

光动力技术及其在生鲜食品保鲜中的应用研究进展

檀茜倩, 麻冰玉, 王 丹, 崔方超, 李学鹏, 孙 彤, 葛永红, 励建荣*

(渤海大学 食品科学与工程学院, 辽宁 锦州 121013)

摘要: 生鲜食品产量很大, 其在贮运过程中极易受到微生物的污染而产生腐败变质, 引发食用安全风险并造成经济损失。热杀菌是目前常用的一种杀菌方法, 但会影响生鲜食品的风味、色泽和营养, 且不适用于热敏感性的食品物料。非热杀菌方法可以在一定程度上弥补这个不足, 光动力技术就是其中之一。目前针对光动力技术在生鲜食品中的应用已经开展了一定的研究, 基于此, 作者概述了光动力技术的定义和杀菌原理, 总结了其对不同微生物的杀灭效果和作用机制, 并介绍了该技术在水产品、果蔬、乳品和肉制品中的应用及其对这些食品品质的影响, 为光动力技术在水产品、果蔬、乳制品、肉制品等生鲜食品保鲜和安全控制中的应用提供一定的借鉴和参考。

关键词: 光动力技术; 生鲜食品; 食品保鲜; 食品安全

中图分类号: TS 254.4 文章编号: 1673-1689(2022)07-0100-11 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.07.009

Research Progress of Photodynamic Technology and Its Application in Fresh Food Preservation

TAN Xiqian, MA Bingyu, WANG Dan, CUI Fangchao,
LI Xuepeng, SUN Tong, GE Yonghong, LI Jianrong*

(College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

Abstract: The output of fresh food is very large, however, fresh food was prone to be contaminated by microorganisms during storage and transportation, which would lead to spoilage and cause food safety risks and economic losses. Thermal sterilization is a commonly used sterilization method, but it would have negative effect on the flavor, color and nutrition of food, moreover, it is not suitable for heat-sensitive food materials. Non-thermal sterilization methods could to some extent make up for this deficiency. Photodynamic sterilization, one of non-thermal sterilization method, has been carried out in the preservation research area of fresh food for a while. This paper reviews the sterilization mechanism of photodynamic sterilization technology, summarizes its killing effect and mechanism on different microorganisms, and introduces their application and impact on the quality of fresh food, such as aquatic products, fruit and vegetables, dairy, and meat. This review would provide

收稿日期: 2022-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901702); 辽宁省教育厅青年项目(LQ2020007)。

作者简介: 檀茜倩(1985—), 女, 博士, 讲师, 主要从事生鲜食品贮藏加工和质量安全控制研究。E-mail: tanxiqian@163.com

* 通信作者: 励建荣(1964—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事生鲜食品贮藏加工和质量安全控制研究。

E-mail: lijr6491@163.com

meaningful references to the preservation and safety control of fresh food.

Keywords: photodynamic technology, fresh food, food preservation, food safety

生鲜食品产量很大,然而由于物理损伤、化学变化、内源性酶和微生物的作用,生鲜食品在贮藏运输过程中极易发生腐败变质,从而引发食用安全风险并造成经济损失。其中微生物及其生命活动所产生的代谢物是造成腐败的主要原因^[1]。因此,如何有效地控制微生物对保证生鲜食品的新鲜度和安全性具有重要意义。

热杀菌虽然是目前应用比较广泛的一种杀菌方式,但会对生鲜食品的风味、色泽和营养成分等造成一定程度的破坏,并不适用于新鲜果蔬、生鱼片等生食物料的杀菌。为了解决这个问题,研究人员开发了一系列的非热杀菌技术,如冷等离子体杀菌^[2]、高压脉冲电场杀菌、高静水压杀菌^[3]、超声波杀菌^[4]等,但是这些杀菌方法存在杀菌成本高或对食品品质影响较大等缺点。光动力技术(photodynamic technology)是一种新型环保的非热杀菌技术,其利用光敏剂在被某些波长的光激活并吸收光子的能量后产生的活性氧(reactive oxygen species, ROS)等物质杀死微生物,整个杀菌过程不会造成邻近组织和细胞的损伤^[5],已经应用于义齿消毒^[6]、口腔念珠菌病治疗^[7]、细菌性角膜炎治疗^[8]、肿瘤抑制^[9]等医疗领域。近年来,针对光动力技术对生鲜食品的杀菌和安全控制也开展了一些研究^[10],相比于其他非热杀菌技术,该技术有成本低、对食品品质影响小等优点,具有很好的应用前景。作者首先概述了光动力杀菌技术的基本原理及影响因素,总结了其对细菌、真菌和病毒的杀灭作用和可能的作用机制,随后对其在水产品、果蔬、乳制品和肉制品等主要生鲜食品中的应用以及对这些食品品质的影响研究进展进行了探讨,以期对光动力杀菌技术在生鲜食品的品质和安全控制领域的应用提供一定的借鉴和参考。

1 光动力技术概述

光动力反应是由不同波长的光驱动的一系列物理、化学和生物反应,当生物组织中被光激发的光敏剂被激发时会触发光动力反应的发生。目前主要有两种类型的光动力反应(见图1)。第一种类型

是在光照下,光敏剂(PS)吸收光子由基态(1PS_0)转变为激发单重态($^1PS^*$),随后这种激发单重态的光敏剂一部分通过荧光发射失去能量返回基态,其余部分则可以通过系统间穿越转换为寿命更长的三重态($^3PS^*$),三重态光敏剂大部分会与周围的有机物和基态氧反应生成I型的ROS,包括超氧阴离子($\cdot O_2^-$)、过氧化氢(H_2O_2)、羟自由基($\cdot OH$)和单线态氧(1O_2)等,这些ROS可使靶细胞失活,而光敏剂在这个过程中被消耗并无法再生;第二种类型是当光敏剂处于三重态时会与三线态氧分子反应生成单线态氧,在这个过程中光敏剂不会被消耗而是会返回基态参与下一个反应循环^[11]。这两个反应过程在光动力反应中可同时存在,并且都需要氧的参与,因此氧是光动力反应过程的一个很重要的因素。

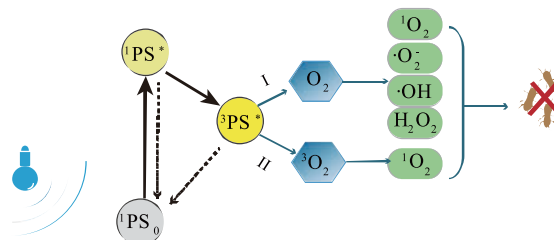


图1 光动力杀菌原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of photodynamic inactivation

