

## 城镇给排水工程设计案例专栏

张国杰,王磊,李建,等.改良型MSBR与反硝化深床滤池工艺在西北地区污水厂提标改造中的应用[J].净水技术,2024,43(10):160-166,201.

ZHANG G J, WANG L, LI J, et al. Application of modified MSBR and denitrifying deep bed filter processes upgrading and reconstruction of WWTPs in northwest region[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(10): 160-166,201.

## 改良型MSBR与反硝化深床滤池工艺在西北地区污水厂提标改造中的应用

张国杰\*,王磊,李建,姜琪

(中国市政工程西北设计研究院有限公司,甘肃兰州 730000)

**摘要** 西北地区M城镇污水处理厂最终排放水体以黄河为主要支流。为积极响应国务院关于黄河流域生态保护相关要求,针对该污水处理厂出水水质标准低、原有生物处理单元水质和水量变化适应性差以及出水浮渣量大等问题进行提标改造。在原有设备改造、完善的基础上,采用城市污水→粗格栅→集水池→提升泵→细格栅→曝气沉砂池(新建)→改良型MSBR池(改造原有CAST池)→中间提升泵房(新建)→高效沉淀池(新建)→反硝化深床滤池(新建)→接触消毒池→一级A达标外排工艺技术,污水厂出水标准由一级B提高至一级A,同时污水厂处理能力由60 000 m<sup>3</sup>/d扩容至100 000 m<sup>3</sup>/d,通过对连续稳定运行一年的系统中的经济性指标分析可知该方案具有良好的经济效益,能够作为西北地区污水厂提标改造的参考方案。

**关键词** 西北地区 黄河流域 提标改造 MSBR 反硝化深床滤池

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2024)10-0160-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.10.020

## Application of Modified MSBR and Denitrifying Deep Bed Filter Processes in Upgrading and Reconstruction of WWTPs in Northwest Region

ZHANG Guojie\*, WANG Lei, LI Jian, JIANG Qi

(CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract** The final discharge water body of M urban wastewater treatment plant (WWTP) in northwest China takes the Yellow River as its main tributary. In order to actively respond to the requirements of the state council on ecological protection in the yellow river basin, the WWTP had been upgraded and reconstructed to address issues such as low effluent quality standards, poor adaptability to changes in water quality and quantity of the original biological treatment unit, and large amount of effluent floating slag. On the basis of the reconstruction and improvement of the original equipment, the use of urban sewage → coarse grid → sump → lifting pump → fine grid → aeration grit tank (new) → improved MSBR tank (transformation of the original CAST tank) → intermediate lifting pump room (new) → high-efficiency sedimentation tank (new) → denitrification deep bed filter (new) → contact disinfection tank → level A standard was discharged to the Weihe River process technology, the effluent standard of the WWTP is increased from class B to class A, and the treatment capacity of the WWTP is expanded from 60 000 m<sup>3</sup>/d to 100 000 m<sup>3</sup>/d. Through the analysis of the economic indices in the continuous and stable operation of the system for one year, it can be seen that the scheme has good economic benefits and can be used as a reference scheme for the upgrading and reconstruction of WWTP in Northwest China.

**Keywords** northwest region Yellow River Basin upgrading and reconstruction MSBR denitrified deep bed filter (DDBF)

[收稿日期] 2023-05-09

[通信作者] 张国杰(1986—),男,高级工程师,研究方向为市政工程设计,E-mail:86425913@qq.com.

2021年国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中提出:在今后一个时期内,推进农业面源污染、工业污染、城乡生活污染

等生态环境的综合整治工作<sup>[1]</sup>。“一河一策”“一湖一策”的推进,加强了黄河支流及流域腹地生态环境治理,使得黄河流域城镇污水处理厂污水的排放标准也更加严格。随着社会经济的不断发展,城镇生活污水水质指标含量总体呈上升趋势,这其中以氨氮和总磷(TP)指标变化最为明显。由于西北地区污水生物处理系统易受温度影响,尤其是在冬季时气温低,污泥活性降低,处理能力减弱。针对以上存在的问题,新疆某城镇污水处理厂采用两级曝气生物滤池技术,并用甲醛作为额外碳源,解决了出水总氮(TN)不达标的问题,保证了出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准<sup>[2]</sup>。赤峰市锦山污水处理厂采用三段式回流厌氧-缺氧-好氧生物脱氮除磷工艺(AAO)与膜生物反应器(MBR)组合工艺,同时对好氧池曝气量进行改造升级,保证出水水质持续达到一级 A 标准<sup>[3]</sup>。对原有工艺的改造升级是国内大多数污水厂最常采用的方式,其中生物处理单元的改造主要包括在原有工艺基础上增加强化脱氮除磷工艺<sup>[4]</sup>、增加膜处理单元或投加悬浮填料<sup>[5]</sup>、提高微生物的活性。深度处理单元通常作为新增处理设施,常用的工艺有 MBR 工艺<sup>[6]</sup>、曝气生物滤池<sup>[7]</sup>、深床滤池工

