

# 姜黄素在食品包装中的应用进展

王倩<sup>1</sup>, 薛舟<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 吴敏<sup>1,2\*</sup>, 周志龙<sup>1</sup>, 杨健<sup>1</sup>

(1. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

(2. 广西清洁化制浆造纸与污染控制重点实验室, 广西南宁 530004)

**摘要:** 食品活性包装可以保护食品免受微生物污染, 而食品智能包装可以实时监测食品的新鲜度或质量变化。姜黄素作为姜黄的主要活性物质, 具有抗菌、抗氧化和屏蔽紫外线等保鲜效果, 并且自身可以作为光敏剂在特定波长的照射下产生活性氧破坏细菌细胞膜, 起到抗菌的目的; 此外, 姜黄素还可以作为酸碱指示剂实时监测和指示食品的腐败变质情况, 其在食品活性和智能包装中得到了广泛应用。该文介绍了姜黄素的结构和理化性能, 深入探讨了姜黄素作为抗菌剂、抗氧化剂、紫外屏蔽剂、光敏剂和酸碱指示剂应用于食品活性和智能包装中的作用机理和研究进展, 并对未来姜黄素在食品包装中的进一步研究与开发提出建议, 以为姜黄素在未来食品包装中的研究提供理论参考。

**关键词:** 姜黄素; 食品包装; 抗菌; 抗氧化; 光敏剂; 酸碱指示剂

文章编号: 1673-9078(2024)07-313-323

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.7.0827

## Application of Curcumin in Food Packaging

WANG Qian<sup>1</sup>, XUE Zhou<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, WU Min<sup>1,2\*</sup>, ZHOU Zhilong<sup>1</sup>, YANG Jian<sup>1</sup>

(1. College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

(2. Guangxi Key Laboratory of Clean Pulp & Papermaking and Pollution Control, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Active food packaging can protect food from microbial contamination, whereas smart food packaging can be used to monitor food freshness and changes in its quality in real time. Curcumin, the main active substance of turmeric, exhibits preservation effects in part due to its antibacterial, antioxidant, and UV blocking properties. Furthermore, it can act as a photosensitizer to produce reactive oxygen species under radiation at specific wavelengths, thereby destroying bacterial cell membranes via an antibacterial effect. In addition, curcumin can also be used as a pH indicator to monitor and evaluate the deterioration of food in real time. In fact, this compound has been widely used in active and smart food packaging. In this study, the structure of curcumin, as well as its physical and chemical properties, were evaluated. The working mechanism of curcumin as an antibacterial, antioxidant, and UV blocking agent, as well as a photosensitizer and pH indicator in active and smart food active packaging, and the relevant research progress, are discussed. Suggestions for further research and development of curcumin in food packaging are also presented. Thus, this study provides a theoretical foundation for research on curcumin in food packaging in the future.

**Key words:** curcumin; food packaging; antibacterial; antioxidant; photosensitizer; pH indicator

引文格式:

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 Qian, XUE Zhou, WANG Tao, et al. Application of curcumin in food packaging [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(7): 313-323.

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (22168006); 广西自然科学基金项目 (2022GXNSFAA035436)

作者简介: 王倩 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 生物质基智能抗菌包装材料, E-mail: 2216391045@st.gxu.edu.cn

通讯作者: 吴敏 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 生物质基智能抗菌包装材料, E-mail: wumin@gxu.edu.cn

食品安全是一个全球性的挑战,已经引起我们的重视<sup>[1]</sup>。食品贮藏过程中微生物的生长繁殖是导致食品腐败变质的主要原因,能引起严重的食品安全问题,对人类健康构成潜在威胁<sup>[2]</sup>。抑制和/或杀死微生物对于保证食品安全是非常重要的<sup>[3]</sup>。随着人们对健康的关注,以天然产物作为食品活性和智能包装的需求显著增长<sup>[4]</sup>。

姜黄素是自然界中存在的一种多酚类化合物,主要来源于姜黄的根茎,具有抗菌性、抗氧化性、紫外屏蔽性、光敏性和酸碱响应变色等特性,姜黄素还被世界卫生组织和美国食品和药物管理局批准为安全食品添加剂,在世界范围内可用作天然色素,近年来,姜黄素已经广泛用于食品包装领域<sup>[5,6]</sup>。姜黄素可以通过防止脂质氧化和限制微生物的生长来延长食品货架期,并作为实时评价包装食品安全和质量的指示材料。因此,姜黄素作为食品活性包装和智能包装是延长食品保质期、保证食品质量安全的理想选择。

目前国内外有一些学者研究了姜黄素在食品包装行业中的应用进展,其中黄浩河等<sup>[7]</sup>研究了姜黄素在食品保鲜领域中利用微胶囊、静电纺丝、纳米粒及胶体等方式的研究进展,黄星海等<sup>[8]</sup>总结了姜黄素加入到天然高分子(壳聚糖、淀粉、纤维素、明胶、海藻酸盐)的成膜基材中制备出智能活性包装膜的研究进展,Roy等<sup>[9]</sup>主要介绍了姜黄素作为一种天然食品着色剂在活性包装和智能包装中的应用,Aliabbasi等<sup>[10]</sup>综述了姜黄素负载的多糖和/或蛋白质复合膜在食品包装行业中的应用进展,Tambawala等<sup>[11]</sup>综述了姜黄素在各种石油基、生物可降解和天然聚合物基聚合物的应用进展,但是这些研究没有过多关注姜黄素的紫外屏蔽性和光敏性。因此,本文综述了姜黄素的结构和理化性能以及近年来在食品包装中作为抗菌剂、抗氧化剂、紫外屏蔽剂、光敏剂和酸碱指示剂的作用机理及应用进展。最后,提出了目前姜黄素应用仍面临的挑战以及对于其未来研究的展望。

## 1 姜黄素的结构

姜黄素是从姜黄中分离出来的一种生物活性天然化合物,具有规则的晶体结构,由两个 $\alpha, \beta$ -不饱和羰基和一个七碳脂肪链,连接到两个酚醛邻

甲氧基 OH 的芳香环上,这种结构赋予了姜黄素疏水的性质<sup>[12]</sup>。根据甲氧基在芳香环上所处位置的不同,可分为:姜黄素、去甲氧基姜黄素和双去甲氧基姜黄素,其中姜黄素是最重要的成分,呈现黄橙色<sup>[13]</sup>。姜黄素含有两个阿魏酸芳环结构,在 420~430 nm 处出现最大紫外吸收峰,可采用紫外法测定姜黄素<sup>[14]</sup>。姜黄素的两种分子构型如图 1 所示,在酸性条件下主要是以酮的形式存在,而在碱性条件下主要是以烯醇的形式存在<sup>[15]</sup>。

