



化学与生物工程
Chemistry & Bioengineering
ISSN 1672-5425, CN 42-1710/TQ

《化学与生物工程》网络首发论文

题目：近红外光增强碲-头孢噻肟纳米复合物对多重耐药菌的抗菌活性
作者：赵德友，刘向宇，吕中
收稿日期：2025-04-22
网络首发日期：2025-09-04
引用格式：赵德友，刘向宇，吕中. 近红外光增强碲-头孢噻肟纳米复合物对多重耐药菌的抗菌活性[J/OL]. 化学与生物工程.
<https://link.cnki.net/urlid/42.1710.tq.20250903.1010.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

赵德友,刘向宇,吕中. 近红外光增强碲-头孢噻肟纳米复合物对多重耐药菌的抗菌活性[J]. 化学与生物工程,2025,42(9):10-10.
ZHAO D Y,LIU X Y,LYU Z. Near-infrared light enhanced antibacterial activity of tellurium-cefotaxime nanocomposite against multidrug-resistant bacteria[J]. Chemistry & Bioengineering,2025,42(9):10-10.

近红外光增强碲-头孢噻肟纳米复合物对 多重耐药菌的抗菌活性

赵德友,刘向宇,吕 中*

(武汉工程大学环境生态与生物工程学院,湖北 武汉 430200)

摘要: 抗生素耐药菌的大量出现导致传统抗生素失效,开发新型抗菌材料与创新抗菌方法对抗多重耐药菌具有重要意义。采用绿色还原法合成了碲-头孢噻肟(Te-CTX)纳米复合物,测定了其在近红外光(NIR)照射下对多重耐药的革兰氏阳性菌耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(MRSA)和革兰氏阴性菌耐药大肠杆菌(DREC)的抗菌活性。结果表明,纳米复合物中CTX的存在增强了Te对MRSA和DREC的抗菌活性;在NIR照射下Te-CTX具有优异的光热转换效率,25 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Te-CTX经NIR照射10 min后,对MRSA和DREC的杀菌率均超过99%,远高于纳米复合物在无光照下的抗菌活性;NIR增强Te-CTX抗耐药菌活性的机制主要包括光热效应、细菌细胞膜结构破坏和细胞内活性氧的过量产生。Te-CTX作为光热抗菌剂在治疗耐药菌感染方面具有潜在的应用价值。

关键词: 碲-头孢噻肟纳米复合物;耐药菌;光热效应;细胞膜;活性氧(ROS)

中图分类号: R978.1 R378

Near-Infrared Light Enhanced Antibacterial Activity of Tellurium-Cefotaxime Nanocomposite Against Multidrug-Resistant Bacteria

ZHAO Deyou, LIU Xiangyu, LYU Zhong*

(School of Environmental Ecology and Biological Engineering, Wuhan Institute of Technology,
Wuhan 430200, China)

Abstract: The emergence of a large number of antibiotic-resistant bacteria has led to the failure of traditional antibiotics. Therefore, the development of new antibacterial materials and innovative antibacterial methods to combat multidrug-resistant bacteria are of great significance. We prepared tellurium-Cefotaxime (Te-CTX) nanocomposite by a green reduction method, and evaluated the antibacterial activity against multidrug-resistant Gram-positive bacterium Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) and Gram-negative bacterium drug-resistant *Escherichia coli* (DREC) under near-infrared light (NIR) irradiation. The results show that the presence of CTX in the composite enhances the antibacterial activity of Te against MRSA and DREC. Under NIR irradiation, Te-CTX possesses excellent photothermal conversion efficiency. After 10 min of NIR irradiation, the killing rate of 25 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Te-CTX against MRSA and DREC is over 99%, which is much higher than the antibacterial activity of the nanocomposite without light irradiation. The mechanism of NIR enhancing the antibacterial activity of Te-CTX against drug-resistant bacteria mainly includes photothermal effect, destruction of bacterial cell membrane structure, and excessive production of intracellular reactive oxygen species.

基金项目: 国家自然科学基金项目(42276164)

收稿日期: 2025-04-22

作者简介: 赵德友(2000—),男,贵州毕节人,硕士研究生,研究方向:纳米生物材料, E-mail: 1375932713@qq.com; 通信作者: 吕中, 博士,教授,研究方向:纳米生物材料及其环境影响, E-mail: zhonglu@wit.edu.cn.