另外两个光动力反应中的重要因素是光源和光敏剂。常见的照射光源包括紫外线(200~380 nm)、可见光(380~780 nm)和红外线(760~2 000 nm)等,发光二极管(light emitting diodes, LED)常被用于产生激发光。光源波长与光敏剂吸收峰的接近程度会影响光动力杀菌效果,当光源波长越接近光敏剂的吸收峰时,杀菌效果越好。常见光敏剂按来源可分为内源性光敏剂和外源性光敏剂。内源性光敏剂是指细菌(大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等)在细胞质中产生的内源性物质,如尿卟啉、原卟啉等^[12];外源性光敏剂是指一些天然产物或人工合成物质,包括姜黄素(curcumin, Cur)、核黄素(riboflavin, RI)、金丝桃素等。光敏剂还可以按照其结构分为三代,第一代为以血卟啉衍生物为代表的卟啉水溶性

混合物,如 photofrin^[13];第二代为卟啉类化合物的衍生物,如卟吩、金属酞菁、稠环醌类等;第三代为基于第二代光敏剂进行化学结构或基团修饰的物质^[14]。常见的天然光敏剂如姜黄素、核黄素等是第二代光敏剂。目前的研究多采用姜黄素和核黄素作为光敏剂。姜黄素是姜黄的活性成分,为二芳基庚酸化合物,有苦味,外观呈橙黄色,易溶于乙醇、二甲基亚砜等极性溶剂,仅在碱性条件下微溶于水,能够吸收波长为 400~475 nm 的光^[15-16]。核黄素是 B 族维生素的一种,可从植物或中草药中提取,其吸收波长在 375 nm 左右^[17]。另外微生物种类和环境因子等也会对光动力杀菌效果有影响。

2 光动力技术对细菌的杀灭作用

在使用光动力技术对细菌进行杀灭的过程中,其杀菌效果与细菌的类型(革兰氏阴性菌、革兰氏阳性菌)和存在状态(浮游态或生物被膜态)有关。其中生物被膜是附着在有生命或没有生命物体表面的一种复杂微生物群落^[18],是细菌为了应对极端环境而采取的一种自我保护机制,与浮游态的细菌相比,生物被膜使得细菌的清除变得更加困难。生物被膜的形成是一个动态且复杂的过程,受到细胞内多个调控系统的控制^[19]。光动力技术可通过影响某些与细菌运动有关的基因来抑制生物被膜的形成^[20]。光动力杀菌的效果也同时受到 LED 发射波长、光敏剂吸收波长、光敏剂类型、环境因子(pH、温度)、光照时间和光照剂量等因素的影响。

2.1 对革兰氏阴性菌的杀灭作用

大肠杆菌(*Escherichia coli*)是食品中常见的革兰氏阴性菌,能够在生物或者非生物表面形成生物被膜,造成食品污染以及食品品质劣化^[21]。为了应对大肠杆菌给食品工业和人类健康带来的危害,研究人员针对光动力技术对大肠杆菌的杀灭效果进行了研究。Ghate 等证实光动力技术可以有效杀灭大肠杆菌,并且其杀菌效果受到光照波长的影响,研究发现虽然 461 nm 和 521 nm 两种波长的光均能有效杀灭浮游状态下的大肠杆菌 O157:H7,但相同条件下 461 nm 比 521 nm 的杀菌效果更好,其可能与 461 nm 的发射光与大肠杆菌的内源性光敏化合物卟啉的吸收光谱更为接近有关;同时研究还发现在碱性条件下的杀菌效果更好,pH 9.5 的条件下进行杀菌时菌落数减少(4.1 ± 0.42) lg(CFU/mL),而在

pH 4.5 和 pH 7.3 的杀菌条件下菌落只减少 2~3 lg(CFU/mL)^[22]。光敏剂类型也对杀菌效果有影响,Lourenço 等在酞菁(Pc)(属于第二代光敏剂,对红光具有较强的吸收能力,其在红光照射下可产生大量单线态氧)的基础上开发出一种新型光敏剂——锌酞菁的衍生物(ZnPc 1a 和 ZnPc 2a),这两种新合成的光敏剂带有阳离子取代基,能够通过静电相互作用与带有负电荷的细菌细胞壁紧密结合,改变了酞菁因缺乏有效的静电作用或范德华力而限制其作为光敏剂应用的劣势,可在短时间内将单线态氧作用于细菌细胞造成细胞损伤。相比于不加入光敏剂和加入光敏剂酞菁,这种新型光敏剂介导的光动力技术的杀菌效果更显著,不仅可以杀灭浮游细菌,对已形成的生物被膜也有很强的清除能力,在红光照射下,其对浮游态和生物被膜态大肠杆菌的灭活率分别高达 99.99%和 99.00%^[23]。

鼠伤寒沙门氏菌(*Salmonella typhimurium*)也是一种常见的食源性致病菌,感染后会引发腹痛、胃肠炎等多种疾病甚至导致死亡^[24]。鼠伤寒沙门氏菌存在内源性卟啉类化合物,可作为光敏剂,光照波长和环境温度会影响光动力杀菌对鼠伤寒沙门氏菌的抑制效果。Ghate 等研究了不同波长(461、521、642 nm)的可见光在不同温度(10、15、20 ℃)下对鼠伤寒沙门氏菌的抑制效果,研究发现,与光动力技术对大肠杆菌的杀灭效果类似,在经过 7.5 h 的处理后,461 nm 波长的光照射下在 10 ℃和 15 ℃菌落数减少 4.6~5.2 lg(CFU/mL);相同温度条件时 521 nm 波长的光照射下菌落数只减少了 1.0~2.0 lg(CFU/mL),而在 642 nm 波长的光照射下菌落数没有变化^[25]。实验结果证实,相同波长光照射时 10 ℃和 15 ℃下的光动力杀菌处理比 20 ℃杀菌效果更好,其原因可能为细菌细胞在较低的环境温度下会改变细胞膜中饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸的比例以保持适当的膜流动性,在较低温度下细胞膜中的不饱和脂肪酸的比例会有所增加,而不饱和脂肪酸可能更容易与光照射产生的 ROS 发生氧化反应,因此,在光照期间暴露于较低温度下的细菌细胞膜更容易被光照射破坏,因此显示出光动力杀菌效果增强。细菌在光动力技术处理时还可能发生一些关键代谢物和代谢途径的改变。研究发现采用 460 nm 波长的光在 25 ℃照射处理 1 h 后,鼠伤寒沙门氏菌的代谢物 11-脱氧皮质醇下调,表明其类固醇的代