艺<sup>[8]</sup>等。本文以天水市 M 污水处理厂提标改造工程为例,在原有 60 000 m<sup>3</sup>/d 一级 B 出水水质的基础上,引入 MSBR 工艺,将现状循环式活性污泥法(CAST)池污水处理量提升至 100 000 m<sup>3</sup>/d,同时出水中污染物质含量达到一级 A 标准。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

天水市 M 污水处理厂总流域服务面积约为 40 km<sup>2</sup>,2015 年服务人口为 255 700 人。污水厂生物处理单元使用 CAST 技术,采用重力浓缩加带式脱水一体机作为污泥处理系统。污水厂主要构筑物有:粗格栅、提升泵房、细格栅、旋流沉砂池、CAST 反应池、化学除磷及接触池、重力浓缩池、污泥泵房、污泥脱水机房、加药加氯间、鼓风机房及变配电室。污水厂可处理水量为 60 000 m<sup>3</sup>/d,以《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 B 标准作为出水水质执行标准。该污水厂在 2016 年对厂区污泥进行升级改造,在厂区东南角预留用地上新建污泥板框脱水车间(60 000 m<sup>3</sup>/d),使污泥脱水后污泥含水率低于 60%。M 污水处理厂改造前进水水量平均值为 1 513 m<sup>3</sup>/h,最大值为 2 170 m<sup>3</sup>/h。水质指标以及处理流程如图 1 所示。



图 1 改造前污水处理厂处理流程

Fig. 1 Treatment Process of WWTP before Reconstruction

### 1.2 目前存在问题

由表 1 可知, M 污水处理厂出水中 COD<sub>Cr</sub> 和

BOD<sub>5</sub> 等主要污染物质去除率均可达到 80% 以上,基本达到一级 B 标准。根据《重点流域水污染防治

表 1 改造前污水处理厂进出水水质

Tab. 1 Influent and Effluent of Quality WWTP before Reconstruction

项目	重铬酸盐指数 (COD <sub>Cr</sub> )	五日生化需氧量 (BOD <sub>5</sub> )	固体悬浮物 (SS)	氨氮	TN	TP
设计进水水质指标/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤350	≤200	≤300	≤35	≤50	≤4
实际进水水质指标/(mg·L <sup>-1</sup> )	338.47	164.07	164.07	35.78	37.21	6.15
设计出水水质指标/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤60	≤20	≤20	≤8(15)	≤20	≤1
实际出水水质指标/(mg·L <sup>-1</sup> )	40.57	13.85	14.87	7.14	17.3	0.68
设计去除率	82.86%	90%	93.33%	77.14%	60%	75%
实际去除率	88.01%	91.56%	90.94%	80.05%	53.51%	88.94%

注:设计进水水温≥10℃,括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标,下同。

规划(2016—2020)》以及省市环保部门要求对流域内水质污染控制指标相关要求, M 污水处理厂出水水质需执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 标准。根据污水厂水量、水质统计报表, M 污水处理厂生物处理单元现有 CAST 反应池共 4 座, 通过将污泥质量浓度由现阶段的 4 000 g/L 提升至 6 000 g/L, 可达到满足提标改造水量要求。但该系统除磷脱碳效果有限, 无法确保满足提标后出水水质要求, 因此需要进一步增设去除 TP、TN 等的处理设施, 提高系统水质和水量适应性。此外衔接点使用的旋流沉砂池存在上浮渣多等问题, 浮渣进入生物反应池后对生物处理单元同样会产生影响, 因此需要对其进行改造优化。

### 1.3 提标改造方案

根据污水处理厂现有处理工艺及提标要求, 主要通过强化系统的脱氮、除磷效率、提高原水碳源利用率、采用高效的脱氮除磷工艺等方面使出水水质指标均能完全达到一级 A 标准要求。同时考虑西北地区年温差大, 冬季干旱寒冷等气候因素, 在污水处理厂提标改造方案设计时需要根据

“活性污泥泥龄、水电子受体、流态分布、污泥维持、物理实施”5 个组成要素在时间、空间和实施方式上的不同组合, 筛选出具有达标优势、技术可行、经济合理的工艺实施方案, 本项目各处理单元改造方案如下。

