质量与安全全面质量管理探讨[J]. *食品安*

- 全导刊, 2015, 1(18): 32-33.
- [5] 周伟. 低温下单色 LED 和短波 UV 照射对上海青贮藏品质调控的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 11-12.
- [6] DENBAARS S P, FEEZELL D, KELCHNER K, et al. Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(3): 945-951.
- [7] NELSON J A, BRUCE B. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs high intensity discharge fixtures[J]. *Plos One*, 2014, 9(6): e99010.
- [8] DUTTA GUPTA S, JATOTHV B. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in invitro plant growth and morphogenesis[J]. *Plant Biotechnology Reports*, 2013, 7(3): 211-220.
- [9] 詹丽娟, 马亚丹, 张翠翠. 发光二极管(LED)照射调控果蔬采后贮藏保鲜研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(4): 269-269, 278.
- [10] KIM M J, MIKŠ-KRAJNİK M, KUMAR A, et al. Inactivation by 405 ± 5 nm light emitting diode on *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella Typhimurium*, and *Shigella sonnei* under refrigerated condition might be due to the loss of membrane integrity[J]. *Food Control*, 2016, 59(2): 99-107.
- [11] KUMAR A, GHATE V, KIM M J, et al. Kinetics of bacterial inactivation by 405 nm and 520 nm light emitting diodes and the role of endogenous coproporphyrin on bacterial susceptibility[J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology B Biology*, 2015, 149(9): 37-44.
- [12] ENDARKO E, MACLEAN M, TIMOSHKIN I V, et al. High-intensity 405 nm light inactivation of *Listeria monocytogenes*[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2012, 88(5): 1 280-1 286.
- [13] KUMAR A, GHATE V, KIM M J, et al. Inactivation and changes in metabolic profile of selected foodborne bacteria by 460 nm LED illumination[J]. *Food Microbiology*, 2017, 63(5): 12-21.
- [14] JOSEWIN S W, KIM M J, YUK H G. Inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. on cantaloupe rinds by blue light emitting diodes (LEDs)[J]. *Food Microbiology*, 2018, 76(7): 219-225.
- [15] GUFFEY J S, WILBORN J. Effects of combined 405 nm and 880 nm light on *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* in vitro[J]. *Photomedicine & Laser Surgery*, 2006, 24(6): 680-683.
- [16] 王冬雷, 王彦国, 凌云. LED 紫外杀菌装置: 中国, 201320878486.X[P]. 2014-08-13.
- [17] JEON M J, HA J W. Efficacy of UV-A, UV-B, and UV-C irradiation on inactivation of foodborne pathogens in different neutralizing buffer solutions [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 98(2): 591-597.
- [18] 方言. 紫外发光二极管[J]. *技术与市场*, 2002, 32(12): 13.
- [19] 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.
- [20] OLIVEIRA E F D, TOSATI J V, TIKEKAR R V, et al. Antimicrobial activity of curcumin in combination with light against *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria innocua*: Applications for fresh produce sanitation [J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2018, 137(4): 86-94.
- [21] 任文霞, 李建科. 冷杀菌技术及其在食品中应用[J]. *粮食与油脂*, 2007, 17(12): 22-23.
- [22] 闫岩, 酃和生, 任志峰. 紫外杀菌技术的研究现状[J]. *石化技术*, 2011, 18(4): 60-63.
- [23] 顾雪锋, 杨海真. 污水处理中紫外线消毒技术的研究进展[J]. *环境科技*, 2003, 16(3): 33-34.
- [24] 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(8): 280-287.
- [25] KIM Y H, JEONG S G, BACK K H, et al. Effect of various conditions on inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella Typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* in fresh-cut lettuce using ultraviolet radiation[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2013, 166(3): 349-355.
- [26] GONZALES F P, MAISCH T. Photodynamic inactivation for controlling *Candida albicans* infections[J]. *Fungal Biol*, 2012, 116(1): 1-10.
- [27] ACHYUT A, ROOPESH M S, KAREN K, et al. Ultraviolet-C light inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* on organic fruit surfaces[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2015, 210(9): 136-142.
- [28] YUN Juan, YAN Rui-xiang, FAN Xue-tong, et al. Fate of *E. coli* O157: H7, *Salmonella* spp. and potential surrogate bacteria on apricot fruit, following exposure to UV-C light[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2013, 166(3): 356-363.
- [29] 李宁, 阎瑞香, 张娜. LED 复合光处理对西兰花低温保鲜效果的影响[J]. *华北农学报*, 2015, 30(1): 188-193.
- [30] ZHAN Li-juan, HU Jin-qian, LIM L T, et al. Light exposure inhibiting tissue browning and improving antioxidant capacity of fresh-cut celery (*Apium graveolens* var. dulce)[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 2 473-2 478.
- [31] 伍新龄, 张娜, 张晓洁, 等. LED 红蓝复合光间歇照射对西兰花贮藏品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2015(5): 6-10.
- [32] 王晶, 潘勇华, 王旭明, 等. 光敏剂及其临床应用进展[J]. *药学实践杂志*, 2002, 20(2): 67-70.
- [33] 马金石. 卟啉类第二代光敏剂的发展[J]. *影像科学与光化学*, 2002, 20(2): 131-148.
- [34] 姜昊文. 新型叶绿素光敏剂—光动力学疗法治疗激素非依

赖性前列腺癌[D]. 上海: 复旦大学, 2004: 20-21.

