

邓仁健, 张金松, 杨靖波, 等. 2013. 高无机悬浮物进水对城市污水厂处理效果的冲击影响及机理研究[J]. 环境科学学报, 33(6): 1605-1610
Deng R J, Zhang J S, Yang J B, *et al.* 2013. The effect of high inorganic suspended solids shock loading on full-scale WWTP removal performance [J].
Acta Scientiae Circumstantiae, 33(6): 1605-1610

高无机悬浮物进水对城市污水厂处理效果的冲击影响及机理研究

邓仁健^{1,2}, 张金松^{1,3,*}, 杨靖波³, 曲志军³

1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院环境科学与工程研究中心, 深圳 518055

2. 湖南科技大学土木工程学院, 湘潭 411201

3. 深圳市水务(集团)有限公司, 深圳 518030

收稿日期: 2012-09-29

修回日期: 2013-01-16

录用日期: 2013-01-17

摘要: 针对我国南方城市污水厂经常出现的高无机悬浮物(SS)负荷冲击问题, 在分析其进水水质特性的基础上, 研究了高无机 SS 负荷冲击对活性污泥系统的污泥特性、污泥活性、出水水质和去除效率等方面的影响。结果表明: 高无机 SS 负荷冲击条件下, 剩余污泥的含水率会变小, 排泥量是主要的控制参数, 应减小冲击初期剩余污泥排放体积; 活性污泥的硝化速率、反硝化速率、释磷速率和吸磷速率分别比正常情况下降了 30.5%、36.7%、35.0% 和 28.1%; COD 去除效率不会改变, SS、TN 和 NH_4^+ -N 的去除效率会降低, 但能够提高 TP 的去除效率。研究结果可为制定相应的工艺对策和措施奠定基础。

关键词: 高无机 SS; 冲击负荷; MSBR 工艺; 工艺对策

文章编号: 0253-2468(2013)06-1605-06

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

The effect of high inorganic suspended solids shock loading on full-scale WWTP removal performance

DENG Renjian^{1,2}, ZHANG Jinsong^{1,3,*}, YANG Jingbo³, QU Zhijun³

1. Environmental Science and Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055

2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201

3. Shenzhen Water (Group) Co. Ltd., Shenzhen 518030

Received 29 September 2012;

received in revised form 16 January 2013;

accepted 17 January 2013

Abstract: The effect of high inorganic suspended solids shock loading on activated sludge characteristics, sludge activity, effluent quality and removal efficiency of a full-scale municipal wastewater treatment plant was studied based on analysis of the influent water quality in a wastewater treatment plant in south China. The experimental results showed that the water content of surplus sludge decreased under high inorganic suspended solids shock loading, and the surplus sludge was the main parameter. Therefore, the discharge of surplus sludge volume should be reduced on the early stage of the shock loading. The nitrification rate, denitrification rate, phosphorus release rate and phosphorus uptake rate decreased by 30.5%, 36.7%, 35.0% and 28.1%, respectively, comparing to normal conditions. The COD removal efficiency kept constant the SS, TN and NH_4^+ -N removal efficiency were reduced, and the TP removal efficiency was improved under the same condition. The process and countermeasures including improving the gas/water ratio, adjusting the SBR tank run model, reducing the sludge discharge volume and the sludge dewatering without coagulant could improve the removal performances of the activated sludge system. The result of the study could be used as a basis for solving the problem of high inorganic suspended solids shock loading.