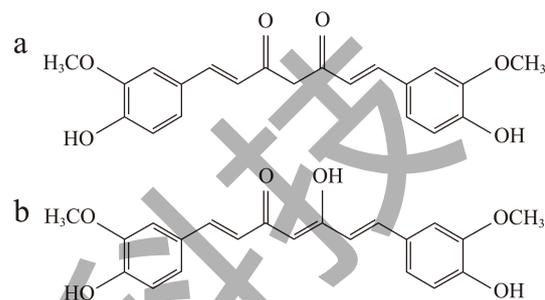


图 1 姜黄素的酮式 (a) 和烯醇式 (b) 结构示意图

Fig.1 Structural diagram of ketone (a) and enol (b) of curcumin

## 2 姜黄素的理化性能

姜黄素在室温下为固体,分子量为 368.385 g/mol,呈橙黄色针状/结晶粉末<sup>[15]</sup>。姜黄素的熔点为 183 °C,在高温下会发生降解,其含量的损失随着温度的升高而迅速增加,在高温下表现出不稳定性的性质<sup>[16]</sup>。同时,姜黄素还对中性和碱性条件比较敏感,在中性和碱性条件下由于结构变化会发生颜色的变化<sup>[17]</sup>。在碱性条件下由黄橙色变为红色,姜黄素的结构从酮型变为烯醇型,这种特性使得姜黄素成为开发智能包装系统的理想选择,以监测猪肉、鱼和虾等肉制品的质量。姜黄素水溶性差,易溶于乙醇、二甲基亚砜、甲醇和丙酮中<sup>[16]</sup>。

姜黄素来源广泛、安全无毒、生物相容性好,是一种优良的天然抗菌剂和抗氧化剂,其抗菌和抗氧化活性归因于酚羟基的存在<sup>[18,19]</sup>。姜黄素由于共轭  $\pi$  电子、相邻碳碳双键和羰基的相互作用,可以在大范围内有效吸收紫外线,从而防止食物氧化<sup>[20]</sup>。姜黄素具有光敏性,可作为一种天然的光敏剂,用于食品智能包装<sup>[21]</sup>。姜黄素可以作为抗菌剂<sup>[18]</sup>、抗氧化剂<sup>[19]</sup>、紫外线屏蔽剂<sup>[20]</sup>、光敏剂<sup>[21]</sup>和酸碱指示剂<sup>[17]</sup>在食品包装中应用,起到保持食品感官、提高食品食用价值、延长食品货架期、实时监测食品新鲜程度等作用<sup>[22,23]</sup>。

### 3 姜黄素在活性包装中的应用进展

活性包装指通过将抗菌剂、抗氧化剂等活性物质加入到包装系统中,可以有效延缓或阻止微生物腐败、减少氧化、屏蔽紫外线等提高食品安全和品质的一种包装体系,是由消费者对高质量、安全、天然食品的需求驱动的<sup>[24]</sup>。姜黄素具有抗菌、抗氧化和紫外线屏蔽等功能,可以保护食品免受微生物的污染、延缓食物的腐败变质、防止紫外线引起的食品氧化,很好地用于食品活性包装。

#### 3.1 姜黄素作为抗菌剂

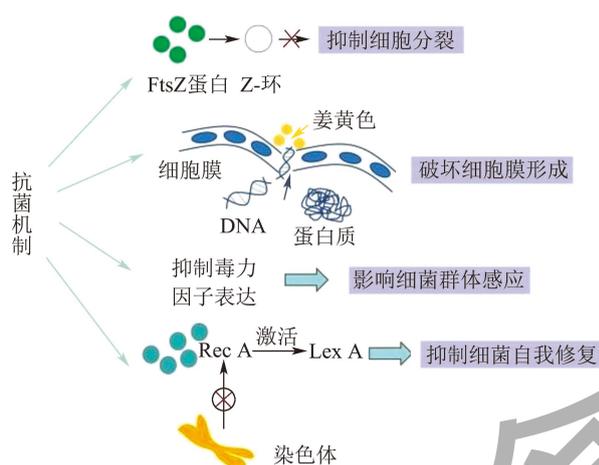


图2 姜黄素的抗菌机制

Fig.2 Antibacterial mechanism of curcumin

姜黄素通过抑制细菌生物膜的形成从而抑制大肠杆菌、李斯特菌、乳酸链球菌、金黄色葡萄球菌等细菌的生长,从而提高食品保质期。图2为姜黄素的抗菌机制,主要包括:姜黄素和细菌分裂时所需要的丝状温度敏感突变体Z结合,通过抑制Z环的形成,达到抑制细菌分裂的作用<sup>[25]</sup>;破坏细菌细胞膜的完整性,使细胞内DNA、营养物质等流失,起到抑菌的作用<sup>[26]</sup>;抑制细菌毒力因子表达,通过细菌群体感应(Quorum Sensing, QS)系统抑制细菌生物膜的形成,发挥抗菌作用;同时也可以抑制细菌自我修复机制,RecA是一种ATP-依赖蛋白,可以激活LexA这类通路靶蛋白抑制剂的自我分裂,从而抑制细菌自我修复<sup>[19]</sup>。目前大多数的研究都认为姜黄素的抑菌机制在于其分子结构中的亲脂基团进入细菌细胞膜,使细胞内的营养物质流失,导致细菌死亡,从而达到抗菌的效果。姜黄素的抗菌活性与具有酚羟基和二酮基两个活性位点有关,二酮

部分具有类烯醇结构交换,在反应过程中,其活性位点位于两个酚羟基上,反应机理主要是氢原子和电子的转移<sup>[18]</sup>。

姜黄素作为抗菌剂在食品活性包装中可以用于肉制品、果蔬等领域,通过抑制和/或杀死食物表面微生物的生长繁殖,从而提高食物的保质期。表1列举了不同形式的姜黄素对不同微生物的最小抑菌浓度,Wang等<sup>[27]</sup>以多孔淀粉和明胶作为壁材制备了姜黄素微胶囊,研究其对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌以及真菌等多种食源性致病菌的抗菌活性,最低抑菌浓度(Minimum Inhibitory Concentration, MIC)通过琼脂稀释法测定,由于细胞膜上的结构差异,姜黄素对不同菌种的抑制效果各不相同,如表1所示对真菌的抑制效果优于细菌,对金黄色葡萄球菌等革兰氏阳性菌的抑制效果优于大肠杆菌等革兰氏阴性菌,这是因为革兰氏阳性细胞的细胞质膜结构更多孔,使姜黄素更易渗透到细胞内。有学者研究了姜黄素对霉菌、革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌等19种病原体的抗菌活性,通过计算MIC来确定该活性,对大肠杆菌的MIC为1500 μg/mL,而对金黄色葡萄球菌的MIC仅为250 μg/mL<sup>[28]</sup>。不同姜黄素类化合物由于官能团结构的不同,对真菌的抑制效果也不同,通过研究姜黄素和姜黄素类化合物对白色念珠菌的抑制作用,结果表明,姜黄素抗真菌作用强于去甲氧基姜黄素,原因在于,姜黄素中的甲氧基使其更亲脂,导致其不间断地进入真菌细胞膜,从而抑制真菌生长<sup>[29]</sup>。除了采用计算MIC来评价抗菌效果,也可以采用计算最小抑菌圈的方法,通过对羧甲基壳聚糖/氧化羧甲基纤维素/姜黄素的三元复合材料抑菌试验表明,复合膜对黑曲霉的最小抑菌圈为15.33 mm,对青霉的最小抑菌圈为14.58 mm,均表现出良好的抗菌性能,姜黄素可作为良好的涂膜抗菌材料用于食品包装材料中<sup>[30]</sup>。Ayca等<sup>[31]</sup>将姜黄素加入到瓜尔胶/橙油的薄膜中,他们观察到,加入姜黄素的薄膜在草莓包装中使用了一周,通过减缓草莓水分流失和腐败变质,提高了货架寿命。综上所述,姜黄素的抗菌性能能够满足大部分食品包装的应用,由于各个菌种细胞膜的结构不同,导致了姜黄素对不同菌种的抑制效果不同,未来可以考虑将姜黄素与不同的抗菌剂(如牛至精油、丁香精油)结合协同发挥抗菌作用。

