

# 低碳氮比污水提标改造工程设计及运行效果分析

钱 亮<sup>1</sup>, 贺北平<sup>1</sup>, 刘瑞东<sup>1</sup>, 高 阳<sup>2</sup>, 陈周华<sup>2</sup>, 彭泽龙<sup>1</sup>, 王毓鸿<sup>2</sup>,  
丁 浩<sup>2</sup>

(1. 浦华控股有限公司, 北京 100084; 2. 汉中市城市污水处理厂, 陕西 汉中 723000)

**摘 要:** 汉中市城市污水处理厂升级改造工程设计规模为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 原主体生物处理工艺为 DE 氧化沟。改造工程将原出水水质标准从《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 B 提高至一级 A。该厂进水为典型低碳氮比污水,  $\text{BOD}_5/\text{TN}$  低至 1.6, 在充分利用原有设施的基础上, 生化处理改为改进型 AAO + 流态化生物载体工艺 (FBC/MBBR), 并新建深度处理设施, 采用化学辅助除磷。在全年未投加外碳源的情况下, 实际出水水质稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 准 IV 类标准。介绍了该工程的工艺流程、构筑物设计和设备配置情况, 并对调试运行过程进行了分析总结。

**关键词:** 污水处理厂; 提标改造; 低碳氮比污水; FBC/MBBR; 准 IV 类标准; 可提升板条曝气器

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2019)14-0081-07

## Design and Operation Effect Analysis of Low C/N Ratio Sewage Upgrading and Reconstruction Project

QIAN Liang<sup>1</sup>, HE Bei-ping<sup>1</sup>, LIU Rui-dong<sup>1</sup>, GAO Yang<sup>2</sup>, CHEN Zhou-hua<sup>2</sup>,  
PENG Ze-long<sup>1</sup>, WANG Yu-hong<sup>2</sup>, DING Hao<sup>2</sup>

(1. Thunip Holdings Co. Ltd., Beijing 100084, China; 2. Hanzhong Municipal Wastewater Treatment Plant, Hanzhong 723000, China)

**Abstract:** The design capacity of Hanzhong municipal wastewater treatment plant upgrading project is  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . The original main biological treatment process was DE oxidation ditch. The effluent water quality requirement in the renovation project was raised from previous first level B to level A of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 - 2002). The influent of  $\text{BOD}_5/\text{TN}$  was as low as 1.6, which was typically low carbon to nitrogen ratio wastewater. Fully based on the existing facilities, the biochemical treatment was renovated into improved AAO and fluidized biological carrier process (FBC/MBBR), and a new advanced treatment facility was built, which used chemical-assisted phosphorus removal. In the case of no additional carbon source in the whole year, the actual effluent quality has reached the quasi-IV criteria of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838 - 2002). The technological process, structure design and equipment configuration of the project was introduced. The commissioning and operation process was analyzed and summarized.

**Key words:** WWTP; upgrading and reconstruction; low C/N ratio sewage; FBC/MBBR; quasi-IV criteria; liftable lath aerator

## 1 工程概况

汉中市城市污水处理厂位于汉江之滨、桥闸北岸,主要收集和处理汉台城区生活污水和工业废水。厂区占地  $12 \text{ hm}^2$ ,采用双沟 DE 型氧化沟工艺,处理总规模为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。污水收集采用截流干管,将城区东西两大排污明渠及数条支渠的混合污水全部引入厂内。改造前污水经处理后达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准并排入汉江。生产运行在线监测数据 24 h 传输到省、市环保部门监控计算机平台。本次改造工程拟将该厂的出水标准由一级 B 提高至一级 A。

汉中市城市污水处理厂提标改造 EPC 工程,由浦华控股有限公司提供工艺包并牵头中国市政工程西北设计研究院有限公司、北京市市政四建设工程有限公司共同完成。本次改造采用好氧 FBC (Fluidized Biological Carriers, 流态化生物载体) 工艺,包括改造和新建两个部分,即原预处理单元、氧化沟设备的改造,以及厌氧池、缺氧池、滤池、鼓风机房等新建工程。汉中市城市污水处理厂负责改造后的运营工作。

## 2 原有工艺及设计进、出水水质

改造前污水处理工艺流程见图 1。改造前出水总氮、总磷、氨氮、SS 偏离一级 A 标准较大,亟需通过工程措施强化处理。污水厂设计考虑日后城区的雨污分流改造,进、出水水质见表 1。

