

反硝化滤池用于城镇污水处理厂提标改造

商佳吉, 洪超, 吕劲衡, 许衡, 张大鹏
(上海市净化技术装备成套有限公司, 上海 200120)

摘要: 在上海市水污染防治行动中,城镇污水处理厂出水水质要求达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,技术重点是实现总氮指标的控制。某城镇污水处理厂在提标改造工程中,深度处理采用反硝化滤池,总设计规模为 $24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中设备结合实际运行情况按 $18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模配置。运行结果表明,系统对硝态氮、总氮具有非常稳定的去除效果,出水总氮稳定在 10 mg/L 以下;滤池微生物群落特征和溶解氧变化,可以作为考察滤池运行状态的必要辅助。经估算,该工程新增的直接运行费用为 $0.012 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

关键词: 反硝化滤池; 提标改造; 总氮; 微生物特征; 溶解氧

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)06-0093-06

Application of Denitrification Filter in Upgrading and Reconstruction of an Urban Wastewater Treatment Plant

SHANG Jia-ji, HONG Chao, LÜ Jin-heng, XU Heng, ZHANG Da-peng
(Shanghai Purification Technology Equipment Co. Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: In the action for the prevention and control of water pollution in Shanghai, the final effluent quality of urban wastewater treatment plants should reach the first level A in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 - 2002). The technical focus is how to control total nitrogen index. The denitrification filter was adopted in advanced treatment for upgrading and reconstruction project of an urban wastewater treatment plant. The total design capacity was $240\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$. The equipment was configured according to the scale of $180\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ according to the actual operation. The result showed that the system had a stable removal efficiency of nitrate nitrogen and total nitrogen. The effluent total nitrogen was stably below 10 mg/L . The microbial characteristics and changes tendency of dissolved oxygen were observed to evaluate the operation status of the filter as necessary assistance. The increasing direct operation cost was about $0.012 \text{ yuan}/\text{m}^3$ wastewater.

Key words: denitrification filter; upgrading and reconstruction; total nitrogen; microbial characteristics; dissolved oxygen

为持续改善区域水环境质量,上海市于 2016 年—2017 年实施了 30 余座城镇污水处理厂提标改造和新建、扩建工程,执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,其重点在于氮、磷等污染物的深度处理。近年来,作为深度处理生物脱氮的重要工艺——反硝化滤池已在国内

得到广泛应用。夏文辉等^[1]、严国奇等^[2]介绍了反硝化滤池在大型污水厂的设计、调试与运行情况,系统脱氮效果稳定。周晓黎等^[3]依托实验室反硝化生物滤池,研究了生物膜胞外聚合物(EPS)的空间分布特征,发现沿水流方向 EPS 含量呈先升高后降低的变化趋势,在滤料层中间段最高。但受多种条

件影响,其实际处理效果报道不多,且较少结合微生物特征来判断运行状态。以某城镇污水处理厂工程为依托,探讨了反硝化滤池的调试运行情况,并提出设备选择的建议,旨在为该工艺的推广应用积累实际工程经验,为污水厂的运行管理提供参考。

1 工程概况

上海市某城镇污水处理厂于2017年初开始实施提标改造工程,改造后主体工艺流程为“粗/细格栅—曝气沉砂池—初沉池—改良型 Bardenpho—二沉池—磁混凝沉淀池—反硝化滤池—消毒池”,其中深度处理段“磁混凝沉淀池—反硝化滤池”为新增单体。反硝化滤池集生物脱氮和过滤为一体,结合传统过滤和反硝化作用,同时去除悬浮物和总氮。土建按远期 $24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 设计,共14格。近期运行按 $18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,投产10格。滤池设计进、出水水质见表1(其中,设计最低水温为 12°C ,出水指标优于一级A标准)。

表1 反硝化滤池设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of denitrification

项目	filter			
	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			
设计进水	TN ≤ 18	SS ≤ 20	TP ≤ 1.5	$\text{NH}_3 - \text{N} \leq 1.5$
设计出水	TN ≤ 10	SS ≤ 5	TP ≤ 0.3	$\text{NH}_3 - \text{N} \leq 1.5$