谢途径受到影响;同时 N-戊基泛酰胺(与辅酶 A 合成有关的物质)水平下调,随之会影响辅酶 A 的合成,辅酶 A 合成的减少会降低细菌对一氧化氮的生物利用度,从而会增加 ROS 的形成,加剧细胞损伤;此外,代谢物 L-酪氨酸和苯氧基自由基 VI 增多,这些物质参与 ROS 或其前体物的合成,ROS 的增多也会进一步加剧细胞损伤^[26]。

副溶血性弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*)可通过鱼、贝类等海产品从环境传染给人类,其产生的黏附因子有助于其在物体表面形成生物被膜^[27]。光动力技术对副溶血性弧菌浮游态的抑制和生物被膜态的清除均有明显效果。Chen 等研究了姜黄素介导的光动力技术对浮游态和生物被膜态副溶血性弧菌的杀灭和清除效果,结果表明,在 5 min 内(光照剂量 1.14 J/cm²)用 1.0 μmol/L 姜黄素处理后,已无法明显检测到处于浮游态的副溶血性弧菌,而随着光照剂量和姜黄素浓度的增加,通过共聚焦荧光显微镜的观察发现其生物被膜的粗糙度随着时间的延长逐渐下降,在 60 min 内(光照剂量 13.68 J/cm²)用 20.0 μmol/L 姜黄素处理基本可以达到清除其生物被膜的效果^[28]。研究发现光动力杀菌可影响细菌的群体感应(quorum sensing, QS)信号通路。QS 信号通路是细菌内部和细菌间采用的依靠信号分子调节群体密度和生物行为的一种调控方式^[29]。分子生物学分析结果发现在一定波长的光照射处理后副溶血弧菌的毒力因子基因(*tdh*, *toxR*)以及生物被膜形成基因(*oxyR*, *aphA*, *luxR* 和 *opaR*)均出现显著下调。光动力杀菌同样可以显著降低铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)与 QS 信号通路有关的基因(*rhIR*, *rhII*, *lasI*, *lasR*)表达,其毒力因子基因(*phzH*, *lasB*)表达也显著下调^[30]。

2.2 对革兰氏阳性菌的杀灭作用

金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)是典型的革兰氏阳性食源性致病菌,可产生多种毒力因子。研究发现,405、460、461、521 nm 波长的光照射处理可不同程度降低金黄色葡萄球菌的数量^[25-26]。光动力杀菌不易使金黄色葡萄球菌产生耐受性^[31]。光敏剂的浓度有可能决定了光动力杀菌对金黄色葡萄球菌的清除效果。Winter 等利用姜黄素和聚乙炔吡咯烷酮合成聚乙炔吡咯烷酮姜黄素(PVP-C)(这种方法可在不添加有机溶剂的情况下,增加姜黄素的水溶性,并克服姜黄素自然条件下快速衰变

导致浓度降低的缺点),随后采用 435 nm 波长的光照射处理,在光敏剂为 2.7 mmol/L 的作用浓度下,能使金黄色葡萄球菌菌落数减少 6 lg(CFU/mL),在 50 μmol/L 的浓度下处理 15 min 到 25 min,则可以对其完全根除;温度对光动力杀灭金黄色葡萄球菌的效果也有影响,在 20 ℃下同等光动力杀菌条件处理对金黄色葡萄球菌造成的亚致死损伤细胞数量远远小于 10 ℃下的数量^[32],其产生原因与低温条件下光动力杀菌会提高大肠杆菌的杀灭作用类似,也是与不饱和脂肪酸和一些代谢产物和通路的变化有关^[25]。

单增李斯特菌(*Listeria monocytogenes*)可在低温下正常生长繁殖,通过污染食物传播^[33]。不同温度下光动力技术对单增李斯特菌表现出不同的杀灭效果^[34],与大肠杆菌和金黄色葡萄球菌类似,低温比室温更易导致其失活;但是单增李斯特菌在酸性条件(pH 4.5)下比碱性条件(pH 9.5)下对光动力杀菌更敏感,这与光动力杀菌在碱性条件下对大肠杆菌的杀菌效果正好相反^[25],其机制有待进一步研究。

另外也有研究人员研究了光动力技术对植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)的杀灭效果。Kumar 等对比了在不同温度(4、10、25 ℃)、不同波长(405、460、520 nm)的光照射对浮游态植物乳杆菌活性的影响,研究结果发现,与 520 nm LED 照射相比,405 nm 和 460 nm 波长的光照射能够更有效地杀灭浮游态植物乳杆菌;在相同的光照剂量水平下,405 nm 波长的光照射显示出最大的灭菌效果,这与其光敏剂为内源性卟啉类物质(最佳光吸收范围在 400~430 nm)有关;植物乳杆菌在所选温度范围内菌落数的变化很小(少于 10%),与温度升高或下降并没有一致的趋势,研究结果显示相比于在 4 ℃和 10 ℃,在 25 ℃的 D_{10} 值处于中等水平,并且发现这个温度和致死光照射剂量的组合有可能会促进在 405 nm 和 460 nm 波长的光照射下细菌细胞进入活的非可培养(viable but non culturable, VBNC)状态,但其具体原因还有待进一步研究^[35]。

3 光动力技术对真菌的杀灭作用

真菌广泛存在于果蔬等生鲜食品中,导致水果的腐败,产生不良气味,引起营养素流失,还可能产生真菌毒素(黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、展青霉素等),不仅造成经济损失,还对人体健康有严重影响^[36]。