Keywords: high inorganic suspended solids; shock loading; modified sequencing batch reactor (MSBR) process; process countermeasures

1 引言 (Introduction)

城市污水厂的进水负荷变化对处理效果、运行

控制有着重要的影响 (刘艳臣, 2008), 许多学者利用小试实验研究了 NH_4^+ -N (Drzewicki *et al.*, 2011)、有机物 (Drzewicki *et al.*, 2011, Hu *et al.*, 2011) 和

基金项目: 深圳水务(集团)有限公司自选课题; 国家自然科学基金(No. 51174090)

Supported by the Optional Subjects of Shenzhen Water (Group) Co. Ltd and the National Natural Science Foundation of China (No. 51174090)

作者简介: 邓仁健(1980—), 男, E-mail: 800912deng@sina.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: zhangjinsong@waterchina.com

Biography: DENG Renjian(1980—), male, E-mail: 800912deng@sina.com; * Corresponding author, E-mail: zhangjinsong@waterchina.com

有毒物质(吴永昌,2010)等污染物冲击负荷对处理效果的影响,而对高悬浮物(SS)冲击负荷的研究很少.我国南方许多城市的污水管网为合流制,因而污水厂进水呈现高SS、低COD的特点(付小平等,2008).与此同时,随着城市面积的不断扩大,污水管网范围内的工程建设活动增加,一些施工单位将基坑排水、渣土车洗车废水等含有高浓度无机物的废水非法排入城市污水厂管网,不仅造成了城市污水管网的堵塞,而且严重影响了城市污水厂的正常运行.由于实际污水厂存在取样困难、重要数据缺少或者缺乏代表性等方面的原因(Puig *et al.*, 2010),因此,有关高无机SS负荷冲击对城市污水厂处理效果、污泥特性等方面影响评价的研究鲜有报道.基于此,本文以某实际污水厂为研究对象,针对运行过程中多次突然持续升高的无机SS冲击负荷问题,以系统处理功能稳定为目标,在分析高无机SS水质特征的基础上,系统研究该情况对污泥脱水性能、污泥活性、出水水质及去除效率等方面的冲击影响及机理,以期采取相应的工艺对策和措施提供参考.

2 实验装置和方法 (Experimental apparatus and methods)

2.1 实验污水厂

该城市污水厂采用7池MSBR工艺,其工艺原理和运行方式详见文献(Deng *et al.*, 2012).污水厂处理规模为 $12.0 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,分为3组,受水量限制,实际运行两组,旱季单组处理水量在 $2.8 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 之间.设计总水力停留时间为14.3 h,设计好氧水力停留时间为5.6 h,好氧池无机械搅拌器(利用曝气搅拌),其他处理单元均设有浮筒搅拌器.处理后水质要求达到一级B标准后排入附近水体.该污水厂于2011年6月和12月分别出现高无机SS负荷冲击问题,在第1次高无机SS负荷冲击问题的基础上,本文对第2次高无机SS负荷冲击问题进行研究.

2.2 实验方法

根据以往的经验、进水中无机SS浓度变化和工艺调整策略,分3个阶段进行分析总结:第1阶段,正常进水且系统脱氮除磷效果稳定(0~7d);第2阶段,高无机SS进水且系统处理效果不稳定(8~23d);第3阶段,进水趋于正常阶段且系统处理趋于稳定(24~30d).正常进水时该污水厂按照“A/O+SBR”方式运行,主要工艺运行参数为:浓缩污泥

回流比0.5,平均气水比为4.8:1(DO为2~4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),污泥浓度为2200~2600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,污泥龄为10 d左右,SBR池按照“缺氧40 min+曝气50 min+预沉淀30 min+出水120 min”的方式运行.实验运行的第7 d晚上发现高无机SS(黄泥水)进水,第10 d,出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN和SS升高,MLVSS很低.经过分析后,第11 d对运行参数进行如下调整:①提高曝气强度,将气水比由4.8:1提高至5.8:1;②将MSBR工艺的SBR池按照“缺氧0 min+曝气80 min+预沉淀40 min+出水120 min”的方式运行;③减少剩余污泥排放体积;④污泥脱水不投加混凝剂并将污泥脱水液回流至进水处.第23 d,进水SS趋于正常进水,出水水质基本稳定,将SBR池的运行方式调整为“缺氧30 min+曝气50 min+预沉淀40 min+出水120 min”,污泥脱水的混凝剂按正常情况下一半的量投加,其余运行参数不变.

