

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.09.002

高浓度消毒剂对活性污泥系统中微生物的影响

陈琳风^{1,2}, 王 怡^{1,2}, 王若卿^{1,3}

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学
陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 中国市政工程西北设计研究院有限
公司 陕西分院, 陕西 西安 710075)

摘 要: 针对污水厂活性污泥易于发生丝状菌污泥膨胀问题,以西安市第二污水处理厂活性污泥为研究对象,在次氯酸钠投加量为 15 mg/L 的条件下,探索高浓度消毒剂对活性污泥中微生物的杀灭效果以及对胞外聚合物(EPS)含量和不同类型微生物活性的影响。结果表明,高浓度次氯酸钠能有效杀灭丝状菌,从而控制污泥的丝状膨胀现象,但在杀灭丝状菌的同时也会影响菌胶团絮体内的部分微生物,且对不同微生物的杀灭效果不同,亚硝酸盐氧化菌(NO_B)是最易被杀灭的类型。当次氯酸钠投加量为 15 mg/L 时,反应 3 h 后污泥胞外聚合物总含量降低了 15.48%,硝化活性丧失殆尽且再未恢复,反硝化活性下降明显;恢复 7 d 后,絮体内部微生物可以得到有效恢复,而丝状菌大多依然处于死亡状态,EPS 总含量继续下降。总之,高浓度消毒剂作用于活性污泥后,可以达到控制丝状菌的目的,但是污泥的硝化和反硝化活性也受到了影响。

关键词: 次氯酸钠; 活性污泥; 微生物; 污泥膨胀

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)09-0007-05

Effect of High Concentration Disinfectant on Microorganisms in Activated Sludge System

CHEN Lin-feng^{1,2}, WANG Yi^{1,2}, WANG Ruo-qing^{1,3}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Shaanxi Branch, CSCEC AECOM Consultants Co. Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Aiming at the problem of filamentous sludge bulking in activated sludge system of a wastewater treatment plant (WWTP), effects of high concentration disinfectant on livability, extracellular polymer substances (EPS) content and activity of different microorganisms in activated sludge were explored. The activated sludge was from No. 2 WWTP in Xi'an, and the dosage of sodium hypochlorite was 15 mg/L. The high concentration sodium hypochlorite could effectively reduce the number of filamentous bacteria and further inhibit the filamentous bulking of activated sludge. In addition, parts of the inner microorganisms in the flocs were also affected along with the sterilization of the filamentous bacteria. The cell livability of different microorganisms was different, and the most vulnerable species was

nitrite oxidizing bacteria (NOB). When the dosage of sodium hypochlorite was 15 mg/L, the total content of sludge extracellular polymer substances decreased by 15.48% after 3 hours of reaction, the nitrification activity was completely lost and never recovered, and the denitrification activity decreased significantly. After recovery for 7 days, the activity of the inner microorganisms could be effectively recovered, while most of the filamentous bacteria were still dead, and the total EPS content decreased continuously. In a word, the growth of filamentous bacteria could be inhibited after the action of high concentration disinfectant on activated sludge, but the nitrification and denitrification activities of sludge were also affected.

Key words: sodium hypochlorite; activated sludge; microorganism; sludge bulking

污泥膨胀是自活性污泥法问世以来污水处理厂普遍存在的问题,膨胀导致污泥沉降性能变差、泥水分离困难,进而影响出水水质^[1]。污泥膨胀可分为非丝状菌膨胀和丝状菌膨胀,后者主要由丝状菌过度繁殖引起,在实际运行中可占90%以上^[2]。

目前,控制污泥丝状菌膨胀的方法主要有生物法和化学法。生物法主要通过增加生物选择器或调节运行工况来改变微生物的生长环境,化学法则通过投加氧化剂、增重剂等药剂来直接改善污泥性状。生物法见效较慢,而化学法能够较快速地控制污泥膨胀。

