

新型钛基光催化剂对水体中耐药菌的消除性能研究

王 阔¹, 刘 叶¹, 周大丁¹, 梁启玉², 刘 娜^{2*}

¹承德医学院生物医学工程系, 河北 承德

²承德医学院生物与食品科学系, 河北 承德

收稿日期: 2026年6月8日; 录用日期: 2026年7月5日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

研究通过利用新型钛基光催化剂作为水体净化材料, 评估了其对水环境中典型耐药菌的灭活效果。结果表明, 该新型钛基光催化剂在可见光下具备优异的光催化灭菌能力, 且灭菌效率与光催化剂的负载呈现先上升后下降的趋势。通过探究不同因素对光催化灭活耐药菌效率的影响发现: 耐药菌灭活效率随光照强度的增强而升高; pH在6~8范围内灭活率较高; 在正常环境水平下, 不同无机离子的存在对光催化灭活耐药菌的性能无显著影响。此外, 通过扫描电镜与活性氧检测分析证实, 在模拟太阳光照射下, 该新型钛基光催化剂产生的活性氧自由基可造成菌体结构损伤、细胞膜通透性改变并引起细胞内氧化应激反应, 最终导致耐药菌死亡。这说明研究使用的新型钛基光催化剂具有良好的耐药菌消除性能, 为控制水环境中耐药菌污染问题提供了新的思路。

关键词

水体消毒, 新型钛基光催化剂, 可见光, 耐药菌, 灭活性能

Study on the Elimination Performance of Novel Titanium-Based Photocatalyst for Drug-Resistant Bacteria in Water

Kuo Wang¹, Ye Liu¹, Dading Zhou¹, Qiyu Liang², Na Liu^{2*}

¹Department of Biomedical Engineering, Chengde Medical University, Chengde Hebei

²Department of Biological and Food Sciences, Chengde Medical University, Chengde Hebei

Received: June 8, 2026; accepted: July 5, 2026; published: July 15, 2026

*通讯作者。

文章引用: 王阔, 刘叶, 周大丁, 梁启玉, 刘娜. 新型钛基光催化剂对水体中耐药菌的消除性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(7): 62-71. DOI: 10.12677/ms.2026.167156

Abstract

This study evaluated the inactivation efficacy of a novel titanium-based photocatalyst against typical drug-resistant bacteria in the aquatic environment, utilizing it as a water purification material. The results demonstrated that this novel titanium-based photocatalyst possessed excellent photocatalytic sterilization capability, and its sterilization efficiency exhibited a trend of initially increasing and subsequently decreasing as the photocatalyst loading varied. An investigation into the effects of various factors on the efficiency of photocatalytic inactivation of drug-resistant bacteria revealed that the inactivation efficiency against drug-resistant bacteria increased with increasing light intensity. The inactivation rates were higher within the pH range of 6 to 8. And under normal environmental conditions, the presence of various inorganic ions had no significant impact on the performance of photocatalytic inactivation of drug-resistant bacteria. Furthermore, analyses utilizing scanning electron microscopy and reactive oxygen species detection confirmed that, under simulated solar light irradiation, the reactive oxygen species generated by this novel titanium-based photocatalyst could induce structural damage to bacterial cells, alter cell membrane permeability, and trigger intracellular oxidative stress responses, ultimately leading to the death of the drug-resistant bacteria. The novel titanium-based photocatalyst employed in this study demonstrates superior efficacy in eliminating drug-resistant bacteria, thereby offering a novel perspective for addressing the issue of drug-resistant bacterial contamination in aquatic environments.

Keywords

Water Disinfection, Novel Titanium-Based Photocatalyst, Visible Light, Drug-Resistant Bacteria, Inactivation Performance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 由于抗生素的大量使用乃至滥用, 抗生素耐药菌大量繁衍, 在各种环境介质中持久存在并广泛传播, 对人类健康和生态安全造成潜在威胁[1]。耐药微生物的抗性可以通过基因横向转移至致病菌, 最终可能导致超级细菌的爆发, 直接影响人类健康, 其危害已超过疟疾等疾病[2]。研究预测, 如果不采取行动, 到 2050 年全球每年因细菌耐药性死亡的人数将达到一千万, 超过癌症和车祸的死亡率[3]。目前, 水处理行业的消毒方法主要包括紫外消毒、臭氧消毒、氯消毒等。这些传统的方法虽然在一定程度上能杀灭细菌, 但存在能耗高、产生消毒副产物、对低溶解氧环境适应性差等问题, 并且难以彻底消除耐药菌[4]。因此, 迫切需要一种绿色的新型消毒技术来解决水体中耐药菌污染问题。

