

# 含氯消毒液对活性污泥的影响及其应对措施

李志华, 高兴东, 杭振宇, 马智博

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 在新型冠状病毒感染的肺炎疫情期间, 消毒液(次氯酸盐)的使用量大幅提升, 导致排水中的消毒液含量增加。消毒液虽然在调节池和管网输送过程中会被还原, 但依然存在污水厂进水次氯酸盐增加的风险, 可能会对活性污泥系统造成一定程度的冲击。因此, 如何判断污水处理厂是否受到冲击以及如何应对这种潜在风险成为广泛关注的问题。整理了课题组关于次氯酸钠对活性污泥微生物活性影响的相关研究成果, 旨在为疫情期间污水处理厂的安全运营提供一些建议及应对措施。特别需要指出, 当进水氯负荷超过  $4 \text{ mg}/(\text{gSS} \cdot \text{d})$  或污泥恢复指数 RI 长期维持在较高水平时(如超过 16%), 表明系统受到了冲击, 面临较大的事故风险, 污水厂需采取措施消除进厂水中高浓度余氯对系统的影响。

**关键词:** 次氯酸钠; 冲击; 活性污泥; 呼吸响应; 污水处理厂

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)06-0028-05

## Effect of Chlorine Disinfectant on Activated Sludge and Its Countermeasures

LI Zhi-hua, GAO Xing-dong, HANG Zhen-yu, MA Zhi-bo

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Currently, at the outbreak period of COVID-19, the consumption of chlorine disinfectant increased significantly, leading to the rapid increase of disinfectant content in wastewater. Although the disinfectant could be reduced in the septic tanks and pipe networks, the risk of increased hypochlorous acid to the treatment plants still exists. This might cause the hypochlorite shock on the activated sludge system to some extent. Therefore, it has been a matter of great concern to judge whether the wastewater treatment plant was shocked and to deal with this potential risk. The research results of the effect of sodium hypochlorite ( $\text{NaClO}$ ) on the microbial activity of activated sludge were summarized, aiming to provide some suggestions and countermeasures for the safe operation of wastewater treatment plants (WWTPs) during the epidemic period. In particular, it needs to be noted that when the influent chlorine load exceeds  $4 \text{ mg}/(\text{gSS} \cdot \text{d})$ , or the sludge recovery index RI increases to a high level (e.g. > 16%) for a long time, it is suggested that the system is impacted and faces a great risk of accidents. Thereby, it is necessary to take measures to eliminate the effect of high concentration of chlorine in influent on activated sludge system.

**Key words:**  $\text{NaClO}$ ; shock; activated sludge; respiratory response; wastewater treatment

plants (WWTPs)

新型冠状病毒肺炎自2019年12月被发现以来,即在全国范围内迅速蔓延。为有效控制疫情,国家倡导对各种场合进行消毒处理,84消毒液作为一种以次氯酸钠为有效成分的高效消毒剂,得到广泛应用。这些消毒液通过管道输送部分分解后,倘若有一部分残余进入污水厂会产生多大的影响,如何在日常运行中监测到这种影响,成为污水处理厂关注的问题。疫情期间气温较低,为污水处理生物活性欠佳时期,两重因素叠加,导致污水处理厂的运行存在较大的风险和困难。整理了笔者所在课题组关于次氯酸钠对污泥微生物活性影响的相关研究成果<sup>[1-8]</sup>,并结合课题组长期从事污水厂事故恢复的工程经验,提出一些看法,以期为疫情防控期污水处理厂的安全稳定运营提供一定参考与指导。

## 1 NaClO 对污泥硝化菌活性的影响显著<sup>[5-6]</sup>

以污水厂污泥和实验室污泥为例,考察 NaClO 对污泥硝化菌活性的影响。NaClO 有效氯投加量分别为 1、2、4、8 mg/(gSS·d) 时对两种污泥的呼吸速率影响情况见图 1<sup>[8]</sup>。图中  $SOUR_e$ 、 $SOUR_n$ 、 $SOUR_c$ 、 $SOUR_{enc}$  分别为内源呼吸、硝化菌呼吸、异养菌呼吸及总呼吸活性。

