

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.20.016

# 大池深多段AO+双层沉淀工艺用于大型半地下污水厂

刘可<sup>1</sup>, 王雪<sup>1</sup>, 戴仲怡<sup>1</sup>, 曾晓琛<sup>2</sup>, 王宇婷<sup>1</sup>

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 深圳市环水启航水质净化有限公司, 广东 深圳 518030)

**摘要:** 沙井水质净化厂三期设计规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,出水水质执行深圳市《水质净化厂出水水质规范》(DB4403/T 64—2020)表1中的B标准。为减少“邻避”效应,污水厂采用双层加盖半地下结构形式建设,上盖建设市政公园。针对该项目用地紧张、进水碳源不足、出水TN指标要求高的特点,污水二级处理采用大池深多段AO生化池+双层平流沉淀池组合工艺,在集约用地的同时保留了多段AO工艺原水碳源利用率高、脱氮效果好的优势,单位用地指标为 $0.31 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。该项目通水运行至今,系统运行稳定,出水水质全面优于设计排放标准。在进水TN平均为 $40.1 \text{ mg/L}$ 、 $\text{C/N}=1.62$ 、月均乙酸钠(20%)投加量为 $43.5 \text{ mg/L}$ 的条件下,可保证出水TN稳定在 $10 \text{ mg/L}$ 以下。

**关键词:** 半地下式污水厂; 多段AO工艺; 深度处理; 大池深生化池; 双层平流沉淀池; 低C/N; 脱氮

中图分类号: X703 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2025)20-0106-07

## Application of Large-deep Multi-stage AO Processes and Double-deck Sedimentation Tank in a Large-scale Semi-underground WWTP

LIU Ke<sup>1</sup>, WANG Xue<sup>1</sup>, DAI Zhong-yi<sup>1</sup>, ZENG Xiao-chen<sup>2</sup>, WANG Yu-ting<sup>1</sup>

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design & Research General Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 2. Shenzhen Huanshui Qihang Water Purification Co. Ltd., Shenzhen 518030, China)

**Abstract:** The design capacity of Shajing wastewater treatment plant (WWTP) phase III project is  $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , and the effluent quality should comply with the level B criteria specified in the *Standards of Water Quality for Wastewater Treatment Plant* (DB4403/T 64-2020). To reduce the NIMBY (Not in my back yard) effect, the WWTP is constructed in a double-layer semi-underground structure, and a municipal park is built on the top. In view of the shortage of land, insufficient carbon sources and high TN requirements for effluent, the secondary wastewater treatment process adopts the combined process of large-deep multi-stage AO bioreactor and double-deck horizontal flow sedimentation tank, which retains the advantages of high utilization rate of raw water carbon sources and high nitrogen removal rate of multi-stage AO process while intensive land use, with a unit land use index of  $0.31 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ . Since the project is commissioned, the system has been running stably, and the effluent quality is superior to the discharge standard. With influent TN of  $40.1 \text{ mg/L}$  and C/N of 1.62, the average monthly sodium acetate (20%) dosage is  $43.5 \text{ mg/L}$  and the effluent TN can be stably less than  $10 \text{ mg/L}$ .

**Key words:** semi-underground wastewater treatment plant; multi-stage AO process; advanced treatment; large-deep bioreactor; double-deck horizontal flow sedimentation tank; low C/N;

nitrogen removal

## 1 工程概况

沙井水质净化厂三期工程位于深圳市宝安区,设计处理能力为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,主要服务范围包括沙井街道、新桥街道以及部分松岗街道。由于部分规划用地属于未征转用地,为保证项目顺利实施,近期需于现状 $6.19 \text{ hm}^2$ 用地优先建设 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模处理设施,其中细格栅及曝气沉砂池、生化池、二沉池按照 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 建设,预留远期 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 预处理及二级处理设施用地,进水泵房、深度处理设施、加药间等按照土建 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 实施,设备按照 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 安装。污水处理厂采用半地下建设形式,上盖建设可对公众开放的市政公园。

该项目出水指标执行深圳市地方标准《水质净化厂出水水质规范》(DB4403/T 64—2020)表1中的B标准,出泥含水率低于40%,大气污染物排放执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级标准。

设计进水水质根据近5年沙井水质净化厂一、二期90%保证率进水水质确定。鉴于该厂实际运行过程中长期存在碳源不足的问题,设计进水 $\text{BOD}_5$ 指标以范围值表示。

