

# 颗粒物对紫外线灭活二级出水中粪大肠菌的影响

孙文俊<sup>1</sup>, 刘文君<sup>1</sup>, Brian Petri<sup>2</sup>, Bill Cairns<sup>2</sup>

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. Trojan Technology, London N5V1T4U7, Canada)

**摘要:**用低压紫外线照射具有相同颗粒物粒径分布的一系列水样,把实验结果带入二重动力学模型进行计算,评价自然状态下颗粒物对粪大肠菌的保护作用。结果表明,二级出水中大部分粪大肠菌都与颗粒物交连在一起;在颗粒物  $< 10^5 \text{ C mL}^{-1}$  时,颗粒物的增加会明显降低紫外线对二级出水中粪大肠菌的灭活率,但当颗粒物  $> 10^5 \text{ C mL}^{-1}$  时,这种影响不明显。从二重动力学模型的计算结果来看,对于不同颗粒物浓度的水样,难灭活的微生物所占的比重很小且比较稳定,大多数与颗粒物结合的粪大肠菌都较易被紫外线灭活。

**关键词:**紫外线;颗粒物;粪大肠菌;二重动力学

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2009)04-1095-04

## Impact of Particle on UV Disinfection for Waste water

SUN Wen-jun<sup>1</sup>, LIU Wen-jun<sup>1</sup>, Brian Petri<sup>2</sup>, Bill Cairns<sup>2</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Trojan Technology, London N5V1T4U7, Canada)

**Abstract:** Water samples with similar particle distribution were irradiated by low-pressure UV. Experiment results were input into the two-kinetic model for calculation. The approach applied in this experiment allowed the assessment of the effect of particles on UV inactivation of FC in their natural state. The results showed that FC concentration increased with the particle number. Particle significantly lowered the inactivation rate of the indigenous FC in the secondary water with elevated particle content when the particle number was less than  $10^5 \text{ C mL}^{-1}$ . On the other hand, the impact was not very significant when the particle number exceeded  $10^5 \text{ C mL}^{-1}$ . Based on the calculation results of a two-kinetic model, for the different number of particles, the ratio of the FC which was difficult to inactivate was stable, while most of the FC which were holed in the particles were easy to inactivate.

**Key words:** UV; particle; fecal coliform; two-kinetic

对于污水处理厂的消毒系统,二级出水颗粒物是影响其对微生物灭活效果的重要因素之一。紫外线消毒(UV)受颗粒物的影响尤其明显,一般认为,在紫外线消毒过程中,颗粒物对微生物保护的机制是:一方面,微生物隐藏在颗粒物的孔隙中,紫外线照射不到;另一方面,颗粒物能够引起光的折射,增加了光程,从而增加了水对紫外线的吸收,减少了可以用作消毒的紫外线能量<sup>[1,2]</sup>。

在污水处理厂中,浊度是可控且容易被检测的参数,所以往往将其作为衡量颗粒物浓度的主要指标。因此,研究者针对浊度与紫外线消毒效果的关系做了大量的工作。一些研究表明,浊度在 10 NTU 以下基本上不会影响紫外线对微生物的灭活<sup>[2,3]</sup>。但是,浊度不能反映颗粒数目、粒径分布和颗粒表面的化学性质,其本身不能充分地说明颗粒物对于微生物的保护机制<sup>[4]</sup>。因此,越来越多的研究将颗粒物分布作为紫外线消毒效果的主要影响因素。Qualls 等<sup>[5]</sup>和 Joliset 等<sup>[6]</sup>的研究结果表明,对于大肠菌的遮蔽作用主要与 7 ~ 10  $\mu\text{m}$  的颗粒相关;Bohnerova 等<sup>[7]</sup>认为,  $< 2 \mu\text{m}$  的颗粒物能够遮挡较小的微生

