网络出版时间:2025-09-10 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.03.017

姜黄素介导光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌作用

俞皖,张帅,熊晓辉,崔晓文
(南京工业大学 食品与轻工学院,江苏 南京 211816)

[摘 要] 【目的】探究姜黄素介导光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果和杀菌机理,为该杀菌技术在食品微生物安全领域的实际应用提供参考。【方法】采用单因素试验,研究不同光照时间和不同姜黄素浓度对沙门氏菌的杀菌效果,通过扫描电镜观察姜黄素介导的光动力杀菌技术处理不同时间对沙门氏菌形态的影响,用碘化丙啶染色法测定杀菌处理不同时间对沙门氏菌细胞凋亡的影响,并用 JC-1 染色法测定其对沙门氏菌细胞膜电位的影响,用紫外分光光度计测定处理不同时间后沙门氏菌在 260 和 280 nm 处的吸光度值,明确姜黄素介导的光动力杀菌技术对沙门氏菌核酸和蛋白质泄漏的影响。【结果】随着光照时间的延长,姜黄素介导的光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果显著增强,当光照时间为 15 min 时,沙门氏菌的菌落总数仅为 $10^{2.670}$ CFU/mL。姜黄素介导的光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果并未完全随着姜黄素浓度的升高而增加,当姜黄素浓度高于 20 μmol/L 时,其对沙门氏菌的杀菌效果无显著性变化。随着姜黄素介导的光动力杀菌技术处理时间的延长,扫描电镜观察结果显示,沙门氏菌细胞表面塌陷、皱缩、内容物流出的现象越发严重;碘化丙啶染色结果显示,红色荧光逐渐增强,表明沙门氏菌凋亡率逐渐增加;JC-1 染色结果显示,红色荧光逐渐减弱,绿色荧光逐渐增强,表明沙门氏菌的细胞膜电位逐渐降低;细胞内核酸、蛋白质泄漏量检测表明,沙门氏菌核酸和蛋白质的泄漏量逐渐增加。【结论】光照时间 15 min,姜黄素浓度为 20 μmol/L 时,姜黄素介导的光动力杀菌技术对沙门氏菌具有较好的杀菌效果,该杀菌技术通过改变沙门氏菌的细胞形态及破坏细胞膜完整性而引起菌体内容物外流,进而达到杀菌的目的。

[关键词] 沙门氏菌;姜黄素;光动力杀菌技术;杀菌机理
[中图分类号] TS201.3 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)03-0162-09

Bactericidal effect of curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology on *Salmonella*

YU Wan, ZHANG Shuai, XIONG Xiaohui, CUI Xiaowen
(*College of Food Science and Light Industry, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu* 211816, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to investigate the bactericidal effect and bactericidal mechanism of curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology on *Salmonella*, to provide reference for the practical application of this bactericidal technology for promoting food microbiological safety. 【Method】 Single factor test was used to study the bactericidal effect of different illumination time and different curcumin concentration on *Salmonella*. The effect of curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology on the morphology of *Salmonella* under different treatment durations was observed by scanning electron microscopy, the effect of curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology on the apoptosis of *Salmonella* under different treatment durations was determined by propidium iodide staining, and the effect of curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology on *Salmonella* cell membrane potential was de-

[收稿日期] 2024-12-06 [修回日期] 2025-01-21
[基金项目] 国家重点研发计划项目(2018YFC1602800)
[作者简介] 俞皖(2000—),女,安徽六安人,在读硕士,主要从事食品微生物研究。E-mail:13151588851@163.com
[通信作者] 崔晓文(1989—),男,江苏南京人,讲师,博士,主要从事食品微生物研究。E-mail:cxw0534@163.com

termined by JC-1 staining.【Result】With the extension of the illumination time, the bactericidal effect of the curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology was significantly improved. The total number of *Salmonella* colonies was only $10^{2.670}$ CFU/mL when the illumination duration was 15 min. The bactericidal effect of curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology on *Salmonella* did not increase consistently with the increase of curcumin concentration. When the curcumin concentration exceeded 20 μmol/L, no significant improvement in bactericidal effect was observed. With the prolongation of treatment time of curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology, the scanning electron microscope observation results showed increasingly severe *Salmonella* cell surface collapse, crumpling, and content outflow. The propidium iodide staining results showed that the red fluorescence was gradually enhanced, indicating that the rate of apoptosis of *Salmonella* was gradually increased. The JC-1 staining results showed that the red fluorescence was gradually reduced, the green fluorescence was gradually enhanced, and the potential of *Salmonella* cell membrane was gradually decreased. The intracellular nucleic acid and protein leakage detection showed that the leakage of nucleic acid and protein in *Salmonella* gradually increased.【Conclusion】The curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology had a better bactericidal effect on *Salmonella* when the illumination time was 15 min and the curcumin concentration was 20 μmol/L. This bactericidal technology caused the efflux of bacterial contents by changing the cellular morphology and destroying the integrity of the cellular membranes of *Salmonella* to achieve the bactericidal purpose.