设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	$\text{BOD}_5$	COD	SS	TN	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP
进水	78~150	410	440	48	35	6
出水	6	30	8	10	1.5	0.3

## 2 工艺设计

### 2.1 工艺流程

针对该项目出水TN标准高、长期存在进水碳源不足的特点,生化处理采用原水碳源利用率高的多段AO工艺<sup>[1]</sup>,以节约脱氮的药剂成本。该项目单位用地指标仅 $0.31 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ ,同时用地红线为不规则菱形,部分远期设施土建需按远期规模在本期建设,实际用地非常紧张。为解决用地不足的问题,二级处理采用大池深生化池结合双层平流沉淀池的形式,对比国内地下式污水处理厂常采用的MBR工艺,具有运行成本低、运维管理简单等优势。污水处理工艺流程如图1所示。

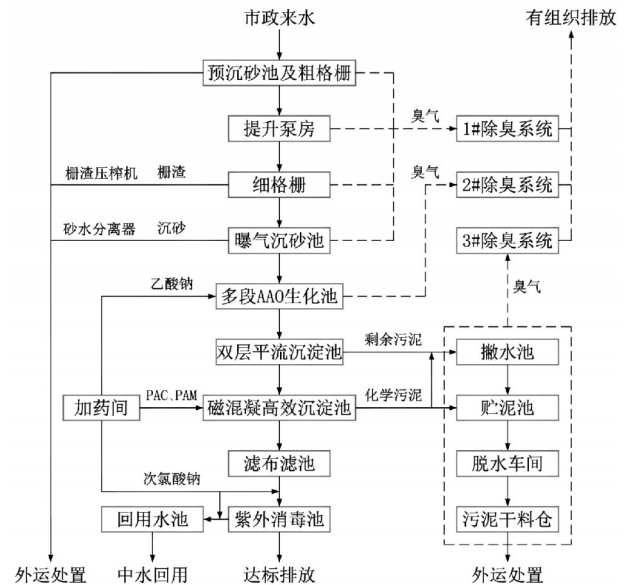


图1 沙井水质净化厂三期污水处理工艺流程

Fig.1 Sewage treatment process of phase III project of Shajing WWTP

### 2.2 污水处理构筑物

#### ① 预处理设施

预沉砂池、粗格栅及进水泵房土建按远期规模 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 设计,设备按照 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 安装。

预沉砂池设置在粗格栅前的进水腔室,通过预沉砂池将进水中较大的砂砾、垃圾等物质沉淀,可有效减少上述物质在进水泵房的淤积以及对后续处理设备的磨损,沉砂等杂质定期通过抓斗清理。近期粗格栅共设置3台,预留1台远期安装空间,栅条间隙 $20 \text{ mm}$ ,格栅宽度 $2.2 \text{ m}$ ,平均时过栅流速 $0.6 \text{ m/s}$ 。近期设置进水潜污泵6台,单台流量 $3125 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程 $230 \text{ kPa}$ 、电机功率 $250 \text{ kW}$ ,2台变频,预留远期泵位2个。远期进水管提前敷设至远期工程碰口处,避免远期实施时对现状厂区道路进行开挖。

细格栅及曝气沉砂池设计规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,细格栅采用内进流形式,共设置6台(5用1备),栅孔孔径 $5 \text{ mm}$ ,格栅安装渠道宽度 $1.6 \text{ m}$ ,栅前水深 $1.45 \text{ m}$ ,单台电机功率 $1.2 \text{ kW}$ 。曝气沉砂池共分4格,有效水深 $4.8 \text{ m}$ ,最大流量时停留时间 $8.5 \text{ min}$ 。为保证曝气沉砂池除臭封闭效果,排砂采用链板式刮砂机+吸砂泵形式。曝气采用三叶罗茨风机,共

设置 6 台, 4 用 2 备, 单台流量  $12.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 、压力  $49 \text{ kPa}$ 、电机功率  $18.5 \text{ kW}$ 。

② 二级处理设施

生化池共分 4 条生产线, 单线规模为  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 有效水深为  $9.5 \text{ m}$ 。采用多段 AO 工艺, 分为厌氧区、缺氧 I 区、好氧 I 区、缺氧 II 区、好氧 II 区、缺氧 III 区、好氧 III 区, 各区停留时间分别为  $1.2$ 、 $1.8$ 、 $2.0$ 、 $2.2$ 、 $2.6$ 、 $2.5$ 、 $3.7 \text{ h}$ , 厌氧区、缺氧 II 区和缺氧

