

# 光动力技术研究进展及其在食品工业中的应用前景

郑宝东<sup>1,2,3</sup>, 林少玲<sup>1,2,3</sup>, 曾绍校<sup>1,2,3</sup>, 胡嘉森<sup>1,2,3</sup>, 赖丹宁<sup>2</sup>

(1. 闽台特色海洋食品加工及营养健康教育部工程研究中心, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 食品科学学院, 福建 福州 350002; 3. 福建省特种淀粉品质科学与加工技术重点实验室 福建 福州 350002)

**摘要:** 食品安全已成为全球关注的热点问题, 由各种食源性致病菌引起的食品安全事故屡有发生。因此, 开发更加安全高效的杀菌方法, 一直以来是食品工业的研发热点之一。光动力技术作为一种新型非热杀菌技术, 因其操作简便、杀菌效果优异、安全可靠、绿色环保、成本低等特点而受到多领域学者的广泛关注。本文概述了光动力技术的作用机理, 总结了光敏剂及光动力技术应用的研究进展, 重点阐述了光动力技术在食品工业中的应用进展和发展前景, 可为进一步开发及优化光动力技术应用于食品工业提供借鉴和参考。

**关键词:** 光动力技术; 光敏剂; 食源性致病菌; 食品安全

中图分类号: TS 201 文章编号: 1673-1689(2020)05-0006-10 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.05.002

## Photodynamic Technology and Its Application in Food Industry

ZHENG Baodong<sup>1,2,3</sup>, LIN Shaoling<sup>1,2,3</sup>, ZENG Shaoxiao<sup>1,2,3</sup>, HU Jiamiao<sup>1,2,3</sup>, LAI Danning<sup>2</sup>

(1. Engineering Research Centre of Fujian-Taiwan Special Marine Food Processing and Nutrition, Ministry of Education, Fuzhou 350002, China; 2. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Quality Science and Processing Technology in Special Starch, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Food safety has become a global concern. Food incidents caused by various foodborne pathogenic bacteria occur frequently. Therefore, the development of safer and more efficient sterilization methods have always been a research focus in food industry. As a novel non-thermal sterilization method, photodynamic technology has attracted much attention due to its great advantages including easy to operate, excellent sterilization effect, safety and reliability, environmental friendliness, and low cost. This review summarizes the mechanism and research progress of photodynamic technology, the development of photosensitizer, and the application of photodynamic technology in food industry, which aims to provide reference for enlargement of the application range of photodynamic technology in food industry.

**Keywords:** photodynamic technology, photosensitizer, foodborne pathogens, food safety

收稿日期: 2020-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801649)。

作者简介: 郑宝东(1967—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事食品加工方面的研究。E-mail: zbdfst@163.com

食品安全问题已成为当今社会不容忽视的问题<sup>[1]</sup>,食源性致病菌是造成食品安全隐患的重要因素之一。目前,食品行业中主要的杀菌手段可分为热力杀菌及非热力杀菌技术。热力杀菌技术历史悠久、应用广泛、技术成熟、杀菌力强,且能广谱杀菌,但能耗高,同时常造成食品原有的营养风味的流失。新型非热杀菌技术如抗生素、超高压、辐照、脉冲光、脉冲电场等也不断涌现<sup>[2-3]</sup>,但抗生素滥用导致细菌耐药性已使抗生素灭菌技术逐渐被淘汰<sup>[4]</sup>,而超高压、辐照、脉冲电场等非热力杀菌技术多存在设备价格不菲、冷链运输要求较高、能耗大等缺陷<sup>[5]</sup>。光动力杀菌技术作为新型非热杀菌技术中的一员,因其所具有的安全、高效、低耗等多种优点,已成为食品工业创新杀菌工艺的新手段。本文旨在综述光动力技术的研究进展及其在食品工业中的应用前景,为将光动力技术更好地应用于食品工业提供参考。

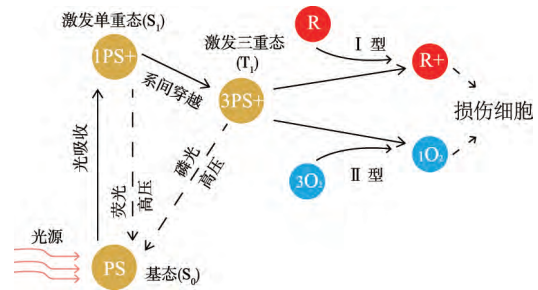
## 1 光动力技术简介

光动力技术(Photodynamic technology, PDT)作为一种非热杀菌技术,主要原理为光敏剂(Photosensitizer, PS)被一定波长的光源所激发后,可产生活性氧分子(ROS)或活跃的单重态氧( $^1O_2$ ),进而通过氧化作用破坏核酸、蛋白质及脂质等生物分子,从而灭活微生物或细胞<sup>[6]</sup>。光敏剂具有组织选择性,能使PDT在有效杀灭微生物的同时不损伤邻近的正常细胞或组织<sup>[7]</sup>。相比于热杀菌方法和其他的非热力杀菌技术,PDT拥有如下优点<sup>[8]</sup>:1)细胞毒性较低;2)具有选择性,精准度较高;3)能耗低;4)灭菌速度快;5)PDT可以单独与其他杀菌手段相结合,如声动力<sup>[9]</sup>等。

## 2 光动力技术作用机理研究进展

目前,对光动力技术作用机理的研究揭示光动力作用可分为两种类型,见图1。首先基态( $S_0$ )光敏剂被激发后可跃迁至激发单重态( $S_1$ ),并通过系间穿越至激发三重态( $T_1$ )<sup>[7]</sup>。之后 $T_1$ 状态下的光敏剂可通过I型反应产生ROS,通过与细胞膜上的磷脂分子发生作用,破坏细胞结构而杀死细胞;或通过II型反应向三重态氧( $^3O_2$ )传递能量,产生极活泼的单重态氧( $^1O_2$ )<sup>[10]</sup>。 $^1O_2$ 则能通过氧化损伤破坏蛋白质、核酸等生物大分子,从而最终达到灭活靶细胞

