

# 污水紫外线消毒工艺的影响因素研究

郭美婷,胡洪营\*,李莉 (清华大学环境科学与工程系,环境模拟与污染控制国家联合重点实验室,北京 100084)

**摘要:** 以大肠杆菌为受试菌种,研究了紫外线光强、配水水质及微生物因素对紫外线消毒的影响.在所选取的紫外光强范围内(0.044~0.163mW/cm<sup>2</sup>),光强对紫外线灭活大肠杆菌的去除率影响不大.水质(浊度、铁和腐殖酸等)对水样的吸光度及紫外线穿透率都有明显的影响;但是对大肠杆菌的灭活率影响不显著;当紫外线剂量增加时,这种影响逐渐变小到可以忽略.微生物的初始浓度对紫外线对微生物的灭活率有影响,微生物初始浓度越大,灭活率越高;对于不同初始浓度,紫外线灭活后存活的微生物数量比较接近.

**关键词:** 污水消毒;紫外线消毒;大肠杆菌;外光光强;水质

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2007)04-0534-05

**Studies on effecting factors of UV disinfection of wastewater.** GUO Mei-ting, HU Hong-ying\*, LI Li(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2007,27(4): 534~538

**Abstract:** The effects of UV intensity, water quality and initial microorganism concentration factors on UV disinfection were studied using *E.coli* as testing bacterial kind. In the range of UV intensities (0.044~0.163mW/cm<sup>2</sup>), the effect of UV intensity on the removal rate of *E.coli* was not great. Water qualities (turbidity, ferric and humic acid concentration etc.) all had effecting on light absorbance degree and UV transmittance of water sample, but no marked effecting on inactivation rate of *E.coli*; while UV doses increased, this effecting decreased gradually to negligible extent. The initial concentration of microorganism had effecting on inactivation of microorganism by UV. The higher the initial concentration of microorganism, the higher the inactivation rate. On different initial concentration, the living microorganism amounts after UV inactivation were more near relatively.

**Key words:** wastewater disinfection; UV disinfection; *E. coli*; UV intensity; water quality

紫外线消毒在废水及再生水消毒中的应用越来越多<sup>[1-3]</sup>,全面了解紫外线消毒的影响因素及其特性,有利于保障紫外线消毒的安全性.紫外线消毒效果主要受 3 个方面的影响,消毒系统的类型,所选用灯管的能量转换率及其发光稳定性、紫外光的光强等<sup>[4-6]</sup>;水质条件,水中的颗粒物质的阻挡、有机物质及无机离子对紫外光的吸收均可能在一定程度上削弱紫外线灭活微生物的效果<sup>[7-9]</sup>;微生物的类型和初始浓度等.由于污水中细菌、病毒种类繁多,且对紫外线的抗性不同,因此对于不同类型的污水,呈现出不同消毒效果<sup>[10]</sup>.其中微生物初始浓度是影响紫外线消毒效率的因素之一,有研究认为较高的微生物量必然要求更高的紫外线剂量<sup>[10]</sup>.本研究以大肠杆菌为受试菌种,在自配水中研究了紫外线光强、浊度和腐殖酸及铁离子、微生物初始浓度对消毒效

果的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 受试菌种 大肠杆菌 1.3373,购于中国科学院环境微生物所.

将-80℃冰箱中的冰冻菌种融化后接种 50μL 于 50mL 营养肉汤培养基中,于 37℃、130r/min 振荡培养 16h,10000/min 离心 10min,弃去上清液,用灭菌生理盐水冲洗 2 次,将沉淀溶于 100mL 灭菌生理盐水中得到菌悬液.根据试验要求配制一定初始浓度的菌悬液作为试验水样.

收稿日期: 2006-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20477021);国家自然科学基金-JST 重大国际合作项目(20510076)

\* 责任作者, 教授, hyhu@tsinghua.edu.cn

1.1.2 水样配制 浊度不同的水样:在菌悬液中添加灭菌的高岭土,配制不同浊度的水样.