III 区分别设置多点进水渠道, 并通过下开式堰门和巴氏计量槽联动控制多点进水分比例, 生化池分区及多点进水设计见图 2。好氧 III 区至缺氧 III 区最大内回流比为  $100\%$ 、好氧 II 区至缺氧 II 区以及好氧 I 区至缺氧 I 区最大内回流比均为  $50\%$ 。生化池设计最大气水比为  $6.5:1$ , 好氧段 3 个区域分别设置独立的曝气干管、热式气体流量计及流量调节阀, 通过精确曝气系统可实现溶解氧的精确控制。

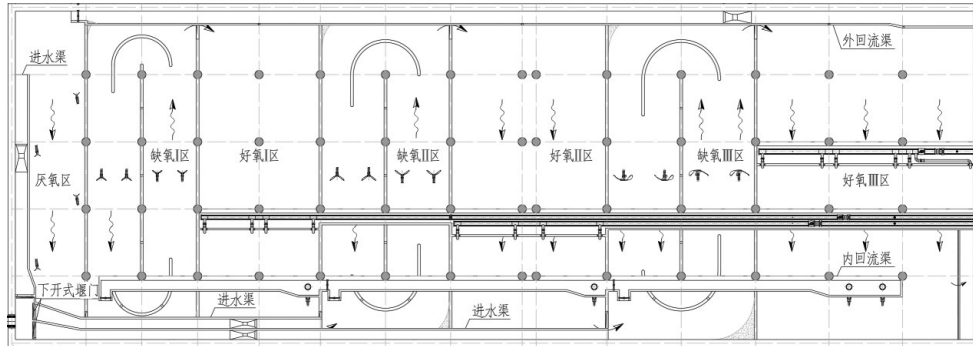


图 2 多段 AO 生化池平面布置

Fig.2 Plan view of multi-stage AO process

二沉池采用双层平流沉淀工艺, 其剖面如图 3 所示。

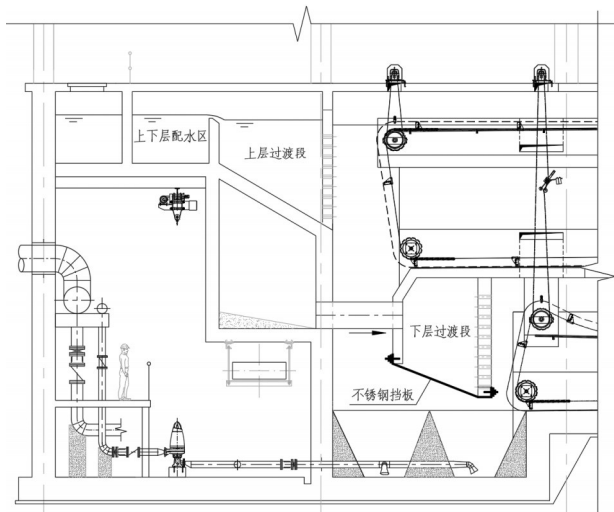


图 3 双层平流沉淀池剖面

Fig.3 Section view of double-deck horizontal flow sedimentation tank

二沉池共分为 16 格, 每格分为上下两层, 上下层通过溢流堰配水, 每格沉淀池在起端设置集泥坑一个, 收集上下层刮泥机的排泥。双层沉淀池下层过渡段距离底部集泥斗较近, 易受外回流影响造成穿孔花墙配水不均并降低回流污泥浓度, 因此在下层过渡段增加密闭挡板进行隔离, 避免下层过渡段

至集泥坑区域形成短流。二沉池上层池长  $50.05 \text{ m}$ , 下层池长  $45.3 \text{ m}$ , 池宽  $7.5 \text{ m}$ , 总池深  $9.8 \text{ m}$ , 平均表面负荷为  $0.77 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。为集约用地, 将污泥泵房与二沉池合建, 设置于二沉池配水溢流堰下层区域。每格沉淀池设置外回流污泥泵 1 台, 流量  $522 \text{ m}^3/\text{h}$ , 扬程  $40 \text{ kPa}$ , 电机功率  $18.5 \text{ kW}$ 。每 4 格沉淀池设置 1 台剩余污泥泵, 流量  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ , 扬程  $80 \text{ kPa}$ , 电机功率  $4 \text{ kW}$ 。

