

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.06.018

A/RPIR+磁混凝沉淀用于临时分散式污水处理工程

彭冠平¹, 邹 静¹, 石稳民¹, 李思洁¹, 黎 斌¹, 刘 雯¹,
楚鑫鹏¹, 徐海飞¹, 李 进¹, 杨 振^{1,2}

(1. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 中建三局水务环保设计研究院, 湖北 武汉 430014)

摘 要: 为缓解武汉市东西湖区汉西污水处理厂现状处理能力不足的问题,设计采用A/RPIR+磁混凝沉淀工艺,新建2座共计 $13\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的应急临时分散式污水处理设施,实现东西湖片区污水处理提质增效。该工程主体构筑物均采用工厂模块化预制、现场焊接拼装形式,其中 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 污水厂建设周期约120 d,污水处理系统单位占地 $0.31\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,远低于同规模用地标准推荐值。运行结果显示,该污水处理系统具有一定耐冲击负荷能力,出水水质可稳定达到一级A标准,综合运营成本为 $0.5502\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

关键词: 提质增效; 分散式污水处理; A/RPIR; 磁混凝沉淀

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)06-0093-06

Application of A/RPIR and Magnetic Coagulation Sedimentation in a Temporary Decentralized Sewage Treatment Project

PENG Guan-ping¹, ZOU Jing¹, SHI Wen-min¹, LI Si-jie¹, LI Bin¹, LIU Wen¹,
CHU Xin-peng¹, XU Hai-fei¹, LI Jin¹, YANG Zhen^{1,2}

(1. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430056, China; 2. China Construction Third Bureau Water & Environment Design and Research Institute, Wuhan 430014, China)

Abstract: To alleviate the current insufficient treatment capacity of the Hanxi sewage treatment plant and realize the quality and efficiency improvement of sewage treatment system in Dongxihu District, Wuhan, two emergency temporary decentralized sewage treatment plants with a total capacity of $13\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, which adopts the rapid purification of sewage using sedimentation integrated rectangular airlift loop reactor (A/RPIR) and magnetic coagulation sedimentation treatment process were newly built. The main structure of the project was prefabricated in factory modular and assembled by on-site welding. The construction period of the $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ sewage treatment plant is about 120 days and the sewage treatment system unit occupies an area of $0.31\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$, which is far lower than the recommended standard value. The operation results showed that the sewage treatment system has a certain impact load resistance, the effluent indexes could stably reach the first-level A criteria of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) and the comprehensive operating cost was $0.5502\text{ yuan}/\text{m}^3$.

Key words: quality and efficiency improvement; decentralized sewage treatment; A/RPIR; magnetic coagulation sedimentation

由于快速城镇化和历史建设等原因,武汉市东西湖区片区存在管网混错接严重、污水处理设施处理能力不足等问题,造成污水系统下游的地势低洼区域污水漫溢现象时有发生,亟待有效解决。

根据《武汉市水污染防治行动计划工作方案(2016—2020年)》,要求加快城镇污水处理设施建设和提标升级改造,到2020年全市城镇污水处理能力提高到 $370 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,城镇污水处理率达到90%以上。为进一步缓解汉西污水处理厂现状处理能力不足、区域污水漫溢等突出问题,武汉市拟参照其他地区类似项目经验,建设东西湖区机场河流域临时分散式污水处理项目,在李家墩闸河东侧、将军路中心沟北侧就地快速兴建临时分散式污水处理设施,为区域污水管网建设完善和污水处理设施扩

建赢取宝贵时间。

1 工程概况

东西湖区机场河流域临时分散式水处理项目主要建设内容:李家墩闸河东侧建设 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 分散式污水处理设施1套,以及相关配套管网和污水提升泵站;将军路中心沟北侧建设 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 分散式污水处理设施1套,以及相关配套管网和污水提升泵站。

根据建设方和环保部门要求,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,污水处理设施设计进、出水水质如表1所示。两座污水处理厂设计规模共 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,两处污水处理设施占地共约 4.2 hm^2 ,总工期约120 d。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH ₃ -N/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH值	粪大肠菌群数/ (个 $\cdot \text{L}^{-1}$)
进水水质	<300	<150	<20	<28	<4	<200	6~9	
出水水质	≤50	≤10	≤5(8)	≤15	≤0.5	≤10	6~9	≤1 000

