DOI:10.12441/spyswjs.20250401003 [文章编号] 1673-1689(2025)09-0001-11

天然色素介导的光动力抗菌机制及其在食品中的应用

赵 磊[1,2] 蒋文莉[1] 沈青山[2] 课净璇[2] 马艳莉[2] 张璨方[2]

(1. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院,河南 郑州 450001; 2. 南阳理工学院河南省张仲景方药与免疫调节重点实验室,河南 南阳 473004)

摘要: 光动力抗菌技术(photodynamic antimicrobial technology,PDT)作为一种非热物理杀菌手段,凭借其高效、低残留且不诱导耐药性等优势得到广泛关注。天然色素作为食品级光敏剂,展现出良好的光学响应性与生物相容性。姜黄素、叶绿素及卟啉类天然色素在果蔬、肉类和饮用水等多种食品体系中均表现出良好的光动力抗菌效果。作者综述了典型天然色素的光动力抗菌机制,分析了光源参数、光敏剂浓度、食品基质等因素对光动力抗菌效果的影响,系统梳理了PDT在果蔬表面消毒、饮用水消毒、智能包装等领域的研究进展,重点探讨了纳米载体与复合膜材料在提升光动力抗菌效率方面的作用。最后,展望了天然色素介导的PDT在食品加工中的产业化应用潜力,指出其在光敏剂稳定性、工艺标准化等方面仍面临的挑战,并提出未来应围绕协同抗菌机制解析与功能材料构建等方向进行研究。

关键词: 光动力抗菌技术;天然色素;食品安全;协同抗菌;智能包装

Natural Pigment-mediated Photodynamic Antimicrobial Technology: Mechanisms and Food Applications

ZHAO Lei[1,2] *JIANG Wenli*[1] *SHEN Qingshan*[2] *KE Jingxuan*[2] *MA Yanli*[2] *ZHANG Lifang*[2]

(1. School of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Key Laboratory of Zhang Zhongjing Formulae and Herbs for Immunoregulation, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: Photodynamic antimicrobial technology (PDT), as a non-thermal physical bactericidal method, has received increasing attention due to its high efficiency, low residue, and lack of resistance induction. Natural pigments, as food-grade photosensitizers exhibit excellent optical responsiveness and biocompatibility. Studies have shown that curcumin, chlorophylls, and porphyrin-based pigments exhibit favorable photodynamic antimicrobial efficacy in various food matrices including fruits, vegetables, meat, and drinking water. The author summarizes the photodynamic antimicrobial mechanisms of representative natural pigments, and analyzes the effects of light parameters, photosensitizer concentrations, and food matrices on photodynamic antimicrobial efficacy. Furthermore, the recent progress of PDT applications in fruit and vegetable surface disinfection, drinking water sterilization, and smart packaging is reviewed, with a focus on the role of nanocarriers and composite films in enhancing photodynamic antimicrobial performance. Finally, the industrial application

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(32302173);河南省高等学校重点科研项目(23B550008);河南省联合基金项目(242103810007);南阳市基础科学项目(23JCQY041);第五批全国中医临床优秀人才研修项目(国中医药人教函[2022]239号)。

通信作者: 赵磊(1992—),男,博士,讲师,硕士研究生导师,主要从事功能性色素与食品防腐研究。E-mai:zhaoleibvrc@163.com

收稿日期: 2025-04-01 **修回日期:** 2025-05-29

potential of natural pigment-mediated PDT in food processing is discussed, along with the challenges regarding photosensitizer stability and process standardization. Future research directions are proposed, emphasizing synergistic antimicrobial mechanisms and the development of functional materials for practical implementation.

Keywords: photodynamic antimicrobial technology; natural pigment; food safety; synergistic antibacterial strategy; smart packaging

食品安全问题日益严峻，病原微生物污染是引发食品腐败变质及食品安全事件的重要因素之一[1]。传统食品防腐技术主要依赖化学防腐剂和抗生素，但长期使用易诱导细菌耐药性，存在潜在风险，因此亟需开发绿色防腐技术[2]。基于此，开发安全、高效、环保的食品抗菌技术已成为食品安全领域的研究热点。

PDT是一种新型的非热物理抗菌技术，其核心原理是利用光敏剂在特定波长光照的激发下产生活性氧（reactive oxygen species，ROS），进而破坏细菌结构导致其失活[3]。相较于传统抗菌手段，PDT具有广谱抗菌、无耐药性风险、无残留污染等优势，近年来在医疗、环境治理及食品安全等领域受到广泛关注。

在食品安全领域，PDT的研究主要聚焦于提升抗菌效果、优化光敏剂性能及拓展应用场景，近年来取得了以下几个方面的突破。第一，增强抗菌效果。PDT在果蔬、肉类、乳制品等食品中的应用已展现出显著抗菌效果。如姜黄素介导的PDT（姜黄素-PDT）可有效降低果蔬表面的微生物污染水平[4]；在肉制品中，PDT处理能抑制金黄色葡萄球菌和李斯特菌[5]的生长，延长食品货架期；此外，PDT还可用于乳制品和饮料的抗菌保鲜，减少化学防腐剂的使用[6-7]。第二，优化光敏剂性能。天然色素虽具有来源广泛、生物安全性高等优势，但在实际应用中存在光敏活性低、光稳定性差等问题[8]。为此，研究者开发了纳米包裹技术、复合光敏剂体系及光催化增强技术等，以提升天然色素的光动力抗菌效果[9-11]。第三，拓展应用场景。随着光源技术的发展（如LED光源的普及和便携式光照装置的开发），PDT在食品安全领域的应用前景更加广阔。如研究者将PDT活性分子与智能传感系统相结合，通过激光照射复合膜产生光热效果，从而实现靶向灭菌[12]。

光敏剂是PDT的核心组成部分，选择适宜的光敏剂对提升光动力抗菌效率至关重要。相较于合成光敏剂，天然色素具有来源广泛、能高效产生ROS等优势，是理想的食品级光敏剂。近年来，天然色素在PDT领域的研究不断深入，主要集中在姜黄素[13]、叶绿素[14-15]、卟啉类化合物[16-17]等天然色素的应用开发。

