

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.12.020

## 反硝化生物滤池+高效气浮工艺用于准IV类提标改造

杨淇棕, 宋凤鸣, 古伟, 周滔, 王文明  
(湖南先导洋湖再生水有限公司, 湖南长沙 410208)

**摘要:** 采用反硝化生物滤池+高效气浮池作为新增深度处理工艺,对长沙市坪塘污水处理厂(一期)进行提标改造,将厂区出水水质由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B标准提高到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准IV类标准,工程设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ( $K_z=1.3$ ),深度处理占地仅约 $1\,800 \text{ m}^2$ 。调试及运行期间深度处理组合工艺出水水质均稳定优于准IV类标准,具有占地面积小、电耗和药耗可控等优点,可为环境敏感地区和需要高品质出水的污水厂提标改造工程,特别是用地比较紧张的同类工程提供借鉴。

**关键词:** 污水处理厂; 反硝化生物滤池; 高效气浮池; 提标改造

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)12-0125-05

### Application of Denitrifying Biofilter and High-efficiency Air Floatation in Upgrading of a WWTP for Quasi-IV Standard

YANG Qi-liang, SONG Feng-ming, GU Wei, ZHOU Tao, WANG Wen-ming  
(Hunan Pioneer Yanghu Reclaimed Water Co. Ltd., Changsha 410208, China)

**Abstract:** Denitrifying biofilter and high-efficiency air floatation tank are used as new advanced treatment processes to upgrade and transform the phase I project of Changsha Pingtang wastewater treatment plant (WWTP). The effluent quality of the WWTP is improved from first level B criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) to quasi-IV standard in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The design capacity of the project is  $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  ( $K_z=1.3$ ), and the footprint of advanced treatment is only about  $1\,800 \text{ m}^2$ . During commissioning and operation, the effluent of the combined advanced treatment process is stably superior to the quasi-IV standard. It has the advantages of small footprint, controllable power and chemical consumption, which can provide reference for the upgrading and reconstruction project of WWTPs in environmentally sensitive areas and requiring high-quality effluent, especially similar projects with tight land use.

**Key words:** wastewater treatment plant; denitrifying biofilter; high-efficiency air flotation tank; upgrading and reconstruction

随着经济和社会的发展,人们对水环境质量的关注和要求也越来越高。许多环境敏感区域已经颁布或正在酝酿较《城镇污水处理厂污染物排放标准》

(GB 18918—2002)更为严格的地方排放标准<sup>[1-2]</sup>。投运较早的污水厂普遍存在设施设备陈旧老化、脱氮除磷效果不佳、难以达到新排放标准的问题,提标

基金项目:长沙市科技计划项目(kh1902279)

改造工程常采用膜生物反应器(MBR)、反硝化深床滤池、高效沉淀池等工艺<sup>[3-5]</sup>。对于预留用地不足的项目,需要研究探讨具有节省占地、高效脱氮除磷等特点的污水深度处理路线。

### 1 项目概况

坪塘污水处理厂(一期)位于长沙市岳麓区洋湖大道以南、靳江河以东<sup>[6]</sup>,于2012年建成投运,工程设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  ( $K_z=1.3$ ),采用MSBR+人工湿地+紫外消毒的主体工艺,设计MSBR工艺段出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B标准,人工湿地净化后出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,尾水排入洋湖湿地公园作为景观水体补水。由于一级A标准出水TN仍有15 mg/L,TP为0.5 mg/L,可能导致接纳水体局部流动性较差区域在晴热少雨时出现富营养化现象。为进一步提高接纳水体水质,拟对一期工程进行提标改造以确保出水水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准IV类标准(其中 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$ ,  $\text{TP} \leq 0.3 \text{ mg/L}$ )。坪塘污水处理厂(一期)提标改造工程(以下简称一期提标改造工程)在原一期工程厂区范围内,工程规模仍为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  ( $K_z=1.3$ ),总投资约7 000万元,预留用地仅约1 800  $\text{m}^2$ 。提标改造内容包括预处理、MSBR池、紫外消毒池等池体土建改造和部分老旧设备更新重置,以及在预留用地新建深度处理组合池。

### 2 工程设计

#### 2.1 设计进、出水水质

一期工程原设计进、出水水质见表1。

表1 一期工程原设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of phase I project

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
设计进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	250	120	220	30	40	3.0
设计MSBR池出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤60	≤20	≤20	≤15	≤20	≤1.0
MSBR去除率/%	76	83	91	50	50	67
设计人工湿地出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤50	≤10	≤10	≤5	≤15	≤0.5
总去除率/%	80	92	95	83	63	83