真菌中不含有内源性的光敏剂,所以在应用光动力杀菌的过程中需要外源添加光敏剂。姜黄素介导的光动力技术能够使霉菌以及酵母的孢子和细胞的存活率显著降低^[37],并且其杀菌效果与真菌种类、光敏剂浓度、光照剂量等密切相关。相关研究表明,在姜黄素浓度为 100~1 000 $\mu\text{mol/L}$ 、光照剂量为 24、48、72、96 J/cm^2 时,光动力处理对溶液中的黑曲霉、黄曲霉、灰黄青霉、黄青霉和白酵母分别有 99.0%、88.9%、78.0%、99.7%、99.2% 的抑制率;同一研究还验证了光动力杀菌对平板上生长的霉菌的抑制效果,在姜黄素的喷洒剂量为 800 $\mu\text{mol/L}$ 以及光照剂量为 360 J/cm^2 时,可以完全抑制黑曲霉、尖孢镰刀菌、白色念珠菌和白酵母,对黄曲霉、灰黄青霉、黄青霉则分别有 75%、80.4%、88.5% 的抑制率;虽然有其他研究表明姜黄素可以破坏白色念珠菌的细胞膜和细胞壁^[38-39],但是此研究证实在辐照前用姜黄素溶液浸泡孢子或细胞对各种真菌的抑制效果没有显著性影响,说明其抑制作用是光照和光敏剂共同作用的结果,姜黄素本身并不是主要的抑菌因素。还有学者研究了另一种光敏剂赤藓红(一类咕吨的环状化合物,常用的一种牙菌斑显示剂,吸收可见光后会引发光动力反应)介导的光动力杀菌对于酵母菌的杀灭效果,研究发现使用 3 mmol/L 赤藓红在 50 J/cm^2 光照剂量的处理下,可使白色念珠菌的菌落数减少近 4 lg(CFU/mL)^[40]。

4 光动力技术对病毒的杀灭作用

光动力技术对病毒也有一定的杀灭效果。诺如病毒(norovirus)是一种常存在于牡蛎、贝类等水产类的食源性病毒,会导致急性肠胃炎,引起腹泻等。光动力杀菌对病毒的抑制效果与病毒种类、光敏剂种类、光照剂量和时间等因素相关。光敏剂姜黄素本身对病毒也有抑制作用。Yang 等研究发现,暴露于姜黄素 3 d 后,鼠诺如病毒(MNV)的感染性降低了 91%,且感染降低的效果呈现剂量依赖性;并利用携带有人诺如病毒(human-norovirus, HuNoV)基因复制子的 HG23 细胞系评估姜黄素对 HuNoV 复制的影响作用发现,姜黄素并不会对 HuNoV 复制产生抑制作用,推测其抗病毒机制可能不是影响了病毒 RNA 的复制,而是通过影响病毒进入宿主细胞或者是影响了病毒的其他生命周期阶段^[41]。另一项研究关于姜黄素介导的光动力杀菌对猫病毒

(FCV)和鼠诺如病毒(这两种病毒都可以作为诺如病毒的代替物)的抗病毒活性影响发现,单纯采用 13.5~1 358.0 $\mu\text{mol/L}$ 的姜黄素处理后,两种病毒的滴度分别有 6~7 lg(TCID₅₀/mL)的下降;而在蓝光照射、光照剂量为 3 J/cm^2 时,添加 5 $\mu\text{g/mL}$ 的姜黄素在 37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 30 min 后就可以使 FCV 滴度降低 1.75 lg(TCID₅₀/mL),添加 50 $\mu\text{g/mL}$ 的姜黄素在 37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 30 min 时,则可使 FCV 的滴度下降近 5 lg(TCID₅₀/mL),虽然同等光动力杀菌条件处理对 MNV 的活性抑制能力较低,但 MNV 病毒滴度降低了 0.73 lg(TCID₅₀/mL)^[42];光动力杀菌对病毒的抑制效果同时受到初始病毒滴度的影响,在初始病毒滴度较低的情况下抑制效果更好,其可能的机制与病毒浓度和 ROS 之间的比率大小以及 ROS 对病毒成分的非特异性作用有关,当病毒浓度较低时,ROS 会与少量的病毒颗粒发生反应,从而产生更大的氧化损伤。

5 光动力技术在生鲜食品保鲜中的应用

5.1 在水产品保鲜中的应用

水产品味道鲜美营养价值很高,在人们的膳食中占了很大的比例,而且由于受到日式和地中海饮食方式的影响,水产品尤其是生食水产品(鲑鱼、鲟鱼、金枪鱼、牡蛎、甜虾)的消费量逐渐增高^[3],因此研究人员对这类水产品的光动力杀菌开展了很多研究,见表 1。

Huang 等采用蓝光照射,以姜黄素作为光敏剂,研究了光动力杀菌对人工接种于鲑鱼表面的单增李斯特菌的抑制效果,通过分析发现,在室温(25 $^{\circ}\text{C}$)条件下光动力杀菌对其表面的单增李斯特菌抑制率可达到 99.99%^[43]。曹斌斌等也证实光动力杀菌能抑制牡蛎中的细菌(主要来源于肠道),其中嗜冷杆菌、速生嗜冷杆菌被部分灭活,迪茨氏菌、枯草芽孢杆菌被完全灭活,大肠杆菌和副溶血性弧菌也被很好地控制^[44]。这一结果证明了光动力处理对牡蛎中存在的食源性致病菌具有广泛杀菌性。同时以姜黄素作为光敏剂,在 470 nm 和 3.6 J/cm^2 的光照剂量处理下,对牡蛎中的鼠诺如病毒有 1~3 lg(PFU/mL)的抑制^[45]。

光动力杀菌还可以保持或在一定程度上提高水产品的品质。Gong 等发现光动力杀菌能够将鲟鱼的货架期延长 3 d 且不会对鲟鱼鱼肉的质构产生影

响。研究发现,在贮藏终点时,处理组的总游离氨基酸和总不饱和脂肪酸的含量明显高于对照组,同时鱼肉的氧化程度、劣变程度以及腐败代谢物的产生都比对照组低^[46]。另一项研究证实缢蛏肉在姜黄素介导的蓝光照射后,可达到 99.99% 的细菌抑制率,且在处理后其外观、色泽能得到很好地保持^[47]。Chen 等也研究了在 4 ℃ 和 10 ℃ 贮藏时光动力杀菌对煮熟牡蛎肉中的副溶血弧菌的杀灭效果和对牡蛎肉品质的影响,发现没有经过光动力杀菌的牡蛎肉的总色差值(ΔE)大幅上升,而经过光动力杀菌的牡蛎肉的 ΔE 上升程度较小,证明光动力杀菌能