2 主要构(建)筑物及设备配置

① 反硝化滤池

磁混凝沉淀池出水总渠分两路管道进入反硝化滤池,滤池为东西两侧布置,每侧布置混合池,设置1台混合搅拌机,功率为5.5 kW,用于快速混合碳源。滤池共14格,单格尺寸($L \times B \times H$)为 $22.75 \text{ m} \times 4.88 \text{ m} \times 5.85 \text{ m}$ 。池底安装高密度聚乙烯滤砖,作为配水布气系统,收集滤液至池底中央的集水槽;反冲洗过程中,均匀分布反冲洗气流和水流;同时作为滤料层的承载结构。由下至上布置承托层和石英砂层,规格依次为5层砾石($19 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ 、 $13 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 、 $6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 、 $13 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 、 $19 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$),以及石英砂层。石英砂粒径为 $1.70 \sim 3.35 \text{ mm}$,均匀系数为1.35,滤层高度为2 m,球形度 > 0.8 ,莫氏硬度为7。

② 反冲洗清水池

尺寸($L \times B \times H$)为 $21.0 \text{ m} \times 9.0 \text{ m} \times 4.3 \text{ m}$ (有效水深为3.3 m),与清水渠连通。设反冲洗水泵(潜水泵3台,2用1备),流量为 $839 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程为

98 kPa,功率为35 kW。

③ 废水池

尺寸($L \times B \times H$)为 $19.7 \text{ m} \times 9.0 \text{ m} \times 6.1 \text{ m}$ (有效水深为5.1 m),与清水渠连通。设置废水泵(潜水泵2台,1用1备),流量为 $296 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程为81 kPa,功率为10 kW。设潜水搅拌机2台,功率为4 kW。

④ 鼓风机房

尺寸($L \times B \times H$)为 $22.0 \text{ m} \times 9.3 \text{ m} \times 8.2 \text{ m}$,与滤池合建。设反冲洗鼓风机3台(2用1备),风量为 $5074 \text{ m}^3/\text{h}$,风压为0.07 MPa,功率为160 kW。设空压机2套,风量为 $0.84 \text{ m}^3/\text{min}$,风压为0.7 MPa,功率为5.5 kW,配套冷干机、储气罐等。

⑤ 碳源投加系统

新建储液池,设投加泵2台,互为备用,流量为 1500 L/h ,压力为0.3 MPa,功率为0.75 kW,分别投加至东西两侧碳源混合池。

⑥ 控制系统

每格滤池设置5个气动蝶阀/闸门,分别为进水闸门、出水调节蝶阀、反冲洗进水蝶阀、反冲洗空气蝶阀、废水蝶阀。反冲洗水泵出口总管设置1个调节蝶阀,反冲洗鼓风机出口总管设置1个电动放空阀。系统内主要仪表包括:进水流量计、反冲洗水流量计、超声波液位计、进出水硝酸盐分析仪、进水溶氧仪,以及配套所需的压力开关和液位开关等。滤池配套1个主控柜,防护等级IP55,含PLC及人机界面,用于控制滤池运行,包括反冲洗鼓风机、反冲洗水泵、废水泵及所有自动控制阀门和仪表。

3 运行效果及分析

3.1 调试启动

该工程于2017年12月建设完工,12月底正式进入调试运行阶段。初期进水量为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,以8格运行。调试阶段正值冬季,启动初期水温为 $10 \sim 12^\circ\text{C}$,进水DO为 $8.5 \sim 9.7 \text{ mg/L}$,SS较低,为 $3 \sim 14 \text{ mg/L}$,COD为 $15.2 \sim 44.2 \text{ mg/L}$,平均值为 24.6 mg/L 。启动方案有两种:①采用污泥接种,降低滤池的液位至砂面上 $300 \sim 500 \text{ mm}$,连接污泥泵和软管后,开启污泥泵,首批投泥;将二沉池污泥分别投加到每格滤池作为接种污泥,并通过曝气使污泥均匀分布。②当水质浓度较低或外部因素受限时,采用自然培养挂膜的方式,依靠前端二沉池出水SS所携带的微生物完成污泥培养及积累,在启动的

