

城市污水再生利用中的消毒问题研究

蒋以元^{1,2} 柯真山³ 张 昱¹ 廖日红⁴ 杨 敏^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085;
2. 广西城市建设学校, 桂林 541003; 3. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100061;
4. 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘 要 从保障再生水微生物安全的角度, 考察了北方某污水处理厂污水处理工艺、混凝沉淀过滤工艺以及臭氧消毒对大肠杆菌和总细菌的去除效果。结果表明, 污水处理厂进水中大肠杆菌数和细菌总数分别为 $10^5 \sim 10^9$ 个/L 和 $10^9 \sim 10^{11}$ 个/L, 经过厌氧-缺氧-好氧组合工艺处理后两者分别降为 $10^3 \sim 10^6$ 个/L 和 $10^6 \sim 10^9$ 个/L, 再经后续混凝沉淀过滤工艺(混凝剂 PAC 投加量: 15 mg/L Al_2O_3)处理, 再生水中大肠杆菌和细菌总数仍分别高达 $10^2 \sim 10^5$ 个/L 和 $10^5 \sim 10^8$ 个/L。对上述再生水进行臭氧消毒批量实验, 在臭氧反应量为 12 mg/L 的条件下实现了对大肠杆菌的完全灭活, 此时臭氧消毒运行费用为 0.13 元/ m^3 左右。

关键词 城市污水 再生水 消毒 大肠杆菌 臭氧

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2008)01-0016-03

Study on disinfection problems in municipal wastewater reclamation treatment process

Jiang Yiyuan^{1,2} Ke Zhenshan³ Zhang Yu¹ Liao Rihong⁴ Yang Min¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085;
2. Guangxi Urban Construction School, Guilin 541003; 3. Beijing Drainage Co Ltd., Beijing 100061;
4. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044)

Abstract From the hygienic viewpoint of reclaimed wastewater, the bacterial removal performance of the successive biological wastewater treatment process, coagulation-sedimentation-filtration process and ozonation in a northern municipal wastewater treatment plant (WWTP) was investigated. *E. coli* and total bacteria in the influent of the WWTP were $10^5 \sim 10^9$ count/L and $10^9 \sim 10^{11}$ count/L, which were reduced to $10^3 \sim 10^6$ count/L and $10^6 \sim 10^9$ count/L respectively following an anaerobic-anoxic-aerobic biological treatment, and $10^2 \sim 10^5$ count/L and $10^5 \sim 10^8$ count/L following the successive coagulation-sedimentation-filtration treatment. Disinfection measures should be taken to satisfy the hygienic requirements for reclaimed wastewater. Ozone was used for the disinfection of the effluent of the reclaimed wastewater, and almost complete inactivation of *E. coli* could be achieved at an ozone dose of 12 mg/L. The running cost for the complete inactivation of *E. coli* is about 0.13 yuan/ m^3 .

Key words municipal wastewater; reclaimed wastewater; disinfection; *E. coli*; ozone

污水的再生利用已经成为解决水资源短缺这一世界性难题的主要途径之一。再生水作为一种新的水资源, 可以用于环境补充水、绿化、街面喷洒、冲刷和洗车等。然而, 由于城市污水中携带有大量人体和动物体排出的致病性微生物, 如何保障再生水的卫生安全显得非常重要。为此, 许多国家都根据用途不同制定了相应的卫生学指标^[1]。在 2003 年爆发非典型肺炎以后, 污水处理厂出水, 特别是再生水中的微生物安全问题在我国越来越受到关注。

氯化消毒灭活微生物的效果好、成本低, 在国内

外污水消毒中得到广泛应用。但氯化消毒会产生以三卤甲烷类 (THMs) 为代表的各类有害的卤代消毒副产物 (DBPs), 并且氯的残留对下游水生生态系统的影响也不可忽视^[2]。因此寻找一种具有广谱杀

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (20521140076 和 50238050)

