

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.07.004

## 污水过氧乙酸/紫外消毒中试研究

徐 垚, 陈家斌, 刘统才, 纪睿成, 张亚雷, 周雪飞  
(同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室,  
上海 200092)

**摘 要:** 首次采用过氧乙酸/紫外(PAA/UV)组合工艺对我国城镇污水处理厂出水进行消毒中试研究,考察了不同PAA和UV投加剂量组合的消毒效率,及其对出水水质、消毒副产物生成的影响。结果表明,与单独PAA及UV消毒相比,PAA/UV组合工艺对总大肠菌群的消毒效率更高。当PAA投加量为4 mg/L、接触时间为5 min,UV剂量为20 J/cm<sup>2</sup>、接触时间为30 s时,PAA/UV工艺对总大肠菌群的对数灭活率可达到4.58-lg,而单一PAA和UV消毒时分别仅为1.53-lg和2.15-lg;在上述工况下,PAA/UV联合消毒对出水NH<sub>3</sub>-N、COD和TOC浓度的影响较小,且大肠埃希氏菌未检出,满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)要求。此外,与传统NaClO消毒工艺相比,PAA/UV工艺不会产生三卤甲烷(THMs)及卤乙酸(HAAs)等消毒副产物。

**关键词:** 过氧乙酸; 紫外线; 污水消毒; 总大肠菌群; 大肠埃希氏菌; 消毒副产物

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)07-0023-06

### Pilot Study on Peracetic Acid/Ultraviolet Disinfection of Sewage

XU Yao, CHEN Jia-bin, LIU Tong-cai, JI Rui-cheng, ZHANG Ya-lei,  
ZHOU Xue-fei

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science  
and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper used a pilot-scale peracetic acid and ultraviolet (PAA/UV) combined process to disinfect effluent from municipal wastewater treatment plants for the first time, and investigated the disinfection efficiency of different dosage combinations of PAA and UV and their effects on effluent quality and the generation of disinfection by-products. Compared with single PAA and UV disinfection, PAA/UV process was more efficient for total coliform disinfection. When PAA dosage was 4 mg/L and its contact time was 5 min, UV dose was 20 J/cm<sup>2</sup> and its contact time was 30 s, the logarithmic removal rate of total coliform reached 4.58-lg, while that was only 1.53-lg and 2.15-lg respectively by the single PAA and UV disinfection. Under the above conditions, PAA/UV disinfection had little influence on NH<sub>3</sub>-N, COD and TOC in the effluent, and *Escherichia coli* was not detected, which met the requirements specified in *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Use* (GB/T 18920-2020). In addition, compared with the traditional NaClO disinfection process, PAA/UV process did not produce disinfection by-products such as trihalomethanes and haloacetic acid.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52122006); 上海市青年科技启明星计划项目(20QC1401200)

通信作者: 陈家斌 E-mail: chenjiabincn@163.com

**Key words:** peracetic acid; ultraviolet; sewage disinfection; total coliform; *Escherichia coli*; disinfection by-products

消毒是保障再生水安全的必要环节,然而目前我国城镇污水厂常规工艺及消毒方式的出水水质无法满足城市污水再生利用的要求。与此同时,全球新冠疫情的蔓延也对污水消毒提出了更高的要求,因此亟需开发高效安全的消毒工艺。

近年来,在美国以及欧盟国家,过氧乙酸(PAA)被认为是替代氯消毒的新型消毒剂<sup>[1]</sup>,因为它具有以下优势:不会产生致癌和致突变的消毒副产物(DBPs);可快速穿透细菌并灭活;对现有污水消毒单元设施的改造成本较低,可灵活安装于现有设施中。然而,PAA消毒会增加水中的有机物含量,从而增大微生物可再生的风险。紫外线(UV)作为国内一种常见的污水消毒工艺,其对水体中的病原体具有较好的灭活效果<sup>[2]</sup>。UV的灭活通常是基于对细胞或病毒的核酸造成不可修复的破坏<sup>[3-4]</sup>,但有研究表明,腺病毒和细菌孢子等对UV有较强的抗性,对此类微生物的灭活往往需要加大剂量<sup>[5-6]</sup>。为了克服上述缺点,可以将UV与PAA两者结合,利用UV破坏微生物遗传物质,同时最大程度激发PAA产生强氧化性的自由基,最终以较低剂量的PAA和UV达到较高的微生物灭活率。Sun等<sup>[7]</sup>研究表明,与单独UV或者PAA消毒工艺相比,PAA/UV联合消毒工艺对大肠杆菌具有更好的灭活效果。