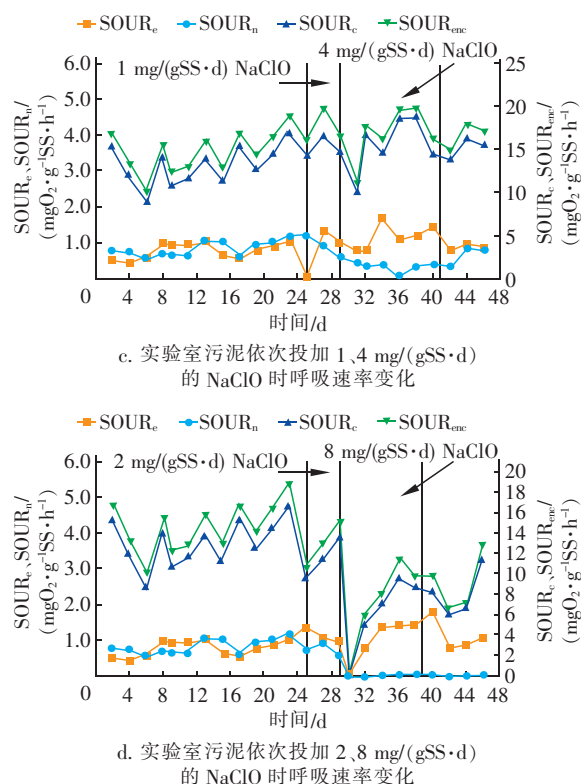
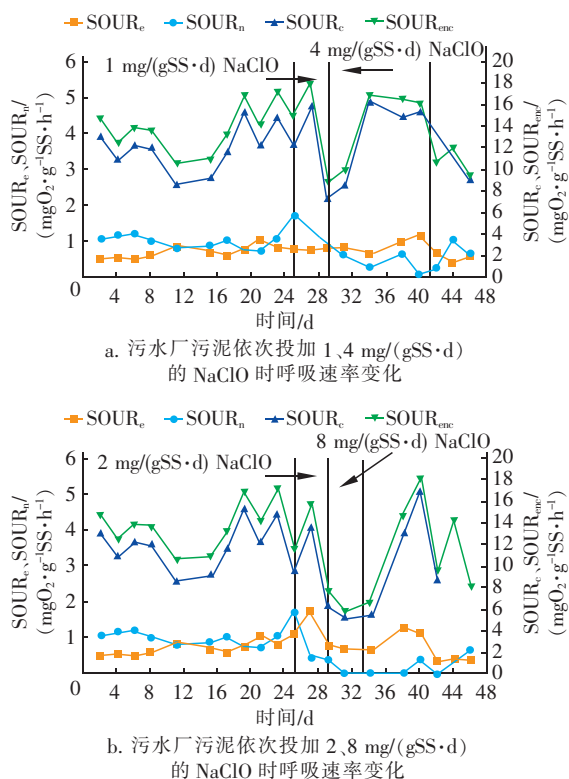


图1 NaClO 投加量对呼吸速率的影响

Fig. 1 Influence of NaClO dosage on respiration rate

图1表明,低剂量[有效氯为 1、2 mg/(gSS·d)] 的 NaClO 不会对系统造成影响;当有效氯含量增大至 4 mg/(gSS·d) 时,会对自养菌呼吸速率造成一定影响,但持续培养又会使活性逐渐恢复;当有效氯含量增大至 8 mg/(gSS·d) 时,功能性菌群的呼吸速率均会受到较大影响,硝化菌活性  $SOUR_n$  降至 0,继续培养依然可以恢复,但恢复的时间将会更长。

图1中有两点信息值得注意:①相比异养菌,自养菌对 NaClO 的敏感性更强,因此更易受到 NaClO 抑制,当有消毒剂进入污水厂时,需着重关注硝化效果。②就硝化细菌而言,实际污水厂污泥比实验室污泥表现出更强的耐冲击能力。

