

紫外线辐照对四环素耐药细菌及基因的消毒特性

汪喜生¹, 吕瑞滨¹, 沈怡雯¹, 郭美婷²

(1. 上海城投污水处理有限公司 石洞口污水处理厂, 上海 200942; 2. 同济大学 环境科学与工程
学院, 上海 200092)

摘 要: 采用紫外线辐射处理市政污水, 考察紫外消毒对市政污水厂中耐四环素的总异养菌、粪大肠菌群和单一大肠杆菌以及 *tetA* 和 *tetO* 两种耐药基因的消毒特性。结果表明: 随紫外线剂量的提高, 对耐四环素总异养菌的杀灭效果显著增强, 当消毒剂量为 $10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时, 灭活率高于 99%; 紫外线对耐四环素粪大肠菌群和大肠杆菌 K12 的杀灭趋势和总异养菌类似; 耐药基因 *tetA* 随消毒剂量的增加而不断降低, 在消毒剂量为 $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时已基本被完全灭活; 低消毒剂量下 ($< 5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) 耐四环素细菌尤其是某些革兰氏阴性耐药细菌, 一定程度上对紫外消毒具有耐受性, 它们对水体的生态风险需要引起重视。

关键词: 四环素; 耐药细菌; 耐药基因; 紫外消毒; 污水处理厂

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)05-0067-06

Disinfection Characteristics of Tetracycline Resistant Bacteria and Genes in Wastewater by UV Radiation

WANG Xi-sheng¹, LÜ Rui-bin¹, SHEN Yi-wen¹, GUO Mei-ting²

(1. Shidongkou Wastewater Treatment Plant, Shanghai Chengtou Wastewater Treatment Co. Ltd., Shanghai 200942, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Disinfection characteristics of tetracycline resistant bacteria including heterotrophic bacteria, fecal coliform, *Escherichia coli* K12, and genes including *tetA* and *tetO* were investigated. The results showed that the disinfection effect of tetracycline resistant heterotrophic bacteria increased significantly with the increase of UV dose, and the removal rate exceeded 99% when the disinfection dose was $10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. The disinfection characteristics of fecal coliform and *Escherichia coli* K12 were similar to that of the heterotrophic bacteria. *tetA* decreased with the increase of UV radiation dose, which was completely inactivated at $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. Tetracycline resistant bacteria, especially the gram-negative bacteria, were partially resistant to UV when the disinfection dose was below $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, which demonstrated an urgent need to focus on the ecological risks of drug-resistant bacteria in municipal wastewater treatment plant.

Key words: tetracycline; resistant bacteria; resistant gene; UV disinfection; municipal wastewater treatment plant

市政污水厂作为各种含抗生素污水的汇集地,所含抗生素抗药细菌和基因的种类相当繁多,截至目前在许多国家和地区的污水厂中都检测到了多种耐药细菌和基因^[1-3]。耐药基因也被认为是一种“新型污染物”^[4]。对市政污水厂各工艺段的研究显示,污水初级处理和二级处理对去除抗生素耐药细菌及基因有一定的贡献,但出水仍含有高浓度的耐药细菌及基因^[5]。

消毒是污水处理流程的最后一个环节,也是控制抗生素耐药细菌与基因在环境中散播的关键步骤^[6-7]。紫外(UV)消毒技术应用广泛,就目前而言,对紫外消毒过程影响抗生素耐药细菌和基因的研究并没有得出统一的认识,不同种类的抗生素耐药细菌和基因经过紫外消毒之后变化趋势并不一致。Meckes发现在经过紫外消毒之后,污水中四环素和氯霉素耐药大肠杆菌的相对丰度明显提高,而链霉素耐药细菌并没有明显变化^[8]。即使对于同一种抗生素的耐药细菌或基因,受控于污水厂运行状况的影响以及不同处理方式,得到的结论也不一样,Auerbach等人的研究表明紫外线对于四环素耐药基因并没有促进诱导增加的效应^[9],而Courcelle的研究发现,当暴露于 $5\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 的紫外线照射剂量下时,菌株中有50%的携带四环素耐药基因的质粒受到损伤,而相应存在于质粒上的耐药基因也受到了损伤,从而在一定程度上降低了抗生素耐药基因的水平。这种不一致的研究结果表明,对紫外消毒过程中耐药细菌和基因的消毒特性还需要进行深入研究。