前2~3天,系统可超越磁混凝沉淀池运行或者暂停混凝加药。方案①接种生化污泥,在缺氧环境下可能出现释磷现象,存在磷超标的风险。因此,该工程采用自然培养的方式挂膜,依靠前段出水SS所携带的微生物完成污泥培养及积累,培养反硝化细菌。

根据水量和进水中硝酸盐浓度,计算醋酸钠投加量(Q)。启动时,先按25% Q 投加碳源(20%的醋酸钠)。由于滤池初期无反硝化效果,在这个阶段出水COD会有所上升,但因少量投加醋酸钠,COD浓度上升不明显,不致引起出水有机物超标。每天早晨8点取样,根据出水硝酸盐浓度逐步提高碳源投加量。在冬季建议投加比例分别按45%、65%、85%和100%,略微过量供给,以促使反硝化细菌尽快占据主导地位。

3.2 微生物特征

生物培养驯化过程中采用双目生物显微镜(XSP-4C)镜检。在反冲洗过程中,气水冲洗约10 min(2/3进程)时取反冲洗废水镜检。培养初期(第1周内)污泥镜检图片见图1。镜检发现菌胶团、微生物种类和数量较少,只能看到少量扭头虫、栉纤虫,偶尔发现1~2只线虫。

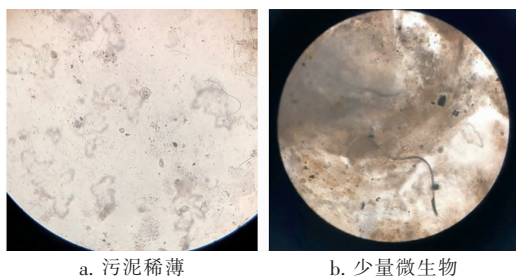


图1 培养初期的污泥镜检结果

Fig. 1 Microphotographs of sludge in the initial culture period

2周后,出水硝酸盐浓度呈降低趋势,在碳源供给稳定的情况下,一旦反硝化效果产生,脱氮效果增长明显,2~3 d内趋于稳定。培养后期的污泥镜检结果见图2。由图2可以观察到,随着调试的进行,首先是丝状菌大量出现,再逐渐出现原生动物和后生动物,如累枝虫、钟虫、轮虫、线虫等,微生物种类丰富,对照硝酸盐的去除效果,说明系统已具备反硝化功能。后期运行期间也发现,当系统受到外界冲击时,微生物种群特征变化,菌种种类和数量减少,特别是丝状菌明显减少。这种情况也与刘凯等^[4]的研究报道一致。丝状菌作为反硝化作用的指示生物之一,既有助于其他菌落围绕其生长,也能依靠菌

丝体的交织作用增加膜块的机械强度^[5]。因不同的污水处理厂水源水质的差异,主要微生物种类也存在较大差异,应按照全厂构筑物的流向进行观察,寻找优势种群的生态演替规律,指示系统运行的状态和判断处理效果。

