

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.20.017

分段进水多级 A/O 工艺污泥膨胀的诊断与调控

陈浩林^{1,2}, 彭轶^{1,2,3}, 安东^{1,2}, 孙哲^{1,2}, 卢先春², 邓龙⁴

(1. 北京信通碧水再生水有限公司, 北京 101149; 2. 国投信开水环境投资有限公司, 北京 101101; 3. 四川蓉信开工程设计有限公司, 四川 成都 610041; 4. 贵阳南明筑秀水务环境产业有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 针对北方某城市污水处理厂分段进水多级 A/O 工艺出现污泥膨胀现象, 结合多级 A/O 工艺特点分析导致系统发生污泥膨胀的可能原因, 通过现场取样观测污泥性状、镜检生物相和衡算沿程各工艺参数等方式, 综合分析判断出引起该污水厂污泥膨胀的原因为水温骤降、DO 浓度低、MLSS 过高、污泥负荷偏低。为降低污泥膨胀对系统运行和出水水质的影响, 采取投加药剂、调整曝气量、加大排泥和调整回流比、进水流量分配比等措施, 逐步恢复生化系统的稳定性和脱碳脱氮除磷功能。

关键词: 多级 A/O; 污泥膨胀; 丝状菌; 污泥负荷; 工艺调控

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)20-0092-07

Diagnosis and Control of Sludge Bulking in Step-feed Multi-stage A/O Process

CHEN Hao-lin^{1,2}, PENG Yi^{1,2,3}, AN Dong^{1,2}, SUN Zhe^{1,2}, LU Xian-chun², DENG Long⁴

(1. Beijing Xintong Bishui Reclaimed Water Co. Ltd., Beijing 101149, China; 2. SDIC Xinkai Water Environment Investment Co. Ltd., Beijing 101101, China; 3. Sichuan Rongxinkai Engineering Design Co. Ltd., Chengdu 610041, China; 4. Guiyang Nanming Zhuxiu Water Environmental Industry Co. Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: In view of the sludge bulking phenomenon in the step-feed multi-stage A/O process of a municipal wastewater treatment plant in north China, the possible causes of sludge bulking in the system are analyzed in combination with the characteristics of the multi-stage A/O process. By field sampling, sludge characteristics observing, microscopic examination of biological phase and balance calculation of process parameters along the process, the causes of sludge bulking are found to be sudden drop of water temperature, low DO concentration, high MLSS and low sludge load. In order to reduce the influence of sludge bulking on system disorder and effluent quality, the measures such as adding chemicals, adjusting aeration rate, increasing sludge discharge, adjusting reflux ratio and influent flow distribution ratio were adopted to gradually restore the stability of the biochemical system and the function of carbon, nitrogen and phosphorus removal.

Key words: multi-stage A/O; sludge bulking; filamentous bacteria; sludge loading; process control

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-003)
通信作者: 彭轶 E-mail: pengyi@zrljssy.com

分段进水多级 A/O 工艺作为污水处理厂常见的脱氮除磷工艺,目前已在国内较多的污水处理厂应用。该工艺通过分段进水方式将原污水流量按比例分配并输送到各级缺氧池前端,实现原水中的碳源最大化利用;同时具有应对水力冲击负荷等不利因素的能力。但受进水水量水质变化、环境因素变化、运行操作控制不当等影响,生化系统往往会出现活性污泥异常现象,如污泥沉降性能下降、污泥流失等。其中最棘手的就是污泥膨胀,轻则二沉池污泥流失,生化系统脱氮效率降低;重则二级处理系统瘫痪,出水水质超标。以北方某城市污水处理厂为例,介绍并分析了分段进水多级 A/O 工艺发生污泥膨胀的发现、原因、控制及系统恢复措施全过程,可供

同行参考。

1 污水厂概况

北方某城市污水处理厂处理规模为 $18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主要出水指标需达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准(出水 $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$)。生化系统由 4 个单元系列并列组成,单系列处理能力为 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,每级池容比为 1:1.3:1.6,设计进水分比为 1:1:1,每级缺、好氧段容积比为 1:1,水力停留时间为 14.8 h,采用刚玉球形曝气器,气水比为 8.6:1。采用双层平流沉淀池,2 座,共 16 格,设计表面水力负荷为 $0.9 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,沉淀时间为 4 h。