综上所述，PDT作为一种新型食品安全保障技术，近年来取得了诸多研究成果，尤其是在光敏剂优化、纳米载体联用及智能包装应用等方面展现出巨大应用潜力。

1 天然色素的光动力抗菌机制

1.1 光动力抗菌的基本原理及机制

PDT是一种基于光敏剂、特定波长光照与氧气相互作用的非热杀菌技术。其核心作用机制是光敏剂在光照激发下产生ROS，这些ROS可氧化细菌的细胞壁、蛋白质并损伤遗传物质，最终导致细菌死亡，见图1[20]。PDT的抗菌机制主要分为2类。I型机制：光敏剂分子被特定波长的光照激活后，先由基态跃迁至激发单重态，再通过系间窜越形成激发三重态，随后通过电子转移直接与底物反应，产生·OH、O_2^-·等自由基及自由基离子[18-19]。II型机制：光敏剂受光照激发后将能量传递给氧分子（O_2），形成单线态氧（$^1O_2$）[21]，$^1O_2$作为强氧化剂，可通过氧化脂质、蛋白质并损伤遗传物质，造成细胞膜破裂和细胞内代谢失衡，最终导致细菌死亡。

1.2 天然色素的光动力抗菌作用靶点

天然色素的光动力抗菌作用靶点包括破坏细胞膜、诱导氧化应激、干扰DNA/RNA等。研究表明，不同天然色素对细菌生理过程的干扰机制存在明显差异，见表1。

2 光动力抗菌效果的影响因素

PDT在食品安全领域的应用受多种因素影响，其中光照条件、光敏剂浓度、细菌类型及食品基质等因素并非独立影响，而是存在显著的交互效应，这对光动力抗菌效果的提升至关重要。因

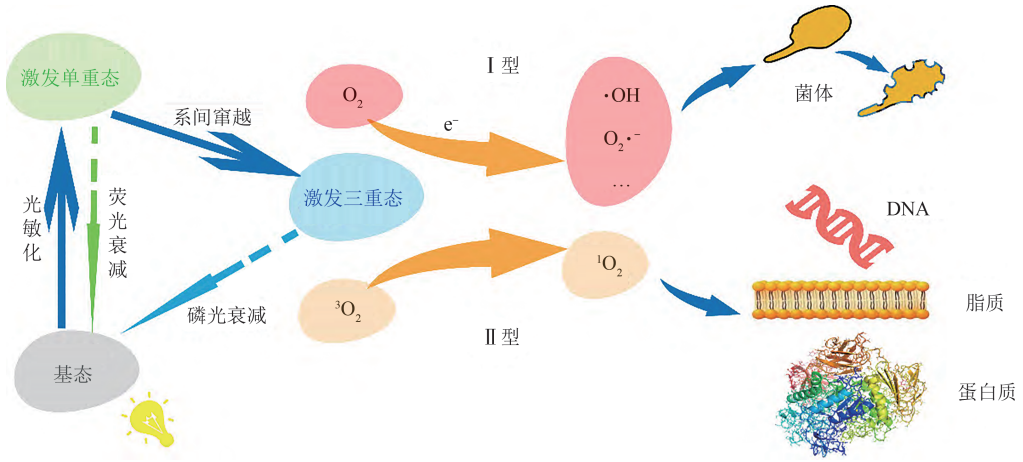


图 1　光敏剂在光照条件下的光动力抗菌机制

Fig. 1　Photodynamic antimicrobial mechanism of photosensitizer under light conditions

表 1　天然色素的光动力抗菌作用靶点

Table 1　Photodynamic antibacterial targets of natural pigments

天然色素	PDT抗菌机制类型	作用靶点	抗菌机制	代表性细菌
姜黄素	Ⅰ型和Ⅱ型	细胞膜	细胞膜损伤及细胞质溢出	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、单核细胞增生李斯特菌[22-24]
		蛋白质和酶	蛋白质降解	
		DNA	与细菌DNA结合，阻止DNA聚合酶作用	
		生物膜	干扰细菌的群体感应系统，降低生物膜的形成能力	
叶绿素及其衍生物	Ⅱ型	细胞膜	氧化损伤	大肠杆菌、副溶血性弧菌和腐烂希瓦氏菌[25-26]
		细胞膜	破坏细胞外聚合物，降低生物膜形成能力	
花青素	Ⅱ型	生物膜	降低生物膜形成能力	卟啉单胞菌[27-28]
核黄素	Ⅰ型	细胞膜	破坏微生物的细胞结构	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、霉菌和铜绿假单胞菌[29-30]

此，合理优化相关参数，构建多参数优化模型及食品基质特异性PDT，是未来提升其实际应用效果的关键。

2.1　光照条件的影响

2.1.1　光照强度与光照时间

光照强度与光照时间直接决定光敏剂的激发效率及ROS的产生量。研究表明，随着光照时间的延长，PDT诱导产生的ROS增多，对展青霉的抑制率可达99.9%；但当光照时间超过15 min时，过量ROS会触发孢子的抗氧化防御系统，导致抑菌效果减弱[31]。同样，姜黄素-PDT对腐生葡萄球菌的抑制效果随光照强度的升高而增强[32]。需要注意的是，光照过强或光照时间过长会导致光敏剂降解或自我屏蔽，进而降低杀菌效率[33-34]，同时还可能对食品的色泽、风味及营养成分造成不利影响。

2.1.2　光源波长

不同光敏剂的吸收峰不同，因此需要匹配合适的光源波长以提高光敏剂的激发效率。不同光源类型的PDT在食品中的应用见表2。

表 2　不同光源类型的PDT在食品中的应用

Table 2　Applications of different light sources of PDT in food

光源类型	波长/nm	适用光敏剂	典型应用
蓝光	400~480	姜黄素、叶绿素及其衍生物	果蔬表面抗菌、液体食品微生物控制及食品包装[14,35-37]
红光、脉冲强光	630~700	卟啉类	肉制品表面抗菌[38-39]
可见光	—	血卟啉、叶绿酸钠	食品表面抗菌[40]

注：“—”表示未提及。

2.2 食品基质的影响

食品中的水分、脂肪和蛋白质含量会影响光动力抗菌效果，因此光敏剂的选择需充分考虑其对不同食品环境的适应性，确保与食品基质相匹配[41]。不同食品基质对光动力抗菌效果的影响见表3。

