

姜黄素介导光动力技术在鲜切果蔬中的应用进展

蒋旭, 熊思国, 彭丽, 姜爱丽, 胡文忠

(大连民族大学 a.生命科学学院 b.生物技术与资源利用教育部重点实验室, 辽宁 大连 116600)

摘要: **目的** 通过介绍姜黄素介导光动力技术在鲜切果蔬保鲜中的应用进展, 为姜黄素介导光动力技术在鲜切果蔬的研究和应用提供合理建议。**方法** 通过研究姜黄素介导光动力技术的作用机理, 并综述国内外姜黄素介导光动力技术对鲜切果蔬品质影响的文献, 分析其在鲜切果蔬中的保鲜抑菌效果, 并介绍姜黄素介导光动力技术的影响因素和安全性, 研究其在鲜切果蔬中的应用前景。**结果** 姜黄素介导光动力技术可以有效地抑制鲜切果蔬中微生物的生长, 并保持鲜切果蔬的品质。**结论** 姜黄素介导光动力技术是一种有效的杀菌手段, 具有巨大的应用潜力, 需对其进行合理的开发利用。

关键词: 姜黄素; 光动力技术; 鲜切果蔬

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)07-0115-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.013

Application of Curcumin-mediated Photodynamic Technology in Fresh-cut Fruits and Vegetables

JIANG Xu, XIONG Si-guo, PENG Li, JIANG Ai-li, HU Wen-zhong

(a. College of Life Science b. Key Laboratory of Biotechnology and Resource Utilization, Ministry of Education, Dalian Minzu University, Liaoning Dalian 116600, China)

ABSTRACT: The work aims to provide reasonable suggestions for the research and application of curcumin-mediated photodynamic technology in fresh-cut fruits and vegetables by introducing its research progress. The action mechanism of curcumin-mediated photodynamic technology was discussed, and the literature about its effects on the quality of fresh-cut fruits and vegetables in China and abroad was reviewed. Then, the fresh-keeping and bacteriostatic effects of curcumin-mediated photodynamic technology for fresh-cut fruits and vegetables were analyzed, and its affecting factors and safety were introduced. Finally, the application prospect of curcumin-mediated photodynamic technology in fresh-cut fruits and vegetables was studied. Curcumin-mediated photodynamic technology could effectively inhibit the growth of microorganisms in fresh-cut fruits and vegetables and maintain the quality of fresh-cut fruits and vegetables. Curcumin-mediated photodynamic technology is an effective sterilization method, which has great application potential and needs to be developed and utilized reasonably.

KEY WORDS: curcumin; photodynamic technology; fresh-cut fruits and vegetables

鲜切果蔬又被称为最少加工处理果蔬, 具有便捷、新鲜、营养等特点, 广受消费者的青睐, 2021

年我国的鲜切果蔬市场需求量达到了 373.3 万 t^[1]。由于机械加工破坏了果蔬原有的组织, 其溢出的营养物

收稿日期: 2022-08-08

基金项目: 甘肃省科技计划重大项目 (21ZD4NA016-02)

作者简介: 蒋旭 (1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为采后生物学与技术。

通信作者: 姜爱丽 (1971—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为采后生物学与技术。

质及大部分果蔬表面的低酸性环境使其成为微生物生长的“天然培养基”，为食源性致病菌的侵染提供了条件^[2]。由于鲜切果蔬一般用于鲜食，可能会带来更高的食源性疾病患病风险^[3]，因此，用于鲜切果蔬的杀菌技术逐渐成为鲜切果蔬产业的研究热点。

目前，基于非热加工的物理保鲜杀菌技术广受关注^[4]。其中，光照技术是一种绿色、环保的冷杀菌技术。研究表明，红光和蓝光有助于促进果蔬的生长，延长果蔬的贮藏时间，并且能够抑制果蔬微生物的生长^[5]。光动力技术（Photodynamic technology, PDT）是一种新兴的光照杀菌技术，该技术使用发光二极管（LED）发出的蓝光对微生物产生抑制作用，并通过激发内源性光敏剂卟啉生成活性氧（Reactive oxygen species, ROS），可以诱导细菌的氧化和死亡^[6]，在抑制果蔬微生物生长的同时不影响果蔬的营养和品质。研究表明，使用LED进行蓝光处理往往需要几小时来发挥作用^[7]，由于鲜切果蔬食用具有时效性，因此可以使用安全且经济的食品级外源光敏剂姜黄素来提高PDT的杀菌效率。文中将介绍姜黄素介导PDT的作用机理，对鲜切果蔬的影响，姜黄素介导PDT的影响因素和安全性，以及其应用前景。