收稿日期: 2007-05-15; 修订日期: 2007-12-07

作者简介: 蒋以元 (1973~), 男, 博士后, 主要从事水处理技术研究工作。E-mail: freehorse315@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yangnin@cees.ac.cn

菌能力、副产物 (尤其是有毒副产物) 产生少、生态风险较小的替代消毒剂是城市污水处理和再生利用中的一个重要课题,臭氧、二氧化氯和紫外线等是人们关注的主要氯化消毒替代手段^[3]。

臭氧是一种强氧化剂 ($E = 2.07 \text{ V}$),同时又是一种广谱高效灭菌剂,广泛应用于水处理领域,其消毒灭菌效果优于氯、二氧化氯和氯胺,并且其灭菌速度较氯快 600 ~ 3 000 倍^[4],能杀灭病毒和包囊 (如隐孢子虫),产生的有害消毒副产物少,同时还能有效去除水中的有机污染物、色度和臭味^[5,6],是一种环境友好、颇有发展前景的消毒剂。但是,在城市污水消毒方面,相关报道不多。

本文作者考察了北方某污水处理厂污水处理工艺、采用混凝沉淀过滤的中水处理工艺以及臭氧消毒对大肠杆菌和总细菌的去除效果,为再生水消毒技术的选择提供科学依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置

臭氧消毒实验用水取自北方某污水处理厂经厌氧缺氧好氧组合工艺 (A^2/O) 和后续混凝、沉淀、砂滤处理的中水系统,实验原水水质为: $\text{COD}_{\text{Mn}} 5.1 \sim 6.8 \text{ mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N } 0.2 \sim 12.4 \text{ mg/L}$, $\text{SS} < 5 \text{ mg/L}$, $\text{UV}_{254} 0.1 \sim 0.13 \text{ mg/L}$, 浊度 $< 2 \text{ NTU}$, 色度 $5.5 \sim 18.6$ (倍), $\text{pH } 7.0 \sim 8.0$ 。中水处理混凝剂为聚合氯化铝 (投药量约为 15 mg/L , 以 Al_2O_3 计)。现场中试实验装置参见文献 [7]。臭氧反应柱 (有效高度 2.2 m , 直径 10 cm , 体积 17.3 L) 进水后,连续投加臭氧 (三菱电机 OS-1N 臭氧发生器, HK-A9030 制氧机),臭氧经钛板布气进入臭氧反应器底部,然后进入臭氧尾气破坏器。臭氧投加量通过调节臭氧发生器的电压来控制,臭氧接触反应时间为 10 min 。

1.2 分析方法

臭氧浓度测定采用碘量法,臭氧消耗量为进气量与尾气及水中臭氧残余之差。细菌总数和大肠杆菌测定分别采用平板计数法和多管发酵法^[8],其他指标测试见文献 [7]。

2 结果与讨论

2.1 污水生物处理工艺对大肠杆菌和细菌总数的去除

图 1 和图 2 分别是该城市污水处理厂 A^2/O 处理及中水处理工艺对大肠杆菌和细菌总数的去除效果。由图可知,污水处理厂总进水中大肠杆菌数和细菌总数分别为 $10^5 \sim 10^9$ 个/L 和 $10^9 \sim 10^{11}$ 个/L,大肠杆菌数总体上呈现冬春秋季高,夏季低的特点,

而细菌总数则处于比较平稳的状态。经过生物处理后,二沉池出水中大肠杆菌数和细菌总数分别降为 $10^3 \sim 10^6$ 个/L 和 $10^6 \sim 10^9$ 个/L,其去除率均大于 99%,表明生物处理对于大肠杆菌和细菌总数均有良好的去除效果。中水处理中采用的混凝沉淀砂滤工艺对二沉池出水中微生物的去除效果有限,再生水中大肠杆菌和细菌总数仍分别达到 $10^2 \sim 10^5$ 个/L 和 $10^5 \sim 10^8$ 个/L 的水平,难以满足国家相关排放和回用标准^[9,10]。