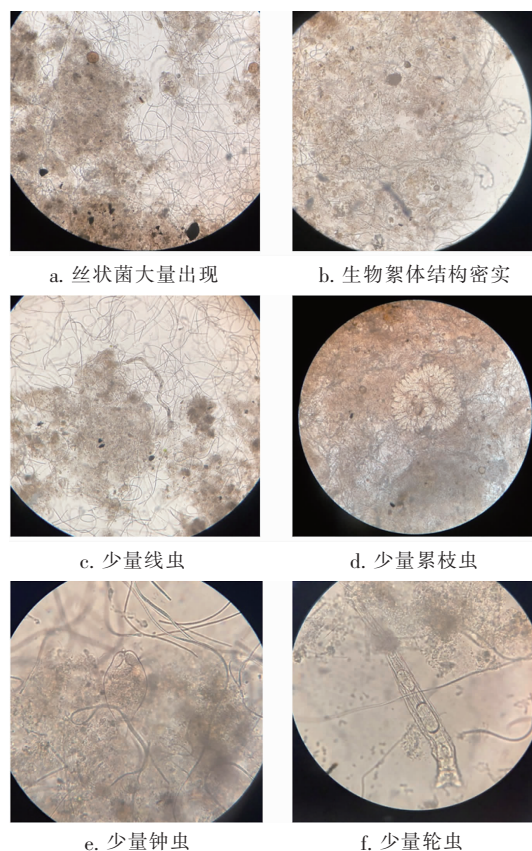


图2 培养后期的污泥镜检结果

Fig. 2 Microphotographs of sludge in the later culture period

3.3 溶解氧的变化

采用HACH HQ40d溶解氧分析仪,浸入式检测滤池内DO的变化情况,分别测定2#、10#滤池进水渠内、滤池内(高低液位及砂面)、清水池内几处,其中高液位为液面淹没进水堰堰口(距滤料顶1.75 m),低液位为经出水调节阀调节后的最低液位(距滤料顶1.55 m),调试初期高低液位波动为 ± 0.1 m。1月—2月水温维持在11~13℃,2#、10#滤池DO浓度相近,进水渠内、滤池内高低液位的DO变化范围依次为8.47~9.31、8.49~9.63、8.46~9.48 mg/L,且高低液位的DO无明显变化。许多研究认为,应控制恒液位避免跌水而产生二次充氧^[3]。而上述数据与现有研究结果不同,分析因进水DO接近饱和,此阶段跌水对DO影响较小。

图3为滤池内DO的变化情况。通过对比发现启动初期清水池DO略降低,约为6~8 mg/L,此时进、出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 无明显变化;随着清水池DO逐渐降至3 mg/L以下,进、出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈下降趋势;当清水池DO<1 mg/L时,系统对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除趋于稳定。按设计规范,活性污泥法缺氧反硝化要求DO<0.5 mg/L,而在实际反应中,由于污泥颗粒尺寸较大,沿粒径方向存在DO浓度梯度,故反硝化对DO的要求显著降低。但当同时存在分子态氧和硝酸盐时,氧会与硝酸盐竞争电子供体,DO会优先消耗掉碳源有机物,造成无效的药耗,且不利于反硝化菌的优势生长,并且可能使反硝化反应集中在填料区后段,从而造成反硝化滤池空间利用不足,影响脱氮效率^[6-7]。

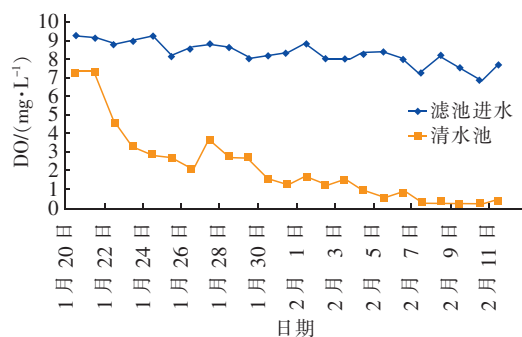
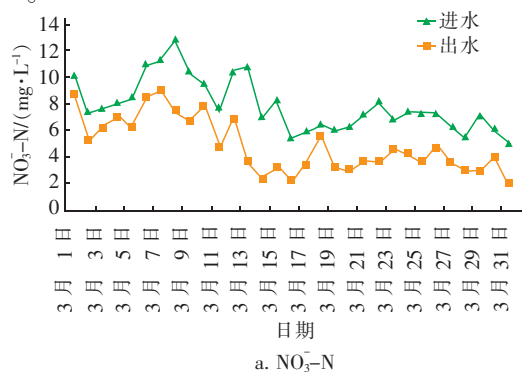