The study indicates that Te-CTX as a photothermal antibacterial agent has potential application value in the treatment of drug-resistant bacterial infections.

Keywords: tellurium-Cefotaxime nanocomposite; drug-resistant bacterium; photothermal effect; cell membrane; reactive oxygen species(ROS)

随着细菌对抗生素耐药性的持续加剧,传统抗生素的治疗效果逐渐降低,导致治疗成本增加、病死率上升^[1],全球公共卫生面临严峻挑战。世界卫生组织(WHO)已将抗生素耐药性列为全球三大公共卫生威胁之一^[2]。当前,新型抗生素的研发速度远不及耐药菌株的出现速度^[3],因此,开发新型抗菌材料与创新抗菌方法是解决细菌耐药性问题的有效途径。

研究发现,部分纳米材料能增强或恢复失效抗生素的抗菌活性,并通过与抗生素的协同作用降低二者的使用浓度,从而降低纳米材料的毒性^[4]。例如,银纳米颗粒(Ag NPs)能恢复多黏菌素对携带黏菌素抗性基因(*mcr*)超级细菌的抗菌活性^[5],在减少 Ag NPs 用量的同时降低其毒性。半金属元素碲(Te)因其独特的电学、热学和光学性质在光电领域得到广泛应用^[6-7]。近年来,含碲材料在抗癌领域的应用潜力逐渐受到关注^[8],如含碲化合物三氯(二氧乙烯-O, O')碲酸铵(AS101)作为免疫调节剂在癌症免疫治疗方面具有较好的效果,目前已进入临床试验阶段^[9]。含碲材料具有较好的光热转换活性,在光热协同抗癌方面已取得诸多重要进展^[10]。目前,关于含碲材料在抗菌方面的应用研究较少。据报道,亚碲酸盐和 β -内酰胺类抗生素头孢噻肟(CTX)可协同抑制大肠杆菌的活性^[11-12]。作者所在课题组前期研究发现,碲化铋(Bi_2Te_3)纳米颗粒能够有效恢复失效抗生素 CTX 对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(MRSA)的抗菌活性^[13]。

光热治疗(PTT)通过多种机制使抗生素耐药菌死亡且不易产生耐药性^[14-15],在对抗耐药菌方面展现出良好应用前景。近红外光(NIR)因具有局部靶向性、组织穿透性、治疗效果快、对健康组织损伤小等优点,被广泛应用于临床^[16-17]。碲化合物因其优异的光热性能被认为是具有前景的 PTT 材料,例如 Ag_2Te 、 CuTe 和 TePt 等^[18-20]。还原型氧化石墨烯修饰的 Bi_2Te_3 在 NIR 照射下具有较高的光热转换效率,对 MRSA 引起的伤口感染具有较好的治疗效果^[21]。作者所在课题组前期研究发现,Te-CTX 复合物在 LED 照射下能有效治疗 MRSA 引起的伤口感染^[22]。

鉴于此,作者结合 Te 与 CTX 的协同抗菌作用及 Te 的光热效应,合成碲-头孢噻肟(Te-CTX)纳米复合物,并研究其在 NIR 照射下对多重耐药的革兰氏阳性

菌和革兰氏阴性菌的抗菌活性和抗菌机理,为解决耐药菌感染问题提供新方法。

1 实验

1.1 菌株、试剂与仪器

耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(MRSA)、耐药大肠杆菌(DREC),武汉市第三医院。

碲酸钠(Na_2TeO_3)、牛血清白蛋白(BSA)、碲粉,中国 Aladdin;D(-)-果糖,中国 Geao 有限公司;头孢噻肟(CTX),中国优克药业有限公司;Mueller-Hinton(MH)培养基,中国奥博兴;LIVE/DEAD™ BacLight™ 细菌活性检测试剂盒,美国 Thermo Fisher;2',7'-二氯二氢荧光素二乙酸酯(DCFH-DA,纯度 $\geq 97\%$),美国 Sigma-Aldrich。

JEM-2100 型透射电子显微镜,日本电子;GeminiSEM 300 型场发射扫描电子显微镜(FE-SEM),德国蔡司;Bruker D8 型 X-射线衍射仪,德国布鲁克;Nicolet 6700 型傅立叶变换红外光谱仪,美国赛默飞;MDL-III 型近红外光发射器,长春新产业光电技术有限公司;FLIR C2 型红外热像仪,美国菲力尔公司;IX73 型倒置荧光显微镜,日本奥林巴斯;F-4700 型荧光光谱仪,日本日立。

