

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.01.005

紫外/过氧乙酸对铜绿假单胞菌灭活及抗性基因去除

许元生, 王珺菽, 潘 燃, 祝淑敏, 施 周

(湖南大学土木工程学院 水安全保障技术及应用湖南省工程研究中心, 湖南长沙 410082)

摘 要: 过氧乙酸(PAA)用于消毒能有效灭活细菌并控制消毒副产物(DBPs)生成,但存在细菌重新复活的问题。为此,探究了紫外/过氧乙酸(UV/PAA)工艺对铜绿假单胞菌的灭活性能和机理。通过灭活、暗修复、膜渗透性分析和电镜扫描等实验及表征方法,发现UV/PAA工艺的灭活性能优于单独紫外线或过氧乙酸,这是因为在UV/PAA体系中产生了自由基和细胞内活性氧(ROS)。铜绿假单胞菌的膜通透性随着暴露在UV/PAA体系中时间的增加而增加,且细胞表面结构受到严重破坏,从而导致DNA和蛋白质等胞内物质泄漏。UV/PAA处理能几乎完全抑制细菌暗修复现象,并且进一步灭活可存活但不可培养(VBNC)的细胞,表现出远远超过单独紫外线或过氧乙酸的氧化能力。此外,UV/PAA工艺还可以有效去除水中抗性基因(ARGs)。

关键词: 紫外; 过氧乙酸; 灭活; 铜绿假单胞菌; 存活但不可培养; 抗性基因

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)01-0032-08

Effective Inactivation of *P. aeruginosa* and ARGs Removal in UV/PAA Process: Performance and Mechanisms

XU Yuan-sheng, WANG Jun-shu, PAN Ran, ZHU Shu-min, SHI Zhou

(Hunan Engineering Research Center of Water Security Technology and Application, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Peracetic acid (PAA) can effectively inactivate bacteria and control disinfection byproducts (DBPs). However, it may promote bacterial reactivation after treatment. This study investigated the performance and mechanism of the UV/PAA process for *P. aeruginosa* inactivation to enhance disinfection. Experimental and characterization methods such as inactivation, dark repair, membrane permeability analysis and electron microscopy scanning showed that the inactivation performance of the UV/PAA process was superior to that of UV or PAA alone due to the generation of free radicals and intracellular reactive oxygen species (ROS) in the UV/PAA system. The membrane permeability of *P. aeruginosa* increased over time when exposed to the UV/PAA system. Additionally, severe disruption of the cell surface structure was observed, resulting in the leakage of intracellular material such as DNA and proteins. The UV/PAA treatment was highly effective in inhibiting the bacterial dark repair phenomenon and further inactivating the viable but non-culturable (VBNC) cells, demonstrating a far superior oxidation ability of UV or PAA alone. Additionally, the UV/PAA process

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52200014)

通信作者: 祝淑敏 E-mail: zshuminwater@163.com

could efficiently eliminate antibiotic resistance genes (ARGs).

Key words: ultraviolet; peracetic acid; inactivation; *P. aeruginosa*; viable but non-culturable (VBNC); antibiotic resistance genes

消毒作为一种水处理中的常见措施,能够灭活病原体,限制相关疾病的传播^[1]。常见的消毒工艺如氯(Cl_2)、臭氧(O_3)和紫外线(UV)存在一些局限性^[2]。氯消毒效率高、成本低、持续时间长,是应用最广泛的消毒剂。然而,在氯消毒过程中会生成消毒副产物(DBPs),严重威胁用水安全,并催生出耐氯细菌^[3-4]。紫外线处理因其对大多数微生物病原体的高效率灭活和不产生DBPs的特点而越来越受重视,然而这一方法并不绝对有效,许多微生物能通过光活化和暗修复机制^[5]修复其造成的损伤。与传统消毒剂相比,过氧乙酸(PAA)杀菌能力更强,适用pH范围更宽,微生物更难产生耐药性,且不会生成DBPs^[6],对水生生物的毒性也更低^[7]。因此,PAA已成为水处理中氯消毒剂的理想替代品,但是商用PAA溶液中含有的醋酸成分可能会在高PAA剂量时增加水中的有机物含量,增加微生物复活的可能性^[8]。基于紫外和PAA的高级氧化工艺能够进一步提高PAA的消毒效率并降低消毒后微生物再生的风险,引起了学者的关注^[9-11]。

抗生素滥用筛选出了一批具有耐药性的病原体,具有耐药抗性基因(ARGs)的细菌对人类健康构成了威胁^[12]。最近的研究表明,PAA能将双内酰胺类抗生素转化为活性较低的形式,进而同时减少耐药性细菌和对应抗性基因的生成^[13]。UV/PAA组合工艺已被证明可以降解包括抗生素在内的多种药物和水处理设施中的耐药大肠杆菌^[14-15]。