物,如 MS2 和 T4 噬菌体;  $> 41 \mu\text{m}$  的颗粒可以影响到紫外线对分枝杆菌的灭活。除了粒径分布,颗粒物与微生物的交连程度也是影响紫外线消毒效果的重要因素。如果颗粒物没有紧密包住微生物,其对微生物的保护作用并不明显。在市政污水中,大肠菌和病毒均很容易与颗粒物交连<sup>[8~10]</sup>,这种交连的原因是静电引力和疏水物质的交互作用<sup>[11]</sup>。

在紫外线消毒过程中,颗粒物对微生物的保护作用是一个非常复杂的过程。理论上,二重动力学模型能够帮助理解颗粒物在紫外线消毒中所起的作用。这个模型描述的是:紫外线消毒中应符合没有被颗粒物保护的微生物(下标用 f)和受颗粒物保护的抗性更强的微生物(下标用 p)两部分灭活动力学相加:

$$N = N_f e^{-k_f D} + N_p e^{-k_p D} \quad (1)$$

式中,  $N$  代表微生物浓度,  $k$  代表一级灭活系数,  $D$  代表紫外线剂量。图 1 是不同颗粒物浓度的理想的

收稿日期:2008-05-28;修订日期:2008-08-06

基金项目:国家自然科学基金项目(50778096)

作者简介:孙文俊(1981~),男,博士研究生,主要研究方向为水处理的紫外线消毒技术,E-mail:sunwj05@mails.tsinghua.edu.cn

二重动力学模型(根据公式 1 和图 1 中的参数带入 EXCEL 计算得到,  $N_f = 10^6$ ,  $k_f = 0.576$ ,  $k_p = 0.046$ ). 按照这个模型,在水质相似的情况下,紫外线达到一定灭活率所需要的剂量会随着颗粒物浓度的增加而增加.

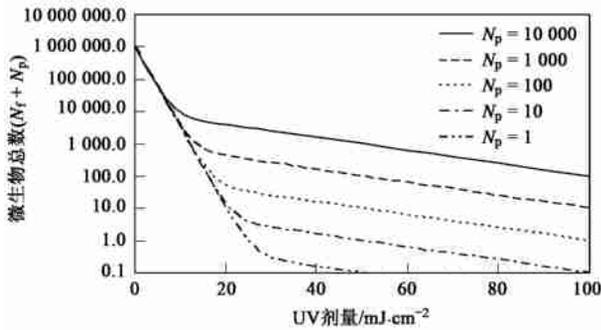


图 1 不同颗粒物浓度下的理想二重动力学模型

Fig. 1 Double-exponential model predictions for varying levels of particles

本实验的主要目的是研究对于相同水质条件下的不同颗粒物浓度,紫外线对污水厂二级出水的粪大肠菌(FC)的灭活曲线,讨论颗粒物对紫外线消毒效果的影响,并将实验结果带入二重动力学模型进行计算,评价颗粒物对 FC 的保护作用.

1 材料与方 法

1.1 水样和试验方 法

水样取自加拿大安大略伦敦的 Greenway 污水处理厂,水样经过如下处理:沉淀 24 h,使体积大的颗粒沉到瓶底;轻轻吸出瓶子上方的上清液,留 15%的水在瓶底,上清液记为 B,瓶底的水记为 A,A 中包含大多数的颗粒物;通过 8 μm 孔径的滤膜过滤水样 B,经过过滤的水样为 C;A 和 C 按不同的比例混合形成 D 和 E,如表 1 所示.

表 1 水样的混合比例/mL

样品	A	C	D	E
A	1 000	0	333	667
C	0	1 000	667	333

水样收集、运输保持 4 ℃ 并且在 2 h 内进行实验.

1.2 颗粒物粒径分布分析

颗粒物粒径分布分析采用 Brightwell 颗粒计数仪(Brightwell Technologies,加拿大),其原理是进行直接照相分析,每个水样的分析体积为 20 mL.