1.2 Te-CTX 的合成与表征

以 BSA 为分散剂、果糖为绿色还原剂和稳定剂,参照文献^[23-24]方法合成生物相容性的复合物 Te-CTX。首先,将 125 mg Na_2TeO_3 溶解于 24 mL 去离子水中,搅拌下加入 1 mL $30 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ BSA 溶液和 1 mL $300 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ CTX 溶液,然后加入 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 溶液调节 pH 值至 11;再加入 5 mL $10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 果糖溶液,将混合溶液在 40°C 下搅拌反应 6 h;将得到的黑色溶液置于透析袋中透析 24 h,通过超滤(100 kDa, Millipore)离心后,将所得 Te-CTX 溶液在 4°C 下保存,备用。通过 TEM 观察样品形貌,通过 XRD 和 FTIR 确认其组成。

1.3 Te-CTX 的光热效应评价

将 $200 \mu\text{L}$ 不同浓度(6.5、12.5、25、50、100, $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)的 Te-CTX 溶液经 NIR(808 nm, $1.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,下同)照射 5 min,使用红外热像仪每 30 s 记录 1 次温度。将 $50 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Te-CTX 溶液进行 4 次

NIR 照射-自然冷却循环,评价其光热稳定性。

1.4 Te-CTX 的抗菌活性测试

将 MRSA/DREC 菌株在 MH 培养基中培养至对数生长期,用 PBS 调节菌浓至 1×10^8 CFU $\cdot$ mL $^{-1}$ 后接种于 96 孔板中;将 20 μ L 菌悬液与 180 μ L 不同浓度的 Te-CTX 溶液混合,经 NIR 照射 10 min 后,于 37 $^{\circ}$ C 孵育 10 min;将菌液用 PBS 稀释合适倍数,并取 10 μ L 涂布于 MH 琼脂板上,37 $^{\circ}$ C 培养 24 h 后计数;以未经 NIR 照射的样品作为对照,计算细菌存活率。

1.5 NIR 增强 Te-CTX 抗菌活性机制探讨

1.5.1 细胞染色实验

使用细菌活性检测试剂盒对不同处理下的 MRSA 和 DREC 进行 SYTO 9 ($6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 PI ($30 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 染色 30 min;染色后的细菌经离心 ($5\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 后,用 0.9% 生理盐水洗涤 3 次,利用倒置荧光显微镜观察。

1.5.2 细菌形态分析

将 1×10^8 CFU $\cdot$ mL $^{-1}$ 菌悬液与 $50 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$

的 Te-CTX 溶液混合,NIR 照射 10 min;收集细菌,用 2.5% 戊二醛在 4 $^{\circ}$ C 下固定 2 h;依次用 50%、75%、85%、95%、100% 的梯度乙醇脱水,利用 FE-SEM 观察细菌形态。以 PBS 代替 Te-CTX 溶液作为对照组。

1.5.3 胞内活性氧(ROS)检测

将 MRSA 悬液 (1×10^8 CFU $\cdot$ mL $^{-1}$) 与 $50 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Te-CTX 溶液混合,NIR 照射 10 min,随后加入 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ DCFH-DA 溶液,37 $^{\circ}$ C 孵育 1 h;用 PBS 洗涤 3 次后,利用荧光分光光度计测定荧光强度(激发波长 450 nm,发射波长 535 nm)。以未处理的 MRSA 悬液作为对照组。

1.6 数据分析

所有数据均以 3 次实验的平均值 $\pm$ 标准差表示。使用单因素方差分析(ANOVA)对数据进行分析,与对照组进行比较。 $P < 0.05$ 表示具有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 Te-CTX 的表征(图 1)