该污水厂主体工艺流程见图 1。

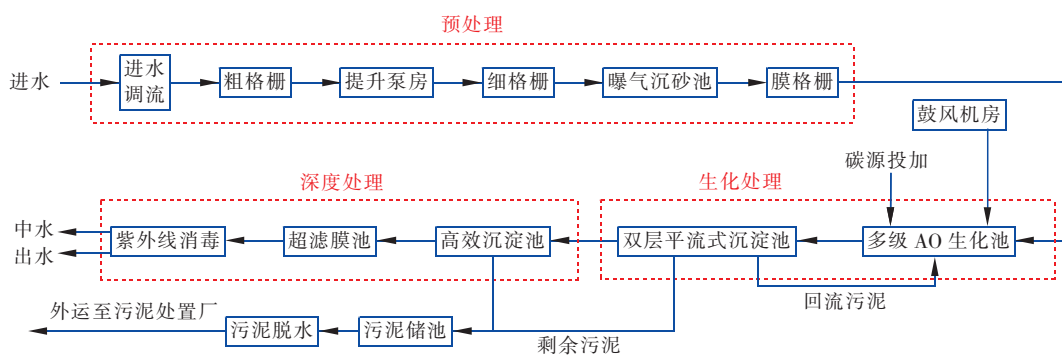


图 1 北方某污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of the wastewater treatment plant in north China

2 污泥膨胀

2.1 污泥膨胀的发现

该污水厂自 2019 年 10 月初发现生化污泥各级好氧池的 SV_{30} 高达 100%,且二沉池发生大量的浮泥与污泥流失现象(见图 2)。随即成立了工艺专题小组,通过水质沿程检测和镜检等取样诊断。

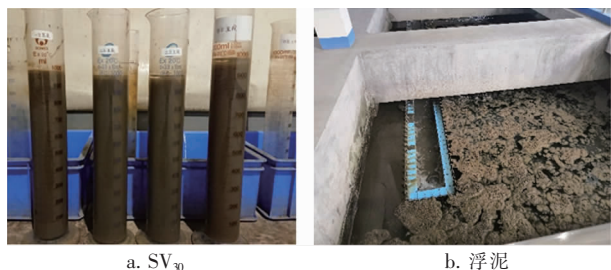


图 2 生化污泥 SV_{30} 与二沉池浮泥

Fig. 2 Pictures of biochemical sludge SV_{30} and floating sludge in secondary sedimentation tank

镜检微生物结果(见图 3)显示活性污泥整体结构松散、絮体直径 $< 50 \mu\text{m}$,丝状菌丰度 4~5 级。

活性污泥中优势丝状菌为 *Microthrix parvicella* (微丝菌)、Type 0092、Type 0041、Type 021N 及 *Nostocoida limicola* II & III,其中 *Microthrix parvicella* 优势较为明显;泡沫中存在大量 *Microthrix parvicella*,同时可见部分 Type 0041 及 Type 021N。