表3 不同食品基质对光动力抗菌效果的影响

Table 3 Influences of different food matrices on photodynamic antimicrobial efficacy

食品类型	食品	水分含量	主要干扰因素
液态食品	果汁、乳制品	高	易扩散但可能影响光吸收[42-43]
高脂食品	肉制品、油炸食品	低、中	脂溶性光敏剂易吸附[44-45]
高蛋白质食品	乳制品、蛋制品	高	可能与光敏剂相互作用，降低ROS释放量[7,46-47]

2.3 光敏剂浓度的影响

光敏剂浓度直接决定ROS的产生量，适当提高光敏剂浓度有助于提升抗菌效果，但浓度过高可能引发光敏剂自猝灭效应，反而降低ROS生成能力。研究表明，当姜黄素浓度为0.2~10.0 μmol/L时，PDT对单核细胞增生李斯特菌的抑菌效果随姜黄素浓度增加而显著提升[48]。而当姜黄素质量浓度超过5 mg/L时，光动力抑菌效果开始下降，且在其质量浓度达到50 mg/L时，抑菌效果显著减弱[49]。因此，实际应用中需确定光敏剂的最优浓度，以实现高效、低残留的食品抗菌目标。

2.4 细菌类型的影响

不同类型细菌（革兰氏阳性菌与革兰氏阴性菌）对PDT的敏感性存在差异，其中革兰氏阳性菌普遍更敏感，革兰氏阴性菌因外膜阻隔作用导致其抗性相对较强[19]。光敏剂与细菌细胞壁/膜的相互作用及结合效果，与其吸附能力和穿透力密切相关；其中亲水性光敏剂更易与革兰氏阳性菌结合，疏水性光敏剂更易穿透革兰氏阴性菌的外膜[50]。有研究表明，与大肠杆菌相比，姜黄素-PDT处理能在更短时间内显著降低金黄色葡萄球菌的存活率（大肠杆菌需20 min，金黄色葡萄球菌只需10 min）；与对照组相比，姜黄素-PDT处理后的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌菌落总数分别降低了3.60 lg（CFU/mL）和5.23 lg（CFU/mL）[33]。

3 天然色素介导的PDT在食品中的应用

PDT作为一种非热杀菌技术，既能有效降低食品中的微生物污染风险，又能减少化学防腐剂的使用，符合食品工业向绿色、安全、健康方向发展的趋势。目前，PDT在食品工业中的应用研究主要集中于果蔬表面消毒、肉制品抗菌与保鲜、饮用水消毒及智能包装等领域，并逐步向产业化应用推进。

3.1 在果蔬表面消毒中的应用

果蔬在种植、采摘、运输和贮存过程中易受大肠杆菌、沙门氏菌、李斯特菌等致病菌的污染。天然色素介导的PDT在果蔬表面微生物控制中的应用见图2。其中，姜黄素-PDT已被证实在果蔬表面消毒中具有良好的应用前景；在420~450 nm蓝光照射下，姜黄素可产生ROS，从而有效杀灭细菌[51]。另有研究发现，采用核黄素和孟加拉玫瑰红这2种单线态氧型光敏剂包被蓝莓后，经蓝光照射可杀灭蓝莓表面的病毒，进一步证实了PDT具有非热杀菌的应用潜力[52]。尽管PDT在果蔬表面消毒中的应用已具备一定的可操作性，但多数研究仍缺乏PDT对天然污染状态下混合菌群的协同杀菌效应评价。此外，不同果蔬的基质特性存在差异，仍需构建更具果蔬类型特异性的光敏剂配伍机制与应用标准，以推动该技术的产业化应用。

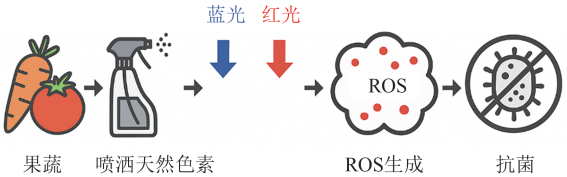


图2 天然色素介导的PDT在果蔬表面微生物控制中的应用示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the application of PDT mediated by natural pigments in the control of microorganisms on fruit and vegetable surfaces

3.2 在肉制品抗菌与保鲜中的应用

肉制品富含蛋白质与水分，极易滋生金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、志贺氏菌等病原菌。传统防腐方法主要依赖低温冷藏或化学防腐剂，而PDT为

肉制品抗菌与保鲜提供了一种绿色非热杀菌技术。如使用40 μmol/L姜黄素和450 nm LED（15 J/cm^2）处理牛肉、鸡肉和猪肉，可使样品中的金黄色葡萄球菌分别减少1.5 lg（CFU/mL）、1.4 lg（CFU/mL）、0.6 lg（CFU/mL）[53]。PDT在肉制品抗菌中的应用见表4。目前，PDT在肉制品中的应用仍面临脂肪干扰、光穿透性不足等问题。因此，后续研究需探究光敏剂与肉制品表面微生物的结合机制，优化光源配置模式，并开发超声-等离子体等复合抗菌技术，以同步提升肉制品的保鲜效果与风味保持效果。

表4　PDT在肉制品抗菌中的应用

Table 4　Antibacterial application of PDT in meat products

肉制品	光敏剂	光敏剂剂量	光照条件	菌种	减少量
猪肉	姜黄素	75 μmol/L	460 nm LED、20 min	荧光假单胞菌	3.23 lg（CFU/g）[54]
鸡肉	姜黄素	200 μmol/L	33 J/cm^2	沙门氏菌	0.9 lg（CFU/g）[55]
牛肉	姜黄素	—	435 nm、47.8 mW/cm^2	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	分别为99.11%、97.12%[56]
缢蛏	姜黄素	26.6 μmol/L	蓝光、20 min	细菌	1.54 lg（CFU/g）[57]
小黄鱼	卤代姜黄素	质量分数0.025%	450 nm、20 mW/cm^2	单核细胞增生李斯特菌	（6.13±0.06）lg（CFU/g）[58]
金枪鱼	核黄素	150 μmol/L	54 J/cm^2	沙门氏菌	2.1 lg（CFU/mL）[59]
鲑鱼	小檗碱	50 μmol/L	白光、50 mW/cm^2	单核细胞增生李斯特菌	100%[60]
虾	姜黄素和*L*-精氨酸	8 μmol/L和0.5 mg/mL	2 J/cm^2	副溶血性弧菌	>8.0 lg（CFU/mL）[13]
鲟鱼	姜黄素	30 μmol/L	470 nm LED、90 s	假单胞菌	（3.19±0.15）lg（CFU/g）[61]

