

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.12.008

过氧乙酸在污水消毒中对病毒灭活的研究进展

朱昱敏, 张亚雷, 周雪飞, 陈家斌

(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: 过氧乙酸(peracetic acid, PAA)作为一种高效广谱消毒剂,被国家推荐用于新型冠状病毒肺炎疫情防控。介绍了PAA的基本性质及其对病毒的高效灭活能力,阐明了PAA的消毒原理,分析了过氧乙酸消毒剂相比于其他消毒方法的优点。最后总结了PAA在实际消毒中的使用方法,以期为PAA应用于新型冠状病毒肺炎疫情的防控提供借鉴。

关键词: 过氧乙酸; 消毒; 病毒; 污水处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)12-0045-06

Research Progress of Peracetic Acid Inactivation of Virus in Wastewater Disinfection

ZHU Yu-min, ZHANG Ya-lei, ZHOU Xue-fei, CHEN Jia-bin

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

Abstract: Peracetic acid (PAA), a high-efficiency broad-spectrum disinfectant, is recommended by the government for the prevention and control of new coronavirus epidemics. The basic properties of PAA and its efficient ability of inactivating viruses were introduced in this review. The disinfection principle of PAA was clarified and the advantages of PAA were analyzed by comparing with other disinfection methods. Finally, the paper summarized the application methods of PAA in practical disinfection, in order to provide reference for its application in the prevention and control of new coronavirus epidemics.

Key words: peracetic acid; disinfection; virus; sewage treatment

过氧乙酸(peracetic acid, PAA)是一种有广谱杀菌能力的强氧化剂,近年来成为替代氯消毒的新型消毒剂,适用于污水厂污水与污泥的消毒^[1]。在新冠肺炎疫情中,生态环境部办公厅发布《关于做好新型冠状病毒感染的肺炎疫情医疗污水和城镇污水监管工作的通知》,强调对污水最有效的消毒方案是投加以强氧化剂为主的消毒剂,并将过氧乙酸

列入常用消毒剂名单内,但对其使用方法尚无明确指导意见。介绍了过氧乙酸消毒技术的消毒原理,分析了影响其消毒的因素,再通过比较不同消毒方法的特点阐明了过氧乙酸消毒的优势,为其在新冠疫情中用于污水污泥的消毒处理提供建议。

1 过氧乙酸消毒剂特点

过氧乙酸消毒剂是过氧乙酸、乙酸、过氧化氢的

溶液混合物, PAA 消毒剂在高浓度 ($>45\%$) 下具有爆炸性; 低浓度时则会分解, 并且浓度越低分解越快, 1% (约 10 g/L) 和 15 mg/L 的 PAA 消毒剂的半衰期分别只有 6 d 和 10 h ^[2], 在实际使用中控制浓度并添加稳定剂抑制分解, 低温避光储存一年的分解量可以低于 10% 。

PAA 自身具有强氧化性, 其标准氧化还原电位为 1.81 eV , 高于次氯酸钠 (1.36 eV) 和二氧化氯 (1.57 eV); 此外, PAA 可以产生包括羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)、甲基自由基 ($\text{CH}_3\cdot$)、过酰基自由基 ($\text{CH}_3\text{COOO}\cdot$) 在内的多种活性氧自由基, 可以增强消毒能力。目前, 多数污水处理厂还是以使用含氯消毒剂等传统方法为主, PAA 用于污水处理消毒的使用量不到其使用总量的 20% ^[1], 因此 PAA 在污水处理消毒领域还有着广阔的发展空间。

2 过氧乙酸灭活病毒能力

过氧乙酸在 SARS 与 COVID-19 疫情期间均被国家列入推荐消毒剂, 主要原因在其高效的病毒灭活能力, 并且针对不同种类的病毒、不同的环境条件都可以发挥作用。

2.1 过氧乙酸对病毒的灭活原理

PAA 大多数情况下通过自身和产生的自由基的强氧化性作用于病毒, 从而使其灭活。PAA 首先氧化病毒外壳上有还原性基团如巯基 ($-\text{SH}$)、二硫键 ($\text{S}-\text{S}$) 以及双键的蛋白质等使其变性凝固, 破坏生物膜的选择透过功能, 使其更容易进入病毒内部, 然后再与核酸物质反应灭活病毒^[1]。吴雪垠^[3]用 PAA 消毒剂处理猪轮状病毒和杜兰病毒, 用不同的方法进行检测, 结果显示病毒的蛋白质外壳和内部基因组都遭受到了不同程度的损伤, 说明两者被 PAA 先后破坏从而导致病毒失活。