1.3 剂量测定和紫外线照射

紫外线照射通过准平行光束仪实现.准平行光束仪主要是由低压紫外线灯管和金属套筒组成(Trojan UV Technologies,加拿大).紫外线光强为 0.194 mW cm<sup>-2</sup>,曝光时间通过指定的紫外线剂量来计算,水样照射体积为 50 mL.

1.4 FC 的计数

FC 的计数采用美国 EPA 的标准方法.水样先通过 0.45 μm 的滤膜,然后在 45 ℃ 条件下培养 24 h,同一个水样做 3 个平行样.

2 结果与讨论

2.1 颗粒物粒径分布与水质的关系

不同水样的颗粒物粒径分布如图 1 所示.颗粒物在 4 个水样中的粒径分布是相似的.大多数的颗粒物粒径分布在 60 ~ 80 μm 之间.

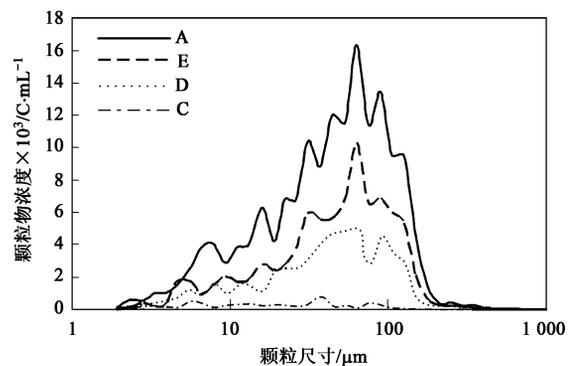


图 2 水样的颗粒物粒径分布

Fig. 2 Particles distribution of the four samples

实验中的水质参数如表 2 所示.浊度和总悬浮固体(TSS)均随着颗粒物浓度的增加而增加,且有很好的相关性.紫外线透光率(UVT)受颗粒物的影响也很明显,在颗粒物浓度达到 3 × 10<sup>5</sup> C mL<sup>-1</sup>时(水样 A),紫外线的透光率下降到 70%以下,这将大大影响到紫外线对微生物的灭活效果.

表 2 水样的水质参数

参数	C	D	E	A
颗粒物浓度 × 10 <sup>3</sup> /C mL <sup>-1</sup>	11.07	111.69	176.4	325.3
> 15 μm	6.37	92.45	151.42	274.68
> 31 μm	2.61	61.71	109.22	189.45
> 63 μm	0.29	22.50	47.92	78.94
浊度/NTU	0.655	3.16	5.29	9.97
UVT/%	73	72	70	68
TSS/mg L <sup>-1</sup>	0	9	18.5	31
FC/CFU · (100 mL) <sup>-1</sup>	33 500	62 000	114 000	190 000

FC 浓度随着颗粒物浓度的增加而增加,且二者之间有很好的线性关系(图 3). 这表明污水处理厂二级出水中的大部分 FC 均与颗粒物结合.

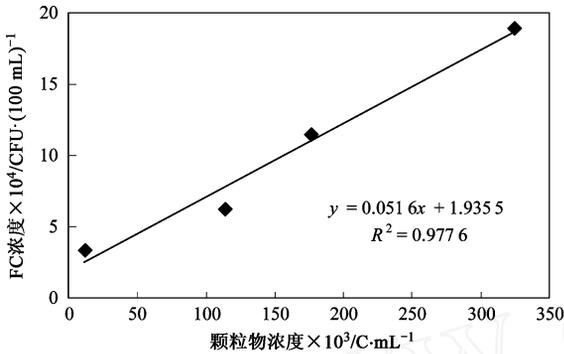


图 3 颗粒物浓度与 FC 浓度的关系

Fig. 3 Relationship of particle and FC concentration

### 2.2 颗粒物对紫外线灭活效率的影响

图 4 为紫外线对 4 个水样的灭活动力学曲线. 水样 D、E、A 的剂量-反应曲线在 30 mJ cm⁻² 时出现拖尾现象,拖尾现象是指当紫外线剂量达到一定数值,随着剂量的升高,灭活率没有明显的增加. 在纯水实验中,FC 灭活曲线的拖尾现象一般发生在 10 mJ cm⁻² 左右,可见颗粒物延迟了拖尾现象出现的位置,即增加了紫外线对 FC 灭活的难度.