图3 溶解氧在滤池内的变化情况

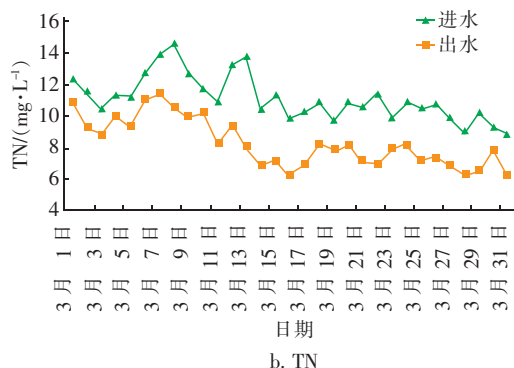
Fig. 3 Change of dissolved oxygen in the filter

3.4 系统运行效果

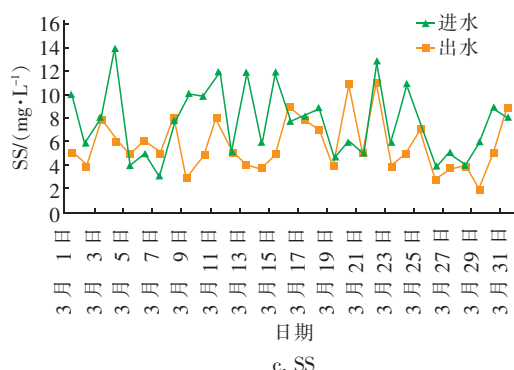
经连续运行,系统整体、各子系统和设备运行正常,稳定可靠。主要监测项目有进、出水的COD、SS、TP、TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 等,出水水质稳定达到且优于一级A标准。2018年3月主要水质指标变化如图4所示。由图4可见,系统对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN具有非常稳定的去除效果,出水TN稳定在<10 mg/L。



a. $\text{NO}_3^- - \text{N}$



b. TN



c. SS

图4 反硝化滤池对污染物的去除效果

Fig. 4 Treatment effect on contaminants of denitrification filter

稳定运行后,初期水量为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,以8格运行;反冲洗频率每48 h一格;驱氮频率为每3~4 h一次;碳源采用20%的乙酸钠溶液,自动投加,投加比率为6~11;碳源前馈计算依据为(进水硝态氮-目标硝态氮)×投加比率/碳源浓度×进水流量/密度;碳源后馈计算依据为比较出水硝态氮和目标硝态氮,系统自动调整投加比率。

3.5 技术经济分析

该工程投资为2 012万元,主要直接运行费用包括电费、药剂费、人工费。其中,系统装机容量为668 kW,电耗为 $0.006 2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,电价按0.76元/(kW·h)计,则电费为0.004 7元/ m^3 。药剂主要为20%的乙酸钠溶液,用量平均为0.58 t/d,单价按1 500元/t计,药剂费为0.0073元/ m^3 。运行管理依托厂内现有定员,故人工费未单独计算。该工程新增的直接运行费用为0.012元/ m^3 。

4 技术难点分析

① 滤池单格面积大,安装精度要求高。滤池单格面积与池型、生产规模、操作运行方式等有关,也与滤后水汇集和冲洗水分配的均匀性有较大关系。从运行经济性和反冲洗均匀性方面考虑,单格

滤池面积一般不宜大于 100 m^2 。从土建、设备等方面综合考虑,该工程单格面积为 111.02 m^2 ,尺寸为 22.75 m (长) $\times 4.88 \text{ m}$ (宽)。为了保证布水布气的均匀性,安装精度要求高,空气支管管顶位于滤砖2个配气孔之间,空气主管安装偏差在 $\pm 3 \text{ mm}$ 范围内,单条滤砖长度方向水平度偏差为 $\pm 3 \text{ mm}$,整格滤砖水平度偏差不得超过 $\pm 6 \text{ mm}$ 。