光催化作为一种新型的环境净化技术, 因其能耗低、环保、无二次污染等优点, 成为解决水体污染问题的重要手段, 在环境净化领域展现出良好的应用前景[5]。在各种各样的光催化材料中, 二氧化钛(TiO_2)光催化剂因其化学性质稳定、无毒、价格低廉等优势而备受关注[6]。然而, 纯相 TiO_2 只能在紫外光($\lambda \leq 380 \text{ nm}$)下激活, 且光生电子-空穴对容易复合, 从而降低了其光催化效率, 限制了 TiO_2 在实际应用中的效果[7]。为改善以上缺陷, 本课题组指导老师在前期研究中通过水热合成法已制备出一种新型非金属-金属-半导体相结合的复合光催化剂 $\text{P/Ag/Ag}_2\text{O/Ag}_3\text{PO}_4/\text{TiO}_2$ (PAGT)并表现出良好的可见光吸收能力和快速的电子-空穴分离效率, 在水体有机物的降解方面展现了优异的性能[8]。另一方面, 利用

聚乙二醇(Polyethylene Glycol, PEG)作为成孔剂对 PAgT 进行改性,可进一步影响光催化剂的晶体结构和粒径,提高其光催化效率[9]。因此,PEG-PAgT 作为新型钛基光催化剂在消除水体耐药菌方面具有一定的潜力,但目前还未见报道。

本研究以新型钛基光催化剂(PEG-PAgT)作为光催化材料,首先选取仅具有耐四环素抗性基因的大肠杆菌(*Escherichia coli*, *E. coli*)作为实验灭菌对象,考察在模拟太阳光照射下,PEG-PAgT 对水体中典型耐药菌的灭活效果;其次,探究不同反应条件,包括光催化剂的负载、光照强度、pH 强度、无机离子等,对光催化杀菌过程的影响;最后,为了探究 PEG-PAgT 光催化剂对耐药菌的可能灭活机理,通过扫描电镜图像表征、胞内活性氧检测等实验分析了 PEG-PAgT 光催化杀菌过程中细菌形貌以及胞内活性氧变化。本研究结果旨在为控制水环境中耐药菌污染问题提供新的思路。

2. 材料与方法

2.1. 细菌悬液的制备

本实验选取具有耐四环素抗性的大肠杆菌(*E. coli* ER2378)作为耐药菌株,无抗性基因的大肠杆菌(*E. coli* 25922)作为敏感菌株。在超净台内用接种环在营养琼脂平板上挑出单个菌落放入含有约 30 mL 营养肉汤培养液的无菌试管中,随后把装有培养液的试管放置在 37℃ 的恒温恒湿培养箱内,进行时长为 18 h 的细菌培养。18 h 后,取出培养好的大肠杆菌菌液。5000 rpm 离心 10 min 收集细菌,弃上清液并用磷酸盐缓冲液重悬洗涤菌液两次。最后将细菌重悬在磷酸盐缓冲液中,利用紫外分光光度计在 600 nm 波长下调节菌液浓度至 10^6 cfu/mL。所有实验所需器皿与试剂均在 121℃ 下高温高压灭菌后使用。

2.2. 光催化剂的制备

首先,将 1 g PEG 加入 46 mL 乙醇中并超声处理 1 h。随后,加入 6 mL 钛酸四丁酯,并在室温下用磁力搅拌器搅拌 30 min。将称量的硝酸银和磷酸银溶解于 11 mL 的 1 mol/L 硝酸中,然后滴入钛酸四丁酯溶液中。连续搅拌 16 h 后,将溶液转移到聚四氟乙烯内衬的水热反应釜中,在 120℃ 下进行 3 h 的水热反应。反应结束后,将溶液冷却至室温,并用 70% 的乙醇洗涤两次。最后,将溶液转移到蒸发皿中,在 60℃ 烘箱中干燥 12 h,得到光催化剂粉末(PEG-PAgT)。

2.3. 光催化杀菌实验

首先,将光催化剂与 15 mL 10^6 cfu/mL 大肠杆菌菌液混合放入烧杯中,并在磁力搅拌器搅拌下利用模拟太阳光灯作为光源(中国郎溪博贝照明电器厂, BBZM-III 型)照射 60 min。为探究不同因素对光催化杀菌效果的影响,反应前将光催化剂的浓度分别调整为 0.25 g/L、0.50 g/L、1.00 g/L、1.25 g/L;光强分别设置为 250 W/m²、500 W/m²、750 W/m²;pH 强度分别设置为 5、6、7、8;无机离子分别添加 0.2 mM 的 Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻。在光照条件下每隔 15 min 取一次菌液进行梯度稀释后,取 1 mL 稀释后的菌液放入一次性培养皿中,加入适量的琼脂培养基摇晃均匀,凝固后放入 37℃ 培养箱中培养 18~24 h。培养结束后对培养皿上的菌落进行计数,通过观察细菌的生长状况和菌落数量,来分析测试材料的杀菌效果。每组实验均进行三次。此外,市售 P25 (纯相 TiO₂)光催化剂的杀菌性能按照上述相同实验方法进行测定,作为衡量测试材料杀菌性能的参照组。

2.4. 耐药菌细胞形貌表征

将 PEG-PAgT 光催化剂处理的耐药菌,分别于光照 0 min、30 min、60 min 下取样。随后,将采样液在 6000 rpm、4℃ 条件下离心 10 min,去除上清液获得菌体沉淀。加入 1 mL 磷酸盐缓冲液对沉淀进行重