含不同浓度腐殖酸的水样:在菌悬液中添加腐殖酸溶液,使得试验水样中腐殖酸的浓度为 0,1,10,50mg/L.添加的腐殖酸溶液通过 0.22 $\mu$ m 膜过滤灭菌.

含不同浓度  $\text{Fe}^{3+}$  的水样:在菌悬液中添加  $\text{FeCl}_3$  溶液,使得水样中  $\text{Fe}^{3+}$  浓度为 0,0.3,3.0,50.0mg/L.添加前, $\text{FeCl}_3$  溶液在紫外灯下照射 15min 灭菌.

## 1.2 紫外线照射试验

测定试验水样的吸光度  $A_{254\text{nm}}$ ,计算设计紫外线剂量下所需的照射时间.取 15mL 试验水样于 60mm 直径的培养皿中,放入转子,将培养皿置于紫外平行光束仪正下方,磁力搅拌器的上面,使水样接受设定时间的紫外线照射.

## 1.3 细菌计数

选用 0.45 $\mu$ m 孔径的滤膜,用真空过滤系统过滤 10mL 紫外线照射后的水样,将滤后滤膜置于品红亚硫酸钠培养基上,将平板倒置于 37 培养箱中培养 24h,计菌落数.每个样品做 3 个平行样.

## 1.4 消毒效果评价

利用紫外线对大肠杆菌的灭活率评价消毒效果.

$$\text{灭活率} = \lg(N_0/N)$$

式中: $N_0$  为紫外线照射前水样中的菌; $N$  为紫外线照射后水样中的菌数.

## 2 结果与讨论

### 2.1 紫外线光强对灭活大肠杆菌的影响

紫外线剂量是进行紫外线消毒工艺的重要指标,通常以  $\text{UV dose} = \text{Intensity}(\text{mW}/\text{cm}^2) \times \text{time}(\text{s})$  来计算<sup>[11]</sup>.污水消毒中常用的剂量为 30~45 $\text{mJ}/\text{cm}^2$ <sup>[12-13]</sup>.但是同一剂量下,不同的光强和时间组合可能对紫外灭活效果产生影响.本试验研究了光强分别为 0.044,0.088,0.163 $\text{mW}/\text{cm}^2$  时,不同紫外线剂量下大肠杆菌灭活的效果(图 1).

由图 1 可见,对同一个光强度,紫外线对大肠杆菌的去除率随紫外线剂量,即随照射时间增加

而增加.但在本研究的光强变化范围内,光强对紫外线灭活大肠杆菌的效果影响不明显.这说明,在光强变化较小的范围内,光强对灭菌效果的影响可以忽略.张永吉等<sup>[10]</sup>认为,光强为 0.008  $\text{mW}/\text{cm}^2$  和 0.100  $\text{mW}/\text{cm}^2$  时对大肠杆菌的灭活率影响不大,这同本研究结果相近.

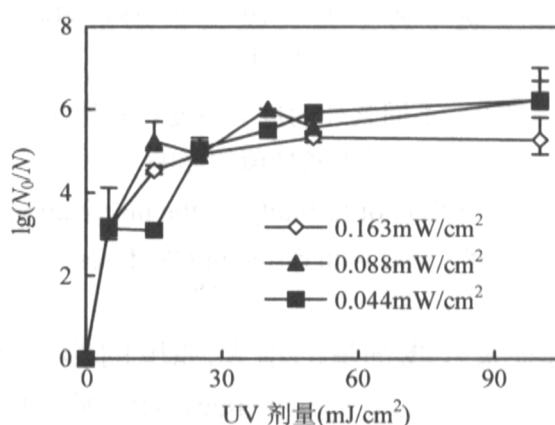


图 1 紫外线光强对灭活大肠杆菌的影响

Fig.1 Effect of UV intensity on *E. coli* inactivation

另外,对于同一剂量,光强越小,所需的照射时间越长.同一剂量时,光强为 0.044  $\text{mW}/\text{cm}^2$  所需的照射时间是光强 0.163 $\text{mW}/\text{cm}^2$  所需照射时间的 4 倍之多.而不同的照射时间对反应器的体积影响很大.照射时间短,在一定流速下,理论上反应器体积小,但是容易在边壁造成短流,反而可能会降低紫外灭活率;而照射时间长,反应器体积大,占地面积大,紫外线照射容易不均匀,也并不能保证消毒效果.故从工艺角度出发,在选择紫外线系统,设计紫外剂量及相应光强时,应全面地综合考虑,选用合适的光强强度的紫外线消毒系统,从而保证经济有效地消毒.

