

工程实例

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.24.016

## 三级生物滤池工艺用于污水处理厂提标改造

杨 巍, 郑佳勇, 李 亮, 刘武平, 刘 波  
(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610218)

**摘 要:** 针对某污水处理厂项目投资受限和不能新增用地的特点, 尽量利用原构筑物进行改造, 一期工程采用中置硝化-两端反硝化脱氮三级生物滤池工艺, 二期工程采用A<sup>2</sup>/O生化池+高密度沉淀池+后置反硝化生物滤池工艺, 全厂一、二期工程在深度处理阶段汇合处理。改造后的现状生物滤池和新建的中置硝化-后置反硝化生物滤池综合单元在雨季浓度情况下满足 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的处理规模; 同时满足旱季高浓度进水水质时 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的处理能力。该项目改造后的单位生产总成本约2.26元/ $\text{m}^3$ , 单位经营成本约1.80元/ $\text{m}^3$ ; 处理出水效果较好, 出水COD<30 mg/L, BOD<sub>5</sub><6 mg/L, NH<sub>3</sub>-N<1.5 mg/L, SS<10 mg/L, TN<10 mg/L, TP<0.3 mg/L, 稳定达到《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)。

**关键词:** 中置硝化-两端反硝化脱氮; 三级生物滤池; 高密度沉淀池

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)24-0087-05

### Application of Three-stage Biofilter Process in Upgrading of a WWTP

YANG Wei, ZHENG Jia-yong, LI Liang, LIU Wu-ping, LIU Bo

(Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd. of China, Chengdu  
610218, China)

**Abstract:** According to the project characteristics of limited investment and no new land use, the original structures are used for transformation as much as possible. Three-stage biofilter with intermediate nitrification and denitrification at both ends process is adopted in phase I project, the A<sup>2</sup>/O biological tank, high-density sedimentation tank and post denitrification biofilter process is adopted in phase II project, and the effluents of both phase projects of the whole plant are treated together in the advanced treatment stage. After reconstruction, the primary biofilters and comprehensive units of intermediate nitrification and post denitrification biofilter meet the treatment capacity of 80 000 m<sup>3</sup>/d in rainy season. Besides, it can meet the treatment capacity of 60 000 m<sup>3</sup>/d for the water quality of high concentration influent in dry season. After transformation, the total unit production cost is about 2.26 yuan/m<sup>3</sup> and the unit operating cost is about 1.80 yuan/m<sup>3</sup>. The effluent treatment effect is good, and the effluent COD, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N, SS, TN, TP are less than 30 mg/L, 6 mg/L, 1.5 mg/L, 10 mg/L, 10 mg/L, and 0.3 mg/L, respectively, which reach the *Discharge Standard of Water Pollutants for Minjiang and Tuojiang River Basins in Sichuan Province* (DB 51/2311-2016).

**Key words:** intermediate nitrification and denitrification at both ends; three-stage biofilter; high-density sedimentation tank

## 1 工程背景

四川某污水处理厂分二期建设,一期工程于2005年投产,采用两级串联(各4格)曝气生物滤池处理工艺;2016年一期完成了提标改造,采用6格曝气生物滤池+2格反硝化生物滤池工艺。2012年二期工程投产,采用改良型氧化沟处理工艺,目前一、二期出水水质均执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

为控制和治理岷江、沱江流域水污染,改善流域水环境质量,四川省环保厅、质量技术监督局组织编制了《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016),自2017年1月1日起实施。该污水处理厂于2017年4月完成了第一版提标改造可行性研究报告,估算投资11 880.30万元。可研编制已过2年半,由于物价和人工费有较大涨幅,原投资已无法满足工程需要,同时工程边界条件发生变化(2017年以来污水处理厂实际进水水质部分指标浓度提高,不能新增用地)的情况下,需重新进行工艺方案设计。

## 2 现状处理效果

该污水处理厂主要处理城区生活污水,总设计规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。一期设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用初沉+6格曝气生物滤池+2格反硝化生物滤池+转盘滤池处理工艺;二期设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,主要采用改良型底曝氧化沟+转盘滤池处理工艺。出水水质执行一级A标准。