#### 1.3.1 二级生物处理单元系统改造方案

作为序批式活性污泥污水处理方法(SBR)工艺的同源技术, M 污水厂目前所使用的 CAST 工艺对水量冲击负荷的适应能力、除磷脱氮效率一般。此外, 受池型、污泥回流量及没有终沉池等因素的影响, 已经不适用于一级 A 标准的核心构筑物。因此需要对 CAST 池进行改造, 且厂区占地有限, 不能增设终沉池。经过初步分析, 拟列出 3 种方案进行比较(表 2), 分别为改良型 MSBR 池(CAST 池改造)+高效沉淀池(新建)、MBBR 池(CAST 池中加填料)+高效沉淀池(新建)以及 AAO(CAST 池改造)+MBR(新建)。

通过方案论证比选, 确定本项目提标扩容处理工艺为改良型 MSBR 工艺(CAST 改造)+高效沉淀池(新建)。

表 2 生物处理单元改造方案比选

Tab. 2 Comparison Reconstruction Schemes of Biological Treatment Units

项目	方案一		方案二	方案三
	改良型 MSBR 工艺(CAST 池改造)+ 高效沉淀池(新建)	改良型 MBBR 工艺(CAST 投加填料)+ 高效沉淀池(新建)	改良型 MSBR 池(CAST 投加填料)+ 高效沉淀池(新建)	AAO+MBR 工艺
主要处理单元	进水及预处理单元 曝气沉砂池(新建) 改良型 MSBR 池(CAST 改造)	进水及预处理单元 曝气沉砂池(新建)	进水及预处理单元 曝气沉砂池(新建)	进水及预处理单元+膜格栅 曝气沉砂池(新建) AAO 生化单元(CAST 改造)
占地面积	原池改造、占地小	原池改造、占地小	原池改造、占地小	增设膜池、占地大
管理维护	维护工作量较小	维护工作量较小	维护工作量较小	需定期化学清洗膜, 有一定的维护工作量
所用药剂	混凝剂	混凝剂	混凝剂	混凝剂
存在问题	系统较传统生物池存在设备数量多、电耗增加等问题	要安装拦截网、搅拌推流器, 填料之间、填料与池壁易碰撞磨损; 日常运营长时间摩擦、碰撞易破损, 有一定的破损率需要定期补充; 填料容易跑漏, 甚至堵塞过流廊道, 严重影响后续处理构筑物的运行, 检修需要把填料打捞出来才能进行检修	要安装拦截网、搅拌推流器, 填料之间、填料与池壁易碰撞磨损; 日常运营长时间摩擦、碰撞易破损, 有一定的破损率需要定期补充; 填料容易跑漏, 甚至堵塞过流廊道, 严重影响后续处理构筑物的运行, 检修需要把填料打捞出来才能进行检修	设备投资较高; 膜组件较多, 增加了设备维护量, 管理及养护相对复杂; 清洗药剂较多增加了运行成本; 回流系统流量较大, 电耗设备较多, 运行成本高

#### 1.3.2 深度处理单元改扩建方案

##### (1) 反硝化深床滤池

二级生物处理单元能有效去除水中大量的污染物, 为保证污水厂出水水质持续满足要求, 提高系统水质变化适应性, 通常需要设置深度处理单元进行水质提升。常用的深度处理技术有: MBR 工艺<sup>[9]</sup>、曝气生物滤池工艺<sup>[10]</sup>、反硝化深床滤池工艺、

高效沉淀池、纤维转盘滤池、臭氧氧化<sup>[11]</sup>等。为了进一步去除 TN 和 SS, 本污水厂改造中使用反硝化深床滤池作为深度处理工艺。反硝化生物滤池有各种类型, 国际上应用较为成熟的有 USFilter 公司的 Biostyr 生物滤池、Ondeo Degremont 公司的 Biofor 生物滤池等, 国内部分厂家也开发了类似的生物滤池。反硝化深床滤池作为一种新型水处理系统, 将反硝

化脱氮和过滤过程有机结合,在污水深度处理领域具有较高的推广价值。

(2) 化学除磷工艺

M 污水厂目前设计进水 TP 质量浓度为 7 mg/L, 经过生物池生物除磷可将 TP 质量浓度降低至 2.0 mg/L 以下。为了确保出水 TP 质量浓度低于 0.5 mg/L, 需在生物处理单元后增设化学除磷系统

作为深度处理单元。化学除磷工艺通过无机金属药剂使溶解性磷酸盐形成颗粒状非溶解性物质从而从水中去除。常用絮凝剂包括硫酸亚铁、氯化硫酸铁以及聚合氯化铝等物质。结合水厂的实际运行情况, 本项目使用聚合氯化铝作为除磷药剂。具体改造工艺流程如图 2 所示。