悬处理, 6000 rpm、4℃离心 5 min 后弃上清液。然后, 用 4%戊二醛在 4℃下固定 6 h 以上, 再置换 2%戊二醛在 4℃下固定 1 h, 每次固定后用磷酸盐缓冲液洗涤三次(6000 rpm、4℃、5 min/次)。随后, 进行乙醇梯度(20%→50%→80%→100%)脱水。最后, 取脱水样品滴附硅片载体, 冷冻干燥 6 h 以上后喷金, 使用扫描电镜(SEM, 德国 ZEISS, Sigma300)观察。

2.5. 耐药菌胞内活性氧检测

2',7'-二氯二氢荧光素二乙酸酯(DCFH-DA)作为膜通透性荧光指示剂, 在胞内酯酶作用下发生水解转化, 生成非荧光性中间体。该物质与活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)发生氧化反应后形成荧光物质, 其发射光谱在 525 nm 处呈现绿色荧光信号, 荧光强度与胞内 ROS 水平呈正相关[10]。实验中, 将直接收集到的菌液作为对照组(既无光催化剂, 也无光照处理); 只有光照处理而没有光催化剂处理的作为光照组; 只有催化剂而无光照处理的作为暗处理组; 光照下负载 PEG-PAgT 光催化剂处理的作为 PEG-PAgT 组。不同实验组分别处理 60 min 后采样。使用磷酸盐缓冲液对采样液进行洗涤后, 去除上清液, 加入 1 mL 的 10 μmol/L DCFH-DA 荧光探针, 并在 37℃下避光孵育 30 min, 每间隔 5 min 混匀一次, 孵育结束用磷酸盐缓冲液洗涤两遍。最后, 使用荧光显微镜观察结果(日本奥林巴斯, CKX53 型)。

3. 结果与讨论

3.1. 不同光催化剂对敏感菌与耐药菌的杀菌性能对比

首先, 本研究通过在模拟太阳光照射下对大肠杆菌(初始细胞浓度为 10^6 cfu/mL)的灭活, 探究了传统钛基材料 TiO_2 和新型钛基复合材料 PEG-PAgT 的光催化消毒性能。如图 1 所示, 结果表明在相同条件下, 新型钛基复合材料对大肠杆菌的灭菌率 $\text{Log}_{10}(C_0/C)$ 远远高于传统纯相 TiO_2 。此外, 新型复合材料 PEG-PAgT 对敏感菌 *E. coli* 25922 的灭菌率较高于耐药菌 *E. coli* ER2378。这可能是由于无抗性的敏感菌 *E. coli* 细胞膜结构较为普通, 新型钛基光催化材料产生的活性物质更容易与细胞膜相互作用, 改变其通透性, 使得细胞内的生物大分子如 DNA、蛋白质等受到破坏, 进而影响其正常代谢和生理功能, 最终导致细菌死亡[11]。而具有四环素抗性的大肠杆菌可能由于长期接触四环素等抗生素, 细胞膜结构发生了一些适应性改变, 比如细胞膜上的孔蛋白数量减少或孔径变小, 这可能在一定程度上阻碍了光催化材料产生

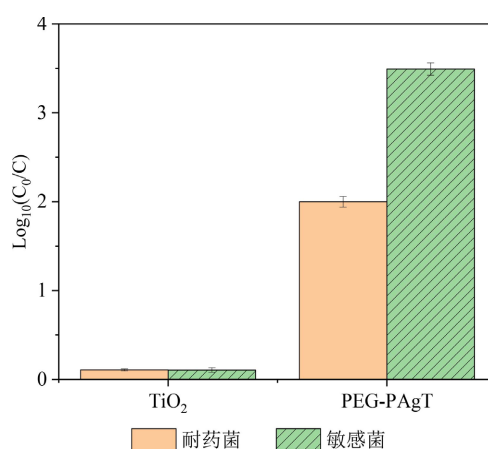


Figure 1. Comparison of bactericidal performance of different photocatalysts against sensitive and drug-resistant bacteria (C_0 : Initial bacterial concentration 10^6 cfu/mL; C : Bacterial concentration after treatment; Light intensity 750 W/m^2 ; Photocatalyst concentration 0.25 g/L)

图 1. 不同光催化剂对敏感菌与耐药菌的杀菌性能对比(C_0 为初始细菌浓度 10^6 cfu/mL; C 为处理后细菌浓度; 光照强度 750 W/m^2 ; 光催化剂浓度 0.25 g/L)

的活性物质进入细胞,并且可能具有相对复杂的防御机制,如产生特定的酶来分解或修饰进入细胞内的有害物质。这些机制可能使其在一定程度上能够抵御光催化材料产生的活性物质攻击,从而降低了灭菌效果[12][13]。结果表明,新型复合材料 PEG-PAgT 光催化剂在模拟太阳光照射下具有良好的消毒能力,可有效地用于耐药菌灭活的研究。