1 姜黄素介导 PDT

1.1 姜黄素

姜黄素（ $C_{21}H_{20}O_6$ ）的结构如图1所示。姜黄素从姜黄属植物的根茎中提取，是一种天然的多酚类物质^[8]。姜黄素具有安全无毒、对人体无副作用等特点，是国家批准使用的食品添加剂^[9]。姜黄素的水溶性和稳定性较差，在光照及碱性条件下易分解，导致其生物利用率有限^[10]。Zheng等^[11]研究表明，姜黄素具有广谱的抑菌作用，可以通过细菌的群体感应（Quorum sensing, QS）系统抑制细菌生物膜的形成；在基因水平上可以下调细菌基因表达，抑制细菌的DNA损伤反应，并与DNA相互作用，达到抑菌作用；还可以通过与微管蛋白结合来抑制细菌的细胞分裂，起到抗菌剂的作用，破坏RNA，中断蛋白质的合成，并与蛋白质相互作用。姜黄素在400~500 nm的吸收光谱中吸收蓝光，并在408~434 nm时有最大的吸收带（依赖于溶剂的极性，氢键供体和受体的性质，以及 π 键的性质）^[12]，姜黄素是一种天然的光敏剂。

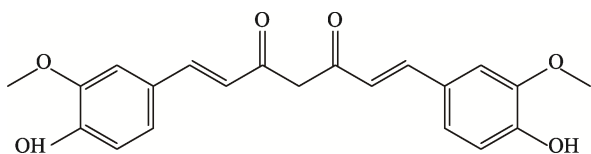


图1 姜黄素的结构式

Fig.1 Chemical structure of curcumin

1.2 姜黄素介导 PDT 的作用机理

PDT是一种特殊的光照处理技术，基于光敏剂、光源及氧气的联合作用^[13]。姜黄素作为外源性光敏剂，经适当的光源照射后会吸收光子，激发成单重态。单重态不稳定，通过系统交叉被激发成三重态，从而通过光反应产生ROS，破坏微生物细胞膜、DNA、蛋白质，靶向抑制微生物的生长^[14]。光反应分为I型和II型光化学反应^[15]。在I型光化学反应中，三重态光敏剂直接与细胞膜及生物大分子等底物发生反应，将电子或氢原子转移到氧或其他邻近分子上，产生自由基。在氧气的作用下，自由基可以产生氧化产物，或者光敏剂自由基阴离子可以将电子转移到氧气，产生超氧阴离子自由基（ $\cdot O_2^{2-}$ ），也可能与氧气发生反应，生成过氧自由基，并开始进行链式反应^[16]。在II型光化学反应中，涉及三重态光敏剂向氧分子的能量转移，生成以单线态氧为主的ROS和基态的光敏剂，ROS可以与多种易氧化的底物（如DNA、脂质、蛋白质等）相互作用^[17]。

2 姜黄素介导 PDT 对鲜切果蔬的影响

2.1 鲜切果蔬抗氧化能力

果蔬的抗氧化能力源于植物体内的抗氧化防御系统。在果蔬正常生长发育过程中，自由基与植物体内的自由基清除剂保持平衡，鲜切果蔬在受到机械损伤后，植物体内的抗氧化物质会发挥作用，清除自由基^[18]。姜黄素介导PDT可以通过调控植物体内的抗坏血酸-还原型谷胱甘肽循环及酚类物质来增强鲜切果蔬的抗氧化能力。

抗坏血酸-还原型谷胱甘肽循环是清除植物细胞中 H_2O_2 的重要途径^[19]。光照可以调控果蔬体内抗坏血酸的生物合成，Kang等^[20]研究表明，蓝光可以通过增加大白菜抗坏血酸生物合成和循环途径中的基因表达量，从而提高其抗坏血酸含量。酚类物质也是清除植物细胞中ROS等自由基的天然抗氧化剂，是果蔬在受到机械损伤后诱发苯丙烷类代谢途径所生成的次生代谢产物^[21]。酚类成分的变化与相应的酶密切相关，尤其是多酚氧化酶、过氧化物酶和苯丙氨酸解氨酶。Yu等^[22]研究表明，姜黄素介导PDT可以显著地抑制多酚氧化酶和过氧化物酶的活性，这可能是因光照辐射会引起多酚氧化酶与过氧化物酶直接发生光氧化，由ROS介导的间接光氧化改变了蛋白质结构的整体构象，从而使酶失活；另一方面，姜黄素介导PDT通过调节苯丙氨酸解氨酶的基因，增加了苯丙氨酸解氨酶的活性，最后促进了酚类物质的积累，增加了鲜切马铃薯的抗氧化活性。