铜绿假单胞菌是《食品安全国家标准 包装饮用水》(GB 19298—2014)中规定的微生物指标之一,对人体危害极大,具有耐氯性和耐药性,常规消毒工艺难以将其有效去除。目前,鲜见UV/PAA工艺灭活铜绿假单胞菌的报道。为此,采用UV-LED光源,研究了UV/PAA工艺对铜绿假单胞菌和抗性基因的去除效能、灭活机理以及铜绿假单胞菌的暗修复潜能。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

过氧乙酸(PAA)、次氯酸钠(NaClO)、磷酸二氢

钠(NaH_2PO_4)、磷酸氢二钠(Na_2HPO_4)、硫代硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)等化学试剂均购自阿拉丁公司;铜绿假单胞菌菌株购自中国工业微生物菌种保藏管理中心(CICC)。所有溶液均使用超纯水制备。

1.2 实验装置

实验装置如图1所示。将圆形石英器皿放置在磁力搅拌器上,并覆盖圆形的UV-LED光反应器。UV-LED可以发射出波长为254 nm的紫外光(UV),其光强为 $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

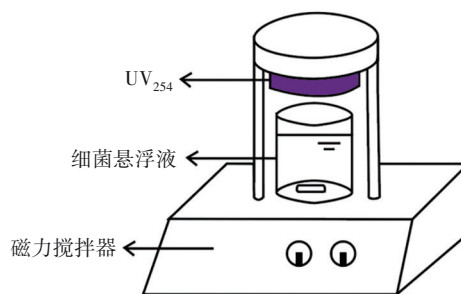


图1 实验装置

Fig.1 Experimental device diagram

1.3 实验方法

1.3.1 菌液配制

菌种用营养肉汤(NB)培养基培养两代后用于实验。实验时,将铜绿假单胞菌菌株接种在一次性无菌培养皿上,然后放置到 37°C 恒温培养箱里培养24 h。培养完成后,刮取培养皿上一定量的细菌溶解于无菌PBS溶液并离心($8\,000 \text{ r}/\text{min}$ 、 4°C 、5 min),弃去上清液,将沉淀的细菌重新溶解、离心,如此反复清洗3次后配制成细菌浓度为 $1 \times 10^7 \text{ CFU}/\text{mL}$ 的菌悬液($\text{OD}_{600}=0.6$)待用。菌悬液在实验当天制备。

1.3.2 灭活实验方法

取30 mL铜绿假单胞菌悬液倒进无菌烧杯(在实验前进行高温蒸汽灭菌并置于无菌操作台里冷却),振荡均匀后加入一定量的过氧乙酸进行反应并计时,在灭活进行3、6、10、15、20和30 min时分别取出100 μL 菌悬液并立即加入过量硫代硫酸钠($0.2 \text{ mol}/\text{L}$)淬灭,之后,采用平板计数法(HPC)对灭活前后的细菌浓度进行检测。

平板计数法主要步骤如下:配制适量LB无菌固

体培养基平板;取待测样品依次进行10倍稀释,选择3个合适稀释度的样品分别吸取100 μL 样品进行平板涂布,每个稀释度做3个平行样;将平板密封好倒置于37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱里培养24 h后,对其中数量为30~300个的菌落数进行计数。

1.3.3 暗修复实验方法

定期检测 OD_{600} 以监测菌悬液中的细菌浓度变化。将消毒后的菌液稀释至浓度低于检测限后,取1 mL菌液与19 mL无菌液体培养基混匀,将其放置于黑暗条件下的37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱里振荡培养,并在第1、2、3、4、5、7天时分别取样检测 OD_{600} ,每组培养15个平行样本。空白对照组采用1 mL无菌PBS代替菌液进行培养,其他条件均保持一致。

1.3.4 抗性基因去除实验方法

抗性基因去除实验用水取自长沙洋湖再生水厂。投加一定量的PAA对污水进行处理30 min,然后通过0.22 μm 的微孔膜过滤以富集抗性基因。目的基因包括7个四环素抗性基因(*tetQ*、*tetW*、*tetX*、*tetM*、*tetA*、*tetC*和*tetO*)和2个磺胺抗性基因(*SUL1*和*SUL2*),内参基因为16S rRNA,采用SYBR荧光染料法进行实时定量荧光PCR分析。

1.4 分析方法

通过计算灭活对数(LR)并采用Chick-Watson模型分析灭活速率常数,来评价消毒工艺对细菌的灭活效果。

$$\text{LR} = \lg(N_i/N_0) = -kC^n t \quad (1)$$

式中: N_0 和 N_i 分别为消毒前后悬浮液中可培养细菌的浓度,CFU/mL; k 为灭活速率常数, $\text{L}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; C 为消毒剂剂量, mg/L ; n 为动力学常数; t 为暴露时间,min。