## 2 NaClO 对污泥存活率的影响<sup>[8]</sup>

图2为 NaClO 投加量对污水厂和实验室污泥微生物存活率的影响情况。由图2可知,两种污泥微生物呼吸速率基本一致,投加低剂量 NaClO 时,污水厂污泥存活率小幅度下降,实验室污泥则小幅度上升,说明低浓度 NaClO 对活性污泥的影响较小,当加氯量提高至 4 mg/(gSS·d) 时,污泥活细胞

比例明显降低,污水厂污泥存活率从 0.62 降至 0.42,实验室污泥存活率从 0.56 降至 0.48,污泥中死亡微生物较多,继续提高加氯量至  $8 \text{ mg}/(\text{gSS} \cdot \text{d})$ ,污泥活细胞比例再次降低,污水厂污泥存活率降至 0.39,而实验室污泥存活率则降至 0.44。停止投加后,两种污泥存活率均有所上升。虽然两种污泥之间情况稍有差异,但变化趋势一致,说明  $\text{NaClO}$  对微生物影响较大,但是短时的较低剂量的  $\text{NaClO}$  抑制是可逆转的。此结果表明,当生化系统受到一定的冲击后,应尽早采取措施,系统有望恢复正常。

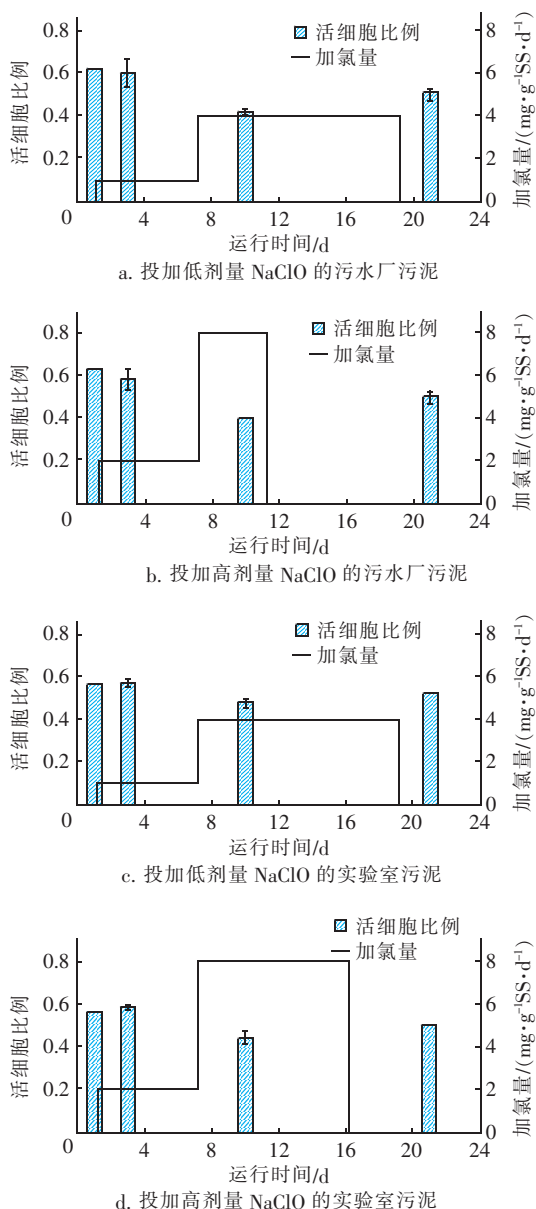


图2  $\text{NaClO}$  投加量对微生物存活率的影响

Fig. 2 Influence of  $\text{NaClO}$  dosage on the survival rate of microorganism

### 3 内源呼吸速率上升是重要的预警信号<sup>[2]</sup>

图3为持续投加过量  $\text{NaClO}$  [有效氯负荷为  $15 \text{ mg}/(\text{gSS} \cdot \text{d})$ ] 时的呼吸图谱变化规律。3天内,  $\text{SOUR}_{\text{enc}}$  即下降至原来的 40% 左右,功能性菌群的呼吸速率受到严重影响。其中,自养菌最为严重,  $\text{SOUR}_{\text{n}}$  下降至 0, 完全失去活性,污泥有解体的趋势。对比投加前后的镜检结果,发现絮体比较松散,体积较大,絮凝效果差。