注：“—”表示未提及。

3.3　在饮用水消毒中的应用

饮用水中的细菌与病毒污染是全球公共卫生面临的重要挑战。传统水处理方法（如氯消毒、臭氧处理）虽具备杀菌效果，但可能生成三卤甲烷等有害副产物，因此绿色环保的水处理技术日益受到关注。卟啉类色素介导的PDT在饮用水消毒领域的应用研究已取得初步进展，其在饮用水消毒中的应用模式见图3。研究表明，采用660 nm红光结合0.5 mg/L卟啉类色素处理20 min后，饮用水中的大肠杆菌数量可降低99.9%以上，满足饮用水安全标准[62]。Bonnett等[63]以新型锌（II）酞菁四磺酸（ZnPcS）/壳聚糖膜作为新型光敏剂，发现该光敏剂介导的PDT对大肠杆菌有很好的灭活效果。此外，过氧化氢与辐射联用技术也展现出杀菌潜力，当过氧化氢质量浓度50~125 mg/L、初始pH 5.0~7.0、温度15~25 ℃、辐射强度100~500 W/m^{2}时，该技术对大肠杆菌具有显著杀灭作用[64]。值得注意的是，相较于食品基质，PDT在水体系中的杀菌效果更为理想，但当前技术多集中在小试装置阶段，大流量动态反应器设计、光源衰减控制及反应残留物质评估等关键问题仍未得到系统性解决。同时，PDT对病毒、多细胞寄生原虫的灭活机制尚不明确，后续需进一步提高其多目标灭活能力，并开展毒理学研究。

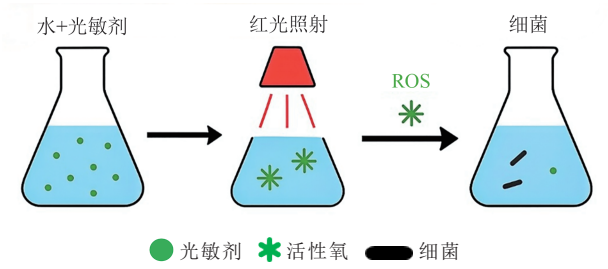


图3　卟啉类色素介导的PDT在饮用水消毒中的应用模式图

Fig. 3　Application model diagram of porphyrin pigment-mediated PDT in drinking water disinfection

3.4　在食品智能包装中的应用

智能包装技术与PDT结合可同时实现食品新鲜度的可视监测与主动抗菌功能，已成为食品工业的新兴发展方向。目前，天然色素介导的PDT智能包装膜已应用于肉制品、水产品[65]等领域，工作原理见图4。研究人员将孟加拉玫瑰红负载于包装膜上作为光动力灭菌成分，发现其抗菌功能可通过自制的猪肉新鲜度传感器颜色变化自动触发，最终使猪肉在4 ℃下的贮藏期延长至3 d，且该传感器可动态呈现整个保鲜过程的新鲜度[66]。另有研究将花青素介导的PDT应用于食品智能包装，发现该智能包装膜可通过颜色变化实时监测食品腐败情况，帮助消费者直观判断食品新鲜度[67]。光动力抗菌智能包装技术具有前沿创新性，但其抗菌效率、膜结构、感应灵敏度间的多因

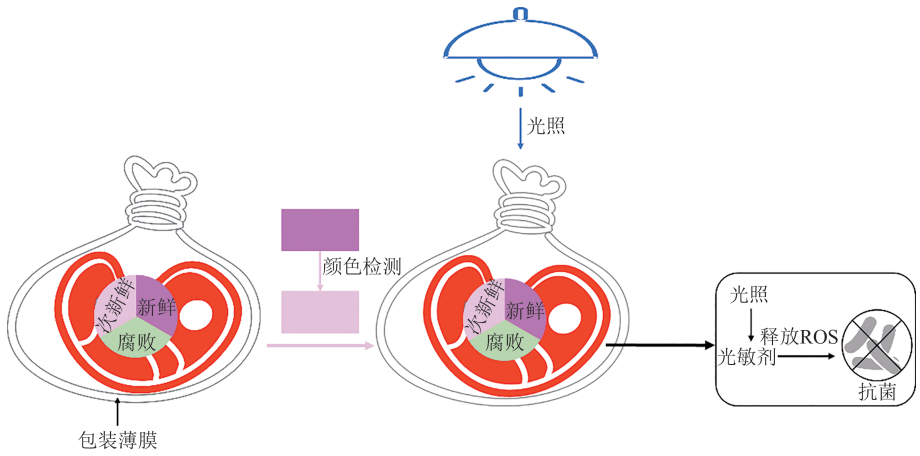


图 4　天然色素介导的 PDT 智能包装膜的工作原理示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the working mechanism of natural pigment-mediated PDT intelligent packaging film

素协调机制尚未明确。另外，当前研究主要集中于实验室静态环境，与实际应用场景存在明显差距，且光敏剂释放速率的精准控制、包装力学性能优化、光敏剂相关法规标准及评价体系仍未成熟。

4　未来发展方向

PDT 凭借其独特优势，已成为食品保鲜与病原微生物控制领域的重要研究方向。当前多数协同抗菌策略虽在杀菌强度方面取得一定成效，但对于 ROS 种类变化、作用位点靶向性及协同增效的分子机制尚缺乏系统性研究。此外，协同作用是简单的加和效应，还是存在协同放大机制，仍需借助高通量组学、成像技术等进一步明确。