表 1 姜黄素对微生物的最小抑菌浓度

Table 1 Minimum inhibitory concentration of curcumin on microorganisms

抑制对象	材料形式	MIC /( $\mu\text{g}/\text{mL}$ )	参考 文献
黑曲霉		15.7	
青霉菌		31.3	
金黄色葡萄球菌 (G+)	微胶囊	62.5	[27]
枯草芽孢杆菌 (G+)		125	
大肠杆菌 (G-)		250	
小肠结肠炎耶尔森菌 (G-)		250	
化脓性链球菌 (G+)		31.25	
金黄色葡萄球菌 (G+)	姜黄素溶液	250	[28]
大肠杆菌 (G-)		1 500	
铜绿假单胞菌 (G-)		2 500	
金黄色葡萄球菌 (G+)		175	
枯草芽孢杆菌 (G+)	姜黄素溶液	217	[32]
铜绿假单胞菌 (G-)		163	
大肠杆菌 (G-)		293	
金黄色葡萄球菌 (G+)	脂质体	32	[33]
金黄色葡萄球菌 (G+)		86.85	
大肠杆菌 (G-)	L-精氨酸基 姜黄素	211.45	[34]
铜绿假单胞菌 (G-)		90.02	

### 3.2 姜黄素作为抗氧化剂

姜黄素是一种优良的抗氧化活性物质,其对清除活性氧、超氧阴离子、二氧化氮自由基和1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基的能力较强,可以用于活性包装材料,以保护氧化敏感食品,从而延长食品货架期,提高包装内食品质量。其抗氧化作用是因为酚羟基和亚甲基位点能提供H原子并与自由基反应(图3),羟基的数量与这种多酚类化合物清除自由基的活性成正比<sup>[35,36]</sup>。Jayaprakasha等<sup>[37]</sup>利用体外模型系统研究了姜黄素的抗氧化活性,并利用密度泛函理论阐明了其潜在机制。考虑了五种不同的机制,包括(i)从分子到自由基的单电子转移,(ii)自由基加合物形成,(iii)中性姜黄素的H原子转移,(iv)去质子化姜黄素的H原子转移,以及(v)顺序质子损失电子转移。已经观察到姜黄素通过顺序质子损失电子转移机制与DPPH自由基相互作用,而中性姜黄素的H原子转移机制是与-OCH<sub>3</sub>和其他烷氧基自由基相互作用的基础,中性姜黄素的H原子转移机制占姜黄素与-OCH<sub>3</sub>反应的95%<sup>[38]</sup>。

姜黄素作为抗氧化剂在食品活性包装中可以用于肉制品领域,防止食物氧化变质,减少总挥发性氮的产生。将姜黄素添加到塔拉胶和聚乙烯醇为基材的薄膜中,研究结果显示,在添加姜黄素后,薄膜的抗氧化能力提高,当姜黄素的质量分数从1%增加到5%时,DPPH·清除能力从7.81%提高到35.16%<sup>[39]</sup>。采用溶液浇铸法将质量分数为1%姜黄素加入到羧甲基纤维素为基材的薄膜中,添加姜黄素后,复合膜的DPPH·清除能力从1.9%提高到40.2%,ABTS<sup>+</sup>清除能力从1.5%提高到92.5%<sup>[40]</sup>。将姜黄素直接加入到膜基材中,容易失去抗氧化活性,因此可以将其加入到乳液中或制备成纳米复合物的形式,无载体姜黄素纳米颗粒的DPPH·清除能力只有27.95%,而经玉米醇溶蛋白/羧甲基壳聚糖纳米复合物包埋后的姜黄素纳米颗粒的DPPH·清除能力可达到87.12%,相比无载体姜黄素纳米颗粒的形式提高了两倍的抗氧化性能<sup>[41,42]</sup>。Abdou等<sup>[43]</sup>研究了在4℃下姜黄素纳米乳液/果胶涂层对冷冻鸡柳的质量、化学成分和感官特性的影响,与对照组相比,该涂层能使鸡肉中总挥发性氮的含量明显降低,并延缓了微生物的腐败,使保质期延长到12d。姜黄素的水溶性差和见光易分解限制了其在食品活性包装中的进一步应用,为了改善其溶解性和稳定性,未来可以继续深入研究姜黄素及其在递送过程中的修饰,比如纳米颗粒、胶束以及与其他材料之间的化学偶联,进而扩大其在食品活性包装中的应用。

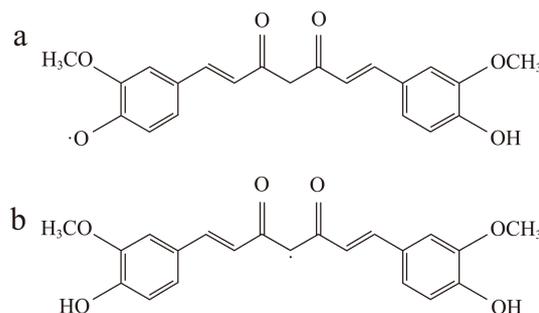


图 3 姜黄素与 DPPH 的化学反应位点

Fig.3 Chemical reaction of curcumin with DPPH

注:(a)酚羟基位点提供H原子;(b)亚甲基位点提供H原子。

### 3.3 姜黄素作为紫外线屏蔽剂

随着石油资源的稀缺和对食品安全的控制要求减少石油基塑料薄膜的使用,以及植物油等油性食物作为不可或缺的食物来源,容易氧化变质,紫外

线的照射会显著加速这一过程, 这将导致食品风味的变化, 进而危害人体健康, 因此在各种新兴的食品活性包装材料中, 具有紫外线屏蔽功能的可生物降解薄膜需求广泛<sup>[44,45]</sup>。引入天然产物, 获得延缓油性食品光氧化的紫外线屏蔽材料, 是一种环境友好型的食品技术。图4是姜黄素紫外线屏蔽的原理图, 姜黄素自身的芳香环状结构以及碳碳双键、羰基、酚羟基等官能团使其具有吸收紫外线的功能<sup>[20]</sup>。