另一方面,目前有关紫外消毒对耐药细菌或耐药基因的研究较少。Munir等考察了密歇根5个世纪污水厂中紫外消毒的效果,发现其对耐药(四环素、磺胺嘧啶)细菌和基因没有明显的去除效果^[10]。目前对于这方面的研究,尤其是对紫外消毒去除耐药基因效果的研究仍十分缺乏。

笔者以四环素(TC)为代表,对典型四环素耐药细菌及基因的消毒特性展开研究。四环素是我国使用相当广泛的抗生素,四环素耐药细菌及基因在污水处理厂中普遍被检出。选择耐四环素的总异养菌、粪大肠杆菌和单一大肠杆菌以及tetA和tetO两种耐四环素基因作为研究对象,考察其在紫外消毒过程中的特性,评价处理后四环素耐药细菌或基因的后续生态风险。

1 材料与方法

1.1 采样

将上海市Q污水处理厂UV消毒前的水样收集于无菌聚乙烯取样瓶后,置于冰上储存并运回实验室立即进行后续试验。Q污水厂采用A²/O脱氮除磷工艺,在二沉池后又设置了曝气生物滤池,处理后的污水采用紫外消毒。采集水样的常规水质指标如下:pH值为6.8~7.2、DO为3.0~4.6 mg/L、A₂₅₄为0.12~0.15、SS为8.2~13.4 mg/L、COD为28.3~71.5 mg/L、BOD₅为5.3~12.5 mg/L、NH₄⁺-N为3.2~11.0 mg/L、总异养菌数为300~6 000 CFU/mL。

为筛选耐四环素大肠杆菌,将上述新鲜污水按一系列梯度稀释后各取1 mL加入含四环素(32 mg/L)的大肠杆菌选择性培养基(HB7001)中,充分振荡混合,待冷却凝固后于37℃下培养24 h,从中挑选2~3株分别接种至1 mL液体LB培养基(NaCl:10 g/L,酵母粉:5 g/L,蛋白胨:10 g/L,万古霉素:32 mg/L,pH值=7.2)中,于37℃、150 r/min下恒温培养24 h。将菌液于LB培养基平板(四环素浓度为32 mg/L)上进行划线分离后挑取4~5株单菌落于液体LB培养基中,于37℃、150 r/min下恒温培养24 h。以1%量将上述菌液扩培后分装于2 mL离心管中,加入甘油于-40℃下保存。另取1管纯菌液送至上海杰李生物公司测序,鉴定发现菌株类型为大肠杆菌K12。

取冰冻保存的大肠杆菌菌液复苏离心(10 000 r/min)10 min,弃上清液,用PBS缓冲溶液将沉淀重新悬浮,然后加至过滤后的污水厂二沉池出水,充分振荡后即制备好的菌悬液。

1.2 紫外消毒处理

实验室采用低压紫外平行光仪作为紫外消毒光源,功率为120 W(TL 120W/01, Philips)。光束在样品表面中心位置的照射强度为 $0.17\text{ mW}/\text{cm}^2$,通过控制紫外照射时间来控制水样消毒剂量。根据Germicidal Fluence 低压汞灯紫外线照射强度计算软件,计算出在特定水样与中心位置紫外光照强度下消毒剂量与时间的关系^[11]。参照实际污水厂UV剂量,设定消毒剂量分别为1、2、5、10 mJ/cm^2 ,对实际污水和筛选的耐四环素大肠杆菌K12样品进行消毒试验,消毒后的水样用于测定耐药细菌和耐药基因的浓度。

