

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.08.028

分段进水多级 A/O 工艺污泥膨胀控制专家系统

陈浩林^{1,2}, 彭轶^{1,2,3}, 安东^{1,2}, 侯锋², 孙哲^{1,2}, 李朋^{2,3},
孙事昊²

(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)

摘要: 基于污泥膨胀理论和控制原理搭建污泥膨胀控制策略框架,以在线和离线数据信息为支撑,采用智能诊断手段综合分析引起污泥膨胀的各种诱发因子。根据分段进水多级 A/O 工艺自身结构特点逐级分析引发污泥膨胀原因并结合设定应对策略实施系统运行调整,实现污泥膨胀有效控制,防止生化系统紊乱导致出水水质超标。该专家系统已在北方某城镇污水处理厂污泥膨胀控制中成功应用。

关键词: 活性污泥; 多级 A/O; 污泥膨胀控制专家系统

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)08-0153-07

Expert System for Sludge Bulking Control in Multi-stage A/O Process

CHEN Hao-lin^{1,2}, PENG Yi^{1,2,3}, AN Dong^{1,2}, HOU Feng², SUN Zhe^{1,2}, LI Peng^{2,3},
SUN Shi-hao²

(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)

Abstract: Based on the theory and control principle of sludge bulking, the control strategy framework of sludge bulking was established, and various inducing factors of sludge bulking were comprehensively analyzed by intelligent diagnosis method supported by online and offline data information. According to the structure characteristics of multi-stage A/O process, the causes of sludge bulking are analyzed step by step, and the operation adjustment of the system was implemented in combination with the set response strategy, so as to achieve effective control of sludge bulking and prevent the biochemical system disorder from causing excessive effluent water quality. The expert system has been successfully applied in the sludge bulking control of a municipal wastewater treatment plant in the north of China.

Key words: activated sludge; multi-stage A/O; sludge bulking control expert system

据不完全统计,有超过 50% 的污水处理厂受到污泥膨胀的困扰,且污水处理厂在一定的生产周期内都会发生污泥膨胀现象。常见的污泥膨胀为丝状

菌污泥膨胀,一旦系统中某个或某些诱导因子出现,进而诱发丝状菌恶性增殖引起污泥膨胀发生,对污水处理稳定达标排放造成极大困扰,轻则出水 SS 超

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-003)

标,重则生化系统瘫痪。

随着经济社会的快速发展,污水处理技术日新月异,国内也综合研究了一系列污泥膨胀引发因素、膨胀原理及控制方法和策略,如王淑莹等^[1]提出采用SBR法处理啤酒废水和化工废水的活性污泥,在低有机负荷时有利于丝状菌增殖,会发生污泥膨胀;刘培等^[2]根据污泥膨胀的特性,提出了采用加重助沉法、灭菌法和环境调控等策略对污泥膨胀进行控制;许世伟等^[3]通过污水处理厂污泥膨胀的实际案例,提出了污水处理厂污泥膨胀发生前后出现的各种情况,结合以往经验和相关资料,建立了污泥膨胀预警评价体系。

如何将这些成熟理论研究和经验方法引导至实际运行生产,实现“专家系统”控制污泥膨胀呢?所谓专家系统,即通过把专家的理论和技术同控制理论、方法与技术结合,在未知环境下效仿专家的智能,实现对系统的控制。该系统可适用于各种非结构化问题,能处理定性的、启发式或不确定的知识信息,在一定程度上模拟人的思维活动,进行自行推理,并可以不断监督生产过程,实现特定性能指标下的优化控制,进行操作指导。基于污泥膨胀控制专家系统,可一定程度上降低因膨胀引起的活性污泥流失、污染物去除率低、生化系统崩溃等不利影响;还可对引发污泥膨胀的不利因子进行筛选和判断,并迅速根据应对策略发出相应工艺调控指令,控制污泥膨胀持续恶化,以免影响出水达标。