2.2 对污水中不同病毒的灭活

环境中病毒种类繁多, 但污水中影响人类健康的病毒只有一部分。对鼠诺如病毒 (MNV) 的两组灭活结果^[4-5]表明, 高浓度短时间消毒和低浓度长时间消毒可以达到相似的灭活效果; 这对 PAA 在污水消毒中的灵活应用有一定的指示性作用。

新型冠状病毒作为呼吸道病毒, 与肠道病毒相比结构上最重要的区别是其具有包膜, 而具有包膜的病毒更容易被消毒剂灭活。PAA 对牛痘病毒 (有包膜) 和脊髓灰质炎病毒 (无包膜) 分别作用 0.5 min 和 1 min 时对数灭活率达到 4 左右, 验证了这一

结论。因此在防疫期间, 使用 PAA 消毒能够保证肠道病毒灭活时, 一般也可以使新型冠状病毒灭活。

实验室中 PAA 用于部分病毒灭活的结果^[6-11]见表 1, 其中灭活效果以对数灭活率 [$\lg(N_0/N_t)$, N_0 和 N_t 分别为灭活前后的病毒浓度] 计。

表 1 过氧乙酸对部分病毒的消毒效果

Tab. 1 Disinfection effect of peracetic acid on some viruses

病毒种类	作用时间/min	PAA 有效浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	对数灭活率
MS2 大肠杆菌噬菌体	120	1.5	1.2
		10	3.4
MS2 大肠杆菌噬菌体	5	50	2.5
	60		>4
鼠诺如病毒	1	85	3
人诺如病毒	10	80	3.66
脊髓灰质炎病毒	7.5	1 800	6.33
新城疫病毒	10	60~84	2.82
仙台病毒	5	2 000	>4
牛肠道细胞病变病毒	30	250	>3.1

2.3 影响消毒的环境因素

不同的环境因素 (温度、有机物含量、浊度、pH 值、不同离子等) 会造成病毒灭活效果的差异。如温度和有机物含量的提高都会增快 PAA 在水中的衰减, 不利于病毒灭活。市政污水和清水对照试验结果表明, 市政污水中有机物含量较高, 病毒的对数灭活率比清水降低了约 2.2 ^[4], 说明实际废水的复杂性会对消毒效果造成一定影响。

浊度过高会导致病毒吸附在悬浮颗粒表面, 降低分散程度使消毒效果减弱。例如, 对鼠诺如病毒的实验显示^[5], 在 PAA 浓度更大和接触时间更长的情况下, 吸附在固体表面的病毒灭活程度比分散在溶液中的反而更低。同时这可能也是包膜病毒更易被灭活的原因, 它相比无包膜病毒更难吸附在固体表面上。

一般认为 pH 值在 $5\sim 8$ 时对 PAA 的消毒效果影响不大, 只有在过高 pH (>9) 下 PAA 以解离酸的形式存在而影响消毒^[12]。但 pH 值可以通过改变病毒的表面电位影响病毒的聚集效应^[13], 病毒聚集时 PAA 的灭活效果会大幅降低, 因此 pH 值对消毒的影响是多方面的。

不同离子的影响也有差异, 磷酸盐因具有猝灭自由基的能力可以减弱消毒效果^[1], 但高浓度下可

以中和病毒表面电荷使其聚集态分散而增强消毒能力^[13]。而氯离子对于大部分病毒的杀灭并无影响,却可显著改善 PAA 对 MS2 噬菌体的灭活能力,这一现象的原因暂无定论,但猜测可能是氯离子改善了 MS2 噬菌体生物膜对 PAA 的敏感度,使其更易于被灭活^[13]。

3 污水处理中过氧乙酸消毒的优势

3.1 不产生有害的消毒副产物

PAA 消毒过程中很少形成有害的消毒副产物(DBP),其中会产生的 DBP 主要是羧酸、醛类、卤代 DBP。羧酸类物质基本无生物毒性或致突变性;醛类物质以小分子甲醛等为主,并且在产生后会被继续氧化成无害产物^[14]。当处理水的卤素浓度过高时,如含有 400 mg/L 的溴离子溶液,在与 PAA 反应后检测到了次溴酸,会进一步生成卤代 DBP。但实际使用中卤代 DBP 很少产生,其原因一方面是实际污水中的卤素远达不到实验中的浓度;另一方面是 PAA 和溴的反应很慢,与其他卤素如氯的反应速率常数则更小^[15]。