的效果<sup>[11-12]</sup>。此外 $^1O_2$ 还可与不饱和脂质和DNA核苷反应,生成高活性的氢氧化物和内过氧化物,直接损伤靶细胞的DNA<sup>[13]</sup>。值得注意的是,I型和II型过程是同时进行的<sup>[14]</sup>,但大部分光敏剂需要在有氧条件下才能发挥光动力灭活作用,易发生I型反应。



$S_0$ :基态光敏剂分子; $^1PS^+$ :激发单重态光敏剂分子; $^3PS^+$ :激发三重态光敏剂分子; $R$ :有机分子; $R^+$ :自由基或离子; $^3O_2$ :三重态氧; $^1O_2$ :单重态氧。

图1 光动力技术作用机理

Fig. 1 Mechanisms of photodynamic Technology

## 3 光敏剂的概述

光敏剂(Photosensitizer, PS)是光动力技术的核心要素<sup>[15]</sup>。理想的PS应具备以下优点<sup>[11]</sup>:1)性质稳定,纯度高;2)光化作用高效,激发后能产生大量ROS或 $^1O_2$ ;3)来源安全,毒性低,能被细胞代谢排出;4)具有靶向性;5)在可见光区有较强的吸收。

主流的PS有以下7类,见表1。传统意义上PS主要应用在医学领域,而随着PDT技术在食品工业中的应用不断得到重视,筛选或开发更加适用于食品领域应用的PS已成为该领域研究热点之一。适合食品领域所使用的PS除应具备以上要求外,还应对食品的外观、成分、风味、味道不造成或少造成影响<sup>[13]</sup>。而天然光敏剂来源可靠、毒副作用低、光作用效率高等特点,已成为用于食品杀菌领域最具有潜力的光敏剂<sup>[6]</sup>。

### 3.1 天然光敏剂的开发

当前,国内外研究主要关注的天然光敏剂包含4大类<sup>[25]</sup>,见表2。其中,姜黄素(Curcumin)作为一种已被批准的食品添加剂,具有原料来源广、安全经济的优点,并被证实具有抗癌<sup>[26]</sup>、抗氧化<sup>[27]</sup>、消炎<sup>[28]</sup>、抑菌<sup>[29]</sup>等功效。国内外学者对姜黄素-PDT应用于杀灭食源性微生物进行了广泛研究,如Jiang S等<sup>[30]</sup>发

表 1 光敏剂分类

Table 1 Classification of photosensitizers

种类	典型光敏剂	激发波长/nm	典型抗菌种类	参考文献
卟啉类化合物	ALA(5-氨基酮戊酸)	400~500	广谱抗菌	[16]
细菌叶绿素衍生物	叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 c、叶绿素 d	700~900	广谱抗菌	[17-18]
酞菁及其衍生物	酞菁硅、酞菁锌	670~780	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌	[19-20]
天然光敏剂及衍生物	姜黄素类	400~475	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、变形链球菌	[21]
亚甲基蓝和吩噻嗪类化合物	亚甲基蓝、甲苯胺蓝	550~700	念珠菌、葡萄球菌	[22]
其他合成染料光敏剂	四碘荧光素	430~530	酵母菌、念珠菌、变异链球菌	[23]
新型纳米光敏剂	富勒烯	700	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、真菌	[24]

表 2 天然光敏剂分类表

Table 2 Classification of natural photosensitizers

类型	典型光敏剂	吸收波长/nm	单线态氧产率( $\Phi$ )	参考文献
姜黄素类	姜黄素	400~475	0.1	[21]
核黄素类	核黄素	220~450	0.54	[33-35]
三联噻吩	$\alpha$ -三噻吩万寿菊(万寿菊属)	355~460	0.86	[36]
醌类化合物	金丝桃素	550~600	0.43~0.73	[37]

现,在 470 nm 蓝光照射下,姜黄素-PDT 能暴露金黄色葡萄球菌的作用位点,破坏其生物膜实现灭菌的目的。作者所在研究团队<sup>[31]</sup>发现姜黄素-PDT 联合 EDTA 能明显降低洋葱伯克霍尔德氏菌的存活率。Corrêa T Q 等<sup>[32]</sup>研究发现,姜黄素-PDT 能降低牛肉、鸡肉等食品表面大肠杆菌和金黄色葡萄球菌污染程度。

### 3.2 光敏剂的改造、修饰研究进展

天然光敏剂化学稳定性及水溶性较差,在光动力作用过程中易产生荧光猝灭现象、二聚氧化等副反应,影响对靶细胞的灭活效果<sup>[38]</sup>。为解决这一问题,国内外学者开展了一系列的改造与修饰 PS 的研究,主要包括以下几种途径:

**3.2.1 光敏剂-纳米化** 纳米化改造主要是通过改变 PS 的大小以增加其表面积,同时提高其靶向性、水溶性、比表面积等,减少副反应发生,增加 PS 的生物利用率<sup>[39]</sup>。目前主要存在 6 种新型光敏剂纳米化改造方式:富勒烯类化合物、碳纳米管、石墨烯衍生物、脂质体、二氧化钛化合物和金属纳米粒子。

**3.2.2 光敏剂-多肽修饰** 多肽相对分子质量较小,生物活性高,易于修饰和规模化制备,PS 的多肽修饰通过对光敏剂进行靶向多肽修饰或带正电荷多肽修饰,从而提高 PDT 的攻击精准度,减少对正常细胞的损伤<sup>[40]</sup>或增强对革兰氏阴性菌的抑制作用<sup>[6]</sup>。如光敏剂曙红 Y 通过与带有正电荷的抗菌肽