目前,我国污水厂还没有采用PAA/UV联合消毒的工程实践。PAA/UV联合消毒工艺是否能够满足我国城市污水再生利用水质的要求尚不清楚。鉴于此,笔者首次对国内城镇污水厂二级出水进行PAA/UV联合消毒中试研究,监测该工艺对总大肠杆菌、粪大肠杆菌和大肠埃希氏菌的消毒效率以及对出水水质的影响,以期为该消毒技术在我国污水再生利用领域的推广提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验试剂

PAA(密度为1.053 kg/L,有效质量分数为15%);氨氮标准溶液(500 mg/L);COD消解试剂;纳氏试剂;酒石酸钾钠、氢氧化钠(分析纯)。

### 1.2 试验水样

中试在苏州市某城镇污水处理厂进行,试验周

期为40 d,中试装置见图1。目前该污水厂处理规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,主体生物工艺为AAO,二级出水采用NaClO消毒。本研究的消毒对象为滤布滤池二级出水,中试规模为 $50 \text{ m}^3/\text{d}$ 。滤布滤池出水水质如下:pH为6.32~7.28,色度为9.0~15.0倍,SS为3.00~8.00 mg/L,COD为3~21 mg/L,氨氮为0.13~1.02 mg/L,总氮为4.12~12.65 mg/L,总磷为0.15~0.36 mg/L,粪大肠菌群为 $(1.2 \sim 4.5) \times 10^5 \text{ MPN/L}$ 。

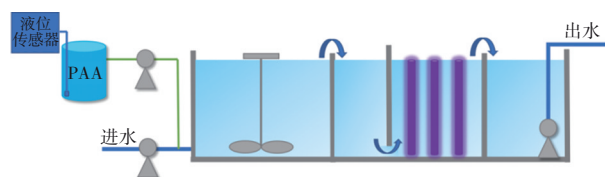


图1 中试装置示意

Fig.1 Schematic diagram of pilot plant

### 1.3 中试消毒试验方法

① 考察单独PAA消毒时不同投加量对消毒效率的影响,通过调节药剂投加计量泵控制PAA投加量依次为2、4、6、8和10 mg/L,消毒接触时间控制为5 min。

② 考察单独UV消毒时不同剂量对消毒效率的影响,通过调整UV灯管数量控制UV剂量分别为5、10、15和20 J/cm<sup>2</sup>,接触时间为30 s。

③ 基于前两组试验,对不同浓度PAA和不同剂量的UV参数进行组合,其中PAA消毒接触时间控制为5 min,UV接触时间为30 s,考察不同组合条件下对总大肠菌群的灭活效率。

④ 基于前一组试验的运行条件,分别控制PAA投加量为4 mg/L、接触时间为5 min,UV剂量为20 J/cm<sup>2</sup>、接触时间为30 s,连续运行1个月,持续监测中试装置进出水水质。监测内容包括消毒前后氨氮、COD、TOC、总大肠菌群、大肠埃希氏菌、粪大肠菌群以及消毒副产物的变化。

### 1.4 分析项目及方法

COD采用哈希COD快速测定仪测定;TOC采用哈希TOC分析仪测定;氨氮采用紫外可见分光光度计测定。主要消毒副产物卤乙酸(HAAs)和三卤甲烷(THMs)均采用气相色谱法测定<sup>[8]</sup>。总大肠菌群、大肠埃希氏菌及粪大肠菌群的测定方法参考《水质

总大肠菌群、粪大肠菌群和大肠埃希氏菌的测定 酶底物法》(HJ 1001—2018)。

消毒效率采用总大肠菌群的对数灭活率进行评价,计算方法如下:对数灭活率= $\lg(N_0/N)$ ,其中, $N_0$ 和 $N$ 分别为消毒前后总大肠菌群的数量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单独 PAA 的消毒效率