分段进水多级A/O工艺为常用的高效生物脱氮工艺,具有耐负荷冲击、脱氮效率高、基建投资省等优点;尤其是处理城镇低C/N水质具有优势,通过将进水流量分配至各段缺氧段,实现原水中的有机碳源优先为反硝化反应提供电子供体而利用,大大节省外碳源投加量并降低吨水运行成本。该工艺在实际运行中也难以摆脱污泥膨胀的厄运。以下将结合专家系统和多级A/O自身工艺结构特点,对分析与控制污泥膨胀问题进行阐述。

1 分段进水多级A/O污泥膨胀成因分析

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)。大多数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^[4],南方污水处理厂优势菌变化较

多^[5]。针对多级A/O工艺污泥膨胀而言,其中影响丝状菌暴发的因素甚多,如水量、水质、水温、pH值、碱度、溶解氧(DO)、污泥浓度(MLSS)、污泥负荷(F/M)、水力负荷、污泥龄(SRT)、有毒物质、进水分配比、缺/好氧池容比、回流比等。各因素可划分为直接、间接因素和工艺设计因素,直接判断因素多在线监测数据,如进水量、水温、pH、DO、MLSS、进水分配比;间接判断因素多为通过一系列在线监测数据和实测化验数据得出的指标,如污泥负荷(F/M)、水力负荷、SRT等;工艺设计因素,主要体现在工艺设计缺陷造成的污泥膨胀,如缺/好氧池容积比,王杰等^[6]提出A/O比值为4/4时,增加的缺氧体积导致缺氧选择器作用消失,该环境刺激污泥分泌大量的胞外聚合物(EPS),同时PN(蛋白质)/PS(多糖)比值也迅速增大,丝状菌在对底物的竞争中占据优势,导致污泥膨胀的发生。但工艺设计因素往往在实际运行中出现频率较低,基本在设计阶段就已规避。以下将针对引起污泥膨胀的常见及主要的影响因子进行讨论。

1.1 水温

污泥膨胀易在冬季频发。查阅文献可知相关案例,如济南某厂每逢进入冬季,不但污泥膨胀加剧,而且产生大量生物泡沫,SVI > 600 mL/g,严重时SV₃₀ > 90%^[7];再如北京清河污水处理厂的污泥膨胀主要发生在冬春交替阶段。高春娣等^[8]提出在温度(14 ± 1) °C下成功诱发丝状菌污泥膨胀,SVI可恶化至663.99 mL/g。其原因:在冬季温度较低时,大多数微生物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细菌,如微丝菌与聚磷菌竞争基质时具有优势^[9];丝状菌大量繁殖,破坏系统菌团结构,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。

1.2 pH值

活性污泥适宜生长的pH值一般为6.5~8.5,原污水的pH值一般为6~9;相关文献表明:较低pH值对絮状菌活性的影响可能比对某些丝状菌的影响大,较低pH值环境易导致污泥膨胀^[10]。例如,pH值 < 6.5时,丝状真菌在众多菌类竞争生长中成为优势菌种,因而会过度生长引发丝状菌污泥膨胀^[11]。市政污水处理pH值波动范围基本微小,主要需引起注意的是化工废水对生化进水pH值的影响。

1.3 DO

已有研究表明^[12],低 DO 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^[13-14],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 条件下,絮状菌具有较高的增殖速率而占优势,在低 DO 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。

1.4 F/M

污泥负荷的高低均会引起污泥膨胀,但低负荷更容易引发丝状菌污泥膨胀^[15]。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;若在缺氧区的碳源利用率极高,则好氧区可利用的碳源极少,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。

1.5 SRT

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。SRT 过小,增加的胞外聚合物(EPS)易增加污泥亲水性而产生黏性膨胀,SRT 过高,活性污泥代谢缓慢^[16]。

