

紫外线灭活水中病原微生物

张光辉¹,孙迎雪¹,顾平¹,丁树运²

(1. 天津大学环境科学与工程学院,天津 300072; 2. 天津市兴源环境技术工程有限公司,天津 300384)

摘 要:介绍了紫外线(UV)消毒在水处理领域的研究情况。采用合适的 UV 剂量,紫外线对水中常见的病原微生物有显著的灭活效果,但对配水系统中孳生的生物膜没有明显灭活作用,并且天然水体中的微生物对 UV 的抵抗力明显高于实验室培养的纯种微生物。另外 UV 消毒光源的研究已经扩展到太阳能领域,有学者对太阳光消毒饮用水进行了研究,并提出了相关的预测模型。

关键词:水处理 紫外线(UV) 灭活 光活化 太阳光

中图分类号:TU991.25

文献标识码:A

文章编号:1000-3770(2006)08-0005-04

紫外线(UV)作为一种特殊的电磁波,其波长范围在 100~400 nm,可分为 UVA(400~320 nm)、UVB(320~275 nm)、UVC(275~200 nm)和 UVD(200~100 nm)。UV 消毒的主要机理是破坏病原菌细胞 DNA 的结构和功能,而 DNA 对波长为 260 nm 的 UV 的吸收最为强烈,因而用于水消毒的主要是 UVC。当暴露在 UVC 波段时,DNA 特定碱基内的电子吸收 UV 光子后导致邻近的嘧啶核碱发生二聚作用,直接破坏 DNA 的内部结构,从而使其失去复制能力。

目前水处理领域常用的消毒方法有氯气、臭氧和 UV 消毒。但传统的加氯消毒会产生致畸、致癌、致突变的消毒副产物(DBPs),对人体健康的潜在影响极大。臭氧由于制取设备复杂、运行费用高,消毒后也可能存在 DBPs,因而一直没有得到推广。UV 消毒不需投加任何药剂,不产生 DBPs,也不增加污染物的遗传毒性^[1],且杀菌速度快、灭菌率高、易操作、管理和自动化程度高,是一种绿色的消毒方式,近年来成为水处理领域的研究热点。

1 UV 对隐孢子虫(*Cryptosporidium Parvum*)和贾第虫(*Giardia muris*)的灭活

水处理领域业内人士广泛关注的“两虫”,即隐孢子虫和贾第虫,在欧洲和美的地表水中普遍存在,对人体健康的危害极大,其中影响最大的是

1993 年在美国 Milwaukee 爆发的隐孢子虫病,造成了 40 万人感染^[2]。美国环保署(USEPA)通过立法,要求给水厂对隐孢子虫和贾第虫的灭活率分别达到 2-log 和 3-log^[3]。

最近的一些研究表明,UV 能够达到对隐孢子虫的较高的灭活水平。Zimmer 等的研究结果表明,即使在很低的 UV 剂量下(1 mJ/cm² 和 3 mJ/cm²),低压汞灯和中压汞灯产生的紫外线对隐孢子虫的灭活效果也非常明显^[4]。UV 剂量为 1 mJ/cm² 时,低压汞灯和中压汞灯对隐孢子虫的灭活率分别为 1.5-log 和 >3-log,UV 剂量为 3 mJ/cm² 时,低压汞灯和中压汞灯对隐孢子虫的灭活率没有区别,均为 >3-log。Craig 等通过实验得出,无论是低压汞灯还是中压汞灯,其对隐孢子虫的灭活情况也没有明显的差别,但要达到 2-log 和 3-log 的灭活率,所需的 UV 剂量分别为 10 mJ/cm² 和 25 mJ/cm²,约是前者的 10 倍^[5]。此外,Song S. Qian 等对实验数据的统计分析表明^[6],8~14 mJ/cm² 的 UV 剂量即可达到 3-log 的灭活率,置信度为 95%。而相关的文献报导^[7],加氯消毒对隐孢子虫的灭活并不十分有效,在 4~30℃ 范围内,pH 为 6.0 时,要达到 2-log 的灭活率,氯的 CT 值(平均剩余浓度与接触时间之积)至少约 1500 mg·min/L。

另外,UV 剂量低于 25 mJ/cm² 时,隐孢子虫的对数灭活率随着 UV 剂量的增加而迅速增大;然而当 UV 剂量超过 25 mJ/cm² 时,出现了“拖尾效