(AMPs) 结合,能在极低浓度下钝化 99.999% 的细菌<sup>[41]</sup>,极为显著增强曙红 Y 对细菌的杀伤效果。

**3.2.3 光敏剂-糖基与糖肽修饰** 部分糖基能在一些细胞表面特异性表达,将 PS 与目标细胞受体的特定糖基结合,不仅能提高 PS 的靶向性,还能增大其杀伤力。蔡颖<sup>[42]</sup>发现用 D-甘露糖分子共轭修饰的光敏剂纳米粒子能在 665 nm LED 光照的条件下,产生大量  $^1\text{O}_2$ ,显著增强靶向 PDT 作用效果。将糖基与 PS 结合,能改善 PS 的生物相容性,但糖基与 PS 结合不紧密,易脱落,而将糖肽与 PS 结合能在一定程度上解决这一问题,Sol V 等<sup>[43]</sup>制备的葡萄糖-丙酰氨基卟啉能更有效地杀伤白血病细胞 K562,并且能延长药效。

## 4 光源的概述

光源是 PDT 的 3 个重要条件之一。光源的选择需要考虑如下因素<sup>[15,44]</sup>:1)与光敏剂的吸收光谱相适应;2)有适当的输出功率;3)具有一定的穿透性;4)光照区域边界灵敏;5)光谱范围界定明显;6)工作性能稳定。应用于 PDT 的光源主要包含相干光源和非相干光源,见表 3。

相干光源波长单一,光强度分布较为均匀;相较于非相干光源,其有更好的方向性、相干性,而且激光在组织中的穿透深度能随波长增加而增加,但激光发射器也存在或多或少的缺点,如氩离子激光

表3 光源分类表

Table 3 Classification of light source

光源类型	典型光源	波长/nm	优点	参考文献
相干光源(激光)	氩离子激光器	630	可调谐输出、分束后仍具有有效输出功率	[45-46]
	金属蒸汽激光器	627.8	体积小、可移动、不需控电或控冷装置	[45]
	He-Ne 激光器	630	成本低、寿命长、使用方便	[47]
	Nd:YAG 激光器	1 064	输出高频率窄脉宽激光、脉冲辐射功率较高	[46-48]
	半导体激光器(LD)	-	体积小、操作方便、供能方式简单	[48-50]
非相干光源	白炽灯	-	光谱分布广	[48]
	LED(发光二极管)	5~10	光功率输出高、光照均匀、光斑面积大	[50]

器不稳定,易受温度影响<sup>[45]</sup>;金属蒸汽激光器成本高,所需预热和冷却时间较长<sup>[47]</sup>。当前,LED被认为是一种极具开发潜力的可用于 PDT 的新型绿色光源,其具有发光效率高、通用性好、发射波长范围广(约为 250~7 000 nm)<sup>[13]</sup>、安全性高、寿命长、能耗低等优点,且其光照强度、光照时间能精确控制,广泛应用于皮肤病、口腔疾病等疾病的光动力治疗<sup>[50]</sup>。此外,各种新型光源在 PDT 中也有很大的应用前景,如有机发光二极管(OLED)具有质量轻、自发光的优点<sup>[51]</sup>;超辐射发光二极管(sLED)具有光谱宽、功率大、效率高的特点<sup>[52]</sup>。

## 5 光动力技术在食品工业中的研究现状和前景

### 5.1 光动力技术对食源性细菌、真菌、病毒的灭活作用

目前,国内外已陆续有针对光动力技术作用于食源性细菌、真菌、病毒的作用机理展开研究。如表 4 所示,PDT 对多种常见的食源性致病菌如大肠杆菌<sup>[53-61]</sup>、金黄色葡萄球菌<sup>[53,58,62-70]</sup>、李斯特菌<sup>[55,58,65,68,71-72]</sup>、沙门氏菌<sup>[55,58,65,73]</sup>、芽孢杆菌<sup>[53-54,58,63,68]</sup>等均可有效杀灭。Bonifacio D 等<sup>[72]</sup>表明姜黄素介导的光动力技术能够显著杀灭李斯特菌,且作用效果优于卟啉。Panhoca V H<sup>[74]</sup>、Paschoal M A<sup>[75]</sup>等研究发现,姜黄素-PDT 能够在一定程度上杀死变形链球菌而对其细胞膜不产生影响。此外,研究发现,PDT 对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌等耐药性菌,保持了高效灭活效果。有大量证据显示 PDT 对食品也显示了显著杀菌效果,如 Bhavya M L 等<sup>[76]</sup>发现在(462±3) nm 的 LED 照射下,姜黄素-PDT 联合超声波能使鲜榨橙汁中的金黄色葡萄球菌降低(2.35±0.16) lg(CFU/mL),使大肠杆菌减少(4.26±0.32) lg(CFU/mL)。

PDT 在适合条件下还具有杀灭真菌的潜能<sup>[77]</sup>,Luksiene Z 等<sup>[78]</sup>用血卟啉和原卟啉介导的 PDT 灭活酿酒酵母,观察到培养物中有 50%~70%酵母的生长受到抑制。Soriano P 等<sup>[79]</sup>发现亚甲基蓝-PDT 对白色念珠菌有明显的杀伤效果。Carpenter B L 等<sup>[80]</sup>研究表明,在 PDT 中使用 0.1 μmol 的光敏剂 DIMPy-BODIPY,能杀死 99.5%新型隐球菌。针对霉菌,D de Menezes Henrique 等<sup>[81]</sup>研究也发现,634 nm 的 LED 照射下,以辐照度为 9 mW/cm<sup>2</sup>,浓度为 10 μmol/L 的五环吩噻嗪化合物 S137 能使热带水果中的尖孢炭疽菌和潜育类炭疽菌的分生孢子存活率降低 5 lg(CFU/mL)。