整理2016年—2018年的运行数据,得出一期保证率为95%的进水水质:COD为191 mg/L, BOD<sub>5</sub>为111 mg/L, SS为241 mg/L, NH<sub>3</sub>-N为22.5 mg/L, TN为27 mg/L, TP为2.86 mg/L;一期保证率为95%的

出水水质:COD为19 mg/L, BOD<sub>5</sub>为1.7 mg/L, SS为5 mg/L, NH<sub>3</sub>-N为4 mg/L, TN为11.3 mg/L, TP为0.45 mg/L。根据上述结果,为确保一期提标后能满足准IV类水质,改造主要目标是降低出水TN、NH<sub>3</sub>-N、TP和SS。改造工程设计进、出水水质见表2。

表2 一期提标改造工程设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality of upgrading and reconstruction of phase I project

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
设计进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	250	120	220	30	40	3.0
深度处理设计进水(即改造后MSBR池出水)/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤30	≤6	≤20	≤1.5	≤13	≤1.0
深度处理设计出水(准IV类标准)/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤30	≤6	≤5	≤1.5	≤10	≤0.3
总去除率/%	88	95	97.7	95	75	90

#### 2.2 提标改造思路及工艺流程

一期原2组MSBR池的设计污泥负荷为0.071 kgBOD<sub>5</sub>/(kgMLSS·d),每组MSBR池容为13 558  $\text{m}^3$ ,总水力停留时间(HRT)为16.3 h,且好氧单元向缺氧单元的内回流比仅为150%。考虑到提标改造主要是更换好氧区的曝气设备及增加搅拌机,有利于降低出水NH<sub>3</sub>-N,但缺氧区停留时间较短且改造后未增加,不利于降低出水TN;且生化系统出水TP一般难以稳定控制在0.5 mg/L以下,因此提标改造还需在MSBR池后增加具有高效脱氮除磷功能的深度处理工艺。由于预留用地面积较小,经比较最终选择处理负荷相对较高的反硝化生物滤池+高效气浮池的深度处理组合工艺。提标改造后的一期工艺流程见图1。

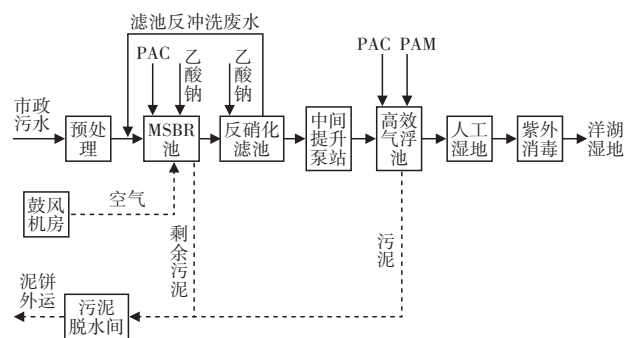


图1 一期提标改造后的工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process of phase I upgrading and reconstruction project

## 2.3 深度处理主要设计参数

### 2.3.1 反硝化生物滤池

采用上向流<sup>[7]</sup>反硝化生物滤池,设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , $K_z=1.3$ 。组合池体包括混合池、滤池主体、反冲洗水池、反冲洗废水池等。

#### ① 混合池

由于需在反硝化生物滤池进水中投加碳源,以满足反硝化菌碳源需求,因此设混合池1座。混合池停留时间为2 min,有效容积为 $85 \text{ m}^3$ 。混合池配置立式搅拌机1台, $N=7.5 \text{ kW}$ 。进水处设在线硝酸盐测量仪,通过测量进水中的硝酸盐浓度动态调节乙酸钠的投加量。混合池出水重力自流至后续反硝化生物滤池。

#### ② 反硝化生物滤池

与乙酸钠混合后的污水通过一条混凝土渠道被引至反硝化生物滤池,均匀分配至各生物滤池。反硝化生物滤池为1座4格,单格滤池面积为 $45.03 \text{ m}^2$ 。配置排污泵2台, $Q=20 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H_{\text{max}}=80 \text{ kPa}$ , $N=4 \text{ kW}$ ;滤板、滤料、各类阀门仪表4套。滤料粒径 $4.2\sim 5 \text{ mm}$ ,均匀系数 $<1.5$ ,密度 $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,滤层厚度约 $3 \text{ m}$ ,容积负荷为 $0.52\sim 0.67 \text{ kgNO}_3^-/\text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。正常运行时平均滤速为 $11.2 \text{ m}/\text{h}$ ,最大滤速为 $13.8 \text{ m}/\text{h}$ ,一格反洗时最大滤速为 $18.3 \text{ m}/\text{h}$ 。