### ① 现状进水水质

鉴于该污水处理厂已运行多年,根据业主提供的2017年6月—2018年8月日报表数据,确定近年来不同保证概率下的进水指标(见表1)。

表1 污水处理厂不同保证概率下的进水指标

Tab.1 Inflow indexes under different assurance probability of wastewater treatment plant

概率/%	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	SS/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{NH}_3\text{-N}/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
85	186	134	38.8	2.90	49.0
90	199	151	40.6	3.02	53.0
95	247	162	43.3	3.25	59.0

根据收集到的水质资料分析,近年来该厂进水COD、TP、有机物、SS均有上升趋势,但总体变化幅度不大;各项指标在该时间段上的变化基本一致; $\text{NH}_3\text{-N}$ 和总氮有激增现象(即存在水质冲击负荷);

营养物的峰值变化相对较小。为了节约总投资和考虑污水基础设施建设的适当性,进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和总氮均按85%保证概率取值,其他指标按95%保证概率取值。

若继续采用原可研的设计进水水质,例如 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标设计保证概率只有45%左右,存在出水水质不达标的严重风险。

根据收集到的四川省周边类似地区城市污水处理厂提标改造项目的设计进水水质数据,近年来进水COD、 $\text{BOD}_5$ 、SS虽未达到原设计水质,但TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等指标已经有超过原设计水质的趋势。以成都市第六净水厂为例,设计进水部分指标如TN由40  $\text{mg/L}$ 提高到60  $\text{mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 由30  $\text{mg/L}$ 提高到50  $\text{mg/L}$ 、TP由4  $\text{mg/L}$ 提高到5  $\text{mg/L}$ ,其他指标在原有基础上保持不变。

### ② 设计进水水质

受该项目投资的限制,同时考虑现状水质的特点,最终分别确定旱季和雨季设计进水水质(见表2)。

表2 设计进水水质

Tab.2 Design influent quality  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	TN	SS	$\text{BOD}_5$
旱季设计进水水质	260	40	4	50	180	160
雨季设计进水水质	260	25	4	35	180	160

### ③ 污水处理规模

现状处理规模按照旱季设计进水水质和雨季设计进水水质确定,需达到雨季低浓度时 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的规模,旱季高浓度时允许降水量负荷运行,满足 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的规模。

## 3 提标改造方案设计

### 3.1 工艺流程

由于投资有限,且无法突破污水厂现状用地红线,因此进行了多方案技术经济比选。同时综合考虑了现状一期采用初沉+6格曝气生物滤池+2格反硝化生物滤池+转盘滤池处理工艺、二期采用改良型底曝氧化沟+转盘滤池处理工艺的情况,为了节约投资,不新增用地,尽量利用现有的工艺构筑物,一期最终采用中置硝化-两端反硝化脱氮三级生物滤池工艺,二期采用 $\text{A}^2/\text{O}$ 生化池+高密度沉淀池+后置反硝化生物滤池工艺作为主体处理工艺,具体如图1所示。

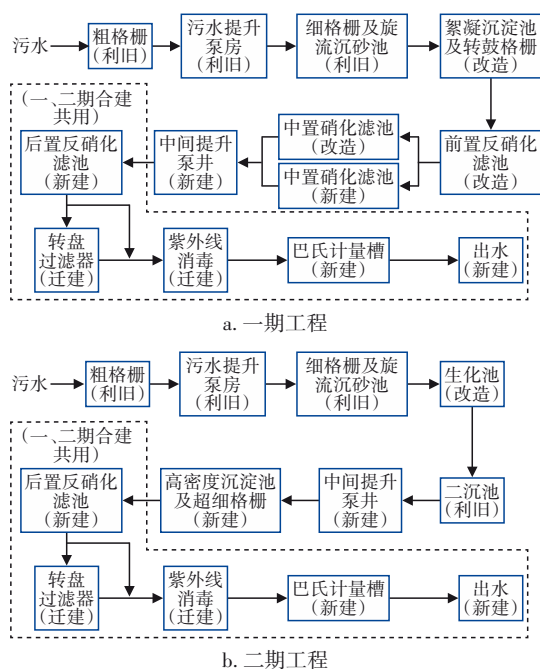


图1 改造后的工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process after reconstruction