注:对于氨氮指标,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。

2 核心工艺比选

基于现有的用地条件和考核的紧迫性,东西湖区机场河流域临时分散式水处理项目在工艺比选和设计过程中需重点考虑以下因素:①投资省、运行费用低、施工周期短、启动速度快;②处理构筑物结构简单、占地面积小、操作管理方便、运行安全可靠;③注重处理系统的灵活性和抗冲击性,提高对水质、水量变化的适应能力,出水水质能稳定达标;④临时应急工程,地面以上尽量不建设钢筋混凝土类永久性构筑物。

2.1 生化处理工艺比选

针对上述项目特点,选取了氧化沟、A²/O、CAST、BAF、MBR、A/RPIR、MBBR等传统及新型污水生化处理工艺,从出水水质、建设费用、运行管理、建设周期、占地面积等维度进行了综合比选(见表2)。考虑本次工程为临时应急处理工程,应采用流程简单、占地面积小、建设周期短、启动速度快、见效快且能稳定达标的生化处理工艺。氧化沟占地面积大,且施工复杂,不适用于本项目。CAST采用变水位运行,污泥稳定性相对较差,脱氮除磷效

果不佳时容易出现水质不达标的问题。BAF占地面积最小,但出水水质难以稳定达标,且对进水SS的要求较高,通常要以超磁分离技术作为预处理,整个工艺设备、阀门及构筑物较多,运行操作不便。MBR工艺处理效果最好,占地面积小,但是投资和运行费用较高^[1],且需要新建离线清洗水池及设备间等建(构)筑物,不适合作为临时应急工程的首选。MBBR具有占地面积小、抗冲击负荷能力强、处理效果好等特点,但污泥驯化周期长、运行管理要求相对较高。A²/O与A/RPIR均能满足本项目对处理效果、耐负荷冲击要求,但A²/O比A/RPIR占地面积大,且需要污泥外回流,运行能耗高。A/RPIR作为一种新型污水快速生化处理技术,在原有活性污泥法的基础上,通过反应器结构优化,增加RPIR模块截留污泥,省去了常规工艺的二沉池,取消了污泥外回流。在高效去除COD的同时,可实现同步硝化反硝化和脱氮除磷,具有占地面积小、水质效果好、RPIR模块无动力消耗、运行管理简便等优点^[2-3]。目前已在市政污水应急处理、乡镇分散式污水处理等领域成功应用,处理水量近 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

综合考虑工艺适用性和成熟度,结合已有实际

工程应用效果,本项目生化处理工艺最终选择 A/RPIR。

表2 污水生化处理工艺比选
Tab.2 Comparison and selection of sewage biochemical treatment process

工艺类型	出水水质	建设费用	运行管理	建设周期	占地面积
氧化沟	一般	高	简单	长	较大
A ² /O	较好	高	一般	长	较大
CAST	一般	中	简单	中	中
BAF	一般	高	一般	长	小
MBR	最好	高	复杂	中	小
A/RPIR	较好	中	简单	中	小
MBBR	较好	中	一般	中	小

2.2 深度处理工艺比选

根据建设方要求,本工程出水水质需达到一级 A 标准,为实现稳定达标排放的目的,需进一步去除污水中微量的 COD、BOD₅、SS、氮、磷及盐类,因此需采用深度处理工艺。结合工程特点,选取了活性炭吸附、膜分离、砂滤、混凝沉淀、超磁分离等常用深度处理技术进行综合比选分析,见表 3。

表3 污水深度处理工艺比选
Tab.3 Comparison and selection of advanced sewage treatment process

工艺类型	出水水质	建设费用	运行管理	建设周期	占地面积
活性炭吸附	好	高	复杂	中	小
膜分离	好	高	复杂	短	小
砂滤	一般	中	复杂	长	大
混凝沉淀	一般	中	中	长	大
超磁分离	较好	中	中	短	小

活性炭吸附占地面积小、处理出水水质较好,但运行成本高;膜分离具有出水水质好、处理效果稳定、占地面积小等优点,但也存在运行维护复杂、设备初始投入高、运行维护费用高等缺点。砂滤建设成本低,运行维护简单,但占地面积大,出水水质较差,且需要定期反冲洗或换砂。常规混凝沉淀基本原理与超磁分离类似,但处理效果、污泥沉降效率相对较低。超磁分离技术具备占地面积小、施工周期短、运维难度小、容积负荷高的技术特点,在建设周期、占地面积及运行管理等方面具有突出优势^[4-5],可以满足该项目作为应急工程的核心需求,