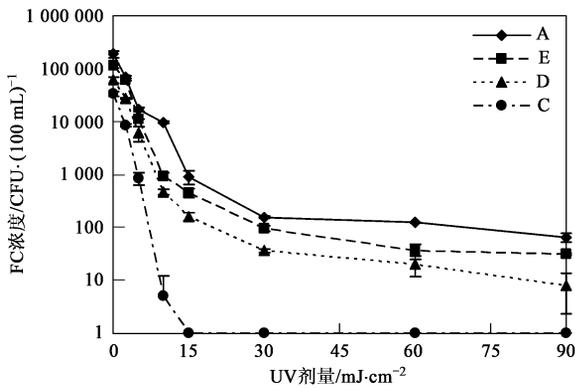


图 4 紫外线对 FC 的剂量-反应曲线

Fig. 4 UV response curve for FC

图 5 是达到拖尾现象之前紫外线 FC 的灭活动力学分析. 在 15 mJ cm⁻² 的紫外线剂量下,水样 A ( $10^{0.14} \text{ cm}^2 \text{ mJ}^{-1}$ )、E ( $10^{0.17} \text{ cm}^2 \text{ mJ}^{-1}$ ) 和 D ( $10^{0.18} \text{ cm}^2 \text{ mJ}^{-1}$ ) 的灭活系数没有明显的区别,但是远低于 C 的灭活系数 ( $10^{0.32} \text{ cm}^2 \text{ mJ}^{-1}$ ). 这说明在颗粒物浓度较低时,颗粒物对 FC 的灭活系数的影响比较显著. 但当颗粒物浓度提高到一个临界点,这种影响变得不明显,这个临界点在  $10^4 \sim 10^5 \text{ C mL}^{-1}$ .

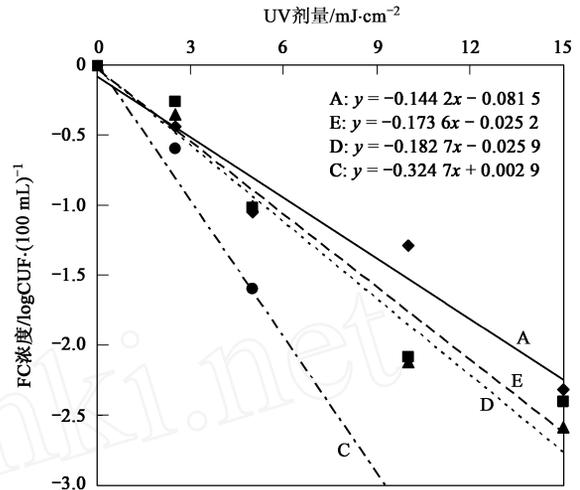


图 5 紫外线剂量低于 15 mJ cm⁻² 的灭活动力学

Fig. 5 Kinetic of UV inactivation for FC under 15 mJ cm⁻²

### 2.3 模型计算结果

采用二重动力学模型来拟合实验数据,结果如表 3 所示.

表 3 模型计算结果/mg L⁻¹

Table 3 Model calculation results/mg L⁻¹

参数/水样	A	E	D	C
$N_f$	162 453	129 805	70 259	45 710
$N_p$	290	218	114	
$k_f$	0.390 473	0.465 883	0.489 516	0.816 416
$k_p$	0.016 256	0.024 317	0.031 099	
$N_p/N_f$	0.18 %	0.17 %	0.16 %	0.00 %