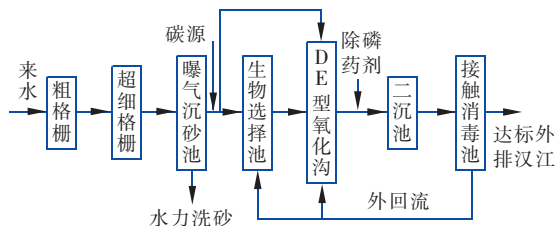


图1 改造前污水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process before upgrading

表1 改造工程设计进、出水水质

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

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
设计进水	440	210	200	55	42	3
设计出水	50	10	10	15	5(8)	0.5

## 3 提标改造工艺方案

本工程进水碳氮比低至 1.6,按传统理论需投

加大量碳源和除磷药剂。提标改造采用好氧 FBC + 纤维转盘滤池的处理工艺。通过工艺参数的优化设置,在生物池中的生物膜、活性污泥、污水、曝气之间形成了多个多相的生物微环境,实现诸如短程硝化反硝化<sup>[1]</sup>、厌氧氨氧化<sup>[2]</sup>、同步反硝化除磷<sup>[3]</sup>、好氧反硝化<sup>[4]</sup>等节能节碳反应过程。改造原转碟曝气器为鼓风机底部曝气系统;为提高生物反应池的处理效率,在好氧区内投加生物填料;并设置纤维转盘滤池进一步去除 SS,使处理出水稳定达标排放。

传统污水厂非填料区的可提升曝气头若直接应用到填料区,会因为填料卡住水下活动部位而无法提升,因此国内填料区普遍采用固定式曝气头,但固定式曝气头的维修和更换需排水完毕并清运池中的填料,是一项耗时耗力的工作。考虑到汉中市城市污水厂后期不能减产运行,因此合作研发了填料区专用可提升板条曝气器。该设备结构简单、水下无活动件,检修更换曝气头不影响生产运行,这在国内大型市政污水好氧填料区中尚属首次。

污泥处理:新建污泥浓缩池,脱水泥饼经干化后含水率不大于 80%,外运至污泥处理设施进行深度处理;污泥脱水车间带式压滤机效率低,拆除并更换为离心脱水机。

提标改造后污水处理工艺流程(见图 2):城市污水→粗格栅(更换设备)→污水提升泵→细格栅(更换设备)→曝气沉砂池(更换设备)→一段厌氧池(新建)→二段厌氧池(原生物选择池)→生物反应池(A/O 反应池 + 好氧 FBC)(原 DE 氧化沟改造)→二沉池→纤维转盘滤池(新建)→接触消毒池(新建及改造)→出水井(改造)→达标外排至汉江。

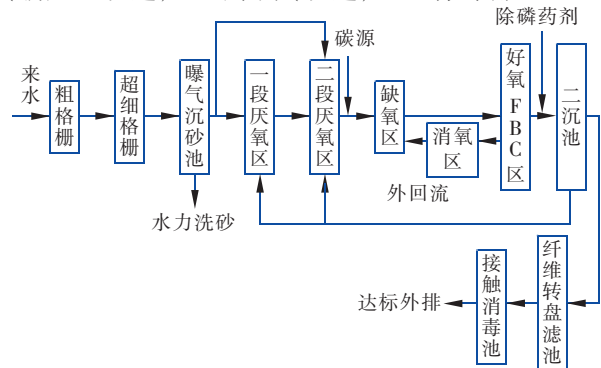


图2 改造后污水处理工艺流程

Fig. 2 Flow chart of wastewater treatment process after upgrading

在原有厂区已有场地范围内改造,不新增占地面积(属厂区已有地);新建一段厌氧池、纤维转盘滤池、接触池、鼓风机房、浓缩池、生物除臭滤池。改造粗格栅间、细格栅间及曝气沉砂池、氧化沟、终沉池、接触池、出水井、污泥脱水机房、变配电室。

## 4 主要工艺单元设计

### 4.1 粗格栅(改造)

设计规模为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,总变化系数为 1.3。维修现有粗格栅设备,保证其正常运行。对格栅机及敞开的池体处进行密封,并进行臭气收集。增设臭气收集罩。