② 下向流的滤池由于进水渠起始端和末端水位的差异,以及受土建施工精度影响,常存在内部配水不均匀的问题,容易导致局部水质穿透^[8]。采用两侧对称布置,因厂区占地受限,从前序单元的出水总渠由两路管道分别向两侧进水,更增加了进水分配的难度。单格滤池进水槽设置可调整高度的堰板,槽纵向堰顶水平偏差为 $\pm 1 \text{ mm}$,池与池之间堰顶竖向偏差为 $\pm 2 \text{ mm}$,进水后再根据所有滤池的进水速度微调,以保证进水流量均衡。在实际运行过程中,由于进 waters 量的波动,特别是在小流量时,单

格流量不能完全均匀,因此考虑后期在每格滤池进水闸门之后增设一道堰板,作为一级布水堰板,在进水渠道内进一步削弱水流的动能,促使水流分布更为均匀^[9]。

③ 反硝化最合适的温度为 $20 \sim 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$,低温会降低反硝化细菌的繁殖速率和代谢速率,温度 $< 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 反硝化速率明显降低,在 $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时反硝化速率极低,不到 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的 $1/7$ ^[4,10]。该工程的系统调试启动期正好在冬季,进水水温较低 ($10 \sim 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$),处于反硝化细菌生长温度的低限,成为影响微生物培养周期的主要问题。调试阶段滤池实际进水负荷较低,选用自然培养的方式,启动周期相对较长,在前2周内基本上未出现明显的反硝化效果,2周后反硝化效果逐渐明显并稳定。

④ 由于进水溶解氧过高,会增加碳源的用量。在调试期间,追踪了从二沉池到清水池的溶解氧浓度变化情况(见表2)。

表2 沿程溶解氧数值

Tab.2 Value of dissolved oxygen from secondary clarifier to clean water tank

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

项目	二沉池			提升泵		磁混凝池				滤格			清水池	
	进水	堰前出水	堰后出水	泵前	泵后	进水	池内	出水槽	总出水渠	进水渠	高液位	低液位	进水	出水
1月23日	8.78	6.29	7.75	6.94	7.37	8.73	8.32	8.82	9.03	9.00	9.50	9.40	3.39	6.43
1月25日	4.23	—	4.38	5.9	6.55	7.76	—	—	8.22	8.18	8.36	8.46	2.65	5.27

注:“—”表示未检测。

由表2可知,受前端生化池的影响,二沉池出水DO已高于 4 mg/L ,且波动较大,经过提升泵提升后DO达到 $6 \sim 8 \text{ mg/L}$,再经后续单元逐级升高,造成滤池进水DO居高不下。在后期将考虑优化前端工艺,控制溶解氧的升高。建议设计阶段在全厂系统内考虑溶解氧的变化,而不仅从滤池单元考虑。

为了降低水头跌落对充氧的影响,在反硝化滤池中普遍采用恒液位的运行模式,而控制恒液位要求液位和出水调节阀开度之间实时响应,这对液位计的精度和灵敏度,以及阀门动作速度和阀板动作次数都提出了更高要求,需要在运行成本和设备寿命之间综合考虑。

5 结论

① 上海某城镇污水处理厂提标改造工程采用反硝化滤池,脱氮效果显著,直接运行费用为 0.012 元/m^3 ,能稳定实现出水总氮指标达到并优于一级A标准。

② 在冬季低温条件下采用自然培养污泥的方式调试,约2周后反硝化效果逐渐显现并在 $2 \sim 3 \text{ d}$ 内趋于稳定。微生物特征变化明显,直接反映系统运行状态,建议作为日常运行必要的检测项目。

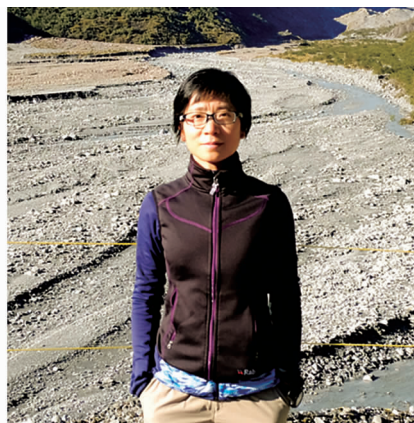
③ 观察滤池进、出水DO变化,有助于了解反硝化的运行环境。通过优化控制全厂系统内DO,从而降低滤池进水DO,对反硝化的经济运行具有重要意义。