2.3 分析方法

每天取进出水的24 h混合样测定pH、SS、COD、TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和TP等指标;每天取好氧池的瞬时污泥样测定SV、 SVI_{30} 、MLSS、MLVSS;每天取污泥脱水前后的瞬时样测定含水率和有机物含量;进水加测总铁和铝离子含量,以上所有的分析方法均采用国家标准方法(国家环保总局,2004).每个星期加测剩余污泥脱水后TP含量,测试方法见文献(中华人民共和国建设部,2006);取第5、15和30 d好氧池的污泥进行活性测试,相关测试方法见文献(Garc *et al.*, 2010).相关的进水量、出水量、排泥量、曝气量、溶解氧均来自在线监测仪.

3 结果及讨论 (Results and discussion)

3.1 进水水质特征

进水污染物的负荷变化和组成情况会影响污水厂处理系统的去除效率和稳定性(Puig *et al.*, 2010).实验期间该污水厂进水水质特征和组成见表1.

由表1可知,不同时间段进水中SS浓度变化非常大,高SS进水期间(第2阶段),SS的平均浓度为 $(748.9 \pm 499.9) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,远超过一般城市污水厂SS的设计值(150~300 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),为正常时期SS浓度 $(147.2 \pm 48.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 的5.1倍,可见SS冲击负荷非常明显.不同时间段进水的COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN和TP浓度变化不大,且未随SS升高而升高,但进水中总铁和铝离子随SS升高而升高,且远高于正常

值. 正常进水 COD/TSS 比值为 1.453, 与 Henze 等 (1987) 的研究结论相近; 随着高 SS 进入污水厂, COD/TSS 比值下降到 0.419, 且 COD/TSS 比值与进水 SS 浓度的相关性显著 ($r = 0.83, p < 0.01$), 充分证明进水 SS 的主要成分为无机物 (Puig *et al.*,

2010). 此外, 不同时间段进水 COD/TN 和 COD/TP 比值分别在 7.6 ~ 10.8 和 55.1 ~ 69.1 之间, C:N:P 比能满足微生物的生长需求 (施汉昌等, 2011). 总体而言, 研究期间该污水厂的进水充分体现了城市污水厂经常面临的高无机 SS 负荷冲击问题.

表 1 进水水质组成和特征

Table 1 Influential characteristics and composition

进水阶段	SS /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NH_4^+-N /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总铁* /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Al^{3+} * /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD/TSS	COD/TN	COD/TP
第 1 阶段	147.2 ± 48.8	226.4 ± 37.8	21.6 ± 1.6	28.3 ± 2.9	3.55 ± 0.71	0.56	1.32	1.453	7.6	60.2
第 2 阶段	748.9 ± 499.9	313.5 ± 80.6	22.2 ± 1.7	28.9 ± 3.2	5.69 ± 2.03	2.60	13.8	0.419	10.8	55.1
第 3 阶段	306.1 ± 61.3	349.8 ± 49.4	23.9 ± 1.3	32.4 ± 2.1	5.06 ± 0.70	—	—	0.963	10.8	69.1

注: * 表示 3 次水样的平均值; “—” 表示未测定.

3.2 高无机 SS 负荷冲击对污泥特性的影响

城市污水处理系统的污泥特性及活性与进污水水质有关, 其性能好坏关系到处理效果和运行成本等. 污泥特性主要包括污泥浓度、沉降性能和含水率等指标, 其中, 沉降性能可以用 SVI_{30} 等表示, 污泥活性可用最大硝化速率、反硝化速率、厌氧释磷速率、好氧吸磷速率等指标来表征.