### 2.2 水质对紫外线灭活大肠杆菌的影响

2.2.1 浊度的影响 水的浊度增加时,紫外线穿透水体的量降低,到达受试微生物的紫外剂量就相对减少.自配水浊度试验结果如图 2 所示.

由图 2 可见,随着水样浊度的增加,紫外线穿透率显著下降.本研究中当浊度从 0.74NTU 增加到 207NTU 时,紫外线穿透率从 97%降到 20%以下.由图 2 可见,在同一紫外线剂量下,浊度在一定程度上降低了大肠杆菌去除率,但是影响强度不大.

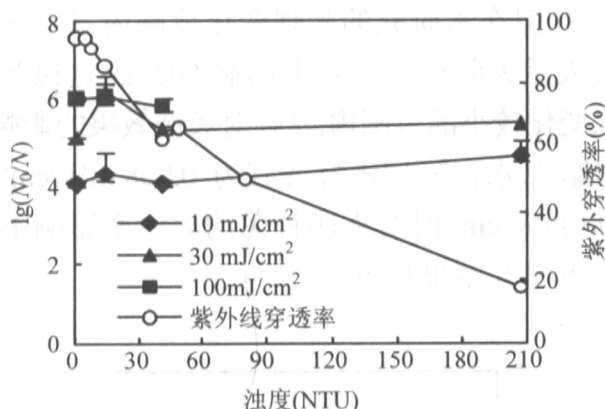


图2 不同紫外剂量下浊度对紫外线灭活大肠杆菌的影响

Fig.2 Effect of turbidity on the inactivation of *E. coli* with different UV doses

随着紫外线剂量的增大,浊度的影响逐渐减小.同一浊度下,剂量为  $30\text{mJ}/\text{cm}^2$  和  $100\text{mJ}/\text{cm}^2$  对大肠杆菌的去除率比较接近,并且浊度越高,两者的差距越小.也就是说,浊度对紫外线消毒的负面效应可以通过提高紫外剂量在一定程度上抵消.一般情况下,剂量设计值为  $30\sim 45\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,所以对浊度较大的污水采用紫外线消毒,一般的工程设计剂量完全可以满足对去除率的要求.

**2.2.2  $\text{Fe}^{3+}$  的影响** 铁是紫外线的强吸收体,水中含有铁会降低紫外线穿透率.用铁盐做絮凝剂的处理出水中往往含有较高的  $\text{Fe}^{3+}$ ,对后续的紫外线消毒可能会产生影响.故研究了铁盐对紫外线灭活大肠杆菌的影响.

由图3可见,随着铁盐浓度的增加,水样在波长  $254\text{nm}$  处的吸光度明显增加,从而大大降低紫外线穿透率,影响消毒效果.当紫外线剂量为  $10\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  浓度从  $0$  增加到  $3\text{mg}/\text{L}$  时,对于大肠杆菌的去除率有较大的降低;但再增加至  $50\text{mg}/\text{L}$  时,去除率仅略微有所减低.另外可以看出,紫外线剂量越高,不同  $\text{Fe}^{3+}$  浓度的水样间的灭活率逐渐接近,  $\text{Fe}^{3+}$  的影响逐渐变小.这说明,铁盐在较低浓度时对紫外线灭活大肠杆菌有较明显的减弱作用;但随着紫外线剂量的增高,  $\text{Fe}^{3+}$  浓度的影响逐渐不明显.