3.2. 不同浓度光催化剂负载对灭活耐药菌的影响

在光催化实验中,催化剂负载是高度影响光催化处理效率的重要因素。为探讨最佳催化剂负载量,在 0.25~1.25 g/L 浓度范围内,对初始耐药菌浓度为 10^6 cfu/mL 的 *E. coli* ER2378 进行了光催化灭活实验。实验结果如图 2 所示,随着 PEG-PAgT 浓度在较低范围内增加,该材料对耐药菌灭活效率也随之增加。当催化剂浓度达到 1.00 g/L 时,此时灭菌效率达到最高, 10^6 cfu/mL 的耐药菌在光催化处理 60 min 内可达到 100% 灭活。然而,当催化剂负载继续增加到 1.25 g/L 时,光催化灭菌效率反而略有下降。这可能是由于当催化剂负载超过最佳时,溶液中大量的催化剂会导致悬浮液浊度增加,产生光屏蔽效应,从而阻止辐射到达细胞和催化剂颗粒表面,进而导致光催化活性降低[14]。因此,后续的灭菌实验采用了 1.00 g/L 作为该体系的最佳光催化剂负载浓度。

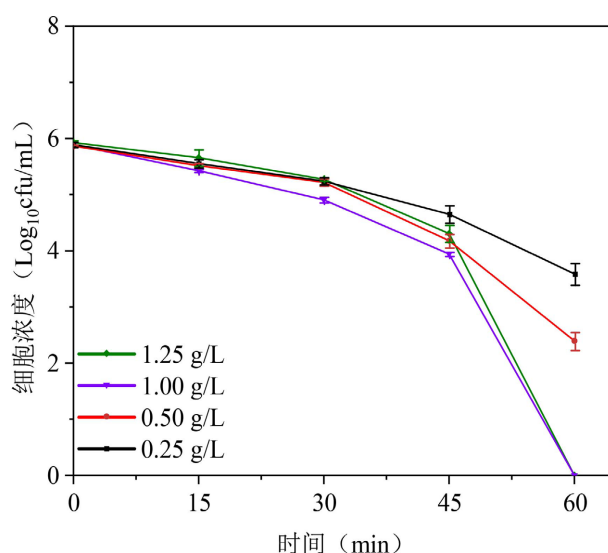


Figure 2. The effect of different concentrations of photocatalyst loading on the inactivation of drug-resistant *E. coli* ER2378 (Initial bacterial concentration 10^6 cfu/mL; Light intensity 750 W/m^2)

图 2. 不同浓度光催化剂负载对耐药菌 *E. coli* ER2378 灭活的影响(初始细菌浓度 10^6 cfu/mL; 光强 750 W/m^2)

3.3. 不同环境因素对灭活耐药菌的影响

一般来说,在真实的水环境中,光催化反应受到各种参数的影响。因此,本研究探究了不同环境因素(如光照强度、溶液 pH、无机离子的存在)对光催化灭活耐药菌的影响。如图 3 所示,当光照强度从 250 W/m^2 提升到 750 W/m^2 时,PEG-PAgT 光催化剂对耐药菌(*E. coli* ER2378)的灭活效率也随之升高。在光照强度为 750 W/m^2 的实验组中,该催化材料在 60 min 接触时间内就可使 10^6 cfu/mL 耐药菌 100% 灭活。这主要是由于随着光照强度的增强,单位时间内到达催化剂表面的光子数随之增多,使得催化剂表面产生活性氧物质的速率大大提升,因此提高了灭活效率。

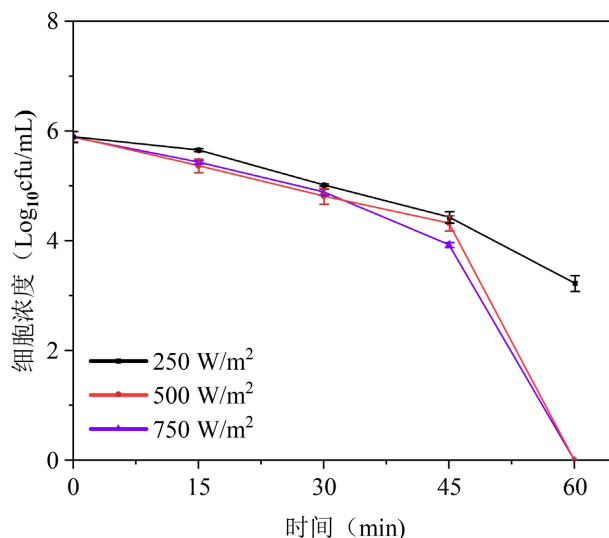


Figure 3. The effect of light intensity on the inactivation of drug-resistant *E. coli* ER2738 (Initial bacterial concentration 10^6 cfu/mL; Photocatalyst concentration 1.00 g/L)

图 3. 光照强度对耐药菌 *E. coli* ER2738 灭活的影响(初始细菌浓度 10^6 cfu/mL; 光催化剂浓度 1.00 g/L)