③ 深度处理设施

深度处理区土建按远期规模  $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  设计, 设备按照  $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  安装。磁混凝高效沉淀池共 6 格, 近期安装设备 4 套, 混凝池停留时间  $1.5 \text{ min}$ , 磁粉投加池停留时间  $1.5 \text{ min}$ , 絮凝池停留时间  $3 \text{ min}$ , 沉淀池斜管区平均表面负荷为  $15.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。滤布滤池共 12 格, 近期安装设备 8 套, 采用外进内出形式, 单格中心出水管设置 14 个滤盘, 滤盘直径  $3 \text{ m}$ , 平均滤速  $5.9 \text{ m/h}$ 。反冲洗共配置 64 台浸没式潜水泵, 单泵流量  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程  $120 \text{ kPa}$ 、电机功率  $4.0 \text{ kW}$ 。紫外消毒池共 3 个渠道, 近期安装设备 2 套。紫外消毒灯管采用斜插交错排布, 单条渠道共 96 支灯管, 紫外光穿透率  $\geq 65\%$ , 有效剂量为  $28 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。

④ 生产辅助设施

生产辅助设施土建按远期规模  $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  设

计,设备按 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 安装。

综合加药间设置PAC、PAM、乙酸钠以及次氯酸钠的储存及投加系统,PAC、乙酸钠和次氯酸钠分别采用10%、20%和5%的成品原液存储,最小储量满足远期工程7 d需要。投加设备采用数字隔膜计量泵,生化池出口和磁混凝高效沉淀池的混凝池分别设置PAC投加点,生化池的厌氧区、缺氧Ⅱ区和缺氧Ⅲ区进水渠分别设置乙酸钠投加点,紫外消毒池进口及中水回用池设置次氯酸钠投加点。加药间共设置PAM制备装置2台,单台制备量4 000 L/h,配备真空上料装置及在线稀释系统,PAM通过螺杆泵投加至磁混凝高效沉淀池的絮凝池。鼓风机房内设单级离心高速鼓风机7台,近期安装4台,3用1备。单台风机风量 $312.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ,出口升压0.11 MPa,电机功率700 kW。

### 2.3 污泥处理系统

污泥处理系统按远期规模 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 一次建成,设计绝干污泥处理量为64 t/d,出泥含水率 $\leq 40\%$ 。污泥系统近期除处理本厂污泥外,还可承接和处理外来80%含水率的污泥以充分利用近期富余产能。污泥处理工艺流程如图4所示。

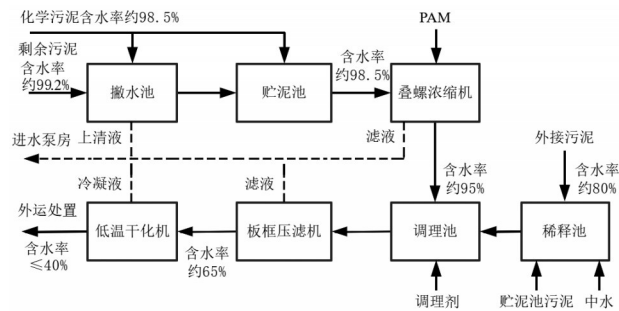


图4 沙井水质净化厂三期污泥处理工艺流程

Fig.4 Sludge treatment process of phase III project of Shajing WWTP

污泥撇水池共2座,用于初步降低剩余污泥含水率,单座直径13 m,水力停留时间3.2 h,设计进泥含水率99.2%,出泥含水率98.5%。贮泥池1座2格,用于缓冲机械脱水设备进泥,有效容积 $295 \text{ m}^3$ ,停留时间1.66 h,设置2台潜水搅拌器防止污泥淤积,单台电机功率2.8 kW。磁混凝高效沉淀池排放的化学污泥一般含固率较高,可直接进入贮泥池,减少对剩余污泥预浓缩的影响。剩余污泥和化学污泥在贮泥池混合后进入叠螺浓缩机,将污泥含水率进一步降至约95%,经污泥调理后进入板框压滤

机压滤,压滤含水率控制在65%左右以保证最佳的切条效果,最后通过低温冷凝干化将污泥含水率降至低于40%后外运处置。叠螺浓缩机共设置5台(4用1备),单台处理量1 000 kg/h、电机功率10 kW。板框压滤机共5台(4用1备),单台翻板过滤面积 $800 \text{ m}^2$ 、电机功率23.35 kW。低温冷凝干化机共4台,预留1台机位远期安装,单台配置6个模块,脱水量 $>21.6 \text{ t/d}$ ,装机功率324.9 kW。外接污泥由于含固率较高,需经过稀释再进入调理池进一步进行板框压滤。稀释可利用贮泥池污泥或中水进行,稀释池设立式搅拌机1台,桨叶直径1 800 mm,电机功率17.5 kW。