姜黄素作为紫外屏蔽剂在食品活性包装中可以用于果蔬领域, 通过屏蔽紫外线的照射, 提高食物的货架期。将姜黄素加入到玉米醇溶蛋白/壳聚糖为基材的薄膜中用于蓝莓保鲜, 所有薄膜在紫外线区均具有较低的透过率, 薄膜的亮度随着姜黄素的加入而逐渐降低(从81.11降低到55.85), 这说明姜黄素具有良好的紫外线屏蔽能力<sup>[46]</sup>。Zhang等<sup>[47]</sup>将姜黄素接枝到氧化纳米纤维素上, 得到改性纳米纤维素, 将改性纳米纤维加入到壳聚糖中流延成膜, 复合膜与纯壳聚糖膜相比具有优良的紫外线屏蔽性能, 紫外阻隔性能提高了77.4%, 主要是因为姜黄素的酚类部分具有较强的紫外线吸收能力。将姜黄素引入蓖麻油基水性聚氨酯中作为扩链剂, 与明胶复合制备了生物活性复合膜, 随着姜黄素基水性聚氨酯的质量分数从1%增加到10%, 薄膜的紫外透过率从4.83%减少到0.02%, 几乎完全实现了紫外屏蔽<sup>[48]</sup>。目前来看, 对于姜黄素紫外线屏蔽性能的相关研究并不多, 未来可以进一步研究这一性能在食品活性包装中的应用及相关机制。

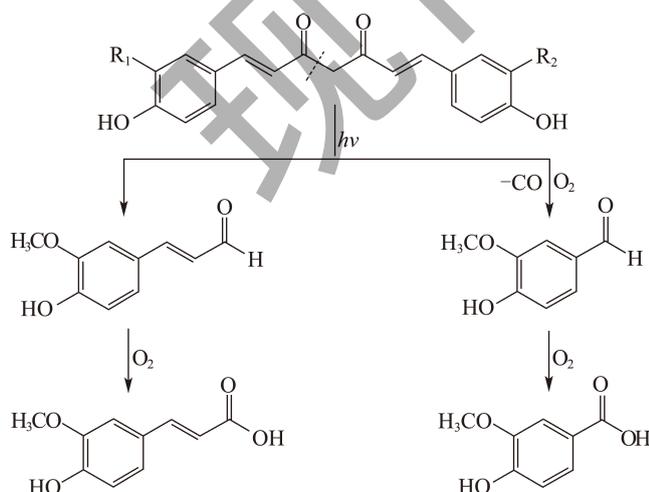


图4 姜黄素紫外屏蔽的原理

Fig.4 The principle of curcumin UV shielding

## 4 姜黄素在智能包装中的应用进展

智能包装是指在包装中引入信息、电子、传感等新技术, 为消费者提供内部食品或者食品所处环境变化的情况, 用于实时监测食品的新鲜程度, 而无需消费者对安全食品需求的多方面分析设备<sup>[49]</sup>。响应型食品包装系统属于一种新颖的智能包装, 它可以响应食物或外界环境的各种刺激(如光照、氧气、湿度、酸碱度等)实时监测食品的品质和安全。姜黄素具有光敏性, 可以作为光敏剂在特定波长的照射下产生活性氧起到智能抗菌的效果, 还具有酸碱响应性颜色变化, 可作为指示剂实时监测食品的新鲜程度。

### 4.1 姜黄素作为光敏剂

光响应智能包装材料是指经过紫外线、近红外等的照射, 其自身吸收一定光能, 并发生物理或化学性质变化的一类材料<sup>[50]</sup>。姜黄素可以在蓝光的照射下诱导光动力激活, 产生光化学反应, 作为一种光敏剂在抗菌治疗中起作用。光动力灭菌技术(Photodynamic Inactivation, PDI)是一种环保、低能耗、低成本的新型灭菌技术, 已被广泛应用于医学领域, 近年来开始出现在食品领域<sup>[51]</sup>。图5为姜黄素光动力灭菌原理示意图, 这种非热处理是基于无毒光敏剂、适当波长的光和分子氧的同时相互作用, 用特定波长的光刺激光敏剂后, 处于基态的光敏剂吸收所需波长的光跃迁至激发态进而发生一系列光化学反应, 产生活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)攻击细胞DNA、RNA、蛋白质等, 从而导致细胞死亡<sup>[52]</sup>。

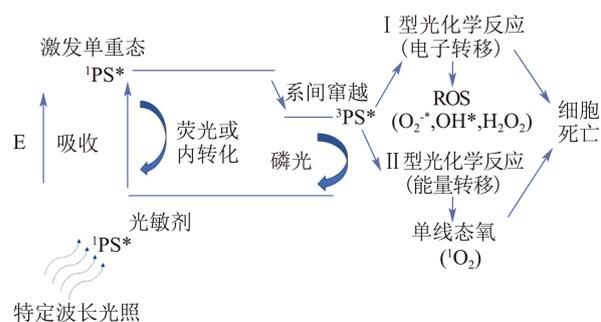


图5 姜黄素光动力灭菌原理图

Fig.5 Schematic diagram of curcumin photodynamic sterilization

蓝光激活的姜黄素并不通过直接接触细胞而发挥抑菌作用, 而是通过姜黄素的自氧化机制来实现这一作用, 这些效应导致中间产物的产生, 并增加

细胞中氧自由基的数量,从而破坏细胞的完整性。光敏剂离细菌细胞越近,活性氧对细胞完整性越有可能产生负面影响,一旦细菌细胞暴露在光下,光敏剂吸收光能,光能被激活产生活性氧,如过氧化氢、超氧化物和单线态氧。然后 ROS 氧化细胞膜成分,包括蛋白质中的胆固醇、含氮和含硫氨基酸残基,导致细菌死亡<sup>[52]</sup>。目前已经研究了姜黄素光动力灭菌技术的一些实际应用,特别是在防止细菌污染的食品保鲜方面<sup>[53]</sup>。