2.2 鲜切果蔬微生物

果蔬经鲜切处理后，其组织结构被损害，本身的

营养物质及切割后表面所构成的低酸性环境条件促进了微生物的生长^[23]。姜黄素介导 PDT 最近已经被证实是一种可以应用于食品的抑菌技术, 并且已经显示出对微生物的广谱功效^[24]。

研究发现, 对于真菌和细菌来说, 真菌对 PDT 的敏感性低于细菌。因为存在核膜, 因此真菌的体积更大, 且 DNA 损伤风险更低^[25]。对于革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌, 革兰氏阴性菌的敏感性低于革兰氏阳性菌^[26], 这取决于两者的细胞壁组成成分的不同。革兰氏阴性菌细胞壁的外壁层由脂多糖、磷脂、脂蛋白和具有孔蛋白功能的蛋白质等组成, 可以控制各种物质的进出, 有助于渗透保护, 而革兰氏阳性菌的细胞壁由大量的肽聚糖组成, 具有较高的孔隙率。

目前, GB 29921—2021^[27]中对鲜切果蔬的 4 种致病菌(沙门氏菌、单核细胞增生李斯特氏菌、金黄色葡萄球菌、致泻大肠埃希氏菌)给出了限量标准。Keyvan 等^[28]研究发现, 沙门氏菌在 405 nm 的 LED 下处理 45 min 后被完全灭活。Huang 等^[29]研究发现, 姜黄素溶液的浓度为 0.5 $\mu\text{mol/L}$ 时, 使用 455~460 nm 的 LED 将照射剂量增加到 1.62 J/cm^2 , 单核细胞增生李斯特氏菌被完全灭活。Penha 等^[30]研究发现, 姜黄素溶液的浓度为 75 $\mu\text{mol/L}$ 时, 在 470 nm 的 LED 下处理 30 min (417 J/cm^2), 金黄色葡萄球菌和致泻大肠埃希氏菌被完全灭活。此外, 姜黄素介导 PDT 对溶血弧菌、膨胀青霉等微生物也具有显著的抑制作用^[31-32]。

2.3 鲜切果蔬感官品质

姜黄素介导 PDT 主要对鲜切果蔬的颜色、水分流失及质地产生影响。在颜色方面, 姜黄素介导 PDT 会抑制过氧化物酶和多酚氧化酶的活性, 减少醌类物质的生成, 延缓鲜切果蔬的褐变进程, 并且使用较高浓度的姜黄素溶液(1 400 $\mu\text{mol/L}$)进行处理, 其表面颜色也未发生变化^[33]。对于马铃薯及菠萝等黄色果蔬, 姜黄素还可为其提供更明亮、更鲜艳的表面颜色^[22, 34]。在水分流失方面, 姜黄素介导 PDT 因抑制了鲜切果蔬微生物的生长, 从而间接地减少了水分的流失, Lin 等^[35]研究发现, 将姜黄素溶液(50 $\mu\text{mol/L}$)喷洒在鲜切哈密瓜上, 并暴露在 460 nm 的 LED 下处理 60 min, 对照组用生理盐水处理, 在贮藏 9 d 后, PDT 处理组样品的含水量下降至初始含水量的 89.04%, 而对照组下降至初始含水量的 71.93%。在质地方面, 姜黄素介导 PDT 应用于鲜切果蔬的方式主要为浸泡处理, 这会对鲜切果蔬的硬度产生影响^[22]。