### 4.2 细格栅及曝气沉砂池(改造)

设计规模为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,总变化系数为 1.3。拆除现状 2 台机械细格栅,重新安装 2 台孔径为 5 mm 的内进流孔板式格栅。对现状砂水分离系统进行改造,在砂水分离器前端增加洗砂设备。

在沉砂池前端增设隔墙,防止泥砂在进水端沉积,并更换桥式吸砂机。对细格栅及曝气沉砂池进行密封,并进行臭气收集。

安装内进流网板式格栅 2 台,渠宽为 1.6 m,网孔直径为 5 mm,安装角度为  $90^\circ$ , $N=2.0 \text{ kW}$ 。安装桥式吸砂机 1 台, $L=8.6 \text{ m}$ , $H=52 \text{ kPa}$ ;安装洗砂设备 1 台,用于清洗曝气沉砂池的砂渣,并回收碳源。

### 4.3 一段厌氧池(新建)

半地下钢筋混凝土水池 1 座,总平面尺寸为  $69.9 \text{ m} \times 21 \text{ m}$ ,总深为 7.5 m, $\text{HRT}=2.2 \text{ h}$ 。安装潜水搅拌机 24 台。进水可根据需要 0~100% 进入一段厌氧池,外回流污泥可全部进入此段。

### 4.4 选择池(改造)

将现状选择池改为二段厌氧池运行,利用现状土建及设备,无需新增。 $\text{HRT}=1.2 \text{ h}$ 。进水可根据需要进入二段厌氧池,外回流污泥可部分进入此段。

### 4.5 氧化沟(改造)

#### ① 曝气系统

将现状交替运行的表面曝气 DE 氧化沟改造为连续运行的微孔曝气 A/O 池,将现状氧化沟的两条沟道一条改为缺氧池和消氧池,另一条改为好氧池。拆除现状好氧池内的转碟曝气器,在缺氧池增设隔墙及潜水搅拌机,在好氧池布设底部微孔曝气器,以创造明显的缺氧和好氧环境,提高缺氧和好氧停留时间,使硝化和反硝化反应进行得更加彻底。同时,增加混合液回流系统,将好氧池硝化液回流至缺氧

池,提高脱氮效果。

#### ② A/O 池

由于好氧池内增设了填料,所需溶解氧增加,若混合液直接回流至缺氧池,则将直接消耗进水碳源,故在缺氧池增设消氧段,并在缺氧池内设置双曲面搅拌器。该双曲面搅拌器经创新设计,自带防浮泥结壳装置,可有效杜绝缺氧区表面浮泥的形成。

现状氧化沟共 2 座,每座处理水量为  $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,每座有 2 条氧化沟,一条改造为推流式缺氧区( $\text{HRT}=4.9 \text{ h}$ )和回流消氧区( $\text{HRT}=1 \text{ h}$ ),一条改为好氧 FBC 池( $\text{HRT}=5.9 \text{ h}$ )。每座氧化沟最大供气量为  $310 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

单组主要工程内容:

- 拆除现状好氧池、缺氧池内的转碟曝气器各 12 套,单座氧化沟共拆除 24 套;
- 拆除现状氧化沟内的潜水搅拌机;
- 在缺氧池内增设双曲面及潜水搅拌设备,单座共设 12 套;
- 在好氧池底部安装可提升式微孔曝气装置及相应空气管道;
- 在好氧池安装填料专用推进器,单座共 12 套;
- 在好氧池及缺氧池中间池壁上开孔,安装混合液回流泵。

每座氧化沟好氧区安装可提升式板条式微孔曝气器 1 426 m,氧利用率  $\geq 30\%$ ;安装填料专用推进器 12 套,功率 = 5.6 W。每座氧化沟缺氧区内安装双曲面搅拌机 10 套,功率 = 5.5 kW,2 套直径为 1.8 m 潜水推流器,功率 = 4.0 kW、推力为 2 710 N;安装混合液回流泵 2 台,单台  $Q=2\ 083 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=8 \text{ kPa}$ , $N=7.5 \text{ kW}$ ,变频控制,内回流比为 100%~200%,内回流液进缺氧区前设置 1 h 的内回流消氧区;池内壁安装不锈钢板防磨内衬;出水弯道处安装不锈钢填料分离拦截装置。