该工艺具有投资较省、处理效果好、运行稳定可靠、操作管理较简单等特点<sup>[1]</sup>。

### 3.2 改造后厂区平面设计

本次改造和新增的构(建)筑物拟尽量在现状功能分区里布置,避免对周边环境产生不利影响。保留一期已建的预处理单元,对絮凝沉淀池进行改造,并拆除接触消毒池和污泥脱水机房,将新增的中置硝化滤池(曝气生物滤池)和后置反硝化滤池(三级生物滤池),即二、三级生物滤池综合单元建在此处。保留二期已建的预处理单元,新建中间提升泵井及高密度沉淀池,后置反硝化生物滤池与一期共建;对已建生化池进行改造,提高处理能力和出水标准;继续使用二沉池,拆除转盘滤池、紫外线消毒渠和出水在线监测房,在一期粗格栅及提升泵房的东侧新建紫外线消毒渠和出水在线监测房,对二期的污泥脱水机房进行改造。

### 3.3 主要构筑物及设计参数

#### 3.3.1 一期工程

##### ① 絮凝沉淀池改造

絮凝沉淀池设计规模  $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 1座分两组。沉淀池平面尺寸不做改动,单格现状尺寸  $18.0 \text{ m} \times 11.6 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$  (水深),改造后单格絮凝室尺寸  $6.2 \text{ m} \times 6.7 \text{ m}$ ,絮凝区最大水深  $4.45 \text{ m}$ ,反应时间为  $9.5$

min。混合室尺寸  $4.4 \text{ m} \times 4.6 \text{ m}$ ,混合区最大水深  $4.5 \text{ m}$ ,反应时间  $4.7 \text{ min}$ 。在沉淀区最大流量情况下,表面水力负荷为  $11.17 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,平均流量时表面水力负荷为  $8.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

##### ② 原生物滤池改造

对现状6格曝气生物滤池+2格反硝化生物滤池进行内部改造。改造后,前置反硝化生物滤池处理规模维持在  $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,总变化系数  $1.32$ ;中置硝化生物滤池处理规模为  $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,总变化系数  $1.32$ 。在雨季设计进水水质浓度情况下,反硝化负荷为  $0.71 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,有机负荷为  $1.10 \text{ kgBOD}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,硝化负荷为  $0.39 \text{ kgNH}_3 - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。中置硝化生物滤池陶粒滤料粒径为  $4 \sim 6 \text{ mm}$ ,层高  $3.7 \text{ m}$ ;前置反硝化生物滤池陶粒滤料粒径为  $6 \sim 9 \text{ mm}$ ,层高  $4 \text{ m}$ 。反冲洗周期不超过  $48 \text{ h}$ ,先单独气洗,历时  $5 \sim 10 \text{ min}$ ,气洗强度  $75 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;再气水反冲洗,历时  $10 \text{ min}$ ,气洗强度  $75 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,水洗强度  $18 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;最后水漂洗,历时  $10 \text{ min}$ ,水洗强度  $18 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

##### ③ 新建二、三级生物滤池综合单元

新建  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  规模中置硝化生物滤池和  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  规模后置反硝化生物滤池(一期、二期合建),含中置硝化生物滤池、后置反硝化生物滤池、反冲洗综合用房、反冲洗清水池、反冲洗废水池、1~2#中间提升及回流泵井、混合池。在雨季设计进水水质浓度情况下,有机负荷为  $1.10 \text{ kgBOD}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,反硝化负荷为  $1.08 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,硝化负荷  $0.39 \text{ kgNH}_3 - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。中置硝化生物滤池陶粒滤料粒径为  $4 \sim 6 \text{ mm}$ ,层高  $3.7 \text{ m}$ ;后置反硝化生物滤池陶粒滤料粒径为  $4 \sim 6 \text{ mm}$ ,层高  $2.74 \text{ m}$ 。反冲洗周期不超过  $48 \text{ h}$ ,先单独气洗:历时  $5 \sim 10 \text{ min}$ ,气洗强度  $75 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;再气水反冲洗:历时  $10 \text{ min}$ ,气洗强度  $75 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,水洗强度  $18 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;最后水漂洗:历时  $10 \text{ min}$ ,水洗强度  $18 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