3 影响姜黄素介导 PDT 效果的因素

姜黄素介导 PDT 在鲜切果蔬中的功效取决于多种因素, 如姜黄素的浓度、孵育时间、光照、应用方式等。

3.1 姜黄素的浓度

姜黄素的浓度是影响姜黄素介导 PDT 效果的重要因素之一。目前在鲜切果蔬的研究中, 当姜黄素的浓度大于 1 $\mu\text{mol/L}$ 时, 表现出良好的抑菌效果^[24]。Chai 等^[36]研究发现, 姜黄素的浓度为 0.2~10 $\mu\text{mol/L}$ 时, PDT 对单核细胞增生李斯特氏菌的抑菌效果随着姜黄素浓度的增加而显著增加。其他一些研究也发现了相同的结果, 证明在一定范围内 PDT 的抑菌效果与姜黄素的浓度成正比。部分研究表明, 在到达特定浓度后, 增加姜黄素的浓度可能只会略微增加微生物的灭活率, 甚至可能会降低抗菌活性。Oliveira 等^[37]研究了当姜黄素的质量浓度为 1~50 mg/L 时, PDT 在姜黄素的质量浓度超过 5 mg/L 时, 其抑菌效果开始下降, 并且在其质量浓度达到 50 mg/L 时, 抑菌效果显著下降。由此可见, 在处理鲜切果蔬时需要筛选出适宜的姜黄素浓度。

3.2 姜黄素孵育时间

姜黄素溶液的化学性质不稳定, 经光照后会发生自氧化反应, 从而迅速水解, 使溶液渐渐变为无色, 其作用也渐渐减弱^[34]。Tao 等^[38]研究发现, 在姜黄素溶液中孵育 10 min 具有显著的抑菌效果, 但是延长时间到 20 min 和 30 min 时无明显变化。Chai 等^[36]研究发现, 在姜黄素溶液中孵育 0~120 min 时, 孵育时间对 PDT 的效果影响不大, 在 120 min 时的抑菌效果最差。

3.3 光照

光源是 PDT 的 3 个重要组成部分之一, 光照也是影响姜黄素介导 PDT 效果的重要因素之一。目前, 主要采用波长为 400~500 nm 的发光二极管(LED)对样品进行处理, 对光照的研究主要集中于光照时间和光照强度。

一般来说, 姜黄素介导 PDT 的效果随着光照时间的增加而增大。Song 等^[32]研究发现, 随着光照时间的增加, 对扩展青霉孢子萌发和菌丝生长的抑制率均显著增加, 但是在光照时间达到 15 min 后, 抑菌效果减慢。王洋等^[39]研究发现, 在 PDT 的光照时间为 0~40 min 时, 光照时间为 20 min 对荧光假单胞菌的抑菌效果最好。这可能是因光照时间过长可能会使环境温度增加, 这有利于荧光假单胞菌的生长繁殖。光照强度是影响 PDT 效果的另一重要因素。Yang 等^[40]研究发现, 姜黄素介导 PDT 对腐生葡萄球菌的抑制效果随着光照强度的增加而增加。由此可见, 对鲜切果蔬进行 PDT 处理时, 需要找到适宜的光照强度和光照时间, 以增加 PDT 的处理效率, 减少使用成本。

3.4 姜黄素的应用方式

目前, 姜黄素的应用方式主要包括浸泡、喷洒、

雾化等。姜黄素介导 PDT 一般采用浸泡处理,该方法可以将微生物与姜黄素充分反应,扩大了姜黄素介导 PDT 的灭菌效果。不过,并不是所有处理对象都适合于长期浸泡,这样会影响食品的质量,降低消费者的接受度。喷洒可以将姜黄素更均匀地覆盖在食物表面,其厚度可控,在保证杀菌效果的同时,减少了姜黄素溶液的使用量,而且喷洒和雾化系统更有利于工业化应用。通过气雾化技术将酸化的姜黄素溶液沉淀在食品上的方法,相较于传统喷洒技术,具有同样的细菌灭活能力,并且姜黄素沉淀在食品上的体积仅为传统喷洒技术的 1/10,可以最大限度地减少消毒液的使用量^[41]。

4 姜黄素介导 PDT 的安全性

目前,在姜黄素介导 PDT 相关的研究中通常没有评估其在鲜切果蔬中是否具有不良反应,以及相应的危害风险。

外源光敏剂姜黄素具有出色的安全性,每日的安全剂量为 4~8 g,临床实验证明每日摄入 12 g 姜黄素无害^[42]。目前研究发现,姜黄素在蓝光下进行反应时会迅速降解,结束后在食物中一般不会残留姜黄素^[34],而且姜黄素的浓度通常控制在 100 $\mu\text{mol/L}$ 以内的低浓度区间,对人体无不利影响。目前,并无研究表明,姜黄素介导 PDT 会对鲜切果蔬具有潜在的负面影响,后续需要深入评估,以便进行推广和商用。