因此深度处理采用磁混凝沉淀工艺。

3 工程设计

3.1 工艺设计

以处理规模为 10×10⁴ m³/d 的污水处理厂为例重点介绍。该厂处理的污水原本为通过箱涵进入汉西污水厂的生活污水,故需设闸门截断原来的箱涵,并通过污水提升泵将污水提升至污水厂进行处理。

工艺流程见图 1。

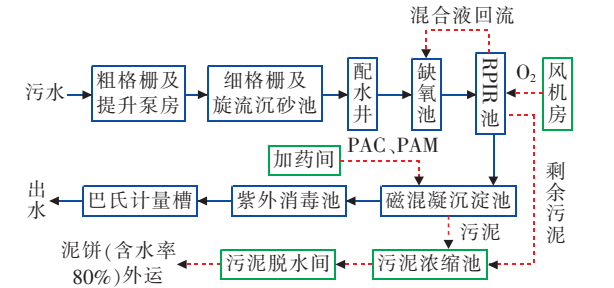


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of sewage treatment process

- ① 污水经提升后进入细格栅和旋流沉砂池,去除细小的漂浮物及粒径>0.2 mm、密度>2.65 t/m³的砂粒。
- ② 旋流沉砂池的出水自流进入 A/RPIR 生化池进行生化处理。利用微生物菌群的不同功能去除有机物、氨氮及总氮等。
- ③ RPIR 池出水进入磁混凝沉淀池,添加混凝剂 PAC(化学除磷药剂)及助凝剂 PAM 进行絮凝、混凝沉淀,对 SS、TP 进行深度处理。
- ④ 磁混凝沉淀池出水进入紫外消毒池进行消毒处理,去除大肠杆菌等病原菌,最后由巴氏计量槽计量后排放。
- ⑤ 剩余污泥排至污泥浓缩池,经污泥浓缩和脱水后(含水率<80%),委托外运处置;臭气由成套生物除臭装置处理后达标排放。

3.2 主要建(构)筑物设计

3.2.1 粗格栅及提升泵房

污水提升设施与污水处理设施规模匹配,日常运行规模为 1.5 m³/s,特殊情况时备用泵同时开启,处理规模可达 2.0 m³/s。进水泵房利用现有箱涵改造而成。

水泵间设 4 台水泵,3 用 1 备,均为变频潜水排污泵,单泵设计流量 0.5 m³/s,扬程 150 kPa,功率

110 kW,自耦式安装。双鼓粉碎型格栅除污机的设计流量5 400 m³/h,宽1.35 m,高2.3 m,栅条间隙15 mm,功率11 kW。

3.2.2 细格栅和旋流沉砂池

细格栅及旋流沉砂池采用合建形式。

细格栅:尺寸($L \times B \times H$)=8.10 m×4.30 m×2.0 m,设计流量 $Q_{\max}=5\,416.6\text{ m}^3/\text{h}$;转鼓式机械格栅, $\varnothing 1\,800\text{ mm}$,渠宽1 900 mm,渠深2 000 mm, $b=5\text{ mm}$, $N=1.5\text{ kW}$,2台。

旋流沉砂池:表面水力负荷 $140\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,停留时间47 s,尺寸 $\varnothing 4.87\text{ m}$,碳钢结构,1座2格。

3.2.3 RPIR池

碳钢防腐结构,4座,单座尺寸: $L \times B \times H=59.40$

$\text{m} \times 35.20\text{ m} \times 6.50\text{ m}$ 。设计流量 $4\,167\text{ m}^3/\text{h}$;有效水深:缺氧池6.0 m,RPIR池5.5 m;有效生化容积:缺氧池 $16\,042\text{ m}^3$,RPIR池 $25\,000\text{ m}^3$;停留时间:缺氧池3.85 h,RPIR池6.0 h;污泥浓度 $4\,000\text{ mg/L}$;有机负荷 $0.1\text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,设计水温 $20\text{ }^\circ\text{C}$;沉淀池表面负荷 $1.3\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;硝化液回流比300%。