### 2.4 除臭系统

根据分区收集、分质处理的原则,将整厂的除臭系统分为预处理区、生化区和污泥区,各区除臭风量分别为80 000、120 000和150 000  $\text{m}^3/\text{h}$ ,对于曝气沉砂池、生化池、污泥撇水池等产生臭气的池体,通过半地下式污水厂操作层的建设可以实现较好的密封效果。对于会产生臭气泄漏的生产设备,如粗格栅、细格栅、叠螺浓缩机、低温干化机、渠道式闸门等均采用单独加罩对臭气进行二次封闭收集。生化区除臭风量大,但臭气浓度相对较低,臭气处理采用生物除臭工艺,共分为高、中、低负荷除臭塔,每级停留时间均为6 s。预处理区和污泥区臭气浓度较高,尤其是污泥处理区低温干化设施产生的难降解VOCs含量较高,预处理区和污泥处理区除臭采用光催化氧化+喷淋洗涤+生物除臭工艺,在生物除臭工艺的基础上,增加光催化氧化工艺可以提高除臭系统对难降解臭味物质的去除效果,增加喷淋洗涤工艺可以提高系统的抗冲击能力。3套除臭设施均布置在生化池操作层,臭气通过上盖烟囱进行有组织排放。为保证臭气扩散效果、减少对公园环境的影响,臭气排放口高出上盖公园地面15 m。

## 3 工程设计特点

### 3.1 大池深生化池+双层平流沉淀池组合运用

为集约用地,二级处理采用“大池深多段AO生化池(有效水深9.5 m)+双层平流沉淀池”组合工艺,生化池+二沉池及管廊的总占地面积 $25 000 \text{ m}^2$ ,与常规池深的MBR工艺方案相当,由于后续需要增加深度处理设施,因此总体方案占地略大于MBR工艺。全厂污水处理电耗约为 $0.2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,远低于

相似进水条件下采用 MBR 工艺项目的  $0.33\sim 0.60 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  [2-3], 可避免 MBR 工艺存在的脱氮效果较差、膜清洗和更换运维管理复杂的问题, 兼顾集约和低耗的需求。此外, 大池深生化池箱体高度与双层二沉池箱体基本一致, 使得地下管廊高程衔接更为顺畅, 便于运维人员通行, 有利于简化基坑设计和提高施工效率。需要注意的是, 由于生化池有效水深较大, 离心风机供气压力高, 在夏季温度较高时风机出口的温度可达  $140\text{ }^\circ\text{C}$ , 应注意出口位置阀门的选型, 采用耐高温的软密封材料或硬密封连接。

### 3.2 仿真模拟验证生化池推流效果

生化池水深过大不利于推流器的布置以及污水和活性污泥的均匀混合, 影响微生物处理效果并存在污泥淤积的隐患, 尤其该项目采用多段 AO 模式设计导致生化池内部分格较多, 部分廊道的宽度较小, 宽深比 ( $B/H$ ) 仅为  $0.6$ , 故不宜仅依靠能量密度和一般经验进行推流器、搅拌器的设计与选型。为保证生化池厌氧/缺氧区的推流效果, 采用 CFD 技术进行仿真模拟, 并根据模拟结果优化推流器、搅拌器的布置与选型。模拟重点关注池底(搅拌器中心)、半池深位置以及水面的推流效果。以宽深比最小的厌氧区和缺氧 I 区为例, 优化前后的 CFD 模拟结果见图 5。

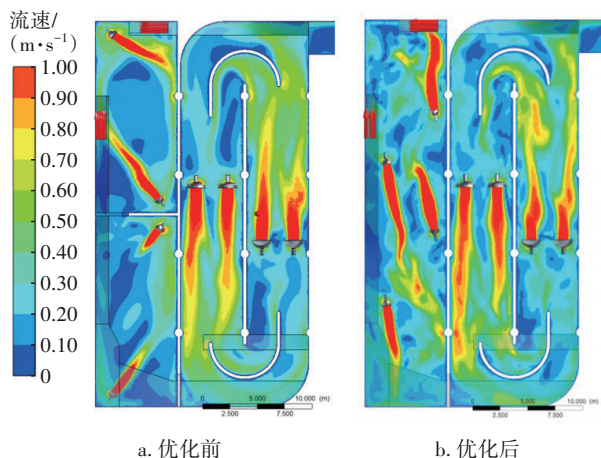


图5 厌氧、缺氧区优化前后 CFD 模拟对比

Fig.5 Comparison of CFD simulation before and after optimization of anaerobic and anoxic zone