Key words: *Salmonella*; curcumin; photodynamic sterilization; bactericidal mechanism

沙门氏菌(*Salmonella*)是一种常见的革兰氏阴性肠道杆菌，全球每年有 40 多万人因食用被沙门氏菌污染的食物而患病，其中 1/3 是 5 岁以下的儿童[1]。世界卫生组织的评估数据显示，沙门氏菌是全球最主要的食源性致病菌之一，每年导致的病例高达 7 800 万例，占食源性疾病病例的 10% 以上。[2]。沙门氏菌传播途径广泛，包括受污染的食品、水源及接触被感染的动物和患者[3]。一旦人体感染沙门氏菌，可引起发热、呕吐、腹泻等症状，严重时可能导致全身炎症反应、休克甚至死亡[4]。沙门氏菌具有强大的环境适应能力，对干燥、腐蚀等不利条件有较强的抵抗能力[5]，这使其难以在食品设备及食品接触表面被清除。

光动力杀菌技术(photodynamic inactivation technology，PDI)是一种基于光敏剂、光源及与氧气相结合的非热杀菌技术[6]，具有广谱灭菌、耗能低、无毒副作用、杀菌速度快等优点[7]。该技术是在有氧条件下，将光敏剂暴露在特定波长光线下诱导产生一系列以单线态氧($^1O_2$)为主的活性氧(reactive oxygen species，ROS)[8]，ROS 能与细胞中核酸、蛋白质、脂质发生反应，破坏生物膜或其细胞结构，使细胞或微生物死亡或者诱导细胞凋亡、坏死[9]，从而达到杀菌的目的。

姜黄素(curcumin)作为一种从姜黄块茎中提取的天然化合物[10]，因其生物多样性和对人体的无毒无害特性而备受关注[11]。姜黄素不仅被世界卫生组织和美国食品药品监督管理局批准为食品添加剂，而且中国标准 GB 2760－2024《食品安全国家标准食品添加剂使用标准》允许将其作为可添加于食品中的 9 种天然色素之一[12]。姜黄素具有对称且共轭的苯环结构[13]，这使其具有良好的光敏活性。在 400～500 nm 波长蓝光照射下，姜黄素抗菌活性增强并产生具有细胞毒性的 ROS[14]。DONG 等[15]研究发现，姜黄素介导的光动力杀菌技术对枯草芽孢杆菌的生长繁殖有明显抑制效果。郑宇航等[16]研究发现，当姜黄素浓度达到 20 μmol/L 且在蓝光下照射 10 min 时，能够完全杀灭产气荚膜梭菌。BHAVYA 等[17]的研究也证实，姜黄素介导的光动力杀菌技术对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等食源性病菌有抑制作用。

近年来，关于姜黄素介导的光动力杀菌技术的研究主要集中在其对不同致病菌的抑制效果方面，关于其对致病菌细胞膜完整性影响的研究较少。鉴于此，本研究通过测定姜黄素介导的光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果，并从细胞结构、凋亡、膜电位以及生物大分子泄漏方面揭示其杀菌机制，以期为非热杀菌技术在食品微生物安全领域的实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

沙门氏菌标准菌株(*Salmonella* ATCC14028),由国家轻工业食品质量监督检测南京站提供。姜黄素,陕西慈缘生物科技有限公司;LB肉汤、琼脂粉,青岛高科技园海博生物科技有限公司;NaCl、蔗糖,西陇科学股份有限公司;NaOH、HCl,上海展云化工有限公司;环丙沙星,国药集团化学试剂有限公司;磷酸,深圳市凌峰科技有限公司;碘化丙啶(propidium iodide,PI),Sigma公司;细胞凋亡线粒体膜电位检测试剂盒JC-1,江苏凯基生物技术股份有限公司。

1.2 仪器与设备

LED蓝光灯(波长455～460 nm,功率30 W),长×宽=14 cm×11 cm,自制;SW-CJ-1FD型超净工作台,苏州净化设备有限公司;SPX-250B-Z型电热恒温培养箱,上海迅博实业有限公司医疗设备厂;ZWYR-2112B型双层恒温摇床,上海智城分析仪器制造有限公司;GI54DWS型高温高压灭菌锅,致微(厦门)仪器有限公司;AllegraX-30R型高速冷冻离心机,美国Beckman Coulter公司;MS104TS型分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;QL-901型涡旋振荡器,江苏南通海门市其林贝尔仪器制造有限公司;Milli-Q型纯水仪,美国MLIIIPROE公司;Quanta FEG 250型扫描电子显微镜,镇江专博检测科技有限公司;Cary6000型紫外全扫分光光度计,安捷伦科技公司;FACSAria Ⅲ型流式细胞分选仪,美国BD公司。

1.3 试验方法

1.3.1 *细菌培养与菌悬液制备* 用接种环蘸取于-80 ℃保存的沙门氏菌ATCC14028,在LB平板上划线培养,挑取形态良好的单菌落至LB肉汤培养基(10 mL),置于37 ℃、130 r/min摇床培养箱中过夜培养18～24 h。取100 μL过夜孵育的菌液于40 mL LB培养基中培养2.5 h,使菌液浓度达到10^8 CFU/mL。

1.3.2 *菌落计数* 参照国标GB 4789.3-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验大肠菌群计数》中的相关方法进行细菌菌落平板计数。

1.3.3 *光敏剂制备及光源配置* 准确称量7.36 mg姜黄素粉末,用无水乙醇定容至10 mL,使其终浓度为2 mmol/L,用0.22 μm滤膜对该溶液进行过滤除菌后即为光敏剂。将其于4 ℃避光保存,但保存时间不宜超过10 d,试验当天按比例稀释成所需浓度的工作液用于光动力灭活试验。光源为波长455～460 nm的LED蓝光灯,在其周围套一层黑色不透明材料,以防止外部光线进入。将24孔板中的样品置于该光源正下方,确保样品处于均匀的光照范围内。

1.3.4 *光照时间对光动力杀菌效果的影响* 取100 μL姜黄素溶液和900 μL菌液于1.5 mL离心管中涡旋混匀,将600 μL混合溶液加入24孔板后进行光动力杀菌技术处理,光照处理时间分别设定5,10,15和20 min,对照组为光照时间0 min且不添加姜黄素的菌液,通过测定各菌液中沙门氏菌菌落数,确定光动力杀菌处理的最佳光照时间。