4.1　新型光敏剂的构建与功能优化

姜黄素、叶绿素和卟啉类化合物等天然光敏剂虽具有良好的生物安全性，但存在光敏效率低、水溶性差、易降解等问题[68]，导致其难以在复杂食品基质中发挥稳定抗菌效果。未来可通过分子结构修饰、功能基团引入等方式优化其光响应能力[69-71]，并引入纳米包裹载体（如壳聚糖[72-74]、二氧化硅[75]、脂质体[76]等）提升光敏剂的水溶性与光稳定性。例如，卟啉类材料在 500~600 nm 可见光区域几乎无吸收，在 600~700 nm 区域吸收强度较弱，通过分子结构修饰可改进其在可见光区域的吸收峰数目或吸收强度，进而拓展其在光动力抗菌方面的应用[77]；将姜黄素负载于介孔二氧化硅纳米颗粒并结合蓝光照射，其抗菌效果显著优于同等浓度的游离姜黄素与抗生素[78]。因此，开发具备宽谱吸收能力及抗菌与抗氧化双重功能的光敏剂[79-80]，有望进一步拓宽其在食品贮运和包装体系中的应用范围。

4.2　协同抗菌策略的探索与机制研究

在高脂肪、高蛋白质食品基质中，单一 PDT 处理的抗菌活性往往受到抑制。因此开发与 PDT 协同的抗菌手段具有重要意义。例如，超声波处理可通过空化效应增强细胞膜通透性，从而提升光敏剂的作用效率，因此有研究将 PDT 与超声波联合使用，发现亚甲蓝和孟加拉玫瑰红的光和超声激活组合可产生更高水平的 ROS[81]。另外，当姜黄素质量摩尔浓度为 400 nmol/g、超声波功率为 300 W、声光处理时间为 30 min 时，虾滑在冷藏期间的菌落总数得到显著抑制，冷藏至第 4 天时仍低于空白对照组[82]。冷等离子体可产生 ROS，与 PDT 形成叠加效应。有研究表明，蓝光通过诱导葡萄球菌黄质光解，能促进等离子体活化水的抗菌作用，使金黄色葡萄球菌的存活种群数量减少 2.70 lg（CFU/mL），效果较单一等离子体活化水提升了约 40 倍[83]。

PDT 与纳米抗菌剂结合可提高光吸收能力并延长抗菌活性。例如，姜黄素-氧化锌纳米颗粒对产气荚膜梭菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌均表现出良好的抑菌性能，其制备的水凝胶膜具有良好的机械性能和水蒸气透过性，且水分渗透性低，对冷鲜鸡肉具有较好的保鲜效果[13]。相较于纳米二氧化钛，纳米氧化锌不仅光催化活性更强，且工业生产中量化率更高、生物相容性好、成本低[84]，具有更广阔的应用前景。此外，PDT 与天然植物提取物[85]、有机酸[86]等协同处理，抗菌谱也显著增强。未来应加强对协同机制中 ROS 种类、抗菌靶点及时间效应的系统性研究，构建多元协同抗菌体系。

4.3　光响应型包装材料的开发与标准建立

基于光动力抗菌机制构建的光响应型抗菌包装膜近年来备受关注，尤其在果蔬贮藏领域具有良好的应用前景。研究表明，负载光敏剂的可降解膜材料在光照条件下可持续释放ROS，抑制食品表面微生物生长[87]。例如，采用负载香芹酚的光响应载体材料制备的光响应控释活性膜，在紫外线和可见光交替照射下可促进香芹酚的释放，显著改善猪肉品质[70]；新型壳聚糖/带负电荷石墨氮化碳自活化生物纳米复合薄膜在可见光下自激活后，对大肠杆菌与金黄色葡萄球菌的抗菌效率均在（99.80±0.26）%以上，还能将橘子保质期延长至24 d[71]。然而，光响应型包装材料的工业化应用仍面临诸多挑战，如光敏剂释放速率可控性不足、光穿透深度有限等；同时，食品接触材料的毒理学评价、光敏剂迁移性测试及残留控制方法尚不完善，相关法规标准体系尚未建立，限制了该包装材料的广泛应用。因此，推动光响应型包装材料相关标准的建立十分必要。

4.4　应用过程标准化与工艺设备开发

PDT在不同食品类型中的抗菌效果存在显著差异，主要原因在于光敏剂种类、光照条件、处理方式等尚未形成统一标准。目前多数研究采用的光源类型、波长、强度与处理时间差异较大，不利于PDT的后续推广。未来需根据食品特性建立特异性处理参数体系，并开发适用于工业流水线的光照设备；同时，推动PDT与现有包装、贮运过程的工艺融合，也是实现其实际应用的关键环节。

5　展望

天然色素作为食品级光敏剂，凭借其良好的光敏响应性与生物相容性，已在PDT中展现出广阔的应用前景。该研究系统梳理了天然色素介导的光动力抗菌机制，归纳了光源参数、光敏剂浓度、食品基质等因素对光动力抗菌效果的影响，总结了PDT在果蔬表面消毒、肉制品抗菌与保鲜、饮用水消毒及智能包装等领域的研究进展。同时，作者强调了超声波、冷等离子体、纳米抗菌剂等协同抗菌技术与PDT结合的协同机制研究，为拓展PDT的应用提供新思路。

未来研究应聚焦以下几个方面：1）开发兼具高光敏活性、环境稳定性与靶向抗菌的新型天然色素或衍生物；2）加强多维度协同抗菌策略机制解析，明确其在复杂食品基质中的ROS行为规律；3）推动光响应型包装材料的结构优化与标准建立，实现可控释放与保鲜功能的统一；4）构建面向工业化应用的PDT工艺体系，包括适配光源、连续化设备的开发及食品类型特异性处理参数的优化。通过材料科学、食品工程与微生物学等多学科的融合创新，有望推动PDT从实验室研究走向工业化应用，为保障食品安全、延长食品货架期及减少化学防腐剂使用提供可靠的技术支撑。

参考文献

[1] SARHAN O M. Tackling biofilm resistance of gram-positive and gram-negative bacteria against levofloxacin *via* nanotechnology and essential oils [J]. Journal of Pharmaceutical Innovation，2024，20（1）：5.

[2] HE J，ZHANG S，HU Z，et al. Antibacterial photodynamic inactivation of pH-responsive microspheres based on chitosan/carboxymethyl chitosan with hypericin and its application in food preservation [J]. Food Bioscience，2025，71106992-106992.

[3] 潘海军，王锋，马路凯，等. 姜黄素光动力技术在微生物杀菌中的研究进展[J]. 保鲜与加工，2025，25（1）：130-138.
PAN H J，WANG F，MA L K，et al. Progress in curcumin-mediated photodynamic technology for microbial sterilization [J]. Storage and Process，2025，25（1）：130-138.（in Chinese）

[4] KIM M J，HWA T，SUK B，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.