够在一定程度上延缓熟牡蛎肉外观和颜色的变化;利用磁共振成像(MRI)对贮藏期间经过杀菌和未杀菌的熟牡蛎肉的新鲜度进行评价发现,光动力杀菌显著延缓水分的流失,因此保证了熟牡蛎肉较好的食用品质^[48]。姜黄素介导的光动力杀菌对即食海蜇品质也能起到保护和一定程度的提升作用^[49],研究发现经 LED 光照处理后即食海蜇的水分、脂肪、蛋白质、碳水化合物和灰分等成分没有发生明显变化,同时硬度、弹性、内聚性、咀嚼性、颜色、气味等质地特性和感官品质相比于对照组有一定提升。

表 1 光动力杀菌在水产品保鲜中的应用

Table 1 Application of photodynamic inactivation technology in the preservation of aquatic products

水产品	微生物种类	波长/nm	照射剂量	杀菌效果	货架期	文献
鲟鱼	菌落总数(TVC)	470	—	减少 1.19 lg(CFU/mL)	由 5 d 延长至 8 d	[46]
缢蛏	菌落总数(TVC)	425	172.8 J/cm ²	减少 99.99%	延长至 6 d	[47]
即食三文鱼	单增李斯特菌	405	(16±2) mW/cm ²	减少 0.4 lg(CFU/cm ²)	—	[50]
	沙门氏菌			减少 0.5 lg(CFU/cm ²)		
牡蛎	菌落总数(TVC)	470	5.4 J/cm ²	—	由 8 d 延长至 12 d	[51]
虾糜	菌落总数(TVC)	425	—	—	由 2 d 延长至 4 d	[52]
烟熏三文鱼	单增李斯特菌	460	15 mW/cm ²	减少 1.2 lg(CFU/cm ²)	—	[53]

5.2 在果蔬保鲜中的应用

果蔬富含多酚、有机酸、维生素,具有调节免疫,改善肠道菌群的作用。但是果蔬的高水分、高糖量的特点使其极易滋生微生物^[54],光动力杀菌在果蔬保鲜中也有很多应用研究(见表 2)。研究发现,采用姜黄素作为光敏剂,460 nm 波长的光照射 60 min 可使鲜切哈密瓜表面需氧微生物总数减少 1.8 lg(CFU/g)^[55];405 nm 波长的光照射下,可以抑制低温环境中鲜切芒果表面的大肠杆菌 O157:H7、单增李斯特菌以及沙门氏菌的生长^[56];鲜切马铃薯表面的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌菌落总数也在光动力处理后显著减少^[57]。同时研究发现,其对浆果表面存在的病毒也具有灭活潜力,在姜黄素介导 405 nm 波长的光照处理下可使人工接种在蓝莓表面的杜兰病毒失活^[58]。

光动力杀菌对果蔬品质基本不会产生很大影响。Zhang 等比较了光动力杀菌在 7 d 的贮藏时间内对葡萄品质的影响,研究发现与贮藏第 1 天相比,未经光动力杀菌处理的葡萄在保质期结束时弹

性显著降低,而经过处理的葡萄没有表现出明显变化;未经处理的葡萄表面在第 7 天出现真菌木霉的大量生长,导致葡萄酸败现象的发生,而经过处理的葡萄在保质期结束时没有表现出明显的腐败,葡萄的腐败率比对照组低 17.7%,所以葡萄的外观在处理能得到更好地保持^[59]。光动力技术也可以在一定程度上减轻果实的褐变,研究发现光动力杀菌处理可以延缓鲜切哈密瓜的褐变速率,并且可以保持可溶性固形物含量、色泽、含水量、硬度等优良感官品质^[55]。

5.3 在乳品保鲜中的应用

乳品营养丰富,但是容易受到各种病原微生物和腐败微生物的污染,乳品中比较常见的食源性微生物有大肠杆菌 O157:H7、金黄色葡萄球菌、单增李斯特菌等。光动力杀菌技术在乳品中的应用目前也有一定研究(见表 3)。Srimagal 研究了光动力杀菌对牛奶中微生物数量和牛奶颜色变化的影响,发现与未经处理的牛奶相比,采用不同浓度的姜黄素,经 405 nm LED 照射处理后牛奶的大肠杆菌数

表 2 光动力杀菌在果蔬保鲜中的应用

Table 2 Application of photodynamic inactivation technology in the preservation of fruits and vegetables

果蔬	微生物种类	波长/nm	照射剂量	杀菌效果	货架期	文献
鲜切哈密瓜	菌落总数(TVC)	460	—	减少 1.8 lg(CFU/g)	9 d	[55]
鲜切芒果表面	大肠杆菌 O157:H7	405±5	2.6~3.5 kJ/cm ²	灭活率达 97%~99%	—	[56]
	单增李斯特菌					
	沙门氏菌					
	荧光假单胞菌					
鲜切马铃薯	大肠杆菌	420	40 W	减少 3.60 lg(CFU/mL)	—	[57]
	金黄色葡萄球菌		20 W	减少 5.23 lg(CFU/mL)		
圣女果	菌落总数(TVC)和大肠菌群	470	7.2 J/cm ²	均减少 80%以上	葡萄由 7 d 延长至 9 d	[59]
草莓						
葡萄						
樱桃						
黄瓜	金黄色葡萄球菌	435	9.4 mW/cm ²	减少 2.6 lg(CFU/mL)(99.8%)	黄瓜表面杀菌效果至少持续 48 h	[60]
辣椒				减少 2.5 lg(CFU/mL)(99.7%)		
番茄	大肠杆菌	435	9.4 mW/cm ²	减少>3 lg(CFU/mL)	—	[61]
黄瓜				相对失活量为 5.6 lg(CFU/mL)		
生菜						
鲜切菠萝片	金黄色葡萄球菌	462±3	(6.34±0.05) mW/cm ²	减少(4.21±0.13) lg(CFU/g)	—	[62]
	大肠杆菌			减少(3.17±0.29) lg(CFU/g)		