优化前池底、半池深以及水面平均流速分别为  $0.29$ 、 $0.22$ 、 $0.24 \text{ m/s}$ , 搅拌器整体推力充足, 但池底和半池深位置流速分布不均, 局部区域流速低于  $0.1 \text{ m/s}$ , 存在一定污泥淤积风险。根据模拟结果,

先后调整了厌氧区隔墙设置、搅拌器安装角度以及推流器在缺氧区的安装位置, 优化后池底、半池深以及水面的平均流速分别提升至  $0.34$ 、 $0.26$ 、 $0.29 \text{ m/s}$ , 平均流速提高的同时大大减少了混合液流速低于  $0.1 \text{ m/s}$  的区域, 降低了局部污泥混合不均和淤积的风险。

### 3.3 地铁下穿协同设计

由于规划用地与地铁某号线停车场出入段线位冲突, 经有关部门和相关单位共同研究确定了水质净化厂与地铁停车场出入线共同建设的方案, 地铁隧道位于水质净化厂构筑物筏板下方, 水质净化厂优先建设, 并预留地铁下穿盾构条件, 地铁下穿路线尽量避让水质净化厂构筑物, 减少下穿范围。对不受地铁下穿影响的构筑物池体, 基础采用  $400 \text{ mm}$  桩径预应力管桩, 强风化岩为桩端持力层, 构筑物底板厚度为  $500\sim 800 \text{ mm}$ 。对受地铁影响的部分构筑物则采用灌注桩+筏板门架结构, 筏板厚  $1500 \text{ mm}$ , 基础采用  $\varnothing 1200 \text{ mm}$  钻孔灌注桩; 筏板与地铁隧道边界竖向净距为  $5.5\sim 9.8 \text{ m}$ , 灌注桩桩身与地铁隧道边界水平净距最小为  $1.5 \text{ m}$ , 桩间距沿轨道线路方向最小间距为  $3.6 \text{ m}$ 。地铁隧道与水质净化厂构筑物竖向高程关系见图 6。

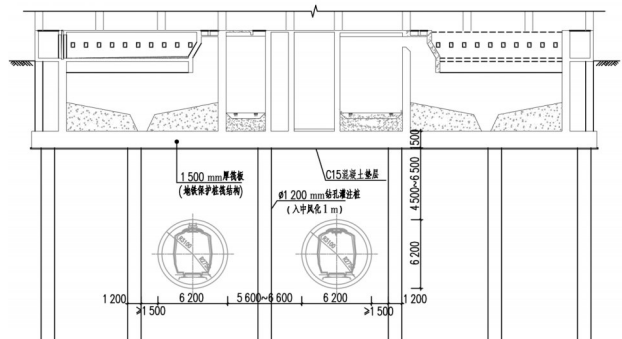


图6 地铁隧道与水质净化厂构筑物竖向高程关系示意

Fig.6 Vertical elevation relationship between subway tunnel and WWTP structures

### 3.4 BIM 技术全过程应用

在项目全生命周期应用 BIM 技术, 覆盖设计、施工及运营维护各阶段。在设计阶段, 对全厂区全专业创建精细化 BIM 模型并积累项目族库; 对模型出具碰撞报告, 反馈各专业碰撞问题并协调修改, 进一步辅助优化设计成果。在施工阶段利用 BIM 制作模拟动画, 进行可视化交底; 针对双层平流沉淀池土建施工较为复杂的问题, 依据设计模型进一

步拆分施工模型,精准划分施工分区,实现阶段浇筑管理;针对进水泵房25 m超深沉井,首次采用沉井施工过程动态监测结合BIM及智慧监测系统控制。在运维阶段,通过BIM+数字化,将“实体空间”和“虚拟呈现”融合,打造多个落地应用场景,实时在线管理厂内人员、设备及运行数据等,赋能智慧污水厂建设。

#### 4 运行效果及经济分析

该工程于2020年1月开工建设,2022年11月通水调试,同年12月通过环保验收,投运至今污水处理效果稳定,出水水质全面优于设计标准。2023年的实际进、出水指标如表2所示。

表2 实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality

项目	mg·L <sup>-1</sup>					
	BOD <sub>5</sub>	COD	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
平均进水	59.45	184	90	35.9	28.8	3.11
平均出水	2.31	11.9	4	6.56	0.29	0.14