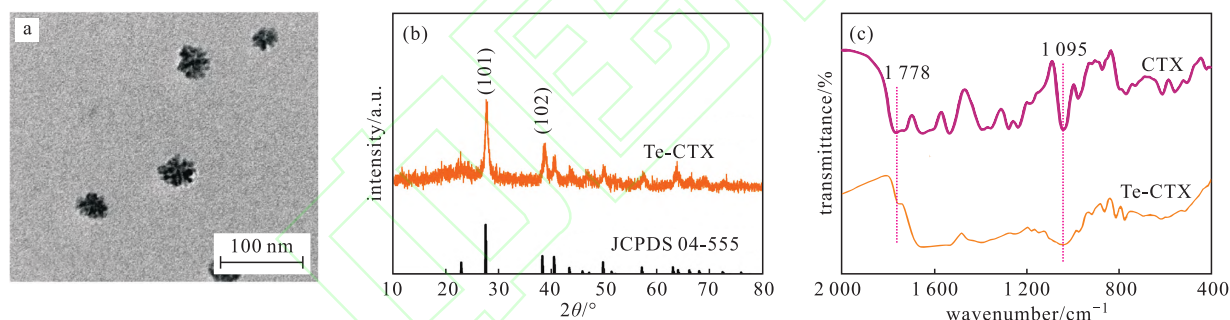


图 1 Te-CTX 的 TEM 照片(a)、XRD 图谱(b)和 FTIR 图谱(c)

Fig.1 TEM image(a), XRD pattern(b), and FTIR spectrum(c) of Te-CTX

由图 1 可知,Te-CTX 纳米复合物呈花状结构,平均粒径约为 40 nm,且在水中表现出良好的分散性(图 1a)。XRD 图谱(图 1b)中,在 27.6 $^{\circ}$ 和 38.3 $^{\circ}$ 处的特征衍射峰分别归属于 Te 晶体的(101)和(102)晶面。FTIR 图谱(图 1c)中,在 1778 cm^{-1} 和 1095 cm^{-1} 处的特征峰均归属于 CTX 内酰胺环的羰基($\text{C}=\text{O}$)。表明 Te-CTX 纳米复合物成功合成。

2.2 Te-CTX 的光热效应(图 2)

由图 2a 可知,随着 Te-CTX 浓度的增加,温度明显上升,当浓度为 $50 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,NIR 照射 5 min 后温度分别升至 55 $^{\circ}$ C 和 71 $^{\circ}$ C,温度升幅分别约为 32 $^{\circ}$ C 和 48 $^{\circ}$ C。表明,Te-CTX 在 NIR 照射下具有优异的光热转换效率。此外,Te-CTX 具有较好的光热稳定性,连续 4 次 NIR 照射-自

然冷却循环后温度升幅几乎无变化(图 2b)。

2.3 Te-CTX 的抗菌活性

NIR 照射下 Te-CTX、Te 纳米颗粒对 MRSA 和 DREC 的抗菌活性如图 3 所示。

由图 3 可知,无 NIR 照射下,即使 Te-CTX 浓度高达 $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$,MRSA 存活率仍为 74.40%,表明单一 Te-CTX 的杀菌效果有限;而仅使用 NIR 照射几乎没有杀菌作用;当 Te-CTX 与 NIR 联用时,表现出明显的抗菌活性,经 $25 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Te-CTX + 10 min NIR 联合处理后,MRSA 杀菌率高达 99.72%,显示出极高的杀菌效率。Te-CTX 对 DREC 表现出与 MRSA 相似的杀菌效果(图 3b)。单独使用 NIR 或 Te-CTX 时,DREC 存活率依然较高;但经 $25 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Te-CTX + NIR 联合处理后,DREC 几乎被完全