图 2 污水处理厂提标改造处理流程

Fig. 2 Treatment Process of Upgrading and Reconstruction in WWTP

1.4 提标改造工艺设计

1.4.1 设计规模

设计处理规模为 100 000 m<sup>3</sup>/d, 设计进水流量

为 4 166.67 m<sup>3</sup>/h, 峰值流量为 5 416.67 m<sup>3</sup>/h。

1.4.2 提标改造设计进出水水质指标

设计进出水水质指标如表 3 所示。

表 3 设计进出水水质指标

Tab. 3 Design Indices of Influent and Effluent Water Quality

项目	COD <sub>Cr</sub>	BOD <sub>5</sub>	SS	氨氮	TN	TP
进水水质指标/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤400	≤250	≤300	≤40	≤55	≤7
出水水质指标/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤50	≤10	≤10	≤5(8)	≤15	≤0.5

1.4.3 提标改造处理单元工艺设计

(1) 生物处理单元

M 污水处理厂原有 CAST 处理单元共有池体 4 座, 运行工作流程如图 3 所示, 正常运行处理水量可达到 60 000 m<sup>3</sup>/d, 将其改造为改良型 MSBR 反应

池后, 每组生化池处理水量为 20 000 m<sup>3</sup>/d。再新建一组座处理量为 20 000 m<sup>3</sup>/d 改良型 MSBR, 使污水处理厂整体处理能力提升至 100 000 m<sup>3</sup>/d, 总变化系数 K<sub>z</sub>=1.3。M 污水处理厂的主体工艺采用改良型 MSBR 工艺+高密度沉淀池+反硝化深床滤池工艺+消毒工艺的组合方式。

改良前 CAST 池工作流程图如图 4 所示, CAST 池尺寸如表 4 所示, 相关参数数值如表 5 所示, 共设有 4 组 CAST 池, 表中数据为单组池子尺寸。

改良型 MSBR 反应池工作流程如图 5 所示, MSBR 池的尺寸及参数如表 6、表 7 所示(4 组 CAST 池, 单座参数)。

污水经预处理工序后与预缺氧池的回流污泥共同进入厌氧池, 充分混合后进入 SBR 系统。首先在厌氧池发生释磷反应, 然后进入缺氧池。为提升反硝化处理效果, 主曝气池中部分污泥回流至缺氧池为原水提供硝态氮。污水由缺氧池进入主曝气池后进行有机物降解、硝化以及磷吸收反应等过程, 随后进入由两座反应池组成的序批池进行沉淀和缺氧过程。序批池出水进入泥水分离池进行处理, 上清液