图 4 为在 PEG-PAgT 光催化剂负载下 pH 强度对光催化灭活耐药菌的影响。结果表明, PEG-PAgT 光催化剂在 pH 6~8 范围内对耐药菌均具有较高的灭活效率。并且在 pH 为 6 的条件下, PEG-PAgT 对仅具有四环素抗性的耐药菌 *E. coli* 消杀速率达到最快。 10^6 cfu/mL 耐药菌仅在 45 min 内可被完全灭活。通常地表水和废水的常见 pH 值在 6.5 到 8.5 之间[15]。因此, 以上结果表明, PEG-PAgT 在实际地表水和废水环境中能够具备较高的耐药菌灭活性能, 适合未来实际水体中耐药菌灭活应用。

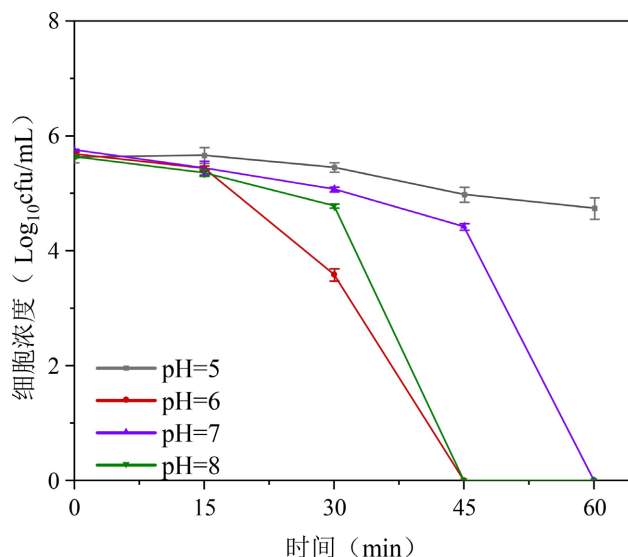


Figure 4. The effect of pH intensity on the inactivation of drug-resistant *E. coli* ER2738 (Initial bacterial concentration 10^6 cfu/mL; Photocatalyst concentration 1.00 g/L; Light intensity 750 W/m^2)

图 4. pH 强度对耐药菌 *E. coli* ER2738 灭活的影响(初始细菌浓度 10^6 cfu/mL; 光催化剂浓度 1.00 g/L; 光强 750 W/m^2)

在模拟实际水处理效果的研究框架下,探究水体中典型无机离子对光催化灭菌体系的干扰效应具有重要意义和价值。因此,本研究探讨了不同离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-)的存在对 PEG-PAgT 光催化灭活耐药菌的影响。根据图 5 所示的结果, Cl^- 和 SO_4^{2-} 的存在对光催化灭活耐药菌的效率几乎没有影响。另一方面, NO_3^- 的存在使得耐药菌灭活效率稍有降低。这可能主要是因为 NO_3^- 在光催化反应中作为电子受体或自由基淬灭剂,与光生载流子(如光生空穴或电子)发生反应,优先消耗了原本用于生成活性氧物种(如 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2$ 等)的氧化还原当量,导致体系中用于氧化杀灭耐药菌的活性物质浓度降低,从而降低光催化效率[16]。整体研究结果显示,在正常环境水平下,不同无机离子的存在对 PEG-PAgT 灭活耐药菌的性能没有显著影响。

综上所述,PEG-PAgT 对耐药菌的灭活效率随光照强度的增强而升高;pH 在 6~8 范围内灭活率较高;不同无机离子的存在对耐药菌的灭活无显著影响。

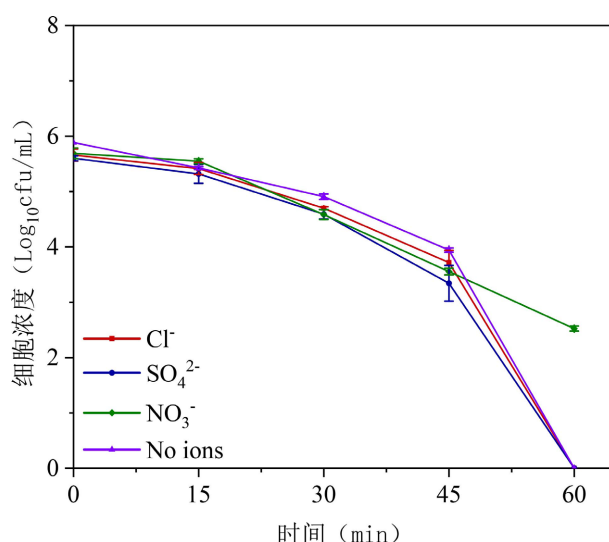


Figure 5. The effect of different inorganic ions on the inactivation of drug-resistant *E. coli* ER2738 (Initial bacterial concentration 10^6 cfu/mL; Photocatalyst concentration 1.00 g/L; Light intensity 750 W/m^2)