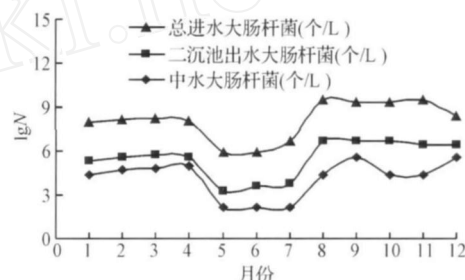


图 1 处理工艺对大肠杆菌去除效果

Fig 1 Removal of *E. coli* by biological and coagulation-sedimentation-filtration treatment

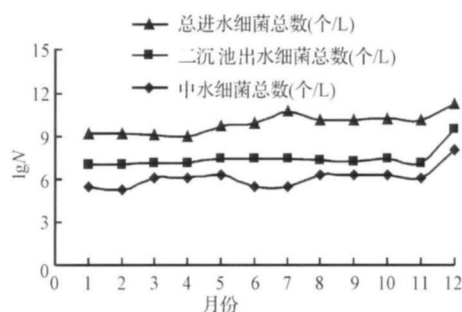


图 2 处理工艺对细菌总数去除效果

Fig 2 Removal of total bacteria by biological and coagulation-sedimentation-filtration treatment

2.2 臭氧消毒条件实验

臭氧既是一种消毒剂,同时也是一种强氧化剂。再生水 DOC 为 $4.8 \sim 7.2 \text{ mg/L}$,表明再生水中存在一定量的有机物,这些有机物会与臭氧发生反应,导致臭氧消耗量的增加^[11]。

在不同臭氧反应量下对 2 种大肠杆菌水平 (3.5×10^5 个/L 和 9.2×10^3 个/L) 下的再生水进行了消毒实验,结果如图 3 所示。无论是哪一种大肠杆菌的含量水平,其灭活效率均随臭氧消耗量增加而增加。当臭氧消耗量为 3 mg/L 时,大肠杆菌的灭活率在 $65.7\% \sim 73.9\%$ 之间,去除效果不理想,可能是共存有机物消耗臭氧的结果。当臭氧消耗量超过 3 mg/L 时,大肠杆菌去除效率明显增加,在臭氧消

耗量为 5 mg/L 时,大肠杆菌去除效率上升到 99% 左右,出水中大肠杆菌的含量分别为 3 500 个/L 和 80 个/L;继续增大到 7 mg/L 时,高浓度和低浓度大肠杆菌去除效率分别达 99.99% 和 99.78%,出水大肠杆菌为 50 个/L 和 20 个/L;臭氧消耗量增加到 12 mg/L 时,大肠杆菌被彻底灭活。与此同时,臭氧氧化能改善出水水质,其对 DOC 、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 和色度的去除率随臭氧消耗量的增加而有所提高(图 4)。但是,从图 4 中可以看出,当臭氧消耗量达到 5 mg/L 后,臭氧投加量的增加对各种指标的去除效果的影响已经很小,这与前面的臭氧消毒结果也比较吻合。也就是说,在臭氧消耗量高于 5 mg/L 时,再生水中能够快速与臭氧反应的物质基本耗竭,臭氧对微生物的消毒作用得到强化。今后需要通过长期运行对臭氧的消毒效果进行进一步的确认。