目的抗性基因的相对丰度采用 $2^{-\Delta\text{Ct}}$ 法计算:

$$\Delta\text{Ct} = T_{\text{Ct}} - R_{\text{Ct}} \quad (2)$$

$$F = 2^{-\Delta\text{Ct}} \quad (3)$$

式中: Ct 为循环数; T_{Ct} 和 R_{Ct} 分别为目的基因和参照基因的循环数; F 为目的基因的相对丰度。

细胞外总氮(TN)浓度采用过硫酸钾消解-紫外吸收法测定;细胞外蛋白质和DNA浓度采用微量分光光度计检测;膜受损细胞在碘化丙啶(PI)中单染后,通过流式细胞仪检测;细胞形态变化通过扫描电镜(SEM)检测;反应系统内羟基自由基($\cdot\text{OH}$)通过EPR检测;胞内活性氧(ROS)水平采用活性氧检测试剂盒染色后通过酶标仪检测。

2 结果与分析

2.1 UV/PAA对铜绿假单胞菌的灭活效能

采用HPC方法测定了经UV、PAA、 Cl_2 和UV/PAA工艺消毒处理后可培养细胞的密度,以此评价这4种工艺对铜绿假单胞菌的灭活效果,结果见图2。灭活3、6、10、15、20和30 min所对应的UV辐照剂量分别为9、18、30、45、60、90 mJ/cm^2 。经过4种工艺处理30 min后,铜绿假单胞菌的灭活对数分别为 1.89 ± 0.14 、 1.60 ± 0.13 、 1.55 ± 0.12 和 4.91 ± 0.14 ,即灭活效率为 $\text{UV/PAA} > \text{单独UV} > \text{单独PAA} > \text{单独}\text{Cl}_2$ 。

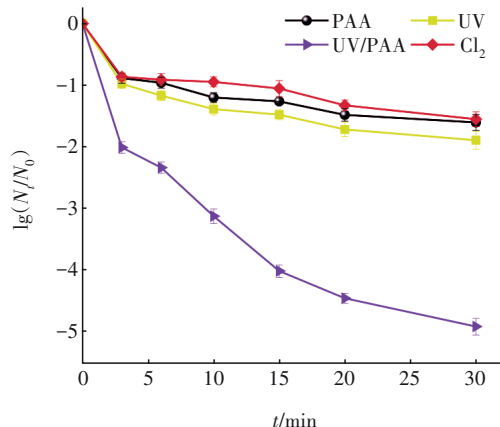


图2 UV、PAA、 Cl_2 和UV/PAA工艺对铜绿假单胞菌的灭活
Fig.2 Inactivation of *P. aeruginosa* in UV, PAA, Cl_2 , and UV/PAA processes

UV/PAA工艺对铜绿假单胞菌的灭活对数高于单独UV和PAA的总和,这表明PAA的紫外激发光解产物对细菌灭活的重要性。铜绿假单胞菌在不同工艺中的失活机制是不同的。PAA作为一种有机过氧化物,可以有效地扩散并渗透进入细胞,通过破坏微生物的酶和运输系统来增强其消毒性能^[16]。紫外线能直接破坏微生物的核酸,通过干扰脱氧核糖核酸(DNA)的复制来阻碍细胞的正常生命活动^[17]。相比之下,PAA与UV联合消毒可通过以下两个方面有效提高对铜绿假单胞菌的灭活效率:①PAA吸附在细胞上并扩散入细胞内^[18];②PAA在紫外光的光解下产生具有强氧化性的自由基。因此,PAA与UV联合消毒可以破坏蛋白质、核酸等重要胞内组分,高效而彻底地灭活铜绿假单胞菌^[19-20]。

铜绿假单胞菌的灭活遵循一级反应(UV、PAA、 Cl_2 、UV/PAA工艺拟合曲线的 R^2 分别为0.934 6、0.925 4、0.972 1、0.992 3),取灭活曲线的线性部分

计算得到灭活速率常数分别为0.041 9、0.033 7、0.015 3、0.171 3 min^{-1} 。在相同的PAA初始浓度和UV辐照剂量下,UV/PAA的灭活速率常数分别约为 Cl_2 、UV和PAA的11.20、4.09和5.08倍,表明UV/PAA组合工艺具有比单一工艺更高的消毒能力与速度。铜绿假单胞菌对氯的耐受性较高,导致单独 Cl_2 灭活铜绿假单胞菌的 k 值最小。可见,UV/PAA工艺对铜绿假单胞菌的灭活能力和速度远高于单独UV和单独PAA消毒,表现出明显的优越性。

2.2 细胞膜完整性分析

完整的细胞膜是维持稳定的胞内代谢环境和正常的细胞生命活动的必要条件,破坏细胞膜完整性是灭活细菌的重要途径之一。采用流式细胞术(FCM)结合PI单染法分析细胞膜完整性。由于PI能与细胞核DNA结合显示红色荧光,因此PI的染色能力在活细胞中相对较弱,而PI能够对死细胞或已破损的细胞强烈染色。流式细胞仪能检测流经细胞的荧光信号,随着红色荧光的增强,散点图上的点簇从左下方向右上方移动,因此右上方电子门中的细胞比例越大,该样品中细胞膜受损细胞占比越高。经过UV、PAA、 Cl_2 和UV/PAA工艺处理30 min后,细胞膜受损的细胞分别占细胞总数的18.6%、21.4%、24.1%和83.1%。通过HPC计算的灭活对数均高于FCM检测的完整细胞减少对数,二者的不同结果表明4种工艺均可诱导铜绿假单胞菌在处理后进进入可存活但不可培养(VBNC)状态。