3.2.1 对污泥浓度和沉降性能的影响

图 1 给出了不同 SS 负荷条件下, SVI_{30} 、污泥含水率、MLSS、MLVSS、污泥龄 (SRT) 与排泥量等指标的变化规律. 在高无机 SS 负荷冲击下, 污泥的 SVI_{30} 由正常值 $45 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 快速下降至 $15 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 1a). 剩余污泥和脱水后污泥含水率分别由 98.5% 和 78.4% 下降至

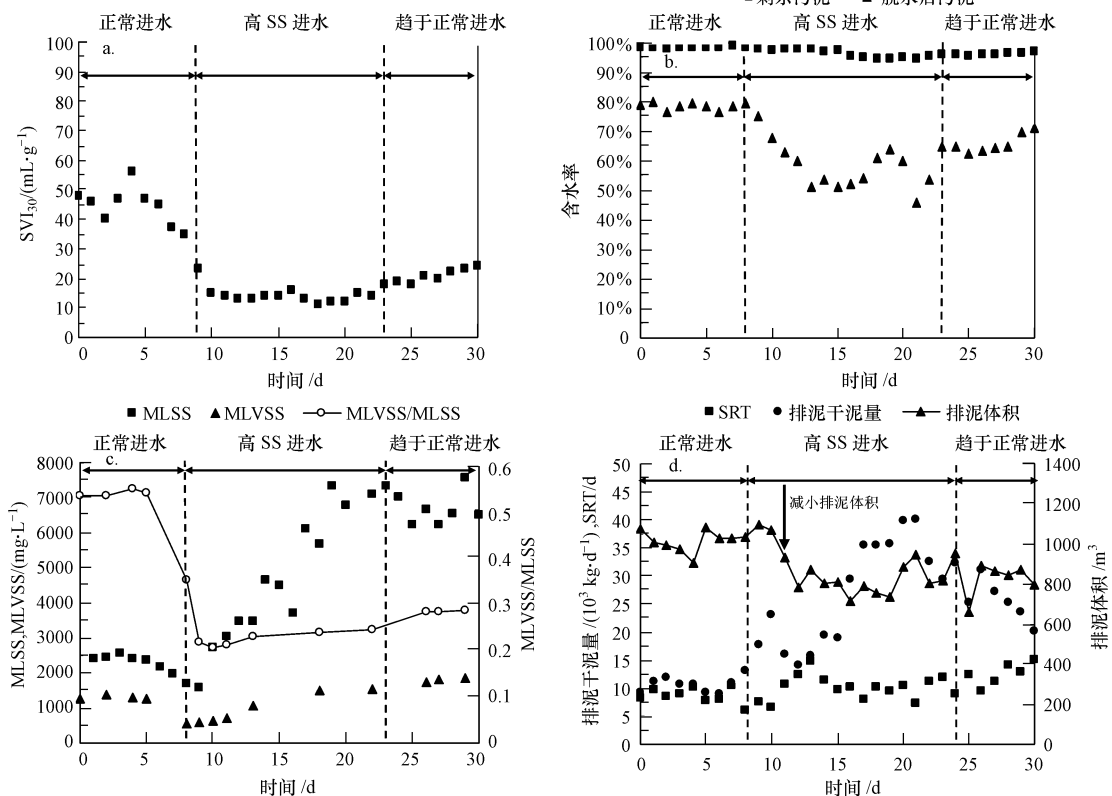


图 1 不同 SS 进水条件下污泥特性变化情况 (a. SVI_{30} , b. 污泥含水率, c. MLSS、MLVSS 及 MLVSS/MLSS, d. 排泥量和污泥龄)

Fig. 1 Variation of sludge characteristics under different SS loadings (a. SVI_{30} , b. water content of before and after sludge dewatering, c. MLSS, MLVSS and MLVSS/MLSS, d. excess sludge and SRT)