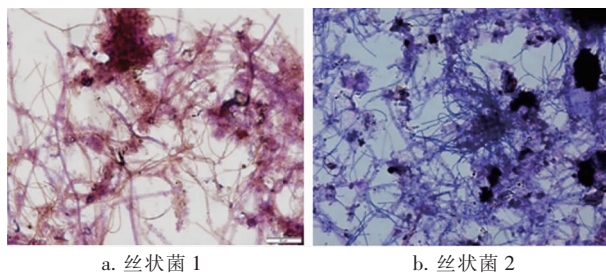


图 3 多级 A/O 系统的丝状菌

Fig. 3 Pictures of filamentous bacteria in multi-stage A/O system

取样检测表明系统内已发生明显的微丝菌致膨现象,同时伴有污泥絮体整体上浮,丝状菌多样。最终判断该污水厂生化池内已发生丝状菌引起的污泥

膨胀现象。

2.2 污泥膨胀原因分析

污泥膨胀分为两种形式:一种是由丝状菌恶性繁殖引起的污泥膨胀,另一种是由于污泥中结合水异常增多导致的污泥膨胀,即黏性膨胀(非丝状菌膨胀)。大多污水厂污泥膨胀均为丝状菌污泥膨胀,其中在我国北方地区污水处理厂污泥膨胀一般为微丝菌型^[1],南方污水处理厂优势菌变化较多^[2]。针对多级 A/O 工艺污泥膨胀,丝状菌暴发的影响因素较多,查阅相关文献可分为 3 类污泥膨胀诱因:①进水水量水质因素,如进水量、进水水质营养物结构、有毒物质等;②环境因素,如水温、pH 值等;③运营控制因素,亦是系统人工强化可调控因素,如 DO、MLSS、SRT、进水分分配比、回流比等。以下结合 3 类因素对该厂污泥膨胀原因进行分析。

2.2.1 水量与水质

从该污水厂 2019 年 1 月—10 月的处理水量统计分析可知(见图 4),平均进水量为 $14.04 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最大进水量为 $20.95 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最小进水量为 $11.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,日平均进水负荷为 78%。10 个月内进水量超设计规模($18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)的天数仅 11 d,占统计天数的 3.6%,主要原因是该污水厂收水服务范围内有部分雨污合流管道,受降雨的影响导致进水量超过设计值。通过统计分析图亦可见年度水量的波动范围较小,进水量为 $(12 \sim 15) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。因此,进水量变化引起系统污泥膨胀的可能性极小,基本上可排除水量因素。

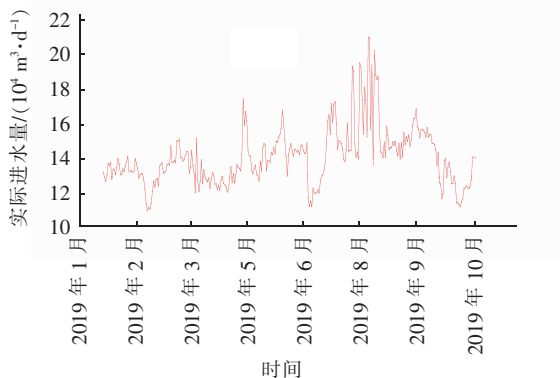
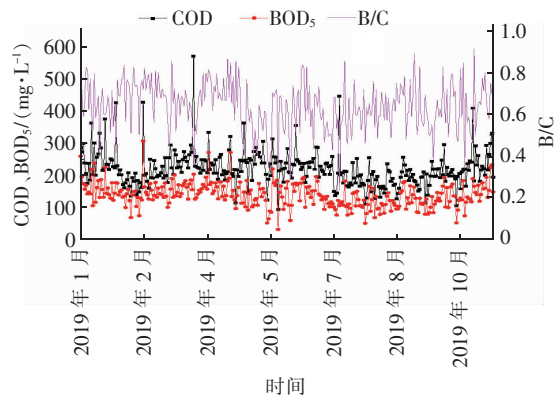


图 4 2019 年 1 月—10 月的进水量

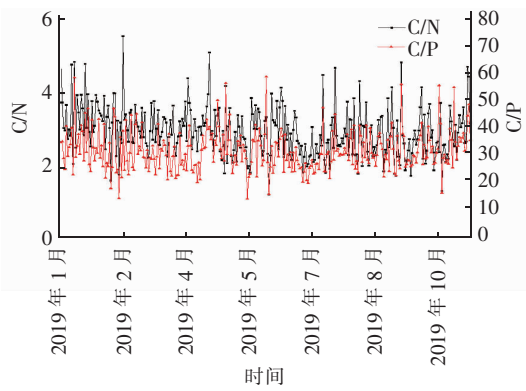
Fig. 4 Inflow volume from January to October, 2019

就进水水质而言(见图 5),1 月—10 月平均进水 COD 为 220.7 mg/L,平均 BOD₅ 为 139.4 mg/L;其中 1 月—6 月的进水 COD 平均浓度为 $(240 \pm 20) \text{ mg/L}$,BOD₅ 平均浓度为 $(150 \pm 30) \text{ mg/L}$,相比 7