UV灭活主要通过直接破坏胞内DNA为嘧啶二聚体,而不对细胞膜造成明显损伤^[21]。与PAA直接扩散进细胞破坏酶和运输系统相比, Cl_2 能直接破坏细胞膜,对细胞结构造成损伤,导致膜通透性提高^[22]。UV/PAA工艺产生的强氧化性自由基(如 $\cdot\text{OH}$)会使细胞膜损伤得更严重,进一步使VBNC细胞失活,因而能够有效灭活铜绿假单胞菌,与图2的结果一致。

2.3 胞内物质泄漏

消毒剂能够破坏细胞膜和细胞壁,致使胞内的蛋白质和核酸等物质泄漏甚至被氧化降解^[23]。图3(a)描述了铜绿假单胞菌悬浮液经过UV、PAA、 Cl_2 和UV/PAA工艺处理后细胞外TN浓度的变化。在UV/PAA工艺处理30 min后,胞外TN浓度从1.54 mg/L增至3.35 mg/L,远高于其他三种工艺处理后的胞外TN浓度。这表明UV/PAA工艺对细胞膜造

成了严重破坏,导致细胞内含氮物质大量泄漏。

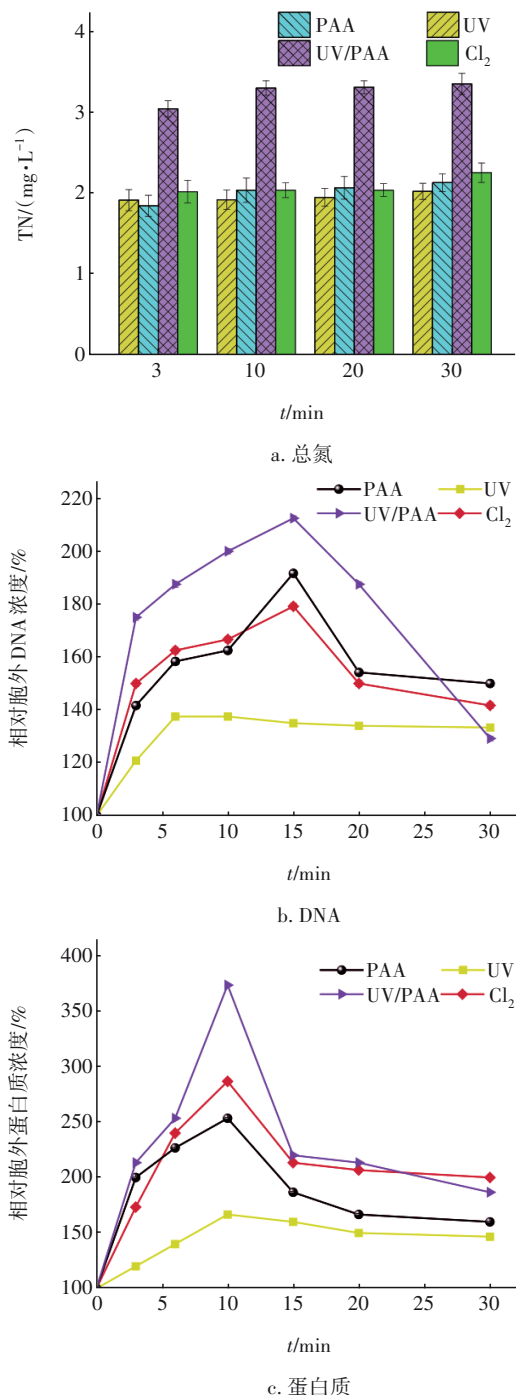


图3 不同工艺处理后胞外物质浓度的变化

Fig.3 Change in concentration of extracellular substances after different treatments

不同工艺处理后菌悬液中胞外DNA和蛋白质浓度的变化如图3(b)和(c)所示。总体来说,在PAA、 Cl_2 和UV/PAA工艺处理过程中,胞外DNA和蛋白质浓度均呈先升高后降低的变化趋势,而在单独UV处理过程中,胞外DNA和蛋白质浓度先缓慢

升高,然后基本保持不变。与其他三种工艺相比,UV/PAA工艺导致了最大的胞外DNA和蛋白质泄漏水平以及最高的胞外DNA和蛋白质降解率,表明UV/PAA系统中产生的高活性自由基在破坏细胞膜和降解DNA及蛋白质等大分子方面具有优势。

根据FCM和胞内物质外流的结果,UV/PAA工艺的灭活机制之一是UV/PAA体系产生的自由基不仅破坏了细胞膜的完整性,导致细胞裂解灭活,并且降解了胞内大分子物质,破坏铜绿假单胞菌的生命活动,从而有效灭活细菌。