在国外最常用的化学药剂是氯或过氧化氢等,其目的是杀死或氧化伸出絮体的丝状细菌^[3]。Neethling 等人^[4]最先提出采用 Cl_2 作为氧化剂来控制污泥膨胀,并将该方法进行了推广。目前城市污水处理厂的二级出水大多以加氯的方式进行消毒,而控制污泥膨胀所需加氯量小于二级出水消毒所需量,因此可利用污水厂现有消毒设备在进行出水消毒的同时实现对污泥膨胀的控制^[5]。徐慧等人^[6]的研究表明,膨胀污泥中的绝大部分丝状菌可通过加氯被杀灭,从而使污泥膨胀得到控制。因此,笔者针对城市污水处理厂活性污泥丝状膨胀现象,探究高浓度次氯酸钠消毒剂对丝状菌及絮体微生物的影响,以期对丝状菌污泥膨胀控制提供参考。

1 材料和方法

1.1 污泥来源及预处理

活性污泥取自西安市第二污水处理厂,将一定体积的活性污泥加入装有已灭菌 PBS 缓冲溶液的离心管中离心 10 min,然后倒掉上清液并重新加入同体积的 PBS 缓冲液,重置混匀后再离心。重复 3 次上述步骤,最后使处理好的活性污泥再悬浮于缓冲溶液中。

1.2 消毒剂的选择和微生物的杀灭

将预处理并均化后的活性污泥和 15 mg/L 的次氯酸钠一起加入 500 mL 低营养浓度培养液中。低营养浓度培养液的组成如下:0.018 g/L 的 NH_4Cl 、0.1 g/L 的葡萄糖、3.93 g/L 的磷酸盐缓冲溶液(1.22 g/L 的 KH_2PO_4 、2.71 g/L 的 Na_2HPO_4)、2 mL/L 的 MgSO_4 (0.1 mol/L)。

将消毒装置放于 200 r/min 的磁力搅拌器上,加入次氯酸钠以后,在 0、5、30、60、120 和 180 min 分别测定相关指标。采用 Hanna HI96734 测定仪检测污泥混合液中余氯浓度。将 1 mL 混合液加入 9 mL 含 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 的缓冲溶液中,采用 R2A 培养基对污泥中异养菌(HPC)进行平板计数,采用 MPN - Griess 法检测污泥中自养菌(主要是硝化菌)数量。

1.3 微生物消毒处理后的恢复

次氯酸钠消毒 3 h 后,在装置中加入少量 10% 的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液使系统中余氯含量为零,将装置继续置于磁力搅拌器上,以 200 r/min 的速度搅拌 7 d 以恢复活性污泥中微生物的活性,并测定相关指标。

1.4 检测项目及方法

死、活细胞的鉴定:采用 LIVE/DEAD BacLight viability kit 试剂盒对污泥中微生物进行染色,并通过激光共聚焦显微镜(CLSM)观察染色结果。完整及结构受损的细胞膜均可透过 SYTO 9 染料,并使微生物被染成绿色,而碘化丙啶只能渗透受损的死细菌细胞膜使微生物被染成红色荧光。

硝化速率的测定:在 25 ℃ 下,取一定量污泥微生物置于一定浓度的 NH_4^+ 和 NO_2^- 溶液中,充分曝气的同时采样测定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度,通过浓度的历时变化计算氮摄取速率(AUR)和比耗氧速率(NUR)。

反硝化速率的测定:在 25 ℃ 下,取一定量污泥

微生物置于一定浓度的 NO_3^- 和 NO_2^- 溶液中,在有机碳源充足及缺氧搅拌条件下采样测定 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度,通过浓度的历时变化计算不同氮源下的反硝化速率。