在表 3 中,  $N_f$  随着颗粒物浓度的增加而增加,表明在污水处理厂二级出水水样中,大部分的 FC 与颗粒物交连,这与图 3 所得到的结论一致. 水样 C 的  $k_f$  明显小于其它 3 个水样,在颗粒物浓度较低时 ( $< 10^5 \text{ C mL}^{-1}$ ),颗粒物的增加会明显降低紫外线对 FC 的灭活率;当颗粒物达到  $10^5 \text{ C mL}^{-1}$  以上时(A、E、D),随着颗粒物浓度的增加,  $k_f$  的数值比较稳定,颗粒物对大部分 FC 的保护作用并没有明显的增强.  $k_p$  的值随着颗粒物的增加而降低,并且二者之间有良好的相关性. 这表明与颗粒物结合的微生物在颗粒物含量高的情况下更加难以灭活.  $N_p/N_f$  的值在水样 A、E、D 中非常一致,即对于不同浓度颗粒物的情况下,难灭活的微生物所占的比重比较稳定,比例在 0.16 % ~ 0.18 %,即大多数与颗粒物结合的粪大肠菌都较易被紫外线灭活,只有少数包埋较深的 FC 受到了颗粒物很好的保护,且这种保护作用随着颗粒物的增加而增加.

### 3 结论

(1) 颗粒物对 FC 浓度的影响显著. FC 浓度随着颗粒物的增加而增加, 二级出水中大多数粪大肠菌都与颗粒物交连在一起.

(2) 在颗粒物浓度较低时, 颗粒物是影响紫外线对 FC 灭活效果的主要因素; 但是随着颗粒物的增加, 其对大部分 FC 的保护作用没有明显的增强.

(3) 有少数包埋较深的 FC 受到了颗粒物很好的保护, 紫外线很难对其灭活, 这部分 FC 所占的比重比较稳定, 且这种保护作用随着颗粒物的增加而增加.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Fariborz T. Ultraviolet and ionizing radiation for microorganism inactivation[J]. *Water Res*, 2004, **38** (6) :3940-3948.
- [ 2 ] Batch L F, Schulz C R, Linden K G. Evaluating water quality effects on UV disinfection of MS2 coliphage[J]. *J Am Water Works Assoc*, 2004, **96** (7) : 75-87.
- [ 3 ] Passantino L, Malley J J, Knudson M, *et al.* Effect of low turbidity and algae on UV disinfection performance[J]. *J Am Water Works Assoc*, 2004, **96** (6) : 128-137.
- [ 4 ] Mamane H, Linden K G. Impact of particle aggregated microbes on UV disinfection. : Proper absorbance measurement for UV fluence [J]. *Environ Eng*, 2006, **132** (6) : 607-615.
- [ 5 ] Qualls R G, Flynn M P, Johnson J D. The role of suspended particles in ultraviolet disinfection[J]. *Water Pollut Control Fed*, 1983, **55** (10) : 1280-1285.
- [ 6 ] Joliset D, Lam C, Pitt P. Particle effects on ultraviolet disinfection of coliform bacteria in recycled water[J]. *Water Environ Res*, 2001, **73** (2) : 233-236.
- [ 7 ] Bohrerova Z, Linden K G. Ultraviolet and chlorine disinfection of Mycobacterium in wastewater: effect of aggregation [J]. *Water Environ Res*, 2006, **78** (6) : 565-571.
- [ 8 ] Parker J A, Darby J L. Particle-associated coliform in secondary effluents: shielding from ultraviolet light disinfection [J]. *Water Environ Res*, 1995, **67** (7) : 1065-1075.
- [ 9 ] Bitton G. Adsorption of viruses onto surfaces in soil and water[J]. *Water Res*, 1975, **9** (5) : 473-484.
- [10] Meschke J S, Sobsey M D. Comparative adsorption of Norwalk virus, poliovirus 1 and F+ RNA coliphage MS2 to soils suspended in treated wastewater[J]. *Water Sci Technol*, 1998, **38** (12) : 187-189.
- [11] Wait D A, Sobsey M D. Method for recovery of enteric viruses from estuarine sediments with chaotropic agents [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1983, **46** (2) : 379-385.