##### ④ 反冲洗废水池

反冲洗废水池收纳新建  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  中置硝化生物滤池和  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  后置反硝化生物滤池的反冲洗废水。中置硝化生物滤池降水位水量  $88.97 \text{ m}^3$ ,反冲洗水量  $544 \text{ m}^3$ ,一次反冲洗废水量为  $632.97 \text{ m}^3$ 。后置反硝化生物滤池降水位水量  $83.5 \text{ m}^3$ ,反冲洗水量  $560.4 \text{ m}^3$ ,一次反冲洗废水量  $643.9 \text{ m}^3$ 。故反冲洗废水池尺寸为  $17.6 \text{ m} \times 7.2 \text{ m} \times 7.8 \text{ m}$ ,有效水深

4.6 m。

### 3.3.2 二期工程

#### ① 新建高密度沉淀池及超细格栅单元

设计规模 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,变化系数1.32;峰值流量时,混合时间2.3 min,絮凝时间11.3 min,沉淀区水力负荷 $14.11 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;平均流量时,沉淀区水力负荷 $10.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。配置栅孔为2 mm的超细格栅2套。

#### ② 新建后置反硝化生物滤池与一期合建。

### 3.4 按旱季高浓度核算设计进水水质

旱季高浓度进水水质时,按处理能力为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 进行核算。

#### ① 一期原生物滤池改造

将原生物滤池改造为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 前置反硝化生物滤池和 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 中置硝化生物滤池,前置反硝化滤池回流比80%,反洗总回流量 $280 \text{ m}^3/\text{h}$ ,最大水力负荷为 $10.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (含回流),最大强制滤速为 $13.6 \text{ m/h}$ (含回流)。中置硝化生物滤池回流比80%,反洗总回流量 $280 \text{ m}^3/\text{h}$ ,最大水力负荷为 $5.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (含回流),最大强制滤速为 $7.4 \text{ m/h}$ (含回流)。

#### ② 一期新建中置硝化生物滤池

新建 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 中置曝气生物滤池,回流比80%,反洗总回流量 $280 \text{ m}^3/\text{h}$ ,最大水力负荷 $4.9 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (含回流),最大强制滤速 $6.6 \text{ m/h}$ (含回流),有机负荷 $0.65 \text{ kgBOD}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,

#### ③ 一期、二期合建后置反硝化生物滤池

主要功能:新建 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模后置反硝化生物滤池(一期、二期合建),最大水力负荷为 $11.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;最大强制滤速为 $13.2 \text{ m/h}$ ,反硝化负荷为 $0.48 \text{ kgNO}_3^-/\text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

#### ④ 二期生化池

二期生化池按 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 进行核算,水力停留时间:选择区0.89 h,厌氧区2.13 h,缺氧区3.93 h,好氧区10.52 h,总停留时间17.47 h。污泥负荷 $0.06 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ;脱氮速率 $0.034 \text{ kgNO}_3^-/\text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ( $15^\circ\text{C}$ );污泥龄20 d;二沉池平均水力负荷为 $0.66 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;内回流比134%~268%,外回流比50%~100%。

经过计算,生化池出水氨氮可以达到小于 $1.5 \text{ mg/L}$ 标准,总氮达到 $15 \sim 20 \text{ mg/L}$ ,生化池出水需要

经过进一步深度处理去除总氮、总磷、SS,保证达标排放。

经过核算,二期生化池、前置反硝化、中置硝化和后置反硝化生物滤池的设计负荷能满足旱季高浓度进水水质时 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 处理能力的需要。

### 4 不停水施工方案

由于该项目必须保证不停产施工,设计前需预判可能出现的问题,并且需要不断地应对施工中随时发生的状况,及时修正。因此,建议分成以下4个阶段实施,保障施工期间不停水。

#### ① 第一阶段

首先新建尾水综合处理池、出水仪表间和二期中提升泵井、高密度沉淀池及超细格栅单元;同时新建一根从一期中置硝化生物滤池出水至转盘滤池的临时管道。在此期间,可保证一期和二期工程的正常运行。

#### ② 第二阶段

进行二期生化池、污泥脱水间和其他设备的改造,新建原二期转盘滤池进水管至二期中提升泵井的管道和2#加药间。同时完成一、二期全厂除臭管道和除臭装置的新建。在此期间,二期停产,一期维持正常运行。