测定不同 PAA 投加量下的总大肠菌群灭活率,结果显示,当 PAA 浓度由 2 mg/L 依次增至 4、6、8、10 mg/L 时,总大肠菌群的对数灭活率由 1.45-lg 依次增至 1.53-lg、2.13-lg、2.27-lg 和 2.30-lg。这说明,PAA 对总大肠菌群具有一定的消毒能力,且随着 PAA 投加量的增加而增大。PAA 消毒过程中分解产物主要是过氧化氢、氧气、水和乙酸。PAA 的灭菌机理主要是氧化病毒外壳上含有还原性基团及双键的蛋白质等,使病毒细胞变性凝固,破坏生物膜的选择透过功能,使 PAA 更容易进入病毒内部,然后再与核酸物质反应,从而致死病原微生物<sup>[9-10]</sup>。一般来讲,以化学氧化剂作为消毒剂的化学消毒方法并不是灭菌,即该方法并不能够杀灭水中所有微生物,例如某些病毒和原生动物(隐孢子虫等)<sup>[11]</sup>。当接触时间为 5 min 时,总体来讲,单独 PAA 消毒对总大肠菌群的灭活效果并不太理想,对数去除率均小于 3-lg(即小于 99.9%),这与一些研究所报道的 PAA 对城镇污水消毒效果较好的结论不太一致<sup>[12-14]</sup>。这主要是因为本研究的主要目的为探究 PAA/UV 联合工艺用于城市生活污水消毒的可能性,考虑到工程实际应用中构筑物的大小所带来的造价问题,因此设置 PAA 消毒的接触时间仅为 5 min,远低于其他研究中的 30~60 min 接触时间<sup>[12-14]</sup>。

### 2.2 单独 UV 的消毒效率

测定不同 UV 剂量下的总大肠菌群灭活率,结果显示,当 UV 剂量由 5 mJ/cm<sup>2</sup> 依次增至 10、15、20、25 mJ/cm<sup>2</sup> 时,大肠杆菌对数灭活率由 1.21-lg 依次增至 1.65-lg、1.91-lg、2.15-lg 和 2.36-lg。这说明,UV 对总大肠菌群也具有一定的消毒能力,且随着 UV 剂量的增加而增大。UV 消毒是一种物理消毒方法,在 UV 照射下,微生物 DNA 的某些结构键会被破坏或者发生一系列光学聚合反应,致使 DNA 失去复制能力,从而达到灭活效果<sup>[15]</sup>。UV 可以在较短时间内高效杀灭病毒和原生动物。但是,冯俊生等<sup>[16]</sup>

研究发现,单一的 UV 消毒不具有持久消毒能力,消毒出水中微生物存在光复活现象,即原先已经被灭活的微生物在可见光照射下,可以自我修复而重新获得活性,从而产生安全健康风险。此外,UV 灯管寿命有限且能耗较大,也是该工艺在实际工程应用中面临的一个难题<sup>[15]</sup>。

### 2.3 PAA/UV 的消毒效率

不同 PAA/UV 参数组合工况下的总大肠菌群灭活率如图 2 所示。可以看出,PAA/UV 工艺相较于单一 PAA 或 UV 工艺的消毒效果有明显提升。最明显的是,当 UV 剂量 $\geq 10$  mJ/cm<sup>2</sup>、PAA 投加量 $\geq 4$  mg/L 时,消毒效率会有一个“突跃式”上升。以 4-lg 灭活率为标准(99.99%),本研究中共有 10 种工况能达到该要求,分别是:UV 剂量=15 mJ/cm<sup>2</sup>,PAA=8、10 mg/L;UV 剂量=20 mJ/cm<sup>2</sup>,PAA=4、6、8、10 mg/L;UV 剂量=25 mJ/cm<sup>2</sup>,PAA=4、6、8 和 10 mg/L。