5 姜黄素介导 PDT 的应用前景和展望

食源性致病菌是造成食源性疾病的主要原因,尤其是消费者购买食品后往往只会进行清洗处理,这不足以清除食品上的致病微生物。已经证明,姜黄素介导 PDT 可以有效控制生鲜农产品、水产品的多种致病微生物和腐败微生物,并且对食品无负面影响^[43]。姜黄素介导 PDT 的处理时间短,可以将其应用在食品的包装阶段和零售商销售阶段,并进行持续或间歇的光照处理,姜黄素还可以在加工线上通过浸渍、喷洒等方式应用于鲜切果蔬中。由于姜黄素具有水溶性低、易降解和生物利用度低等缺点^[44],因此其应用和推广目前面临困难。近期发现,将姜黄素介导 PDT 与其他技术相结合,为其进一步应用和发展提供了便利性和实用性。

5.1 姜黄素介导 PDT 与纳米技术相结合

姜黄素的纳米递送体系包括纳米粒、脂质体及聚合物胶束等^[45]。通过纳米载体,使得姜黄素免于在生理环境中降解,同时以更具有生物相容性的形式递送姜黄素。Gomez-Estaca 等^[46]以玉米蛋白聚合物为原料制作的纳米颗粒,经过了 3 个月的黑暗贮藏,纳米颗粒无显著变化。Huang 等^[47]研究发现,

负载姜黄素的纳米有机框架的化学稳定性是游离姜黄素的 4.9 倍以上,并可以有效地延长火龙果的货架期。Wu 等^[48]将牛奶和磷虾的磷脂与胆固醇相混合,制备了姜黄素负载纳米脂质体,具有较好的包封效率(牛乳磷脂的包封率为 84.78%,磷虾磷脂的包封率为 75.75%)。姜黄素在胆固醇作用下,提高了它在不适宜条件下的稳定性,并有效地对金黄色葡萄球菌产生抗菌作用。

5.2 姜黄素介导 PDT 与活性包装技术相结合

活性包装薄膜采用多糖、蛋白质和脂质等可生物降解的聚合物制成,并且掺入活性物质,来增加膜的功能特性^[49]。姜黄素已被掺入生物聚合物薄膜(如壳聚糖、淀粉、果胶、羟丙基甲基纤维素、明胶等)中,以增加薄膜的功能,例如紫外线阻隔性能、气体阻隔性能、抗菌作用等^[50]。

Wang 等^[51]将姜黄素与蛋白质相结合制备食品包装膜,并用于 PDT 处理,在 450~460 nm 的 LED 下处理 70 min,姜黄素的浓度为 0.2 mmol/L 时的抑菌效果显著优于无姜黄素的对照组,且随着姜黄素浓度的增加,其抑菌效果也随之增大。Cai 等^[52]使用纳米载体负载姜黄素掺入聚己内酯薄膜中,表现出 pH 值和光的 2 种响应方式。当纳米颗粒的负载率为 15% 时,使用 420~430 nm 蓝光进行照射,大肠杆菌的抑制率接近 99.9%,而未进行光照处理的大肠杆菌抑制率为 16.9%。Mahmud 等^[53]研究表明,使用 PVA/姜黄素溶液制成的静电纺丝纤维垫,可以实现姜黄素的控制释放,后续也可以进行深入研究。

6 结语

在鲜切果蔬的处理方式中,姜黄素介导 PDT 是一种新兴的非热杀菌技术。姜黄素介导 PDT 具有安全、高效等特点,且适用于鲜切果蔬加工线的多个阶段,在杀菌的基础上对鲜切果蔬的抗氧化能力及感官品质具有积极作用。目前,针对姜黄素介导 PDT 是否会引起鲜切果蔬营养成分的改变及是否产生不良反应的相关研究较少,后续需重点关注。姜黄素与纳米技术、活性包装技术的结合也增加了其生物利用度,为后续商用大规模批量处理鲜切果蔬提供了便利性和实用性。

参考文献:

- [1] 马金晶,李凤琴,黄敏毅,等.鲜切果蔬中食源性致病菌污染研究进展[J].食品安全质量检测学报,2021,12(7):2591-2599.
MA Jin-jing, LI Feng-qin, HUANG Min-yi, et al. Research Progress of Food-Borne Pathogens Contamina-