1.6 营养物质

普通活性污泥法对碳、氮、磷浓度维持在一个平衡关系要求,即常见的 $BOD_5: N: P = 100: 5: 1$,氮源缺乏时,微生物不能充分利用碳源合成细胞物质,过量的碳源被转化成一种高度亲水型化合物,影响污泥的沉降性^[17]。与此相反,国内污水厂进水基本上呈碳源不足状态($C/N < 4$),在不外加碳源的前提下很难实现对出水总氮要求过高地区的达标排放。同时碳源浓度较低,污泥浓度过高直接拉低污泥负荷,正如前述负荷较低易引起污泥膨胀。

2 污泥膨胀控制专家系统的建立

随着计算机、大数据和智能自控操作技术水平逐渐提高,污水处理领域已有条件和能力实现专家系统控制。该系统依托专家理论支撑,通过工艺过程数据监测、采集与储存,在已搭建的理论基础上进行各因素类比与筛分分析,对工艺异常情况进行诊断和提前预警并指导工艺及时作出调整,将风险遏制在萌芽初期,实现污水处理提质增效。以下将结合引起污泥膨胀成因和分段进水多级 A/O 工艺特

点进行专家系统介绍。

首先判断污泥膨胀,可通过表观特征和理化分析两个方面进行评价。表观特征主要是观察生化池污泥状况和出水现象,如生化池中污泥的颜色、臭味、泡沫是否有异常,正常的污泥呈黄褐色,带有一股土腥味,曝气池表面分散偏白色的小气泡;污泥膨胀初期污泥色泽转淡、发臭,泡沫发黄,个体增大,数量增加,覆盖池面面积剧增^[7],同时可观察到二沉池污泥沉降性能下降,出水中携带污泥;理化分析主要分析 MLSS、 SV_{30} 及 SVI,其中常以 SVI 为分析指示项目。彭永臻等^[18]利用 SVI 数值对污泥膨胀程度进行了界限划分,SVI 维持在 150 ~ 250 mL/g 为污泥微膨胀,SVI > 250 mL/g,为较严重的污泥膨胀。由此可见,当 SVI > 150 mL/g 时,污泥已开始膨胀。污泥膨胀又分为丝状菌污泥膨胀和非丝状菌污泥膨胀即黏性膨胀,在控制策略中需判断污泥膨胀的类别,对症下药。通过相关文献回顾和对专家的访问,以及结合现场实际污泥膨胀案例分析,建立分段进水多级 A/O 工艺污泥膨胀的专家控制决策树,如图 1 所示。

专家系统首先通过进出水、生化系统在线监测及实测沿程数据获得信息,第一步首要判断原水水质浓度是否大于设计值,若小于设计值,说明系统产生了丝状菌膨胀,为进一步提高判断的准确性,可联合协同镜检对活性污泥中丝状菌生物相进行检测,反之为黏性膨胀。系统在此节点开始分别针对丝状菌膨胀和黏性膨胀进行逐级溯源和剖析。若识别已确定是丝状菌增殖引起的污泥膨胀,进一步结合获取的信息综合计算出 SVI 值,若 SVI < 250 mL/g,说明多级 A/O 生化系统污泥膨胀现象不太严重,此时需对污泥膨胀再进行一次筛选和诊断。

① 若 SVI < 150 mL/g,说明污泥处于预膨胀前期,此时注意观察二沉池的出水 SS 是否大于 5 mg/L;若 > 5 mg/L,系统立即向控制系统发起警告,采取措施,制止出水 SS 超标,如可采取在二沉池前端投加混凝剂等手段。若二沉池的出水 SS < 5 mg/L,系统需识别前端进水量监测数据是否超出设计流量值;若大于设计水量,说明进水流量过大,对系统受水力冲击负荷的影响导致了污泥预膨胀,此时专家系统发出信号作用于提升泵,调整进水提升泵运行策略,同时开启二沉池超越系统,使多余水量从旁路外排,及时减轻系统受水力冲击负荷的