97.4% 和 57.4% (未加混凝剂), 且 MLSS 越高剩余污泥及脱水后污泥含水率越低 (图 1b). MLSS 先略微减小然后快速上升, 而 MLVSS 由正常时的 $1300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小到高无机 SS 冲击初期的 $580 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在工艺调整后缓慢升至 $1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, MLVSS/MLSS 由正常时的 0.45 下降至高无机 SS 冲击初期的 0.21 (图 1c). 正常进水 (1~7 d) 和高 SS 冲击初期 (8~10 d), 剩余污泥排放体积均在 1000 m^3 左右, 排泥干泥量分别为 $10.4 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $17.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, 系统的污泥龄由 9.8 d 减小至 6.5 d (图 1d). 可见, 在高无机 SS 负荷冲击下, 污泥沉降速度加快, 压缩沉淀显著, 剩余污泥的含固率变大, 脱水性能发生改变, 如果不控制剩余污泥排放体积, 易使 MLVSS 被排出, 造成系统的 MLSS 很高而 MLVSS 很低的极端情况 (MLVSS/MLSS 极小). 因此, 高无机 SS 负荷冲击条件下, 如何通过工艺控制来防止 MLVSS/MLSS 太小的极端情况是非常重要的, 排泥量是最重要的控制参数, 特别是高无机 SS 负荷冲击初期需要特别控制剩余污泥的排放体积, 否则会造成 MLVSS 太低, 进而影响处理效果.

3.2.2 对污泥活性的影响 根据文献 (Garc *et al.* ,

2010) 测定的不同 SS 进水条件下 (第 1 阶段) 污泥活性参数和剩余污泥含磷量见表 2. 由表 2 可知, 正常进水条件下该污水厂的各项污泥动力学参数与文献值 (王闯等, 2003; 王洪臣等, 2009) 接近, 说明污泥活性正常. 高无机 SS 负荷冲击条件下 (第 2 阶段), 硝化、反硝化、释磷和吸磷速率分别比正常情况下降了 30.5%、36.7%、35.0% 和 28.1%, 可见, 高无机 SS 负荷冲击对污泥的活性有较大的负面影响. 其原因可能有两点: ① 由于工艺调整及 MLVSS 较低, 微生物的生存环境发生了较大的改变; ② 进水中含有大量的铝离子 (表 1, 折合硫酸铝可达 $82.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 对微生物产生抑制作用. Clark 等 (1997) 和 Liu 等 (2011) 认为铝离子对硝化和反硝化反应有抑制作用, 且随着铝离子含量的增加而增加, 并随投加时间的延长抑制作用增强, 停止投加药剂后, 硝化作用得到恢复, 本研究硝化和反硝化速率变化趋势 (表 2) 符合这一规律. 高无机 SS 负荷冲击下, 释磷与吸磷速率均下降可能与进水中含有大量铝离子有关, de Hess 等 (2001) 研究认为, 铝离子会对生物除磷带来负面影响. 可见, 高无机 SS 中所含的铝离子和铁会抑制污泥的活性.

表 2 不同 SS 进水条件下污泥活性参数和含磷量情况

Table 2 Parameters of the sludge activity and phosphorus content of sludge under different SS loadings

进水阶段	硝化速率 $/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	反硝化速率 $/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	释磷速率 $/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	吸磷速率 $/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	剩余污泥含磷量
第 1 阶段	0.141	0.031	0.040	0.032	1.78%
第 2 阶段	0.098	0.019	0.026	0.023	0.15%
第 3 阶段	0.112	0.025	0.032	0.028	1.47%
文献值	0.169~0.196	0.017~0.022	0.053	0.046	2%~4%
A_1	30.50%	36.70%	35.00%	28.10%	91.60%
A_2	20.60%	16.70%	20.00%	12.50%	17.40%

注: 硝化速率以每 kg VSS 中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 计, 反硝化速率以每 kg VSS 中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 计, 释磷速率和吸磷速率均以 kg VSS 中的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 计; 文献值源于文献 (王闯等, 2003; 王洪臣等, 2009); A_1 为第 2 阶段与第 1 阶段的差值与第 1 阶段相应值之比, A_2 为第 3 阶段与第 1 阶段的差值与第 1 阶段相应值之比.