收稿日期:2005-06-13

作者简介:张光辉(1976-)男,博士研究生,主要从事水处理与污水资源化研究,联系电话:022-27405059,E-mail:z_gh@163.com。

应”,即对数灭活率的增长趋于平缓。

Rochelle 等人总结前人的研究成果,发现在一定的 UV 剂量范围内($<10 \text{ mJ/cm}^2$) ,隐孢子虫的对数灭活率与 UV 剂量成正比^[8]。

不同剂量 UV 对贾第虫的灭活情况。UV 剂量为 5 mJ/cm^2 时贾第虫孢囊的灭活率就超过了 2-log ,但 UV 剂量增加到 25 mJ/cm^2 时,其对数灭活率才接近 3-log 。另外,当 UV 低于 8 mJ/cm^2 时,贾第虫的对数存活率与 UV 剂量呈明显的线性相关;但是当 UV 剂量超过 8 mJ/cm^2 后,贾第虫的对数灭活率也出现了“拖尾效应”^[9],这一点与隐孢子虫卵囊的灭活率类似。Song S Qian 等人也对 UV 灭活贾第虫的实验结果进行了统计分析^[9] : $12\sim 20 \text{ mJ/cm}^2$ 的 UV 剂量可实现 3-log 的灭活率,置信水平为 95%。

造成拖尾效应的原因可能包括:水样中卵囊的密度很大,因遮挡或混合不均匀致使部分卵囊未受到辐射;因遗传或形态差异,亚卵囊群(sub-population of oocysts)对 UV 的抵抗力强;水中的颗粒物或孢囊小群体的存在抵消了 UV 辐射。Emerick 等经过研究 UV 对分散的和与颗粒物缔合的大肠菌的灭活规律,提出了与实际情况相吻合的灭活公式,能够很好地解释滞后(或肩形)和拖尾效应^[10]。

2 UV 对嗜肺军团菌 (*Legionella pneumophila*, LP) 和枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 的灭活

LP 是一种典型的水传染病病原菌,在自然水环境和人工水系统(例如给水系统、冷却水系统、医院、宾馆、疗养院、家庭的游泳池及温泉浴场)都发现过 LP。自 1976 在美国费城的退伍军人聚会上爆发军团病以来,水系统中的 LP 也成为人们的关注重点。有文献报导^[11] LP 对氯有很强的抵抗力,持续的 $2\sim 6 \text{ mg/L}$ 的高投氯量和周期性的 $20\sim 50 \text{ mg/L}$ 冲击加氯,才能抑制其在水系统中的繁殖,但如此高的氯浓度势必会造成配水管道的严重腐蚀和具有潜在危害的 DBPs 的大量生成。加热也可以去除 LP,但作用是暂时的,经过一段时间后 LP 会重新繁殖。

UV 对 LP 有较高的灭活能力。Zeming Liu 等研究了 UV 对医院的供水配水系统中 LP 的灭活情况^[12],试验结果见表 1。

比较表 1 中的工艺条件(3)和(4),去除军团菌的机理是 UV 辐射而不是过滤,但过滤可以减缓污垢在石英套管表面的积累。延长 UV 装置清洗周

表 1 UV 对医院供水配水系统中 LP 的灭活情况

Table 1 Inactivation of LP in the water distribution system of a hospital

工艺条件	基本结论
(1)无预处理的 UV 消毒	消毒点与控制点的 LP 没有明显的差别(t 检验 $P=0.91$) ,其它细菌也出现类似情况
(2)加热冲洗+加氯+UV	一个月后,UV 强度低于 80% ,消毒点出现军团菌,而且一个月 6 次清洗石英套管
(3)加热冲洗+加氯+过滤+UV	三个月后光强仍然维持在 100% ,无军团菌繁殖
(4)加热冲洗+加氯+过滤	一个月后军团菌呈阳性