1.3.5 *姜黄素浓度对光动力杀菌效果的影响* 以1.3.4得到的光照时间进行光动力杀菌技术处理。将姜黄素母液稀释至10,20,100和200 μmol/L。取100 μL姜黄素溶液和900 μL菌液于1.5 mL离心管中进行涡旋混匀,将600 μL混合溶液加入24孔板后用光动力杀菌技术处理15 min。对照组为未添加姜黄素的菌液。通过测定各菌液中沙门氏菌的菌落数,确定最佳的姜黄素浓度。

1.3.6 *细菌形态变化的扫描电子显微镜观察* 收集1.3.4中光动力杀菌技术处理不同时间后的菌液,置于8 000 r/min离心机中离心10 min,取菌液沉淀用无菌PBS洗涤2次,并用体积分数2.5%的戊二醛固定过夜,然后依次用体积分数30%,50%,70%,80%,90%和95%的乙醇逐步脱水,再将经无水乙醇脱水、临界点干燥后的菌样品进行喷金处理后,置于扫描电子显微镜下观察,分析光动力杀菌技术处理不同时间后沙门氏菌的形态变化。

1.3.7 *细菌细胞凋亡检测* 收集1.3.4中光动力杀菌技术处理不同时间后的菌液,置于8 000 r/min离心机中离心10 min,将菌液沉淀用生理盐水进行洗涤,并用PI染色液进行染色。将染色样品置于流式管中,调节流式细胞仪参数,选择激发绿色和红色荧光通道,采用Cyt Expert 2.0软件进行分析,确定光动力杀菌技术处理不同时间对沙门氏菌细胞的凋亡效应。

1.3.8 *细菌细胞膜电位检测* 收集1.3.4中光动力杀菌技术处理不同时间后的菌液,置于8 000 r/min离心机中离心10 min,分别加入等体积的生理盐水进行重悬,再分别加入JC-1工作液(JC-1是一种阳离子脂质荧光染料,用作检测线粒体跨膜电位的指示剂)充分混匀,37 ℃孵育15 min后,采用

细胞凋亡线粒体膜电位检测试剂盒进行检测。将孵育后的染色样品置于流式管中，调节流式细胞仪参数，选择激发绿色和红色荧光通道，采用 Cyt Expert 2.0 软件进行分析。

1.3.9　细菌细胞内核酸、蛋白质泄漏量检测　参照鲍悦忻等[18]的方法，测定菌液在 260 及 280 nm 处的吸光度来评估细菌细胞膜的完整性。收集 1.3.4 中光动力杀菌技术处理 0，5，10，15 min 后的菌液，置于 8 000 r/min 离心机中离心 10 min，取处理后的菌液加入比色皿中，使用紫外分光光度计测定其在 260 nm 和 280 nm 处的吸光度值。

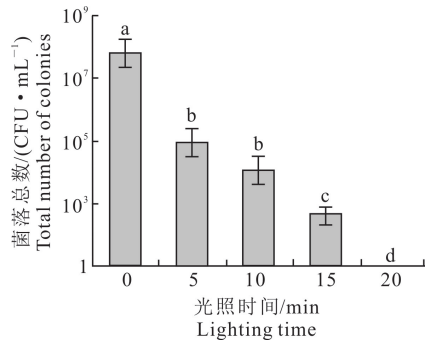
1.4　数据处理与统计处理

采用 IBM SPSS Statistics 23 和 Origin 9.0 进行误差分析并绘图，不同组之间进行单因素方差分析，以 $P<0.05$ 具有显著性差异。所有试验均进行 3 次重复。

2　结果与分析

2.1　光照时间对沙门氏菌菌落总数的影响

不同光照时间（0，5，10，15，20 min）下光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果如图 1 所示。



图柱上标不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Different lowercase letters on the column indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1　光照时间对沙门氏菌菌落数的影响

Fig. 1　Effects of illumination time on the number of *Salmonella* colonies

图 1 显示，与对照组（0 min）相比，当加入 20 μmol/L 姜黄素并于光照条件下暴露 5～15 min 时，菌液中的沙门氏菌菌落总数呈显著下降趋势（$P<0.05$），可见随着光照时间的延长，姜黄素介导的光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果显著增强。当光照时间为 5，10，15 min 时，沙门氏菌的菌落总数分别为 $10^{4.945}$，$10^{4.045}$，$10^{2.670}$ CFU/mL；当光照时间为 20 min 时，沙门氏菌的菌落总数降至平板最低检测限。该结果表明，姜黄素介导光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果具有时间依赖性，由此确定的光动力杀菌技术处理的最佳光照时间为 15 min。

2.2　姜黄素浓度对沙门氏菌菌落总数的影响

在光照处理时间为 15 min 条件下，评估不同浓度（10，20，100，200 μmol/L）姜黄素介导的光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果，结果如图 2 所示。图 2 表明，与对照组（0 μmol/L）相比，当加入 10～200 μmol/L 姜黄素并于光照条件下暴露 15 min 后，沙门氏菌菌落总数均呈显著下降趋势（$P<0.05$）。当姜黄素浓度为 10 μmol/L 时，沙门氏菌的菌落总数为 $10^{4.890}$ CFU/mL；当姜黄素浓度为 20，100 和 200 μmol/L 时，沙门氏菌的菌落总数分别为 $10^{3.530}$，$10^{3.610}$，$10^{3.500}$ CFU/mL，三者之间并无显著差异（$P>0.05$），表明姜黄素浓度过高可能会减弱光动力杀菌技术的杀菌效果。这一现象可能归因于姜黄素浓度过高会导致大量的光敏剂无法有效吸附在细菌表面，未能吸附的光敏剂会消耗掉部分光照能量，而吸附在菌体表面的光敏剂所吸收的能量就会降低，从而导致杀菌效率下降[19]。由此确定本试验条件下，光动力杀菌技术处理的最佳姜黄素浓度为 20 μmol/L。