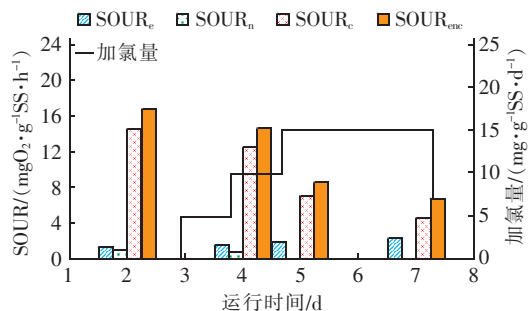


图3 过量的  $\text{NaClO}$  对呼吸速率的影响

Fig. 3 Influence of excessive  $\text{NaClO}$  dosage on respiration rate

表1为本阶段末系统进、出水水质情况,此时系统 COD 去除率为 57%,氨氮和总磷则完全没有去除,出水总磷甚至高于进水。值得一提的是,抑制过程中比内源呼吸速率迅速增大,即从  $1.22 \text{ mgO}_2/(\text{gSS} \cdot \text{h})$  上升至  $2.32 \text{ mgO}_2/(\text{gSS} \cdot \text{h})$ ,表明比内源呼吸速率的上升并不意味着微生物活性的上升,可能是系统崩溃的前兆。

表1 投加过量  $\text{NaClO}$  的进、出水水质情况

Tab. 1 Influent and effluent quality at excessive  $\text{NaClO}$  dosage

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	氨氮	亚硝氮	硝氮	总磷
进水	600	65	0	2.2	6.0
出水	257	65	0.1	1.5	9.9

笔者课题组提出了以内源呼吸比  $\text{RI}$  ( $\text{RI} = \text{SOUR}_{\text{e}}/\text{SOUR}_{\text{enc}}$ ) 作为系统受冲击情况的衡量指标。实验室条件下,首先采用低 DO 诱导丝状菌膨胀过程产生低 DO 环境,之后通过投加  $\text{NaClO}$  控制污泥膨胀,产生了  $\text{NaClO}$  冲击环境,具体结果见图4和图5。由图4可知,DO 降低前,RI 值基本稳定在  $0.042 \pm 0.008$ ; DO 开始降低,RI 值立即上升至 0.100,随后又恢复至  $0.065 \pm 0.012$ ,但仍高于正常 DO 时的水平。当开始投加  $\text{NaClO}$  时,RI 值快速上升;随着投加量的增加,RI 值一度高达 0.35。此时,

污泥微生物的生长受到严重威胁,并且出水水质发生严重恶化,功能性菌群呼吸速率降幅明显,污泥活性较差,观察污泥形态发现此时的污泥絮体松散,絮凝效果差,有解体的趋势。由此可见,RI 值变化与污泥活性变化高度吻合。

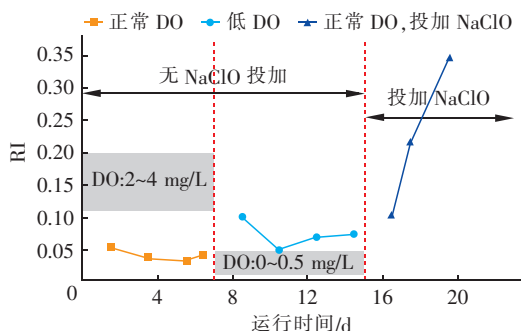


图4 实际冲击条件下恢复指数 RI 变化情况

Fig. 4 Variations of recovery index (RI) under shocking conditions

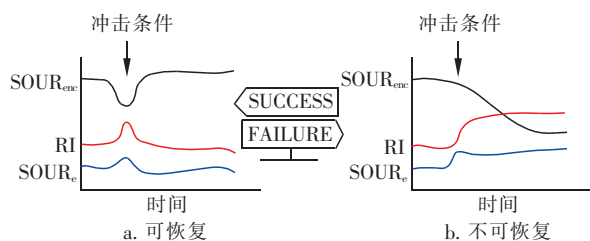


图5 系统可恢复性判断的理论示意

Fig. 5 Theoretical graph of system recoverability judgment

RI 值变化可以作为污泥是否受到外界环境冲击的判断依据:当 RI 值突然增大并维持一定时间时,微生物处于生理适应期;当 RI 值增大后逐渐平稳或减小,说明微生物可以适应新环境;当 RI 值持续增大,说明活性污泥中功能性菌群的活性正大幅降低,微生物可能适应不了新环境,面临着絮体解体甚至系统崩溃的重大风险。