当前,将 PDT 应用于食源性病毒的研究较少,但初步研究也表明,PDT 对病毒也起到较好的灭活作用。如针对水产品(如虾)中主要易感病毒诺如病毒(Norovirus, NV),Randazzo W 等<sup>[82]</sup>将 50 μg/mL 的姜黄素置于 37 °C 孵育 30 min 后,用 3 J/cm<sup>2</sup> 的 LED 蓝光激活,能使病毒的滴度降低约 0.73 lg(TCID<sub>50</sub>/mL)。此外,武娟<sup>[61]</sup>也报道姜黄素-PDT 能使牡蛎肠道中的诺如病毒滴度减少 1~2 lg(PFU/mL),可能是通过破坏诺如病毒的超微结构和 RNA 的完整性,进而杀灭诺如病毒。

### 5.2 光动力技术在食品保质保鲜中的应用

当前添加防腐剂、抗氧化剂、护色剂等化学添加剂是最为常用的延长食品货架期,维持食品品质、色泽、风味的手段。此外,烘烤、浸渍、烟熏等手段也常被用于保持食品的新鲜度。然而,这些传统保鲜技术常对食品风味、营养、安全带来负面影响。基于健康、环保、降低能耗等方面的考虑,运用 PDT 延长食品货架期将是今后国内外食品保质保鲜领域的研究热点。

在水产品保质保鲜方面,PDT 已取得了良好效

表 4 光动力技术的抑菌作用

Table 4 Antibacterial effect of photodynamic technology

细菌种类	光敏剂	波长/nm	温度/°C	光照总剂量	辐照强度	灭活率	参考文献
大肠杆菌 ( <i>E.Coli</i> ) O157:H7	0、1、10、100 μmol/L 的卟啉于室温孵育 10 s	500~550	室温	40 J/cm <sup>2</sup> (10 个脉冲)、 80 J/cm <sup>2</sup> (20 个脉冲)	10、20 J/cm <sup>2</sup>	7~8 lg(CFU/mL)	[53]
	150 μg/mL 血卟啉单甲醚					99.9%	[57]
	75 mg/L 血卟啉单甲醚	650	未指定		200 mW/cm <sup>2</sup>	59.3%	[54]
	150 mg/L 血卟啉单甲醚					99.9%	
	无	405	26±1	108 J/cm <sup>2</sup>	10、20、30 mW/cm <sup>2</sup>	0~5 lg(CFU/mL)	[55]
	50 μmol/L 酞菁锌化合物 2.3a、2.3b、2.3c	670	室温			99.9%	[56]
	内源性粪卟啉	405,520	4,10,25	306 J/cm <sup>2</sup> (405 nm); 3 060 J/cm <sup>2</sup> (520 nm)	(21±3) mW/cm <sup>2</sup> (405 nm); (210±33) mW/cm <sup>2</sup> (520 nm)	2~4 lg(CFU/mL) (405 nm); 1~1.5 lg(CFU/mL) (520 nm)	[58]
	0.1 mg/mL 甲苯胺蓝	660	未指定		10 mW/cm <sup>2</sup> 18 mW/cm <sup>2</sup> 50 mW/cm <sup>2</sup> 200 mW/cm <sup>2</sup>	62.5% 70.1% 79.3% 76.4%	[59]
肠出血性 大肠杆菌	24.08 mg/L 亚甲基蓝				200 mW/cm <sup>2</sup>	1.03 lg(CFU/mL)	[60]
大肠杆菌 DH5α	5 μmol/L 姜黄素	470	低温	3.6 J/cm <sup>2</sup>	60 mW/cm <sup>2</sup>	0.51 lg(CFU/mL)	[61]
	10 μmol/L 姜黄素					1.71 lg(CFU/mL)	
	20 μmol/L 姜黄素					2.50 lg(CFU/mL)	
金黄色葡萄球菌	血卟啉、叶绿酸钠	可见光	<30 °C	未指定 (照明时间:1 h)	未指定 (1 000 W)	3~5 lg(CFU/mL), 取决于 PS 种类	[63]
	50 μg/mL 血卟啉单甲醚	350~2 500			200 mW/cm <sup>2</sup>	90%以上	[64]
	5 μg/mL 血卟啉单甲醚					96.3%	
	0、1、10、100 μmol/L 的卟啉于室温孵育 10 s	500~550	室温	40 J/cm <sup>2</sup> (10 个脉冲); 80 J/cm <sup>2</sup> (20 个脉冲)	10、20 J/cm <sup>2</sup>	6~7 lg(CFU/mL)	[53]

果。赵元晖等<sup>[86]</sup>发明了一种鲟鱼的光动力保鲜方法,姜黄素-PDT 与葛根素联合使用能灭杀 98.72% 的细菌。曹斌斌等<sup>[87]</sup>将姜黄素-PDT 应用于牡蛎中微生物的杀菌灭活,杀菌率达到 90% 以上,尤其是对大肠杆菌和诺如病毒有良好的灭活效果,同时能极好地保持牡蛎感官品质,满足消费者需求。作者所在课题组<sup>[88]</sup>前期研究发现,姜黄素-PDT 不仅能抑制海蜇中的细菌生长,同时还能降低其 TVB-N 值、铝残留物含量,维持其质地、营养成分和感官品质。

PDT 还被广泛证实可用于鲜切水果的保鲜。研究表明,PDT 能在储藏初期增强鲜切苹果抗氧化能

力,较好维持鲜切苹果的营养<sup>[89]</sup>,利用电子鼻对比鲜切苹果贮藏前后的香气变化,发现 PDT 对鲜切苹果气味影响小,而且能良好保持其可溶性糖分含量<sup>[90]</sup>。本课题组前期<sup>[91]</sup>研究也证实浓度为 50 μmol/L 的姜黄素-PDT 处理鲜切哈密瓜 60 min,能使其细菌总数减少约 1.8 lg(CFU/g),并较好的维持可溶性固形物含量、色泽、硬度、含水量及感官品质。

PDT 在肉禽制品保鲜领域也崭露头角。叶绿素镁钠盐是一种天然叶绿素或叶绿素衍生物,已被批准可作为食品着色剂使用<sup>[92]</sup>。研究表明,加入适量叶绿素镁钠盐可有效延长冷链销售的盐水鸡货架期