3.2.4 磁混凝沉淀池

磁混凝沉淀采用一体化设备,碳钢防腐结构,单套处理能力 $2.5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,共4套。尺寸: $L \times B \times H=38.00\text{ m} \times 19.20\text{ m} \times 4.98\text{ m}$,表面负荷 $15\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水力冲击负荷最大可达120%。

3.2.5 其他构筑物

其他构筑物设计参数如表4所示。

表4 其他构筑物设计参数

Tab.4 Design parameters of other structures

项 目	设计参数
紫外消毒池及巴氏计量槽	尺寸: $L \times B \times H=20.00\text{ m} \times 6.62\text{ m} \times 3.00\text{ m}$;碳钢结构;1座
污泥浓缩池	污泥池有效容积 $1\,300\text{ m}^3$;改造后新增 250 m^3 ;单座尺寸: $L \times B \times H=13.0\text{ m} \times 10.00\text{ m} \times 5.5\text{ m}$;碳钢结构;2座
加药间	尺寸: $L \times B \times H=40.00\text{ m} \times 10.00\text{ m} \times 6.00\text{ m}$;PAC投加量: 35 mg/L ;轻钢结构;1座
污泥脱水间	尺寸: $L \times B \times H=20.5\text{ m} \times 12.5\text{ m} \times 9.8\text{ m}$;设计污泥处理能力 $12\,170\text{ kgDS/d}$;轻钢结构;1座
风机房	尺寸: $L \times B \times H=25.00\text{ m} \times 10.00\text{ m} \times 7.00\text{ m}$;设计风量 $416\text{ m}^3/\text{min}$,设计风压 60 kPa ;轻钢结构;1座

3.3 总图

厂区总平面布置主要根据厂区地形、厂区周围环境和处理工艺以及进、出水位置等条件,在保证污水、污泥处理工艺布局合理、生产管理方便、连接管线简洁的基本原则下,综合考虑将建(构)筑物分区、分类,便于管理。在竖向布置方面,由于选址位于河道旁边,地下水位较高,且项目为临时性建筑,因此考虑主要构筑物均设置于地面之上,便于后期处置。

4 实际运行状况及效能分析

4.1 运行状况

该项目自2020年11月正式通水运行以来,处理水量为 $(7 \sim 10) \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,曝气池MLSS维持在 $5\,000\text{ mg/L}$ 左右,PAC实际投加量约 30 mg/L ,平均产泥约 70 t/d ,曝气系统运行良好,出水水质稳定达到一级A排放标准。选取2020年12月—2021年2月部分运行数据做进一步分析。

4.1.1 对COD的去除效果

该污水厂进、出水COD浓度变化见图2。整体来看,进水COD为 $83.4 \sim 279.0\text{ mg/L}$,呈现一定的波

动,平均值为 166.0 mg/L ,低于设计进水浓度;出水COD为 $3.5 \sim 28.1\text{ mg/L}$,平均为 13.8 mg/L ,平均COD去除率为91.4%,稳定达到设计出水水质要求。可见,A/RPIR+磁混凝工艺对有机污染物具有良好的去除效果。RPIR模块可有效截留活性污泥,提高活性污泥浓度,对进水水质波动冲击有一定的耐受性。

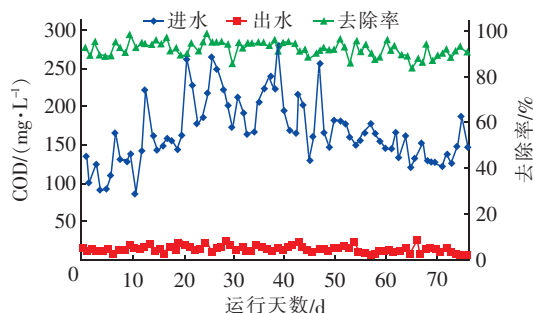


图2 对COD的去除效果

Fig.2 Removal efficiency of COD

4.1.2 对TP的去除效果

该污水厂进、出水TP浓度变化见图3。

进水TP为 $2.1 \sim 5.0\text{ mg/L}$,平均值为 3.0 mg/L ,

进水TP较为稳定,除偶有超标外,基本处于设计进水浓度范围内。经过处理后,出水TP为0.1~0.5 mg/L,平均值为0.3 mg/L,平均去除率为89.9%,满足设计出水标准。该工艺系统采用生物除磷和化学除磷相结合的方式,除磷效果高效稳定。