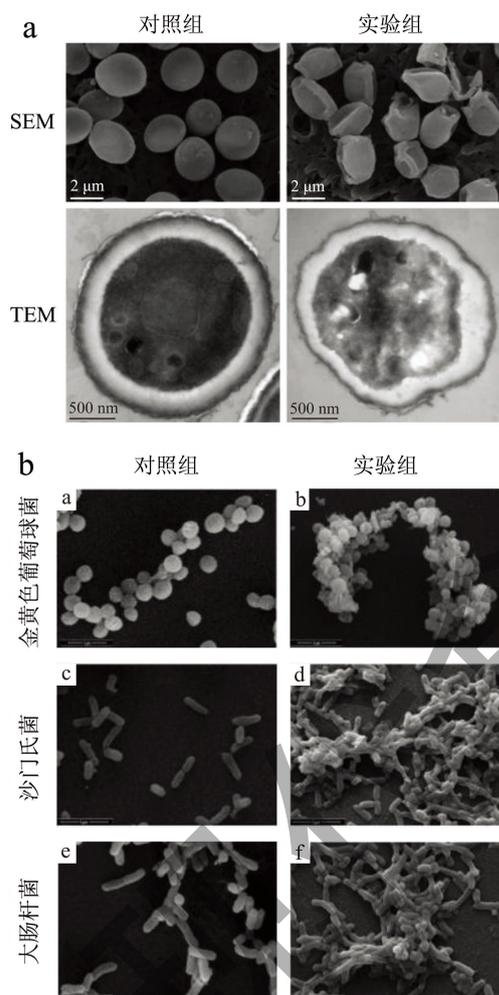


图6 (a) 利用 SEM 和 TEM 观察 PDT 对孢子形态和超微结构的破坏; (b) 利用 SEM 观察 PDT 对金黄色葡萄球菌、沙门氏菌属和大肠杆菌的破坏

**Fig.6 (a) The damage of PDT on spore morphology and ultrastructure was observed by SEM and TEM;**

**(b) The destruction of *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* and *Escherichia coli* by PDT was observed by SEM**

姜黄素作为光敏剂进行光动力灭菌在食品包装中的应用主要体现在肉制品和果蔬领域,通过计数 PDT 前后食品表面的细菌数量来进行表征光动力效果。将被金黄色葡萄球菌污染的食物样品

切成薄片,使用  $40 \mu\text{g/mL}$  的姜黄素培养样品,然后采用  $15 \text{ J/cm}^2$  波长为  $450 \text{ nm}$  的光进行照射,通过计数菌落进行微生物分析, PDT 使牛肉、鸡肉和猪肉样品上的金黄色葡萄球菌分别减少了 1.5、1.4 和  $0.6 \log \text{ CFU/mL}$ ,可以看出, PDT 可以有效减少肉类表面上的金黄色葡萄球菌污染水平,在微生物食品安全领域的应用前景广阔<sup>[54]</sup>。使用  $300 \mu\text{g/mL}$  的姜黄素培养鸡皮 5 min,然后采用  $32.1 \text{ kJ/m}^2$  波长为  $430 \text{ nm}$  的光进行照射,鸡皮上的单核增生乳杆菌和沙门氏菌分别减少了 2.9 和  $1.5 \log \text{ CFU/cm}^2$ <sup>[55]</sup>。此外,在光动力灭菌处理后,鸡皮的外观没有观察到任何视觉变化。这表明,姜黄素可以有效灭活食物上的病原体,而不会导致食物表面变色<sup>[56]</sup>。还有研究表明,姜黄素光敏化处理成功地延长了牡蛎和鲟鱼的保质期 3-4 天,并对其品质(如颜色、风味、质地、游离氨基酸含量和游离脂肪酸水平)有积极影响<sup>[57,58]</sup>。PDT 在果蔬方面的应用可以通过测试食品自身硬度的变化来进行表征, Chai 等<sup>[59]</sup>研究了在  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  下,姜黄素光敏化处理 4 min 后对新鲜切梨硬度变化的影响,贮藏 6 d 后,梨的硬度仍然较高,从  $70.78 \text{ N}$  仅下降到  $51.19 \text{ N}$ 。还有研究表明  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  下姜黄素的 PDT 显著延长了新鲜枣的保质期和质量,保质期延长了 70 d,而且在处理后并没有观察到物理化学特性的变化<sup>[60]</sup>。

除了测试最小抑菌浓度,还可以通过 SEM 和 TEM 观察食品表面细胞的变化来表征姜黄素光动力灭菌的效果。图 6a 用 SEM 和 TEM 观察了姜黄素光动力灭活前后孢子的形态和结构变化,未处理组孢子细胞壁均匀、光滑饱满,细胞核完整圆润,而光照 30 min 后,孢子表现出细胞壁萎缩破碎、空泡化以及细胞核膜模糊<sup>[61]</sup>。Laura 等<sup>[62]</sup>研究表明,与未处理的细胞相比,SEM 观察到经姜黄素光动力灭菌技术处理的金黄色葡萄球菌、沙门氏菌和大肠杆菌均出现了明显的皱纹和细胞表面破坏(图 6b)。姜黄素 PDT 除了对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌等细菌具有良好的抑制效果,其对真菌也起到一定的抑制作用。庞甲雷等<sup>[63]</sup>研究了姜黄素光动力灭菌技术对扩展青霉生长的抑制效果,姜黄素仅短暂处理就可轻微抑制菌丝的生长,而经姜黄素 PDT 处理后可显著降低扩展青霉的菌落直径,可见,光动力处理能够有效控制苹果的青霉毒害,并且有效抑制扩展青霉的生长,为开发食品保鲜技术提供了一定的理论基础。目前还需进一步的研究来更好地理解限制姜黄素光动力灭菌技术的因素,如光照分布、食物的几何形状和表面性质等。

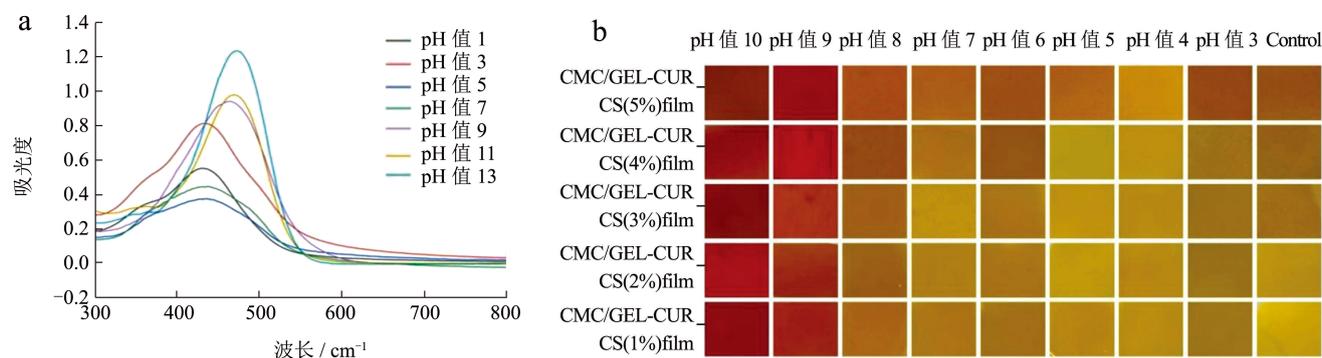


图7 (a) 不同 pH 值下姜黄素溶液的紫外-可见光谱及不同 pH 值下姜黄素溶液的相应照片; (b) 羧甲基纤维素/明胶-姜黄素-壳聚糖薄膜在不同 pH 值的蒸馏水中的颜色