#### ③ 反冲洗水池

生物滤池正常运行过程中,由于生物体繁殖与悬浮固体截留会逐渐堵塞滤床,需要定期对滤池进行反冲洗。设置反冲洗水池1座,有效容积为 $600 \text{ m}^3$ 。反冲洗采用气水联合冲洗方式。配置螺杆风机3台,2用1备,单台风机设计风量 $49 \text{ m}^3/\text{min}$ ,风压 $80 \text{ kPa}$ ,功率 $90 \text{ kW}$ ;水洗采用离心泵3台,2用1备, $Q=680 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=120 \text{ kPa}$ , $N=18.5 \text{ kW}$ 。反冲洗频率为 $1 \text{ 次}/(8\sim 16) \text{ h}$ ,反冲洗水洗强度为 $30 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、气洗强度为 $130 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

#### ④ 反冲洗废水池

生物滤池的反冲洗废水被送至反冲洗废水池(设计1座,有效池容 $630 \text{ m}^3$ )。反冲洗废水经潜水泵送至原一期预处理。配置反冲洗废水回流泵2台(1用1备), $Q=350 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=120 \text{ kPa}$ , $N=20 \text{ kW}$ 。

#### ⑤ 压缩空气系统

设压缩空气罐1台,空压机2台(1用1备), $Q=1.52 \text{ m}^3/\text{min}$ , $N=11 \text{ kW}$ ,另配吸附式干燥器、前过滤器、压缩空气管路等附件。

### 2.3.2 中间提升泵站及高效气浮池

中间提升泵站及高效气浮池为叠合池体,上层为高效气浮池,下层为中间提升泵站集水池。中间提升泵站设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,调节容积为 $550 \text{ m}^3$ ,停留时间为 $19.8 \text{ min}$ ,调节液位为 $2.27 \text{ m}$ 。配置潜污泵3台(2用1备), $Q=1240 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=55 \text{ kPa}$ , $N=55 \text{ kW}$ 。

高效气浮池集混凝、絮凝和气浮于一体<sup>[8-9]</sup>,反硝化生物滤池处理出水经加压提升后由管道引入高效气浮池。管道上设置管道混合器,用于在线混合气浮池进水与除磷剂PAC。设高效气浮池3座,单池气浮区面积为 $42 \text{ m}^2$ 。配置静态混合器3个,加压水释放喷头3套,链条式刮泥机3台, $N=0.75 \text{ kW}$ ;离心溶气泵4台,3用1备,单台 $Q=85 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=0.7 \text{ MPa}$ , $N=30 \text{ kW}$ 。浮泥排泥泵2台, $Q=20 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=0.2 \text{ MPa}$ , $N=5.5 \text{ kW}$ 。设计气浮区平均负荷为 $13.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,气浮区最大负荷为 $17.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,溶气水回流比为 $10\%$ 。出水总渠上安装1台在线SS测量仪用于监测出水SS浓度。

### 2.3.3 配套加药间

采用PAC作为除磷剂,投加点设在MSBR池内和气浮池混凝段;采用工业乙酸钠作为碳源,投加至MSBR池及反硝化生物滤池;絮凝剂采用PAM,设计投加点为气浮池絮凝区前。

配套设置机械隔膜泵、搅拌机、小型螺杆泵、制备系统、加药系统等。

## 3 深度处理运行效果及经济分析

一期提标改造工程深度处理部分完成设备安装、单机调试、设备联动调试后,启动工艺调试,通过两个多月的工艺调试,深度处理出水全部达到设计出水水质要求。为进一步验证深度处理系统的脱氮除磷效果及测算运行成本,从2021年5月13日起开始为期一周的性能测试,并对深度处理进出水进行检测。

在性能测试期间,一期提标工程进水量为 $46454\sim 61088 \text{ m}^3/\text{d}$ ,平均处理水量为 $54558 \text{ m}^3/\text{d}$ ,超过设计处理规模。改造后的MSBR池出水COD、TN、TP指标分别小于 $30$ 、 $10$ 、 $0.3 \text{ mg}/\text{L}$ ,除SS外,主要指标均已达到准IV类标准( $\text{TN} \leq 10 \text{ mg}/\text{L}$ )。再经深度处理后,出水SS小于 $5 \text{ mg}/\text{L}$ ;TP为 $0.06\sim 0.13 \text{ mg}/\text{L}$ ,平均值为 $0.10 \text{ mg}/\text{L}$ ;TN为 $3.57\sim 5.20 \text{ mg}/\text{L}$ ,