影响。若处理水量小于或等于设计水量,说明系统污泥预膨胀并非水力负荷过大引起,需进一步判断二沉池的固体负荷是否大于设计要求,若二沉池的固体负荷大于设计要求,说明系统的污泥浓度过高引起污泥预膨胀,此时需启动排泥系统,加大排泥量,缩短系统的SRT。若二沉池的固体负荷小于或等于设计要求,需判断生化池末端的DO是否介于2~3 mg/L。常规认为曝气池中DO ≥ 2 mg/L能维持活性污泥微生物的正常生长,戴红玲等^[5]在实验中发现当系统DO > 4.5 mg/L时发生了污泥解体;周利等^[19]通过试验发现:对于低DO污泥膨胀的发

生,提高DO至3.4 mg/L运行一段时间,污泥膨胀得到有效控制;同时结合多级A/O工艺结构及属性,生化末端过曝气将引起回流污泥中携带分子氧破坏前端缺氧段反硝化反应,故污泥膨胀专家控制系统将DO界定为2~3 mg/L。若DO > 3 mg/L,说明是由曝气量过大引起污泥预膨胀,系统溶氧仪反馈监测数据至曝气系统,发起调整鼓风机曝气量,降低生化池末端的DO。若以上各级控制因子均在正常值范围内,说明系统运行设备出现故障,构筑物池内出现短流等现象,系统发起警报,此时需人工进行干预,对故障设备进行检修或调整进水方式等。