[35] 王小倩, 刘忠义, 余元善, 等. 叶绿素镁钠盐对液态食品中 *Staphylococcus aureus* 的光动力杀菌研究[J]. 现代食品科技, 2013, 19(3): 463-466.

[36] LUKSIENE Z, PASKEVICIUTE E. Microbial control of food-related surfaces: Na-Chlorophyllin-based photosensitization[J]. Journal of Photochemistry & Photobiology B Biology, 2011, 105(1): 69-74.

[37] BUCHOVEC I, LUKSEVICIUTE V, KOKSTAITE R, et al. Inactivation of Gram (-) bacteria *Salmonella enterica* by chlorophyllin-based photosensitization: Mechanism of action and new strategies to enhance the inactivation efficiency[J]. Journal of Photochemistry & Photobiology B Biology, 2017, 172(5): 1-10.

[38] APONIENE K, LUKSIENE Z. Effective combination of LED-based visible light, photosensitizer and photocatalyst to combat Gram (-) bacteria[J]. J Photochem Photobiol B, 2015, 142(12): 257-263.

[39] HATCHER H, PLANALP R, CHO J, et al. Curcumin: from ancient medicine to current clinical trials[J]. Cellular & Molecular Life Sciences (CMLS), 2008, 65(11): 1 631-1 652.

[40] 沃兴德, 洪行球, 高承贤, 等. 姜黄素长期毒性试验[J]. 浙江中医药大学学报, 2000, 24(1): 61-65.

[41] HAUKVIK T, BRUZELL E S, TONNESEN H H. Photokilling of bacteria by curcumin in different aqueous preparations: Studies on curcumin and curcuminoids XXXVII[J]. Pharmazie, 2009, 64(10): 666-673.

[42] QIAN Ting-ting, WANG Mei, WANG Jiao, et al. Transient spectra study on photo-dynamics of curcumin[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2016, 166: 38-43.

[43] 许川山, LEUNG A W N. 中药姜黄素的光谱学特性研究[J]. 激光杂志, 2005, 26(4): 86-88.

[44] PENHA C B, BONIN E, SILVA A F D, et al. Photodynamic inactivation of foodborne and food spoilage bacteria by curcumin [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 76(2): 198-202.

[45] APONIENE K, PASKEVICIUTE E, REKLAITIS I, et al. Reduction of microbial contamination of fruits and vegetables by hypericin-based photosensitization: Comparison with other emerging antimicrobial treatments[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144(1): 29-35.

[46] ERCAN D, COSSU A, NITIN N, et al. Synergistic interaction of ultraviolet light and zinc oxide photosensitizer for enhanced microbial inactivation in simulated wash-water[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33(9): 240-250.

[47] DE OLIVEIRA E F, COSSU A, TIKEKAR R V, et al. Enhanced antimicrobial activity based on a synergistic combination of sublethal levels of stresses induced by UV-A light and organic acids[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2017, 83(11): 317-383.

[48] 邓丽莉, 袁梓泮, 尹保凤, 等. LED 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果实着色的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 127-133.

[49] GANG Ma, ZHANG Lan-cui, KATO M, et al. Effect of the combination of ethylene and red LED light irradiation on carotenoid accumulation and carotenogenic gene expression in the flavedo of citrus fruit [J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 99(99): 99-104.

(上接第 126 页)

[10] 戴志远, 翁丽萍, 王宏海. 养殖大黄鱼气调包装保鲜工艺研究[J]. 中国食品学报, 2010, 10(5): 204-211.

[11] 吴行印, 谢晶, 王旭. 不同贮藏温度下小黄鱼货架期预测模型的建立和评价[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 84-90.

[12] 郭丽, 王鹏, 姜喆, 等. 透明质酸涂膜对鲫鱼微冻贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 120-124.

[13] 陈剑岚, 施文正, 陈舜胜, 等. 不同贮藏温度对草鱼肉滋味和鲜度的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(5): 329-333.

[14] SALIH A M, SMITH D M, PRICE J F, et al. Modified extraction thiobarbituric acid method for measuring lipid oxidation in poultry[J]. Poultry Science, 1987, 66(9): 1 483-1 488.

[15] TIRONI V, DE L M, LEBAIL A. Quality changes during the frozen storage of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) muscle after pressure shift freezing and pressure assisted thawing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(4): 565-573.

[16] 宋敏, 许艳顺, 夏文水, 等. 冻结方式对鲷鱼片品质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(8): 154-159.

[17] 赵启蒙, 许澄, 黄雯, 等. 不同冻藏温度下镀冰衣处理对鲈鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(12): 307-310.

[18] CAI Lu-yun, WU Xiao-sa, DONG Zhi-jian, et al. Physicochemical responses and quality changes of red sea bream (*Pagrosomus major*) to gum arabic coating enriched with ergothioneine treatment during refrigerated storage [J]. Food Chemistry, 2014, 160(11): 82-89.

[19] 邱伟强, 陈刚, 陈舜胜, 等. 离子对反相高效液相色谱法同时检测水产品中 6 种 ATP 关联化合物[J]. 水产学报, 2011, 35(11): 1 745-1 752.

[20] 欧阳芳芳, 王建辉, 陈奇, 等. 草鱼贮藏期间肌肉 ATP 关联物及 K 值的动态变化[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 137-140, 159.

[21] 沈秋霞, 李明元, 胡永正, 等. 包装方式对三文鱼片贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 133-138.