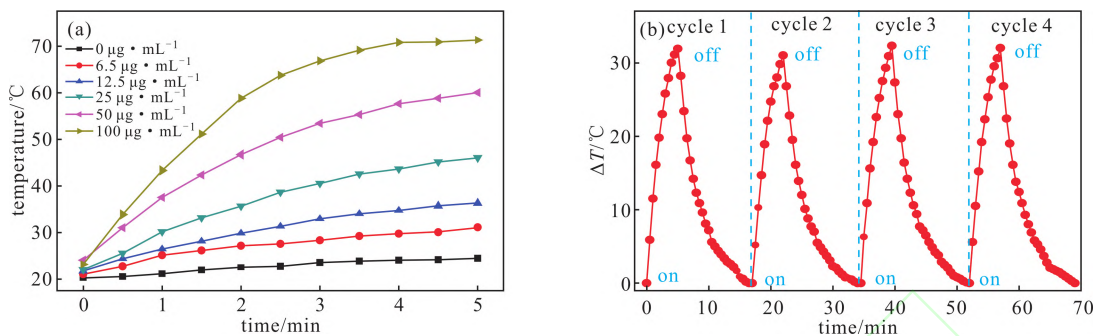
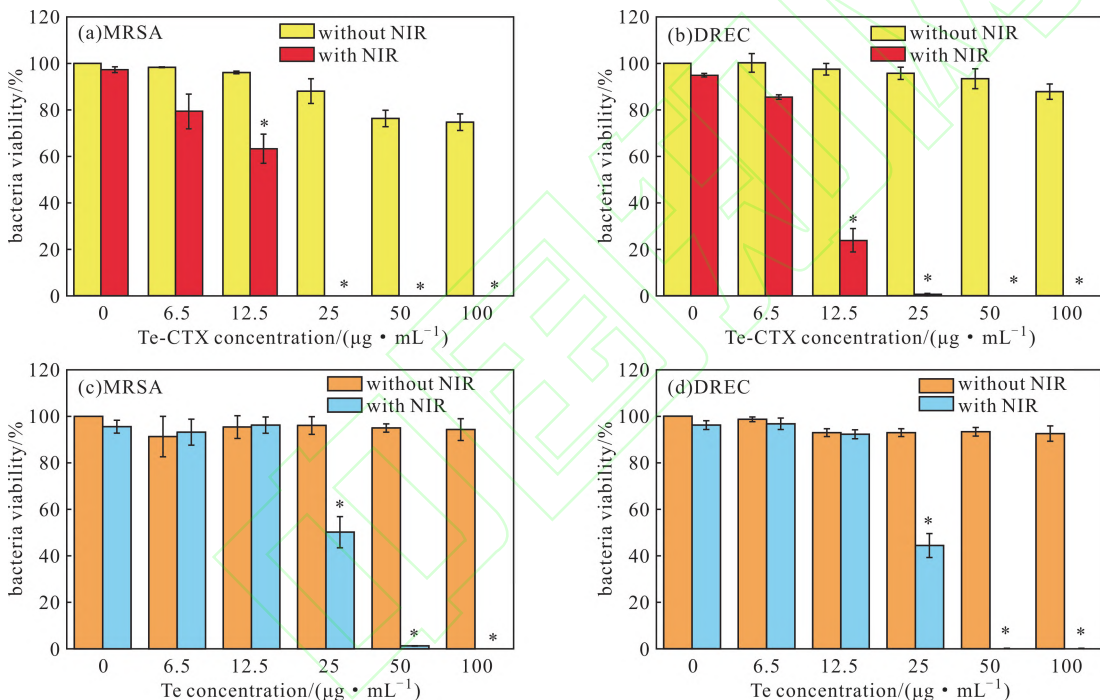


图 2 不同浓度 Te-CTX 溶液在 NIR 照射下的温度变化(a)及 50 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Te-CTX 溶液在 NIR 照射下的光热稳定性(b)
Fig. 2 Temperature changes of Te-CTX solutions with different concentrations under NIR irradiation(a) and photothermal stability of 50 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Te-CTX solution under NIR irradiation(b)



注: * 表示与对照组相比有显著差异, $P < 0.05$, 下图同

图 3 NIR 照射下 Te-CTX、Te 纳米颗粒对 MRSA(a,c) 和 DREC(b,d) 的抗菌活性

Fig. 3 Antibacterial activities of Te-CTX and Te nanoparticles against MRSA(a,c) and DREC(b,d) under NIR irradiation

杀灭。以上结果表明, NIR 显著增强了 Te-CTX 对耐药菌的抗菌活性。

值得注意的是, CTX 的存在进一步增强了 Te 的抗菌活性。在相同浓度 ($12.5 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$) 及 10 min NIR 照射条件下, 未负载 CTX 的 Te 纳米颗粒对 MRSA 和 DREC 几乎无杀菌作用 (图 3c、3d); 而 Te-CTX 对 MRSA 和 DREC 的杀菌率分别为 36.74% 和 76.29%。因此, Te-CTX 纳米复合物联合光热治疗是一种高效的抗耐药菌策略。

2.4 NIR 增强 Te-CTX 抗菌活性的机制

为探究 NIR 增强 Te-CTX 对 MRSA 和 DREC 抗菌活性的机制, 采用 SYTO 9 和 PI 荧光染料对细菌进行染色, SYTO 9 能使活菌特异性地呈现绿色荧光,