3.3 高无机 SS 负荷冲击对出水水质及去除效率的影响

图 2 给出了不同 SS 进水条件下各种污染物的进、出水浓度及去除效率. 由于进水 SS 很高, 不同 SS 负荷条件下, 出水 SS 去除效率并没有明显的变化; 在高无机 SS 负荷冲击下, 出水 SS 由 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 快速上升到 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右 (最高为 $38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 然后下降 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2a), 达不到一级 B 标准的要求. 在高无机 SS 负荷冲击初期虽然污泥的沉降速度

很快, 但絮体结构松散, 细小的无机颗粒难沉淀, 因此, 出水的 SS 不断升高. 随着工艺的调整和 SS 负荷减小, MLVSS/MLSS 增大, 污泥絮体变得密实, 在静电吸附、网捕扫卷等方面的作用下, 细小悬浮颗粒能够沉淀, 出水的 SS 下降.

不同 SS 负荷条件下, 出水的 COD 和去除率没有明显的变化 (图 2b), 均能达到一级 A 标准的要求. 在高无机 SS 负荷冲击下, COD 负荷最大为 $1.38 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (以 MLVSS 计), 但系统的实际水力停

留时间为 19.6 h. 此外,如果只去除 COD,污泥龄为 1~3 d 就可以满足要求(施汉昌等,2011). 因此,高无机 SS 负荷冲击初期,虽然会降低 MLVSS 浓度,但

污泥龄为 6.5 d,对出水的 COD 和去除率未产生明显影响.