[5] 王百川. 低温预制食品中单核细胞增生李斯特菌生长模型的构建及光动力抑菌的应用[D]. 江西：南昌大学，2022.

[6] 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.

[7] DOS SANTOS R F，CAMPOS B S，DE ASSIS REGO FILHO 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.

[8] 檀茜倩，麻冰玉，王丹，等. 光动力技术及其在生鲜食品保鲜中的应用研究进展[J]. 食品与生物技术学报，

2022,41(7):100-110.
TAN X Q,MA B Y,WANG D,et al. Research progress of photodynamic technology and its application in fresh food preservation[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022,41(7):100-110.(in Chinese)

[9] ZHANG Y, YAN H J, TANG J W, et al. Dual-mode antibacterial core-shell gold nanorod@mesoporous-silica/curcumin nano complexes for efficient photothermal and photodynamic therapy[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A:Chemistry,2022,425:113722.

[10] LV Y B, LI P Y, CEN L, et al. Gelatin/carboxymethylcellulose composite film combined with photodynamic antibacterial: new prospect for fruit preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2024,257:128643.

[11] 赵南昕. pH响应型智能介孔二氧化硅载体应用于金黄色葡萄球菌生物膜的光动力杀菌研究[D]. 无锡:江南大学,2022.

[12] CHEN H L, TANG C H. Metal polyphenol network-modified chitin nanocrystals reinforce versatile biomass films: active packaging, intelligent visualization and controlled photothermal sterilization [J]. Chemical Engineering Journal,2024,500:157114.

[13] 杨宇恒,宋子伟,郑宇航,等. 负载姜黄素-氧化锌纳米颗粒的水凝胶膜的制备及其对冷鲜鸡肉的保鲜效果[J]. 食品工业科技,2025,46(19):327-335.
YANG Y H,SONG Z W,ZHENG Y H,et al. Preparation of hydrogel films loaded with curcumin-zinc oxide nanoparticles and its preservation effect on low-temperature chilled chicken meat[J]. Science and Technology of Food Industry,2025,46(19):327-335.(in Chinese)

[14] 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.
WANG X Q, LIU Z Y, YU Y S, et al. Photodynamic sterilization of *Staphylococcus aureus* in liquid food by Na-chlorophyllin[J]. Modern Food Science and Technology, 2013,29(3):463-466,478.(in Chinese)

[15] ZHANG Y C, DING Z Y, SHAO C B, et al. Chlorophyllin-based 405 nm light photodynamic improved fresh-cut pakchoi quality at postharvest and inhibited the formation of biofilm[J]. Foods,2022,11(16):2541.

[16] 舒丽枝,时苗苗,张牧焓,等. 卟啉类化合物和游离铁对鸡胸肉肌原纤维蛋白理化特性的影响[J]. 江苏农业学报,2024,40(10):1952-1961.
SHU L Z, SHI M M, ZHANG M H, et al. Effect of porphyrins and free iron on physicochemical properties of myofibrillar protein of chicken breast muscle[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2024, 40(10): 1952-1961.(in Chinese)

[17] PALACIOS Y B,SIMONETTI S O,CHAVEZ C H,et al. "Illuminated glycoporphyrins": a photodynamic approach for *Candida albicans* inactivation [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B:Biology,2025,264:113105.

[18] LAN M H,ZHAO S J,LIU W M,et al. Photosensitizers for photodynamic therapy [J]. Advanced Healthcare Materials,2019,8(13):1900132.

[19] 郑双芝,王晓迪,张蕾,等. 光动力杀菌技术及其杀灭食源性有害微生物的研究进展[J]. 食品与发酵工业,2023,49(21):321-328.
ZHENG S Z, WANG X D, ZHANG L, et al. Photodynamic anti-microbial technology and its research progress in killing foodborne harmful microorganisms[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(21): 321-328.(in Chinese)

[20] LU N, WANG Z G, ZHANG X, et al. Effects of curcumin-based photodynamic method on protein degradation of oysters[J]. International Journal of Food Science & Technology,2021,56(8):4050-4061.

[21] ZHANG Z, LONG S R, CAO J F, et al. Revealing the photodynamic stress *in situ* with a dual-mode two-photon $^1O_2$ fluorescent probe[J]. ACS Sensors, 2020, 5(5): 1411-1418.

[22] ZHOU Z L, CHEN R X, LI P Z, et al. Natural borneol improves cellular uptake of curcumin to enhance its photodynamic bactericidal activity against *Escherichia coli* ATCC8739[J]. Food Microbiology, 2025,127:104686.

[23] ZHANG J W, ZHENG P Y, LI J, et al. Curcumin-mediated sono-photodynamic treatment inactivates *Listeria monocytogenes via* ROS-induced physical disruption and oxidative damage[J]. Foods,2022,11(6):808.

[24] HUANG J M, CHEN B W, LI H H, et al. Enhanced antibacterial and antibiofilm functions of the curcumin-mediated photodynamic inactivation against *Listeria monocytogenes*[J]. Food Control,2020,108:106886.

[25] ZHANG Z Q, QIN J R, WANG Z, et al. Sodium copper chlorophyll mediated photodynamic treatment inactivates *Escherichia coli via* oxidative damage[J]. Food Research International,2022,157:111472.

[26] TAN L J, ZHAO Y, LI Y F, et al. Potent eradication of mixed-species biofilms using photodynamic inactivation coupled with slightly alkaline electrolyzed water [J]. LWT-Food Science and Technology,2022,155:112958.

[27] OLIVEIRA H, ARAÚJO P, PEREIRA A R, et al.

Photoactivated cell-killing amino-based flavylium compounds [J]. Scientific Reports，2021，11：22005.

[28] TEERAKAPONG A，DAMRONGRUNGRUANG T，SATTAYUT S，et al. Efficacy of erythrosine and cyanidin-3-glucoside mediated photodynamic therapy on *Porphyromonas gingivalis* biofilms using green light laser [J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy，2017，20：154-158.