1.3 耐药细菌浓度的测定

选取四环素作为代表,检测耐四环素总异养菌、粪大肠菌群和大肠杆菌 K12 的数量。

采用平板计数法进行耐四环素总异养菌数的测定。首先将样品在 150 r/min 摇床中振荡 3 min 以充分混合样品,取 1 mL 混合充分的样品,10 倍连续梯度稀释,然后取 1 mL 若干梯度稀释的样品分别置于皮氏培养皿中,加入 10 mL 含 16 mg/L 四环素的营养琼脂(蛋白胨:10 g/L,牛肉膏:3 g/L,NaCl:5 g/L,琼脂:15 g/L,pH 值=7.2)后充分振荡以混合培养基和样品,待冷却凝固后放入恒温(37℃)培养箱中培养 24 h,统计菌落数在 20~300 CFU/mL 的培养皿,确定耐四环素总异养菌数。每个梯度浓度的样品均设置 3 个平行样本。此外,将 1 mL 同样梯度稀释操作的上述水样加入不含抗生素的营养培养基中同时进行培养计数操作,用来反映水样中的总异养菌数。

耐四环素大肠杆菌数量的测定参照上述耐四环素总异养菌数的测定方法,不同之处是将培养基换成培养大肠杆菌的 LB 培养基(酵母粉:5 g/L,蛋白胨:10 g/L,NaCl:10 g/L,琼脂:10 g/L,pH 值=7.2)。

采用滤膜法进行耐四环素粪大肠菌群的测定。将适量水样注入已灭菌的放有滤膜(孔径为 0.22 μm)的过滤装置中,将截留细菌的滤膜贴于浇注好的 M-FC 培养基上,于 44.5℃ 下培养 24 h,记录菌落颜色为蓝色或蓝绿色且数量在 5~60 CFU/mL 的培养皿,从而计算出每 1 L 水样中含有粪大肠菌群数量。

四环素浓度值的选取依据美国临床实验室标准化协会 2011 年发布的耐药性标准 CLSI 中规定的各病原菌对该抗生素具有抗药性的最低抑菌浓度(MIC),并取最大值。

1.4 DNA 提取及耐四环素基因浓度的测定

采用细菌基因组 DNA 提取试剂盒提取水样的 DNA。提取后的 DNA 样本利用琼脂糖凝胶电泳以及紫外分光光度计(NanoDrop 2000C)进行含量以及纯度检测。

利用 SYBR Green II 定量 PCR,选取两种典型的四环素耐药基因(tetA、tetO)进行定量检测。这两种基因代表了细菌对四环素具有耐受性的两种重要机制,tetA 可以编码四环素外排泵蛋白,而 tetO 可以

编码核糖体保护蛋白^[12]。四环素耐药基因引物的建立和优化参照文献[1]进行。引物序列及相关信息见表 1。将耐药基因导入质粒当中进行无性增殖从而获得含目的基因的质粒,对其进行转化、提取后通过紫外分光光度计检测其浓度。进行 4~5 个梯度稀释,以初始浓度的对数为横坐标、CT 值为纵坐标绘制标准曲线(R^2 均大于 0.99)。用 SYBR Green II Premix(天根)试剂进行实时定量 PCR 反应(ABI 7500)。PCR 反应体系(体积为 20 μL),包括染料试剂 10 μL,目的基因上、下游引物各 0.3 μL,待测 DNA 模板 1 μL,无菌水 8.4 μL。反应程序:先在 94℃ 下预变性 3 min,再在 94℃ 下变性 10 s,然后根据表 1 退火温度退火 30 s,最后在 72℃ 下充分延伸 32 s,共进行 40 个循环。每个样品平行测定 3 次以确保准确性,每组基因 PCR 回收效率在 88%~110% 之间。

表 1 耐四环素基因引物序列

Tab. 1 Primer sequence of tetracycline resistant gene

| 项目 | 序列(5' - 3') | 扩增片段/bp | 退火温度/℃ |
|------|----------------------------|---------|--------|
| tetA | 正向引物 GCTACATCCTGCTTGCCTTC | 210 | 58 |
| | 反向引物 CATAGATCGCCGTGAAGAGG | | |
| tetO | 正向引物 ACAGAAAGCTTATTATATAAC | 171 | 60 |
| | 反向引物 TGGCGTGTCTATGATGTTTAC | | |