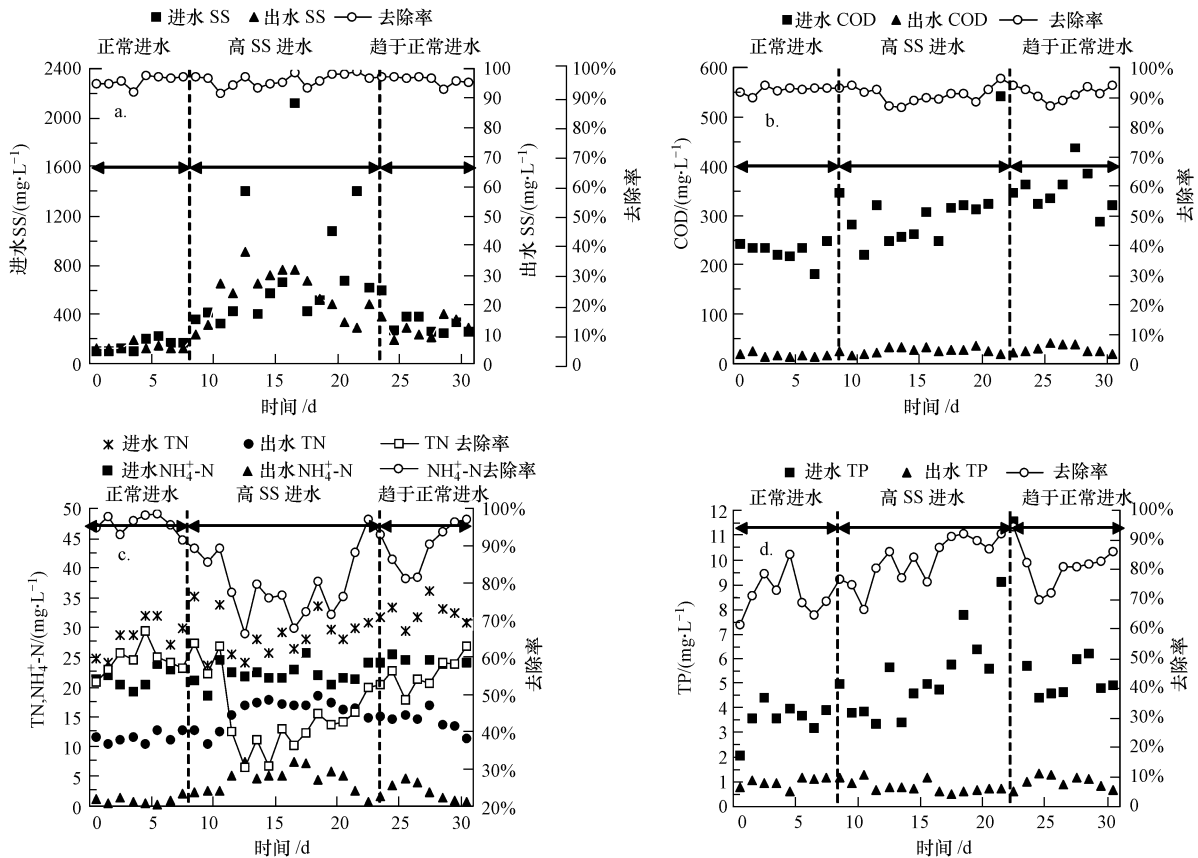


图 2 不同 SS 进水条件下系统的各污染物去除效率(a. SS, b. COD, c. TN 和 NH_4^+-N , d. TP)

Fig. 2 Removal characteristics of SS (a), COD(b), TN, NH_4^+-N (c), and TP (d) under different SS loadings

高无机 SS 负荷冲击条件下,出水 TN、 NH_4^+-N 分别由 11.48、0.91 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 快速上升到 15.95 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (最高为 18.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、4.97 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (最高为 7.37 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (图 2c),未能达到到一级 A 标准. 因此,对出水 TN 和 NH_4^+-N 浓度和去除效率均有负面影响. 实验过程中好氧池的溶解氧和供气量情况见图 3,正常进水与高无机 SS 负荷冲击期间好氧池溶解氧变化不大,且溶解氧在 1.8~4.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,因此,基本可排除由溶解氧太低导致硝化效果差的原因. 造成 TN 和 NH_4^+-N 浓度升高的原因主要以下几点:①由前面分析可知,进水含有大量的铝离子抑制硝化和反硝化反应的进行;②高无机 SS 负荷冲击初期,由于过量排泥导致 MLVSS 浓度很低(图 1a),污泥龄只有 6.5 d(图 1d)不能满足硝化反应的最小污泥龄(施汉昌等,2011);③高无机 SS 负荷冲击后期,好氧池的 MLSS 浓度太高,单纯靠曝气

来实现搅拌混合,效果不理想,影响氧传递效率,也可能会降低硝化效果.

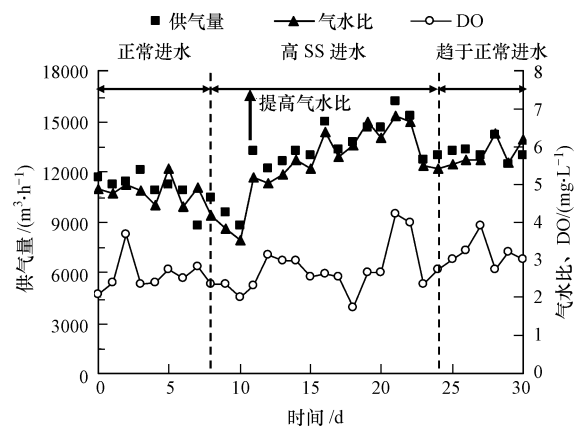


图 3 不同 SS 进水条件下供气量、气水比和 DO 的变化

Fig. 3 Variation of gas volume, gas/water ratio and DO under different SS loadings

由图 2d 可知,在正常和高无机 SS 负荷条件下,出水 TP 由 $0.98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低至 $0.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相应的去除率由 71.5% 升高至 85.9%,可见,高无机 SS 负荷冲击有利于 TP 的去除.造成该现象的原因有两个方面:①高负荷初期大量的排泥,导致系统的 MLVSS 较低有利于生物除磷;②高无机 SS 进水中含有大量的铁和铝离子(实测总铁和铝离子分别为 $2.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $13.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,见表 1),具有明显的化学除磷作用.