月—9 月的进水平均 COD 和 BOD₅ 稍高,这与进水量密切相关,但从 10 月初进水浓度开始回升。由图 5 可知,进水 B/C 平均值为 0.64,可生化性较好;但进水 B/C 的变化幅度较明显,主要是受水质取样或化验检测的干扰导致的测量误差,不可避免。



a. COD、BOD₅ 和 B/C



b. C/N、C/P

图 5 2019 年 1 月—10 月的进水水质

Fig. 5 Influent quality from January to October, 2019

对于脱氮除磷工艺而言,碳源充足是最基本的条件。该厂 10 个月的平均进水 C/N(BOD₅/TN)为 2.99,碳源不足;平均进水 C/P(BOD₅/TP)为 28.6 > 17;进水平均 C : N : P = 28 : 9.4 : 1,可见 C、N、P 比例失衡。另外需说明的是该污水厂收水范围内无工业生产废(污)水,可排除有毒物质的影响。

2.2.2 环境因素

环境因素中常规指标为温度。污泥膨胀现象冬季易频发,高春娣等^[3]在 $(14 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下成功诱发丝状菌污泥膨胀,SVI 可恶化至 663.99 mL/g。在冬季温度较低时,多数微生物的生长因酶的活性受低温抑制而代谢缓慢,但丝状菌增殖速率远远大于系统中其他微生物,如微丝菌与聚磷菌竞争基质时具有优势^[4];丝状菌大量繁殖,破坏系统菌胶团结构,污

泥絮凝和沉降性能下降,导致大量污泥流失,出水 SS 严重超标。生化池水温变化如图 6 所示。

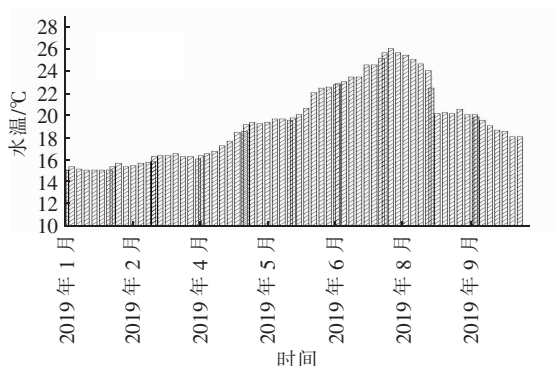


图 6 生化池水温监测统计

Fig. 6 Statistics of water temperature monitoring of biochemical tank

由图 6 可知,1 月—3 月水温基本在 15 °C 上下浮动;4 月中旬季节性回暖,水温随之也达到 18 °C 及以上;9 月下旬水温骤降,对系统内污泥膨胀具有一定影响。

2.2.3 运营控制因素

活性污泥法的本质是通过人工强化驯化微生物对污染物进行去除。运营对工艺的操作及调控主要表现在曝气量、污泥浓度、进水流量分配等的调节和控制。

① 曝气量

曝气量主要体现在 DO 数值上,已有研究表明^[5-7],低 DO 浓度容易引发污泥膨胀。这方面的原因大多从丝状菌和絮状菌的动力学选择理论上进行解释^[8-9]。该理论认为:由于引起污泥膨胀的丝状菌的最大比增长速率(μ_{\max})和氧饱和常数(K_s)比絮状菌的小,因此,在高 DO 浓度时,絮状菌具有较高的增殖速率而占优势,在低 DO 浓度条件下,丝状菌由于具有较大的比表面积,更具有生长优势而引起丝状菌污泥膨胀。鉴于该污水厂生化池有 4 个系列,若将每个系列每天的 DO 数据列出,其数据量较庞大,故仅以 3#生化池 9 月的 DO 监测数据为例进行分析(见图 7)。3#生化池第 I 级好氧池的平均 DO 浓度为 0.3 mg/L,基本上可认为处于缺氧状态;第 II 级好氧池的平均 DO 浓度为 1.87 mg/L,曝气量稍偏低;第 III 级好氧池的平均 DO 浓度为 3.89 mg/L,曝气量充足。