而死菌由于细胞膜受损, 导致 PI 能轻易进入并与核酸结合, 呈现红色荧光^[25]。染色结果 (图 4a) 显示, 在对照组、NIR 处理组及 Te-CTX 处理组中, 几乎所有 MRSA 均呈现出绿色荧光, 表明其细胞膜结构保持完整; 而在 Te-CTX+NIR 联合处理组中, 所有 MRSA 均呈现出红色荧光, 表明其细胞膜完整性遭到破坏, 细菌已被有效杀灭。DREC 的染色结果与 MRSA 高度一致。说明, Te-CTX 与 NIR 联用对 MRSA 和 DREC 的细胞膜结构具有显著的破坏作用, 展现出强大的杀菌效果。

采用 FE-SEM 观察处理前后 MRSA 和 DREC 细胞形态的变化 (图 4b), 发现未经处理的 MRSA 和 DREC 细胞形态完整, 表面光滑; Te-CTX 单独处理

后,细菌形态基本保持不变;而经 $50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ Te-CTX+NIR 联合处理后,大部分细菌表面出现明显收缩和塌陷,部分细菌的细胞膜破裂并伴有胞质物质泄漏,表明细胞膜结构遭到了严重破坏。

研究发现,部分光敏剂在 NIR 照射下会产生大量的 ROS^[26],而细菌体内高水平 ROS 可以引起脂质、DNA 和蛋白质的氧化损伤,从而导致细菌死亡^[27]。DCFH-DA 能与 ROS 反应生成具有荧光的 2',7'-二

氯荧光素(DCF),其荧光强度与 ROS 含量成正比。因此,采用 DCFH-DA 荧光探针检测 NIR 照射下 Te-CTX 对 MRSA 细胞内 ROS 水平的影响(图 4c)。结果显示,与对照组相比,NIR 或 Te-CTX 单独处理的细胞内 ROS 水平仅略有升高;而经 Te-CTX+NIR 联合处理的细胞内 ROS 水平明显升高,表明 NIR 照射可促进 ROS 生成,这可能是导致细菌细胞死亡的重要机制。