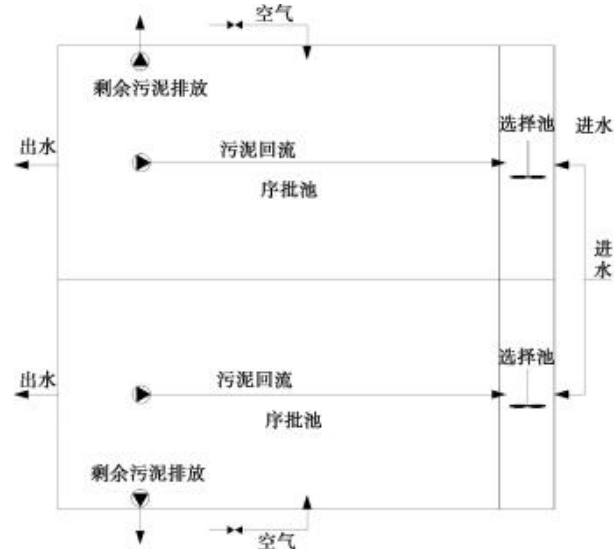


图 3 现状 CAST 池工作流程

Fig. 3 Workflow of Existing CAST Tank

进入缺氧池,污泥则进入预缺氧池经反硝化脱氮后进入厌氧池与进厂污水混合进行释磷。

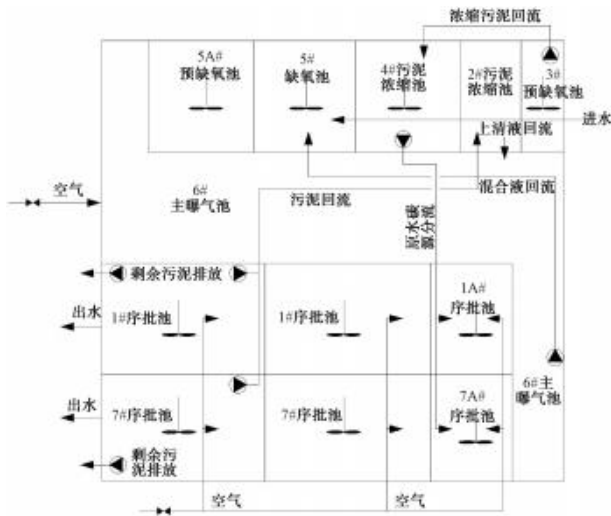


图 4 改造前 CAST 池工作流程

Fig. 4 Workflow of CAST Tank before Reconstruction

表 4 CAST 池尺寸

Tab. 4 Size of CAST Pool

单元池#	长/m	宽/m	有效水深/m	水力停留时间 (HRT)/h	池容/m <sup>3</sup>
选择池	5	51.3	5.3	2.18	1 359.45
序批池	48.7	51.3	5.3	21.19	1 3241.04

表 5 CAST 池相关参数

Tab. 5 Related Indices of CAST Pool

项目	数值	单位
每日半周期数	6	/
半周期时间	240	min
污泥负荷(F/M)	0.101	kg BOD <sub>5</sub> /(kg MLSS·d)
平均污泥浓度	4 000	mg/L
HRT	0.97	d
泥龄	20	d
每日最大干泥量	10.8	kg/d
每日排泥量	1 800	m <sup>3</sup> /d

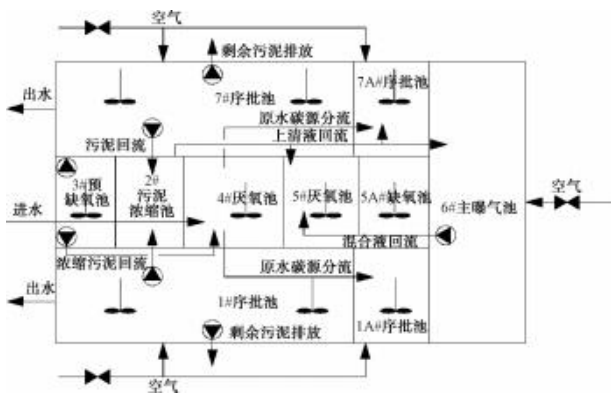


图 5 改良型 MSBR 反应池工作流程

Fig. 5 Workflow of Modified MSBR Process

表 6 MSBR 池尺寸

Tab. 6 Size of MSBR Pool

单元池	长/m	宽/m	有效水深/m	HRT/h	池容/m <sup>3</sup>
1#	34.55	14	5.3	3.08	2 563.61
1A#	9	14	5.3	0.8	667.8
2#	7	14	5.3	0.37	311.64
3#	4.5	14	5.3	0.4	333.9
4#	10	14	5.3	1.14	949.76
5#	10.5	14	5.3	0.93	779.1
5A#	10.5	14	5.3	0.93	779.1
6#	42.8	20	5.3	5.44	4 536.8
7#	34.55	14	5.3	3.08	2 563.61
7A#	9	14	5.3	0.8	667.8

表 7 MSBR 池相关参数

Tab. 7 Related Indices of MSBR Pool

项目	数值	单位
每日半周期数	12	cycles
半周期时间	120	min
污泥负荷(F/M)	0.101	kg BOD <sub>5</sub> /(kg MLSS·d)
平均污泥质量浓度	3 500	mg/L
HRT	0.71	d
泥龄	9.9	d
最大干泥量	4 717	kg/d
排泥量	471	m <sup>3</sup> /d
碳需氧量	1.25	kg O <sub>2</sub> /(kg BOD <sub>5</sub> )
氮需氧量	4.6	kg O <sub>2</sub> /(kg TKN)
反硝化可利用氧	50%	/

(2)深度处理单元

生物处理单元出水进入反硝化深床滤池进行处理,通过反硝化过程对水中的硝态氮进行处理,实现脱氮目标的同时截留 SS。本项目采取在高效沉淀池前混合池内投加聚合氯化铝的方式来进行化学除磷,聚合氯化铝与其他化学除磷药剂相比具有处理效率高、水质及水温适应性强等优点。反硝化深床滤池设计参数如表 8 所示。

2 工程运行效果

对 M 污水处理厂进行提标改造后由 1 月—9 月连续稳定运行中每日进出水部分水质指标进行测定,结果如图 6 所示。

图 6 中分别为污水厂出水中的 COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN 以及 TP 的含量变化。图中结果表明经过提标改造后的处理工艺能够保证 M 污水厂出水水质持续满足一级 A 标准,具有良好的处理效果。