2.4 细胞形态变化

图4展示了铜绿假单胞菌经UV、PAA和UV/PAA工艺处理前后的扫描电镜图像。未经处理的铜绿假单胞菌光滑饱满,细胞形态完整;经过UV和PAA处理后,铜绿假单胞菌轻微变形起皱,但没有严重破裂;而经过UV/PAA工艺灭活后变得极为粗糙,细胞表面凹陷,甚至失去了正常的形状。由此可见,相比于其他两种工艺,UV/PAA对细胞结构的破坏更加严重,这与FCM测量和胞内物质泄漏结果一致。分析原因是紫外线照射直接损伤的主要是核酸而不是细胞膜,而在UV/PAA系统中,UV激活PAA产生的活性自由基(如 $\cdot\text{OH}$)比PAA的氧化性更强,可以对铜绿假单胞菌细胞进行彻底破坏。

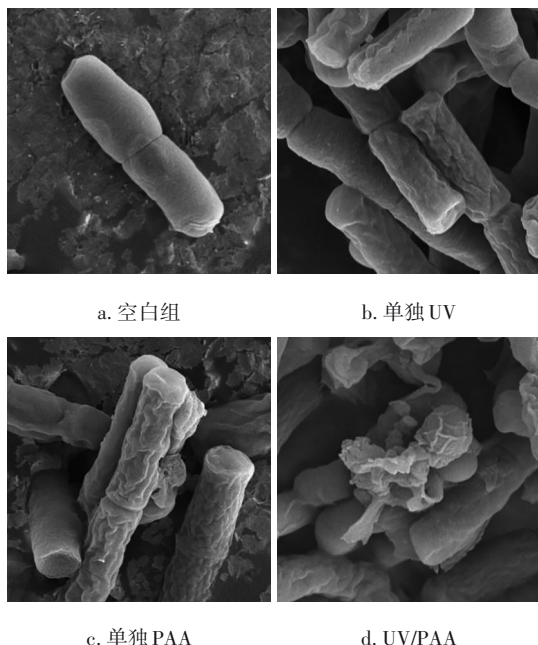


图4 不同工艺处理后的扫描电镜图像

Fig.4 Scanning electron microscope images after different treatments

2.5 活性物质检测分析

细胞内的ROS水平代表细菌的新陈代谢情况,高水平的胞内ROS会对DNA、蛋白质和脂质造成严重的氧化损伤,从而损害正常的细胞代谢功能^[24]。胞内ROS可以氧化无荧光的2',7'-二氯二氢荧光素(DCFH)生成有荧光的2',7'-二氯荧光素(DCF),通过检测DCF的荧光强度来测定胞内ROS水平,结果见图5。

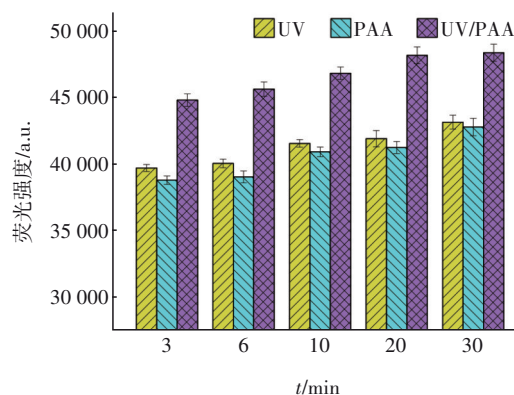


图5 不同工艺处理后的胞内ROS水平

Fig.5 Intracellular ROS after different treatments

由图5可知,UV/PAA体系中的胞内ROS水平在3 min时就已达到很高水平(空白组的ROS水平对应的荧光强度为36 442 a. u.),并随着暴露时间的增加而持续上升,达到初始ROS水平的130%,高于PAA和UV处理后的水平(分别为115%和116%)。HPC结果同样也遵循这一顺序:UV/PAA>UV>PAA。与单独UV和PAA相比,UV/PAA工艺可以给予细胞更多更强的氧化刺激,包括氧化剂、紫外照射和PAA光解产生的活性自由基,促使铜绿假单胞菌的胞内ROS水平急剧提升,胞内组分和细菌正常的代谢能力被严重损害,从而更加有效地灭活铜绿假单胞菌。

通过测定菌悬液电子顺磁共振(EPR)光谱,证实在UV/PAA灭活过程中产生了 $\cdot\text{OH}$ 。如图6所示,经过UV/PAA工艺处理后1:2:2:1的典型信号峰值强度随着暴露时间的增加而提高,表明UV/PAA体系中存在 $\cdot\text{OH}$,并且连续的紫外照射能够增强 $\cdot\text{OH}$ 的形成;而经过PAA灭活后未观察到明显的峰值。这表明PAA联合紫外线照射可以促进 $\cdot\text{OH}$ 的产生。 $\cdot\text{OH}$ 可导致细胞膜中的脂质、胞内酶和遗传物质被氧化破坏,使微生物得到有效灭活^[20]。Xu等^[25]发现,加入叔丁醇($\cdot\text{OH}$ 抑制剂,但不影响乙酰