约一周<sup>[93]</sup>,这是由于叶绿素镁钠盐能够被激活产生光动力作用,破坏微生物的细胞结构,起到抗菌保鲜的效果。

### 5.3 光动力技术在食品包装的应用

PS 结合传统的包装材料制备具有杀菌活性的复合包装薄膜已经受到人们广泛关注<sup>[94]</sup>。张权<sup>[95]</sup>制作了 P(MMA-co-MAA)/MMT 复合纳米纤维,可灭活 99.9% 以上的金黄色葡萄球菌和大肠杆菌,并可循环多次使用保持其抗菌效率。除了抗菌包装,可快速降解包装也得到学者的关注,张妍等<sup>[96]</sup>在 PVC 中加入橙黄 制出可光降解固相复合膜,在 300 W 汞灯照射下,橙黄 能加速 PVC 的降解,此项发明为减少食品包装废料作出了一定贡献。

### 5.4 光动力技术在水体消毒的应用

PDT 还被证实可用于水体消毒。Bonnett R 等<sup>[97]</sup>构建了新型 ZnPcS/壳聚糖膜,其介导的 PDT 能有效降低水流中的微生物水平。Kuznetsova N A 等<sup>[98]</sup>合成了一种新型非均相光敏剂,实验表明,硅胶结合酞菁在光激发下能有效灭活大肠杆菌,可用于水的

净化消毒。刘一鸣等<sup>[99]</sup>测评了姜黄素-PDT 对海水、桶装水、矿泉水的消毒效果,发现此技术能将水体中的细菌总数降低至标准要求,而且不产生副产物。

## 6 展望

光动力技术作为一种新型杀菌技术,具有安全环保、操作简便、耗能低等优点,其在食品杀菌方面展现难以媲美的优势和潜力,将其应用于食品保鲜、食品包装、水消毒等方面能有效控制食品微生物,但由于食品复杂多样,光动力技术在食品工业中的应用仍需进一步探索。我们还需要筛选更多有效天然光敏剂或者对已有光敏剂进行结构改造、修饰,或者联合其他杀菌技术,寻找并攻克限制光动力技术发展的因素,如食品几何结构和表面性质等;此外,还必须致力于研究光动力技术对食品理化特性、结构特性和营养特性等的影响,提高光动力杀菌功效,减少因食源性疾病引起的食品安全事故,增加光动力技术在食品工业中的创新与应用。

## 参考文献:

- [1] 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, 7(18): 33-34.
- [2] 汪蓉. 基于新型二维材料的食源性致病菌光动力学杀灭控制机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [3] LI X, FARID M M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies[J]. **Journal of Food Engineering**, 2016, 182(14): 33-35.
- [4] 陈执中, 姜宁. 新型“超级细菌”及抗菌新药的筛选[J]. 食品与药品, 2010, 12(11): 439-441.
- [5] 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, (12): 22-23.
- [6] 杨晨. 光动力灭菌技术研究及灭菌仪开发[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [7] KWIATKOWSKI S, KNAP B, PRZYSTUPSKI D, et al. Photodynamic therapy-mechanisms, photosensitizers and combinations [J]. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, 2018, 106(10): 1098-1107.
- [8] ALVES E, FAUSTINO M A, NEVES M G, et al. Potential applications of porphyrins in photodynamic inactivation beyond the medical scope[J]. **Journal of Photochemistry & Photobiology, C: Photochemistry Reviews**, 2015, 22: 34-57.
- [9] 邱建清, 李世洋, 叶倩文, 等. 非热力声动力技术在杀菌领域的研究进展[EB/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200302.1536.020.html>, 2020-03-25.
- [10] DEROSA M C, CRUTCHLEY R J. Photosensitized singlet oxygen and its applications[J]. **Coordination Chemistry Reviews**, 2002, 233-234: 351-371.
- [11] SHARMA S K, MROZ P, DAI T, et al. Photodynamic therapy for cancer and for infections: what is the difference[J]. **Israel Journal of Chemistry**, 2012, 52(8-9): 691-705.
- [12] MANG T S, TAYAL D P, BAIER R E, et al. Photodynamic therapy as an alternative treatment for disinfection of bacteria in oral