胞外聚合物(EPS)含量的测定:消毒一定时间后取适量污泥,按照文献[7]测定微生物胞外蛋白质、多糖及核酸的含量。

2 结果与讨论

2.1 次氯酸钠对活性污泥微生物的灭活作用

图1为活性污泥消毒前后及恢复7 d后的 CLSM 图像。活性污泥的基本形态是以絮体细菌为主、并辅以一定量丝状菌为骨架形成结构紧密的大絮体。

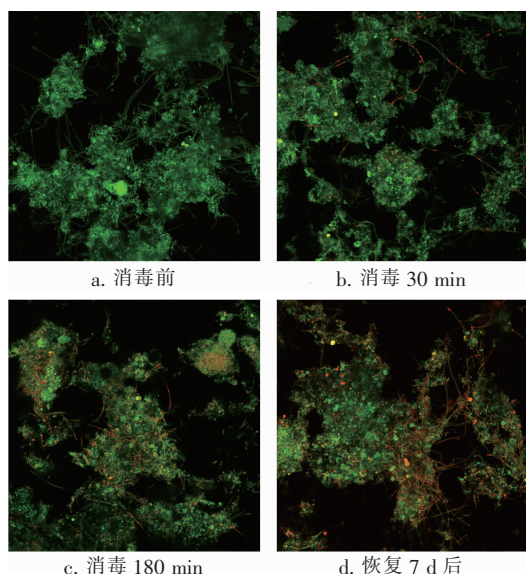


图1 消毒后及恢复中活性污泥的 CLSM 图像

Fig.1 CLSM images of activated sludge during disinfection and recovery

由图1(a)可以看出,CLSM 图像在消毒前基本呈绿色,只出现少量红色荧光点,说明活性污泥微生物在消毒前基本保持活性状态,仅存在极少量死亡微生物。由图1(b)可以看出,消毒30 min后 CLSM 图像中红色荧光点略有增多且主要为丝状菌,表明在试验初期高浓度的次氯酸钠主要杀灭污泥中的丝状菌。由图1(c)可以看出,消毒180 min后活性污泥中红色荧光点明显增多,丝状菌微生物继续大量死亡的同时,内部的絮体微生物也有部分死亡,但仍存在大量活细胞。由图1(d)可以看出,恢复7 d后污泥中丝状菌微生物大量死亡,部分絮体微生物有所恢复,绿色荧光点稍有增加但明显低于消毒前的

数量。

综上所述,由于丝状菌伸出活性污泥絮体外,其随着消毒时间的延长绝大部分死亡且无法恢复活性,而絮体内仅部分微生物受消毒剂影响后可恢复活性^[3]。因此,从丝状菌的杀灭效果看,通过投加次氯酸钠来抑制丝状菌似乎能够控制丝状菌引起的污泥膨胀。

2.2 次氯酸钠对活性污泥胞外聚合物含量的影响

EPS 对活性污泥絮体的形成和稳定结构具有重要作用^[8],可占污泥总有机物的50%~90%。EPS成分虽然多样,但主要由蛋白质、多糖和少量核酸等物质组成^[9]。图2为消毒前后及恢复中活性污泥胞外聚合物含量的变化。可以看出,消毒后活性污泥中EPS总含量降低了15.48%,恢复7 d后EPS总含量相对于消毒后又降低了10.26%,且EPS中单项物质的含量在试验过程中均降低。

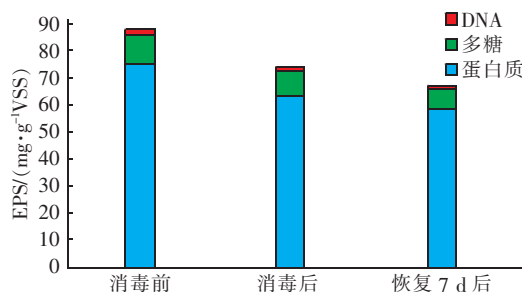


图2 消毒前后及恢复中活性污泥胞外聚合物含量的变化

Fig.2 Variation of EPS content in activated sludge during disinfection and recovery

研究表明^[10],具有强氧化性的次氯酸可以和蛋白质、DNA、胆固醇、脂肪等许多具有生物意义的物质反应。因此,在次氯酸钠作用下活性污泥EPS中蛋白质、多糖及DNA含量均降低。但与此同时,这些物质可通过与消毒剂的反应来抑制消毒剂进入细胞内部,使活性污泥内部微生物活性得以保持。而在7 d的恢复时间内,微生物继续利用自身EPS中的蛋白质和多糖等物质作为生长代谢的能量物质,因此使得蛋白质和多糖等物质含量继续降低。

2.3 次氯酸钠对活性污泥中微生物的杀灭效果

消毒过程中,余氯浓度、异养菌及硝化菌(氨氧化菌AOB和亚硝酸盐氧化菌NOB)数量的历时变化如图3所示。可知,试验中余氯初始浓度为9.67 mg/L,消毒前HPC的初始浓度为 1.37×10^7 CFU/mL,AOB和NOB的初始浓度分别为 1.30×10^6 和