自由基的产生)后,细胞中高水平的ROS被显著抑制,这表明 $\cdot\text{OH}$ 在增强ROS水平方面发挥了关键作用,而乙酰自由基对胞内ROS的影响较小。

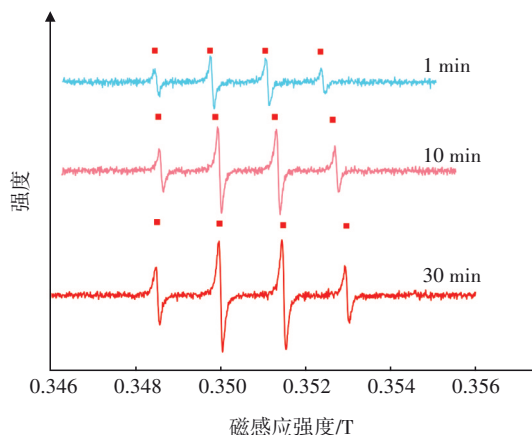


图6 UV/PAA工艺处理不同时间后的自由基生成情况

Fig.6 Free radicals formation after UV/PAA treatment for different times

综上所述,相比单独UV和PAA消毒,UV/PAA工艺通过光解氧化反应产生高活性羟基自由基,促进了胞内ROS水平的提升, $\cdot\text{OH}$ 和高水平胞内ROS能够损害胞内物质和细胞膜,破坏正常的细胞功能和细胞结构,从而有效地灭活铜绿假单胞菌。

2.6 UV/PAA对污水中ARGs的去除

ARGs能够通过水文循环进入水源和水处理设施,甚至在常规消毒过程后仍存留较高浓度^[12]。利用实时定量荧光法(RT-PCR)检测,得到经过不同工艺处理前后磺胺类抗性基因和四环素类抗性基因丰度变化如图7所示。污水样本中均检测到目标抗性基因,其中*tetQ*的相对丰度最高,*tetC*最低。经过UV、PAA和UV/PAA工艺处理后,ARGs的总去除率依次为37.79%、35.23%和61.50%。紫外线可以直接攻击DNA使之形成嘧啶二聚体,并氧化核苷酸同时打破双链,诱导细胞产生胞内ROS,从而更有效地去除ARGs^[21]。

相较于其他两种工艺,UV/PAA工艺对ARGs的去除效果最好。紫外线照射对DNA的直接损伤、PAA扩散和自由基的产生共同主导了UV/PAA的消毒进程,尤其是PAA光解产生的羟基自由基能够诱导细胞产生过量的胞内ROS,并与ARGs发生显著反应^[25-26]。此外,同一工艺对不同ARGs的去除率不同,UV/PAA工艺能够有效减少水中的大部分ARGs,但对于部分ARGs(如*SUL2*),三种处理方法

的去除效果均不理想,亟需进一步探索针对性处理方法以解决ARGs问题。

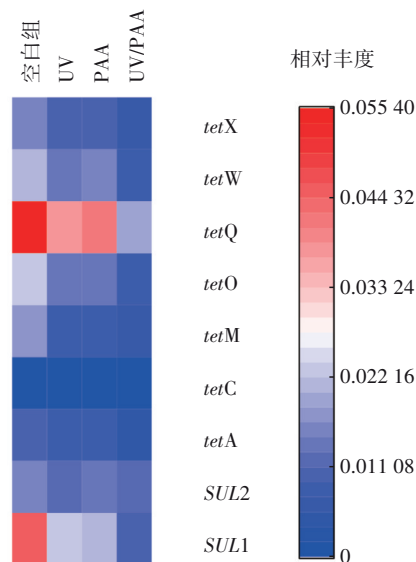


图7 不同工艺处理后ARGs的相对丰度

Fig.7 Relative abundance of ARGs after different treatments

2.7 UV/PAA处理后细菌暗修复潜力评估

细菌在消毒过程中可被诱导进入VBNC状态,通过光活化或暗修复可能被重新激活,对饮用水安全产生威胁。图8显示了铜绿假单胞菌在UV、PAA和UV/PAA工艺处理后7 d内的暗修复情况。对于单独UV和PAA消毒,前3 d观察到明显的再活化现象, OD_{600} 迅速升至0.6。随后,铜绿假单胞菌随着营养匮乏开始自我衰亡,数量不断减少。然而,经过UV/PAA工艺处理后,在黑暗营养环境下所培养菌液的 OD_{600} 一直被控制在0.1274以内,这表明UV/PAA工艺比单独UV和单独PAA更有效地抑制了铜绿假单胞菌的再活化和增殖。如图3所示,单独UV和PAA消毒工艺对蛋白质的降解能力较差,因而铜绿假单胞菌经单独UV和PAA处理后仍然具备可以修复DNA的蛋白酶,在黑暗营养环境中胞内DNA损伤被修复,细菌实现再活化并进行对数生长。而UV/PAA工艺中的活性自由基能严重破坏细胞结构,促使胞内物质外流,并有效降解大多数大分子物质,这是一种不可逆损伤,难以修复^[20,24]。然而,商业PAA溶液中含有醋酸,当少数VBNC细胞获得充足营养时,在UV/PAA工艺中会发生轻微的再活化现象。基于以上分析,UV/PAA工艺能有效降低铜绿假单胞菌的再活化潜能。