显著下降,并将其在 4℃贮藏条件下的保质期从 5 d 延长到 9 d,LED 光照处理对牛奶中的水分、脂肪、蛋白质、碳水化合物含量,以及酸度、黏度、颜色的影响并不显著^[63]。对于奶酪来说,制作奶酪采用的牛奶是否经过巴氏杀菌会对光动力杀菌结果产生影响,采用巴氏杀菌牛奶制成的奶酪对于光动力杀菌更敏感,其中的金黄色葡萄球菌能够得到有效控制,奶酪贮藏的货架期得以延长;而光动力杀菌对未经巴氏杀菌的牛奶制成的奶酪则无明显货架期延长的效果,其原因可能是未经高温消毒的牛奶制成的奶酪样品中存在对姜黄素作为光敏剂的光动力杀菌方式更具有耐受的微生物,具体原因还有待于进一步研究^[64]。Hyun 等也证实 460~470 nm 波长的光照射可以在 4℃下抑制定向聚丙烯(0.03 mm)包装切片奶酪表面的单增李斯特菌和荧光假单胞菌,从而延长包装切片奶酪的保质期,将其食源性疾病的风险降至最低,同时不会导致奶酪颜色的变化^[65]。

5.4 在肉制品保鲜中的应用

肉制品种类丰富,富含蛋白质、脂肪等营养成分,易被金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、单增李斯特菌和大肠杆菌等微生物污染(见表 3)。Tortik 等将金黄色葡萄球菌接种至鸡腿表面,经 435 nm 波长的光照射后鸡腿表面的细菌数量减少 1.5 lg(CFU/cm²),同时鸡腿外观无明显变化^[60]。Gao 等研究了时间和光照剂量影响姜黄素介导的光动力处理对鸡皮表面的单增李斯特菌和沙门氏菌的抑制效果,结果表明光动力杀菌可以在较短时间内杀灭细菌,鸡皮表面的单增李斯特菌和沙门氏菌在光照射后分别减少 2.9 lg(CFU/cm²)和 1.5 lg(CFU/cm²),且鸡皮颜色没有显著变化^[66]。另有研究证实,蓝光(405 nm 和 464 nm)对人工接种于即食肉制品表面的单增李斯特菌具有 69.55%~85.25%的杀灭率^[67];同时在不同参数下蓝光(405 nm)照射对接种在热狗表面的大肠杆菌也可达到 75.61%~96.34%的抑制率^[68]。

表 3 光动力杀菌在其他生鲜食品保鲜中的应用

Table 3 Application of photodynamic inactivation technology in the preservation of other fresh foods

其他生鲜食品	微生物种类	波长/nm	照射剂量	杀菌效果	货架期	文献
鸡腿	金黄色葡萄球菌	435	9.4 mW/cm ²	减少 1.7 lg(CFU/cm ²) (98%)	—	[60]
牛奶	大肠杆菌	405	10.0 W	最大减少 5.27 lg(CFU/mL)	4 ℃储藏条件下 由 5 d 延长至 9 d	[63]
巴氏杀菌奶酪	金黄色葡萄球菌	450±10	10.0 J/cm ²	减少 4.43 lg(CFU/cm ²)	—	[64]
包装切片奶酪	单增李斯特菌	460~470	604.8 J/cm ²	最大减少 5.14 lg(CFU/cm ²)	可用于延长奶酪 货架期	[65]
	荧光假单胞菌			最大减少 3.60 lg(CFU/cm ²)		
鸡皮	单增李斯特菌	430	32.1 kJ/m ²	2.9 lg(CFU/cm ²)	—	[66]
	沙门氏菌			1.5 lg(CFU/cm ²)		
即食肉	单增李斯特菌	405	60.0 J/cm ²	抑制率为 85.25%	—	[67]
热狗	大肠杆菌	405	100.0 J/cm ²	抑制率为 96.34%	—	[68]

6 展 望

目前关于光动力杀菌在生鲜食品中的保鲜和安全性控制中的研究已取得了一定进展,但是仍然存在一些问题(比如光敏剂的稳定性、杀菌的有效性等)限制了其在生鲜食品杀菌中的应用。未来的研究可以考虑以下几个方面:1)针对光敏剂容易受食品种类以及其他条件影响,并且部分光敏剂存在的溶解性和稳定性差的缺点,可以考虑开发受食品物料影响小、溶解性和稳定性高的新型光敏剂;2)

虽然光动力杀菌技术不容易使细菌产生耐药性但是却有可能使细菌进入 VBNC 状态,这会使得某些病原菌无法检测,增加了消费者感染食源性疾病的风险,探明在不同光动力杀菌条件下促使不同细菌形成 VBNC 状态的机制以及如何优化杀菌条件避免这种现象的发生十分重要;3)因为光动力杀菌效果受到多种环境因素的影响,所以可以考虑和其他杀菌方式结合(例如添加化学或生物保鲜剂等),以综合提高光动力杀菌对多种类型食源性微生物的杀灭效果。

参考文献:

- [1] 朱军莉,冯立芳,王彦波,等. 基于细菌群体感应的生鲜食品腐败机制[J]. 中国食品学报,2017,17(3):225-234.
- [2] RATHOD N B, RANVEER R C, BHAGWAT P K, et al. Cold plasma for the preservation of aquatic food products: an overview [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(5):4407-4425.
- [3] KONTOMINAS M G, BADEKA A V, KOSMA I S, et al. Innovative seafood preservation technologies: recent developments[J]. *Animals (Basel)*, 2021, 11(1):1-40.
- [4] 刘伟,宋弋,张洁,等. 超声波对果蔬汁杀菌和品质影响的研究进展[J]. 现代食品科技,2018,34(5):276-289.
- [5] GHATE V S, ZHOU WYUK H G. Perspectives and trends in the application of photodynamic inactivation for microbiological food safety[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(2):402-424.
- [6] RIBEIRO D G, PAVARINA A C, DOVIGO L N, et al. Photodynamic inactivation of microorganisms present on complete dentures: a clinical investigation[J]. *Lasers in Medical Science*, 2012, 27(1):161-168.
- [7] VECCHI C F, DOS SANTOS R S, DA SILVA J B, et al. Development and *in vitro* evaluation of buccal mucoadhesive films for photodynamic inactivation of *Candida albicans*[J]. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2020, 32:1-11.
- [8] DEICHELBOHRER M, WU M, SEITZ B, et al. Bacterial keratitis: photodynamic inactivation reduced experimental inflammation [J]. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 2017, 14(5):4509-4514.