说明:试验中 UV 剂量高于 30 mJ/cm^2

期(比较工艺条件(2)和(3)),也可以去除军团菌。此外,由于管道内壁附着的生物膜及污垢层内和管道的死水区都存在 LP 的繁殖,而 UV 没有持续消毒能力,故工艺条件(1)中虽然存在 UV 辐射,但消毒点仍然出现了存活的 LP,因此消毒前对给水管进行加热冲洗和加氯消毒非常必要。污垢层既影响紫外线的穿透力,其内部也有存活的 LP,故预过滤也很有必要。在现有的配水系统中安装 UV 辐射装置简单方便、费用低,不影响水质和给水管。工程中一般将 UV 辐射装置安装在取水点(水龙头、淋浴头)附近。为减少石英套管的清洗次数,可以考虑在 UV 装置前安装过滤器,以减少水中的杂质在石英套管表面的沉积。

Bacillus subtilis 也是自然水体中常见的一种病原微生物,其孢子对消毒剂的抵抗力较强。Hadas Mamane-Gravetz 等比较了 UV 对实验室纯种 *Bacillus subtilis* 孢子(ATCC 6633)和水中天然孢子的灭活效果^[13],发现后者对 UV 的抵抗力远高于前者,原因可能有两个:(1)纯种孢子具有均一的、相同的性质,而天然孢子则处在休眠、代谢等不同的生命阶段;(2)水中颗粒对天然孢子的屏蔽作用。此外,UV 对天然孢子的灭活遵循化学反应一级动力学,且灭活速率常数与原水中的初始孢子浓度无关。

3 UV 对病毒的灭活

病毒的危害比细菌更为严重,影响范围更广。水中常见的病毒有腺病毒(*Adenovirus*)、大肠杆菌噬菌体(*Coliphage*)和脊髓灰质炎病毒(*poliovirus*)等,USEPA 要求饮用水中病毒的灭活率要达到 4-log 。

目前,腺病毒被认为是对 UV 抵抗力最强的病毒^[14],因此研究 UV 对腺病毒的灭活效果,对 UV 在饮用水和污水消毒中的应用具有重要的指导意义。Qin Shao Meng^[15]等人研究了 UV 对腺病毒、大肠杆菌噬

菌体和脊髓灰质炎病毒的灭活情况。结果表明,腺病毒对 UV 的抵抗力明显高于其它病毒, EAd40 的耐 UV 能力分别是 EAd41、MS-2、PRD-1 和 Polio-1 的 1.2、1.8、4.1 和 5.6 倍。T 检验表明, EAd40 的耐 UV 能力明显高于 MS-2 ($P < 0.01$); 虽然 EAd41 的耐 UV 能力低于 EAd40, 但二者没有明显的差别 ($P < 0.05$)。对数据进行回归分析, 决定系数 R^2 在 0.980~0.993 之间, 说明 UV 对病毒的灭活完全符合化学反应一级动力学, 有力地证明了病毒粒子属于单分散的。

4 光活化 (photoreactivation) 和暗修复 (dark repair)

紫外线应用于水处理的一个广为关注的课题是微生物对 UV 损害的 DNA 的修复能力, 微生物修复的方式通常有两种: 暗修复 (也称为核苷酸切除修复) 和光活化。核苷酸切除修复是一个非常复杂的修复过程, 它涉及到大量酶联合去除 DNA 的损害部分。因为该反应不需要可见光, 故这个过程通常称为暗修复。暗修复在 UV 消毒后的配水系统中最受关注。

光活化是许多微生物用来逆转 UV 辐射损害的一个机理。DNA 光裂合酶能够利用波长在 300~500 nm (UVA 和可见光范围) 的辐射光线去直接逆转 DNA 的损害, 因而许多微生物具有光活化能力, 但修复的时间从几分钟到几小时不等。值得注意的是, 由于病毒缺乏大多数光活化过程中所必需的修复酶, 因而一般来说光活化只与细菌有关。当 UV 消毒单元位于水处理中某个允许光辐射的处理单元之前, 或者水经分配后暴露在阳光下 (例如用户在暴光的环境中存放紫外线消毒后的水), 光活化的影响不能排除。

另外, Koji Kashimada 等人以生活污水为实验对象, 研究指示细菌 (好氧菌、大肠菌群、粪大肠菌) 的暗修复和光活化能力。实验中没有观察到指示细菌的暗修复现象。在日光灯辐射下观察到指示细菌的光活化现象, 但 *E. Coli* B 和 *E. Coli* K12 A/λ(F^+) 则没有发生光活化。在太阳光照射下, 粪大肠菌群发生了明显的光活化现象。