表 8 反硝化深床滤池设计参数  
Tab. 8 Design Indices of Denitrification Deep Bed Filter

项目	数值	单位	项目	数值	单位
设计水量	5 417	m <sup>3</sup> /h	滤料上水深	2.06	m
格数	8	格	平均时设计滤速	5.46	m/h
单格过滤尺寸	L×B×H=26.8×3.56×6.55	m	最大时设计滤速	7.1	m/h
配水层高	1.07	m	单格滤料数量	174.6	m <sup>3</sup>
承托层高	0.45	m	气水分布块	95.4	m <sup>2</sup> /格
滤块高	0.19	m	单格滤料数量	174.6	m <sup>3</sup>
滤料层高	1.83	m			

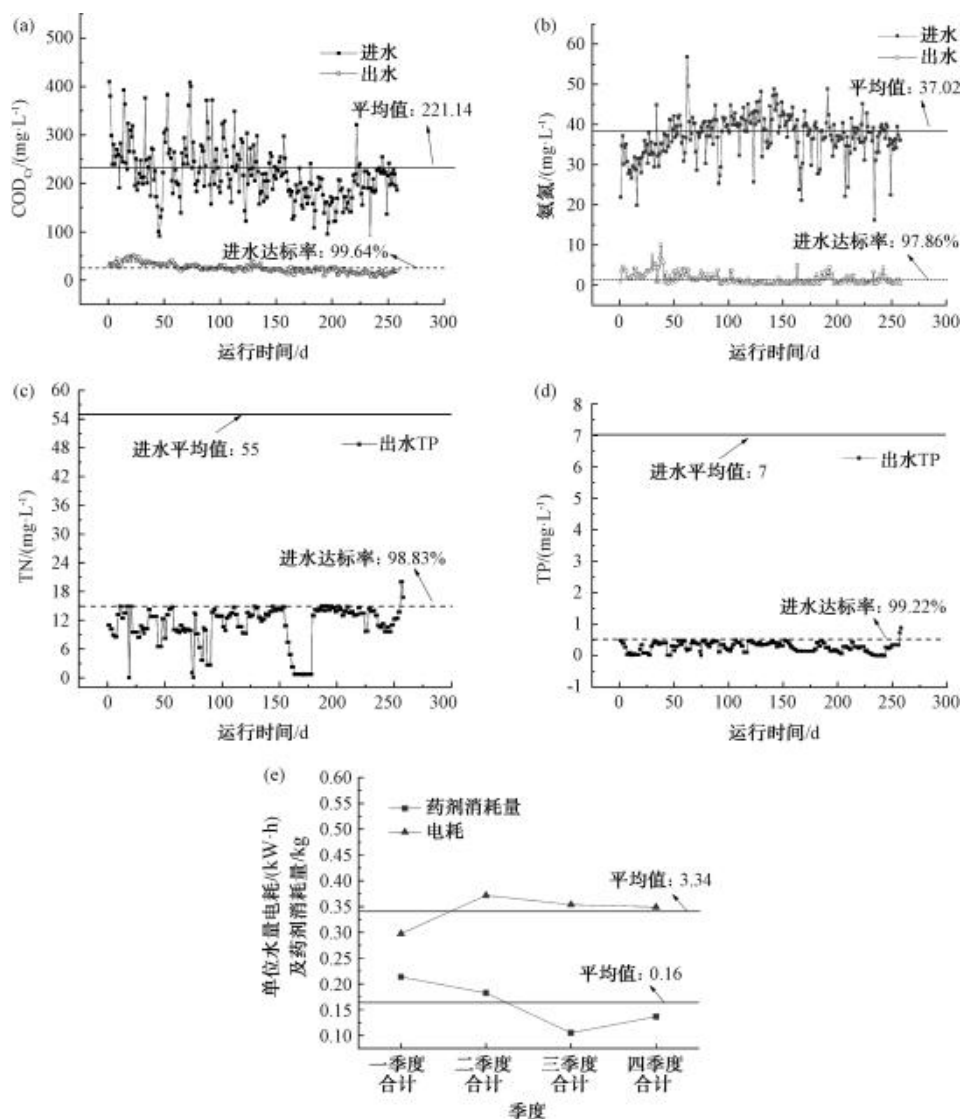


图 6 系统连续稳定运行效果

Fig. 6 Effect of Continuous and Stable Operation

(1)图 6(a)为污水厂进水中 COD<sub>Cr</sub> 浓度变化。污水厂进水 COD<sub>Cr</sub> 浓度在不同季节变化较大,

其中冬春两季整体偏高,夏秋两季较低。改良型 MSBR 生物处理单元能够有效应对水质变化,出水

COD<sub>Cr</sub> 达标率达到 99% 以上,在温度较低的月份同样表现出良好的去除效果。

(2)图 6(b)和图 6(c)分别为出水氨氮和 TN 浓度变化,其中氨氮出水达标率为 97.86%,TN 出水达标率为 98.83%。反硝化深床滤池系统,脱氮反应通过附着在石英砂表面上的反硝化细菌来完成。系统运行结果表明,在前端生物处理单元硝化反应较完全的情况下,深床滤池可稳定做到出水 TN ≤ 20 mg/L<sup>[12]</sup>,本项目所使用的反硝化深床滤池具有良好的应用效果。