- [9] MOKOENA D R, GEORGE B P H. Photodynamic therapy induced cell death mechanisms in breast cancer[J]. **International Journal of Molecular Sciences**, 2021, 22(19): 1-15.
- [10] 郑宝东, 林少玲, 曾绍校, 等. 光动力技术研究进展及其在食品工业中的应用前景[J]. **食品与生物技术学报**, 2020, 39(5): 6-15.
- [11] ZHU S, SONG Y, PEI J, et al. The application of photodynamic inactivation to microorganisms in food[J]. **Food Chemistry: X**, 2021, 12: 1-10.
- [12] NITZAN Y M. Endogenous porphyrin production in bacteria by δ -aminolaevulinic acid and subsequent bacterial photoeradication [J]. **Lasers in Medical Science**, 1999, 14(4): 269-277.
- [13] ABRAHAMSE H M R. New photosensitizers for photodynamic therapy[J]. **Biochemical Journal**, 2016, 473(4): 347-364.
- [14] 熊晓辉, 孔佳仪, 张帅, 等. 光敏剂介导光动力杀菌在食品中应用的研究进展[J]. **食品与发酵工业**, 2021, 47(22): 309-318.
- [15] SEIDI D M, MEREDDY R, NETZEL M E, et al. An insight into curcumin-based photosensitization as a promising and green food preservation technology[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 2020, 19(4): 1727-1759.
- [16] QIAN T, WANG M, WANG J, et al. Transient spectra study on photo-dynamics of curcumin[J]. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, 2016, 166: 38-43.
- [17] 林以琳, 邱建清, 李世洋, 等. 核黄素介导的光动力技术的研究进展[J]. **食品工业科技**, 2020, 41(6): 332-337.
- [18] BESHIRU A, IGBINOSA I, HIGBINOSA E O. Biofilm formation and potential virulence factors of *Salmonella* strains isolated from ready-to-eat shrimps[J]. **PLoS One**, 2018, 13(9): 1-22.
- [19] JHA P K, DALLAGI H, RICHARD E, et al. Formation and resistance to cleaning of biofilms at air-liquid-wall interface: influence of bacterial strain and material[J]. **Food Control**, 2020, 118: 1-21.
- [20] HEMDAN A B, AZAB E L M, EI-TAWHEEL G E. The destruction of *Escherichia coli* adhered to pipe surfaces in a model drinking water distribution system via various antibiofilm agents[J]. **Water Environment Research**, 2020, 92(12): 2155-2167.
- [21] SHARMA G, SHARMA S, SHARMA P, et al. *Escherichia coli* biofilm: development and therapeutic strategies[J]. **Journal of Applied Microbiology**, 2016, 121(2): 309-319.
- [22] GHATE V, LEONG A L, KUMAR A, et al. Enhancing the antibacterial effect of 461 and 521 nm light emitting diodes on selected foodborne pathogens in trypticase soy broth by acidic and alkaline pH conditions[J]. **Food Microbiology**, 2015, 48: 49-57.
- [23] LOURENÇO L M O, ROCHA D M G C, RAMOS C I V, et al. Photoinactivation of planktonic and biofilm forms of *Escherichia coli* through the action of cationic zinc(II) phthalocyanines[J]. **ChemPhotoChem**, 2019, 3(5): 251-260.
- [24] LIS K A, BOULAABA A, BINDER S, et al. Inactivation of *Salmonella typhimurium* and *Listeria monocytogenes* on ham with nonthermal atmospheric pressure plasma[J]. **PLoS One**, 2018, 13(5): 1-21.
- [25] 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.
- [26] 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: 12-21.
- [27] ASHRAFUDOUILLA M, MIZAN M F R, HA A J, et al. Antibacterial and antibiofilm mechanism of eugenol against antibiotic resistance *Vibrio parahaemolyticus*[J]. **Food Microbiology**, 2020, 91: 1-13.
- [28] CHEN B, HUANG J, LI H, et al. Eradication of planktonic *Vibrio parahaemolyticus* and its sessile biofilm by curcumin-mediated photodynamic inactivation[J]. **Food Control**, 2020, 113: 1-10.
- [29] BAI A J, RAI V R. Bacterial quorum sensing and food industry[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 2011, 10(3): 183-193.
- [30] 谭杨. ALA-PDT 对铜绿假单胞菌生物膜及其 QS 系统的影响的实验研究[D]. 重庆: 第三军医大学, 2017.
- [31] BARTOLOMEU M, ROCHA S, CUNHA A, et al. Effect of photodynamic therapy on the virulence factors of *Staphylococcus aureus*[J]. **Frontiers in Microbiology**, 2016, 7: 1-11.

