

工程实例

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.14.018

北京中心城区再生水厂“京标”A提标改造工程实践

时玉龙, 雷登科, 蒋奇海, 鲍海鹏, 张荣兵, 张志渊, 白煜,
尹昱程, 王金惠

(北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要: 北京五里坨再生水厂采用改良“AAO+SBR”(MSBR)工艺,本文聚焦2022年冬季该厂由《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB11/890—2012)(简称“京标”)B级提标至A级的工程改造与运行优化措施,对提标前(2022年1月)与提标后(2023年1月)的运行数据进行对比分析。结果表明,SBR池筛选排泥套筒显著改善了冬季污泥沉降性能,污泥体积指数(SVI)降幅达69.5%。进水碳源分配优化、外加碳源多点投加及一体化泵站的应用,有效提升了系统的脱氮效率,MSBR对总氮的月度去除量与去除率均值分别提高38.67%、12.86个百分点。新增侧流自养脱氮滤池对再生水厂出水总氮去除量的贡献为1.71 mg/L。提标改造后,各项出水水质均满足“京标”A级的限值要求,电耗、药耗增加对应处理成本增量为0.22元/m³。

关键词: MSBR工艺; 强化生物脱氮; 硫自养反硝化; 再生水厂; 提标改造

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0123-07

Upgrading of a Water Reclamation Plant in Beijing Central Urban Area to Meet the Class A of the Local Discharge Standard

Shi Yulong, Lei Dengke, Jiang Qihai, Bao Haipeng, Zhang Rongbing,
Zhang Zhiyuan, Bai Yu, Yin Yucheng, Wang Jinhui
(Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: This paper focuses on the modified AAO+SBR (MSBR) process at the Wulituo water reclamation plant, highlighting the engineering modifications and operational optimization measures implemented during the upgrading from class B to class A of *Discharge Standard of Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plants* (DB11/890-2012) in the winter of 2022. A comparative analysis was conducted on operational data between pre-upgrading (January 2022) and post-upgrading (January 2023). The results indicate that the implementation of a selective sludge discharge sleeve in the SBR tank significantly improved sludge settleability during winter, with a 69.5% reduction in the sludge volume index (SVI). Optimization of influent carbon source distribution, multi-point dosing of external carbon sources, and the use of integrated pump stations effectively enhanced the nitrogen removal efficiency. The monthly total nitrogen (TN) removal amount and removal rate of the MSBR process increased by 38.67% and 12.86 percentage points, respectively. The newly added side-stream autotrophic nitrogen removal filter contributed 1.71 mg/L of TN removal in the final effluent. Following the upgrading, all effluent quality parameters met the limits of class A of DB11/890-2012, with increases in electricity and chemical consumption corresponding to a unit treatment cost increment of 0.22 CNY/m³.

Keywords: MSBR process; enhanced biological nitrogen removal; sulfur autotrophic denitrification; water reclamation plant; upgrading

永定河是京津冀晋地区重要的水源涵养区和生态廊道。2020年永定河北京段实现断流25年来的首次全线通水。2024年永定河北京段地表水Ⅲ类及以上水质河长占比达93.7%,绿色生态屏障日益巩固。五里坨再生水厂是北京市中心城区16座规划再生水厂中设计处理规模最大的执行《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB11/890—2012)(简称“京标”)A级的再生水厂,也是中心城区唯一直接向永定河生态补水的城镇净水设施^[1]。

为适应永定河水系的功能定位,满足永定河综合治理与生态修复的切实需求,自2013年建成投产

以来,五里坨再生水厂出水标准已从最初的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A逐步提升到“京标”A级。出水水质标准提升情况见表1。冬季低温期,受微生物代谢活性降低与胞外聚合物(EPS)组分变化的影响,活性污泥沉降性能与脱氮效率均呈下降趋势^[2]。本文围绕该厂改良“AAO+SBR”(MSBR)主体工艺,聚焦2022年冬季该厂由“京标”B级提标至“京标”A级过程中采取的工程改造与运行优化措施,对提标前后历史同期运行数据进行对比分析,以期为再生水厂挖掘系统潜力、提升精细化运营水平提供经验参考。

表1 五里坨再生水厂出水水质提标情况

时间	出水执行标准	COD	BOD ₅	总氮	氨氮	总磷
2013年7月—2021年12月	GB 18918—2002的一级A	50	10	15	5	0.5
2021年12月—2022年12月	“京标”B级	30	6	15	1.5(2.5)	0.3
2022年12月—	“京标”A级	20	4	10	1.0(1.5)	0.2