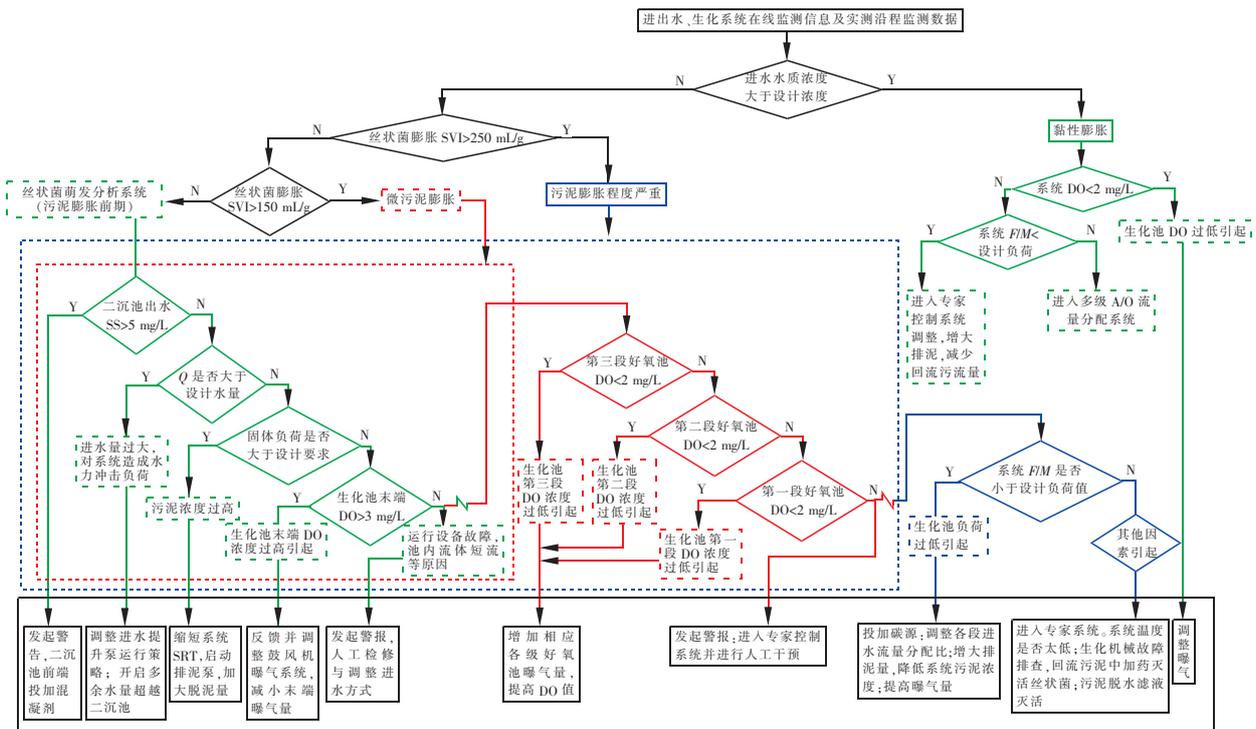


图1 分段进水多级A/O污泥膨胀控制专家系统

Fig. 1 Multi-stage A/O sludge bulking control expert system

② 若 150 mL/g < SVI < 250 mL/g,说明污泥处于微膨胀状态。系统首先针对二沉池一系列表观特征和生化末端理化分析进行识别与调整,其控制策略与 SVI < 150 mL/g(污泥预膨胀)的调控步骤一致,但当系统追溯到生化池末端DO时,还未能解决微膨胀,在此节点上控制系统进一步判断第三段好氧池中是否为DO < 2 mg/L,若DO < 2 mg/L,说明生化池第三段DO过低引起污泥微膨胀,此时系统反馈鼓风机曝气系统调整曝气量,使此段的DO达到2 mg/L;若第三段好氧池中的DO > 2 mg/L,需进一步分析第二段好氧池中是否为DO < 2 mg/L而引起的

污泥微膨胀,以此类推直至分析到第一段好氧池的DO。DO过低引起污泥微膨胀的控制策略只能通过增大曝气量、提高DO含量,系统针对不同分级生化池DO进行调整。当第一段好氧池DO值正常时(即DO ≥ 2 mg/L),污泥微膨胀并非DO低所致,系统发起警报,并进入专家系统进行人工干预。

③ 若SVI > 250 mL/g,说明多级A/O生化系统污泥膨胀程度较严重,此时需对污泥膨胀及时采取控制措施,将出水超标尽可能降到最低。污泥膨胀成因分析与前述污泥预膨胀、微膨胀分析控制保持一致,当生化系统各级DO含量均处于正常范围,

此时专家系统需对 F/M 值进行分析,通过在线和离线数据综合计算判断系统的 F/M 值是否小于设计值,若小于,说明是由低负荷引起的污泥膨胀,控制系统通过投加碳源、调整各段进水流量分配比、增大排泥量,以便降低系统污泥浓度等综合措施控制污泥膨胀继续恶化并适时恢复系统处于正常状态。若 F/M 值不小于设计值,说明由其他因素引起污泥膨胀。此节点已针对各项主要引发膨胀因子做了系统梳理和排查,专家系统进行综合研判,主要分析水温是否过低,生化池内机械是否故障等一系列非“主观因素”。系统污泥膨胀程度较严重,为防止生化系统“崩盘”,需及时遏制丝状菌持续增殖,可通过在回流污泥管道上投加氯进行灭活,同时污泥脱水系统的上清液需采用氯进行灭活,避免丝状菌在系统中一直循环。

若系统识别已确定是非丝状菌增殖引起的黏性膨胀(黏性膨胀一般由细胞表层形成胞外聚合物过多而影响污泥沉降性能),则进入黏性膨胀分支系统,首要判断生化系统的 DO 值是否小于 2 mg/L,若是,说明 DO 含量过低导致黏性膨胀,此时控制系统作用于曝气系统,调整曝气策略,增大池内 DO。若 DO 正常,专家系统下一步分析生化系统的 F/M 值是否低于设计值,若 F/M 值低于设计值,进入专家系统进行工艺调整,发起如增大排泥量、减少回流污泥量等措施信号。若 F/M 值正常,专家系统进入多级 A/O 流量分配程序,根据各级浓度梯度和水力负荷进行调整。