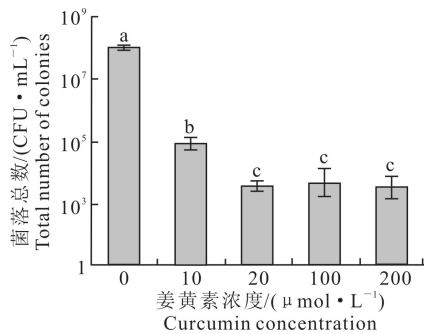


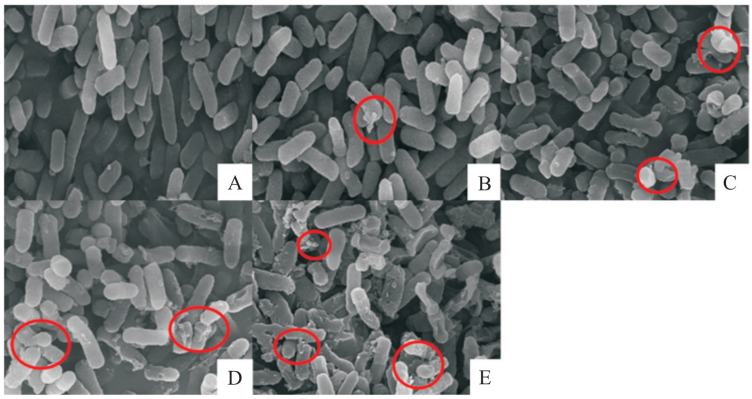
图 2　姜黄素浓度对沙门氏菌菌落数的影响

Fig. 2　Effects of curcumin concentration on the number of *Salmonella* colonies

2.3　沙门氏菌细胞完整性评估

2.3.1　光动力杀菌技术对细菌表面形态的影响　通过扫描电子显微镜观察沙门氏菌在光动力杀菌技术处理 5，10，15，20 min 后细胞表面形态的变化，结果如图 3 所示。图 3-A 显示，在对照组中，沙门氏菌细胞表面平滑且形态完整。相对而言，经姜黄素介导的光动力杀菌技术处理 5，10，15 和 20 min 后，沙门氏菌细胞表面相继出现出褶皱和塌陷，伴随有细胞破损和内容物外漏现象（图 3-B、C、D、E 中红色圆

圈所标记部分),且随着姜黄素介导光动力杀菌技术处理时间的延长,这些现象愈发严重。



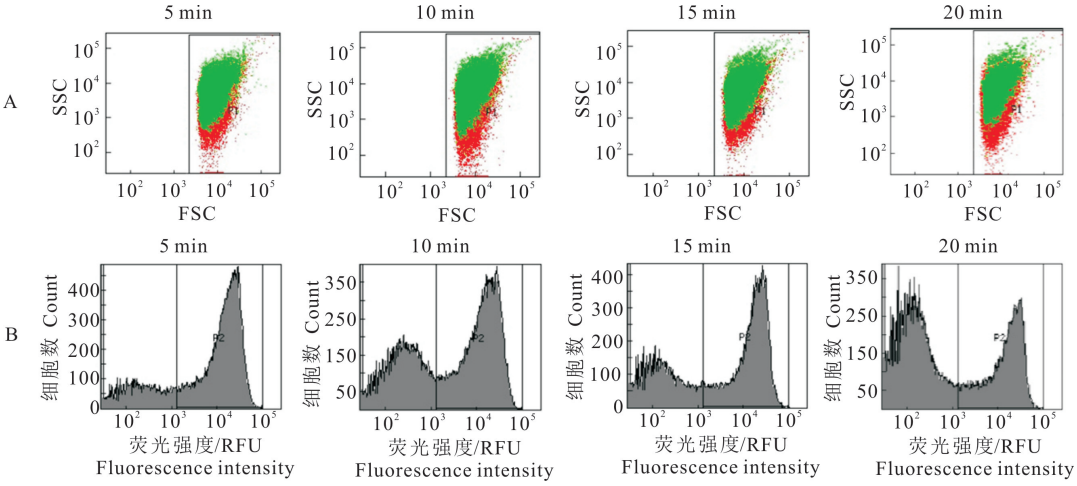
A. 未经姜黄素介导光动力杀菌技术处理的对照组(CK)细菌表面;B、C、D、E. 经姜黄素介导光动力杀菌技术处理 5,10,15,20 min 后的细菌表面。

A. Surface morphology of bacteria of CK which is not subject to curcumin-mediated photodynamic sterilization; B, C, D, E. Surface morphology of bacteria after 5, 10, 15, 20 min of curcumin-mediated photodynamic sterilization.

图 3 姜黄素介导光动力杀菌技术处理不同时间沙门氏菌细胞表面形态的扫描电子显微镜观察(×10 000)

Fig. 3 Scanning electron microscopy results of surface morphology of *Salmonella* cells after curcumin-mediated photodynamic sterilization under different durations(×10 000)

2.3.2 光动力杀菌技术对细菌细胞凋亡的影响 通过 PI 染料染色结合流式细胞术评估姜黄素介导的光动力杀菌技术处理不同时间对沙门氏菌细胞凋亡的影响。PI 作为一种膜通透性荧光染料,其作用机制具有高度选择性:完整细胞膜可有效阻隔 PI 分子与胞内 DNA 结合,而膜损伤细胞则允许 PI 渗透并产生红色荧光信号。利用流式细胞仪进行分析时,受损细胞(即死细胞)会表现出红色荧光,而活细胞则几乎不显示或仅显示极低水平的荧光[20]。试验过程中同步采集流式细胞术的两个关键物理参数,即前向散射光信号(FSC)和侧向散射光信号(SSC),前者反映细胞的大小,后者表征细胞内部结构的复杂程度,通过 FSC 和 SSC 信号以及荧光强度来评估光动力杀菌技术对沙门氏菌的凋亡效应,得到处理不同时间 PI 染色的流式散点图和波形图,结果如图 4 所示。



A. PI 染色流式散点图;B. PI 染色流式波形图。SSC. 侧向散射光信号;FSC. 前向散射光信号。图 5 同。

A. Flow scatter plot of PI staining; B. Flow waveform plot of PI staining. SSC. Lateral scattered light signal; FSC. Forward scattered light sigal. Fig. 5 is the same.