注:12月1日—3月31日执行括号内的排放限值。

1 工艺流程及提标前运行情况

五里坨再生水厂一期工程设计处理规模为2万m³/d,设计进水COD、总氮、总磷分别为380、54、8mg/L。此次提标改造前,再生水厂处理工艺为“旋流沉砂池→MSBR生物池→纤维转盘”,出水水质执行“京标”B级标准。总氮、总磷的设计去除率分别为72%、96%,出水经高井沟补给永定河。

MSBR主体工艺将A²O与SBR结合,是一种兼具厌氧/缺氧/好氧空间功能分区与时间序批式的改良型活性污泥工艺^[3]。该工艺在发挥A²O工艺运行稳定性的同时,可充分利用末端SBR池可调控性强、工序灵活多变的优势。空气堰出水方式助力SBR池实现同步进、出水,池内液位保持恒定,可进一步提升系统的容积缓冲能力。

主体工艺流程如图1所示。

MSBR工艺包含7个处理单元,1#、7#为SBR池,均配备浮筒搅拌器,缺氧搅拌时段启用;3#、4#、5#分别为预缺氧区、厌氧区、缺氧区,均配备浮筒搅拌器,持续搅拌;2#为污泥浓缩池,6#为好氧池。1#、7#SBR池的外回流污泥进入2#污泥浓缩池,2#污泥浓缩池与3#预缺氧池通过隔墙底部坡角为25°

的斜面连通。2#池上清液进入5#缺氧池,而浓缩后的污泥则滑落到3#预缺氧区,进行内源反硝化。生物池进水与3#浓缩污泥共同进入4#厌氧池,在进行厌氧释磷等系列反应后进入5#缺氧区,5#缺氧区可投加乙酸钠以强化对内回流硝酸盐氮的去除。6#好氧池投加聚合氯化铝(PAC)强化除磷,好氧池出水交替进入后续1#、7#SBR池。1#、7#SBR池各序批段(缺氧搅拌、好氧曝气、预沉淀、进出水)时长灵活可调。

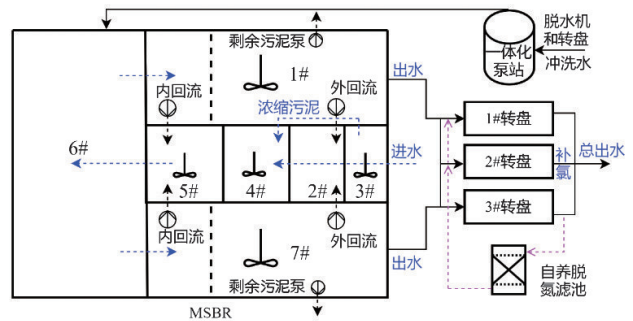
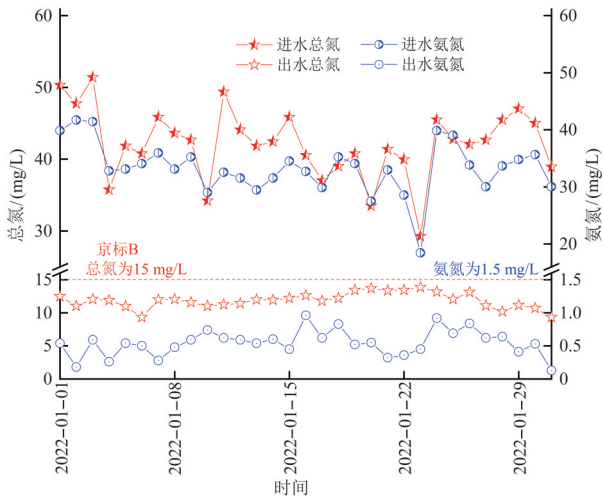