图 5. 不同无机离子存在对耐药菌 *E. coli* ER2738 灭活的影响(初始细菌浓度 10^6 cfu/mL; 光催化剂浓度 1.00 g/L; 光强 750 W/m^2)

3.4. 细胞形貌变化

为了探究 PEG-PAgT 光催化剂对耐药菌细胞形貌的破坏效果,本研究利用 SEM 观察了耐药菌形态在光催化反应过程中的变化。如图 6 所示,结果显示未经光催化处理的耐药菌 *E. coli* 呈现典型杆状形态,表面光滑且细胞结构完整。经过 30 min PEG-PAgT 光催化处理后的细菌形态变得异常,表面粗糙,胞体上出现凹坑。将反应时间延长到 60 min 时,细菌出现了形态塌陷、破损的情况,在细菌表面上形成更大的凹坑和孔洞,膜结构紊乱。这说明了光催化产生的活性氧成分在一定程度上可以破坏耐药菌的细胞膜,且细胞的破坏过程是从细胞膜向细胞内部组分逐步推进的,最终导致耐药菌的死亡[17]。

3.5. 耐药菌胞内活性氧的检测

胞内活性氧是指在细胞内有氧代谢过程中产生的一类具有高度反应性的分子,主要由一些氧分子或氧的衍生物(如过氧化氢、超氧化物等)构成,它们在正常细胞的代谢活动中不断生成。过量的胞内活性氧会导致细胞内 DNA、蛋白质、生长因子等物质造成损伤,从而影响细胞正常功能。DCFH-DA 荧光探针

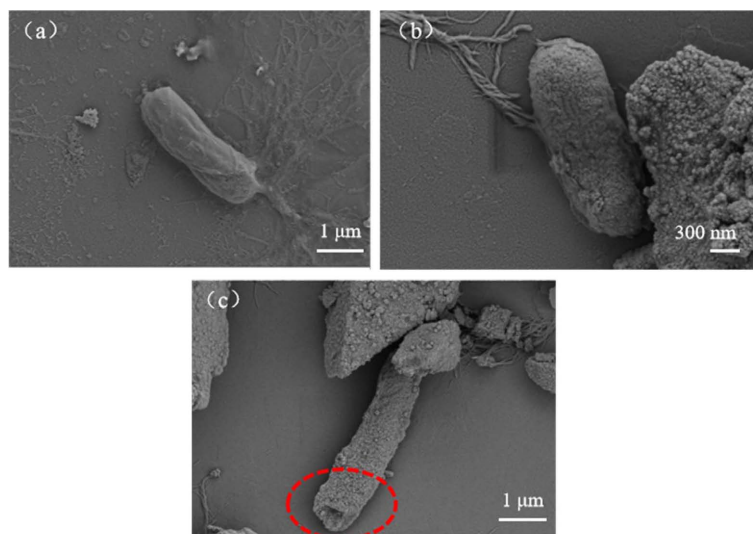


Figure 6. SEM images of (a) drug-resistant bacteria without photocatalytic treatment, (b) drug-resistant bacteria after 30 min of PEG PAgT photocatalytic treatment, and (c) drug-resistant bacteria after 60 min of PEG PAgT photocatalytic treatment
图 6. (a) 未经光催化处理的耐药菌、(b) PEG-PAgT 光催化处理 30 min 后的耐药菌、(c) PEG-PAgT 光催化处理 60 min 后的耐药菌 SEM 图像

检测结果显示(图 7), 光照处理组的活性氧要略高于不做任何处理的对照组, 这可能是由于光照导致的反应环境温度升高对细菌胞内活性氧产生了细微影响。同时, 在无光照条件下经 PEG-PAgT 处理的耐药菌活性氧水平也略高于对照组, 这可能是由于 PEG-PAgT 粉末材料在反应过程中产生的吸附作用对耐药菌的细胞膜造成一定伤害, 从而导致胞内活性氧升高[18]。而在 PEG-PAgT 光催化处理后的实验组中, 其活性氧含量明显高于其他组别, 证明在 PEG-PAgT 灭活耐药菌过程中光催化为主导机制。由此可以推断: 光照下 PEG-PAgT 表面产生的活性氧成分可攻击细菌, 导致细菌细胞内活性氧含量升高, 进一步破坏胞内大分子导致细菌损伤甚至是死亡[19]。