图 4 姜黄素介导光动力杀菌技术处理不同时间对沙门氏菌细胞凋亡的影响

Fig. 4 Effects of curcumin-mediated photodynamic sterilization technology on *Salmonella* cellular regeneration under different treatment durations

经姜黄素介导的光动力杀菌技术处理 5,10,15 和 20 min 后,菌液中沙门氏菌细胞的凋亡率见表 1。图 4 和表 1 表明,随着光动力杀菌技术处理时间的延长,沙门氏菌细胞的凋亡率逐渐增大。经姜黄素

介导的光动力杀菌技术处理 5 min 后，沙门氏菌细胞的凋亡率达到 77.9%；当处理时间延长至 10，15，20 min 时，细胞凋亡率分别增加至 78.8%，82.1% 和 86.4%，与光照处理 5 min 相比细胞凋亡率均显著增大。

表 1　姜黄素介导光动力杀菌技术处理不同时间后沙门氏菌细胞凋亡率的变化

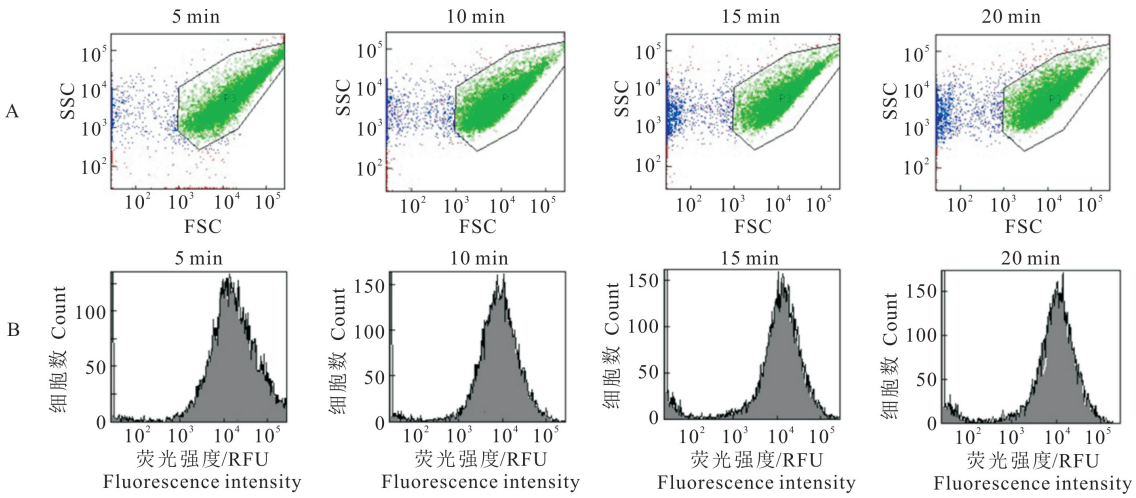
Table 1　Changes in apoptosis rate of *Salmonella* under different treatment durations of curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology

光照时间/min Lighting time	凋亡率/% Apoptosis rate	光照时间/ min Lighting time	凋亡率/% Apoptosis rate
5	77.9±1.29	15	82.1±1.33*
10	78.8±1.64*	20	86.4±0.95*

注：* 表示与光照 5 min 相比差异显著（$P<0.05$）。

Note: * indicates significant differences ($P<0.05$) compared to that under the illumination time of 5 min.

2.3.3　光动力杀菌技术对细菌细胞膜电位的影响　细胞膜电位（$\Delta\psi$）是质子动力的重要组成部分，与 ATP 的生成密切相关，在细菌生理学研究中具有十分重要的作用，并且细胞膜电位还与细菌自溶、低 pH 条件下生存、葡萄糖运输等多种过程相关[21]。由于细菌缺少线粒体，因此细菌细胞膜电位也可以反映细胞膜的完整性及细胞活性[22]。阳离子脂质荧光染料工作液 JC-1 有单体和多聚体两种存在状态，JC-1 可透过正常细胞膜并随浓度增加形成多聚体而产生红色荧光，当细胞膜受损时，JC-1 以单体形式存在于胞质内并产生绿色荧光[23]。图 5 表明，随着处理时间延长，红色荧光逐渐减弱，绿色荧光逐渐增强，表明延长姜黄素介导光动力杀菌技术的光照时间，可使沙门氏菌的细胞膜电位逐渐降低。