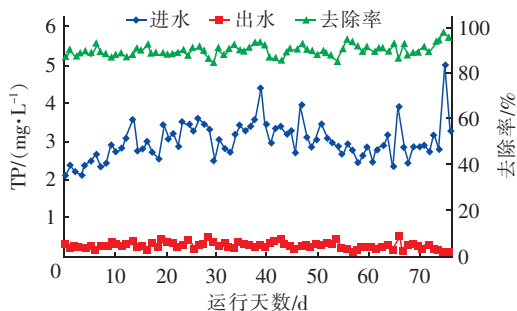


图3 对TP的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of TP

4.1.3 对TN及NH₃-N的去除效果

该污水厂进、出水TN、NH₃-N浓度变化分别见图4、5。

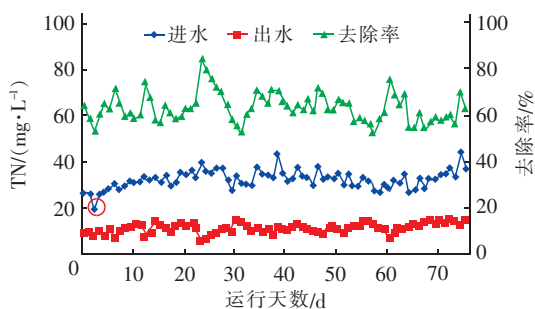


图4 对TN的去除效果

Fig.4 Removal efficiency of TN

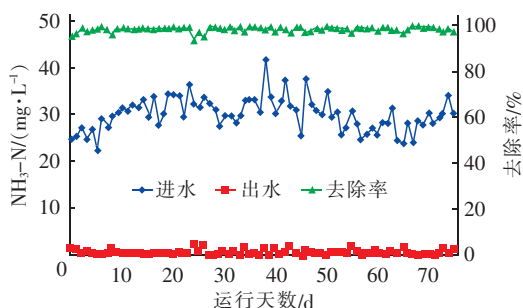


图5 对NH₃-N的去除效果

Fig.5 Removal efficiency of NH₃-N

进水TN为25.9~44.6 mg/L(12月3日进水TN实测值明显偏离,舍去),平均为32.3 mg/L,进水TN较为稳定。经过处理后,出水TN平均浓度为11.8 mg/L,平均去除率为63%。进水NH₃-N为22.3~

42.2 mg/L,平均值为30.0 mg/L,进水氨氮浓度高出设计值50%以上。出水NH₃-N为0.1~2.0 mg/L,平均值为0.46 mg/L,平均去除率为98.5%。

由图4、5可知,进水TN以NH₃-N为主,在设计氨氮浓度偏高,且冬季环境气温偏低的情况下,通过采取严格控制曝气池和缺氧池溶解氧浓度、投加乙酸钠碳源、适当减少排泥量、增加池体及管道保温等措施,该处理系统仍能达到稳定去除氨氮的效果。此外,RPIR模块能够有效截留脱氮生物相,高效完成硝化作用,从而提升对氨氮的降解作用^[2]。同时在底部的非曝气区,可形成缺氧状态,同步进行反硝化反应,达到高效脱除总氮的目的。

4.1.4 对SS的去除效果

该污水厂进、出水SS浓度变化见图6。进水SS为13~340 mg/L,平均值为90.9 mg/L。受上游来水影响,进水SS波动范围较大,但大部分处于设计范围内。出水SS为1.0~9.0 mg/L,平均值为4.3 mg/L,平均去除率为94.3%。该工艺利用RPIR模块设计,省去了二沉池,利用污泥的吸附和团聚作用,结合磁絮凝沉淀可有效去除SS。