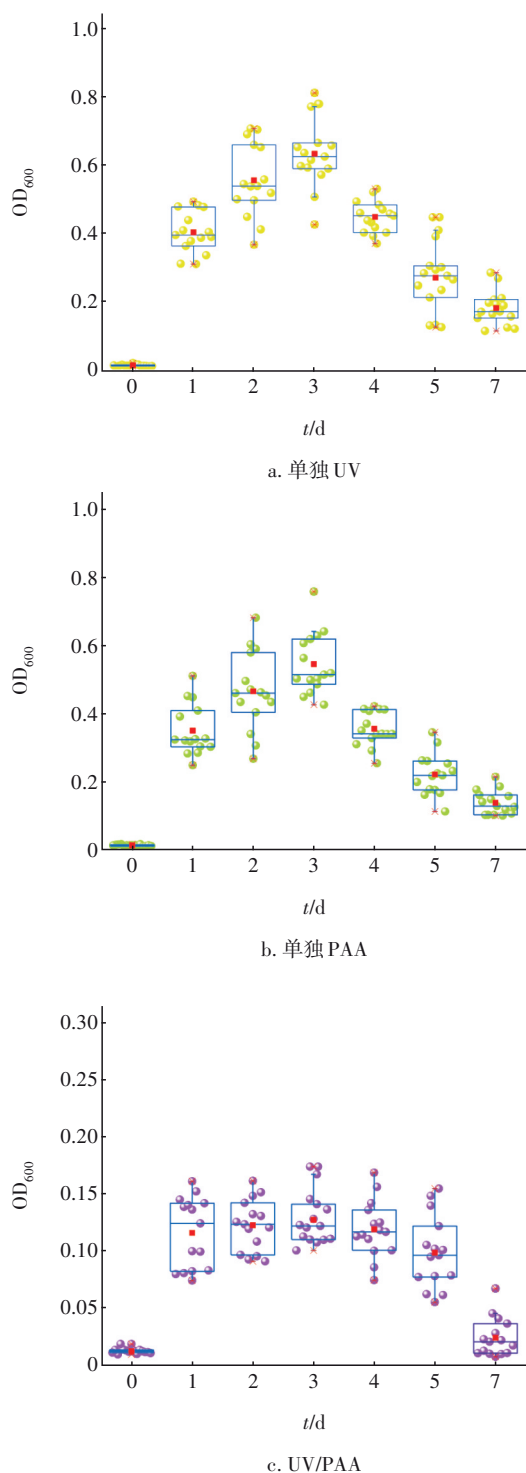


图8 不同工艺处理后铜绿假单胞菌的暗修复

Fig.8 Dark repair of *P. aeruginosa* after different treatments

3 结论

① UV/PAA工艺对铜绿假单胞菌的灭活效果显著优于单独UV、PAA和 Cl_2 消毒工艺,使膜通透性细胞比例增加至83.1%,细胞完全变形,胞内物质

大量泄漏甚至被降解。

② UV/PAA工艺产生大量羟基自由基,羟基自由基能够提高胞内ROS水平,并与ROS共同氧化细胞结构来灭活细菌。

③ 相比单独UV或PAA,UV/PAA工艺对污水中ARGs的去除效果最优,不同目标ARGs受三种工艺的影响程度存在差异。

④ UV/PAA工艺能够抑制VBNC细胞的再活化,相比于单独UV和PAA工艺,可以进一步减少VBNC细胞的数量,有效降低细菌的暗修复潜能。

参考文献:

- [1] COLLIVIGNARELLI M, ABBÀ A, BENIGNA I, *et al.* Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants [J]. Sustainability, 2017, 10(2): 421–442.
- [2] MORRISON C M, HOGARD S, PEARCE R, *et al.* Ozone disinfection of waterborne pathogens and their surrogates: a critical review [J]. Water Research, 2022, 214: 118–206.
- [3] MAZHAR M A, KHAN N A, AHMED S, *et al.* Chlorination disinfection by-products in municipal drinking water—a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 101–113.
- [4] LI X F, MITCH W A. Drinking water disinfection byproducts (DBPs) and human health effects: multidisciplinary challenges and opportunities [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(4): 1681–1689.
- [5] XIA Y, WAN Q, XU X, *et al.* Solar disinfection of fungal spores in water: kinetics, influencing factors, mechanisms and regrowth [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 428: 452–463.
- [6] 徐垚,陈家斌,刘统才,等. 污水过氧乙酸/紫外消毒中试研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(7): 23–28.
XU Yao, CHEN Jiabin, LIU Tongcai, *et al.* Pilot study on peracetic acid/ultraviolet disinfection of sewage [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(7): 23–28 (in Chinese).
- [7] DOMINGUEZ HENAO L, TUROLA A, ANTONELLI M. Disinfection by-products formation and ecotoxicological effects of effluents treated with peracetic acid: a review [J]. Chemosphere, 2018, 213: 25–40.
- [8] KITIS M. Disinfection of wastewater with peracetic acid: a review [J]. Environment International, 2004,