研究微生物经 UV 消毒后的光活化和暗修复能力, 为工程设计提供参考, 在设计中对 UV 剂量进行修正, 从而保证水质的安全。

5 UV 的实际应用研究

UV 消毒具有许多优点和长处, 但也并非适用于所有场合。最近的研究表明^[16], UV 对模拟配水系

统中孳生的生物膜和微生物群落没有明显的灭活作用, 而且经 UV 辐射后, 配水系统中异养菌的密度随进水营养物 (污染物) 浓度的增大而增大, 随机加入的病原菌同样基本不受 UV 辐射的影响, 而且与异养菌的密度线性相关。出现上述现象可能与水中微小颗粒物的遮蔽有关。

UV 作为一种特殊的消毒方式, 启发人类重新审视固有的消毒观念和思维, 推动了消毒方式的变革。拉美的发展中国家海地, 因得天独厚的地理优势, 研究利用当地丰富的太阳光能对饮用水进行消毒, 将 UV 消毒扩展到太阳能领域^[17]。研究结果表明, 将饮用水置于太阳光下辐射 2d, 即可达到 100% 的微生物灭活率^[18]。

$$\frac{1}{x_1} = -\frac{1}{k} \ln[1 - (1 - y)^{\frac{1}{x_2}}] e^{-\frac{\mu}{\rho} \frac{m}{A}}$$

式中 x_1 为太阳光辐射强度 kJ/m^2 ; x_2 为每个水样中的细菌数; y 为被污染水样百分率; k 为太阳光灭活系数 (kJ/m^2)⁻¹; μ 为 (深度方向) 衰减系数 m^{-1} ; ρ 为水的密度 kg/m^3 ; m 为受到辐射部分的水的质量 kg ; A 为辐射面积 m^2 。

分析太阳光的辐射强度 x_1 和饮用水中细菌污染程度 x_2 , 可以根据上述公式预测太阳光的消毒效果。广大发展中国家因资金匮乏、技术设施落后, 无法保证居民饮用水的安全卫生条件, 而太阳光消毒简单方便、投资省、费用低、无化学污染, 非常适合赤道附近地区偏远乡村的饮用水消毒; 另外我国许多地区的太阳能资源也很丰富, 因此上式对工程实际具有一定的指导意义。

6 结 论

UV 消毒是一种绿色的消毒工艺, 效率高、速度快、不需投加化学药剂、不产生消毒副产物, 应用前景广阔。

采用合适的剂量, UV 对水中常见的微生物 (如隐孢子虫、贾第虫、军团菌、枯草芽孢杆菌、腺病毒等) 有显著的灭活效果, 但对配水系统中孳生的生物膜没有明显灭活作用, 尤其是外来病原菌侵入时 UV 消毒的作用并不显著。天然水体中的微生物对 UV 的抵抗力明显高于实验室培养的纯种微生物。