3.2 更加高效的消毒能力

PAA 消毒剂的强氧化性使其消毒效果显著,对诸如病毒的灭活实验中,PAA 表现出比次氯酸钠更强的灭活能力^[7]。过氧化氢与 PAA 同属过氧化物类消毒剂,但达到相同的效果时,过氧化氢单独作用时的使用剂量要远超 PAA^[16]。其原因是 PAA 产生的有机自由基被认为具有更好的透过生物膜的能力,并且半衰期更长^[1],相比无机自由基更有效。

3.3 对人体的危害较小

长时间接触含氯消毒剂、臭氧等会对人体产生伤害,而使用 PAA 消毒剂的危害较小。虽然 PAA 也有一定的刺激性,但实验研究证明 0.4%~0.8% 的 PAA 可以直接作用于外部皮肤,只有在更高浓度下才不建议直接接触^[17],低浓度(如 0.2%)短期接触对皮肤无副作用。在空气中浓度为 0.50~0.52 mg/m³ 时不会使人体不适^[3],并且 PAA 易自行分解,因此使用时空气中的 PAA 对人体的影响很小。

3.4 相对适中的消毒成本

PAA 的消毒成本首先取决于目标处理效果,高标准需要更高的 PAA 浓度,成本也更高。在达到相同处理效果的情况下,PAA 消毒成本相对适中。PAA 消毒的基建成本略高于二氧化氯,低于臭氧和紫外消毒^[3];但运行维护成本远不及紫外消毒经

济,与臭氧消毒差距不大。不过当 PAA 以购买药剂使用而非现场制取时,其市场价格比一般含氯消毒剂高,可能达到次氯酸钠的 4~5 倍^[17]。综合考虑经济效益与消毒效果,PAA 可能更适用于中小型污水处理厂。

4 过氧乙酸消毒的实际应用

4.1 PAA 应用于污水消毒

针对医疗机构的污水,疫情期间所有接收新冠肺炎患者的医院其污水排放标准均按照传染病医疗机构执行,根据《医疗机构水污染物排放标准》(GB 18466—2005),粪大肠菌群数应小于 100 MPN/L,肠道致病菌与肠道病毒不得检出。在 SARS 疫情中对医疗污水处理使用 PAA 建议浓度为 20~100 mg/L,作用时间为 30~60 min^[18]。新型冠状病毒与 SARS 病毒结构相似,因此可考虑使用 SARS 中的消毒参数来处理新冠疫情中的医疗机构污水。

城镇污水处理厂污水中的病毒浓度相比医疗污水要低得多,一方面是由于高流量的稀释作用,另一方面是前置处理工艺(如生物处理)可以达到 1~2 的对数灭活率的病毒处理效果。目前使用 PAA 消毒的处理厂中关于病毒的灭活数据较少,因此以细菌的消毒数据作为参考。表 2 中列出了部分国外污水处理厂实际运行和中试中 PAA 对细菌的灭活效果^[16,19~25]。

由实际运行效果发现,中小型处理厂在 PAA < 2 mg/L 接触消毒 20 min 左右时,消毒后菌群浓度约在 10⁵ 个/L 的数量级水平,对数灭活率不到 2;而 PAA 浓度在 10 mg/L 左右、接触时间最高为 30 min 的情况下,对数灭活率可以达到 3 左右,灭活后菌群数降低到最高 10⁴ 个/L 的水平,可以达到我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 B 标准的灭活要求。在流量较小的情况下,PAA 消毒效果更好,这可能是由于较高的负荷会影响消毒效果。而对于三级出水(经过砂滤等工艺)的消毒,由于水质中的有机物、病毒等含量有了很大降低,PAA 消毒效果更好,甚至 400 mg/L 的 PAA 可将总大肠菌群数降至约 20 CFU/L^[24],达到很高的标准。