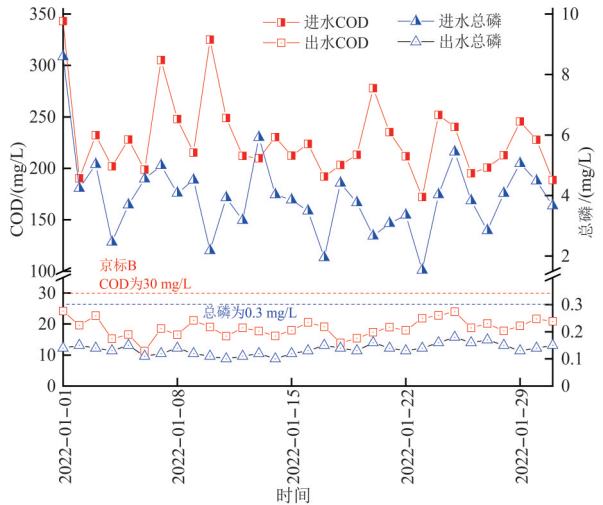
图1 主体工艺流程

提标改造前,2022年1月再生水厂的日均处理水量为1.52万m³/d,水力负荷率为76%。进出水水质、MSBR工艺活性污泥主要性能指标变化如图2

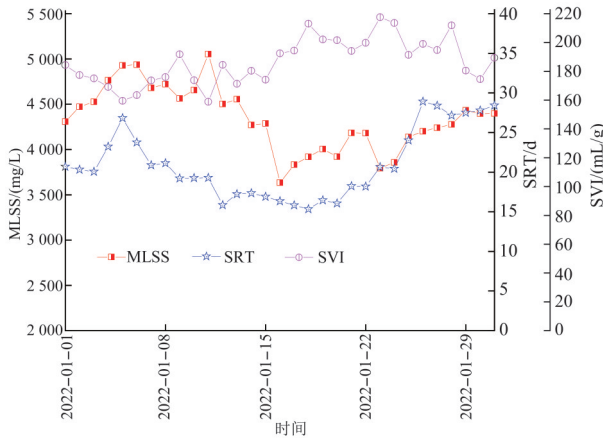
所示。



a. 提标前的进、出水氨氮和总氮



b. 提标前的进、出水COD和总磷



c. MSBR 的 MLSS、SVI、SRT

图2 提标前2022年1月进、出水水质与主要污泥指标
进水 COD、总磷的月均值分别为 215.14、3.93

mg/L, 与全国调研污水处理厂进水平均浓度基本持平。总氮均值为 42.44 mg/L, 较全国进水总氮平均浓度 (30.36 mg/L) 高出约 39.79%^[4]。进水 BOD₅/总氮偏低, 月均值为 2.7。进水水温为 13.7~15.2℃, 平均水温为 14.4℃。

MSBR 主体工艺月均混合液悬浮固体 (MLSS) 为 4308 mg/L, 混合液挥发性悬浮固体 (MLVSS) 占比为 61.0%, 污泥停留时间 (SRT) 为 20.3 d。气水比为 4:1~6:1, 6#好氧池曝气风量约 4000 m³/h, 中段溶解氧 (DO) 维持在 2.0~4.0 mg/L, 末端 DO<0.8 mg/L。1#、7#SBR 池按上半周期 (搅拌、曝气、预沉淀)、下半周期 (沉淀、同步进出水) 交替运转, 运行工序如表 2 所示。

表 2 1#、7#SBR 池每个周期的运行工序 min

1#SBR	搅拌:40	曝气:10	预沉淀:70	沉淀、同步进出水:120
7#SBR	沉淀、同步进出水:120	搅拌:40	曝气:10	预沉淀:70

两座 SBR 池至 5#缺氧池内回流比、至 2#污泥浓缩池外回流比分别为 250%、140%。SBR 池污泥沉降性能较差, 污泥体积指数 (SVI) 维持在 158.8~217.6 mL/g 的高位区间, 均值高达 184.5 mL/g (见图 2)。高泥位导致跑泥仍是 SBR 池冬季运行的主要挑战之一。2022 年 1 月, 全厂生产电耗月均值为 0.35 kW·h/m³, 5#缺氧池乙酸钠、6#好氧池 PAC 投配率分别为 40.9、11.6 mg/L。

MSBR 产水经纤维转盘进一步截留 SS、补氯后出水, 总出水 COD、总氮、氨氮、总磷变化区间分别为 11.27~24.17、9.33~13.85、0.13~0.96、0.10~0.18 mg/L, 月均值分别为 18.79、11.98、0.54、0.14 mg/L。总氮月去除量与去除率均值分别为 30.85 mg/L、72.39%。各项指标均满足“京标”B 级标准。与拟提标的“京标”A 级相比, 现况工艺出水的氨氮、总磷可满足其限值要求, 但 COD、总氮存在差距。其中, COD>20 mg/L 的天数占比为 32.26%, 而总氮>10 mg/L 的天数占比高达 93.55%, 因此强化生物脱氮是此次提标改造的首要任务。