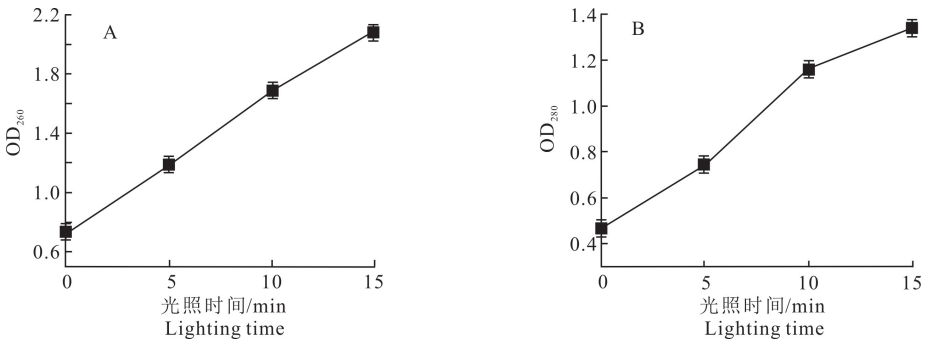
A. JC-1 染色流式散点图；B. JC-1 染色流式波形图。

A. Flow scatter plot of JC-1 staining; B. Flow waveform plot of JC-1 staining.

图 5　姜黄素介导光动力杀菌技术处理不同时间后沙门氏菌细胞膜的电位流式图

Fig. 5　Potential flow plot of *Salmonella* cell membrane under different treatment durations of curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology

2.3.4　光动力杀菌技术对细菌细胞内大分子渗漏的影响　由于细菌的细胞膜被破坏，导致菌体内的核酸、蛋白质等生物大分子泄漏，因此可以通过检测上清液中的核酸和蛋白质浓度，判断细胞膜的完整性[24]。核酸、蛋白质分别在 260 和 280 nm 处具有特异性吸收峰[20]，故可以通过测定上清液在 260 及 280 nm 处的吸光度反映核酸和蛋白质的浓度。通过测定 0，5，10 和 10 min 光照时间条件下，姜黄素介导光动力杀菌技术处理沙门氏菌后上清液的 OD_{260} 和 OD_{280} 值，以评估姜黄素介导光动力杀菌技术对沙门氏菌核酸和蛋白质泄漏的影响。结果（图 6）表明，随着姜黄素介导光动力杀菌技术对沙门氏菌光照时间的延长，OD_{260} 和 OD_{280} 值显著增大，表明沙门氏菌核酸和蛋白质的泄漏呈光照时间依赖性。由此可知，光照时间的延长可显著提高沙门氏菌细胞膜的通透性，诱发细胞内核酸和蛋白质发生更大规模的泄漏。这与 LU 等[25]的研究结果一致，即细胞膜的损伤会导致核酸及蛋白质的渗漏，其在 260 和 280 nm 处具有很强的紫外吸收能力。



A. 核酸泄漏量;B. 蛋白质泄漏量。

A. Leakage of nucleic acids; B. Leakage of proteins.

图 6 姜黄素介导光动力杀菌技术处理不同时间后沙门氏菌细胞内大分子的泄漏量

Fig. 6 Leakage of macromolecules in *Salmonella* cells under different treatment durations of curcumin-mediated photodynamic bactericidal technology

3 讨 论

姜黄素介导的光动力杀菌技术是一种非热杀菌技术,其杀菌效果受到光照时间和姜黄素浓度的影响。本研究探究了不同光照时间与不同姜黄素浓度条件下,姜黄素介导光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果。结果显示,姜黄素介导光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果存在光照时间依赖性。杨园平等[8]的研究也发现,在 5,10,15 和 20 min 光照时间条件下,光动力杀菌技术对志贺氏菌和沙门氏菌的杀菌效果同样呈增强趋势。在不同姜黄素浓度条件下,光动力杀菌技术对沙门氏菌的杀菌效果并不是随着姜黄素浓度的升高而增加。过高浓度的姜黄素会产生自我屏蔽效应,可能会阻止有效的光传输到光敏剂分子内部,进而会影响光动力杀菌技术的杀菌效果。

细胞膜对于维持细胞形态、保证细胞正常生命活动和内环境稳态具有重要作用。有研究显示,细胞膜通透性的改变可能会导致细胞内核酸、蛋白质的不断泄漏[26]。本研究扫描电镜观察结果显示,经姜黄素介导光动力杀菌技术处理的沙门氏菌菌体表面发生皱缩,伴随有细胞破损和内容物泄漏的现象,这种现象随着处理时间的延长表现越明显。

PI 是一种不能透过活细胞的细胞膜而只能穿过受损细胞细胞膜与 DNA 结合,并发出红色荧光的染色液。因此可以通过 PI 染色液的荧光强度来评估姜黄素介导光动力杀菌技术对沙门氏菌的凋亡效应。本研究中,经过姜黄素介导光动力杀菌技术处理的沙门氏菌发出大量红色荧光,表明 PI 染液已通过受损细胞膜进入细胞中,说明此时沙门氏菌的细胞膜已遭到破坏,沙门氏菌出现凋亡。随着光照时间的增加,沙门氏菌细胞凋亡率亦逐渐增大。

指示剂 JC-1 可以穿透细胞膜,在正常细胞内形成多聚体并发出红色荧光。细胞坏死时,JC-1 释放至胞质,以单体的形式存在而发出绿色荧光。因此可以通过荧光颜色来评估姜黄素介导光动力杀菌技术对沙门氏菌细胞膜电位的影响。本研究中,利用姜黄素介导光动力杀菌技术处理沙门氏菌,随着光照处理时间的延长红色荧光逐渐减弱,绿色荧光逐渐增强,表明 JC-1 工作液已通过受损的细胞膜进入细胞中,进一步说明沙门氏菌的细胞膜遭到了破坏,导致其细胞膜电位受损,影响了沙门氏菌的活性。