④ 在长期运行过程中,需要运营人员积累运行数据,分析滤池的运行状态,在保证系统出水各项水质指标的前提下,对反洗周期、碳源投加量等重要运行参数进行调整,摸索系统在不同工况、不同季节下的最佳运行参数,进一步降低处理能耗。

参考文献:

- [1] 夏文辉,杨兴豹,张超,等. 污水厂 Denite[®]深床反硝化滤池升级改造工程设计[J]. 中国给水排水,2011,27(8):64-67.

- Xia Wenhui, Yang Xingbao, Zhang Chao, *et al.* Design of deep bed Denite[®] filter for upgrading and retrofitting of WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(8): 64–67 (in Chinese).
- [2] 严国奇, 张丽丽. 七格三期污水处理厂反硝化深床滤池的调试与运行[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(16): 127–132 (in Chinese).
- Yan Guoqi, Zhang Lili. Commissioning and operation of deep-bed denitrification filter in Qige phase III wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(16): 127–132 (in Chinese).
- [3] 周晓黎, 孙迎雪, 石娜, 等. 反硝化生物滤池生物膜胞外聚合物空间分布特征[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(5): 2836–2844.
- Zhou Xiaoli, Sun Yingxue, Shi Na, *et al.* Spatial distribution characteristics of extracellular polymeric substances in a denitrification biological filter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(5): 2836–2844 (in Chinese).
- [4] 刘凯, 王海燕, 马名杰, 等. 温度对城市污水厂尾水反硝化 MBBR 深度脱氮的影响[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(6): 877–886.
- Liu Kai, Wang Haiyan, Ma Mingjie, *et al.* Influence of temperature on nitrogen removal from wastewater treatment plant effluent by denitrification MBBR [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(6): 877–886 (in Chinese).
- [5] 罗志腾. 水污染控制工程微生物学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1988.
- Luo Zhiteng. *Microbiology for Water Pollution Control Engineering* [M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 1988 (in Chinese).
- [6] 刘欢, 王源, 骆灵喜, 等. 城市污水处理厂高溶解氧尾水脱氮研究[J]. *广东化工*, 2016, 43(14): 26–28.
- Liu Huan, Wang Yuan, Luo Lingxi, *et al.* Study on the nitrogen removing capacity along the path of biological denitrification filter [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2016, 43(14): 26–28 (in Chinese).
- [7] 胡洁, 刘怡心, 张辉, 等. 曝气沉砂池跌水充氧对反硝化影响及改造建议[J]. *安徽科技*, 2018(5): 48–51.
- Hu Jie, Liu Yixin, Zhang Hui, *et al.* Effects on denitrification of reoxygenation in dropping water & improving suggestions for aerated sand basin [J]. *Anhui Science & Technology*, 2018(5): 48–51 (in Chinese).
- [8] 唐仲民, 戴文权. 湖南怀化梅子湾水厂过滤系统的技术改造[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(12): 79–82.
- Tang Zhongmin, Dai Wenquan. Renovation of filtration system in Meiziwan Waterworks in Huaihua City of Hunan Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(12): 79–82 (in Chinese).
- [9] 李亚林, 袁寿其, 陈义春, 等. 快滤池进水渠道内堰板的正交试验与优化设计[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2015(1): 96–100.
- Li Yalin, Yuan Shouqi, Chen Yichun, *et al.* Orthogonal test and optimization design of weir plate in the water channel of rapid filter [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2015(1): 96–100 (in Chinese).
- [10] Vidal S, Rocha C, Galvão H. A comparison of organic and inorganic carbon controls over biological denitrification in aquaria [J]. *Chemosphere*, 2002, 48(4): 445–451.



作者简介: 商佳吉 (1984 –), 女, 四川眉山人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为污水深度处理及回用。

E-mail: shangjiagi@sptec.com.cn

收稿日期: 2018–09–12