2 结果与讨论

2.1 紫外消毒剂量对四环素耐药细菌的影响

采集 Q 污水厂二沉池出水进行耐四环素细菌检测,考察了不同紫外消毒剂量对 3 类不同的耐四环素细菌的杀灭效果。

试验结果表明,紫外消毒对耐四环素异养菌的杀灭效果随 UV 剂量的提高而显著增强。当较低剂量(1 mJ/cm²)的紫外线照射时灭活率仅有 30%,而当剂量增加到 2 mJ/cm² 时灭活率可达到 90%,在较高剂量(5 mJ/cm²)紫外线照射时,所检出的耐四环素异养菌数低于 10 CFU/mL,继续增加消毒剂量(10 mJ/cm²),灭活率大于 99%,耐四环素异养菌几乎全部被杀灭。

紫外消毒对耐四环素粪大肠菌群的杀灭趋势和总异养菌类似,在低紫外消毒剂量(1 mJ/cm²)下灭活效果不够理想,灭活率只有 30% 左右,在紫外消毒剂量为 2 mJ/cm² 时,灭活率约为 70%。从绝对浓度来看,耐四环素粪大肠菌群数目并不多,当紫外

消毒剂量超过 $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时,耐四环素粪大肠菌群即被完全杀灭。

对比研究耐四环素总异养菌与粪大肠菌群中细菌的消毒特性可知,由于污水中耐四环素细菌浓度本身较低,所以当紫外剂量为 $10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时可被有效杀灭,说明耐四环素细菌中并不存在对 UV 有强烈抗性的细菌种类。然而一般实际污水厂中 UV 消毒剂量常常低于 $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$,甚至在 $1 \sim 2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 之间,此时 UV 消毒效果相对较差,因而低剂量下耐四环素细菌的后续生态风险需要引起关注。为了进一步考察耐四环素细菌的消毒特性,对单一耐四环素大肠杆菌 K12 同样进行了 UV 消毒研究,结果如图 1 所示。可知,单一的耐药纯菌有着同总异养菌和粪大肠菌群相似的消毒特性,随着紫外剂量的提升,杀灭效果不断提升。在 UV 剂量为 $1 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时,灭活率约为 87%,当 UV 剂量为 $2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时,灭活率刚刚超过 90%,随着消毒剂量的继续增大,灭活率也呈现进一步提高。为了控制四环素耐药细菌的生态风险,应当注意紫外照射剂量,使其保持较高的灭活效果。

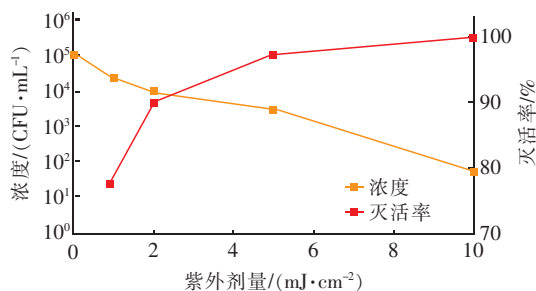


图1 不同 UV 剂量下耐四环素大肠杆菌 K12 的灭活效果

Fig. 1 Inactivation efficiency of tetracycline resistant *Escherichia coli* K12 with different UV doses

2.2 四环素耐药细菌的消毒特性

之前的研究表明紫外消毒对于耐四环素总异养菌和粪大肠菌群均有一定的杀灭效果,而这两种四环素耐药细菌杀灭情况是否有所不同? 是否会因为不同种类细菌对紫外消毒耐受值不同而导致灭活情况有所不同? 因此,进一步分析了不同种类耐药细菌在不同 UV 剂量下的灭活情况,结果见图 2。可以看出,随着紫外剂量的增加,四环素耐药细菌的灭活率都不断增加,在较高剂量 ($5, 10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) 时,紫外消毒对四环素耐药细菌的杀灭率均超过 99%。紫外消毒对耐四环素粪大肠菌群的去除效果与相应总