(3)图 6(d)为出水中 TP 的浓度变化,出水中 TP 达标率为 99.22%。本项目中所采用的改良型 MSBR 系统进水由连续运行单元(厌氧池或好氧池)进入。对生物除磷来说,连续的厌氧池进水可大大提高厌氧区 BOD<sub>5</sub> 及挥发性脂肪酸(VFA)的浓度,从而改善除磷效果。

(4)图 6(e)为系统连续稳定一年中经济性指标分析,系统年平均电耗为 3.34 kW·h,平均药剂消耗量为 0.16 kg/m<sup>3</sup>。由分析结果可知,4 季度单位水量电耗和药剂消耗量波动范围小,系统运行平稳,运行成本和系统能耗满足提标改造相关要求,具有良好的经济性,对于西北地区四季分明的气候特点具有良好的适应性。

### 3 结论

(1)针对西北地区城镇污水处理厂水质特点及气候特征,改良型 MSBR 工艺+反硝化深床滤池+化学除磷的提标改造方案具有良好的应用效果。改造后的系统具有污染物去除效率高、抗冲击负荷能力强等优点。污水厂出水满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 类排放标准。

(2)项目建成后每年排入水体中的可降低 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、SS、TN、氨氮、TP 可分别降低 3 723、5 329、4 453、693.5、576.7、105.85 t。有效减少了城区排出污水对受纳水体的污染。

(3)通过对系统运行一年中的单位水量电耗和药剂消耗量分析结果可以看出,该系统具有良好的经济性。不同季度的电耗和药剂消耗量相对稳定,针对西北地区冬季水温低对系统运行效果的影响,本项目通过增加污泥浓度和精准控制曝气过程来改善低温运行效果,好氧区和缺氧区根据水质和水温

状况进行灵活调整,有效提升了系统的适应性,为西北地区污水厂的提标改造提供方案参考和数据支撑。

### 参考文献

- [ 1 ] 中共中央国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(30):15-35. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council Print and Issue the *Outlines for the Plan for Ecological Protection and High-Quality Development of the Yellow River Basin* [J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2021(30): 15-35.
- [ 2 ] 李建,王磊,王海梅,等. 低温低碳条件下污水处理厂提标改造——以乌市某污水处理厂为例[J]. 净水技术, 2021,40(8):155-161. LI J, WANG L, WANG H M, et al. Upgrading and transformation of wastewater treatment plants under low temperature and low carbon conditions—A case study of a wastewater treatment plant in Urumqi [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(8): 155-161.
- [ 3 ] 王卓艺,张鸿涛,李东玲,等. AAO 和 MBR 组合工艺在寒冷地区污水处理中的应用[J]. 中国给水排水, 2020,36(18): 70-74. WANG Z Y, ZHANG H T, LI D L, et al. Application of AAO and MBR combined process for wastewater treatment in cold area [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18): 70-74.
- [ 4 ] 高原. AAO-MBR 工艺提标改造小型城市污水处理厂[J]. 水处理技术, 2018, 44(8):126-128. GAO Y. Upgrading and reconstruction of small urban wastewater treatment plant by AAO-MBR technology [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(8): 126-128.
- [ 5 ] 唐凯峰,王华,赵乐军. 悬浮填料 SBBR 在污水处理厂提标改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(12):90-94. TANG K F, WANG H, ZHAO L J. Application of SBBR with filled suspended carrier in upgrading of a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(12): 90-94.
- [ 6 ] 史赛花. 西安某 Orbal 氧化沟工艺问题解析与升级改造[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014. SHI S H. Upgrading and analysis on the Orbal oxidation ditch process of a wastewater treatment plant in Xi'an [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [ 7 ] 蒋岚岚,张万里,胡邦,等. 无锡城北污水处理厂升级改造工艺设计[J]. 给水排水, 2009,45(6):29-34. JIANG L L, ZHANG W L, HU B, et al. Design for upgrading reconstruction process of Chengbei wastewater treatment plant in Wuxi city [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(6): 29-34.