2 提标改造与运行优化措施

针对生物强化脱氮除磷, 管控 SRT 是基础^[5], 合理调控进入厌/缺氧段的 DO、硝酸盐氮, 提供有效的厌氧、缺氧反应时长是条件, 而碳源的分配优化与

内碳源开发则会进一步激发系统潜力。国内外实践表明,将污泥侧流发酵产生的优质碳源与富集的特殊功能菌回流到主流区,可以强化系统的脱氮除磷效果^[6-7]。高碑店再生水厂改造工程中,先将剩余污泥排到初沉池,与初沉污泥混合发酵后再排入泥区^[8]。王刚等^[9]研究发现,初沉池污泥混合发酵过程中挥发性脂肪酸(VFAs)与磷酸盐的释放对生物除磷有明显的促进作用。哈尔滨工业大学研究团队^[10]根据污水处理厂进水C/N的变化,灵活分配剩余污泥用于侧流发酵强化脱氮除磷与厌氧消化产甲烷热电联产,在提高碳源利用效率的同时实现碳减排。五里坨再生水厂在此次由“京标”B级向“京标”A级的提标改造中,通过筛选排泥套筒改善污泥沉降性能,厌/缺氧段扩容、优化碳源分配,以及在MSBR池下游增加侧流自养脱氮滤池等措施,在保证总磷稳定达标的同时,强化总氮的去除。

2.1 SBR池筛选排泥

为改善冬季污泥沉降性能,对1#、7#SBR池剩余污泥泵分别加装筛选排泥套筒(直径1.0 m、高度0.8 m),套筒直接设在池底。剩余污泥泵仍使用原有耦合装置,放在排泥套筒底部中心位置。受重力作用下污泥分层沉降的影响,高于排泥套筒上沿的轻质污泥优先被吸入套筒并被剩余污泥泵排出系统,而SBR池底部密度较大的污泥絮体则继续在系统内循环。为加速污泥沉降性能的改善,湿法投加粒径150目左右的粉末活性炭,4 d累计投加2.75 t。MSBR池活性污泥干泥(DS)量以60 t核算,对应粉末活性炭投配率为45.8 mg/gDS。

2022年11月初安装筛选排泥套筒,11月中旬投加粉末活性炭。投加粉末活性炭优化污泥絮体结构,见效快,而加装筛选排泥套筒持续将上层轻质污泥从系统中分离去除,则更侧重于长效机制,两者协同作用显著改善了冬季MSBR的污泥沉降性能。1#、7#SBR池SVI均值由2022年11月第1周的130.0 mL/g快速降至2022年12月最后1周的51.6 mL/g,降幅达60.3%,且由此开始2座SBR池的SVI进入相对稳定的平台期。

2.2 厌/缺氧段反应效率提升

MSBR池3#预缺氧区、4#厌氧区、5#缺氧区的有效容积分别为405、864、1 120 m³,设计停留时间相应为0.49、1.04、1.34 h,低于《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中A²O生物脱氮除磷工艺厌氧段

1~2 h、缺氧段2~10 h的推荐值。

提标改造前,厂区回流到栅前的自用水量较大。以每天1车15 t泥饼(含水率为80%)外运量核算,2台带式压滤机滤液及滤布冲洗水量约为1 300 m³/d。若污泥量增加,废水量还会升高。此外,3台纤维转盘冲洗消耗中水量为360 m³/d。前述两者占2023年1月日均总进水量的8.80%。此次提标改造新增一体化泵站,配备2台额定流量为80 m³/h、扬程为10 m的潜水泵。将脱水机滤液及冲洗水、纤维转盘冲洗水跨越4#厌氧池、5#缺氧池,直接泵送至6#好氧池出水侧。一体化泵站的使用既降低了进水抽升压力、提高了系统产水率,又将4#厌氧池、5#缺氧池、6#好氧池的容积提升8.80%以上。