3 污泥膨胀控制专家系统应用

北方某城镇污水处理厂规模为 $18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用三级 A/O 工艺+矩形二沉池+高密度沉淀池+紫外消毒工艺。该污水厂自 2019 年 10 月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。该厂立即成立了工艺专题小组,对生化工艺进行分析、诊断与调控。

以专家控制系统指导该污水厂因污泥膨胀导致系统紊乱的分析和处置,具体步骤如下:

通过取样镜检微生物对污泥膨胀进行识别,镜检结果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。同时经过长达一个月的取样观测,生化池内 SV_{30} 最高为 97%,最低为 80%;SVI 最大为 273 mL/g,平均值为 180 mL/g(见图 2),据此断定系统为丝状菌污泥膨胀。

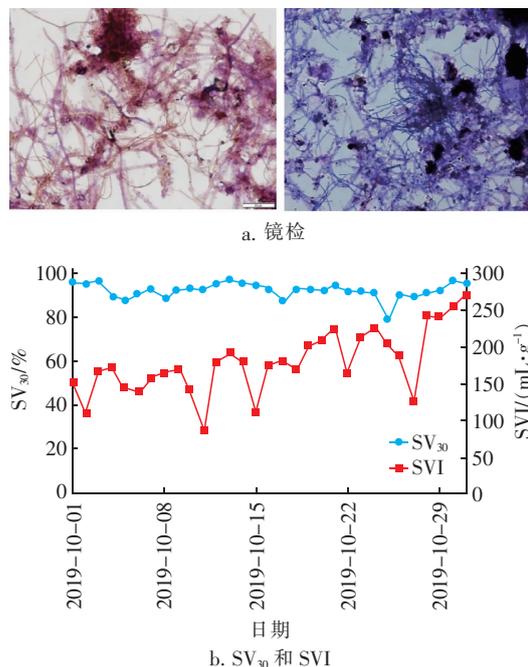


图 2 丝状菌镜检以及污泥的 SV_{30} 与 SVI 变化

Fig. 2 Microscopic examination of filamentous bacteria and changes of SV_{30} and SVI in sludge

首先观察二沉池出水 SS,二沉池上层有大量浮泥,出水 SS 高达 500 mg/L,进水水量未达到设计满负荷,二沉池的进水固体负荷为 144 mg/L,生化池第三段好氧末端 DO 及设备运行均正常,第一阶段诊断结束。系统自动开始第二阶段诊断,对各级好氧池中 DO 进行分析,第一段好氧池 $DO < 0.5 \text{ mg/L}$,第二段好氧池 $DO < 1.5 \text{ mg/L}$,第三段好氧池 $DO < 2 \text{ mg/L}$,通过第二阶段诊断出系统 DO 浓度极低,不满足设计要求,系统条件反馈调整鼓风机风量,增大曝气量以提高系统 DO 浓度。专家系统进入第三阶段诊断分析,系统设计污泥负荷为 $0.08 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,实测生化池平均污泥负荷为 $0.015 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,实际负荷为设计负荷的 19%,说明生化系统中污泥储量极大,为丝状菌增殖提供了有利条件。通过专家系统综合分析得出:由于系统 DO、 F/M 均低于设计值,生化池内污泥负荷较低引起污泥膨胀。故需结合原因分析提出调整策略,可以采取常规的工艺调整,如增大曝气量、排泥量等,但受污水厂脱水机的实际产能限制,不能同时大量排泥,以防止污泥大量流失,影响生化系统的稳定性。该厂采取投加碳源、调整各段进水比、增大曝气量等策略,进一步抑制污泥膨胀,使系统逐步恢复。众所周知,生化系统污泥膨胀恢复时