4 结论(Conclusions)

1)在高无机 SS 负荷冲击下,污泥沉降速度加快,压缩沉淀显著,剩余污泥的含固率增加,排泥量是主要的控制参数,如果不控制冲击初期剩余污泥排放体积,易使 MLVSS 被排出,造成系统的 MLSS 很高而 MLVSS 很低的极端情况(MLVSS/MLSS 极小情况),进而影响处理效果.

2)在高无机 SS 负荷冲击下,由于环境的改变和铝离子的抑制作用会使污泥的活性减弱,本研究条件下硝化、反硝化、释磷和吸磷速率分别比正常情况下降了 30.5%、36.7%、35.0% 和 28.1%.

3)高无机 SS 负荷冲击下,处理系统对 COD 去除率影响不大,对 SS、TN 和 NH_4^+-N 去除率有较大的负面影响,但能够提高 TP 的去除效率.

责任作者简介:张金松(1963—),男,博士生导师,主要研究方向为城镇水处理技术及理论. E-mail: zhangjinsong@waterchina.com.

参考文献(References):

Clark T A, Stephenson T, Pearce S. 1997. Phosphorus removal by chemical precipitation in a biological aerated filter[J]. *Water Res*, 23(10): 2557-2563

de Hess D W, Wentzel M C, Ekama G A. 2001. The use of simultaneous chemical precipitation in modified activated sludge systems exhibiting biological excess phosphate removal Part 5: experimental periods using a ferrous-ferric chloride blend[J]. *Water SA*, 27(2): 117-134

Deng R J, Zhang J S, Qun Z J. 2012. Study on the enhanced bio-denitrification in a full-scale WWTP with MSBR process[A]. 2nd International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development[C]. Jilin. 1551-1555

Drzewicki A, Kulikowska D. 2011. Limitation of sludge biotic index application for control of a wastewater treatment plant working with shock organic and ammonium loadings [J]. *European Journal of Protistology*, 47(4): 287-294

付小平,何晖,李国荣,等. 2008. 超低进水有机物浓度、高 SS 污水厂运行控制[J]. *水处理技术*, 34(4): 77-79

国家环保总局. 2004. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社

Garct A F, Usach J R, Ferrer A S J. 2010. Calibration of denitrifying activity of polyphosphate accumulating organisms in an extended ASM2d model[J]. *Water Research*, 44(5): 5284-5297

Henze M, Grady C P L, Gujer W, et al. 1987. Activated sludge model No. 1. [R]. IAWPRC Scientific and Technical Report, No. 1 [R]. London: IAWPRC

Hu B B, Andrew W, Ishtchenko V. 2011. The effect of shock loads on SAF bioreactors for sewage treatment works [J]. *Chemical Engineering Journal*, 166(1): 73-80

刘艳臣. 2008. Carrousel 氧化沟单沟脱氮优化条件及其控制策略研究[D]. 北京: 清华大学

Liu Y, Shi H, Li W, et al. 2011. Inhibition of chemical dose in biological phosphorus and nitrogen removal in simultaneous chemical precipitation for phosphorus removal [J]. *Bioresource Technology*, 102(1): 4008-4012

Puig S, van Loosdrecht M C M, Flameling A G, et al. 2010. The effect of primary sedimentation on full-scale WWTP nutrient removal performance[J]. *Water Res*, 44(3): 3375-3384

施汉昌,胡志荣,周军,等. 2011. 污水生物处理-原理、设计与模拟[M]. 北京: 中国建筑工业出版社

王闯,杨海真,顾国维. 2003. 改进型序批式反应器(MSBR)的试验研究[J]. *中国给水排水*, 19(5): 41-43

王洪臣,周军,王佳伟,等. 2009. 5F-A²/O 脱氮除磷工艺的探索与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社

吴昌永. 2010. A²/O 工艺脱氮除磷及其优化控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学

郑敏. 2005. 7 池 MSBR 工艺的脱氮除磷的研究[D]. 重庆: 重庆大学

中华人民共和国建设部. 2006. CT/J 221—2005 城市污水处理厂污泥检验方法[S]. 北京: 中国建筑出版社