#### ③ 填料投加

通过在生物反应池内投加填料来提高好氧池的生物量,以降低污泥负荷、提高处理效果。设计污泥负荷为  $0.085 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ,污泥龄为 17 d,污泥总产率系数为  $0.7 \text{ kgSS/kgBOD}_5$ ;每座氧化沟好氧池内填料填充率约 30%。

### 4.6 纤维转盘滤池及接触池(新建)

设计水量为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,总变化系数为 1.3。



滤池共3组,单组处理量为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,2用1备。当3台同时运行,滤速为 $5 \sim 8 \text{ m/h}$ ,出水效果更好。

纤维转盘滤池下部为半地下钢筋混凝土水池1座,平面尺寸为 $18.4 \text{ m} \times 15.5 \text{ m}$ ,总深为 $4.7 \text{ m}$ ;上部为框架结构,平面尺寸为 $18.4 \text{ m} \times 15.5 \text{ m}$ ,建筑高度为 $9.54 \text{ m}$ 。

利用原有接触池,并新建半地下钢筋混凝土水池1座,平面尺寸为 $29 \text{ m} \times 15.5 \text{ m}$ ,总深为 $4.3 \text{ m}$ 。安装3套过滤设备,每套平均处理能力为 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用过滤转盘,驱动功率为 $0.75 \text{ kW}$ ,包含4台反冲洗水泵及配套阀门,水泵 $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H = 70 \text{ kPa}$ , $N = 2.2 \text{ kW}$ 。

次氯酸钠储存罐3台,储量为 $5 \text{ m}^3$ ,直径 $= 1820 \text{ mm}$ , $H = 2300 \text{ mm}$ ,单套安装投加计量泵(隔膜计量泵)2台,1用1备。

为拦截生物反应池出水中极少量填料的流出和二沉池的树叶、杂物,保护纤维转盘滤池设备不受损坏,减少生物填料的损耗,在纤维转盘滤池总进水渠道后每个进水口处设置保安过滤装置1套,半个月人工清理一次。

#### 4.7 投药间(利用原有脱水机房)

为确保总磷达标排放,在生物除磷的基础上,增加化学强化除磷设备。为确保脱氮效果,增加碳源投加装置,应对水质波动。对处理后的污水进行消毒处理,确保出水大肠杆菌达标。

① 辅助除磷:絮凝剂采用聚合氯化铁,最大投加量为 $30 \text{ mg/L}$ ,投加浓度为 $10\%$ 。

② 应急补充碳源:采用乙酸钠,最大投加量为 $64.2 \text{ mg/L}$ ,投加浓度为 $30\%$ 。

③ 消毒:采用次氯酸钠消毒,投加量为 $10 \text{ mg/L}$ ,投加浓度为 $10\%$ 。

辅助除磷药剂根据出水总磷情况投加在好氧池末端,间断运行。补充碳源根据出水总氮情况,投加在生物池的缺氧池内,间断运行。加氯消毒根据出水大肠杆菌情况,投加在接触消毒池内,连续运行。

利用原有脱水机房,设备按规模一次建成、安装。PAM投加装置利旧一套、新增一套。新增一套干粉投加聚铝/聚铁装置和一套液态投加聚铝/聚铁装置。加药间内设乙酸钠全自动溶药制备装置1套,制备量为 $200 \text{ kg/h}$ 。

#### 4.8 鼓风机房(新建)

处理水量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,总变化系数为 $1.3$ ;

连续运行,最大供风量为 $37200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

地上式框架建筑一座,平面尺寸为 $24.3 \text{ m} \times 10.2 \text{ m}$ ,建筑高度为 $11.5 \text{ m}$ 。土建和设备按规模一次建成、安装。安装磁悬浮鼓风机5台,4用1备,单台 $Q = 155 \text{ m}^3/\text{min}$ , $H = 53.9 \text{ kPa}$ , $N = 250 \text{ kW}$ 。鼓风机配套安装进出口配套阀门、消音器、进口过滤器等。鼓风机房进风廊道安装电动卷帘除尘器2台,每台功率为 $0.1 \text{ kW}$ 。