再从多级 A/O 工艺结构的角分析可知:

a. 原设计缺/好氧池比例为 1 : 1,即三级好氧池容占总池容的 50%,现第 I 级好氧池处于缺氧状态,间接缩减了好氧池容,大大增加了第 II、III 级好氧池的容积负荷,降低了异养菌和硝化菌的生物作用,对碳和氨氮的去除具有较大影响;相反,则为丝状菌增殖提供了有利条件。

b. 第 I 级好氧池处于缺氧状态,直接延长原水进入第 I 级的缺氧停留时间,相比设计值增大了 1 倍。常规设计时均将外回流污泥布置在进水最前端,外回流污泥浓度极高且优先被第 I 级缺氧池所接纳,故第 I 级缺氧池的污泥负荷(F/M)值极低,变相将第 I 级缺氧池“改造”成为一个生物选择器,在低溶解氧 + 低负荷双重条件下,回流污泥中的丝状菌优先获得碳源,进而增强了丝状菌生物选择的生长性能。

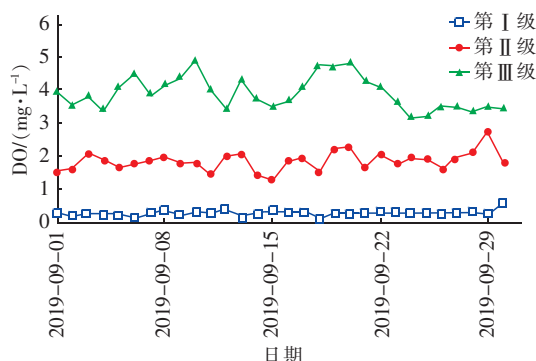


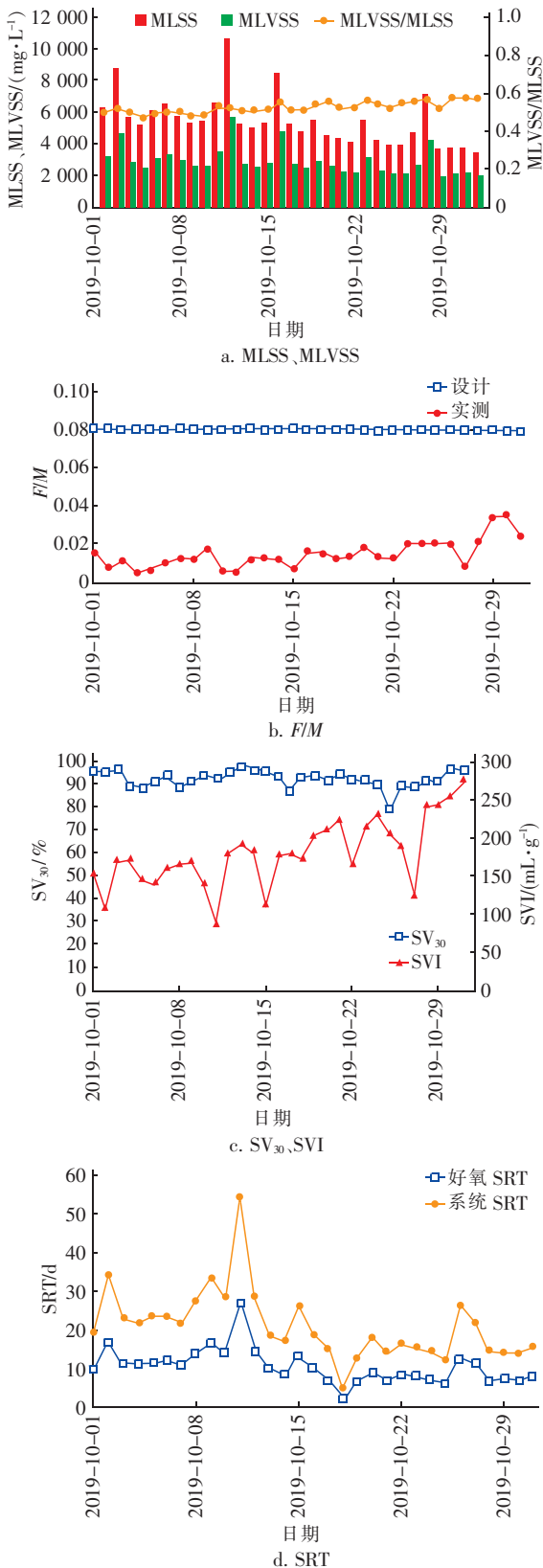
图 7 3#生化池各级好氧池 DO 值

Fig. 7 DO of aerobic tank at 3# biochemical tank

② 污泥浓度

作为体现微生物量多少的指标,MLSS 在工艺分析中可直接衍生出一系列重要工艺参数,包括 F/M 、SVI、SRT 等。如 F/M 过高或过低均会引起污泥膨胀,但低负荷更易引发丝状菌污泥膨胀^[10]。对于多级 A/O 工艺而言,有机物优先在缺氧段被反硝化菌或聚磷菌利用,进入好氧段的有机物浓度减少;若缺氧区的碳源利用率高,则好氧区可利用碳源较少,尤其对于碳源不足的污水,好氧区负荷进一步降低,为丝状菌创造了快速增殖条件。丝状菌作为活性污泥骨架,絮状菌附着其上形成活性污泥絮体,两者比例合适时菌团的沉降性能较好。再如 SRT 过小,增加的 EPS 易增加污泥亲水性而产生黏性膨胀, SRT 过高,污泥活性代谢缓慢^[11]。

该污水处理厂自发现污泥膨胀之日起进行了长达 1 个月的取样观测,各项指标如图 8 所示。

图8 生化系统 MLSS、 SV_{30} 与 SVI、 F/M 、SRTFig. 8 MLSS, SV_{30} and SVI, F/M , SRT of biochemical system