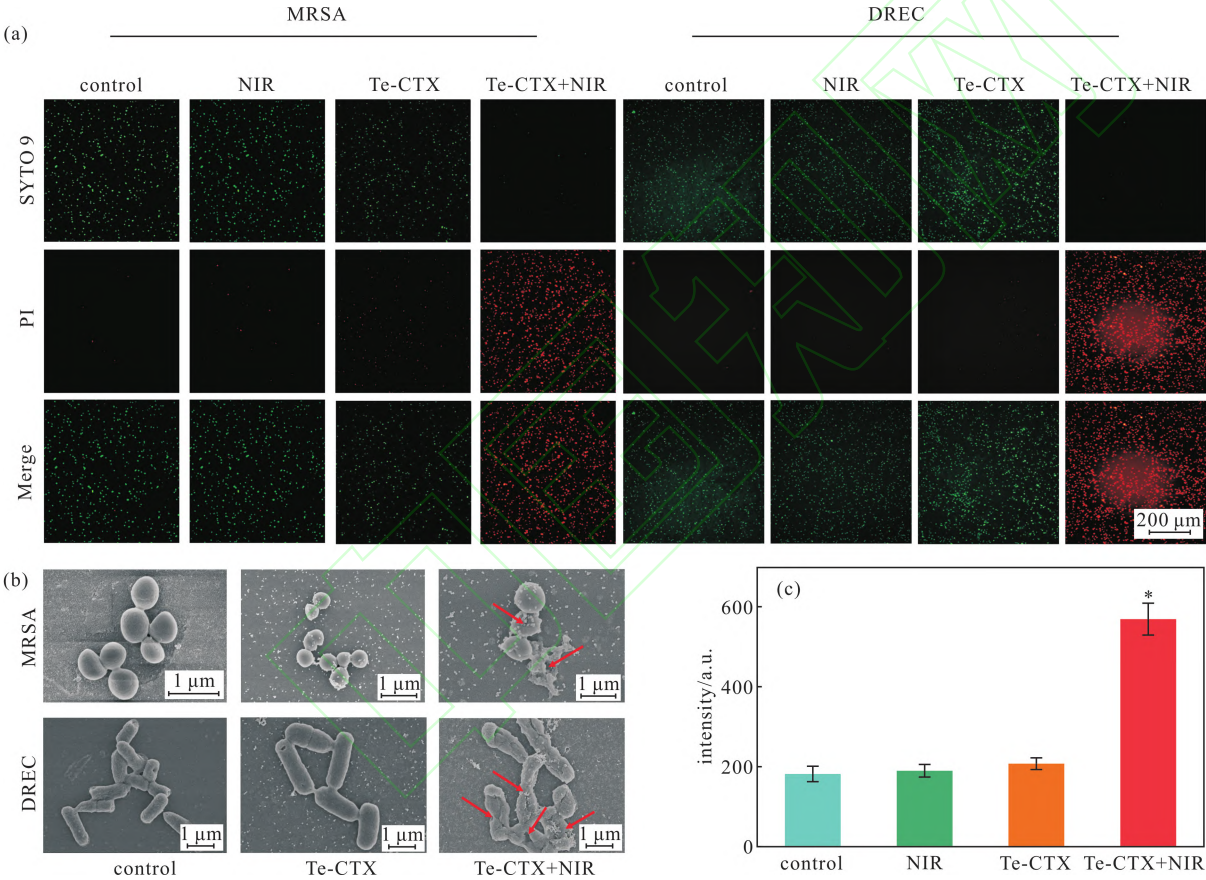


图 4 不同处理后 MRSA 和 DREC 的活/死细胞染色荧光图(a)和 FE-SEM 照片(b)及 MRSA 细胞内 ROS 水平(c)

Fig. 4 Live/dead cell staining fluorescence images(a),FE-SEM images(b) of MRSA and DREC,and intracellular ROS level of MRSA(c) after different treatments

3 结论

采用绿色还原法合成了 Te-CTX 纳米复合物,由于 Te 与 CTX 的协同抗菌作用,使 Te-CTX 对多重耐药的革兰氏阳性菌 MRSA 和革兰氏阴性菌 DRCE 表现出较高的抗菌活性。在 NIR 照射下,Te-CTX 具有优异的光热效应,对耐药菌 MRSA 和 DRCE 的抗菌活性显著增强。NIR 增强 Te-CTX 抗耐药菌活性的机制主要包括光热效应、细菌细胞膜结构破坏和细胞内 ROS 的过量产生。Te-CTX 纳米复合物联合 NIR

有望成为一种高效消除耐药菌的新型抗菌策略,在治疗耐药菌感染方面具有应用潜力。

参考文献:

- [1] ZHOU X Q, GUO Z C, TANG X, et al. Sulfate radical-based advanced oxidation processes for simultaneous removal of antibiotic-resistant bacteria and antibiotic resistance genes and the affecting factors[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 498: 155149.
- [2] SATI H, CARRARA E, SAVOLDI A, et al. The WHO bacterial priority pathogens list 2024: a prioritisation study to guide research, development, and public health strategies against antimicro-