#### ③ 第三阶段

拆除一期污泥脱水间、一期深度处理系统(含转盘滤池、紫外线消毒渠、巴氏计量槽、出水井)和出水在线监测房;然后在此处新建二、三级生物滤池综合单元。同时新建二期超细格栅出水至二、三级生物滤池综合单元的管道;一期中置硝化生物滤池出水至二、三级生物滤池综合单元的管道。

#### ④ 第四阶段

进行一期絮凝沉淀池、现状生物滤池和其他设备的改造,同时新建1#中提升泵井至一期超细格栅的管道和配电间。在此期间,一期停产,二期维持正常运行。

### 5 改造效果及工程投资

根据业主提供的2020年12月—2022年4月进、出水水质监测数据(见表3),提标改造后对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和SS的处理效果很明显,主要原因是采用的中置硝化—两端反硝化脱氮三级生物滤池工艺具有强制曝气、高SS截留率的特点,主要通过物理过滤、网捕吸附和生物代谢实现对废水的净化,有利于对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和SS的去除。

表3 改造后进、出水各项指标  
Tab.3 Influent and effluent indexes after reconstruction  
mg·L<sup>-1</sup>

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	SS	TP	TN
进水水质	108~318	51.3~113	18.7~38.7	68~147	1.23~3.11	21.2~42.2
进水均值	168	86.2	28.7	117.5	2.5	32.5
出水水质	8~25	3.5~4.1	0.1~0.59	1~3	0.03~0.14	2.4~9.2
出水均值	21.0	4.0	0.35	2.0	0.10	6.8
排放标准	30	6	1.5(3)	10	0.3	10
注: 对COD、BOD <sub>5</sub> 、NH <sub>3</sub> -N、SS、TP、TN的去除率分别为92.6%、93.1%、99.1%、97.0%、94.5%、83.6%。						

该提标改造工程总投资约 13 046.34 万元,第一部分工程费用约 10 441.8 万元,单位处理投资约 1 305.2 元/m<sup>3</sup>,单位生产总成本约 2.26 元/m<sup>3</sup>,单位经营成本约 1.80 元/m<sup>3</sup>。

6 结论

该污水厂是四川省内首个同时采用中置硝化-两端反硝化脱氮三级生物滤池工艺和 A<sup>2</sup>/O 生化池+高密度沉淀池+后置反硝化生物滤池两种工艺进行提标升级改造的项目。设计进水水质按旱季和雨季考虑,处理水量也分旱季和雨季规模,占地面积仅为 0.510 4 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>)。

采用中置硝化-两端反硝化脱氮三级生物滤池和 A<sup>2</sup>/O 生化池+高密度沉淀池+后置反硝化生物滤池组合工艺处理城市生活污水,整个系统对 TN 的去除率达到 83.6%,在外加碳源的情况下,中置硝化-两端反硝化脱氮三级生物滤池可确保 TN<10 mg/L。

目前该厂碳源费用为 0.279 元/m<sup>3</sup>,PAC 费用为 0.061 元/m<sup>3</sup>,PAM 费用为 0.031 元/m<sup>3</sup>。药剂使用量基本控制在合理范围内,仅碳源成本较高,建议优化调整预处理对 COD 的去除率,同时也可以选用不同种类的碳源进行对比试验,根据实际运行情况挑选出性价比更高的碳源,在保证利用效率的同时达到降低运行成本的目的。

由于中置硝化-两端反硝化脱氮三级生物滤池工艺的提升泵、曝气风机等均为 24 h 连续运行,全厂共有 18 格滤池,反洗设备也基本满负荷投入使用,因此目前该污水处理厂运行电耗为 0.41 kW·h/m<sup>3</sup>,略高于其他工艺。

参考文献:

[1] 张小玲,李强,王靖楠,等.曝气生物滤池技术研究进展及其工艺改良[J].化工进展,2015(7):2023-2030.  
ZHANG Xiaoling, LI Qiang, WANG Jingnan, et al. Research progress-process improvement of biological aerated filter: a review [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015 (7) : 2023-2030 (in Chinese).

作者简介:杨巍(1983-),女,四川崇州人,硕士,高级工程师,注册公用设备工程师(给水排水),主要从事给水排水处理技术全过程咨询设计工作。

E-mail:181355225@qq.com

收稿日期:2021-08-19

修回日期:2021-12-03

(编辑:衣春敏)

环境就是民生,青山就是美丽,蓝天也是幸福