间较长,该污水处理厂的分段进水多级 A/O 工艺污泥膨胀采用专家系统调控策略,在 2 个月内控制住生化系统污泥持续膨胀的趋势。如图 3 所示,自 2019 年 11 月开始诊断起至 2020 年 4 月初,系统 SV_{30} 由 97% 降至 80%,SVI 由 295 mL/g 逐渐降至 180 mL/g,2020 年 4 月初—6 月末, SV_{30} 基本维持在 $(60 \pm 20)\%$,SVI 基本控制在 (100 ± 20) mL/g,二沉池污泥的沉降性能有较大的改善,污泥流失现象彻底解决,二级处理出水 SS 日均值小于 10 mg/L。

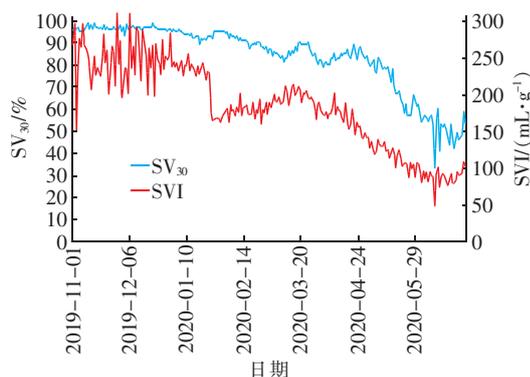


图 3 生化系统逐渐恢复过程中的 SV_{30} 、SVI 变化

Fig. 3 Changes of SV_{30} and SVI during the gradual recovery of biochemical system

4 结论

基于污泥膨胀理论和控制原理搭建污泥膨胀控制策略框架,以在线和离线数据信息为支撑,采用智能诊断手段综合分析引起污泥膨胀的各种诱发因子,如系统 DO 值是否过低、 F/M 是否在设计值正常范围区间等系统需解决的问题。专家系统经过识别问题所在根源并自动采取调整措施改变工艺运行操作和策略。针对分段进水多级 A/O 工艺污泥膨胀,专家控制系统可实现二级处理系统全过程或各级好氧池中的污泥预膨胀、污泥微膨胀和严重膨胀及黏性膨胀的分类诊断,并第一时间发出预警提示或警报信号,降低因膨胀引起的污泥流失导致出水超标影响。引入专家控制系统策略,按照专家系统步骤逐步分析引起污泥膨胀的原因并挖潜多级 A/O 工艺的自身工艺优势来调整系统的“恢复能力”,如通过调整进水分配比实现系统污泥膨胀的有效控制与调整,保障出水稳定达标排放。

参考文献:

[1] 王淑莹,丁峰,吕宏德,等. 低 pH 值与低有机负荷引

起的活性污泥膨胀及其恢复[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2000,33(2):53-57.

WANG Shuying, DING Feng, LÜ Hongde, *et al.* Activated sludge bulking due to low pH value & organic loading and its resume[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2000, 33(2): 53-57 (in Chinese).

[2] 刘培,张雁秋. 浅析污泥膨胀的特性与控制对策[J]. 能源环境保护,2006,20(3):7-9.

LIU Pei, ZHANG Yanqiu. Research and control of bulking sludge[J]. Energy Environmental Protection, 2006, 20(3): 7-9 (in Chinese).

[3] 许世伟,张荣兵,顾剑,等. 大型城市污水处理厂活性污泥法污泥膨胀防控对策[J]. 给水排水,2010,36(11):43-45.

XU Shiwei, ZHANG Rongbing, GU Jian, *et al.* Early warning and measures for the sludge bulking of activated sludge process in large scale municipal wastewater treatment plants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(11): 43-45 (in Chinese).

[4] 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).

[5] 戴红玲,胡锋平,李长风. 活性污泥异常现象的成因与控制[J]. 水处理技术,2009,35(3):107-109,117.

DAI Hongling, HU Fengping, LI Changfeng. Effect analysis of treating urban sewage by the modified oxidation ditch [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(3): 107-109, 117 (in Chinese).