#### 4.9 生物除臭滤池(新建)

对粗格栅及提升泵坑、细格栅及曝气沉砂池、一段厌氧池、污泥浓缩池、污泥脱水机房等进行了加盖密封,臭气经收集后排入生物除臭滤池处理。设1座生物除臭滤池,位于曝气沉砂池南侧。安装离心风机2台,单台 $Q = 24000 \text{ m}^3/\text{h}$ ;安装循环水泵2台,1用1备,单台 $Q = 48 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H = 230 \text{ kPa}$ , $N = 5.5 \text{ kW}$ ;安装喷淋水泵1台, $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H = 100 \text{ kPa}$ , $N = 2.2 \text{ kW}$ 。

#### 4.10 污泥浓缩池(新建)

2座,半地上式圆形钢筋混凝土结构, $D = 12 \text{ m}$ , $H = 5.0 \text{ m}$ 。污泥固体负荷为 $45 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,浓缩时间 $\geq 12 \text{ h}$ ,池边有效水深为 $4 \text{ m}$ 。浓缩后污泥含水率为 $96\% \sim 98\%$ ,连续运行。

安装设备(单座): $\varnothing 12 \text{ m}$ 中心传动浓缩机1台, $N = 0.37 \text{ kW}$ ;不锈钢出水三角堰34块, $L = 2 \text{ m}$ 。

#### 4.11 污泥脱水机房(改造)

在原有污泥脱水机房内改造。剩余污泥量为 $15000 \text{ kg/d}$ (干固体),出泥含水率 $\leq 80\%$ ,间歇运行。由于目前污水厂已有1台离心脱水机,因此本次工程再新增2台离心脱水机,2用1备。

### 5 生产调试

先后对两组生物池进行改造,实现了改造期间污水厂不停水、水质持续达标。整个调试过程可分为接种阶段、适应阶段及稳定阶段。

① 由于活性污泥从原来氧化沟的运行方式调整为A/A/O的运行方式,环境的改变导致活性污泥需要一定的驯化适应时间,再加上调试期处于寒冷的1月份(水温仅为 $7 \sim 9 \text{ }^\circ\text{C}$ ),微生物活性较低,因此,调试伊始氨氮处理效果不佳。该阶段通过提高曝气量来确保出水氨氮达标,初期溶解氧 $>4 \text{ mg/L}$ 。经过1个月的运行,接种的填料完成挂膜,同时活性污泥系统已经适应了A/A/O的运行方式,出水氨氮逐步下降。

② 调试初期由于填料区后无缓冲段,出水直接进入二沉池,导致填料区溶解氧过高,从而影响出水总氮和总磷;溶解氧 $<2\text{ mg/L}$ 时,填料区的氨氮处理效率不明显。运行1个月后,填料上生物膜生长良好,填料区溶解氧可控制在 $2\text{ mg/L}$ 以下,从而可有效解决此问题。

③ 夏季内回流比为150%、冬季内流比为180%时,氧化沟出水TN优于排放标准,但TP不能仅依靠生物处理稳定达标,约为 $0.3\sim0.7\text{ mg/L}$ ,需辅助化学除磷。经过一年的不断尝试,目前采用成品液态聚铁为除磷药剂,加药量也不断减少,平均除磷药剂费 $<0.05\text{ 元/m}^3$ 。

④ 污泥外回流比为80%~100%,可确保生物池处理效果稳定,通过在线泥位计实时反馈泥位数据,将二沉池泥位稳定在一定数值,可利用底泥对外回流中的硝酸盐进一步反硝化,此技术在其他工程中亦成功得到运用<sup>[5]</sup>。

## 6 运行效果及数据分析

汉中市城市污水厂经过改造后,出水水质逐步稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准IV类标准,详见表2、图3~6。

表2 改造前后进、出水水质对比

Tab. 2 Comparison of influent and effluent quality before and after upgrading  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目		COD	BOD <sub>5</sub>	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
2017年4月—12月	进水	130.67	58.27	36.55	25.11	2.85
	出水	26.31	11.26	17.22	3.30	0.71
2018年6月—8月	进水	101.24	51.70	32.34	23.08	2.69
	出水	10.23	4.81	4.86	0.33	0.29
2018年11月—2019年1月	进水	106.47	52.50	38.16	28.92	3.40
	出水	10.19	5.13	8.70	0.26	0.16