- tion in Fresh-Cut Fruits and Vegetables[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(7): 2591-2599.
- [2] 王佳宇, 胡文忠, 于皎雪, 等. 紫外线杀菌技术在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. *包装工程*, 2021, 42(13): 85-92.
WANG Jia-yu, HU Wen-zhong, YU Jiao-xue, et al. Research Progress in the Development of Ultraviolet Sterilization Technology for Fresh-Cut Fruits and Vegetables[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(13): 85-92.
- [3] YU He-yao, NEAL J A, SIRSAT S A. Consumers' Food Safety Risk Perceptions and Willingness to Pay for Fresh-Cut Produce with Lower Risk of Foodborne Illness[J]. *Food Control*, 2018, 86: 83-89.
- [4] 胡晓敏, 黄彭, 刘雯欣, 等. 非热物理技术在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(10): 278-284.
HU Xiao-min, HUANG Peng, LIU Wen-xin, et al. Application of Non-Thermal Physical Technologies in Fresh-Cut Fruits and Vegetables Preservation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(10): 278-284.
- [5] 曹婷婷, 曾凯芳, 邓丽莉. 光照技术在果蔬采后贮藏保鲜中的应用研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(10): 314-320.
CAO Ting-ting, ZENG Kai-fang, DENG Li-li. Research Progress on the Application of Light Irradiation in Postharvest Storage and Preservation of Fruits and Vegetables[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(10): 314-320.
- [6] WANG Yu-cheng, WANG Ying, WANG Yu-guang, et al. Antimicrobial Blue Light Inactivation of Pathogenic Microbes: State of the Art[J]. *Drug Resistance Updates*, 2017, 33-35: 1-22.
- [7] LIAO Hui-ling, ALFEREZ F, BURNS J K. Assessment of Blue Light Treatments on Citrus Postharvest Diseases[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 81: 81-88.
- [8] XIANG De-biao, ZHANG Kai-qiang, ZENG Ya-ling, et al. Curcumin[J]. *Medicine*, 2020, 99(2): e18467.
- [9] GB 2760—2011, 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准[S].
GB 2760-2011, National Food Safety Standards - Uses of Food Additives[S].
- [10] HEGER M, VAN GOLEN R F, BROEKGAARDEN M, et al. The Molecular Basis for the Pharmacokinetics and Pharmacodynamics of Curcumin and Its Metabolites in Relation to Cancer[J]. *Pharmacological Reviews*, 2013, 66(1): 222-307.
- [11] ZHENG Dan-tong, HUANG Chong-xing, HUANG Hao-he, et al. Antibacterial Mechanism of Curcumin: A Review[J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2020, 17(8): e2000171.
- [12] SEIDI DAMYEH 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.
- [13] NICULESCU A G, GRUMEZESCU A M. Photodynamic Therapy—An Up-to-Date Review[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3626.
- [14] 孟媛媛, 刘海泉, 潘迎捷, 等. 光动力杀菌机制及在食品应用中的优势与不足[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(22): 414-421.
MENG Yuan-yuan, LIU Hai-quan, PAN Ying-jie, et al. Mechanism of Photodynamic Inactivation and Its Advantages and Disadvantages in Food Applications[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(22): 414-421.
- [15] 周子伊, 任彪, 周学东. 姜黄素介导光动力治疗口腔感染性疾病的研究进展[J]. *口腔疾病防治*, 2022, 30(8): 588-593.
ZHOU Zi-yi, REN Biao, ZHOU Xue-dong. Research Progress on Curcumin-Mediated Photodynamic Therapy for Oral Infectious Diseases[J]. *Journal of Prevention and Treatment for Stomatological Diseases*, 2022, 30(8): 588-593.
- [16] LIU Dan, GU Wei-ming, WANG Lu, et al. Photodynamic Inactivation and Its Application in Food Preservation[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021: 1-15.
- [17] BACELLAR I O L, TSUBONE T M, PAVANI C, et al. Photodynamic Efficiency: From Molecular Photochemistry to Cell Death[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, 16(9): 20523-20559.
- [18] 陈守江. 果蔬贮藏过程中总抗氧化能力与后熟衰老生理的关系研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2003: 13.
CHEN Shou-jiang. Studies on the Relationship Between Total Antioxidant Activity and Physiology of Ripening and Senescence During Storage of Fruits and Vegetables[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2003: 13.
- [19] 杨乾, 范存斐, 王毅, 等. 水杨酸处理诱导采后甜瓜抗坏血酸-还原型谷胱甘肽循环代谢清除过氧化氢的作用及机制[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 243-249.
YANG Qian, FAN Cun-fei, WANG Yi, et al. Role and Underlying Mechanism of the Ascorbic Acid-Reduced Glutathione Cycle in Scavenging Hydrogen Peroxide in Postharvest Melons Induced by Salicylic Acid[J]. *Food*