- 30(1): 47–55.
- [9] RIZZO L, AGOVINO T, NAHIM-GRANADOS S, *et al.* Tertiary treatment of urban wastewater by solar and UV–C driven advanced oxidation with peracetic acid: effect on contaminants of emerging concern and antibiotic resistance [J]. *Water Research*, 2019, 149: 272–281.
- [10] HASSABALLAH A H, BHATT T, NYITRAI J, *et al.* Inactivation of *E. coli*, *Enterococcus* spp., somatic coliphage, and *Cryptosporidium parvum* in wastewater by peracetic acid(PAA), sodium hypochlorite, and combined PAA–ultraviolet disinfection[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2020, 6(1): 197–209.
- [11] ZHU T, LIU B. Mechanism study on the effect of peracetic acid (PAA), UV/PAA and ultrasonic/PAA oxidation on ultrafiltration performance during algae-laden water treatment [J]. *Water Research*, 2022, 220: 118705.
- [12] LIN W, ZHANG M, ZHANG S, *et al.* Can chlorination co-select antibiotic-resistance genes?[J]. *Chemosphere*, 2016, 156: 412–419.
- [13] CHEN J, XU J, LIU T, *et al.* Oxidation of tetracycline antibiotics by peracetic acid: reaction kinetics, mechanism, and antibacterial activity change [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 134–143.
- [14] HU J, LI T, ZHANG X, *et al.* Degradation of steroid estrogens by UV/peracetic acid: influencing factors, free radical contribution and toxicity analysis[J]. *Chemosphere*, 2022, 287: 132–261.
- [15] RIZZO L, LOFRANO G, GAGO C, *et al.* Antibiotic contaminated water treated by photo driven advanced oxidation processes: ultraviolet/H₂O₂ vs ultraviolet/peracetic acid [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 205: 67–75.
- [16] ZHANG C, BROWN P J B, MILES R J, *et al.* Inhibition of regrowth of planktonic and biofilm bacteria after peracetic acid disinfection [J]. *Water Research*, 2019, 149: 640–649.
- [17] WANG J, QU D, BU L, *et al.* Inactivation efficiency of *P. aeruginosa* and ARGs removal in UV/NH₂Cl process: comparisons with UV and NH₂Cl [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 305: 473–482.
- [18] AO X W, ELORANTA J, HUANG C H, *et al.* Peracetic acid-based advanced oxidation processes for decontamination and disinfection of water: a review [J]. *Water Research*, 2021, 188: 116479.
- [19] ZHANG T, HUANG C H. Modeling the kinetics of UV/peracetic acid advanced oxidation process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(12): 7579–7590.
- [20] SUN P, ZHANG T, MEJIA-TICKNER B, *et al.* Rapid disinfection by peracetic acid combined with UV irradiation [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, 5(6): 400–404.
- [21] WEN G, DENG X, WAN Q, *et al.* Photoreactivation of fungal spores in water following UV disinfection and their control using UV-based advanced oxidation processes [J]. *Water Research*, 2019, 148: 1–9.
- [22] WAN Q, WEN G, CAO R, *et al.* Simultaneously enhance the inactivation and inhibit the photoreactivation of fungal spores by the combination of UV–LEDs and chlorine: kinetics and mechanisms [J]. *Water Research*, 2020, 184: 116143.
- [23] ZHANG W, CAO B, WANG D, *et al.* Influence of wastewater sludge treatment using combined peroxyacetic acid oxidation and inorganic coagulants re-flocculation on characteristics of extracellular polymeric substances (EPS) [J]. *Water Research*, 2016, 88: 728–739.
- [24] LIU F, LI Z, DONG Q, *et al.* Catalyst-free periodate activation by solar irradiation for bacterial disinfection: performance and mechanisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(7): 4413–4424.
- [25] XU X, ZUO J, WAN Q, *et al.* Effective inactivation of fungal spores by the combined UV/PAA: synergistic effect and mechanisms [J]. *Journal of Hazard Material*, 2022, 430: 128515.
- [26] ZHANG T, WANG T, MEJIA-TICKNER B, *et al.* Inactivation of bacteria by peracetic acid combined with ultraviolet irradiation: mechanism and optimization [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(15): 9652–9661.

作者简介:许元生(1998–),男,安徽六安人,硕士研究生,研究方向为高级氧化技术。

E-mail:1626356968@qq.com

收稿日期:2024-05-14

修回日期:2024-06-15

(编辑:李德强)