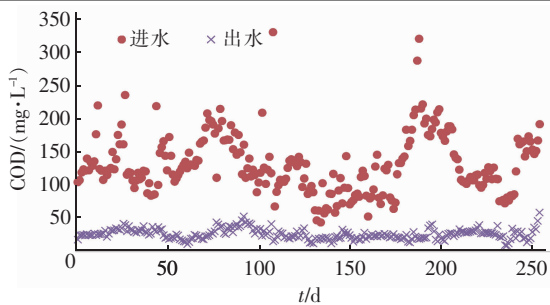


图3 改造前进水和出水COD(2017年4月22日—12月31日)

Fig. 3 COD of influent and effluent before upgrading from Apr. 22 to Dec. 31, 2017

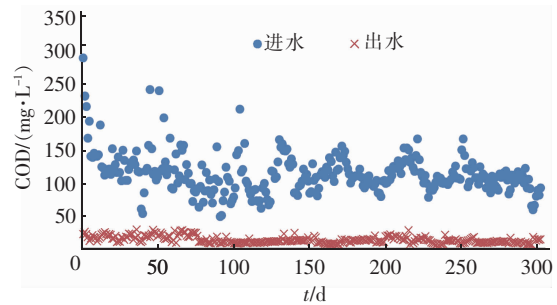


图4 改造后进水和出水COD(2018年4月1日—2019年1月31日)

Fig. 4 COD of influent and effluent after upgrading from Apr. 1, 2018 to Jan. 31, 2019

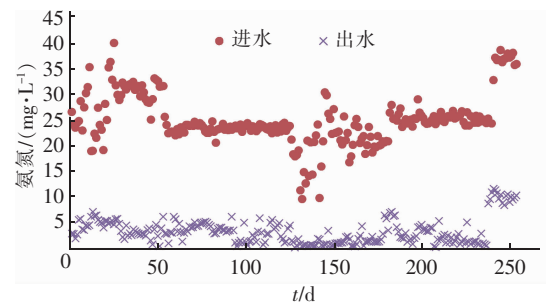


图5 改造前进水和出水氨氮(2017年4月22日—12月31日)

Fig. 5 NH<sub>3</sub>-N of influent and effluent before upgrading from Apr. 22 to Dec. 31, 2017

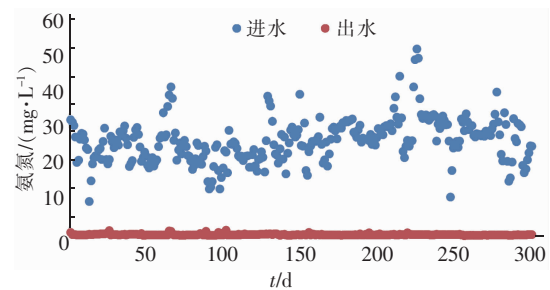


图6 改造后进水和出水氨氮(2018年4月1日—2019年1月31日)

Fig. 6 NH<sub>3</sub>-N of influent and effluent after upgrading from Apr. 1, 2018 to Jan. 31, 2019

### 6.1 运行控制效果分析

汉中地处陕西省南部,冬夏季水温变化较大:夏季水温为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冬季进水温度则可低至 $7\sim9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。出水COD基本不受水温变化的影响,稳定维持在 $10\text{ mg/L}$ 左右;而TN随着进水温度降低略有影响:夏季为 $5\text{ mg/L}$ ,冬季为 $9\text{ mg/L}$ ;而冬季出水TP浓度明显低于夏季。

TN 升高的原因主要是水温对反硝化速率产生了影响<sup>[6]</sup>。而 TP 的降低有三方面原因:①随着时间的增长,运行管理人员对新工艺的理解越来越深刻,对各参数的把控和操作也愈加熟练。②最关键的一点,本工程自始至终厌氧区末端都可以测到明显的生物释磷现象(5~10 mg/L),在 10 月份之前,吸磷现象全部发生在好氧区,而 10 月后通过自控系统加大了对生物池溶解氧的控制,使得缺氧区溶解氧<0.1 mg/L,在碳源严重不足的情况下,缺氧区也发生了明显的反硝化除磷现象。③由于 11 月份后将化学除磷药剂从投加固态粉末改为液态除磷药剂,投药的稳定性得到大幅提高,实际的投药量反而下降了 30%。