异养菌的灭活效果相差不大。在较低的紫外剂量下,四环素耐药细菌杀灭情况均不理想,而在较高紫外剂量下,细菌均被杀灭。有所区别的是,在紫外剂量为 $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时,紫外消毒对耐四环素总异养菌的灭活效果要明显好于对耐四环素粪大肠菌群的灭活效果。因此,在设计污水厂时,为了控制相应耐药细菌带来的生态风险,应注意消毒剂量的设置,紫外剂量最好可以达到 $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。此外,单一四环素耐药细菌在低紫外剂量下也能被较好地灭活,这可能是由于纯菌培养液中的浊度比实际污水要低,而浊度可以显著降低紫外光在水中的穿透率从而影响消毒效果。

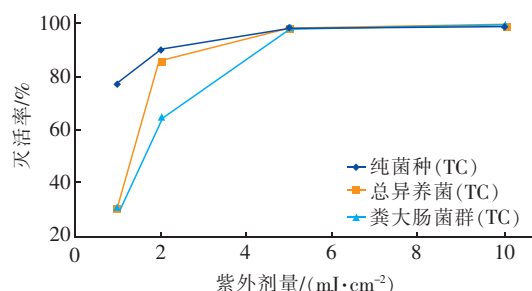


图2 紫外消毒对耐四环素总异养菌、粪大肠菌群以及大肠杆菌 K12 的灭活效果

Fig. 2 Inactivation efficiency of tetracycline resistant heterotrophic bacteria, fecal coliform, *Escherichia coli* K12 by UV disinfection

2.3 四环素耐药基因的消毒特性

为考察紫外消毒对耐药基因的灭活情况,利用实时定量 PCR 技术对经紫外消毒后水样中典型四环素耐药基因 (*tetA*、*tetO*) 的浓度进行检测,结果见表 2。

表2 不同紫外剂量下耐药基因的去除效果

Tab. 2 Removal efficiency of tetracycline resistant genes with different UV doses

| UV 剂量 / ($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$) | 0 | 1 | 2 | 5 | 10 |
|---|-------|-------|------|-----|----|
| <i>tetA</i> 浓度 / ($\text{copies} \cdot \text{mL}^{-1}$) | 243.2 | 109.5 | 41.7 | 2.8 | 0 |
| <i>tetO</i> 浓度 / ($\text{copies} \cdot \text{mL}^{-1}$) | 4.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

结果表明,水样中基因 *tetA* 的浓度显著高于另一种耐药基因 *tetO*,这和之前学者对水中四环素耐药基因的认识相符^[1]。耐药基因浓度随紫外线照射剂量的增加而不断降低,在 $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时已基本不可检出,说明紫外消毒对耐药细菌和耐药基因的去除都比较有效。值得注意的是, $1 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 的紫外线对耐药基因 *tetA* 的去除率为 70%,高于同一消毒剂

量下对耐四环素总异养菌的去除率(30%)。可知,紫外消毒对耐药基因的去活效果优于耐药细菌。这也同紫外线杀灭细菌的机理为破坏其遗传物质——DNA^[6]是一致的。

2.4 紫外消毒对四环素耐药细菌生态风险的控制

为考察耐四环素细菌在紫外消毒过程中的健康风险及其对紫外消毒处理的敏感或耐受性,将四环素耐药细菌与相应总细菌在UV消毒过程中的灭活特性进行了对比分析,结果见图3。

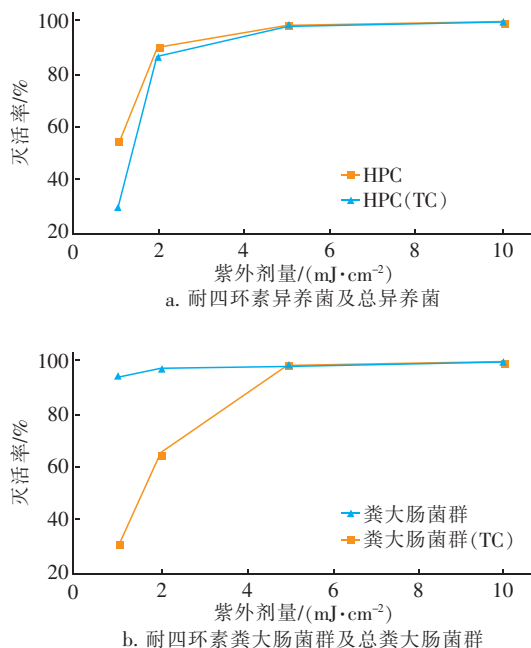


图3 UV消毒对耐四环素异养菌、粪大肠菌群及相应总细菌的灭活效果

Fig.3 Inactivation efficiency of tetracycline resistant heterotrophic bacteria and fecal coliform and their corresponding total bacteria by UV disinfection