- biofilms[J]. **Lasers in Surgery and Medicine**, 2012, 44(7): 588-596.
- [13] LUKSIENE Z, BROVKO L Y. Antibacterial photosensitization-based treatment for food safety[J]. **Food Engineering Reviews**, 2013, 5(4): 185-199.
- [14] ETHIRAJAN M, CHEN Y, JOSHI P, et al. The role of porphyrin chemistry in tumor imaging and photodynamic therapy[J]. **Chemical Society Reviews**, 2011, 40(1): 340-362.
- [15] 林少玲, 黄晨楹, 朱子瑶, 等. 非热力光动力灭菌技术在食品安全中的研究进展[J]. **中国食品学报**, 2018, 18(07): 323-331.
- [16] 张全权. 功能性卟啉化合物的合成及其性能研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [17] 王梦亮, 常如波, 刘滇生. 金属细菌叶绿素的合成及其对肿瘤细胞的抑制作用[J]. **药理学报**, 2005, 40(10): 920-923.
- [18] SCHASTAK S, ZIGANSHYNA S, GITTER B, et al. Efficient photodynamic therapy against gram-positive and gram-negative bacteria using THPTS, a cationic photosensitizer excited by infrared wavelength[J]. **Plos One**, 2010, 5(7): e11674.
- [19] GIULIANI F, MARTINELLI M, COCCHI A, et al. In vitro resistance selection studies of RLP068/Cl, a new Zn (II) phthalocyanine suitable for antimicrobial photodynamic therapy[J]. **Antimicrobial Agents and Chemotherapy**, 2010, 54(2): 637-642.
- [20] VECCHIO D, DAI T, HUANG L, et al. Antimicrobial photodynamic therapy with RLP068 kills methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and improves wound healing in a mouse model of infected skin abrasion PDT with RLP068/Cl in infected mouse skin abrasion[J]. **Journal of Biophotonics**, 2013, 6(9): 169-177.
- [21] CHIGNELL C F, BILSKJ P, RESZKA K J, et al. Spectral and photochemical properties of curcumin[J]. **Photochemistry and Photobiology**, 1994, 59(3): 259-302.
- [22] CAHAN R, SCHWARTZ R, LANGZAM Y, et al. Light-activated antibacterial surfaces comprise photosensitizers[J]. **Photochemistry and Photobiology**, 2011, 87(6): 1379-1386.
- [23] COSTA A C B P, RASTEIRO V M C, HASHIMOTO E S H D S, et al. Effect of erythrosine- and LED-mediated photodynamic therapy on buccal candidiasis infection of immunosuppressed mice and *Candida albicans* adherence to buccal epithelial cells[J]. **Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology**, 2012, 114(1): 67-74.
- [24] SPESIA M B, MILANESIO M E, DURANTINI E N. Synthesis, properties and photodynamic inactivation of *Escherichia coli* by novel cationic fullerene C60 derivatives[J]. **European Journal of Medicinal Chemistry**, 2008, 43(4): 853-861.
- [25] 周盼, 谢小燕, 熊力, 等. 抗菌光敏剂的分类及研究进展[J]. **激光生物学报**, 2017, 26(3): 193-197.
- [26] KAMEL A E, FADEL M, LOUIS D. Curcumin-loaded nanostructured lipid carriers prepared using Peceol™ and olive oil in photodynamic therapy: development and application in breast cancer cell line[J]. **International Journal of Nanomedicine**, 2019, 14: 5073-5085.
- [27] 王舒然, 陈炳卿, 王朝旭, 等. 姜黄素降血脂及抗氧化作用的研究[J]. **中国公共卫生学报**, 1999, 18(5): 263-265.
- [28] HUSSAIN Z, THU H E, AMJAD M W, et al. Exploring recent developments to improve antioxidant, anti-inflammatory and antimicrobial efficacy of curcumin: a review of new trends and future perspectives[J]. **Materials Science & Engineering C**, 2017, 77(8): 1316-1326.
- [29] 周阿容, 葛胜晗, 孔子浩, 等. 姜黄素的功能特性及其毒理学研究进展[J]. **食品研究与开发**, 2019, 40(16): 219-224.
- [30] JIANG S, ZHU R, HE X, et al. Enhanced photocytotoxicity of curcumin delivered by solid lipid nanoparticles[J]. **International Journal of Nanomedicine**, 2017, 12: 167-178.
- [31] HU J, LIN S, TAN B K, et al. Photodynamic inactivation of *Burkholderia cepacia* by curcumin in combination with EDTA[J]. **Food Research International**, 2018, 111(9): 265-271.
- [32] CORREA TQ, BLANCO KC, Garcia E B, et al. Effects of ultraviolet light and curcumin-mediated photodynamic inactivation on microbiological food safety: a study in meat and fruit[J]. **Photodiagnosis and Photodynamic Therapy**, 2020, 30(2): 101678.
- [33] 卫玉芝, 许伟, 钟涛, 等. 核黄素结合紫外光灭活血小板细菌及膜糖蛋白的变化[J]. **安徽医药**, 2011, 15(1): 80-81.
- [34] THAKURI P S, JOSHI R, BASNET S, et al. Antibacterial photodynamic therapy on *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* in-vitro[J]. **Nepal Medical College Journal: NMCJ**, 2011, 13(4): 281-284.
- [35] BAIER J, MAISCH T, MAIER M, et al. Singlet oxygen generation by UVA light exposure of endogenous photosensitizers[J]. **Biophysical Journal**, 2006, 91(4): 1452-1459.
- [36] LIN Q, TSUCHIDO T, TAKANO M, et al. Photodynamic inactivation of bacteria on immobilized  $\alpha$ -terthienyl film[J]. **Applied**