铁对紫外灭活率的影响一方面是由于铁吸收紫外线,使得微生物接受的紫外线照射会减少;另一方面由于铁易形成絮体,多孔的物质可以吸

附包裹微生物避免其受到紫外线照射.铁盐浓度较低时,铁对紫外线的吸收或其絮体对大肠杆菌的包裹作用较明显;而浓度增大时,铁对紫外线的吸收或其絮体对大肠杆菌的包裹作用增加有限,从而对大肠杆菌灭活率的影响增加也有限.

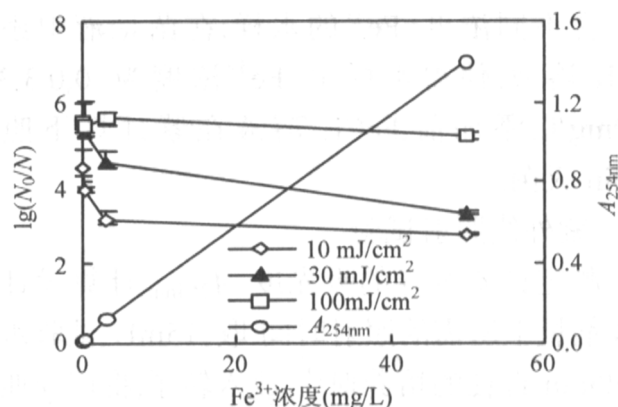


图3 不同紫外剂量下  $\text{Fe}^{3+}$  对紫外线灭活大肠杆菌的影响

Fig.3 Effect of ferric concentration on the inactivation of *E. coli* with different UV doses

有研究<sup>[14]</sup>表明,  $\text{Fe}^{3+}$  对紫外线灭菌效果产生影响的浓度为  $0.057\text{mg}/\text{L}$ .另外,铁盐的存在还易加速紫外线灯管的结垢<sup>[15]</sup>.因此对于水处理过程使用到铁盐或污水中含铁盐较高的水厂来说,选择紫外线消毒时应考虑铁的因素.

**2.2.3 腐殖酸的影响** 腐殖酸也是紫外线的强吸收体,会降低紫外线穿透率.

图4显示,腐殖酸的浓度增加时,水样在波长  $254\text{nm}$  处的吸光度明显增加,降低了紫外线穿透率,从而降低了紫外线消毒效果.这一结果与  $\text{Fe}^{3+}$  的影响类似.当腐殖酸浓度增大时,大肠杆菌的去除率明显降低;尤其在腐殖酸浓度为  $50\text{mg}/\text{L}$  时,低浓度 ( $<10\text{mg}/\text{L}$ ) 的腐殖酸对紫外线消毒效果的影响可以忽略.

当紫外线照射剂量由低到高逐渐增加时,不同浓度的腐殖酸对紫外灭活大肠杆菌去除率的降低程度也逐渐减小,去除率逐渐接近.以上结果表明,高的紫外线剂量仍然可以在水样紫外线穿透率低的情况下达到较高的去除率.

## 2.3 微生物初始浓度的影响

消毒前微生物的初始浓度不同,微生物自身

引起的水样吸光度和浊度就不同,单个微生物所接受的紫外线照射也不同,对消毒效果也会有一定的影响。

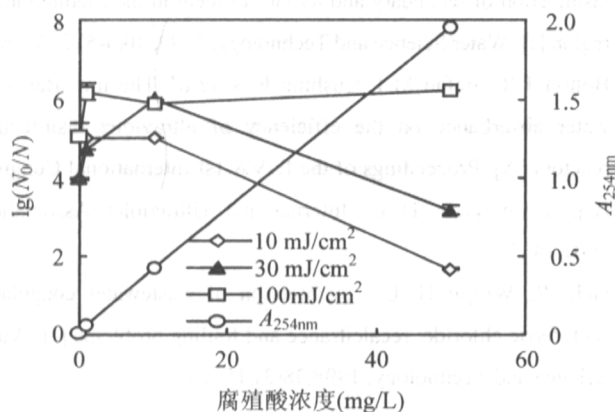


图4 不同紫外剂量下腐殖酸对紫外线灭活大肠杆菌的影响

Fig.4 Effect of humic acid on the inactivation of *E.coli* with different UV doses