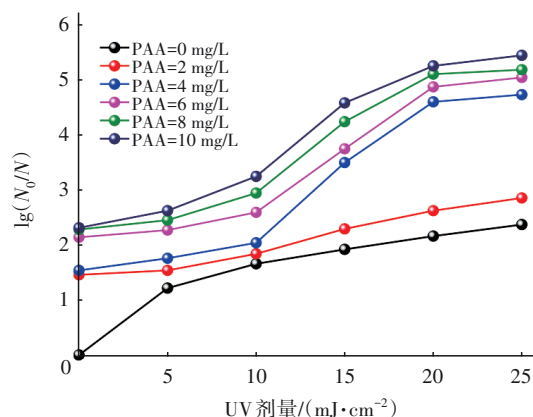


图 2 PAA/UV 消毒剂量对总大肠菌群灭活效率的影响

Fig.2 Effect of PAA/UV dose on inactivation efficiency of total coliform

PAA/UV 工艺的消毒机理如图 3 所示。

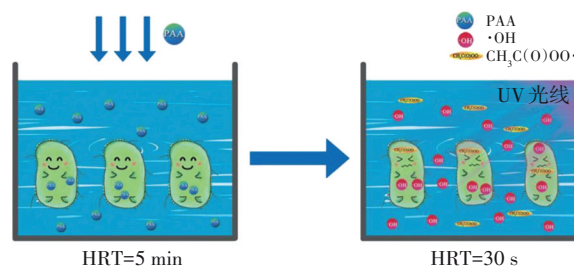


图 3 PAA/UV 消毒机理示意

Fig.3 Schematic diagram of PAA/UV disinfection mechanism

PAA 是很小的中性分子,它可以快速扩散到带负电荷的细菌表面并渗透到细菌内部,在 UV 光活



化作用下进一步生成具有强氧化能力的羟基自由基和有机自由基,使得细胞结构破损、细胞膜破裂,进而对其内容物与DNA进行氧化破坏,最终从细菌体内两个维度破坏酶的活性而达到灭活细菌的效果<sup>[17-18]</sup>。另外,在自由基作用下,细胞内容物暴露,更利于UV进行作用<sup>[19-20]</sup>。PAA与UV具有协同作用,可强化单一PAA和UV工艺的消毒效果。

### 2.4 PAA/UV消毒对常规水质指标的影响

控制PAA投加量为4 mg/L、接触时间为5 min,UV剂量为20 mJ/cm<sup>2</sup>、接触时间为30 s,在该工况下连续运行1个月,监测PAA/UV中试装置进、出水的常规指标变化,结果如图4所示。

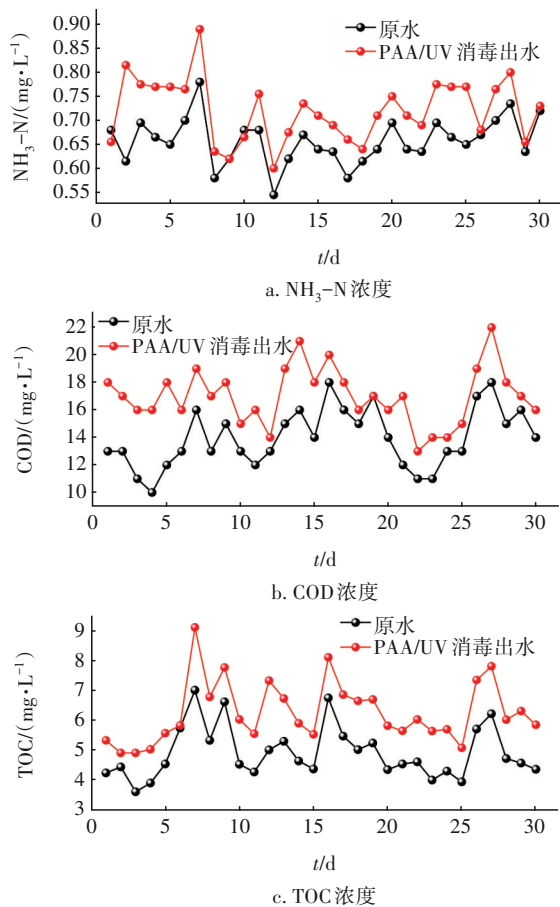


图4 PAA/UV消毒对NH<sub>3</sub>-N、COD和TOC的影响

Fig.4 Effect of PAA/UV disinfection on NH<sub>3</sub>-N, COD and TOC

有研究表明,当投加PAA时,PAA分解过程中持续产生氧气会导致BOD<sub>5</sub>测试结果不准确,因此多采用TOC来代替该指标<sup>[21]</sup>。从图4可以看出,PAA/UV消毒会在一定程度上增加COD和TOC浓度,而对氨氮浓度的影响相对较小。在整个监测周期内