平均值为 4.30 mg/L; COD 为 5~12 mg/L, 平均值为 7.6 mg/L; 其余指标也都优于设计要求。深度处理段对 SS、TP、TN、COD 的平均去除率分别为 70.20%、38.80%、44.89%、55.46%。

测试过程中根据水量和水质动态调节药剂投加量, 其中 20% 乙酸钠液体平均使用量为 1.17 t/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 折合投加当量为 117 mg/L (液体); 10% 的 PAC 液体平均使用量为 0.41 t/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 折合投加当量为 41 mg/L (液体)。测试期间深度处理工艺平均电耗为 3 013 kW·h/d, 折合吨水电耗为 0.055 2 kW·h/m<sup>3</sup>。

深度处理段进出水 SS、TP、TN 和 COD 的浓度变化及去除率如图 2 所示。

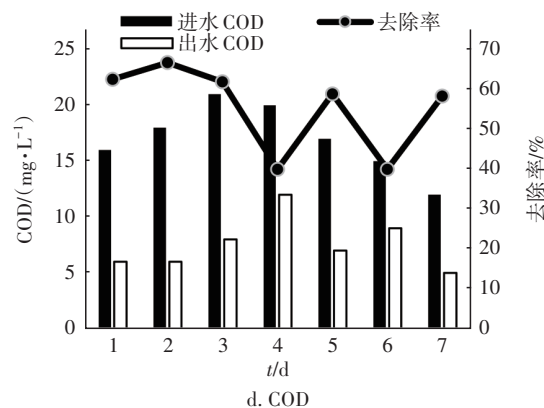
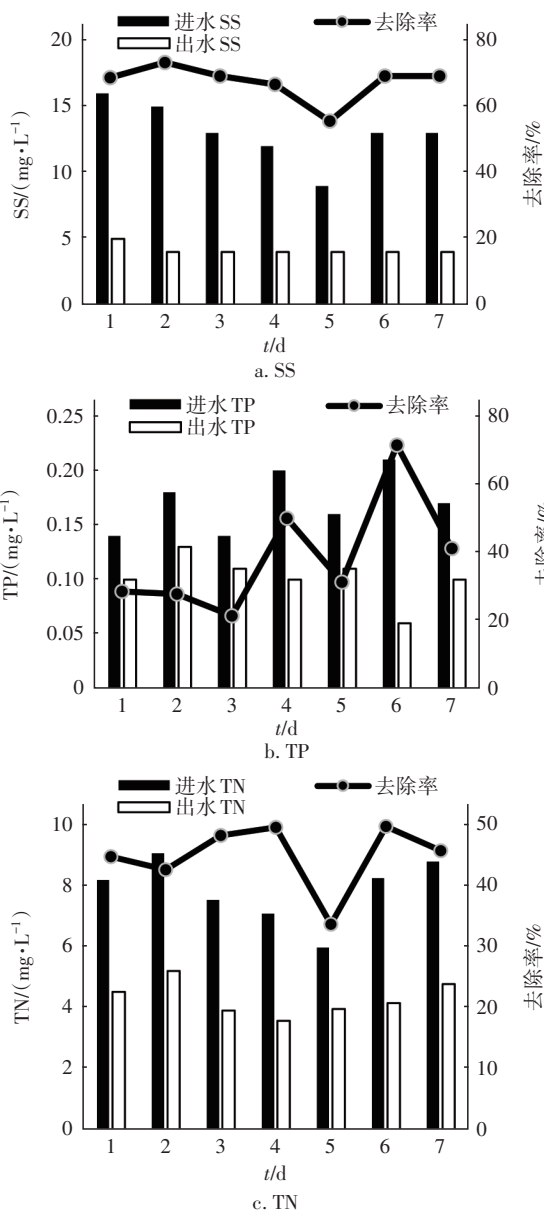


图 2 深度处理段进、出水数据及去除率

Fig.2 Influent and effluent data and removal rate of advanced treatment section

通过性能测试后, 深度处理系统开始试运行。至 2022 年 5 月近一年时间一期提标改造工程运行正常。整理运行数据发现, 2021 年 11 月—2022 年 1 月冬季低温期间的进水浓度相对较高, 进水 COD、BOD<sub>5</sub>、SS 和 TP 均高于设计进水水质; 冬季出水仍稳定达到准 IV 类标准, 具体进、出水水质及去除率见表 3。