核酸和蛋白质的泄漏可以作为判断细胞膜损伤程度的重要指标,大量核酸和蛋白质泄漏会对细胞膜造成不可逆的损伤[27]。本试验结果表明,用姜黄素介导光动力杀菌技术处理沙门氏菌,随着光照处理时间的延长,OD_{260} 和 OD_{280} 逐步升高,表明沙门氏菌细胞的核酸和蛋白质泄漏存在时间依赖性,进一步证实其细胞膜完整性遭到破坏,导致内容物大量泄漏。有研究表明,这种细菌损伤和细胞质的泄漏通常是不可逆的[28]。该结果证实姜黄素介导的光动力杀菌技术可以破坏沙门氏菌细胞膜结构的完整性,使细胞内物质泄漏出胞外,从而达到杀菌效果[29]。

4 结 论

姜黄素介导光动力杀菌技术对沙门氏菌具有明显的杀菌效果,最佳光照时间以及最佳姜黄素浓度分别为 15 min 和 20 μmol/L。杀菌机理分析表明,姜黄素介导的光动力杀菌技术通过破坏沙门氏菌细

胞结构的完整性，导致膜通透性增加及细胞膜电位下降，引起细胞体内核酸、蛋白质等物质外泄，进而使菌体皱缩、塌陷并死亡。

[参考文献]

[1] 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，QU 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.

[2] World Health Organization. Joint FAO/WHO Expert Meeting on the pre- and post-harvest control of *Campylobacter* spp. in poultry meat[R]. Italy：FAO Headquarters，2023.

[3] 卜祥逢，洪意，吴瑜凡，等. 五株临床分离肠炎沙门氏菌同源性及耐药与毒力特征分析[J]. 食品与发酵工业，2024，50(19)：1-8.
BU X F，HONG Y，WU Y F，et al. Homology and characterization of antibiotic resistance and virulence of five clinical isolates of *Salmonella enteritidis*[J]. Food and Fermentation Industries，2024，50(19)：1-8.

[4] JINAPON C，PRADIT W，CHALINAN P，et al. Development of monoclonal antibodies for the rapid detection and identification of *Salmonella* enterica serovar enteritidis in food sample using dot-blot assays[J/OL]. Journal of Food Safety，2020，40：e12841. DOI：10.1111/jfs.12841.

[5] 宋贵太，臧家祥. 浅谈猪沙门氏菌病的防治[J]. 山东畜牧兽医，2019，40(4)：21-22.
SONG G T，ZANG J X. An introduction to the prevention and control of *Salmonellosis* in pigs[J]. Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine，2019，40(4)：21-22.

[6] GHATE V S，ZHOU W，YUK H G. Perspectives and trends in the application of photodynamic inactivation for microbiological food safety[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2019，18(2)：402-424.

[7] ZHANG X，LU N，LI Z J，et al. Effects of curcumin-mediated photodynamic treatment on lipid degradation of oysters during refrigerated storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2021，102(5)：1978-1986.

[8] 杨园平，石慧. 姜黄素介导的光动力联合噬菌体对食源性致病菌的杀菌效果及机理[J]. 食品科学技术学报，2025，43(1)：36-43.
YANG Y P，SHI H. Antibacterial effect and mechanism of photodynamic inactivation of curcumin combined with phage on foodborne pathogens[J]. Journal of Food Science and Technology，2025，43(1)：36-43.

[9] YANG Q Q，FARHA A K，KIM G，et al. Antimicrobial and anticancer applications and related mechanisms of curcumin-mediated photodynamic treatments[J]. Trends in Food Science & Technology，2020，97：341-354.

[10] 王德华，李璟，周凤，等. 声光动力非热杀菌技术的作用机制及应用研究进展[J]. 肉类研究，2023，37(1)：53-57.
WANG D H，LI J，ZHOU F，et al. Progress in research on the mechanism of action and application of sono/photodynamic non-thermal sterilization technology[J]. Meat Research，2023，37(1)：53-57.

[11] 刘丽芳，邱建清，徐芳，等. 声光动力联合杀菌技术对牡蛎的保鲜效果[J]. 农业工程学报，2023，39(5)：232-240.
LIU L F，QIU J Q，XU F，et al. Preservation effect of oyster by sono-photodynamic sterilization technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2023，39(5)：232-240.

[12] 郑蕾，黄红，吴涵，等. 姜黄素抗肺纤维化作用的分子机制研究进展[J]. 中草药，2022，53(21)：6909-6918.
ZHENG L，HUANG H，WU H，et al. Progress on the molecular mechanism of curcumin's anti-pulmonary fibrosis effects[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs，2022，53(21)：6909-6918.

[13] 程永霞，张茜，金子恒，等. 姜黄素的生理功能及其应用研究进展[J]. 中国食品添加剂，2024，35(11)：33-40.
CHENG Y X，ZHANG Q，JIN Z H，et al. Research progress on molecular mechanism of curcumin against pulmonary fibrosis[J]. China Food Additives，2024，35(11)：33-40.

[14] MARAL S D，RAM M，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.

[15] DONG L，QIN J R，TAI L Y，et al. Inactivation of *Bacillus subtilis* by curcumin-mediated photodynamic technology through inducing oxidative stress response[J]. Microorganisms，2022，10(4)：802.

[16] 郑宇航，麦栩滔，王文卓，等. 姜黄素介导的光动力杀菌对产气荚膜梭菌的作用机制[J]. 食品工业科技，2024，45(12)：121-128.
ZHENG Y H，MAI X T，WANG W Z，et al. Mechanism of curcumin mediated photodynamic sterilization on *Clostridium perfringens*[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(12)：121-128.

[17] BHAVYA M L，HEBBAR H U. Efficacy of blue LED in microbial inactivation：effect of photosensitization and process parameters[J]. International Journal of Food Microbiology，2018，290：296-304.