Fig.7 (a) Uv-vis spectra of curcumin solution at different pH values and corresponding photos of curcumin solution at different pH value; (b) Color of carboxymethyl cellulose/gelatin-curcumin-chitosan films in distilled water at different pH values

姜黄素光动力灭菌技术的抗菌效果取决于多种因素,如姜黄素的浓度、应用方法等。这些因素在决定这种抗菌策略在食品包装中的潜力方面起着重要的作用。一般来说,姜黄素 PDI 对微生物的灭活是一个浓度依赖的过程:随着姜黄素浓度的增加,微生物存活率逐渐降低<sup>[64-66]</sup>。较高的姜黄素浓度可能促进 PDI 中 ROS 的生成,这是其抗菌活性的主要原因。但在达到一定浓度后,姜黄素浓度的进一步增加可能仅会轻微提高灭活率,甚至可能降低抗菌活性<sup>[67]</sup>。这种现象可能与光的自屏蔽效应有关,即溶液浑浊度可能会阻碍光穿透,从而在一定浓度阈值后屏蔽姜黄素与光的相互作用<sup>[68]</sup>。因此,要适当控制食品中姜黄素的浓度,避免产生自屏蔽效应。将姜黄素作为光敏剂用于实际应用中主要有两种方法:一种是将食品直接浸入姜黄素溶液中,另一种是在光辐射前向食品表面喷洒或添加姜黄素。国标中规定食物中姜黄素的最大剂量不超过 0.7 g/kg,总的来说,这两种方法都可以有效灭活微生物<sup>[69]</sup>。但是,一些食物,如谷物和肉制品不适合长期浸泡,相比之下,喷涂方法不仅不会对食品质量产生影响,而且在食品表面提供了更均匀的涂层,不污染姜黄素溶液。因此,采用喷涂法更有利于姜黄素在食品行业的广泛应用。

#### 4.2 姜黄素作为酸碱指示剂

在食品腐败变质过程中,果蔬由于受到细菌真菌的感染,会代谢产生乳酸、乙酸、苹果酸等酸性物质,导致食品局部微环境的 pH 值降低;肉制品会随着储存时间的增加,在微生物的作用下产生挥发性碱性氮等碱性物质,导致表面 pH 值升高<sup>[70]</sup>。姜

黄素通过对食品腐败和/或外界环境变化引起的 pH 值变化作出反应,并显示出颜色变化,可以作为一种比色酸碱指示剂,实时监测食品储存过程的品质变化。姜黄素的  $\beta$ -二酮链上的 H 原子可以发生分子内转移,因此其分子结构以酮-烯醇互变异构体的形式存在,在酸性和中性水溶液中主要是以酮的形式存在,而在碱性水溶液中则主要是以烯醇的形式存在<sup>[15]</sup>。一般来说,在酸性和中性条件下姜黄素溶液的颜色是亮黄色的,当 pH 值增加到碱性条件时,溶液的颜色变为红色,并且随着 pH 值的增加红色逐渐加深。

姜黄素作为酸碱指示剂在食品智能包装中可以用于监测水果和肉制品的新鲜程度,智能指示膜的颜色差值可以根据包装上的颜色变化参考来判断食物的品质。Li 等<sup>[71]</sup>制备了姜黄素和细菌纤维素纳米纤维的魔芋葡甘聚糖基智能薄膜,随着包装牛肉的变质,薄膜颜色从黄色逐渐变红,表明该薄膜可以作为肉类的 pH 比色指示剂,此外,从图 7a 的紫外-可见光谱分析可以看出,姜黄素的吸收峰随着 pH 值的升高从 428 nm 移动到 472 nm,峰位置的红移与姜黄素在不同 pH 值下的可逆结构转变有关。刘迪<sup>[72]</sup>以辛烯基琥珀酸变性淀粉作为皮克林乳液的固体粒子包埋姜黄素制备成包装膜,对巴沙鱼的腐败产生了变色响应,随着 pH 值从 3.0 增加到 10.0,姜黄素的颜色从黄色变为红色。由于姜黄素见光容易分解,所以通常将其封装起来制备成微胶囊的形式以更好地监测食物的腐败程度。Liu 等<sup>[73]</sup>制备了明胶/姜黄素/壳聚糖微胶囊,将微胶囊加入到羧甲基纤维素基薄膜中来监测食物的新鲜度,如图 7b 所示,当 pH 值为 3~5 时,复合膜的颜色由暗变亮,

再由亮变暗, pH 值为 5~7 时再变亮, 在碱性条件下, 膜的红移明显, 这是由于姜黄素的去质子化引起的。Zhang 等<sup>[74]</sup>将姜黄素加入到聚乙烯醇薄膜中, 用于虾肉的品质监测, 建立了薄膜颜色、挥发性碱性氮含量和色差值之间的联系, 虾的挥发性碱性氮含量与色差值呈正相关关系。这些智能系统将有助于提高食品安全和保质期, 为消费者提供更直观、更精准的食物新鲜程度。

姜黄素响应酸碱变化的颜色区分度不大, 智能指示食品品质变化精度和灵敏度要小于传感器, 可以将姜黄素与其他天然指示剂(如花青素、甜菜素)混合, 丰富酸碱指示剂的颜色变化, 从而更好地判断食品品质的新鲜度区间。此外, 贮藏环境的光线、温度和氧气等影响姜黄素的稳定性, 从而间接影响其响应酸碱变化的灵敏度和精度, 可以采用封装(如乳液、微胶囊等形式)提高姜黄素作为指示剂的稳定性, 同时也可以通过将姜黄素与膜基材进行交联等来提高其稳定性。目前姜黄素的显色规律多是通过直接将制备的指示标签浸泡在具有不同 pH 值的缓冲液中进行测定和分析的, 并未建立微生物生长/食品 pH/指示标签的颜色三者之间的联系, 也未分析微生物生长与颜色变化的规律, 使得利用姜黄素制备的指示标签的实际应用和准确显示食品腐败变质程度受到限制, 这也是未来需要详细研究的一个内容。

## 5 结论与展望

姜黄素作为一种天然的食品保鲜剂, 具有安全无毒、抗菌、抗氧化、紫外屏蔽性、光敏性以及酸碱响应变色等优点, 在食品包装的应用上具有很大的发展前景。本文主要阐述了姜黄素的结构和理化性能, 以及在食品包装中作为抗菌剂、抗氧化剂、紫外屏蔽剂、光敏剂和酸碱指示剂的作用机理和应用进展, 姜黄素可以通过防止脂质氧化和限制微生物的生长来延长食品货架期, 并作为实时评价包装食品安全和质量的指示材料。然而, 姜黄素在提高稳定性、水溶性以及理解抗菌、抗氧化机理等方面有待更全面的研究, 以扩大姜黄素在食品包装方面的应用范围。