另外, UV 消毒的研究已经扩展到太阳能利用领域, 国外学者对利用当地丰富的太阳光消毒饮用水进行了研究, 并提出了相关的预测模型, 具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Thomas Haider ,Regina Sommer *et al.* Genotoxic response of Austrian groundwater samples treated under standardized UV (254 nm)- disinfection conditions in a combination of three different bioassays [J]. *Water Research* ,2002 ,36(1) :25-32.
- [2] A T Campbell ,L J Robertson ,M R snowball *et al.* Inactivation of oocysts of *Cryptosporidium parvum* by ultraviolet irradiation [J]. *Water Research* ,1995 ,29(11) :2583-2586.
- [3] USEPA. Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule (LT1ESWTR) Implementation Turbidity Provisions-- Technical Guidance Manual [M]. EPA 816-R-04-007 August ,2004 :25-26.
- [4] J L Zimmer ,R M Slawson ,P M Huck. Inactivation and potential repair of *Cryptosporidium parvum* following low- and medium-pressure ultraviolet irradiation [J].*Water Research* ,2003 ,37(14) :3517-3523.
- [5] Stephen A Craik ,Daniela Weldon ,Gordon R Finch *et al.* Inactivation of *cryptosporidium parvum* oocysts using medium- and low-pressure ultraviolet radiation [J]. *Water Research* ,2001 ,35(6) :1387-1398.
- [6] Song S Qian ,Maureen Donnelly ,Daniel C Schmelling *et al.* Ultraviolet light in inactivation of protozoa in drinking water: a Bayesian meta-analysis [J]. *Water Research* ,2004 ,38(2) :317-326.
- [7] Benito Corona-Vasquez ,Jason L Rennecker ,Amy M Driedger *et al.* Sequential inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with chlorine dioxide followed by free chlorine or monochloramine [J]. *Water Research* ,2002 ,36(1) :178-188.
- [8] Paul A Rochelle ,Steve J Upton ,Beth A Montelone *et al.* The response of *cryptosporidium parvum* to UV light [J]. *Trends in Parasitology* ,2005 ,21(2) :81-87.
- [9] Stephen A Craik ,Gordon R Finch ,James R Bolton *et al.* Inactivation of *Giardia muris* cysts using medium-pressure ultraviolet radiation in filtered drinking water [J]. *Water Research* ,2000 ,34(18) :4325-4332.
- [10] 梅特卡夫,埃迪公司. 废水工程(第四版) [M]. 史京华,刘希曾,史忠义,等,译. 北京:化学工业出版社,2004 :945-946.
- [11] Kumiko Oguma ,Hiroyuki Katayama ,Shinichiro Ohgaki. Photoreactivation of *Legionella pneumophila* after inactivation by low- or medium-pressure ultraviolet lamp [J]. *Water Research* ,2004 ,38(11) :2757-2763.
- [12] Zeming Liu ,Janet E Stout ,Lawrence Tedesco *et al.* Efficacy of ultraviolet light in preventing *legionella* colonization of a hospital water distribution system [J]. *Water Research* ,1995 ,29(10) :2275-2280.
- [13] Hadas Mamane-Gravetz ,Karl G Linden. UV disinfection of indigenous aerobic spores: implications for UV reactor validation in unfiltered water [J]. *Water Research* ,2004 ,38(12) :2898-2906.
- [14] Bill Mccann. UV for the US [J]. *Water* ,2004 ,(4) :19-20.
- [15] Qin Shao Meng ,Charles P Gerba. Comparative inactivation of enteric adenovirus, poliovirus and coliphages by ultraviolet irradiation [J]. *Water Research* ,1996 ,30(11) :2665-2668.
- [16] Nicki Pozos ,Kate Scow ,Stefan Wuertz *et al.* UV disinfection in a model distribution system: biofilm growth and microbial community [J]. *Water Research* ,2004 ,38(13) :3083-3091.
- [17] Peter M Oates ,Peter Shanahan ,Martin F Polz. Solar disinfection (SODIS): simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in Haiti [J]. *Water Research* ,2003 ,37(1) :47-54.
- [18] Fadhi M, Salih. Formulation of a mathematical model to predict solar water disinfection [J]. *Water Research* ,2003 ,37(16) :

INACTIVATION OF PATHOGENIC MICROORGANISMS BY ULTRAVIOLET

Zhang Guang-hui¹, Sun Ying-Xue¹, Gu Ping¹, Ding Shu-ying²

(1.School of Environmental Science and Engineering,Tianjin University,Tianjin 300072,China;

2.Tianjin Xingyuan Environmental Technological Engineering Co.,Ltd, Tianjin 300384, China)

Abstract: Ultraviolet (UV) disinfection for water and wastewater treatment is introduced in this paper. When proper UV dose was added, the ordinary pathogenic microorganism such as *Cryptosporidium Parvum*, *Giardia muris*, *Legionella pneumophila*, *Bacillus subtilis* and *adenovirus*, could be inactivated effectively, however, UV has little influence on biofilm in the water distribution system. The indigenous microorganism in natural water was much more resistant to UV than the purified microorganism. Additionally, source of UV has been extended to the field of solar energy, and some researchers put forward the prediction model, based on the inactivation of microorganism in drinking water by sunlight.

Key words: water and wastewater treatment; ultraviolet (UV); inactivation; photoreactivation; sunlight

简 讯

山东省济宁市污水处理工程

山东省济宁市污水处理厂建设污水深度处理及中水回用工程,该工程污水深度处理改造 20 万 m³/d、中水回用 8 万吨 / 日以及相关的配套管网。目前该项目已由有关部门批准,预计 2007 年动工。

(冯 雷)