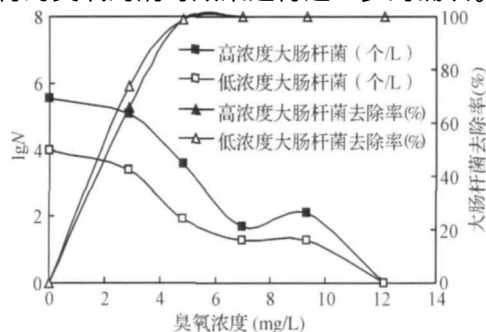


图 3 臭氧对不同浓度大肠杆菌的灭活效果

Fig 3 Effect of ozone dose on *E. coli* removal

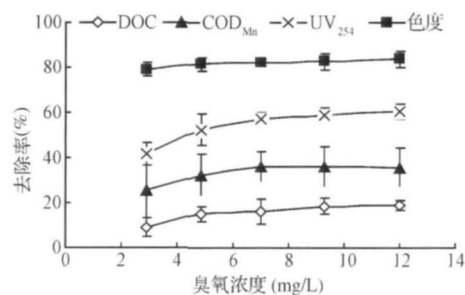


图 4 臭氧氧化对出水水质的改善

Fig 4 Effect of ozonation on other parameters

3 经济分析

一般来说,生产 O_3 的电耗为 16 kWh/kg,按电费以 0.60 元/(kWh) 计算,生产 1 kg O_3 的费用约为 9.6 元,完全灭活大肠杆菌时的臭氧消耗量为 12.0 g/ m^3 ,臭氧吸收效率按 90% 计,则 O_3 消毒费用为 0.13 元/ m^3 。

4 结论

(1) 城市污水处理厂总进水、常规二级处理出水和经混凝沉淀过滤处理后回用水中细菌总数分别在 $10^9 \sim 10^{11}$ 个/L、 $10^6 \sim 10^9$ 个/L 和 $10^5 \sim 10^8$ 个/L 范围内,大肠杆菌数在 $10^5 \sim 10^9$ 、 $10^3 \sim 10^6$ 和 $10^2 \sim 10^5$ 之间,传统城市污水再生处理工艺不能保证微生物安全性;

(2) 臭氧杀菌效果随臭氧消耗量的增加而提高。大肠杆菌彻底灭活的臭氧消耗量为 12 mg/L;

(3) 大肠杆菌被彻底灭活时,臭氧消毒费用为 0.13 元/ m^3 ,并且能显著改善水质,具有良好的性能价格比。

参考文献

- [1] USEPA. Guidelines for water reuse, EPA625/R-92/004, September 1992
- [2] Gunten E. E., Chiang P. C., et al. By-products formation during water disinfection: A tool to assess disinfection efficiency. *Water Research*, 2001; 35 (8): 2095 ~ 2099
- [3] Lazarova V., Savoye P., Janex M. L. Advanced wastewater disinfection technologies: State of the art and perspectives. *Wat Sci Tech*, 1999, 40 (4 ~ 5): 203 ~ 213
- [4] 侯为国. 臭氧技术应用研究. *医药工程设计杂志*, 2000, 21 (6): 255 ~ 257
- [5] Facile N., Barbeau B. Evaluation bacterial aerobic spores as a surrogate for *Giardia* and *Cryptosporidium* inactivation by ozone. *Water Res*, 2000, 34 (12): 3238 ~ 3246
- [6] Ferguson D. W., et al. Comparing peroxide and ozone for controlling taste and odor compounds, disinfection by-products, and microorganisms. *J. AWWA*, 1990, 82 (4): 181 ~ 191
- [7] 蒋以元, 杨敏, 等. 以污水回用为目的的 O_3 -BAC 法城市污水深度处理研究. *中国给水排水*, 2004, 20 (7): 92 ~ 95
- [8] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 (第 4 版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [9] 中华人民共和国国家标准 GB18918-2002 城镇污水处理厂污染物排放标准, 2003
- [10] 中华人民共和国国家标准 GB18921-2002 城市污水再生利用景观环境用水水质, 2003
- [11] Pei Xu, Marie-Laure Janex, et al. Wastewater disinfection by ozone: Main parameters for process design. *Water Research*, 2002, 36 (5): 1043 ~ 1055
- [12] 张自杰. 环境工程手册 (水污染防治卷). 北京: 高等教育出版社, 1996