基于姜黄素在食品包装中的研究和应用现状, 对其未来研究提出了以下几点展望: (1) 未来可以考虑将姜黄素与不同的抗菌剂(如牛至精油、丁香精油)结合协同发挥抗菌作用。(2) 加强对姜黄素

抗菌、抗氧化机理的研究, 可以从抗菌、抗氧化过程中姜黄素结构的微观变化作为切入点, 建立姜黄素的微观结构与功能特性的相关性。(3) 进一步开发姜黄素在食品包装中的应用, 目前对姜黄素的应用大多集中于其抗菌、抗氧化性, 可以开发其光敏性、紫外线屏蔽性等其他功能在食品工业中的应用。(4) 姜黄素的低水溶性和不稳定性限制了其在食品包装中的应用, 可以采用纳米粒子对其进行封装, 制备成乳液或微胶囊的形式。(5) 目前并未建立微生物生长/食品 pH/指示标签的颜色三者之间的联系, 也未分析微生物生长与颜色变化的规律, 使得利用姜黄素制备的指示标签的实际应用和准确显示食品腐败变质程度受到限制, 这也是未来需要详细研究的一个内容。研究姜黄素在食品包装中的应用进展, 有利于促进其在食品行业中的进一步发展, 从而解决人民密切关注的食品安全问题, 紧跟“健康中国”的伟大战略。

## 参考文献

- [1] PASQUALE R, VITTORIO C. Editorial: Microbiological Safety of Foods [J]. Foods, 2021, 10(1): 53.
- [2] LEE W R. Extraintestinal foodborne pathogens [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2020, 11(1): 275-294.
- [3] MONICA G, LYDIA F, ARMANDO C, et al. Relationships between food and diseases: What to know to ensure food safety [J]. Food Research International, 2020, 137: 109414.
- [4] HU X J, LU C, HOWYIN T, et al. Active food packaging made of biopolymer-based composites[J]. Materials, 2023, 16(1): 279.
- [5] SHISHODIA S, SETHI G, AGGARWAL B B. Curcumin: getting back to the roots [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2005, 1056(1): 206-217.
- [6] 陈梦奇,周鸣睿,韩娅红.姜黄素在食品中的应用研究进展[J].中国食品添加剂, 2022,33(10):292-300.
- [7] 黄浩河,黄崇杏,张霖雲,等.姜黄素在食品保鲜中应用的研究进展[J].食品工业科技,2020,41(7):320-331.
- [8] 黄星海,韦建华,钟海艺.姜黄素天然高分子智能活性包装膜研究进展[J].食品与发酵工业,2024,50(9):348-355.
- [9] ROY S, PRIYADARSHI R, EZATI P, et al. Curcumin and its uses in active and smart food packaging applications-a comprehensive review [J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131885.
- [10] ALIABBASI N, FATHI M, EMAM D Z. Curcumin: A promising bioactive agent for application in food packaging systems [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105520.

- [11] TAMBAWALA H, BATRA S, SHIRAPURE Y, et al. Curcumin-A bio-based precursor for smart and active food packaging systems: A review [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30: 2177-2208.
- [12] ANDREA A C, MAHMOOD A, ANWESHA S. Recent advances in emulsion-based delivery approaches for curcumin: From encapsulation to bioaccessibility [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 71: 155-169.
- [13] SAMAN S, ALI R, LAURENCE D M, et al. Recent advances to improve curcumin oral bioavailability [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2021, 110: 253-266.
- [14] PAYTON F, SANDUSKY P, ALWORTH W L. NMR study of the solution structure of curcumin [J]. *Journal of Natural Products*, 2007, 70(2): 143-146.
- [15] SHARMA R A, GESCHER A J, STEWARD W P. Curcumin: The story so far [J]. *European Journal of Cancer*, 2005, 41 (13): 1955-1968.
- [16] MAHESH K, DAVID J M. Recent advances in colloidal delivery systems for nutraceuticals: A case study-delivery by design of curcumin [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 557: 506-518.
- [17] 高媛,李辰钰,李春伟.花青素与姜黄素在食品包装领域的应用[J].*食品安全质量检测学报*,2022,13(16):5137-5143.
- [18] ZHENG D T, HUANG C X, HUANG H H, et al. Antibacterial mechanism of curcumin: A review [J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2020, 17(8): 171-200.
- [19] DAI C, LIN J, LI H, et al. The natural product curcumin as an antibacterial agent: Current achievements and problems [J]. *Antioxidants*, 2022, 11(3): 459.
- [20] 康顺爱.姜黄素抗紫外线辐射损伤保护作用及其机制[D].长春:吉林大学,2009.
- [21] MARAL S D, RAM M, MICHAEL E N, 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.
- [22] YAM K L, TAKHISTOV P, MILTZ J. Intelligent packaging: Concepts and applications [J]. *Journal of Food Science*, 2005, 70: R1-R10.
- [23] 胡晓亮,沈建.淡水鱼天然保鲜剂的研究进展[J].*现代食品科技*,2013,29(4):925-931.
- [24] CHANG B P, TRINH B M, TADELE D T, et al. Natural antioxidant and antimicrobial agents and processing technologies for the design of active food packaging polymers [J]. *Polymer Reviews*, 2023, 63(4): 961-1013.
- [25] DIPTI R, JAY K S, NILANJAN R, et al. Curcumin inhibits FtsZ assembly: an attractive mechanism for its antibacterial activity [J]. *Biochemical Journal*, 2008, 410(1): 147-155.
- [26] POONAM T, MADHURI S, HIMANI K, et al. Bactericidal activity of curcumin I is associated with damaging of bacterial membrane [J]. *Plos One*, 2015, 10(3): 121-133.
- [27] WANG Y, LU Z, WU H. et al. Study on the antibiotic activity of microcapsule curcumin against foodborne pathogens [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2009, 136(1): 71-74.
- [28] ARTUR A, MARCIN O, TOMASZ M K. Curcumin, a natural antimicrobial agent with strain-specific activity [J]. *Pharmaceuticals*, 2020, 13(7): 153.
- [29] ZHANG D, LUO J, YAN D, et al. Effects of two curcuminoids on *Candida albicans* [C]. *Chinese Herbal Medicines*, 2012, 4(3): 205-212.
- [30] 曹立好,陈澄,周治,等.羧甲基壳聚糖/氧化羧甲基纤维素/姜黄素复合膜的制备及其在草莓涂膜保鲜中的应用[J].*现代食品科技*, 2022,38(12):247-254.
- [31] AYCA A, CLAYTON J R, SEMIH B, et al. Characterization of curcumin incorporated guar gum/orange oil antimicrobial emulsion films [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 148: 110-120.
- [32] GUNES H, GULEN D, MUTLU R, et al. Antibacterial effects of curcumin: An *in vitro* minimum inhibitory concentration study [J]. *Toxicology and Industrial Health*, 2016, 32(2): 246-250.
- [33] 刘颖慧.姜黄素脂质体的制备及其体内外抗菌活性的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2021.
- [34] 李海鹰,邱明恒,陈健等.L-精氨酸基姜黄素衍生物的合成及抑菌性评价[J].*河北大学学报(自然科学版)*, 2021,41(2):155-160.
- [35] SANDRA L, SARA G, JULIÁN L, et al. Antioxidant activity of curcuminoids [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2019, 21: 3752-3760.
- [36] 宋立敏.姜黄素类化合物体外抗氧化作用及其构效关系研究[D].烟台:烟台大学,2018.
- [37] JAYAPRAKASHA G K, JAGANMOHAN R L, SAKARIAH K K. Antioxidant activities of curcumin, demethoxycurcumin, and bisdemethoxycurcumin [J]. *Food Chemistry*, 2006, 98(4): 720-724.
- [38] ANNIA G, RUSLÁN Á D, MARÍA T R S, et al. Role of the reacting free radicals on the antioxidant mechanism of curcumin [J]. *Chemical Physics*, 2009, 363(1-3): 13-23.
- [39] MA Q Y, REN Y M, WANG L J. Investigation of antioxidant activity and release kinetics of curcumin from tara gum/polyvinyl alcohol active film [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 70: 286-292.
- [40] SWARUP R, JONG W R. Carboxymethyl cellulose-based antioxidant and antimicrobial active packaging film incorporated with curcumin and zinc oxide [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 148: 666-676.
- [41] 李婷,刘蕾,黄敏,等.负载姜黄素的玉米醇溶蛋白-羧甲基壳聚糖纳米复合物的制备表征、体外消化及其抗氧化