(下转第 201 页)

- YU H G. Intelligent PID control method for chlorination at water treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(7): 58-60.
- [ 2 ] 丛孙丽, 姜哲宇. 基于 PLC 和 Intouch 的次氯酸钠加氯系统设计[J]. *给水排水*, 2021, 47(5): 135-139.
- CONG S L, JIANG Z Y. Design of sodium hypochlorite chlorination system based on PLC and Intouch[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(5): 135-139.
- [ 3 ] 郭晓, 范建伟. 多变量模糊加权控制在水厂自动加药系统中的应用[J]. *城镇供水*, 2017, 2017(1): 26-30.
- GUO X, FAN J W. Application of multivariable fuzzy weighted control in the automatic dosing system of drinking water treatment plants[J]. *City and Town Water Supply*, 2017, 2017(1): 26-30.
- [ 4 ] 李成. 智能控制在净水厂混凝投药过程中的应用研究[J]. *新型工业化*, 2022, 12(8): 217-220.
- LI C. Research on the application of intelligent control in the coagulation dosing process of water treatment plants[J]. *The Journal of New Industrialization*, 2022, 12(8): 217-220.
- [ 5 ] 韩梅, 李玉宝, 邹放, 等. 基于水厂大数据的混凝投药系统智能模型的构建[J]. *净水技术*, 2021, 40(9): 40-47.
- HAN M, LI Y B, ZOU F, et al. Modeling of big data-based intelligent model for coagulation dosing system in WTP[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(9): 40-47.
- [ 6 ] 魏琪, 刘保超. 两种混凝剂智能投加系统在自来水厂中的应用[J]. *供水技术*, 2023, 17(2): 1-5.
- WEI Q, LIU B C. Application of two intelligent coagulant dosing systems in waterworks[J]. *Water Technology*, 2023, 17(2): 1-5.
- [ 7 ] REN B, WEITZEL K A, DUAN X, et al. A comprehensive review on algae removal and control by coagulation-based processes: Mechanism, material, and application [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 293: 1-26.
- [ 8 ] JAVIER G, RAMON V, HERMINIO M G, et al. Fuzzy gain scheduling and feed-forward control for drinking water treatment plants (DWTP) chlorination process[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 110018-110032. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3002156.
- [ 9 ] GODO-PLA L, RODRIGUEZ L J, SUQUET J, et al. Control of primary disinfection in a drinking water treatment plant based on a fuzzy inference system[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 145: 63 - 70. DOI: 10.1016/j.psep.2020.07.037.
- [ 10 ] 唐志松, 周志鹏, 唐健. 串联系统多参数广义不确定度传递模式与多反馈控制[J]. *数学的实践与认识*, 2021, 51(7): 195-205.
- TANG B S, ZHOU Z P, TANG J. Transfer mode of generalized uncertainty with multiple parameters and multiple feedback control for series systems [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2021, 51(7): 195-205.
- [ 11 ] 袁卓昇. 制水混凝加药控制的模糊 PID 算法研究[J]. *计算技术与自动化*, 2022, 41(3): 27-31.
- YUAN Z Y. Fuzzy PID algorithm for coagulant dosing control of water production[J]. *Computing Technology and Automation*, 2022, 41(3): 27-31.

(上接第 166 页)

- [ 8 ] 刘亦凡, 陈涛, 李军. 中国城镇污水处理厂提标改造工艺及运行案例[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(16): 36-41.
- LIU Y F, CHEN T, LI J. Process analysis of upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plants in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(16): 36-41.
- [ 9 ] 姚亮, 张强, 李鹏. 多级 AO+MBR 工艺在污水处理厂高排放标准提标改造中的应用[J]. *净水技术*, 2023, 42(3): 164-173.
- YAO L, ZHANG Q, LI P. Application of multi-stage AO+MBR processes in upgrading and reconstruction of stricter discharge standard of WWTP[J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(3): 164-173.
- [ 10 ] 吴越, 卢俊平, 王怡, 等. MBBR+曝气生物滤池工艺在北方地区污水处理厂提标改造中的应用[J]. *净水技术*, 2023, 42(2): 162-168.
- WU Y, LU J P, WANG Y, et al. Application of MBBR+BAF processes in upgrading and reconstruction of WWTP in northern region[J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(2): 162-168.
- [ 11 ] 徐世峰. 西北地区某城市污水处理厂提标改造的实践研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- XU S F. Practical research on upgrading and reconstruction of municipal sewage treatment plant in northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [ 12 ] 汪寅莹. 西北地区城市污水处理厂升级改造工艺研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- WANG Y Y. Municipal sewage treatment plant upgrading of technology in northwest area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.