- Science, 2021, 42(1): 243-249.
- [20] KANG C H, YOON E K, MUTHUSAMY M, et al. Blue LED Light Irradiation Enhances L-Ascorbic Acid Content while Reducing Reactive Oxygen Species Accumulation in Chinese Cabbage Seedlings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 261: 108924.
- [21] 高红豆, 胡文忠, 管玉格, 等. 鲜切果蔬酚类物质的产生及其调控研究进展[J]. *食品工业*, 2020, 41(4): 212-216.
- GAO Hong-dou, HU Wen-zhong, GUAN Yu-ge, et al. The Advances of the Production and Regulation in Phenols of Fresh-Cut Fruits and Vegetables[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(4): 212-216.
- [22] YU Jin-shen, ZHANG Fang, ZHANG Jing, et al. Effect of Photodynamic Treatments on Quality and Antioxidant Properties of Fresh-Cut Potatoes[J]. *Food Chemistry*, 2021, 362: 130224.
- [23] 张晓芳, 胡文忠, 刘程惠, 等. 清洗技术对鲜切果蔬微生物与品质影响的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(13): 336-342.
- ZHANG Xiao-fang, HU Wen-zhong, LIU Cheng-hui, et al. Research Progress on Effects of Cleaning Technology on Microorganisms and Quality of Fresh-Cut Fruits and Vegetables[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(13): 336-342.
- [24] YU Xin-peng, ZOU Yuan, ZHANG Zi-qian, et al. Recent Advances in Antimicrobial Applications of Curcumin-Mediated Photodynamic Inactivation in Foods[J]. *Food Control*, 2022, 138: 108986.
- [25] DO PRADO-SILVA L, BRANCINI G T P, BRAGA G Ú L, et al. Antimicrobial Photodynamic Treatment (aPDT) as an Innovative Technology to Control Spoilage and Pathogenic Microorganisms in Agri-Food Products: An Updated Review[J]. *Food Control*, 2022, 132: 108527.
- [26] MUNIR Z, BANCHE G, CAVALLO L, et al. Exploitation of the Antibacterial Properties of Photoactivated Curcumin as 'Green' Tool for Food Preservation[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(5): 2600.
- [27] GB 29921—2021, 食品安全国家标准 预包装食品中致病菌限量[S].
- GB 29921-2021, National Food Safety Standard - Limit of Pathogen in Prepackaged Foods[S].
- [28] KEYVAN E, KAHRAMAN H A, TUTUN H, et al. Curcumin and Carvacrol Mediated Photodynamic Inactivation with 405 nm Light Emitting Diodes (LEDs) on *Salmonella Enteritidis*[J]. *Food Science and Technology International*, 2022. DOI:10.1177/10820132221114763.
- [29] HUANG Jia-ming, CHEN Bo-wen, LI Hui-hui, et al. Enhanced Antibacterial and Antibiofilm Functions of the Curcumin-Mediated Photodynamic Inactivation Against *Listeria Monocytogenes*[J]. *Food Control*, 2020, 108: 106886.
- [30] PENHA C B, BONIN E, DA SILVA A F, et al. Photodynamic Inactivation of Foodborne and Food Spoilage Bacteria by Curcumin[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 76: 198-202.
- [31] WU Juan, MOU Hai-jin, XUE Chang-hu, et al. Photodynamic Effect of Curcumin on *Vibrio Parahaemolyticus*[J]. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2016, 15: 34-39.
- [32] SONG Li-li, ZHANG Fang, YU Jin-shen, et al. Antifungal Effect and Possible Mechanism of Curcumin Mediated Photodynamic Technology Against *Penicillium Expansum*[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 167: 111234.
- [33] AL-ASMARI F, MEREDDY R, SULTANBAWA Y. The Effect of Photosensitization Mediated by Curcumin on Storage Life of Fresh Date (*Phoenix Dactylifera* L.) Fruit[J]. *Food Control*, 2018, 93: 305-309.
- [34] 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.
- [35] LIN Yi-lin, HU Jia-miao, LI Shi-yang, et al. Curcumin-Based Photodynamic Sterilization for Preservation of Fresh-Cut Hami Melon[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2019, 24(13): 2374.
- [36] CHAI Zheng-yuan, ZHANG Fang, LIU Bing-jie, et al. Antibacterial Mechanism and Preservation Effect of Curcumin-Based Photodynamic Extends the Shelf Life of Fresh-Cut Pears[J]. *LWT*, 2021, 142: 110941.
- [37] 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.
- [38] TAO Ran, ZHANG Fang, TANG Qing-juan, et al. Effects of Curcumin-Based Photodynamic Treatment on the Storage Quality of Fresh-Cut Apples[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 415-421.
- [39] 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 Yang, ZHAO Yu-ling, CHEN Meng-han, et al.