## 6.2 超低进水碳氮比,不加碳源实现总氮稳定达标

本工程进水  $BOD_5/TN$  远远低于理论值的 2.86,却取得了良好的处理效果。主要原因如下:①充分考虑了内外回流的消氧问题,也避免了活性污泥由于在厌/缺/好氧区之间不断地循环导致反硝化细菌受到一定的抑制,反硝化效率大大提高。同时碳源不容易被浪费,利用率提高。②缺氧区经测定实现了良好的反硝化同步除磷,总磷在厌氧区得到了极大的释放,并在缺氧区得到较高的去除率,一碳两用,大大节省了碳源。③强化了厌氧、缺氧区的处理效果,停留时间较传统设计大了两倍,充分利用了系统的内碳源,在碳源耗尽的情况下可以通过微生物体自身作为碳源进一步提高系统的 TN 去除率,内碳源反硝化速率通常为传统反硝化速率的 1/3,但事实证明是有效而且便于实现的<sup>[7]</sup>。④通过工程和技术手段,在保证良好的填料流态环境下,将好氧填料区溶解氧控制在 0.8~1.6 mg/L。在 30% 填料填充比的情况下,填料生物膜内部有局部的短程硝化反硝化现象,在节省曝气的同时也大大节约了系统碳源。经测定在好氧区出水溶解氧为 1.2 mg/L 左右,好氧 FBC 填料区对总氮的去除率可达到 5%~10%。

多年来人们在实际工程中发现很多好氧条件下的脱氮现象,如在 SBR 反应器中观察到了 95% 的总氮去除率<sup>[8]</sup>。本工程生物系统中生物膜、活性污泥、污水、曝气之间形成了一个多相的生物微环境,大大提高了系统的反硝化效果,同时也可能存在好氧反硝化菌,但有待持续深入研究。图 7 为 2019 年 1 月某天的总氮、总磷沿程数据,当天进水泵坑水温

为 8.5℃,生物池好氧区末端水温为 10.5℃,溶解氧为 1.34 mg/L,出水氨氮为 0.27 mg/L,外回流比为 90%,内回流比为 180%。可见:①厌氧区和缺氧区对 TN 皆有一定量的去除,尤其是缺氧区总氮的去除效率明显,出水总氮为 7.34 mg/L;②厌氧区发生了较明显的生物释磷现象,缺氧区发生了明显的同步反硝化吸磷,对系统的生物除磷贡献较大;③好氧池出水端通过同步投加除磷药剂进一步降低了出水的总磷,最终出水总磷为 0.071 mg/L。

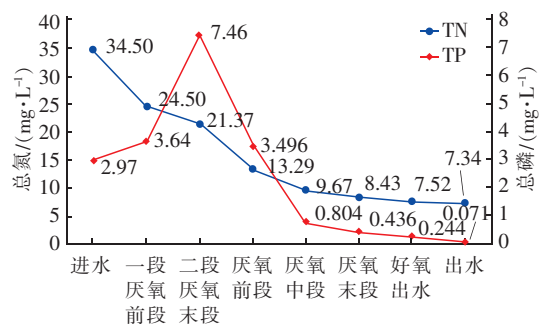


图7 总氮和总磷沿程浓度变化

Fig.7 Concentration changes of total nitrogen and total phosphorus at different units

## 7 结论

① 汉中市城市污水处理厂提标改造工程是丹江口流域综合治理重点项目,处理水量为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。二级生物处理采用改进 AAO 结合好氧 FBC 处理工艺,深度处理采用滤布滤池过滤工艺,并辅助化学除磷。该工程占地面积小,土建工程量少,施工周期短,有效地解决了污水厂现状工程用地紧张、高程限制、工期短的问题。

② 目前该污水厂生物池主要运行参数:一段厌氧  $HRT = 2.2 \text{ h}$ ,二段厌氧  $HRT = 1.2 \text{ h}$ ,缺氧  $HRT = 4.9 \text{ h}$ ,好氧区  $HRT = 5.9 \text{ h}$ ,内回流消氧区  $HRT = 1 \text{ h}$ 。内回流比为 100%~200%,外回流比为 70%~100%,好氧填料填充比为 30%,MLSS 为 5 000~8 000 mg/L。出水水质大大优于一级 A 排放标准,达到地表水Ⅳ类标准。该工程改造完成后极大地改善了周边水体环境,对治理水污染、保护当地流域水质和生态平衡具有十分重要的作用,更为国家南水北调中线工程长期调水的安全和稳定从源头上提供了保障。