- [32] WINTER S, TORTIK N, KUBIN A, et al. Back to the roots: photodynamic inactivation of bacteria based on water-soluble curcumin bound to polyvinylpyrrolidone as a photosensitizer[J]. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 2013, 12(10): 1795-1802.
- [33] FURLANETO-MAIA L, RAMALHO R, ROCHA K R, et al. Antimicrobial activity of enterocins against *Listeria* sp. and other food spoilage bacteria[J]. **Biotechnology Letters**, 2020, 42(5): 797-806.
- [34] HUANG J, CHEN B, LI H, et al. Enhanced antibacterial and antibiofilm functions of the curcumin-mediated photodynamic inactivation against *Listeria monocytogenes*[J]. **Food Control**, 2020, 108: 1-8.
- [35] KUMAR A, GHATE V, KIM M J, et al. Antibacterial efficacy of 405, 460 and 520 nm light emitting diodes on *Lactobacillus plantarum*, *Staphylococcus aureus* and *Vibrio parahaemolyticus*[J]. **Journal of Applied Microbiology**, 2016, 120(1): 49-56.
- [36] 沈友明, 聂继云, 李志霞, 等. 果品中真菌毒素的污染、毒性、生物合成及影响因素研究进展[J]. **食品科学**, 2018, 39(9): 294-304.
- [37] ALASMARI F, MEREDDY R Y. A novel photosensitization treatment for the inactivation of fungal spores and cells mediated by curcumin[J]. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, 2017, 173: 301-306.
- [38] KUMAR A, DHAMGAYE S, MAURYA I K, et al. Curcumin targets cell wall integrity via calcineurin-mediated signaling in *Candida albicans*[J]. **Antimicrobial Agents and Chemotherapy**, 2014, 58(1): 167-175.
- [39] LEE W, LEE D G. An antifungal mechanism of curcumin lies in membrane-targeted action within *Candida albicans*[J]. **IUBMB Life**, 2014, 66(11): 780-785.
- [40] EN-SHENG K, NAZZAL S, TSENG Y H, et al. Erythrosine-mediated photodynamic inactivation of bacteria and yeast using green light-emitting diode light[J]. **Journal of Food & Drug Analysis**, 2012, 20: 951-956.
- [41] YANG M, LEE G J, SI J, et al. Curcumin shows antiviral properties against norovirus[J]. **Molecules**, 2016, 21(10): 1-14.
- [42] RANDAZZO W, AZNAR R, SANCHEZ G. Curcumin-mediated photodynamic inactivation of norovirus surrogates[J]. **Food and Environmental Virology**, 2016, 8(4): 244-250.
- [43] HUANG J, CHEN B, ZENG Q H, et al. Application of the curcumin-mediated photodynamic inactivation for preserving the storage quality of salmon contaminated with *L. monocytogenes*[J]. **Food Chemistry**, 2021, 359: 1-10.
- [44] 曹斌斌, 武娟, 许川山, 等. 姜黄素介导的光动力冷杀菌方法对牡蛎杀菌的效果研究[J]. **食品科学**, 2016, 37(5): 46-49.
- [45] WU J, HOU W, CAO B, et al. Virucidal efficacy of treatment with photodynamically activated curcumin on murine norovirus bio-accumulated in oysters[J]. **Photodiagnosis and Photodynamic Therapy**, 2015, 12(3): 385-392.
- [46] GONG C, LI Y, GAO R, et al. Preservation of sturgeon using a photodynamic non-thermal disinfection technology mediated by curcumin[J]. **Food Bioscience**, 2020, 36: 1-10.
- [47] 林以琳, 李世洋, 赖丹宁, 等. 姜黄素介导光动力减菌技术对缢蛏的保鲜效果[J]. **农业工程学报**, 2020, 36(16): 320-326.
- [48] CHEN B, HUANG J, LIU Y, et al. Effects of the curcumin-mediated photodynamic inactivation on the quality of cooked oysters with *Vibrio parahaemolyticus* during storage at different temperature[J]. **International Journal of Food Microbiology**, 2021, 345: 1-11.
- [49] HU J, ZHOU F, LIN Y, et al. The effects of photodynamically activated curcumin on the preservation of low alum treated ready-to-eat jellyfish[J]. **LWT – Food Science and Technology**, 2019, 115: 1-6.
- [50] LI X, KIM M J, YUK H G. Influence of 405 nm light-emitting diode illumination on the inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. on ready-to-eat fresh salmon surface at chilling storage for 8 h and their susceptibility to simulated gastric fluid[J]. **Food Control**, 2018, 88: 61-68.
- [51] LIU F, LI Z, CAO B, et al. The effect of a novel photodynamic activation method mediated by curcumin on oyster shelf life and quality[J]. **Food Research International**, 2016, 87: 204-210.
- [52] WANG D, ZHOU F, LAI D, et al. Curcumin-mediated sono/photodynamic treatment preserved the quality of shrimp surimi and influenced its microbial community changes during refrigerated storage[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2021, 78: 1-10.
- [53] JOSEWIN S W, GHATE V, KIM M J, et al. Antibacterial effect of 460 nm light-emitting diode in combination with riboflavin

- against *Listeria monocytogenes* on smoked salmon[J]. **Food Control**, 2018, 84:354-361.
- [54] 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.
- [55] LIN Y, HU J, LI S, et al. Curcumin-based photodynamic sterilization for preservation of fresh-cut hami melon[J]. **Molecules**, 2019, 24(13):2374-2383.
- [56] KIM M J, TANG C H, BANG W S, et al. Antibacterial effect of (405±5) nm light emitting diode illumination against *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* on the surface of fresh-cut mango and its influence on fruit quality[J]. **International Journal of Food Microbiology**, 2017, 244:82-89.
- [57] 于金坤, 张芳. 姜黄素介导的光动力技术对鲜切马铃薯的杀菌效果[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4):259-263.
- [58] KINGSLEY D H, PEREZ-PEREZ R E, BOYD G, et al. Evaluation of 405 nm monochromatic light for inactivation of *Tulane virus* on blueberry surfaces[J]. **Journal of Applied Microbiology**, 2018, 124(4):1017-1022.
- [59] ZHANG X, WU J, XU C, et al. Inactivation of microbes on fruit surfaces using photodynamic therapy and its influence on the postharvest shelf-life of fruits[J]. **Food Science and Technology International**, 2020, 26(8):696-705.
- [60] TORTIK N, SPAETH A, PLAETZER K. Photodynamic decontamination of foodstuff from *Staphylococcus aureus* based on novel formulations of curcumin[J]. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 2014, 13(10):1402-1409.
- [61] GLUECK M, SCHAMBERGER B, ECKL P, et al. New horizons in microbiological food safety: photodynamic decontamination based on a curcumin derivative[J]. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 2017, 16(12):1784-1791.
- [62] BHAVYA M L, SHEWALE S R, RAJORIYA D, et al. Impact of blue LED illumination and natural photosensitizer on bacterial pathogens, enzyme activity and quality attributes of fresh-cut pineapple slices[J]. **Food and Bioprocess Technology**, 2021, 14(2):362-372.
- [63] SRIMAGAL A, RAMESH T, SAHU J K. Effect of light emitting diode treatment on inactivation of *Escherichia coli* in milk[J]. **LWT – Food Science and Technology**, 2016, 71:378-385.
- [64] SANTOS D R F, CAMPOS B S, REGO F F, et al. Photodynamic inactivation of *S. aureus* with a water-soluble curcumin salt and an application to cheese decontamination[J]. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 2019, 18(11):2707-2716.
- [65] HYUN J E, LEE S Y. Antibacterial effect and mechanisms of action of 460–470 nm light-emitting diode against *Listeria monocytogenes* and *Pseudomonas fluorescens* on the surface of packaged sliced cheese[J]. **Food Microbiology**, 2020, 86:1-7.
- [66] GAO J W, MATTHEWS K R. Effects of the photosensitizer curcumin in inactivating foodborne pathogens on chicken skin[J]. **Food Control**, 2020, 109:1-7.
- [67] MOTTS S D, GUFFEY J S, PAYNE W C, et al. The use of 405 nm and 464 nm blue light to inhibit *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat (RTE) meat[J]. **European Journal of Academic Essays**, 2016, 3(1):76-80.
- [68] GUFFEY J S, PAYNE W C, MOTTS S D, et al. Inactivation of *Salmonella* on tainted foods; using blue light to disinfect cucumbers and processed meat products[J]. **Food Science & Nutrition**, 2016, 4(6):878-887.