- Microbiology & Biotechnology**, 1991, 35(5): 585-590.
- [37] 肖冬梅,周倩,黄春妮,等. 金丝桃素对铜绿假单胞菌的体外光动力杀菌研究[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2018, 43(03): 1267-1276.
- [38] SPAGNUL C, TURNER L C, BOYLE R W, et al. Immobilized photosensitizers for antimicrobial applications[J]. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, 2015, 150(9): 11-30.
- [39] MASTER A M, LIVINGSTON M, GUPTA A S. Photodynamic nanomedicine in the treatment of solid tumors: perspectives and challenges[J]. **Journal of Controlled Release**, 2013, 168(1): 88-102.
- [40] 汪小又, 刘鑫龙, 李翀. 多肽 / 微型蛋白类导向分子的研究进展[J]. 药学进展, 2019, 43(10): 767-776.
- [41] JOHNSON G A, MUTHUKRISHNAN N, PELLOIS J. Photoinactivation of gram positive and gram negative bacteria with the antimicrobial peptide (KLAKLAK)(2) conjugated to the hydrophilic photosensitizer eosin Y[J]. **Bioconjugate Chemistry**, 2013, 24(1): 114-123.
- [42] 蔡颖. D- 甘露糖修饰载光敏剂纳米体系的构建及其靶向光动力治疗乳腺癌的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [43] SOL V, BLAIS J C, CARRE V, et al. Synthesis, spectroscopy, and photocytotoxicity of glycosylated amino acid porphyrin derivatives as promising molecules for cancer phototherapy[J]. **Chem Inform**, 2010, 30(37): 4431-4444.
- [44] HUANG Z, XU H, MEYERS A D, et al. Photodynamic therapy for treatment of solid tumors - potential and technical challenges [J]. **Technology in Cancer Research & Treatment**, 2008, 7(4): 309.
- [45] LEE S M, MUELLER E K, WORKEEN B C V D, et al. Improved low-power semiconductor diode lasers for photodynamic therapy in veterinary medicine[J]. **Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering**, 2001, 4244: 567-574.
- [46] MANG T S. Lasers and light sources for PDT: past, present and future[J]. **Photodiagnosis and Photodynamic Therapy**, 2004, 1(1): 43-48.
- [47] LING Y, LI G, ZHANG N, et al. High-power He-Ne laser and its application to photodynamic therapy of cancer [J]. **Japanese Journal of Applied Physics**, 2006, 45(1A): 107-110.
- [48] BRANCALEON L, MOSELEY H. Laser and non-laser light sources for photodynamic therapy [J]. **Lasers in Medical Science**, 2002, 17(3): 173-186.
- [49] LIU G, GUI C, ZHAO J. Reasonable selection of photodynamic therapeutic instrument for skin diseases [J]. **Chinese Medical Equipment Journal**, 2013, 34(1): 95-96, 115.
- [50] 胡甜甜, 吴金鹏, 阴慧娟, 等. 发光二极管光源的生物学效应及临床研究新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 19-29.
- [51] ATTILI S K, LESAR A, MCNEILL A, et al. An open pilot study of ambulatory photodynamic therapy using a wearable low-irradiance organic light-emitting diode light source in the treatment of nonmelanoma skin cancer[J]. **The British Journal of Dermatology**, 2009, 161(1): 170-173.
- [52] 段成丽, 王振. 超辐射发光二极管的研究进展[J]. 半导体光电, 2013, 34(3): 361-400.
- [53] MAISCH T, SPANNBERGER F, REGENBURGER J, et al. Fast and effective: intense pulse light photodynamic inactivation of bacteria[J]. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, 2012, 39(7): 1013-1021.
- [54] 任雅清, 唐书泽, 吴希阳, 等. 血卟啉甲醚对蜡样芽胞杆菌和大肠杆菌的光动力杀伤作用[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(07): 140-144.
- [55] MURDOCH L E, MACLEAN M, ENDARKO E, et al. Bactericidal effects of 405 nm light exposure demonstrated by inactivation of *Escherichia*, *Salmonella*, *Shigella*, *Listeria*, and *Mycobacterium* species in liquid suspensions and on exposed surfaces[J]. **The Scientific World Journal**, 2012, 12: 1-8.
- [56] 李红爱, 胡慧丹, 邓曦, 等. 应用激光共聚焦显微镜观察光动力技术对单增李斯特菌菌膜的灭活作用[J]. 食品工业科技, 2014, 35(4): 157-160.
- [57] 任雅清, 唐书泽, 吴希阳, 等. 光动力对细菌的杀伤作用研究[J]. 中国调味品, 2008, 33(6): 37-40.
- [58] KUMER 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 and Photobiology B: Biology**, 2015, 149(8): 37-44.



- [59] 严金华,杨晨,李泽林,等. 光强和光照时间对大肠杆菌光动力灭菌效果的影响[J]. 浙江工业大学学报,2017,45(1):60-63.
- [60] 唐姝姝,唐书泽,李红爱,等. 亚甲基蓝对肠出血性大肠杆菌 O157 的光动力杀菌技术研究[J]. 食品工业科技,2012,33(23):136-139,143.
- [61] 武娟. 生鲜牡蛎中大肠杆菌和诺如病毒的检测及光动力非热力杀菌相关研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2015.
- [62] CORREA T Q,BLANCO K C,GARCIA E B, et al. Effects of ultraviolet light and curcumin-mediated photodynamic inactivation on microbiological food safety: A study in meat and fruit[J]. **Photodiagnosis and Photodynamic Therapy**, 2020,30(2):1-7.
- [63] KREITNER M,WAGNER K H,ALTH G, et al. Haematoporphyrin- and sodium chlorophyllin-induced phototoxicity towards bacteria and yeasts-A new approach for safe foods[J]. **Food Control**,2001,12(8):529-533.
- [64] 金花,赵宏霞,任雅清,等. 原子力显微镜观测血卟啉单甲醚对细菌光动力杀伤作用[J]. 微生物学报,2008,48(10):1378-1382.
- [65] 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.
- [66] 邢丽梅,邱海霞,周少娜,等. 新型亚苾基环烷戊酮化合物介导的光动力对铜绿假单胞菌的体外杀伤效应[J]. 中国激光医学杂志,2018,27(2):78.
- [67] 张岩. 水溶性酞菁光敏剂的合成及光动力抑菌研究[D]. 济南:山东大学,2014.
- [68] KIM M J. Antibacterial effect and mechanism of high-intensity 405nm light emitting diode on *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes*, and *Staphylococcus aureus* under refrigerated condition[J]. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, 2015,153(12):33-39.
- [69] 叶祖林,王颖,郑美玲,等. 新型亚苾基环烷酮类光敏剂介导的光动力疗法对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌生物被膜的破坏作用[J]. 中国激光医学杂志,2016,25(01):2-7,53-54.
- [70] 丁涛. 姜黄素光动力疗法对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌及其生物膜作用的体外研究[D]. 青岛:青岛大学,2019.
- [71] BUCHOVEC I,PASKEVICIUTE E,LUKSIENE Z. Photodynamic inactivation of food pathogen *Listeria monocytogenes*[J]. **Food Technology and Biotechnology**,2010,48(2):207-213.
- [72] BONIFACIO D,MARTINS C,DAVID B, et al. Photodynamic inactivation of *Listeria innocua* biofilms with food-grade photosensitizers: a curcumin-rich extract of *Curcuma longa* vs commercial curcumin[J]. **Journal of Applied Microbiology**,2018,125(1):282-294.
- [73] BUCHOVEC I,VAITONIS Z,LUKSIENE Z. Novel approach to control *Salmonella enterica* by modern biophotonic technology: photosensitization[J]. **Journal of Applied Microbiology**,2009,106(3):748-754.
- [74] PANHOCA V H,FLOREZ F L,JUNIOR N B, et al. Evaluation of antimicrobial photodynamic therapy against *Streptococcus mutans* biofilm in situ[J]. **The Journal of Contemporary Dental Practice**,2016,17(3):184-191.
- [75] PASCHOAL M A,LIN M,SANTOSPINTO L A, et al. Photodynamic antimicrobial chemotherapy on *Streptococcus mutans* using curcumin and toluidine blue activated by a novel LED device[J]. **Lasers in Medical Science**,2015,30(2):885-890.
- [76] BHAVYA M L,HEBBAR H U. Sono-photodynamic inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in orange juice [J]. **Ultrasonics Sonochemistry**,2019,57(8):108-115.
- [77] PRATES R A,SILVA E G,YAMADA A M, et al. Light parameters influence cell viability in antifungal photodynamic therapy in a fluence and rate fluence-dependent manner[J]. **Laser Physics**,2009,19(5):1038-1044.
- [78] LUKSIENE Z,PECIULYTE D,LUGAUSKAS A. Inactivation of fungi in vitro by photosensitization: preliminary results [J]. **Annals of Agricultural and Environmental Medicine: AAEM**,2004,11(2):215.
- [79] SORIALOZANO P,GILABERTE Y,PAZCRISTOBAL M P, et al. In vitro effect photodynamic therapy with different photosensitizers on cariogenic microorganisms[J]. **BMC Microbiology**,2015,15(1):187.
- [80] CARPENTER B L,SITU X,SCHOLLE F, et al. Antiviral, antifungal and antibacterial activities of a BODIPY-based photosensitizer[J]. **Molecules**,2015,20(6):10604-10621.
- [81] DE MENEZES H D,RODRIGUES G B,TEIXEIRA S D P, et al. In vitro photodynamic inactivation of plant-pathogenic fungi *Colletotrichum acutatum* and *Colletotrichum gloeosporioides* with novel phenothiazinium photosensitizers[J]. **Applied and Environmental Microbiology**,2014,80(5):1623-1632.
- [82] RANDAZZO W,AZNAR R,SANCHEZ G, et al. Curcumin-mediated photodynamic inactivation of norovirus surrogates[J]. **Food and Environmental Virology**,2016,8(4):244-250.