表 3 一期提标改造工程冬季进、出水水质

Tab.3 Influent and effluent quality of phase I upgrading and reconstruction project during winter

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	257	140	384	15.7	24.9	4.16
出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	13	0.8	4	0.2	7.6	0.15
总去除率/%	95	99	99	99	69	96

冬季运行期间一期提标改造工程平均处理水量约 2.6×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d, 平均电耗约 0.29 kW·h/m<sup>3</sup>, 其中 20% 乙酸钠液体总用量为 340.4 t, 折合投加当量约 145 mg/L (液体); 10% 的 PAC 液体总用量为 31.3 t, 折合投加当量约 14 mg/L (液体)。

#### 4 结论

长沙市坪塘污水处理厂(一期)提标改造工程采用反硝化生物滤池+高效气浮池作为深度处理工艺, 将出水水质由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 B 标准提高到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准 IV 类标准。工程实践表明, 该组合工艺具有占地面积小、脱氮除磷效果好、电耗和药耗可控等优点, 可应用于我国环境敏感地区和需要高品质出水的污水处理厂提标改造工程。

## 参考文献:

- [1] 谢志成,冯鸣凤,乔婧,等. 天津城镇污水厂排放新标准对南港工业区的影响[J]. 中国给水排水, 2017, 33(14):40-42.  
XIE Zhicheng, FENG Mingfeng, QIAO Jing, *et al.* Influence of the new discharge standard of municipal wastewater treatment plant in Tianjin on drainage system in Nangang industrial park [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(14):40-42(in Chinese).
- [2] 张鹤清,朱帅,吴振军,等. 城镇污水处理厂“准IV类”标准提标改造技术简析[J]. 环境工程, 2019, 37(6):26-30,36.  
ZHANG Heqing, ZHU Shuai, WU Zhenjun, *et al.* Analysis of “quasi-category IV” standard upgrading and reconstruction technology for municipal wastewater treatment plant [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(6): 26-30,36(in Chinese).
- [3] 李采芳,杨丹,王志刚. A/O+高效沉淀+深床滤池用于污水处理厂提标扩建[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16):88-92.  
LI Caifang, YANG Dan, WANG Zhigang. Application of A/O, high efficiency sedimentation tank, denitrification deep-bed filter process in upgrading and expansion of WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 88-92(in Chinese).
- [4] 王春晖,邓磊,王春,等. AAO+MBR工艺用于污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 79-81.  
WANG Chunhui, DENG Lei, WANG Chun, *et al.* Application of AAO+MBR process in upgrading project of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 79-81(in Chinese).
- [5] 陈建平,毛云飞. 传统污水处理厂类IV类水提标改造工程实践[J]. 中国给水排水, 2017, 33(24):87-91.  
CHEN Jianping, MAO Yunfei. Renovation of traditional wastewater treatment plant for the effluent quality similar to the fourth class [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(24):87-91(in Chinese).
- [6] 励梁栋,朱强. 深床反硝化滤池+外压式超滤在城镇污水处理厂地表准IV类出水标准的应用实践研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(10): 118-122.  
LI Liangdong, ZHU Qiang. Application of deep-bed denitrification bio-filter and external pressure ultrafiltration in surface quasi IV effluent sewage treatment [J]. Environmental Science and Management, 2018, 43(10): 118-122(in Chinese).
- [7] 王文明,宋凤鸣,尹振文,等. MSBR+微絮凝过滤组合工艺在城市再生水厂的应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18):102-106.  
WANG Wenming, SONG Fengming, YIN Zhenwen, *et al.* Application of a combined process of MSBR and micro-flocculation filtration in urban reclaimed wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 102-106(in Chinese).
- [8] 范金祥. 污水生化处理过程关键技术研究及控制系统开发[D]. 天津:天津工业大学, 2020.  
FAN Jinxiang. Research on Key Technology of Sewage Biochemical Treatment Process and Development of Control System [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2020(in Chinese).
- [9] 李文强. 混凝气浮工艺在高标准、短工期背景下的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2021(6): 184-187.  
LI Wenqiang. Application of coagulation air flotation process under background of high standard and short construction period [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021(6):184-187(in Chinese).

作者简介:杨洪棕(1982- ),男,湖南衡阳人,大学本科,中级工程师,主要从事水污染防治有关工作。

E-mail:67323610@qq.com

收稿日期:2022-04-08

修回日期:2022-05-19

(编辑:衣春敏)