该项目工程总投资约131 224.95万元,其中:第一部分建设安装工程费用为107 597.14万元,工程建设其他费用为13 185.41万元,预备费用为6 039.13万元,单位经营成本为0.71元/m<sup>3</sup>。

该项目运行过程中存在明显的碳源不足问题,尤其是在11月至次年3月的旱季,进水TN偏高,月均进水BOD<sub>5</sub>为63.0~81.3 mg/L, TN为35.6~44.4 mg/L, C/N仅为1.51~1.90,远低于脱氮适宜的碳氮比。2023年1月—2024年5月乙酸钠投加量与进水BOD<sub>5</sub>、TN的月均变化如图7所示。

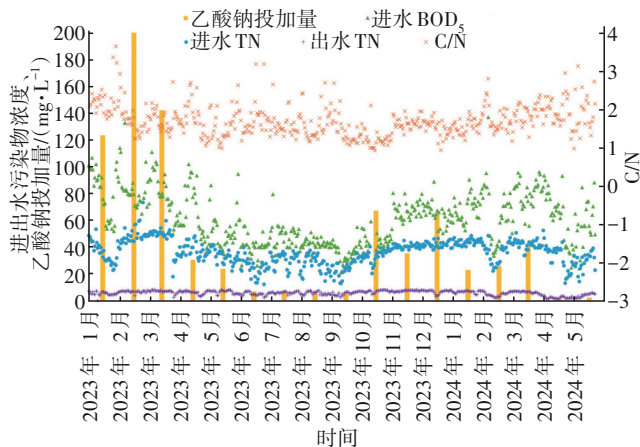


图7 进水TN、BOD<sub>5</sub>、C/N、出水TN及乙酸钠投加量的变化

Fig.7 Changes of influent TN, BOD<sub>5</sub>, C/N, effluent TN, and sodium acetate dosage

由图7可知,2023年1月—3月碳源投加量较大,乙酸钠(20%)平均投加浓度达到188.7 mg/L,除进水TN较高的因素外,主要原因在于生化系统尚未调试到最佳工况,并且运行初期为了驯化污泥、提高系统生物总量需要额外投加较多的碳源。2023年4月—9月为深圳雨季,平均进水TN为30.1 mg/L, BOD<sub>5</sub>为48.1 mg/L, C/N=1.59, C/N值与旱季基本一致,但进水TN浓度较低,雨季基本不需投加碳源,乙酸钠仅作为出水TN应急保障和固定营养源进行少量补充。2023年10月—2024年3月的旱季平均进水TN为40.1 mg/L, BOD<sub>5</sub>为65 mg/L, C/N=1.62,乙酸钠(20%)平均投加量为43.5 mg/L,主要在出水TN波动时进行应急投加。碳源投加量远低于投运初期,相比同类型项目碳源投加量少,碳源利用率高,反硝化效果好。

理论上,为使反硝化进行完全,去除1 kgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N需要2.86 kgBOD<sub>5</sub><sup>[4]</sup>,而实际工程中受溶解氧等因素影响,一般去除1 kgTN需要3.0~3.5 kgBOD<sub>5</sub><sup>[5]</sup>。考虑该项目投加碳源后单位TN去除仅消耗2.62 kgBOD<sub>5</sub>,低于理论值,可见优异的TN去除效果应该不仅源于多段AO工艺较高的碳源利用效率。事实上,该项目运营时在多段AO的基础上引入了限氧曝气的理念,将好氧I区、II区、III区的溶解氧分别控制在0.5、0.5、2 mg/L左右,一方面在低溶解氧的条件可以减少原水有机物消耗,并抑制亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)活性,实现短程硝化反硝化<sup>[6]</sup>;另一方面,有研究表明,长期低DO连续曝气的短程硝化效果可能并不理想——NO<sub>B</sub>丰富的种群结构能通过优势种群更替逐渐适应长期间氧抑制环境<sup>[7]</sup>,间歇曝气策略有利于实现对NO<sub>B</sub>的多重抑制,实现更加稳定的短程硝化反硝化<sup>[8]</sup>。该项目多段AO不断交替的缺氧、好氧环境可能起到了类似间歇曝气辅助强化对NO<sub>B</sub>抑制的效果,并进一步实现更为稳定的短程硝化反硝化,从而在低C/N条件下取得较好的脱氮效果。