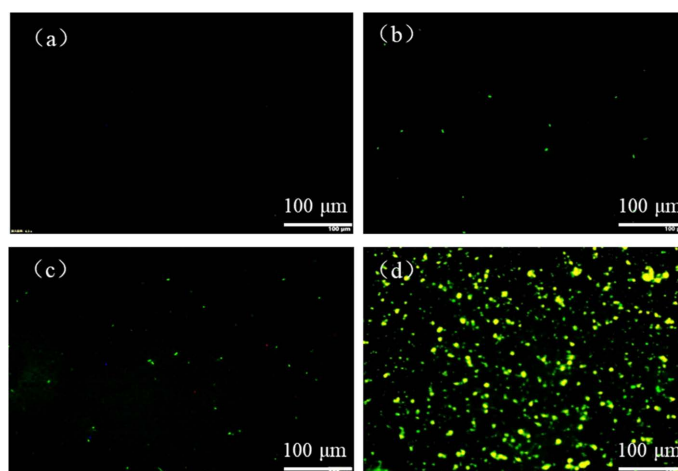


Figure 7. Fluorescence images of intracellular reactive oxygen species in drug-resistant *E. coli* ER2738 cells in the (a) control group, (b) light treated group, (c) dark treated group and (d) PEG-PAgT treated group
图 7. (a) 对照组、(b) 光照处理组、(c) 暗处理组和(d) PEG-PAgT 处理组中耐药菌 *E. coli* ER2738 细胞内活性氧的荧光图像

3.6. 光催化杀菌机理

基于以上实验结果,本研究提出了新型钛基光催化材料 PEG-PAgT 对水体中耐药菌灭活的可能机理。首先,在模拟太阳光照射下,PEG-PAgT 光催化剂可被激发产生电子(e^-)和空穴(h^+)。其中电子(e^-)可与溶液中的溶解氧(O_2)反应生成高活性氧物种($\cdot O_2^-$)。另一方面,空穴(h^+)可与水分子(H_2O)反应生成羟基自由基($\cdot OH$)。二者均为强氧化性活性物种,故能直接攻击耐药菌细胞膜,氧化破坏细胞膜上的磷脂双分子层,由此导致胞内物质外泄[20]。更重要的是,这些活性物种会由细胞膜向细胞内部组分逐层攻击,系统、彻底地破坏细胞内蛋白质、DNA 等关键组分,最终使耐药菌失活[21]。另外,值得指出的是,PEG-PAgT 光催化剂表面所产生的活性氧成分本身可诱导耐药菌发生氧化应激反应,致使耐药菌胞内活性氧水平急剧升高。而过量的胞内活性氧会对菌胞内 DNA、蛋白质、生长因子等生物大分子造成直接损伤,扰乱细胞正常功能,破坏胞内大分子结构,最终导致细菌损伤乃至死亡。

4. 结论

本文对新型钛基光催化剂 PEG-PAgT 灭活水体中典型耐药菌的性能进行了系统的评价。结果表明:PEG-PAgT 光催化剂对水体中耐四环素大肠杆菌具有良好的光催化灭活能力,且灭活效率与光催化剂负载量呈先上升后下降的趋势。同时,本研究考察了不同环境因素对光催化灭活耐药菌效率的影响,发现耐药菌的灭活效率随光照强度的增强而升高;pH 在 6~8 范围内灭活率较高;不同无机离子的存在对耐药菌的灭活无显著影响。此外,SEM 观察及胞内活性氧检测实验证明新型钛基光催化剂 PEG-PAgT 在模拟太阳光照射下可产生强氧化性自由基,破坏耐药菌细胞形貌,改变耐药菌细胞膜通透性,诱导胞内发生氧化应激反应,最终导致菌体形态塌陷、细胞破裂甚至死亡。综上所述,本研究所采用的新型钛基光催化剂 PEG-PAgT 具有良好的耐药菌灭活性能。研究结果可为高效解决水体中耐药菌污染问题提供一种新思路 and 实验依据,在水体净化方面具有实际应用价值。

基金项目

本研究得到了河北省自然科学基金资助项目(B2023406001)和河北省引进留学人员资助项目(C20230371)的资助。

参考文献

- [1] Jian, Z., Zeng, L., Xu, T., Sun, S., Yan, S., Yang, L., *et al.* (2021) Antibiotic Resistance Genes in Bacteria: Occurrence, Spread, and Control. *Journal of Basic Microbiology*, **61**, 1049-1070. <https://doi.org/10.1002/jobm.202100201>
- [2] He, H., Zhou, P., Shimabuku, K.K., Fang, X., Li, S., Lee, Y., *et al.* (2019) Degradation and Deactivation of Bacterial Antibiotic Resistance Genes during Exposure to Free Chlorine, Monochloramine, Chlorine Dioxide, Ozone, Ultraviolet Light, and Hydroxyl Radical. *Environmental Science & Technology*, **53**, 2013-2026. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04393>
- [3] 丰俊. 耐药细菌, 挑战人类健康的隐形“敌人” [J]. 健康生活, 2024(9): 7-8.
- [4] 刘佳乐, 刘晓晔, 付玉林, 史晓敏. 医院废水中耐药菌与耐药基因分布, 传播及消毒技术的研究进展[J]. 环境化学, 2025, 44(4): 1169-1183.
- [5] Long, Z., Li, Q., Wei, T., Zhang, G. and Ren, Z. (2020) Historical Development and Prospects of Photocatalysts for Pollutant Removal in Water. *Journal of Hazardous Materials*, **395**, Article ID: 122599. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122599>
- [6] Pascariu, P., Romanitan, C., Rusu, D., Silion, M., Cojocaru, C. and Serban, A.B. (2026) Nanofibers Based on Dy-Doped TiO_2 Prepared by Electrospinning-Calcination Method for Visible-Light-Driven Photocatalysis Applications. *Applied Surface Science*, **730**, Article ID: 166306. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2026.166306>
- [7] Atacan, K., Güy, N. and Semerci, A.B. (2025) Designing Green Synthesis of Silver Nanoparticles from Citrus Reticulata Onto $g-C_3N_4/TiO_2$ for Antibacterial and Photocatalytic Activities. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **64**,