具体分析如下:

a. 生化池内 MLSS 平均为 5 484 mg/L, MLVSS 平均为 2 884 mg/L, MLVSS/MLSS 值为 0.53, 污泥的活性尚好, 但系统内污泥浓度过高。

b. 检测成果显示 SV_{30} 最高为 97%, 最小为 80%; SVI 最大为 273 mL/g, 平均值为 180 mL/g, 说明污泥的沉降性能差, 表现反映出污泥已有发生膨胀的可能性。

c. 系统设计污泥负荷为 $0.08 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,

d. 实测生化池平均污泥负荷为 $0.015 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$, 实际负荷仅为设计负荷的 19%, 说明生化系统中污泥储量极大, 侧面说明大量的微生物处于饥饿状态或内源呼吸期(或衰减期)。

d. 经计算, 系统 SRT 平均为 21 d, 好氧污泥龄为 10.5 d。其中 10 月 11 日生化池污泥浓度高达 10 700 mg/L, 导致当天的 SRT 计算值过大, 进一步说明系统污泥浓度过高, 亟需排泥。为防止污泥大量流失冲击生化系统的脱氮稳定性, 自 10 月中旬后采取逐步加大排泥量的方式调整系统污泥浓度。

③ 进水流量分配

进水流量分配为多级 A/O 工艺的自身特有属性, 适当的流量分配对系统具有较大影响。为判断进水流量分配比是否对污泥膨胀或控制有影响, 对进水流量和污泥回流量进行了监测。由于该污水厂的各级进水采用堰分流, 无法直接测量, 只能采用便携式流量计在各级进水渠道测量, 经多次测量得出第 I、II、III 级进水流量比分别为 30%、30%、40% (见图 9); 说明第 I、II 级进水流量偏低, 尤其是第 I 级进水仅占总进水量的 30%; 因污水厂还未满负荷运行, 运行时将回流污泥泵全频开启, 故计算出外回流比 (R) 约 130%, 综合进水比和回流比进一步说明了第 I 级所承担的运行负荷极高, 原水量小, 碳源浓度低, 污泥浓度高, 综合导致第 I 级处于极低负荷运行条件, 为丝状菌提供了增殖条件。