[18] 鲍悦忻，陈艳红，马钰，等. 羟丙基-β-环糊精-姜黄素包合物的制备及其光动力杀灭沙门氏菌的机制[J]. 食品工业科技，2024，45(12)：75-84.
BAO Y X，CHEN Y H，MA Y，et al. Preparation of hydroxypropyl-β-cyclodextrin-curcumin complex and its mechanism of photodynamic killing of *Salmonella*[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(12)：75-84.

[19] YUAN Y，LIU Q Y，HUANG Y J，et al. Antibacterial efficacy and mechanisms of curcumin-based photodynamic treatment against *Staphylococcus aureus* and its application in juices

[J]. Molecules,2022,27(20):7136.

[20] LIU F,LIU Y N,SUN Z L,et al. Preparation and antibacterial properties of ε-polylysine-containing gelatin/chitosan nanofiber films[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2020,164:3376-3387.

[21] NOVO D,PERLMUTTER N G,HUNT R H,et al. Accurate flow cytometric membrane potential measurement in bacteria using diethyloxacarbocyanine and a ratiometric technique[J]. Cytometry,1999,35(1):55-63.

[22] MÜLLER S,ULLRICH S,LÖSCHE A,et al. Flow cytometric techniques to characterise physiological states of *Acinetobacter calcoaceticus*[J]. Journal of Microbiological Methods,2000,40(1):67-77.

[23] PERELMAN A,WACHTEL C,COHEN M,et al. JC-1:alternative excitation wavelengths facilitate mitochondrial membrane potential cytometry[J]. Cell Death & Disease,2012,3(11):e430-e430.

[24] 陈雪琴,赵圆圆,张珍,等.肉桂精油的化学成分分析及其对沙门氏菌细胞膜损伤机制的研究[J].食品与发酵工业,2022,48(14):24-32.
CHEN X Q,ZHAO Y Y,ZHANG Z,et al. Analysis of cinnamon essential oil composition and its mechanism of cell membrane damage in *Salmonella enterica*[J]. Food and Fermentation Industries,2022,48(14):24-32.

[25] LU X Y,CHENG J H. Evaluation of the effects of cold plasma on cell membrane lipids and oxidative injury of *Salmonella typhimurium*[J]. Molecules,2022,27(3):640.

[26] 周琦,张宝善,韦露莎,等.魔芋飞粉生物碱的抑菌活性及抑菌机理研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(3):121-128.
ZHOU Q,ZHANG B S,WEI L S,et al. Antimicrobial activity and mechanism of alkaloid from konjac powder[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2019,47(3):121-128.

[27] 岳瑞,程文婷,王圆圆,等.1-丙硫醇对兰州百合采后篮状菌的防治效果[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(7):1-10.
YUE R,CHENG W T,WANG Y Y,et al. Control effect of 1-Propanethiol on *Talaromyces tumili* in postharvest Lanzhou lily[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2025,53(7):1-10.

[28] HU J M,LIN S L,TAN B K,et al. Photodynamic inactivation of *Burkholderia cepacia* by curcumin in combination with EDTA[J]. Food Research International,2018,111:265-271.

[29] HAMANO Y. Occurrence,biosynthesis,biodegradation,and industrial and medical applications of a naturally occurring ε-poly-L-lysine[J]. Bioscience,biotechnology,and biochemistry,2011,75(7):1226-33.

(责任编辑:温晓平)

(上接第161页)

[20] MIAO J,WEI K,LI X,et al. Effect of boiling and drying process on chemical composition and antioxidant activity of *Chaeno-meles speciosa*[J]. Journal of Food Science and Technology,2017,54(9):2758-2768.

[21] HUANG H,HUANG G. Extraction,separation,modification,structural characterization,and antioxidant activity of plant polysaccharides[J]. Chem Biol Drug Des,2020,96(5):1209-1222.

[22] 王承福,陆廷祥,曾欢,等.响应面法优化青钱柳茶不同冲泡工艺总黄酮含量比较[J].广东化工,2024,51(19):169-171,162.
WANG C F,LU Y X,ZENG H,et al. Comparison of total flavonoids content of Cyclocarya paliurus tea in different brewing processes by response surface methodology[J]. Guangdong Chemical Industry,2024,51(19):169-171,162.

[23] KE L J,XU W,GAO J N,et al. Isolation and characterization of thermo-tolerant polyphenol oxidases in a black tea infusion[J]. Food Control,2021,119:107465.

[24] ANTONY A,FARID M. Effect of temperatures on polyphenols during extraction[J]. Applied Sciences,2022,12(4):2107.

[25] 陈侠,杨亦扬,皮杰,等.茶叶揉捻工艺技术研究现状和发展趋势[J].中国茶叶,2022,44(12):9-15.
CHEN X,YANG Y Y,PI J,et al. Research status and development trend of tea twisting technology[J]. Chinese Tea,2022,44(12):9-15.

[26] 黎娜,唐睿,钟兴刚,等.变温滚炒与高温足干提香结合对秋季炒青绿茶品质的影响[J].茶叶通讯,2023,50(3):344-351.
LI N,TANG R,ZHONG X G,et al. Effect of combination of variable temperature roll-roasting and high temperature final drying fragrance-enhancing on the quality of autumn roasted green tea[J]. Journal of Tea Communication,2023,50(3):344-351.

[27] MENG J M,CAO S Y,WEI X L,et al. Effects and mechanisms of tea for the prevention and management of diabetes mellitus and diabetic complications:an updated review[J]. Antioxidants,2019,8(6):170-195.

[28] 冯拓,单培,张展开,等.16种市售茶叶抗氧化活性及抗氧化物质分析[J].中国食品学报,2022,22(10):352-362.
FENG T,SHAN P,ZHANG Z K,et al. Analysis of antioxidant activities and antioxidant substances of sixteen kinds of commercial tea[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2022,22(10):352-362.

(责任编辑:温晓平)