PAA 的加入会使水体的 COD 和 BOD₅ 指标值增高,这对出水满足排放标准是不利的。理论计算表明,1 mg/L 的 PAA 投加会使 COD 指标增加 2.8

mg/L^[17],但由于实际使用环境的复杂性,消毒后两项指标增加、不变与减少的情况均有报道,指标值的减少可能是部分有机物的氧化所致^[1]。因此中小型污水处理厂正常运行时,多数情况下10 mg/L的PAA消毒30 min可以达到一级B排放标准要求;而疫情期间对于污水消毒的要求更高,污水厂应在以

上参数的基础上进行调试改进,保证最终出水中病毒的灭活效果。而对于执行一级A排放标准(粪大肠菌群 $<10^3$ 个/L)或大型污水厂,过高的PAA浓度对经济效益并不友好,对出水的其他指标也会有不利影响,此时可以考虑与其他消毒方法进行联用。

表2 不同污水处理厂实例中PAA消毒的效果

Tab. 2 Effect of PAA disinfection in different sewage treatment plants

污水处理项目或中试名称	处理能力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	PAA 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	接触时 间/min	消毒效果
Montreal 城市社区污水处理厂 ^[16]	2.46×10^6	0.6 ~ 1.6	120	粪大肠菌群数:10 000 CFU/100 mL
意大利某污水处理厂 ^{a[19]}	2.49×10^5	1.5	20	粪大肠菌群:对数灭活率为1.77
意大利某污水处理厂 ^{a[20]}	1.62×10^5	2	20	大肠杆菌数:5 000 CFU/100 mL
Kuopio 市政污水处理厂 ^[21]	2.06×10^4	2 ~ 7	27	总大肠菌群:对数灭活率为3
Dunkerque 污水处理厂 ^[22]	—	10	10	总/粪大肠菌群:对数灭活率为3
Taskila 污水处理厂 ^[23]	—	1.5 ~ 2	10 ~ 15	大肠杆菌数:500 CFU/100 mL
West Bari 市政污水处理厂 ^[24]	2.4×10^3	400	20	总大肠菌群数:2 CFU/100 mL
		10	30	总大肠菌群数:1 000 CFU/100 mL

注: ^a指污水流量数据根据人口当量换算而来,换算依据为通过文献^[25]中不同国家每人每天平均用水量来估计每人每天平均污水产生量。

4.2 PAA 应用于污泥消毒

PAA 应用于污泥处理也有较多的优势。如与次氯酸进行医疗MBR污泥处理时,虽然作用速率比次氯酸略慢,但其用量相比次氯酸会有较大减少^[26],说明PAA消毒可以在保证效果的前提下减少消毒剂的使用投资费用。

PAA 与其他处理方法的联用对污泥处置发展也有较大的促进,微波与PAA的联用通过微波破碎病毒和微生物体,再让PAA发挥氧化作用,处理后的清液中各项有机元素的去除效果相比单独微波处理具有较大的提升^[27];而PAA与化学絮凝的联用可以有效提高污泥的过滤和干化效率,如使用亚铁离子与PAA一同投加,PAA/ Fe^{2+} 形成的类Fenton体系可以有效氧化裂解污泥,原位形成的三价铁离子则可以发挥絮凝作用提高其过滤干化的能力^[28],实际上该体系会形成更多的有机自由基协同促进病毒的灭活。

在新冠肺炎疫情期间,可以参考吴晗等^[29]的研究结果,投加浓度为400 mg/L的PAA消毒剂,接触时间为1 h时,消毒后沉淀污泥中的残余粪大肠菌群能够满足排放要求,以作为疫情中PAA对污泥处理无害化时的灭活参数。

5 结语

过氧乙酸作为具有广谱杀菌能力的强氧化剂,

能够应用于新冠肺炎疫情防控工作以防止病毒传播。PAA相比其他消毒剂灭活病毒效果更好的原因是,其自身具有强氧化能力并且能够产生有机自由基。此外,PAA能够克服消毒中病毒种类多样性、实际环境复杂性等问题,灵活调整参数和方法进行消毒处理。PAA消毒技术的应用也能解决目前其他消毒方法存在的消毒副产物多、人体危害性大、操作和运行困难等问题。

参考文献:

- [1] Luukkonen T, Pehkonen S O. Peracids in water treatment: A critical review [J]. Crit Rev Environ Sci Technol, 2017, 47(1): 1-39.
- [2] Luukkonen T, Heyninck T, Rämö J, et al. Comparison of organic peracids in wastewater treatment: Disinfection, oxidation and corrosion [J]. Water Res, 2015, 85: 275-285.
- [3] 吴雪垠. 高铁酸钾和过氧乙酸氧化灭活肠道病毒的研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
Wu Xueyin. Inactivation of Enterovirus by Ferrate and Peracetic Acid [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019 (in Chinese).
- [4] Dunkin N, Weng S C, Schwab K J, et al. Comparative inactivation of murine norovirus and MS2 bacteriophage by peracetic acid and monochloramine in municipal

- secondary wastewater effluent[J]. *Environ Sci Technol*, 2017,51(5):2972–2981.
- [5] Girard M, Mattison K, Fliss I, *et al.* Efficacy of oxidizing disinfectants at inactivating murine norovirus on ready-to-eat foods[J]. *Int J Food Microbiol*, 2016,219:7–11.
- [6] Park E, Lee C, Bisesi M, *et al.* Efficiency of peracetic acid in inactivating bacteria, viruses, and spores in water determined with ATP bioluminescence, quantitative PCR, and culture-based methods[J]. *J Water Health*, 2014,12(1):13–23.
- [7] Anfruns-Estrada E, Bottaro M, Pintó R M, *et al.* Effectiveness of consumers washing with sanitizers to reduce human norovirus on mixed salad[J]. *Foods*, 2019,8(12):637.
- [8] 于海玲,李海帅,丁士翔,等. 一种过氧乙酸与过氧化氢混合消毒液对细菌芽孢与病毒杀灭效果比较[J]. *中国消毒学杂志*, 2018,35(11):813–815.
- Yu Hailing, Li Haishuai, Ding Shixiang, *et al.* Evaluation of sporicidal activity and virucidal efficacy of a peroxide disinfectant with the quantitative suspension test[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2018,35(11):813–815 (in Chinese).
- [9] 刘梅,沈欣悦,李建梅,等. 二氯异氰尿酸钠和过氧乙酸消毒剂对新城疫病毒灭活效果研究[J]. *中国家禽*, 2019,41(4):64–66.
- Liu Mei, Shen Xinyue, Li Jianmei, *et al.* Effect of sodium dichloroisocyanurate and peracetic acid disinfectant on inactivation of new castle disease virus[J]. *China Poultry*, 2019,41(4):64–66 (in Chinese).
- [10] 孙凤萍,胡建华,高骏,等. 四种消毒剂对仙台病毒的灭活效果[J]. *中国消毒学杂志*, 2007,24(6):524–526.
- Sun Fengping, Hu Jianhua, Gao Jun, *et al.* The efficacy of four disinfectants in inactivating Sendai virus[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2007,24(6):524–526 (in Chinese).
- [11] Martin H, Soumet C, Fresnel R, *et al.* Comparison of the virucidal efficiency of peracetic acid, potassium monopersulfate and sodium hypochlorite on hepatitis A and enteric cytopathogenic bovine orphan virus[J]. *J Appl Microbiol*, 2013,115(4):955–968.
- [12] 曹聪,张士乔,张富标,等. 饮用水中的新型消毒剂——过氧乙酸的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2018,34(4):36–40.
- Cao Cong, Zhang Tuqiao, Zhang Fubiao, *et al.* Research progress of peracetic acid (PAA): An emerging disinfectant in drinking water[J]. *China Water & Wastewater*, 2018,34(4):36–40 (in Chinese).
- [13] Mattle M J, Crouzy B, Brennecke M, *et al.* Impact of virus aggregation on inactivation by peracetic acid and implications for other disinfectants[J]. *Environ Sci Technol*, 2011,45(18):7710–7717.
- [14] Henao L D, Turolla A, Antonelli M. Disinfection by-products formation and ecotoxicological effects of effluents treated with peracetic acid: A review[J]. *Chemosphere*, 2018,213:25–40.
- [15] Shah A D, Liu Z Q, Salhi E, *et al.* Peracetic acid oxidation of saline waters in the absence and presence of H_2O_2 : Secondary oxidant and disinfection byproduct formation[J]. *Environ Sci Technol*, 2015,49(3):1698–1705.
- [16] Wagner M, Brumelis D, Gehr R. Disinfection of wastewater by hydrogen peroxide or peracetic acid: Development of procedures for measurement of residual disinfectant and application to a physicochemically treated municipal effluent[J]. *Water Environ Res*, 2002,74(1):33–50.
- [17] Kitis M. Disinfection of wastewater with peracetic acid: A review[J]. *Environ Int*, 2004,30(1):47–55.
- [18] 关淳,秦军,刘云凯. 过氧乙酸在防治 SARS 中的应用[J]. *口岸卫生控制*, 2003,8(3):34–36.
- Guan Chun, Qin Jun, Liu Yunkai. The application of peroxyacetic acid in the prevention and cure of SARS[J]. *Port Health Control*, 2003,8(3):34–36 (in Chinese).
- [19] Zanetti F, De Luca G, Sacchetti R, *et al.* Disinfection efficiency of peracetic acid (PAA): Inactivation of coliphages and bacterial indicators in a municipal wastewater plant[J]. *Environ Technol*, 2007,28(11):1265–1271.
- [20] Stampi S, De Luca G, Onorato M, *et al.* Peracetic acid as an alternative wastewater disinfectant to chlorine dioxide[J]. *J Appl Microbiol*, 2002,93(5):725–731.
- [21] Koivunen J, Heinonen-Tanski H. Peracetic acid (PAA) disinfection of primary, secondary and tertiary treated municipal wastewaters[J]. *Water Res*, 2005,39(18):4445–4453.
- [22] Lazarova V, Janex M L, Fiksdal L, *et al.* Advanced wastewater disinfection technologies: Short and long term efficiency[J]. *Water Sci Technol*, 1998,38(12):109–117.