3#预缺氧区的设计初衷是内源反硝化脱氮,以减缓外回流污泥中的硝酸盐氮对4#池厌氧环境的冲击。常规内源反硝化速率较低,即使在以后端缺氧区内源反硝化强化脱氮而著称的AOA工艺中,通常也需要缺氧段内源反硝化停留时间>4 h^[11]。尽管2#污泥浓缩池可将进入3#预缺氧区及后续单元的外回流污泥量降低约30%,3#预缺氧区名义停留时间提升至约0.7 h,但其反硝化作用并不明显,实测硝酸盐氮仍维持在6.28~7.68 mg/L。此次提标改造新增进水分配管路,将部分生物池进水引至3#预缺氧区,参照高碑店再生水厂等相关工程案例^[8,12],3#预缺氧区进水分配比例为15%。同时,乙酸钠由5#缺氧区单点投加,调整为3#预缺氧区、4#厌氧区、5#缺氧区3点递减式投加。2022年12月历史投加数据分析显示,乙酸钠3点投加比例约为3.5:1.5:1。通过进水碳源分配优化与外加碳源多点投加,将反硝化脱氮反应区域向MSBR工艺上游扩展。3#预缺氧区与5#缺氧池的氧化还原电位(ORP)分别在-60、-50 mV附近波动,而4#厌氧池ORP则主要集中在-180~-80 mV。3#预缺氧区的反硝化效果得到改善,其出水硝酸盐氮均值为2.69 mg/L,硝酸盐氮平均去除量为4.60 mg/L。5#缺氧区的出水硝酸盐氮也由改造前的5.45 mg/L降至2.00 mg/L。

提标改造前,4#厌氧池监测到厌氧释磷效果,正磷酸盐由0.18 mg/L升高至2.07 mg/L。改造过程中,尝试降低4#厌氧池进水硝酸盐氮、补充外碳源为厌氧生物释磷创造条件,但改造后4#厌氧池正磷酸盐释放量未见明显升高,仍维持在2.00 mg/L左右。分析原因,为提高出水总磷达标保障度,将6#

好氧池的PAC投加量由2022年11月的16.11 mg/L提高至2022年12月的26.83 mg/L。增加PAC投加量在强化除磷的同时,一方面会对生物除磷产生一定的抑制作用^[13],另一方面除磷药剂会与聚磷菌释放的正磷酸盐快速结合,影响正磷酸盐的测定结果^[14]。

2.3 侧流自养脱氮滤池

除二级活性污泥工艺强化脱氮外,高碑店、清河等已投运的再生水厂在升级改造过程中均采用反硝化生物滤池。但在实际运行过程中,反硝化生物滤池出现了不同程度的亚硝酸盐积累问题,既降低了碳源的有效利用率,又会增加下游臭氧、次氯酸钠等氧化剂的消耗^[15-16]。相比之下,在硫自养脱氮技术体系中,以脱氮硫杆菌为代表的硫自养反硝化菌以低价态硫作为电子供体即可将硝酸盐氮还原为氮气,且随着新型硫基功能材料的不断出现,硫自养脱氮滤池因其脱氮效率高、无需外加碳源、对进水DO适应性强等特点,在再生水强化脱氮方面展现出较好的应用前景^[17-18]。

此次提标改造,新建5000 m³/d的侧流自养脱氮滤池,MSBR池出水经3#纤维转盘后,部分进入自养脱氮滤池。自养脱氮滤池出水再进入1#、2#纤维转盘,1#、2#、3#纤维转盘的出水混合后补氯排放。自养脱氮滤池采用下向流形式,共6格,单格尺寸 $L \times B \times H = 5.0 \text{ m} \times 3.1 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$,每格滤池装填2.5 m厚滤料,滤料主要成分为单质硫,粒径为3~5 mm。设计硝酸盐氮去除量为9 mg/L,对应硝酸盐氮容积负荷为0.19 kg/(m³·d)。设计滤速为2.2 m/h,空床停留时间(EBCT)为1.1 h。反洗频次为2~8次/月(为保证低温期脱氮效果,可适当降低反洗频次),气洗强度为12.9 L/(s·m²),水洗强度为3.9 L/(s·m²)。

2022年11月中旬自养脱氮滤池建成后,通过自然挂膜的方式启动。启动约10 d后,出水硝酸盐氮降至2.00 mg/L以下。2023年1月滤池进水水温、pH均值分别为13.3℃、7.45。滤池进水硝酸盐氮主要集中在4.50~8.50 mg/L,均值为6.97 mg/L,如图3所示。

滤池出水硝酸盐氮<1.00 mg/L,均值为0.76 mg/L,硝酸盐氮去除量为6.21 mg/L,平均去除率为88.79%。自养脱氮滤池去除1 mg硝酸盐氮产生约9 mg硫酸盐(SO₄²⁻),出水SO₄²⁻平均为191 mg/L,与同类型滤料中试出水SO₄²⁻浓度接近^[19],均低于《地

表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中集中式生活饮用水地表水源地SO₄²⁻<250 mg/L的限值要求。同样得益于侧流形式,滤池处理水量稳定维持在5000 m³/d,未发生因进水负荷波动引发的出水还原性硫化物浓度升高及次生问题。滤池出水pH较滤池进水降低0.15,亚硝酸盐增加0.35 mg/L,变化幅度较小,与主流1#、2#纤维转盘出水混合后,对总出水影响可忽略。