- [83] 吴苏敏,王颖,顾瑛. 光动力对铜绿假单胞菌 PAO1 浮游菌与生物被膜的体外清除作用[J]. 中国激光医学杂志,2014,23(2):59-63,112.
- [84] 王钰铖. 甲苯胺蓝介导的光动力疗法对多重耐药铜绿假单胞菌的杀伤作用[J]. 中国激光医学杂志,2014,23(03):172-173.
- [85] 吴谦. 副溶血弧菌生物菌膜形成特性及亚甲基蓝光动力灭活作用研究[D]. 广州:暨南大学,2016.
- [86] 赵元晖,宫臣,高瑞昌,等. 一种鲟鱼光动力冷杀菌保鲜方法[P]. 中国专利:CN110150372A,2019-08-23.
- [87] 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.
- [88] 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*,2019,115:119685.
- [89] 张芳,陶然,孟祥红. 光动力处理对鲜切苹果贮藏品质的影响[A]. 中国食品科学技术学会第十五届年会论文摘要集[C]. 北京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社,2018.
- [90] 陶然,张芳,张俊楠,等. 无损检测光动力杀菌鲜切苹果气味及糖度[J]. 食品安全质量检测学报,2018,9(12):3111-3114.
- [91] 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.
- [92] 王小情,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,2013,29(3):463-466+478.
- [93] 王小情. 冷链销售盐水鸡产品微生物控制技术研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2013.
- [94] BYUN Y,KIM Y,WHITESIDE S,et al. Characterization of an antioxidant polylactic acid (PLA) film prepared with  $\alpha$ -tocopherol, BHT and polyethylene glycol using film cast extruder[J]. *Journal of Food Engineering*,2010,100(2):239-244.
- [95] 张权. 光动力抗菌型 P(MMA-co-MAA)/MMT 电纺纳米纤维的制备及表征[D]. 无锡:江南大学,2018.
- [96] 张妍,吴迪,李晨,等. 橙黄 做光敏剂掺杂 PVC 制备可光降解塑料研究[A]. 2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷)[C]. 北京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社,2019.
- [97] BONNETT R,KRYSTEVA M A,LALOV I G,et al. Water disinfection using photosensitizers immobilized on chitosan[J]. *Water Research*,2006,40(6):1269-1275.
- [98] KUZNETSOVA N A,YUZHAKOVA O A,STRAKHOVSKAYA M G,et al. New heterogeneous photosensitizers with phthalocyanine molecules covalently linked to aminopropyl silica gel[J]. *Journal of Porphyrins and Phthalocyanines*,2011,15(7-8):718-726.
- [99] 刘一鸣,武娟,许川山,等. 基于光动力的饮用水消毒方法[P]. 中国专利:CN103991920A,2014-08-20.

## 会 议 消 息

会议名称:第二届果蔬类功能食品开发及产业发展大会暨新技术、新产品展览会

时间:2020年7月24-26日 地点:山东省济南市

主办单位:中华全国供销合作总社济南果品研究院(CTCF),中国果蔬贮藏加工技术研究中心

会议报名:<http://www.foodmate.net/hyhy/778/fy.html>

会议内容:1. 成立“果蔬功能性食品产业技术创新联盟”;2. 果蔬类功能食品产业政策、市场环境及发展趋势;3. 果蔬营养与人体健康;4. 食品安全标准、品质控制、检测技术;5. 果蔬天然活性物质分离纯化技术及应用;6. 果蔬功能食品开发与创新;7. 果蔬功能食品原料、配料开发与应用;8. 果蔬益生菌及微生物技术与应用;9. 果蔬加工副产物资源综合利用;10. 果蔬加工技术专题:贮藏、保鲜、杀菌、干燥、清洗、筛选、压榨、冷链物流、包装等新工艺、新装备应用;11. 新技术、新产品展览展示,新品发布。

会议形式:特邀报告、专题论坛、展览展示

联系人:张杨

电话:13552626928(微信)

邮箱:739692322@qq.com