当现场无法测试 OUR 时,操作人员也可按照曝气池的溶氧变化对 RI 值进行简单的评估。当曝气池因接纳消毒液产生冲击且微生物无法适应时,微生物由于内源呼吸需氧量增大,将会导致曝气池溶氧长期维持较低水平,若溶氧下降明显且时间较长(图5中不可恢复工况),往往意味着需要采取应急措施以维持微生物的活性及正常的絮体结构。

#### 4 日常运行关注要点与应对措施

##### 4.1 日常运行关注要点

① NaClO 对自养菌的影响较大,为保证系统

硝化反应的正常进行,有效氯负荷不应超过  $4 \text{ mg}/(\text{gSS} \cdot \text{d})$ 。以曝气池污泥浓度为  $3000 \text{ mg/L}$ 、水力停留时间为  $4 \text{ h}$  为例,若进水氯浓度超过  $2 \text{ mg/L}$ ,系统将面临较大风险,需采取一定应对措施。就一般市政污水处理厂而言,由于调节池和管网收集系统均有较长的停留时间,次氯酸钠在进入生化系统前,有充足的时间与污水中的还原性物质(COD、氨氮等)反应而被分解,因此进厂余氯浓度较小,其影响有限。但对于氯消毒排污点离污水处理厂较近的工业企业的污水处理站而言,若次氯酸钠来不及分解,达到上述浓度时对生化系统的冲击则不容忽视。

② 呼吸速率的上升有时候并不意味着微生物活性的上升,可能是系统崩溃的前兆。因此,现场操作人员需加强对污泥活性的监测,冲击情况下需警惕耗氧速率 OUR 长期维持在较高水平。具体而言,既可以通过测试 OUR 来判断,也可通过曝气池溶氧水平急剧下降且长期处于较低水平(相对于正常工况)的时间来间接评估。需要指出的是,如果冲击剧烈则会导致细菌大量死亡,耗氧量急剧减少,溶氧快速上升,系统面临崩溃。

③ 采用 RI 值作为微生物受到冲击后能否恢复的判别指标。如 RI 值突然上升,说明微生物受到了冲击;RI 值上升后逐渐恢复,说明微生物可以通过生理适应性调整恢复活性;如 RI 值持续增大,说明活性污泥中功能性菌群的活性大幅降低,微生物可能适应不了新环境而面临系统崩溃的风险。

##### 4.2 应对措施

① 当进水有效氯负荷超过  $4 \text{ mg}/(\text{gSS} \cdot \text{d})$  时或 RI 值长时间维持在较高水平(曝气池溶氧急剧下降且维持时间长),表明系统已经受到冲击,需要考虑在调节池投加亚铁将其还原<sup>[9]</sup>,生成产物具有混凝效果以便维持絮体的稳定结构,避免硝化菌流失;也可在调节池加入亚硫酸钠等还原剂,同样可以起到将次氯酸盐还原的作用<sup>[10]</sup>。

② 倘若已经检测到系统受到冲击,建议减少排泥,加大污泥及混合液回流。一方面,可以提高生化系统污泥浓度;另一方面,NaClO 浓度会在处理过程中沿程降低。因此,回流液会对进水中有效氯起到一定稀释作用<sup>[11]</sup>。