③ 通过将部分氧化沟改造成填料区,按好氧 FBC/MBBR 工艺运行,并增加内回流措施,经调试和不断地优化运行,生物脱氮除磷效率持续提高并



发生明显的反硝化吸磷现象,且去除总氮全年无需外加碳源。整个污水处理厂大大强化了厌氧和缺氧区对主要污染物的去除效果,生化出水溶解氧通过风机变频和阀门开度自动控制在 $1.2\text{ mg/L}$ 左右,最终电费 $<0.15\text{ 元/m}^3$ ,具有节能节碳的良好效果。

④ 整个处理工艺针对性强,处理效果稳定,工程投资低,运行成本低,管理维护简单。同时考虑本工程日后无法减产运行,所有填料区的板条曝气器可提升,这在国内大型市政污水 FBC/MBBR 填料区中尚属首次。

⑤ 汉中市污水处理厂属于典型的低碳氮比废水,碳源严重不足,却取得了非常好的生物处理效果,突破了传统的认知。其中的机理还需进行持续深入的研究,希望对同类型的低碳氮比污水处理厂提标改造有参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 袁林江,彭党聪,王志盈. 短程硝化-反硝化生物脱氮[J]. 中国给水排水,2000,16(2):29-31.  
Yuan Linjiang, Peng Dangcong, Wang Zhiying. Biological nitrogen removal by short range nitrification and denitrification[J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(2):29-31 (in Chinese).
- [2] 郑平,冯孝善,Jetten M S M, et al. 厌氧氨氧化菌基质转化特性的研究[J]. 浙江农业大学学报,1997,23(4):409-413.  
Zheng Ping, Feng Xiaoshan, Jetten M S M, et al. Study on substrate conversion characteristics of mixed microbial culture for anaerobic ammonium oxidation[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1997, 23(4):409-413 (in Chinese).
- [3] 支霞辉,黄霞,李朋,等. 厌氧-好氧-缺氧短程硝化同步反硝化除磷工艺研究[J]. 环境科学学报,2009,29(9):1806-1812.  
Zhi Xiahui, Huang Xia, Li Peng, et al. Anaerobic-aerobic-anoxic short cut nitrification coupled with simultaneous denitrifying phosphorus removal[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(9):1806-1812 (in Chinese).
- [4] 吕锡武,李峰,稻森悠平,等. 氨氮废水处理过程中的好氧反硝化研究[J]. 给水排水,2000,26(4):17-20.  
Lü Xiwu, Li Feng, Inamori Yuhei, et al. Study on aerobic denitrification during the ammonia wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2000, 26(4):17-20 (in Chinese).
- [5] 钱亮,贺北平,刘瑞东,等. 西安市第四污水处理厂一期工程升级改造经验总结[J]. 中国给水排水,2016,32(2):74-78.  
Qian Liang, He Beiping, Liu Ruidong, et al. Summary of experience in upgrading and reconstruction of first stage project of Xi'an Fourth WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(2):74-78 (in Chinese).
- [6] 王洪臣,周军,王佳伟,等.  $5\text{F}-\text{A}^2/\text{O}$ ——脱氮除磷工艺的实践与探索[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.  
Wang Hongchen, Zhou Jun, Wang Jiawei, et al.  $5\text{F}-\text{A}^2/\text{O}$ —Practice and Exploration of Nitrogen and Phosphorus Removal Process [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009 (in Chinese).
- [7] 崔洪升,刘世德. 强化脱氮 Bardenpho 工艺碳源投加位置及内回流比的确定[J]. 中国给水排水,2015,31(12):22-24.  
Cui Hongsheng, Liu Shide. Determination of carbon source addition position and internal reflux ratio in Bardenpho process for enhanced denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(12):22-24 (in Chinese).
- [8] Jetten M S, Strous M, van K T, et al. The anaerobic oxidation of ammonium[J]. FEMS Microbiol Review, 1998, 22(5):421-437.



作者简介:钱亮(1983-),男,安徽芜湖人,硕士,高级工程师,主要研究方向为污水处理技术。

E-mail:qianliang1225@163.com

收稿日期:2019-02-26