[29] PING Y Y，ZHANG L，WANG W Z，et al. Visible light-driven multichannel concerted antibacterial films with photodynamically enhanced self-cascading chemodynamic actions for long-term preservation of perishable food[J]. Food Chemistry，2025，471：142787.

[30] RIVAS AIELLO M B，GHILINI F，MARTÍNEZ PORCEL J E，et al. Riboflavin-mediated photooxidation of gold nanoparticles and its effect on the inactivation of bacteria [J]. Langmuir，2020，36(28)：8272-8281.

[31] SONG L L，ZHANG F，YU J S，et al. Antifungal effect and possible mechanism of curcumin mediated photodynamic technology against *Penicillium expansum* [J]. Postharvest Biology and Technology，2020，167：111234.

[32] YANG W，WANG Z Y，LI Q，et al. Photodynamic inactivation using natural bioactive compound prevents and disrupts the biofilm produced by *Staphylococcus saprophyticus*[J]. Molecules，2021，26(16)：4713.

[33] 于金珅，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)：259-263，270.
YU J S，ZHANG F. Effects of curcumin-mediated photodynamic technology on bactericidal efficacy of fresh-cut potatoes[J]. Science and Technology of Food Industry，2021，42(4)：259-263，270.(in Chinese)

[34] 何荣强，高土玲，符天晓，等. 光动力杀菌技术在鲜切水果保鲜中的研究进展[J]. 保鲜与加工，2025，25(2)：150-156.
HE R Q，GAO T L，FU T X，et al. Research progress of photodynamic antimicrobial technology in fresh-cut fruits preservation[J]. Storage and Process，2025，25(2)：150-156.(in Chinese)

[35] LIU Y，LI Y J，SHAO C，et al. Curcumin-based residue-free and reusable photodynamic inactivation system for liquid foods and its application in freshly squeezed orange juice[J]. Food Chemistry，2024，458：140316.

[36] 闫元元. 叶绿素镁钠盐介导的光动力技术对金黄色葡萄球菌的灭活及其生物被膜的清除作用研究[D]. 上海：上海海洋大学，2021.

[37] 王倩，薛舟，王涛，等. 姜黄素在食品包装中的应用进展[J]. 现代食品科技，2024，40(7)：313-323.
WANG Q，XUE Z，WANG T，et al. Application of curcumin in food packaging[J]. Modern Food Science & Technology，2024，40(7)：313-323.(in Chinese)

[38] 张力，蒋建勤. 卟啉类光敏剂的研究进展[J]. 云南化工，2018，45(11)：1-6.
ZHANG L，JIANG J Q. Research progress of porphyrin photosensitizers [J]. Yunnan Chemical Technology，2018，45(11)：1-6.(in Chinese)

[39] MAISCH T，SPANNBERGER F，REGENSBURGER J，et al. Fast and effective：intense pulse light photodynamic inactivation of bacteria [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology，2012，39(7)：1013-1021.

[40] 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.

[41] 施源，李璟，胡嘉淼，等. 基于Citespace的光动力杀菌技术研究进展可视化分析[J]. 食品工业科技，2024，45(10)：335-352.
SHI Y，LI J，HU J M，et al. Bibliometric analysis of the research progressing in photodynamic antimicrobial technology based on Citespace [J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(10)：335-352.(in Chinese)

[42] 黄璐瑶，杜艳瑜，陆晓丹，等. 大黄鱼鱼卵磷脂乳化姜黄素工艺的研究[J]. 食品与发酵工业，2020，46(13)：196-202.
HUANG L Y，DU Y Y，LU X D，et al. Study on the technology of emulsifying curcumin in phospholipids oflarge yellow croaker roe[J]. Food and Fermentation Industries，2020，46(13)：196-202.(in Chinese)

[43] 赵若晴. 蔬菜汁中金黄色葡萄球菌生长预测模型的构建及光动力杀菌技术研究[D]. 长春：吉林大学，2020.

[44] ZHENG S Z，YAN H，DENG P W，et al. Enhancement of curcumin-mediated photodynamic inactivation against *Pseudomonas fluorescens* on fish fillets combined with ε-polylysine hydrochloride[J]. LWT-Food Science and Technology，2025，217：117344.

[45] 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.

[46] ZHANG X，LI X，JIANG Y. Interaction between chlorophyll derivatives and proteins in dairy products under light exposure[J]. Journal of Dairy Science，2021，104(5)：5123-5132.

[47] 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,2020,86:103314.

[48] CHAI Z Y, ZHANG F, LIU B J, et al. Antibacterial mechanism and preservation effect of curcumin-based photodynamic extends the shelf life of fresh-cut pears[J]. LWT-Food Science and Technology,2021,142:110941.

[49] DE OLIVEIRA E F, 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 and Technology,2018,137:86-94.

[50] GAO J W, MATTHEWS K R. Effects of the photosensitizer curcumin in inactivating foodborne pathogens on chicken skin[J]. Food Control,2020,109:106959.

[51] LUO C S, XIE F, CHEN Q Q, et al. Starch-nanoencapsulated polyphenol-induced polysaccharide gel coatings with efficient preservation capability[J]. Food Chemistry,2025,467:142203.

[52] 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.

[53] CORRÊA T Q, BLANCO K C, GARCIA É 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,2020,30:101678.

[54] 王洋,赵瑜玲,陈孟涵,等. 姜黄素联合乙二胺四乙酸对荧光假单胞菌的光动力灭活作用[J]. 食品科学,2022,43(21):8-15.
WANG Y,ZHAO Y L,CHEN M H,et al. Photodynamic inactivation effect of curcumin combined with ethylene diamine tetraacetic acid on *Pseudomonas fluorescens*[J]. Food Science,2022,43(21):8-15.(in Chinese)

[55] 曾巧辉,余杏同,区灿盛,等. 姜黄素光动力杀灭即食鸡肉中沙门氏菌的研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版),2022,40(1):19-25.
ZENG Q H,YU X T,OU C S,et al. Study on curcumin-mediated photodynamic inactivation of *Salmonella* on ready-to-eat chicken[J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition),2022,40(1):19-25.(in Chinese)

[56] 庄迪. 姜黄素-虫胶纳米颗粒光敏抑菌明胶膜的制备及保鲜机制[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024.