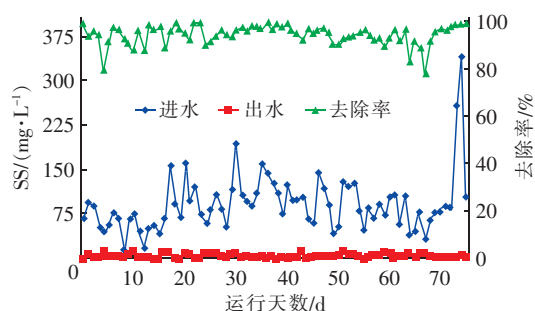


图6 对SS的去除效果

Fig.6 Removal efficiency of SS

4.2 工程效能

基于该项目为临时应急工程的特点,设计中除地基基础外,设备主体结构均为碳钢结构,采用工厂化标准预制模式,实现现场快速吊装、焊接施工。规模为10×10⁴ m³/d的污水厂实际施工时间约120 d,比同等规模传统建造方式的污水厂节省建设工期40%以上。

该污水处理厂红线总占地面积31 424 m²,折算占地为0.31 m²/(m³·d⁻¹),远低于《城市排水工程规划规范》(GB 50318—2017)推荐的二级处理单元占地标准[1.00~1.20 m²/(m³·d⁻¹)]及深度处理单元占地标准[0.30~0.50 m²/(m³·d⁻¹)]。采用集约化工艺

设计和一体化设备较好地解决了工程建设用地紧张的问题。

根据现阶段运行统计数据,日均吨水处理可变动成本如下:电费0.13元/m³,水费0.008元/m³,药剂费0.139元/m³,污泥处置费0.073 2元/m³,日均吨水处理固定成本(人工费、设备维护费等)0.20元/m³,总计污水处理成本为0.550 2元/m³。根据统计资料,武汉市2019年污水处理平均成本约0.7元/m³,本工程现阶段运行成本略低于平均值。后期随着进水浓度升高,污水处理成本预计将有所增加。

5 结论

东西湖区机场河流域临时分散式水处理项目为典型的应急工程项目,经过多轮比选,最终选择RPIR+磁混凝沉淀作为主体处理工艺。该工程主体结构构筑物采用工厂模块化预制、现场焊接拼装形式,10×10⁴ m³/d污水厂建设周期约120 d,污水处理系统单位占地为0.31 m²/(m³·d⁻¹),日均吨水处理成本为0.550 2元/m³。运行结果分析显示,该处理系统对进水水质波动具有一定的耐受性,出水水质可稳定达到一级A标准。综合来看,该系统工艺具有占地面积小、单位投资省、建造速度快、处理效果稳定等特点,可为国内其他类似应急处理工程提供参考。

参考文献:

- [1] 郝晓地,陈峤,李季,等. MBR工艺全球应用现状及趋势分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 7-12.
HAO Xiaodi, CHEN Qiao, LI Ji, *et al.* Status and trend of MBR process application in the world [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (20) : 7-12 (in Chinese).
- [2] 林佩斌,李小江,李辉,等. 快速污水处理技术(RPIR)

用于深圳水环境治理[J]. 中国给水排水, 2020, 36 (12): 117-120,137.

LIN Peibin, LI Xiaojang, LI Hui, *et al.* Application of rapid wastewater treatment technology (RPIR) in water environment improvement in Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (12) : 117-120, 137 (in Chinese).

- [3] 刘淑杰,王丹丹,陈福明,等. 反应沉淀一体式矩形环流装置处理低C/N值污水[J]. 中国给水排水, 2010, 26(5): 12-15.

LIU Shujie, WANG Dandan, CHEN Fuming, *et al.* Treatment of low C/N ratio wastewater using reaction-precipitation integrated rectangular airlift loop reactor [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(5) : 12-15(in Chinese).

- [4] 熊建英. MBBR+磁混凝工艺用于污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 50-55.

XIONG Jianying. Application of MBBR + magnetic coagulation process for upgrading of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 50-55 (in Chinese).

- [5] 杨祝平. 多级AO+双层沉淀+磁混凝澄清工艺用于污水处理[J]. 中国给水排水, 2019, 35(8): 53-57.

YANG Zhuping. Application of step-feed AO + double layer precipitation+magnetic coagulation clarification process in municipal sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(8): 53-57 (in Chinese).

作者简介:彭冠平(1982-),男,湖北枝江人,硕士,高级工程师,注册环保工程师,主要从事水环境综合治理、市政污水处理工程设计与施工管理工作。

E-mail:45050597@qq.com

收稿日期:2021-03-04

修回日期:2021-05-30

(编辑:衣春敏)

开展河湖“清四乱”,打好河湖管理攻坚战