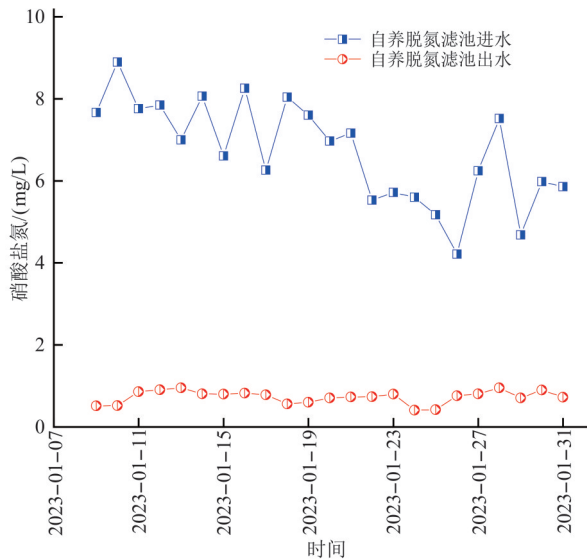
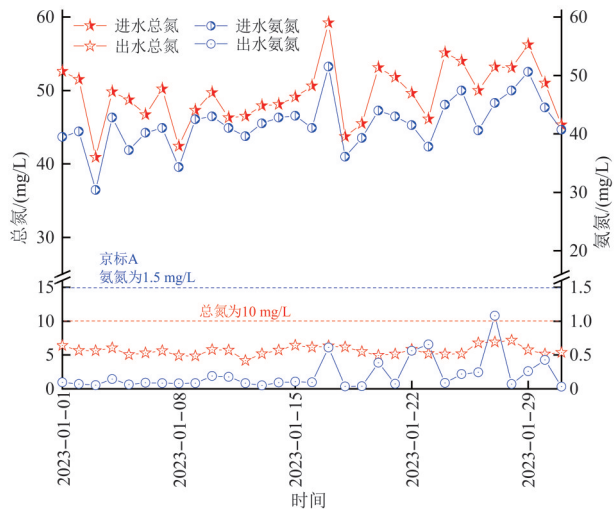


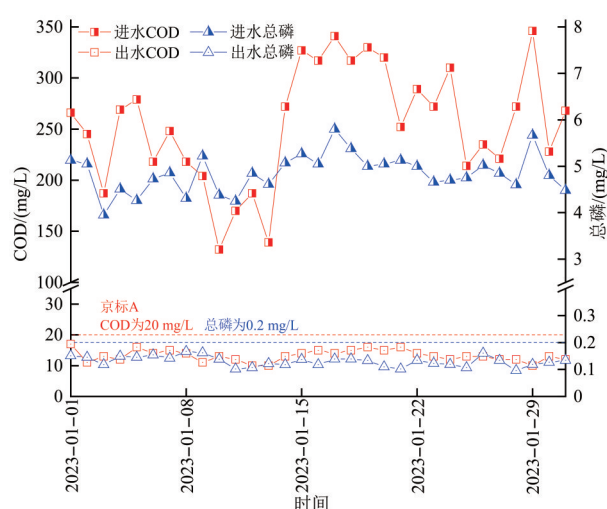
图3 自养脱氮滤池进、出水硝酸盐氮变化情况

3 提标改造后运行情况

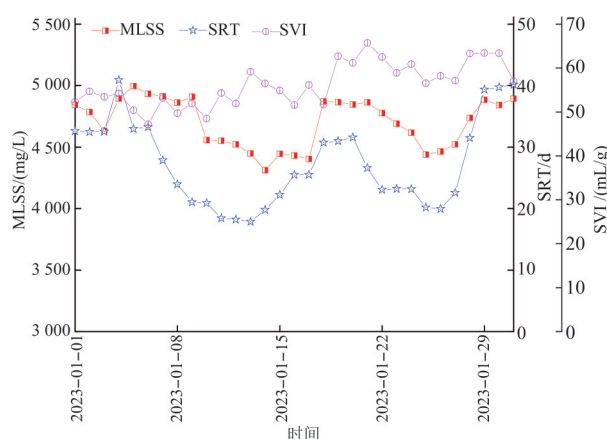
2022年12月,五里坨再生水厂出水标准顺利由“京标”B级提升至A级。提标后,2023年1月的日均处理水量为1.82万 m³/d,水力负荷率为91%,较2022年同期提升19.7%。进、出水水质和MSBR活性污泥的主要性能指标变化如图4所示。