PAA/UV消毒工艺会使出水COD和TOC平均浓度分别从13.97、4.92 mg/L增至17.00、6.27 mg/L。COD和TOC浓度的增加主要是因为投加PAA后,无论其本身还是产物乙酸均会增加水体中的有机物浓度。另外,在整个监测周期内PAA/UV消毒工艺会使出水NH<sub>3</sub>-N平均浓度从0.64 mg/L增至0.76 mg/L,NH<sub>3</sub>-N浓度的少许增加可能是由于,PAA/UV消毒过程中细胞结构破损、细胞膜破裂,少量的胞内有机氮转化为氨氮所致。目前大中城市污水厂普遍已完成提标改造,其出水COD及NH<sub>3</sub>-N指标实际上远远低于国家一级A排放标准限值即50 mg/L和5 mg/L(8 mg/L)。此外,本工艺中PAA投加量较低,其对出水有机物的增量有限,因此,PAA/UV工艺用于我国城市污水厂消毒是可行的。

### 2.5 PAA/UV消毒对出水微生物指标的影响

PAA/UV消毒工艺对总大肠菌群、粪大肠菌群和大肠埃希氏菌的影响如表1所示。

表1 PAA/UV消毒前后总大肠菌群、粪大肠菌群和大肠埃希氏菌的变化

Tab.1 Change of total coliform, fecal coliform and *Escherichia coli* before and after PAA/UV disinfection

时间/d	水样	总大肠菌群/(MPN·L <sup>-1</sup> )	粪大肠菌群/(MPN·L <sup>-1</sup> )	大肠埃希氏菌/(MPN·L <sup>-1</sup> )
0	原水	16 500	4 400	1 300
	PAA/UV出水	5	2	ND
3	原水	24 500	6 300	1 450
	PAA/UV出水	ND	ND	ND
6	原水	20 000	6 900	2 000
	PAA/UV出水	2	ND	ND
9	原水	18 900	4 630	1 320
	PAA/UV出水	ND	ND	ND
12	原水	22 200	4 260	980
	PAA/UV出水	10	3	ND
15	原水	14 200	2 800	1 230
	PAA/UV出水	ND	ND	ND
18	原水	16 300	2 020	680
	PAA/UV出水	ND	ND	ND
21	原水	13 400	2 630	470
	PAA/UV出水	ND	ND	ND
24	原水	14 400	3 500	750
	PAA/UV出水	5	2	ND
27	原水	16 900	2 930	430
	PAA/UV出水	ND	ND	ND
30	原水	11 400	1 450	590
	PAA/UV出水	ND	ND	ND

注: ND表示未检出。

从表 1 可以看出,PAA/UV 工艺对城镇污水的消毒效果较好。从 10 次抽检结果来看,其对总大肠菌群、粪大肠菌群和大肠埃希氏菌均有较好的灭活效果。同时,值得指出的是,该工艺为污水再生利用提供了一种全新的思路。以本中试出水为例,采用 PAA/UV 消毒可以满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)中大肠埃希氏菌不得检出的要求。综合来看,采用 PAA/UV 消毒将是城镇污水处理厂出水再生利用的一个具有广泛应用前景的技术思路。