从图3(a)可以看出,在紫外剂量为1 mJ/cm^2 时,紫外消毒对耐四环素异养菌的灭活率更低,但是随着紫外剂量的升高,对四环素耐药细菌的灭活率与总异养菌的灭活率几乎保持一致,因而四环素耐药细菌对紫外消毒敏感程度与总异养菌并没有明显差别。

相比之下,1 mJ/cm^2 紫外线照射对耐四环素粪大肠菌群的灭活效果(30.2%)远远低于对总粪大肠菌群(94.6%)的灭活效果,相应占比由消毒前的不足3%增加至20%,在2 mJ/cm^2 消毒剂量下也发现了相同的规律,直到消毒剂量高于5 mJ/cm^2 ,紫外消毒对耐四环素粪大肠菌群和总大肠菌群都具有

较好的灭活效果。这可能是因为,很多粪大肠菌群寄居在细菌体内,对包括UV等的外界光线较敏感,而耐四环素粪大肠菌则相对敏感性变差。上述结果表明,低剂量紫外消毒可能增加耐四环素细菌的生态风险,因此在设计紫外消毒剂量时,应充分考虑到四环素耐药细菌的生态风险,采用足够的紫外消毒剂量。

为进一步验证四环素耐药细菌在UV消毒过程中的健康风险,将耐四环素大肠杆菌K12与其敏感菌株的灭活情况进行了对比,结果见图4。可以看出,在相同消毒剂量下对耐四环素大肠杆菌的去除率均低于敏感菌的去除率,如1 mJ/cm^2 消毒剂量对敏感菌的灭活率高于95%,而对耐四环素大肠杆菌K12的灭活率却不足80%,这与耐四环素粪大肠菌群呈现的规律类似。

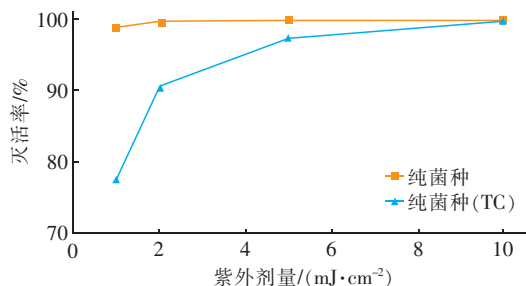


图4 UV消毒对耐四环素大肠杆菌K12和敏感大肠杆菌的灭活效果

Fig.4 Inactivation efficiency of tetracycline resistant *Escherichia coli* K12 and its corresponding total bacteria by UV disinfection

上述结果表明,耐四环素细菌尤其是某些革兰氏阴性耐药细菌,对UV消毒具有一定程度的耐受性,这种耐受性可能和耐四环素细菌典型的耐药机制有一定的联系,药物外排泵是细菌对四环素产生抗性的重要机制之一^[12],而这种外排机制可能造成了细胞壁或细胞膜的某种变化,使得UV相对不容易进入细胞内部杀灭细胞,从而表现出一定的耐受性。本研究以四环素为例考察了其耐药细菌的消毒特性,发现消毒剂量在5 mJ/cm^2 以上时可以有效去除耐药细菌,但较低消毒剂量则不能完全杀灭耐药细菌,耐药细菌的生态风险反而有所增加^[10]。在实际污水厂运行期间,尤其当UV设备运行年限较长时,其有效照射剂量一般低于5 mJ/cm^2 ,耐药细菌的生态风险需要引起人们的重视。