#### 5 结论

① 多段AO工艺的原水碳源利用率高,运行控制方式灵活,可结合限氧曝气的运行模式实现低C/N值原水条件下TN的高效脱除,并大大节省碳源投加成本,相较常规生化脱氮工艺优势明显。

② “大池深多段AO生化池+双层平流沉淀

池”组合工艺应用于地下/半地下式污水处理厂具有集约化程度高、运行成本低、运维管理便捷等优势,对用地受限的工程项目具有一定的推广价值。

③ 生化池大池深、低宽深比时应注意搅拌区的推流设计,避免混合液浓度不均导致的处理效果下降和污泥淤积问题,建议采用CFD技术进行仿真模拟,辅助验证推流器和搅拌器的选型和设计。

④ 双层平流沉淀池设计应注意下层进水短流问题,防止下层沉淀效果不佳。双层平流沉淀池土建结构较为复杂,应注意施工区域划分并加强施工现场管理,建议采用BIM技术进行可视化交底并精准划分施工分区,实现阶段浇筑管理。

#### 参考文献:

- [1] 鲍任兵,徐健,杜敬,等. 低温低C/N下改良Bardenpho工艺与多级AO工艺的比较[J]. 净水技术, 2023,42(12):80-87.  
BAO Renbing, XU Jian, DU Jing, *et al.* Comparison of modified Bardenpho and multi level AO processes under low C/N influent at low temperature [J]. Water Purification Technology, 2023, 42 (12) : 80-87 (in Chinese).
- [2] 任诚,毛云飞,周科帆,等. AAO+MBR系统的稳定低耗运行研究[J]. 中国给水排水, 2023,39(5):67-73.  
REN Cheng, MAO Yunfei, ZHOU Kefan, *et al.* Stable operation of AAO+MBR system with low consumption [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39 (5) : 67-73 (in Chinese).
- [3] 杨敏,颜秀勤,孙雁,等. A<sup>2</sup>O-MBR工艺城镇污水处理厂能耗特征与运行优化[J]. 给水排水, 2016, 42(12):44-47.  
YANG Min, YAN Xiuqin, SUN Yan, *et al.* Energy consumption and operation optimization of urban wastewater treatment plant with A<sup>2</sup>O-MBR process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(12):44-47 (in Chinese).
- [4] 张自杰,林荣忱,金儒霖. 排水工程(下册)[M]. 4版. 北京:中国建筑工业出版社,2000.  
ZHANG Zijie, LIN Rongchen, JIN Rulin. Water

Drainage Engineering (Volume 2) [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000 (in Chinese).

- [5] 王子龙. 多段多级AO工艺处理低碳氮比污水的效能及碳排放分析[J]. 净水技术, 2023, 42 (sl) : 146-153.  
WANG Zilong. Efficiency and carbon emission analysis of step-feed multistage AO process in low C/N wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2023,42(sl):146-153(in Chinese).
- [6] 吴芳磊,贺航运,陈博涵,等. 低C/N进水城镇污水厂低溶解氧运行效能及微生物变化[J]. 环境工程学报, 2022,16(8):2711-2719.  
WANG Fanglei, HE Hangyun, CHEN Bohan, *et al.* The efficiency and microbial community change of urban sewage plant with low C/N influent based on low DO strategy [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022,16(8):2711-2719(in Chinese).
- [7] 付昆明,杨帆,靳怡然,等. 基于溶解氧和缺氧时长调控的间歇曝气策略对短程硝化脱氮工艺的影响[J]. 环境工程学报, 2022,16(3):824-836.  
FU Kunming, YANG Fan, JIN Yiran, *et al.* Effect of intermittent aeration strategy based on dissolved oxygen and anoxic period regulation on partial nitrification process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022,16(3):824-836(in Chinese).
- [8] 谢怡漪,李祥,袁怡,等. 主流条件下间歇曝气抑制NOB与微生物动态响应[J]. 中国环境科学,2023,43(9):4616-4625.  
XIE Yiyi, LI Xiang, YUAN Yi, *et al.* The way of coupling intermittent aeration strategy to inhibit NOB activity in mainstream environment and the dynamic response of microorganisms [J]. China Environmental Science, 2023, 43(9): 4616-4625 (in Chinese).

作者简介:刘可(1992-),男,江西新余人,硕士,高级工程师,主要从事市政排水工程、市政给水工程设计及研究工作。

E-mail:494106760@qq.com

收稿日期:2024-05-23

修回日期:2024-06-28

(编辑:衣春敏)