- [23] Luukkonen T, Teeriniemi J, Prokkola H, *et al.* Chemical aspects of peracetic acid based wastewater disinfection [J]. *Water SA*, 2014, 40(1): 73 – 80.
- [24] Liberti L, Lopez A, Notarnicola M, *et al.* Comparison of advanced disinfecting methods for municipal wastewater reuse in agriculture [J]. *Water Sci Technol*, 2000, 42 (1/2): 215 – 220.
- [25] Johannes Pinnekamp, 袁国文. 欧洲污水处理技术、成本与收费[A]. 21世纪国际城市污水处理及资源化发展战略研讨会论文集[C]. 北京: 建设部, 2001.
Johannes Pinnekamp, Yuan Guowen. European wastewater treatment technology, costs and charges [A]. The 21st Century International Conference on Developing Strategy or Urban Wastewater Treatment and Reuse Proceedings [C]. Beijing: Ministry of Construction, 2001 (in Chinese).
- [26] 张景丽, 顾平, 张光辉. NaClO 和 PAA 对医院污水 MBR 污泥消毒的研究 [J]. *中国给水排水*, 2014, 30 (3): 87 – 91.
Zhang Jingli, Gu Ping, Zhang Guanghui. Sodium hypochlorite and peracetic acid for disinfection of sludge from membrane bioreactor treating hospital wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(3): 87 – 91 (in Chinese).
- [27] 孙德栋, 郭思晓, 马妮娜, 等. 微波—过氧乙酸联合作用处理剩余污泥的研究 [J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(4): 50 – 53.
Sun Dedong, Guo Sixiao, Ma Nina, *et al.* Pretreatment of excess sludge by microwave combined with peracetic acid [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2011, 33 (4): 50 – 53 (in Chinese).
- [28] 王彩霞, 张伟军, 王东升, 等. 过氧乙酸和亚铁联用调质强化活性污泥过滤脱水性能 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(8): 3975 – 3984.
Wang Caixia, Zhang Weijun, Wang Dongsheng, *et al.* Enhancement of activated sludge dewatering performance with combined peroxyacetic acid and ferrous iron [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9 (8): 3975 – 3984 (in Chinese).
- [29] 吴晗, 顾平, 朱丹, 等. 过氧乙酸用于医院污泥消毒的研究 [J]. *给水排水*, 2012, 48(12): 50 – 54.
Wu Han, Gu Ping, Zhu Dan, *et al.* Research on hospital sludge disinfection by peracetic acid [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 48 (12): 50 – 54 (in Chinese).



作者简介: 朱昱敏(1997 –), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 研究方向为高级氧化技术处理水环境中的污染物。

E-mail: zhuyumin@tongji.edu.cn

收稿日期: 2020 – 02 – 27

幸福生活靠奋斗, 美丽河湖靠呵护