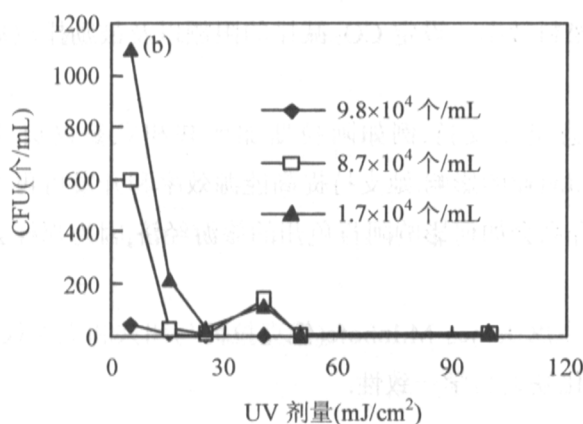
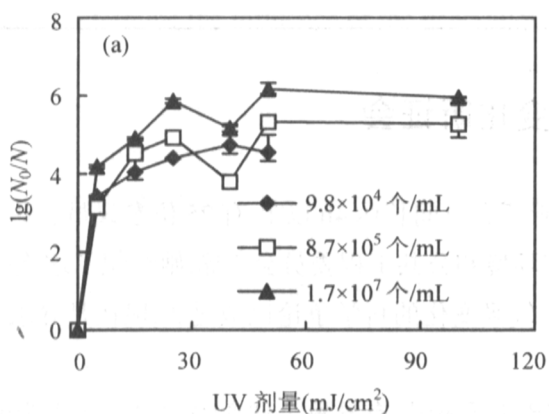


图5 大肠杆菌初始浓度对紫外线消毒效果的影响

Fig.5 Effect of the initial concentration of *E.coli* on the inactivation by UV

由图 5(a)可以看出,不同初始微生物浓度,紫外线灭活的趋势相同.随着紫外线剂量的增大而

灭活率增加;当紫外线剂量达到  $50\text{mJ}/\text{cm}^2$  以上时,灭活率基本不变.但是初始微生物浓度越高,灭活率越大.分析本研究结果认为,微生物浓度大时,水样单位体积内被紫外线照射到的微生物就越多,从而灭活的微生物也越多。

图 5(b)显示,尽管初始微生物浓度不同,紫外线照射后存活微生物的数量仍比较接近.所以评价消毒效果或进行消毒设计时不能单纯地只要求对数去除率,而要结合出水微生物排放标准综合考虑。

### 3 结论

3.1 在本研究所选取的紫外光强范围内 ( $0.044\sim 0.163\text{mW}/\text{cm}^2$ ),光强对紫外线灭活配水中大肠杆菌的去除率影响不大。

3.2 配水水质(浊度、铁和腐殖酸等)对水样的吸光度及紫外线穿透率有明显的影响,但是对大肠杆菌的灭活率影响不显著.同时,当紫外线剂量增加时,这种影响逐渐变小到可以忽略。

3.3 微生物的初始浓度对紫外线对微生物的灭活率有影响.微生物初始浓度越大,灭活率越高.而不同初始浓度时紫外灭活后存活的微生物数量比较接近.故评价消毒效果或设计消毒剂量时应综合考虑微生物灭活率和微生物的初始浓度。

### 参考文献：

- [1] Lazarova V, Savoye P, Janex M L. Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives [J]. Water Science and Technology, 1999,40(4-5):203-213.
- [2] Lazarova V, Janex M L, Pilsdal L, et al. Advanced wastewater disinfection technologies: short and long term efficiency [J]. Water Science and Technology, 1998,38(12):109-117.
- [3] Liberti L, Notarnicola M, Petruzzalli D. Advanced treatment for municipal wastewater reuse in agriculture. UV disinfection: parasite removal and by-product formation [J]. Desalination, 2002,152:315-324.
- [4] Sommer R, Cabaj A, Pribil W, et al. Influence of lamp intensity and water transmittance on the UV disinfection of water [J]. Water Science and Technology, 1997,35(11-12):113-118.
- [5] Dussert B W. Essential criteria for selecting an: Ultraviolet disinfection system [J]. Journal American Water Works Association,