Article ID: 103524. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103524>

- [8] Zhu, Q., Liu, N., Ma, Q., Sharma, A., Nagai, D., Sun, X., *et al.* (2021) Sol-Gel/Hydrothermal Two-Step Synthesis Strategy for Promoting Ag Species-Modified TiO₂-Based Composite Activity toward H₂ Evolution under Solar Light. *Materials Today Energy*, **20**, Article ID: 100648. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100648>
- [9] Sharma, A., Liu, N., Ma, Q., Zheng, H., Kawazoe, N., Chen, G., *et al.* (2020) PEG Assisted P/Ag/Ag₂O/Ag₃PO₄/TiO₂ Photocatalyst with Enhanced Elimination of Emerging Organic Pollutants in Salinity Condition under Solar Light Illumination. *Chemical Engineering Journal*, **385**, Article ID: 123765. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123765>
- [10] Ninganagouda, S., Rathod, V., Singh, D., Hiremath, J., Singh, A. K., Mathew, J. and Ul-Haq, M. (2014) Growth Kinetics and Mechanistic Action of Reactive Oxygen Species Released by Silver Nanoparticles from *Aspergillus niger* on *Escherichia coli*. *BioMed Research International*, **2014**, Article ID: 753419. <https://doi.org/10.1155/2014/753419>
- [11] 王佳赫, 刘大勇, 刘伟, 王林, 董彪. 纳米 TiO₂ 光催化抗菌应用的研究进展[J]. 应用化学, 2022, 39(4): 629-646.
- [12] Zhang, Y., Li, J. and Chen, J. (2026) Preparation of CuBi₂O₄/SrTiO₃ Composite Photocatalytic Materials Driven by Visible Light and Investigation of Their Broad Antibacterial Properties. *Journal of Molecular Structure*, **1363**, Article ID: 145789. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2026.145789>
- [13] Davin-Regli, A., Pagès, J. and Vergalli, J. (2024) The Contribution of Porins to Enterobacterial Drug Resistance. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, **79**, 2460-2470. <https://doi.org/10.1093/jac/dkac265>
- [14] Liu, L., Laghari, A.A., Meng, G., Chen, H., Wang, C. and Xue, Y. (2022) Photocatalytic Disinfection of Different Airborne Microorganisms by TiO₂/MXene Filler: Inactivation Efficiency, Energy Consumption and Self-Repair Phenomenon. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **10**, Article ID: 107641. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107641>
- [15] 王思予, 周宏飞, 闫英杰, 杨松, 苏媛. 夏季蒙古国西部地表水水质空间分布特征及评价[J]. 干旱区地理, 2025, 48(10): 1783-1792.
- [16] Du, H., Ma, Y., Du, X., Zhang, W. and Chen, X. (2023) 3D/2D CuBi₂O₄@Bi₂O₂CO₃ Z-Scheme Heterojunction: The Construction of Adsorption-Photocatalytic Synergistic Effect for Tetracycline Hydrochloride Removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **11**, Article ID: 110501. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110501>
- [17] Bi, Y., Shan, D., Feng, B., Wang, S., Zhu, E., Guo, H., *et al.* (2023) Carboxyl Group-Decorated Polythiophenes Polymeric PBTE-T-COOH for Visible-Light-Driven Photocatalytic Drug-Resistant Bacteria Inactivation. *Materials Today Communications*, **34**, Article ID: 105148. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105148>
- [18] 洪冕, 黄佳敏, 陈冬梅, 谢书宇. 纳米技术抗耐药菌的研究进展[J]. 畜牧兽医学报, 2022, 53(11): 3731-3736.
- [19] Liu, X., Yu, D., Wang, Y., Li, N., Wang, K., Yang, Y., *et al.* (2025) Highly Efficient Photocatalytic Inactivation of Flowing Bioaerosol by Using Visible Light-Assisted Titanium-Based Composite: Application and Mechanism. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **463**, Article ID: 116287. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2025.116287>
- [20] Iravani, S. (2022) Nanophotocatalysts against Viruses and Antibiotic-Resistant Bacteria: Recent Advances. *Critical Reviews in Microbiology*, **48**, 67-82. <https://doi.org/10.1080/1040841x.2021.1944053>
- [21] Ye, M., Lv, L., Chen, W., Gao, W., Chen, Y. and Liu, K. (2026) Fate and Removal of Antibiotic Resistance Bacteria and Genes in Medical Wastewater: Potential of Membrane Bioreactors. *Chemical Engineering Journal*, **535**, Article ID: 175598. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.175598>