- Photodynamic Inactivation Effect of Curcumin Combined with Ethylene Diamine Tetraacetic Acid on *Pseudomonas Fluorescens*[J]. *Food Science*, 2022, 43(21): 8-15.
- [40] YANG Wei, WANG Zi-yuan, LI Qing, et al. Photodynamic Inactivation Using Natural Bioactive Compound Prevents and Disrupts the Biofilm Produced by *Staphylococcus Saprophyticus*[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2021, 26(16): 4713.
- [41] DE OLIVEIRA E F, TIKEKAR R, NITIN N. Combination of Aerosolized Curcumin and UV-a Light for the Inactivation of Bacteria on Fresh Produce Surfaces[J]. *Food Research International*, 2018, 114: 133-139.
- [42] GUPTA S C, PATCHVA S, AGGARWAL B B. Therapeutic Roles of Curcumin: Lessons Learned from Clinical Trials[J]. *The AAPS Journal*, 2013, 15(1): 195-218.
- [43] 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.
- [44] 李丽, 陈鹤, 匡艳青, 等. 姜黄素制剂研究进展[J]. *广州化工*, 2021, 49(16): 1-3.
LI Li, CHEN He, KUANG Yan-qing, et al. Research Progress on Curcumin Preparation[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2021, 49(16): 1-3.
- [45] 刘肖莹, 杨婷惠, 尚广亮, 等. 姜黄素纳米递药系统的构建及性能表征[J]. *中草药*, 2019, 50(16): 3802-3807.
LIU Xiao-ying, YANG Ting-hui, SHANG Guang-liang, et al. Preparation and Performance Characterization of Curcumin Nanoparticles[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2019, 50(16): 3802-3807.
- [46] GOMEZ-ESTACA J, BALAGUER M P, GAVARA R, et al. Formation of Zein Nanoparticles by Electrohydrodynamic Atomization: Effect of the Main Processing Variables and Suitability for Encapsulating the Food Coloring and Active Ingredient Curcumin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 28(1): 82-91.
- [47] HUANG Guo-huan, YAN Yu-ping, XU Dan-xia, et al. Curcumin-Loaded nanoMOFs@CMFP: A Biological Preserving Paste with Antibacterial Properties and Long-Acting, Controllable Release[J]. *Food Chemistry*, 2021, 337: 127987.
- [48] WU Yu-jie, WANG Ke, LIU Qin-ru, et al. Selective Antibacterial Activities and Storage Stability of Curcumin-Loaded Nanoliposomes Prepared from Bovine Milk Phospholipid and Cholesterol[J]. *Food Chemistry*, 2022, 367: 130700.
- [49] OLIVEIRA FILHO J G, EGEA M B. Edible Bioactive Film with Curcumin: A Potential Functional Packaging? [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(10): 5638.
- [50] 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.
- [51] WANG Fan, WANG Rong-han, PAN Ying-jie, et al. Gelatin/Chitosan Films Incorporated with Curcumin Based on Photodynamic Inactivation Technology for Antibacterial Food Packaging[J]. *Polymers*, 2022, 14(8): 1600.
- [52] CAI Ying, GUAN Jing-wei, WANG Wen, et al. PH and Light-Responsive Polycaprolactone/Curcumin@zif-8 Composite Films with Enhanced Antibacterial Activity[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(8): 3550-3562.
- [53] MAHMUD M M, ZAMAN S, PERVEEN A, et al. Controlled Release of Curcumin from Electrospun Fiber Mats with Antibacterial Activity[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2020, 55: 101386.

责任编辑:彭颀