a. 进、出水总氮和氨氮



b. 进、出水COD和总磷



c. MSBR主要污泥指标

图4 提标后(2023年1月)进、出水水质与主要污泥指标

2023年1月进水COD、总氮、总磷月均值分别为266、49.7、4.85 mg/L, 3项指标较2022年同期均有所升高, 平均增幅为21.38%。进水BOD₅/总氮均值为2.3, 较2022年同期降低14.8%。进水水力负荷的提升与BOD₅/总氮比例的下降, 进一步加剧了生物脱氮面临的挑战。

2023年1月, MSBR池的月均MLSS为4776.7 mg/L, MLVSS占比62.7%, SRT为25.5 d。得益于SBR池排泥筛选套筒的使用, 尽管进水水温较2022年同期略低, 月均为14.0℃, 最低为12.7℃, 但SVI降幅明显。2023年1月1#、7#SBR池SVI为45.1~67.2 mL/g, 月均值为56.2 mL/g, 较2022年1月历史同期均值(184.5 mL/g)下降69.5%。

MSBR池的气水比、DO控制区间与2022年1月接近, 6#好氧池曝气平均风量提高至4500 m³/h左右, 内、外回流比分别为200%、110%。1#、7#SBR池

设定时序与表2基本一致, 结合硝酸盐氮与氨氮去除的需要, 搅拌与曝气的时长也在适时调整。例如, 2023年1月末为保证出水氨氮达标, 曝气时间由10 min调至15、20 min。全厂生产电耗月均值为0.40 kW·h/m³。PAC投配率为23.76 mg/L, 乙酸钠投配率为106.24 mg/L, 3#、4#、5#池的投加比例为3:1:1。与2022年1月相比, 提标改造后(2023年1月)电耗、药耗增加, 处理成本增量为0.22元/m³。

2023年1月, 总出水COD、总氮、氨氮、总磷变化区间分别为10.0~17.0、4.18~7.16、0.03~1.08、0.096~0.170 mg/L, 月均值分别为13.0、5.63、0.13、0.094 mg/L, 各项指标均满足“京标”A级标准。针对强化生物脱氮, MSBR出水总氮均值为7.32 mg/L, MSBR主体工艺对总氮的月度去除量与去除率均值分别为42.78 mg/L、85.25%, 较2022年历史同期分别提升38.67%、12.86个百分点。在此基础上, 侧流自养脱氮滤池对MSBR出水(5000 m³/d)的总氮去除量为6.21 mg/L, 折合到总处理水量, 对总出水总氮去除量的贡献为1.71 mg/L。

4 结论与展望

① SBR池筛选排泥套筒显著改善了污泥沉降性能, 为生物脱氮提供了保障。2023年1月, 2座SBR池的SVI月均值为56.2 mL/g, 较2022年1月均值(184.5 mL/g)下降69.5%。

② 进水碳源分配优化与外加碳源多点投加, 将反硝化脱氮反应区域向MSBR上游扩展, 新增一体化泵站将厂区自用水跨越至好氧区末端, 为厌/缺氧段进一步扩容8.80%以上。2023年1月MSBR主体工艺对总氮的月均去除量与去除率均值分别为42.78 mg/L、85.25%, 较2022年1月相应指标分别提升38.67%、12.86个百分点。

③ 新增5000 m³/d侧流自养脱氮滤池出水硝酸盐氮<1.0 mg/L, 硝酸盐氮去除量与去除率分别为6.21 mg/L、88.79%, 对总出水总氮去除量的贡献为1.71 mg/L。MSBR池强化生物脱氮改造与侧流自养脱氮滤池联用为出水总氮实时达标提供了有力保障。

④ MSBR特色鲜明, 具有较好的污泥颗粒化潜力。污泥颗粒化改造是实现其技术迭代以及现况工艺升级改造的可行路径。强化生物脱氮是“京标”B级提标至A级的核心任务, 后续可将工艺关键

节点的ORP、硝酸盐氮数据实时采集,与加药泵进行联锁调控,实现外碳源的智能投加。

⑤ 在总磷的去除方面,优选策略充分发挥生物除磷的经济性,辅以化学除磷,在保证污泥沉降性能的同时,有效应对生物除磷可能的波动。为提高出水总磷的达标保障度,此次提标改造增加了PAC的投加量,在除磷经济性方面尚有提升空间。污泥中的铝盐及其水解产物会与正磷酸盐结合,将对厌氧区正磷酸盐释放量的监测产生影响。建议具备条件的再生水厂采用污泥的聚磷酸盐含量评估生物除磷效果。