## 2.6 PAA/UV 与次氯酸钠消毒生成的 DBPs 对比

HAA5 和 THMs 是传统氯消毒最主要的两类 DBPs。污水中的 DBPs 绝大部分是残留有机物在预氯化或消毒过程中与消毒剂反应生成的。PAA/UV 和次氯酸钠消毒前后 HAA5 和 THMs 浓度的变化如图 5 所示。可以看出,传统的次氯酸钠消毒工艺会明显增加出水中的 HAA5 和 THMs 浓度,HAA5 由 8.9  $\mu\text{g/L}$  增至 32.1  $\mu\text{g/L}$ ,THMs 由 11.3  $\mu\text{g/L}$  增至 43.6  $\mu\text{g/L}$ 。这与 Lu 等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。氯消毒副产物是氯的活性基团与污水中溶解性有机物进行取代和加成反应的产物,而 PAA/UV 消毒过程中主要分解产物为乙酸和水。通过对比可以发现,PAA/UV 消毒工艺对出水中 HAA5 和 THMs 浓度的影响较小,水质安全性更高。

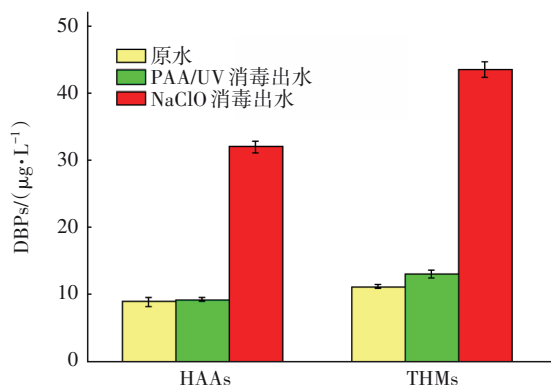


图 5 PAA/UV 和次氯酸钠消毒工艺的 DBPs 生成情况对比

Fig.5 Comparison of DBPs formation in PAA/UV and NaClO disinfection processes

## 3 结论

与单独 PAA 及 UV 消毒相比,PAA/UV 联合消毒工艺对总大肠菌群的灭活效率更高。当 PAA 投加量为 4 mg/L、接触时间为 5 min,UV 剂量为 20 J/cm<sup>2</sup>、接触时间为 30 s 时,PAA/UV 工艺对总大肠菌群的

对数去除率可达到 4.58 lg;在上述工况下,PAA/UV 消毒对出水氨氮、COD 和 TOC 的影响较小且大肠埃希氏菌未检出。此外,与传统次氯酸钠消毒工艺相比,PAA/UV 工艺产生的 THMs、HAA5 等消毒副产物极少。

## 参考文献:

- [1] CHANG W, SMALL D A, TOGHROL F, *et al.* Microarray analysis of toxicogenomic effects of peracetic acid on *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(15): 5893-5899.
- [2] 付树森,王艺,王肖霖,等. 氯和紫外消毒过程中胞外抗性基因的产生特征[J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4756-4762.  
FU Shusen, WANG Yi, WANG Xiaolin, *et al.* Generation of extracellular antibiotic resistance genes during municipal wastewater chlorination and UV disinfection [J]. China Environmental Science, 2021, 41(10): 4756-4762 (in Chinese).
- [3] 蔡美全. 微量药物污染物在氯和紫外/过氧乙酸消毒过程中的降解与转化规律研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016.  
CAI Meiquan. Degradation and Transformation Mechanisms of PhACs during Chlorination and UV/Peracetic Acid Disinfection [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016 (in Chinese).
- [4] FLORES M J, BRANDI R J, CASSANO A E, *et al.* Kinetic model of water disinfection using peracetic acid including synergistic effects [J]. Water Science & Technology, 2016, 73(2): 275-282.
- [5] KITIS M. Disinfection of wastewater with peracetic acid: a review [J]. Environment International, 2004, 30(1): 47-55.
- [6] 郭美婷,胡洪营,李莉. 污水紫外线消毒工艺的影响因素研究[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 534-538.  
GUO Meiting, HU Hongying, LI Li. Studies on effecting factors of UV disinfection of wastewater [J]. China Environmental Science, 2007, 27(4): 534-538 (in Chinese).
- [7] SUN P Z, ZHANG T Q, MEJIA-TICKNER B, *et al.* Rapid disinfection by peracetic acid combined with UV irradiation [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2018, 5(6): 400-404.
- [8] 顾平. 室内游泳池水中三卤甲烷类和卤乙酸类消毒