[6] 王杰,薛同来,彭永臻,等. A/O 系统中不同缺氧/好氧体积比对活性污泥沉降性能的影响[J]. 中国环境科学,2016,36(2):443-452.

WANG Jie, XUE Tonglai, PENG Yongzhen, *et al.* Effect of different anoxic/aerobic volume ratio on activated sludge settleability in A/O system [J]. China Environmental Science, 2016, 36(2): 443-452 (in Chinese).

[7] 赵立春,李英姿,孙子惠,等. 光大水务济南一厂污泥膨胀的调控[J]. 中国给水排水,2008,24(20):91-93.

ZHAO Lichun, LI Yingzi, SUN Zihui, *et al.* Control of sludge bulking in first wastewater treatment plant of

- Everbright Water (Jinan) Limited [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(20): 91 - 93 (in Chinese).
- [8] 高春娣, 张娜, 韩徽, 等. 低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 [J]. *环境科学*, 2020(7): 3373 - 3383.
GAO Chundi, ZHANG Na, HAN Hui, *et al.* Microbial diversity of filamentous sludge bulking at low temperature [J]. *Environmental Science*, 2020(7): 3373 - 3383 (in Chinese).
- [9] 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.
- [10] 高春娣, 王淑莹, 吴凡松, 等. 化工污水处理场污泥膨胀与上浮的原因及其控制 [J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1999, 32(5): 52 - 55.
GAO Chundi, WANG Shuying, WU Fansong, *et al.* Causes and control of sludge bulking and scumming in a chemical wastewater plant [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1999, 32(5): 52 - 55 (in Chinese).
- [11] 韩红桂, 伍小龙, 王丽丹, 等. 丝状菌污泥膨胀简化机理模型 [J]. *化工学报*, 2013, 64(12): 4641 - 4648.
HAN Honggui, WU Xiaolong, WANG Lidan, *et al.* Simplified mechanistic model of filamentous bulking sludge [J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(12): 4641 - 4648 (in Chinese).
- [12] MARTINS A M P, HEIJNEN J J, VAN LOOSDRECHT M C M. Effect of feeding pattern and storage on the sludge settleability under aerobic conditions [J]. *Water Research*, 2003, 37(11): 2555 - 2570.
- [13] MARTINSAM P, HEIJNEN J J, VAN LOOSDRECHT M C M. Effect of dissolved oxygen concentration on sludge settleability [J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2003, 62(5/6): 586 - 593.
- [14] 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.
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] 韩云, 杨清香, 杨敏, 等. 酵母菌处理系统中氮缺乏引起的污泥膨胀控制 [J]. *环境科学*, 2003, 24(4): 68 - 72.
HAN Yun, YANG Qingxiang, YANG Min, *et al.* Bulking controls induced by nitrogen insufficiency in yeast system [J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 68 - 72 (in Chinese).
- [18] 彭永臻, 郭建华, 王淑莹, 等. 低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法的发现、提出及理论基础 [J]. *环境科学*, 2008, 29(12): 3342 - 3347.
PENG Yongzhen, GUO Jianhua, WANG Shuying, *et al.* Energy saving achieved by limited filamentous bulking under low dissolved oxygen: derivation, originality and theoretical basis [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12): 3342 - 3347 (in Chinese).
- [19] 周利, 彭永臻, 徐晓军, 等. 丝状菌污泥膨胀机理与控制方法 [J]. *苏州科技学院学报(工程技术版)*, 2005, 18(2): 43 - 47.
ZHOU Li, PENG Yongzhen, XU Xiaojun, *et al.* Mechanism and control methods of filamentous sludge bulking [J]. *Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology)*, 2005, 18(2): 43 - 47 (in Chinese).

作者简介: 陈浩林(1992 -), 男, 四川平昌人, 大学本科, 给排水工程师, 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 - 09 - 30

修回日期: 2020 - 10 - 29

(编辑: 衣春敏)