③ 絮体解体和污泥流失是系统应对高浓度 NaClO 面临的核心问题。因此采用絮凝剂特别是亚铁絮凝剂有助于解决这一关键问题。文中所提出的



应对措施只考虑了氯对生化系统中微生物的影响,并未考虑污水厂出水对氯浓度的要求。

#### 参考文献:

- [1] Li Z H, Hang Z Y, Zhang Q, *et al.* Tuning of activated sludge in winter based on respirogram profiles under standard and site temperatures[J]. *J Environ Sci*, 2019, 79(5): 330–338.
- [2] Li Z H, Ma Z B, Yu H Q. Respiration adaptation of activated sludge under dissolved oxygen and hypochlorite stressed conditions[J]. *Bioresour Technol*, 2018, 248: 171–178.
- [3] Li Z H, Zhu Y M, Zhang J, *et al.* Evaluation of robustness of activated sludge using calcium-induced enhancement of respiration[J]. *Bioresour Technol*, 2018, 253: 55–63.
- [4] 董晓宇, 李志华, 杨成建, 等. 不同曝气控制方式下的活性污泥呼吸速率特征研究[J]. *工业水处理*, 2017, 37(11): 50–53.  
Dong Xiaoyu, Li Zhihua, Yang Chengjian, *et al.* Research on the characteristics of activated sludge respiration rate in different aeration control modes[J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(11): 50–53 (in Chinese).
- [5] 李志华, 杨振鼎, 杨成建, 等. NaClO 对膨胀污泥中微生物的影响[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(7): 40–44.  
Li Zhihua, Yang Zhending, Yang Chengjian, *et al.* Effect of NaClO on microorganisms in bulking sludge[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(7): 40–44 (in Chinese).
- [6] 马智博, 李志华, 杨成建, 等. 低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析[J]. *环境科学*, 2017, 38(9): 3801–3806.  
Ma Zhibo, Li Zhihua, Yang Chengjian, *et al.* Analysis of respirogram characteristics of filamentous bulking caused by low dissolved oxygen[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(9): 3801–3806 (in Chinese).
- [7] 张亚伟, 李志华, 杨成建, 等. 呼吸图谱表征活性污泥微生物的休眠与流失[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(11): 7–11.  
Zhang Yawei, Li Zhihua, Yang Chengjian, *et al.* Indication of dormancy and loss of activated sludge microorganisms using respirogram[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(11): 7–11 (in Chinese).
- [8] 马智博. 污泥膨胀及控制过程中污泥微生物生长状态
- 态的评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- Ma Zhibo. Estimation of the Growth State of Activated Sludge during Sludge Bulking and Its Control Periods [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017 (in Chinese).
- [9] 苗群, 邢美燕, 刘志强, 等. 含次氯酸钠水产品加工废水预处理的试验研究[J]. *工业水处理*, 2005, 25(3): 29–31.  
Miao Qun, Xing Meiyun, Liu Zhiqiang, *et al.* Study on the pretreatment of aquatic product wastewater containing sodium hypochlorite[J]. *Industrial Water Treatment*, 2005, 25(3): 29–31 (in Chinese).
- [10] 杨树利. 含次氯酸钠废水处理技术[J]. *化工安全与环境*, 2011(12): 18–19.  
Yang Shuli. Sodium hypochlorite containing wastewater treatment technology [J]. *Chemical Safety & Environment*, 2011(12): 18–19 (in Chinese).
- [11] 李晓艳, 尹桂兰, 秦海生. 炼化污水处理场活性污泥系统受冲击的原因和对策[J]. *内蒙古石油化工*, 2016, 42(1/2): 61–62.  
Li Xiaoyan, Yin Guilan, Qin Haisheng. Causes and countermeasures of shock on activated sludge system in refinery sewage treatment plant [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2016, 42(1/2): 61–62 (in Chinese).



**作者简介:**李志华(1976–),男,湖南郴州人,博士,教授,主要研究方向为污水处理理论与技术,长期工作在污水处理第一线,为我国百余座污水处理厂的事故恢复、应急处理与节能降耗提供了技术服务,开发的《污水处理智慧运行工作站技术》为国家环保重点实用技术,《污水处理精细化运行管理技术》被列入国家水污染防治先进技术目录。

**E-mail:** lizhihua@xauat.edu.cn

**收稿日期:** 2020–02–05