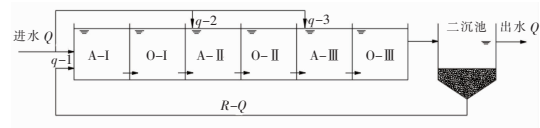


图9 多级 A/O 进水流量分配

Fig. 9 Distribution of multi-stage A/O inflow

综上所述, 进水量和水质对污泥膨胀影响极小, 温度对污泥膨胀具有一定影响。该污水厂污泥

膨胀主要由曝气不足、污泥浓度过高、系统污泥负荷偏低引起。

3 污泥膨胀的控制措施

3.1 内部工艺调整

采用调整各段进水比、增大曝气量等运行策略,进一步抑制污泥膨胀恶化,使系统逐步恢复正常。

① 改变原有进水分配比策略。第 I 段进水流量低,第 I 级缺氧池的水力负荷过高,有机负荷偏低,间接变成了一个生物选择器,故增大第 I 段的进水分配,采用一点进水的方式进行生化池的推流式运行,一方面冲刷丝状菌外排,减少系统丝状菌生物量;另一方面,直接提高第 I 级缺/好氧的有机负荷,破坏“生物选择器”功能。

② 增大系统曝气量。2019 年 12 月初各级好氧池 DO 逐渐调整并恢复正常,第 I 级好氧段平均 $DO \geq 1.0$ mg/L,第 II 级好氧段平均 DO 为 2.5 mg/L,第 III 级好氧段平均 DO 为 4.0 mg/L,见图 10。

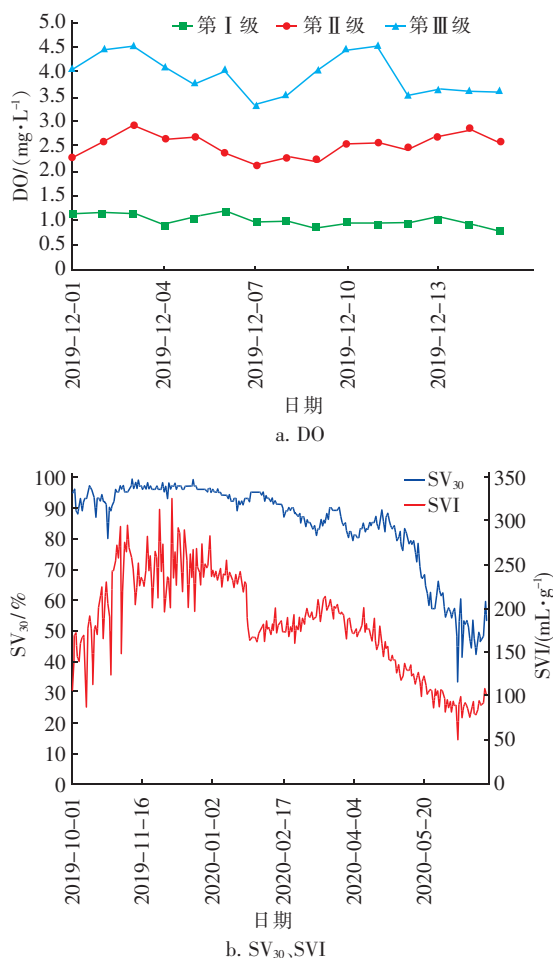


图 10 生化系统的 DO、 SV_{30} 与 SVI

Fig. 10 DO, SV_{30} and SVI of biochemical system

由于北方 11 月—4 月一直处于低温状态,该污水厂进水受气温低的影响,运行调控较保守,采用逐步排泥的方式降低系统的污泥浓度;自 2020 年 5 月开始, SV_{30} 逐渐恢复至 80% 以下,SVI 基本稳定在 120 mL/g。

3.2 外部辅助措施

出水达标排放为该厂最基本的要求,而污泥膨胀导致污泥流失造成出水 SS 严重超标的风险。在应急工况下,在二沉池进水前端投加混凝剂,并采用气动泵搅拌使药剂与混合液充分混合,达到迅速沉淀的效果。由于该厂二沉池为矩形式双层平流沉淀池,在进水均匀分配的操作上存在盲区,导致各池的水力负荷不均匀,排泥规律混乱,造成池底污泥储量差异性较大,在调整过程中需重新指导运行班组调整排泥策略和流量分配闸门控制。