2.0×10^5 MPN/mL。消毒 30 min 以后, HPC 数量降低了 1.35×10^7 CFU/mL, AOB 和 NOB 的减少量分别为 1.29×10^6 和 1.99×10^5 MPN/mL。消毒 30 ~ 180 min 时, HPC 减少量为 1.04×10^5 CFU/mL, AOB 减少量为 9.2×10^3 MPN/mL, 而 NOB 在 180 min 时未检测到。消毒剂投加以后, HPC、AOB 和 NOB 在 30 min 内的减少速率明显大于后期, 前 30 min 的消毒速率对数值为 30 ~ 180 min 相应值的 5 ~ 20 倍。

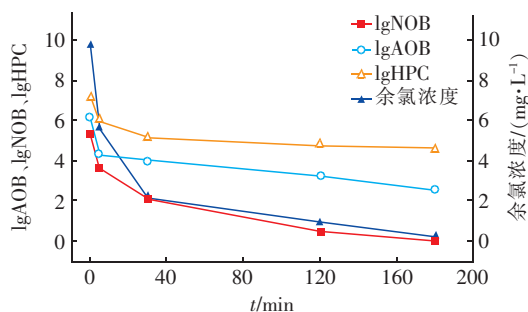


图3 消毒过程中微生物数量及余氯浓度的变化

Fig. 3 Variation of microbial population and residual chlorine during disinfection

表1 消毒前后及恢复7 d后活性污泥硝化和反硝化速率的变化

Tab. 1 Variation of nitrification and denitrification rates during disinfection and recovery

项 目	消毒前	消毒后	恢复7 d后
AUR/($\text{mgNH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{g}^{-1}\text{VSS} \cdot \text{h}^{-1}$)	3.304	0	0
NUR/($\text{mgNO}_2^- - \text{N} \cdot \text{g}^{-1}\text{VSS} \cdot \text{h}^{-1}$)	5.288	0	0
反硝化速率/($\text{mgNO}_3^- - \text{N} \cdot \text{g}^{-1}\text{VSS} \cdot \text{h}^{-1}$)	4.366	1.256	1.648
反硝化速率/($\text{mgNO}_2^- - \text{N} \cdot \text{g}^{-1}\text{VSS} \cdot \text{h}^{-1}$)	6.498	1.609	1.170

高浓度次氯酸钠作用于活性污泥时, 污泥微生物的硝化活性及反硝化活性均受到影响。消毒 3 h 后硝化活性完全丧失, 且在无消毒剂条件下培养 7 d 后仍处于失活状态, 反硝化活性则大幅下降但未完全失活。好氧的硝化菌常分布于活性污泥絮体表层, 故硝化菌比处于菌胶团内部、常处于缺氧条件的反硝化菌更易受到消毒剂的侵害, 因此次氯酸钠对反硝化菌的影响小于其对硝化菌的影响。

3 结论

① 高浓度次氯酸钠能够降低污泥中丝状菌的数量, 从而有效控制丝状菌引起的活性污泥膨胀。在杀灭丝状菌的同时也会使菌胶团絮体内的部分微生物被杀灭, 但在无消毒剂条件下培养 7 d 后, 絮体内部微生物可得到有效恢复, 而丝状菌则仍处于死亡状态。

② 采用高浓度次氯酸钠消毒 3 h 后, 活性污

在 3 h 的消毒过程, 余氯浓度、异养菌及硝化菌数量均随反应时间的增加而下降。HPC 数量的对数衰减量为 2.56, AOB 和 NOB 数量的对数衰减量分别为 3.64 和 5.30。当次氯酸钠投量为 15 mg/L 时, 反应 3 h 后, 次氯酸钠对所有微生物均有一定程度的杀灭作用, 但对不同微生物的杀灭效果略有不同, 其中 NOB 最易被杀灭, 这一结果与王若卿等人^[11]的研究结果相似。