[57] 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.
LIN Y L,LI S Y,LAI D N,et al. Effects of curcumin-mediated of anti-microbial photodynamic technology on preservation of razor clam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16):320-326.(in Chinese)

[58] JIAO L,LI Y W,TIAN M Y,et al. Novel halogenated curcumin-mediated photodynamic inactivation for the preservation of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2024,72(33):18720-18730.

[59] LI H H, TAN L J, CHEN B W, et al. Antibacterial potency of riboflavin-mediated photodynamic inactivation against *Salmonella* and its influences on tuna quality[J]. LWT-Food Science and Technology,2021,146:111462.

[60] LI Q Y, WANG B C, PENG S Y, et al. Photodynamic inactivation of *Listeria monocytogenes* using a natural aggregation-induced emission photosensitizer and its application in salmon preservation[J]. LWT-Food Science and Technology,2024,193:115762.

[61] GONG C, LI Y J, GAO R C, et al. Inactivation of specific spoilage organism (*Pseudomonas*) of sturgeon by curcumin-mediated photodynamic inactivation [J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 2020, 31: 101827.

[62] 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(7n08):718-726.

[63] 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.

[64] GOMES A L R,RIBEIRINHO-SOARES S,MADEIRA L M, et al. Disinfection of secondary urban wastewater using hydrogen peroxide combined with UV/visible radiation: effect of operating conditions and assessment of microorganism competition[J]. Water,2025,17(4):596.

[65] 邹林红. 青稞麸皮-花青素/碳量子点智能双层膜的制备、理化性能及鱼肉保鲜的应用[D]. 雅安:四川农业大学,2024.

[66] ZHANG J J, ZHANG J N, ZHANG R J, et al. Preparation of photodynamic-controlled release packaging for pork preservation and its visualization[J]. Food Chemistry,2025,473:143005.

[67] 张俊俊. 猪肉感控保鲜一体化的智能包装膜研究[D]. 镇江:江苏大学,2023.

[68] ABDOU E S, GALHOUM G F, MOHAMED E N. Curcumin loaded nanoemulsions/pectin coatings for refrigerated chicken fillets[J]. Food Hydrocolloids,

2018，83：445-453.

[69] LUO L P，SU W Q，HASSAN M F，et al. Photothermal functionalized antibacterial packaging film with controllable release capability for fruit preservation[J]. Food Research International，2025，206：116079.

[70] NING H Y，LU L X，ZHANG Y M，et al. Development of novel sodium alginate-based light-responsive controlled-release active packaging film[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2025，304：140780.

[71] NI Y S，SHI S，LI M，et al. Visible light responsive，self-activated bionanocomposite films with sustained antimicrobial activity for food packaging [J]. Food Chemistry，2021，362：130201.

[72] 沈永康，朱峰，冯雪锋，等. 壳聚糖基保鲜膜/涂层的制备及应用[J]. 包装工程，2025，46（1）：79-88.
SHEN Y K，ZHU F，FENG X F，et al. Preparation and application of chitosan-based fresh-keeping films/coatings [J]. Packaging Engineering，2025，46（1）：79-88.（in Chinese）

[73] WANG F，WANG R H，PAN Y J，et al. Gelatin/chitosan films incorporated with curcumin based on photodynamic inactivation technology for antibacterial food packaging [J]. Polymers，2022，14（8）：1600.

[74] WANG D F，WANG X，ZHOU S S，et al. Radish residue carbon dots-based novel starch/chitosan film with high antioxidant，biocompatibility，and antibacterial activities for salmon fillets’ active packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，273：133107.

[75] 张磊. 载姜黄素脂质包覆介孔二氧化硅纳米颗粒的制备及性能评价[D]. 天津：河北工业大学，2019.

[76] 黄荣. 基于界面交联的负载姜黄素乳液体系的构建及其保护效果研究[D]. 武汉：华中农业大学，2024.

[77] 曹洪玉. 氮杂卟啉和杂原子卟啉电子吸收光谱理论研究[D]. 大连：大连理工大学，2019.

[78] MEDAGLIA S，OTRI I，BERNARDOS A，et al. Synergistic antimicrobial photodynamic therapy using gated mesoporous silica nanoparticles containing curcumin and polymyxin B[J]. International Journal of Pharmaceutics，2024，654：123947.

[79] CONTRERAS J，ALCÁZAR-VALLE M，LUGO-CERVANTES E，et al. Color degradation kinetics and antioxidant potential of black bean anthocyanin-rich extracts in commercial beverages[J]. Current Developments in Nutrition，2024，8：102671.

[80] SOLEIMANI F，KARIMI A R，HADIZADEH M. Multifunctional riboflavin/chitosan-based dianhydride crosslinked hydrogels：photodynamic therapy，antioxidant，and antibacterial properties [J]. Next Research，2025，2（1）：100139.

[81] MCCAUGHAN B，ROUANET C，FOWLEY C，et al. Enhanced ROS production and cell death through combined photo- and sono-activation of conventional photosensitising drugs [J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters，2011，21（19）：5750-5752.

[82] 王德华. CUR-SPDT对哈维氏弧菌的灭活效果及在虾滑冷藏保鲜中的应用研究[D]. 福州：福建农林大学，2022.

[83] BAEK K H，KIM H J，KANG T，et al. Blue light promotes bactericidal action of plasma-activated water against *Staphylococcus aureus* on stainless steel surfaces [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2021，69：102663.

[84] 唐雅兰，蒋学金. 纳米技术在食品包装的应用研究[J]. 中国包装，2024，44（11）：37-41.
TANG Y L，JIANG X J. Study on the application of nanotechnology in food packaging[J]. China Packaging，2024，44（11）：37-41.（in Chinese）

[85] NI Y S，LI Y M，WANG M Y，et al. Chitosan-based packaging films with antibacterial-sterilization integrated continuous activity for extending the shelf life of perishable foods[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，275：133351.

[86] ZHU Y B，JIANG T，MAO Z Y，et al. Synergistic bactericidal effects of photodynamic inactivation technology combined with citric acid on *Staphylococcus aureus*[J]. LWT-Food Science and Technology，2025，216：117366

[87] 刘帅言. 共载花青素和姜黄素的多荷环糊精自组装递送体系的构建及应用研究[D]. 长春：吉林大学，2024.

（责任编辑：刘冬梅）