- crobial resistance[J/OL]. The Lancet Infectious Diseases, 2025, DOI:10.1016/S1473-3099(25)00118-5.
- [3] 谢建平, 黄煜, 宋洁. 抗生素耐药机制与新抗感染措施研发[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2023, 46(6): 719-730.
XIE J P, HUANG Y, SONG J. Mechanism of antibiotic resistance and development of new anti-infection measures[J]. Journal of Sichuan Normal University(Natural Science), 2023, 46(6): 719-730.
- [4] LAKSHMINARAYANAN R, YE E Y, YOUNG D J, et al. Recent advances in the development of antimicrobial nanoparticles for combating resistant pathogens[J]. Advanced Healthcare Materials, 2018, 7(13): 1701400.
- [5] ZHANG Q, WANG R M, LIU C J, et al. Re-sensitization of *mcr* carrying multidrug resistant bacteria to colistin by silver[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(11): e2119417119.
- [6] DUAN L Q, LIU T, CHEN T F. Near-infrared laser-triggered drug release in a tellurium nanosystem for simultaneous chemophotothermal cancer therapy [J]. Biomaterials Science, 2021, 9(5): 1767-1778.
- [7] TANG X M, DAI J, SUN H L, et al. Mechanical strength, surface properties, cytocompatibility and antibacterial activity of nano zinc-magnesium silicate/polyetheretherketone biocomposites[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2019, 19(12): 7615-7623.
- [8] WANG H L, CHAI L X, XIE Z J, et al. Recent advance of tellurium for biomedical applications[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2020, 36(4): 551-559.
- [9] CHIAVERINI L, MARZO T, LA MENDOLA D. AS101: an overview on a leading tellurium-based prodrug[J]. Inorganica Chimica Acta, 2022, 540: 121048.
- [10] PAN W, LIU C, LI Y H, et al. Ultrathin tellurium nanosheets for simultaneous cancer thermo-chemotherapy[J]. Bioactive Materials, 2022, 13: 96-104.
- [11] MOLINA-QUIROZ R C, LOYOLA D E, MUNOZ-VILLAGRAN C M, et al. DNA, cell wall and general oxidative damage underlie the tellurite/cefotaxime synergistic effect in *Escherichia coli* [J]. PLoS One, 2013, 8(11): e79499.
- [12] MOLINA-QUIROZ R C, MUNOZ-VILLAGRAN C M, de LA TORRE E, et al. Enhancing the antibiotic antibacterial effect by sub lethal tellurite concentrations: tellurite and Cefotaxime act synergistically in *Escherichia coli* [J]. PLoS One, 2012, 7(4): e35452.
- [13] LIU X Y, MA L L, CHEN F, et al. Synergistic antibacterial mechanism of Bi₂Te₃ nanoparticles combined with the ineffective β -lactam antibiotic Cefotaxime against Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* [J]. Journal of Inorganic Biochemistry, 2019, 196: 110687.
- [14] LI J, LIU X M, TAN L, et al. Zinc-doped Prussian Blue enhances photothermal clearance of *Staphylococcus aureus* and promotes tissue repair in infected wounds [J]. Nature Communications, 2019, 10: 4490.
- [15] SHANMUGAM M, KUTHALA N, VANKAYALA R, et al. Multifunctional CuO/Cu₂O truncated nanocubes as trimodal image-guided near-infrared-III photothermal agents to combat multidrug-resistant lung carcinoma [J]. ACS Nano, 2021, 15(9): 14404-14418.
- [16] JUNG H S, VERWILT P, SHARMA A, et al. Organic molecule-based photothermal agents: an expanding photothermal therapy universe [J]. Chemical Society Reviews, 2018, 47(7): 2280-2297.
- [17] XU X B, CHAO Y Y, MA X Z, et al. A photothermally antibacterial Au@Halloysite nanotubes/lignin composite hydrogel for promoting wound healing [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258(Part 1): 128704.
- [18] DONG L L, LI W J, YU L D, et al. Ultrasmall Ag₂Te quantum dots with rapid clearance for amplified computed tomography imaging and augmented photonic tumor hyperthermia [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(38): 42558-42566.
- [19] LI W H, ZAMANI R, GIL P R, et al. CuTe nanocrystals: shape and size control, plasmonic properties, and use as SERS probes and photothermal agents [J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135(19): 7098-7101.
- [20] PANDEY S, TALIB A, THAKUR M M, et al. Tellurium platinum nanowires for photothermal therapy of cancer cells [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2016, 4(21): 3713-3720.
- [21] WANG S Y, QIAO Y Q, LIU X M, et al. Reduced graphene oxides modified Bi₂Te₃ nanosheets for rapid photo-thermoelectric catalytic therapy of bacteria-infected wounds [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(3): 2210098.
- [22] WU S M, LIU X Y, LI Z, et al. Te-Cefotaxime nanocomposites with restored antibiotic susceptibility and the LED light activated photothermal effect for rapid MRSA eradication [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2022, 10(10): 1571-1581.
- [23] WANG Y, WU Y Y, LIU Y J, et al. BSA-mediated synthesis of bismuth sulfide nanotheranostic agents for tumor multimodal imaging and thermoradiotherapy [J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(29): 53350-5344.
- [24] XIAO X, HU R P, LIU C, et al. Facile large-scale synthesis of β -Bi₂O₃ nanospheres as a highly efficient photocatalyst for the degradation of Acetaminophen under visible light irradiation [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2013, 140: 433-443.
- [25] LIANG F S, LIU X P, YU X, et al. Enhancing bioavailable carbon sources and minimizing ammonia emissions in distillery sludge and distiller's grains waste co-composting through deep eutectic solvent addition [J]. Bioresource Technology, 2024, 397: 130491.
- [26] 李双, 白龙, 赵敏. 硫化铜纳米材料的制备与应用研究进展 [J]. 化学与生物工程, 2023, 40(7): 1-5, 17.
LI S, BAI L, ZHAO M. Research progress in preparation and application of copper sulfide nanomaterials [J]. Chemistry & Bioengineering, 2023, 40(7): 1-5, 17.
- [27] SUN J H, YAN M J, TAO G D, et al. A single-atom manganese nanozyme mediated membrane reactor for water decontamination [J]. Water Research, 2025, 268(Part A): 122627.