⑥ 硫自养脱氮滤池在冬季低温期仍具有较好的总氮去除效果。实践中建议优选侧流方式运行,避免进水负荷波动导致出水还原性硫化物浓度升高,进而引发次生问题。如确需主流方式运行,应设置进水调蓄池,以稳定滤池进水负荷。

参考文献:

- [1] 北京市区污水处理厂合理规模研究课题组. 北京市区污水处理厂合理规模研究[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005:67-91.
- [2] Xie F, Tian C Z, Ma X, et al. Seasonal temperature effects on EPS composition and sludge settling performance in full-scale wastewater treatment plant: mechanisms and mitigation strategies[J]. Fermentation, 2025, 11(9): 532.
- [3] 沈磊, Yang Chester, 吉成豪, 等. 多点进水MSBR耐水力负荷冲击性能及处理效果[J]. 中国给水排水, 2025, 41(15): 97-102.
- [4] 郭泓利, 李鑫玮, 任钦毅, 等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 44(6): 12-15.
- [5] 时玉龙, 鲍海鹏, 蒋奇海, 等. 污泥龄调控实现污水污泥资源化处理良性互动[J]. 工业水处理, 2026, 46(1): 163-167.
- [6] 刘智晓. 生物除磷理论及实践新突破:从主流EBPR到侧流EBPR[J]. 中国给水排水, 2018, 34(24): 19-25.
- [7] Li G Y, Srinivasan V, Tooker N B, et al. Metagenomic analysis revealed community-level metabolic differences between full-scale EBPR and S2EBPR systems [J]. Water Research, 2025, 280: 123509.
- [8] 李鹏飞, 蒋奇海, 张志渊, 等. 高碑店再生水厂升级改造及运行优化[J]. 给水排水, 2019, 45(8): 13-17.
- [9] 王刚, 李魁晓, 时玉龙, 等. 初沉池泥位变化对生物除磷影响规律[J]. 净水技术, 2022, 41(9): 67-71.
- [10] Song Y P, Du L L, Wang B G, et al. Flexible carbon source regulation for mitigating greenhouse gas emissions in full-scale wastewater treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59(19): 9517-9528.
- [11] 高歆婕, 彭永臻. 厌氧-好氧-缺氧(AOA)污水处理工艺的原理、发展与应用[J]. 给水排水, 2025, 51(10): 27-35.
- [12] 柯水洲, 胡祥, 马晶伟, 等. 多段改良A²O脱氮除磷工艺生产运行优化[J]. 中国给水排水, 2023, 39(17): 74-80.
- [13] 毕若彤, 李魁晓, 王刚, 等. 化学除磷药剂对生物除磷的影响研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(11): 3319-3322.
- [14] 王刚, 李魁晓, 高媛, 等. 除磷药剂对生物除磷效能精准评估的影响及改进策略研究[J]. 环境工程, 2026, 44(1): 52-60.
- [15] 王慰, 刘锟, 贺赞, 等. 低碳氮比进水反硝化生物滤池亚硝积累成因[J]. 中国环境科学, 2025, 45(3): 1333-1340.
- [16] 于澜, 李鹏飞, 张达飞, 等. 反硝化生物滤池亚硝酸盐积累研究及管控实践[J]. 中国给水排水, 2025, 41(9): 88-93.
- [17] Zhu T T, Cheng H Y, Yang L H, et al. Coupled sulfur and iron carbonate-driven autotrophic denitrification for significantly enhanced nitrate removal [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(3): 1545-1554.
- [18] Hu K Y, Liu X M, Jia X, et al. Advances in sulphur-iron autotrophic denitrification research and exploration of its future application in wastewater treatment: a critical review[J]. Bioresource Technology, 2026, 439: 133391.
- [19] 王鸿博, 郑晓英, 王慰, 等. 不同挂膜启动方式对复合硫填料自养脱氮效果的影响[J]. 中国给水排水, 2023, 39(5): 9-16.

作者简介:时玉龙(1986—),男,山东德州人,博士,主要研究方向为污水再生处理与污泥资源化处置。

E-mail:yuchengshihit@163.com

收稿日期:2026-03-18

修回日期:2026-04-15

(编辑:衣春敏)