3 结论

① 紫外消毒对耐四环素异养菌的灭活效果随着消毒剂量的提高而显著增强。在消毒剂量为 1 mJ/cm^2 时,灭活率仅有 30%,而 2 mJ/cm^2 消毒剂量下灭活率可达到 90%,消毒剂量在 5 mJ/cm^2 以上时耐四环素总异养菌数低于 10 CFU/mL ,继续增加消毒剂量(10 mJ/cm^2),灭活率高于 99%,耐四环素异养菌几乎全部被杀灭;UV 对耐四环素粪大肠菌群和大肠杆菌 K12 的灭活趋势与总异养菌类似。

② *tetA* 是水体中主要的四环素耐药基因,其浓度随紫外消毒剂量的增加而不断降低,在紫外消毒剂量为 5 mJ/cm^2 时已基本被完全去除。

③ 紫外消毒对总异养菌与其中耐四环素异养菌的灭活率无显著差别,但是在低紫外剂量($< 5 \text{ mJ/cm}^2$)下对耐四环素粪大肠菌群或大肠杆菌的杀灭效果显著低于相应粪大肠菌群总数和敏感大肠杆菌,耐四环素细菌尤其是某些革兰氏阴性耐药细菌,对 UV 消毒具有一定的耐受性。

参考文献:

- [1] Zhang X X, Zhang T. Occurrence, abundance, and diversity of tetracycline resistance genes in 15 sewage treatment plants across China and other global locations [J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45(7): 2598 – 2604.
- [2] Zhang H M, Liu P X, Feng Y J, *et al.* Fate of antibiotics during wastewater treatment and antibiotic distribution in the effluent-receiving waters of the Yellow Sea, northern China [J]. *Mar Pollut Bull*, 2013, 73(1): 282 – 290.
- [3] Szczepanowski R, Linke B, Krahn I, *et al.* Detection of 140 clinically relevant antibiotic-resistance genes in the plasmid metagenome of wastewater treatment plant bacteria showing reduced susceptibility to selected antibiotics [J]. *Microbiology*, 2009, 155 (Pt 7): 2306 – 2319.
- [4] Pruden A, Pei R, Storteboom H, *et al.* Antibiotic resistance genes as emerging contaminants: Studies in northern Colorado [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(23): 7445 – 7450.
- [5] Guardabassi L, Lo Fo Wong D M A, Dalsgaard A. The effects of tertiary wastewater treatment on the prevalence of antimicrobial resistant bacteria [J]. *Water Res*, 2002, 36(8): 1955 – 1964.
- [6] McKinney C W, Pruden A. Ultraviolet disinfection of antibiotic resistant bacteria and their antibiotic resistance genes in water and wastewater [J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46(24): 13393 – 13400.
- [7] Macauley J J, Qiang Z, Adams C D, *et al.* Disinfection of swine wastewater using chlorine, ultraviolet light and ozone [J]. *Water Res*, 2006, 40(10): 2017 – 2026.
- [8] Meckes M C. Effect of UV light disinfection on antibiotic-resistant coliforms in wastewater effluents [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1982, 43(2): 371 – 377.
- [9] Auerbach E A, Seyfried E E, McMahon K D. Tetracycline resistance genes in activated sludge wastewater treatment plants [J]. *Water Res*, 2007, 41(5): 1143 – 1151.
- [10] Munir M, Wong K, Xagorarakis I. Release of antibiotic resistant bacteria and genes in the effluent and biosolids of five wastewater utilities in Michigan [J]. *Water Res*, 2011, 45(2): 681 – 693.
- [11] Bolton J R, Linden K G. Standardization of methods for fluence (UV dose) determination in bench-scale UV experiments [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2003, 129(3): 209 – 215.
- [12] Chopra I, Roberts M. Tetracycline antibiotics: mode of action, applications, molecular biology, and epidemiology of bacterial resistance [J]. *Microbiol Mol Biol Rev*, 2001, 65(2): 232 – 260.



作者简介:汪喜生(1970 –),男,江西九江人,硕士,高级工程师,主要研究方向为污水处理和污泥焚烧。

E-mail: wxs@shwwt.com

收稿日期:2018-05-12