- 2005,97(7):52-58.
- [6] 张 辰,张 欣,吕东明,等.紫外线消毒系统的设计 [J]. 给水排水, 2004,30(3):25-27.
- [7] Loge F J, Emerick R W, Thompson D E, *et al.* Factors influencing ultraviolet disinfection performance part I: light penetration to wastewater particles [J]. Water Environment Research, 1999,71(3): 377-381.
- [8] Emerick R W, Loge F J, Thompson D E, *et al.* Factors influencing ultraviolet disinfection performance part II: association of coliform bacteria with wastewater particles [J]. Water Environment Research, 1999,71(6):1178-1187.
- [9] 丁南珊.影响紫外线消毒效果的因素探讨 [J]. 净水技术, 1994,47(1):20-24.
- [10] 张永吉,刘文君.紫外线对自来水中微生物的灭活作用 [J]. 中国给水排水, 2005,21(9):1-4.
- [11] Labas M D, Brandi R J, Martin C A. *et al.* A contribution to the UV dose concept for bacteria disinfection in well mixed photoreactors [J]. Chemical Engineering Journal, 2006,116: 197-202.
- [12] Moreno B, Goni F, Fernandez O, *et al.* The disinfection of wastewater by ultraviolet light [J]. Water Science and Technology, 1997,35(11-12):233-235.
- [13] Andreadakis A, Mamais D, Christoulas D, *et al.* Ultraviolet disinfection of secondary and tertiary effluent in the Mediterranean region [J]. Water Science and Technology, 1999, 40(4-5):253-260.
- [14] Bolton J R, Stefan M I, Cushing R S, *et al.* The importance of water absorbance on the efficiency of ultraviolet disinfection reactors [A]. Proceedings of the IUVA 1st International Congress [C]. Washington, D C: International Ultraviolet Association, 2001.14-16.
- [15] Gehr R, Wright H. UV disinfection of wastewater coagulated with ferric chloride: recalcitrance and fouling problems [J]. Water Science and Technology, 1998,38(3):15-23.
- 作者简介 :郭美婷(1982-)女,陕西长武县人,清华大学环境科学与工程系博士研究生,主要研究方向为污水再生利用技术.发表论文 5 篇.

## 美国参议院举行气候变化听证会

2007 年 1 月 30 日美国参议院举行了一次马拉松式听证会,听证会时间长达 4h 以上,有 25 位参议员表达了他们的观点.加利福尼亚州民主党参议员 Barbara Boxer 现在是参议院环境和公共工程委员会主席,她组织了这次听证会.她说,举行这次听证会的目的是推动参议院采取行动.她认为关于气候变化的科学争论已成过去,现在是寻求减少温室气体排放的时候.

听证会上有 3 位参议员发言反对采取法规行动.讨论的提案涉及面较广,有导致全球变暖的 CO<sub>2</sub> 的人为源,有要求增加提高能效和可再生能源技术研究的经费、要求提高车辆燃料效率、设定 CO<sub>2</sub> 减排的限额以及鼓励排放额度交易.

有几位参议员说他们过去反对气候变化法规,现在则愿意给予支持.例如阿拉斯加州共和党参议员 Lisa Murkowski 谈到北极冰层减少以及全球变暖对鸟类、哺乳动物和渔业的影响,她支持提高能源效率和开发可再生能源技术.阿肯色州民主党参议员 Blanche L.Lincoln 介绍了温度升高会如何影响阿肯色州的旅游经济,因为那样会缩短该州捕猎野鸭的季节并限制家庭的户外活动.

主要反对立法的参议员是参议院环境和公共工程委员会前主席 James M.Inhofe(俄克拉荷马州共和党参议员),他曾阻止 Boxer 不要举行这次听证会.他表示要继续指出气候变化缺乏科学一致性.

江 英 摘自《Chemical & Engineering News》, February 5 , 10(2007)