2.4 次氯酸钠对活性污泥硝化和反硝化的影响

消毒前后及恢复 7 d 后活性污泥微生物硝化和反硝化速率的变化见表 1。可知, 消毒前活性污泥微生物的硝化和反硝化速率均较高。消毒 3 h 后, 活性污泥微生物的 AUR 和 NUR 均降至零, 硝化活性完全丧失, 以 NO_3^- 和 NO_2^- 为氮源的反硝化速率分别降低了 71.23% 和 75.24%。经过 7 d 无氯培养恢复后, AUR 和 NUR 仍为零, 而以 NO_3^- 为氮源的反硝化速率略有上升, 以 NO_2^- 为氮源的反硝化速率略有下降, 反硝化活性未见恢复, 总体保持为消毒 3 h 后的水平。

泥中 EPS 总含量降低了 15.48%, 且经过 7 d 的恢复后, EPS 总含量依然下降。

③ 高浓度次氯酸钠作用于活性污泥时, 系统中余氯浓度、污泥中异养菌和硝化菌的数量均随着消毒时间的延长而降低, 但是对不同微生物的杀灭效果略有不同, NOB 是活性污泥中最易被杀灭的微生物。

④ 高浓度次氯酸钠对活性污泥硝化活性和反硝化活性的影响程度不同。次氯酸钠作用 3 h 后, 污泥的硝化活性丧失殆尽且再未恢复, 反硝化活性虽未完全丧失但大幅下降。

参考文献:

- [1] Fan N S, Wang R F, Qi W, et al. Control strategy for filamentous sludge bulking: Bench-scale test and full-scale application[J]. Chemosphere, 2018, 210: 709 - 716.

- [2] Wang P, Yu Z S, Qi R, *et al.* Detailed comparison of bacterial communities during seasonal sludge bulking in a municipal wastewater treatment plant[J]. *Water Res*, 2016, 105: 157 – 166.
- [3] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, *et al.* Filamentous bulking sludge—a critical review [J]. *Water Res*, 2004, 38(4): 793 – 817.
- [4] Neethling J B, Jenkins D, Johnson K M. Chemistry, microbiology, and modeling of chlorination for activated sludge bulking control [J]. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1985, 57(8): 882 – 889.
- [5] 朱帅, 周利. 添加剂法控制丝状菌活性污泥膨胀[J]. *市政技术*, 2017, 35(5): 153 – 155.
Zhu Shuai, Zhou Li. Expansion control of filamentous bacteria activated sludge by the additive method [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2017, 35(5): 153 – 155 (in Chinese).
- [6] 徐慧, 周利, 王伟平. 丝状菌性污泥膨胀的影响因素及控制方法[J]. *环境技术*, 2005, 24(6): 18 – 21.
Xu Hui, Zhou Li, Wang Weiping. The influencing factors and control of filamentous sludge bulking [J]. *Environmental Tecnology*, 2005, 24(6): 18 – 21 (in Chinese).
- [7] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, 95(3): 249 – 256.
- [8] Wang B B, Liu X T, Chen J M, *et al.* Composition and functional group characterization of extracellular polymeric substances (EPS) in activated sludge: the impacts of polymerization degree of proteinaceous substrates [J]. *Water Res*, 2018, 129: 133 – 142.
- [9] Wang X L, Zhang L, Peng Y Z, *et al.* Enhancing the digestion of waste activated sludge through nitrite addition: insight on mechanism through profiles of extracellular polymeric substances (EPS) and microbial communities [J]. *J Hazard Mater*, 2019, 369: 164 – 170.
- [10] Boncler M, Kehrel B, Szweczyk R, *et al.* Oxidation of C-reactive protein by hypochlorous acid leads to the formation of potent platelet activator [J]. *Int J Biol Macromol*, 2017. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2017.10.159.
- [11] 王若卿, 王怡, 袁洛薇. 高浓度消毒剂对再生水管道生物膜中微生物的影响[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(5): 14 – 17, 22.
Wang Ruqing, Wang Yi, Yuan Luowei. Influence of high-concentration disinfectant on microorganisms in biofilm formed in reclaimed water pipeline [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(5): 14 – 17, 22 (in Chinese).



作者简介:陈琳风(1994 –),女,江西井冈山人,硕士研究生,主要研究方向为水体富营养化控制。

E-mail:1635789767@qq.com

收稿日期:2019 – 11 – 14

开展河湖“清四乱”,打好河湖管理攻坚战