4 结语

污泥恶性膨胀对污水厂稳定运行具有破坏性的影响。结合该实践工程案例,污泥膨胀恶性暴发的主要原因在于工艺的控制不当,如各段曝气量较小导致系统 DO 偏低;排泥不畅,MLSS 维持过高,直接降低系统污泥负荷等,故在运行过程中需着重加强生化工艺沿程动态变化因子的监测,尤其对北方的污水厂,要充分结合气候变化周期规律,控制好因温度下降而造成的污泥膨胀。针对分段进水多级 A/O 工艺,可借助分段进水的优势,调整各级进水分配比,进而联锁调动系统各级浓度梯度、污泥负荷、曝气量等工艺措施,对污泥膨胀的控制具有积极作用。最后,建议污水厂根据运行工况周期建立适合自身工艺的预警机制,指导实际工艺运行。

参考文献:

- [1] 陈珺. 城市污水处理厂的污泥膨胀研究分析[J]. 给水排水, 2009, 35(12): 31-34.
CHEN Jun. Study and analysis on sludge bulking in municipal wastewater treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(12): 31-34 (in Chinese).
- [2] CAO C Y, LOU I, HUANG C, et al. Metagenomic sequencing of activated sludge filamentous bacteria community using the Ion Torrent platform [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(5): 2175-2183.
- [3] 高春娣, 张娜, 韩徽, 等. 低温下丝状菌膨胀污泥的微生物

- 生物多样性[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3373 – 3383.
- GAO Chundi, ZHANG Na, HAN Hui, *et al.* Microbial diversity of filamentous sludge bulking at low temperature [J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3373 – 3383 (in Chinese).
- [4] KNOOP S, KUNST S. Influence of temperature and sludge loading on activated sludge settling, especially on *Microthrix parvicella* [J]. Water Science & Technology, 1998, 37(4/5): 27 – 35.
- [5] MINO T. Survey on filamentous micro-organisms in activated sludge processes in Bangkok, Thailand [J]. Water Science & Technology, 1995, 31(9): 193 – 202.
- [6] KAPPELER J, GUJER W. Development of a mathematical model for “aerobic bulking” [J]. Water Research, 1994, 28(2): 303 – 310.
- [7] MARTINS A M P, VAN LOOSDRECHT M C M, HEIJNEN J J. Effect of feeding pattern on storage and sludge settleability under aerobic conditions [J]. Water Research, 2003, 37(11): 2555 – 2570.
- [8] MARTINS A M P, HEIJNEN J J, VAN LOOSDRECHT M C M. Effect of dissolved oxygen concentration on the sludge settleability [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 62: 586 – 593.
- [9] GAVAL G, PERNELLE J J. Impact of the repetition of oxygen deficiencies on the filamentous bacteria proliferation in activated sludge [J]. Water Research, 2003, 37(9): 1991 – 2000.
- [10] 吴昌永, 彭永臻, 彭轶. A²O 工艺中的污泥膨胀问题及恢复研究 [J]. 中国环境科学, 2008, 28(12): 1074 – 1078.
- WU Changyong, PENG Yongzhen, PENG Yi. Activated sludge bulking and control in A²O process [J]. China Environmental Science, 2008, 28(12): 1074 – 1078 (in Chinese).
- [11] 彭赵旭, 彭澄瑶, 何争光, 等. 污泥龄对低氧丝状菌活性污泥微膨胀系统的影响 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 245 – 251.
- PENG Zhaoxu, PENG Chengyao, HE Zhengguang, *et al.* Impacts of sludge retention time on low oxygen limited filamentous sludge bulking system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(1): 245 – 251 (in Chinese).
- 作者简介: 陈浩林 (1992 –), 男, 四川平昌人, 大学本科, 工程师, 主要从事给水排水设计与运行管理工作。
- E-mail: 1175688856@qq.com
- 收稿日期: 2020 – 12 – 01
- 修回日期: 2021 – 01 – 04

(编辑: 衣春敏)

加强湖泊管理保护**改善湖泊生态环境****维护湖泊健康生命**