- 副产物检测及其状况研究[D]. 上海:复旦大学, 2013.
- GU Ping. Study of the Detection and Status of Disinfection By-products of Trihalomethanes and Haloacetic Acids in Indoor Swimming Pool Water [D]. Shanghai: Fudan University, 2013 (in Chinese).
- [9] 朱昱敏, 张亚雷, 周雪飞, 等. 过氧乙酸在污水消毒中对病毒灭活的研究进展[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 45-50.
- ZHU Yumin, ZHANG Yalei, ZHOU Xuefei, *et al.* Research progress of peracetic acid inactivation of virus in wastewater disinfection [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 45-50 (in Chinese).
- [10] DA SILVA W P, CARLOS T D, CAVALLINI G S, *et al.* Peracetic acid: structural elucidation for applications in wastewater treatment [J]. Water Research, 2020, 168: 115143.
- [11] RACHMADI A T, KITAJIMA M, KATO T, *et al.* Required chlorination doses to fulfill the credit value for disinfection of enteric viruses in water: a critical review [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(4): 2068-2077.
- [12] HENAO L D, COMPAGNI R D, TUROLLA A, *et al.* Influence of inorganic and organic compounds on the decay of peracetic acid in wastewater disinfection [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 337: 133-142.
- [13] MORA M, VEIJALAINEN A M, HEINONEN-TANSKI H. Performic acid controls better *Clostridium tyrobutyricum* related bacteria than peracetic acid [J]. Sustainability, 2018, 10(11): 4116.
- [14] ANTONELLI M, TUROLLA A, MEZZANOTTE V, *et al.* Peracetic acid for secondary effluent disinfection: a comprehensive performance assessment [J]. Water Science & Technology, 2013, 68(12): 2638-2644.
- [15] 刘淑琳, 唐玉霖. 城市污水处理厂紫外线消毒常见问题控制及发展趋势[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 24-28.
- LIU Shulin, TANG Yulin. Solutions of common problems and development trends of ultraviolet disinfection in wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 24-28 (in Chinese).
- [16] 冯俊生, 蔡晨, 姚海祥, 等. 紫外联合过硫酸盐杀灭水中大肠杆菌[J]. 环境工程学报, 2019, 13(8): 1847-1856.
- FENG Junsheng, CAI Chen, YAO Haixiang, *et al.* Inactivation effect of *Escherichia coli* by ultraviolet combined with persulfate [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(8): 1847-1856 (in Chinese).
- [17] SCHWAB K J, WENG S C, DUNKIN N, *et al.* Impact of UV irradiation and peracetic acid-UV combined treatment on MS2 bacteriophage virus and murine norovirus in secondary wastewater effluent [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2017(9): 3090-3094.
- [18] WENG S C, DUNKIN N, SCHWAB K J, *et al.* Infectivity reduction efficacy of UV irradiation and peracetic acid-UV combined treatment on MS2 bacteriophage and murine norovirus in secondary wastewater effluent [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 221: 1-9.
- [19] ZHANG T Q, WANG T, MEJIA-TICKNER B, *et al.* Inactivation of bacteria by peracetic acid combined with UV irradiation: mechanism and optimization [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(15): 9652-9661.
- [20] KIBBEE R, ÖRMECI B. Peracetic acid (PAA) and low-pressure ultraviolet (LP-UV) inactivation of *Coxsackievirus* B3 (CVB3) in municipal wastewater individually and concurrently [J]. Water Research, 2020, 183: 116048.
- [21] AO X W, ELORANTA J, HUANG C H, *et al.* Peracetic acid-based advanced oxidation processes for decontamination and disinfection of water: a review [J]. Water Research, 2020, 188: 116479.
- [22] LU Y, SONG Z M, WANG C, *et al.* Nontargeted identification of chlorinated disinfection byproducts formed from natural organic matter using Orbitrap mass spectrometry and a halogen extraction code [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 126198.

作者简介: 徐垚(1991-), 男, 江苏泰州人, 博士研究生, 主要研究方向为污水消毒、磷资源回收与利用。

E-mail: sustxuyao@163.com

收稿日期: 2021-09-06

修回日期: 2021-12-05

(编辑: 刘贵春)