- 活性[J].现代食品科技, 2022,38(12):110-117.
- [42] WU J, CHEN J, WEI Z, et al. Fabrication, evaluation, and antioxidant properties of carrier-free curcumin nanoparticles [J]. *Molecules*, 2023; 28(3): 1298.
- [43] 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.
- [44] BO H L, HYUN A C, MI R K, et al. Changes in chemical stability and bioactivities of curcumin by ultraviolet radiation [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2013, 22: 279-282.
- [45] ZOE R T, JACK W S, DIMITAR D S. Shielding from UV photodamage: Implications for surficial origins of life chemistry on the early earth [J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2021, 5(2): 239-246.
- [46] MANNI R, ZHE C, LI C, et al. Preparation of zein/chitosan/eugenol/curcumin active films for blueberry preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules* 2022, 22(3): 1054-1066.
- [47] ZHANG X H, LI Y T, GUO M M, et al. Antimicrobial and UV blocking properties of composite chitosan films with curcumin grafted cellulose nanofiber [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112(10): 63-77.
- [48] ZHANG T, ZHANG W S, DENG Y J, et al. Curcumin-based waterborne polyurethane-gelatin composite bioactive films for effective UV shielding and inhibition of oil oxidation [J]. *Food Control*, 2022, 141(10): 109-119.
- [49] 韩晓雪, 司军, 武俊峰, 等. 食品智能包装新鲜度指示剂研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(7): 173-181.
- [50] 唐裕芳. 光响应聚合物胶束结构稳定性及其光控酸敏行为[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- [51] COSSU M, LEDDA L, COSSU A. Emerging trends in the photodynamic inactivation (PDI) applied to the food decontamination [J]. *Food Research International*, 2021, 144: 110358.
- [52] YANG Q Q, ARAKAVEETIL K F, GOWOON K, et al. Antimicrobial and anticancer applications and related mechanisms of curcumin-mediated photodynamic treatments [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 97: 341-354.
- [53] 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: 109152.
- [54] THAILA Q C, KATE C B, ÉRICA B G, 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.
- [55] GAO J, MATTHEWS K R. Effects of the photosensitizer curcumin in inactivating foodborne pathogens on chicken skin [J]. *Food Control*, 2020, 109: 106959.
- [56] TORTIK N, SPAETH A, PLAETZER K. Photodynamic decontamination of foodstuff from *Staphylococcus aureus* based on novel formulations of curcumin [J]. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2014, 13: 1402-1409.
- [57] 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: 100594.
- [58] 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.
- [59] CHAI Z Y, ZHANG F, LIU B, 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.
- [60] FAHAD A A, RAM M, YASMINA S. The effect of photosensitization mediated by curcumin on storage life of fresh date (*Phoenix dactylifera* L.) fruit [J]. *Food Control*, 2018, 93: 305-309.
- [61] 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.
- [62] LAURA A D M P, ADRIANE F, CARLOS E B, et al. Effect of an antimicrobial photoinactivation approach based on a blend of curcumin and *Origanum* essential oils on the quality attributes of chilled chicken breast [J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2023, 176: 114484.
- [63] 庞甲雷, 张芳. 姜黄素光动力技术对扩展青霉生长及分泌棒曲霉素的抑制效果[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(2): 229-234.
- [64] JIANG Y, ALBERT W L, HUA H Y, et al. Photodynamic action of LED-activated curcumin against *Staphylococcus aureus* involving intracellular ROS increase and membrane damage [J]. *International Journal of Photoenergy*, 2014, 51(4): 1-7.
- [65] WANG Z, JIA Y, LI W, et al. Antimicrobial photodynamic inactivation with curcumin against *Staphylococcus saprophyticus*, *in vitro* and on fresh dough sheet [J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2021, 147: 111567.
- [66] WEI C, ZHANG F, SONG L, et al. Photosensitization effect of curcumin for controlling plant pathogen *Botrytis cinerea* in postharvest apple[J]. *Food Control*, 2021, 123: 107683.
- [67] 蒋旭, 熊思国, 彭丽, 等. 姜黄素介导光动力技术在鲜切果蔬中的应用进展[J]. *包装工程*, 2023, 44(7): 115-121.

- [68] SROKA R, HERMWILLE M, HEMB B, et al. Impact of photosensitizer parameters on the self-shielding effect in photodynamic therapy-A comparison [J]. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2017, 17: A50-A51.
- [69] GB 2760-2014, 食品安全国家标准食品添加剂使用标准[S].
- [70] 安朝霞, 苗雨阳, 杜玉婉, 等. 食品腐败变质生物因素相关机制研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(1):86-93.
- [71] LI N, YANG X B, LIN D H. Development of bacterial cellulose nanofibers/konjac glucomannan-based intelligent films loaded with curcumin for the fresh-keeping and freshness monitoring of fresh beef [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 34: 100989.
- [72] 刘迪. 姜黄素皮克林乳液淀粉基智能包装膜的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [73] LIU Y W, MA Y L, LIU Y, et al. Fabrication and characterization of pH-responsive intelligent films based on carboxymethyl cellulose and gelatin/curcumin/chitosan hybrid microcapsules for pork quality monitoring[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107224.
- [74] ZHANG J J, HUANG X W, ZOU X B, et al. A visual indicator based on curcumin with high stability for monitoring the freshness of freshwater shrimp, *Macrobrachium rosenbergii* [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 292: 110290.

现代食品科技