

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.22.011

# 改良 $A^2O$ + 深度处理工艺用于污水厂类Ⅳ类标准提标

李士松, 朱春风, 温汝青, 危斌

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

**摘要:** 河北某污水处理厂提标改造工程的设计规模维持  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  不变。在充分利用原有建(构)筑物及设施的情况下,改造原有 CWSBR(恒水位 SBR 工艺)生物池为改良  $A^2/O$  工艺,并设置脱气区、后缺氧区和后好氧区,强化生物脱氮除磷功能;新建初沉发酵池,在去除 SS 中无机组分的同时,改善碳源质量,充分利用内碳源;增加高效沉淀池+深床滤池+高级氧化池深度处理工艺,强化对二级生物处理出水中 SS、TP、TN、有机物和色度的去除,使该污水处理厂出水标准由一级 A 标准提高至地表Ⅳ类水体标准( $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$ )。

**关键词:** 提标改造; 改良  $A^2/O$ ; 初沉发酵池; 高效沉淀池; 深床滤池

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)22-0063-05

## Application of Modified $A^2O$ and Advanced Treatment Process in a Wastewater Treatment Plant Upgraded to Quasi-Ⅳ Surface Water Standards

LI Shi-song, ZHU Chun-feng, WEN Ru-qing, WEI Bin

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The design scale of a wastewater treatment plant upgrading project in Hebei Province remains  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . In full use of the original structures and equipment, the original CWSBR (constant water level SBR) process was transformed into modified  $A^2/O$  process, and the degassing zone, post-anoxic zone and post-aerobic zone were set up to enhance the biological nitrogen and phosphorus removal. In addition to removing inorganic components in the SS, the quality of the carbon source was improved and the internal carbon source was fully utilized in the newly-built primary sedimentation/fermentation tank. The advanced treatment process of high efficiency sedimentation tank, deep bed filter and advanced oxidation tank was added to enhance the removal of SS, TP, TN, organic matter and chroma in the secondary biological treatment effluent, so that the discharge standard of the wastewater treatment plant was upgraded from the first level A standard to the surface water class Ⅳ standard ( $\text{TN}$  is less than  $15 \text{ mg/L}$ ).

**Key words:** upgrading and reconstruction; modified  $A^2/O$  process; primary sedimentation/fermentation tank; high efficiency sedimentation tank; deep bed filter

目前,为保障城市受纳水体的水环境质量、加强源头管控,已有许多地区发布了严于国家排放标准的水污染物排放标准。河北省于 2018 年 8 月 29 日发布了《大清河流域水污染物排放标准》(DB

13/2795—2018)、《子牙河流域水污染物排放标准》(DB 13/2796—2018)及《黑龙港及运东流域水污染物排放标准》(DB 13/2797—2018)3 个地方标准,并于 2018 年 10 月 1 日起正式实施。河北省某污水处

理厂位于子牙河流域重点控制区,按当地政府水污染防治工作要求,出水在执行河北省地方标准的同时,要确保排污口水质达到地表水Ⅳ类水体标准( $TN \leq 15 \text{ mg/L}$ )。

## 1 工程背景

该污水厂于 2010 年竣工并投入运行,设计处理能力为  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  (其中预处理系统土建规模为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,除提升泵按  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  安装外,其余设备按  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  安装),采用 CWSBR (恒水位 SBR) 处理工艺。现状污水厂设备老化、运行不稳定,必须通过厂内提标改造来保证排污口主要水质指标达到地表水Ⅳ类标准( $TN \leq 15 \text{ mg/L}$ )。

## 2 污水处理厂现状及分析

### 2.1 现有工艺流程

污水处理厂原采用 CWSBR 工艺,共 4 组。每组 CWSBR 反应池包括进水控制区,混合、反应、沉淀区,出水平衡区,三个区域由两个柔性可移动水力帆分隔。原工艺流程见图 1。

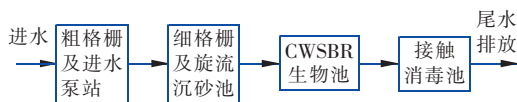


图 1 提标改造前工艺流程

Fig. 1 Process flow chart before upgrading and reconstruction

### 2.2 现状运行情况

该污水处理厂的原设计进、出水水质及实际进、出水水质见表 1。可见,实际进水中  $TN$ 、 $NH_3 - N$ 、 $BOD_5$  三项与原设计值偏差较大,水质明显恶化。污水处理厂的进水水质波动较大,导致出水水质也不稳定。由于污泥附着在水力帆上,导致运行一段时间后水力帆无法按设定程序进行往复运动,生物池调节能力严重下降,即使投加外部碳源,出水水质也得不到保障。

表 1 原设计及实际进、出水水质

Tab. 1 Original design and actual influent and effluent quality of the WWTP

项 目	COD	$BOD_5$	SS	TN	$NH_3 - N$	TP
原设计进水	410	210	220	40	30	4
原设计出水	50	10	10	15	5(8)	0.5
实际 85% 概率进水	403	108	204	69	44.8	3.99
实际平均进水	224	63	150	49	29.3	3.01
实际 85% 概率出水	49.2	9.7	8.4	14.8	2.1	0.44

该污水处理厂所在区域属于子牙河流域重点控

制区,应执行《子牙河流域水污染物排放标准》(DB 13/2796—2018)的排放限值,即“准Ⅴ类标准”。而按当地政府水污染防治工作要求,应通过污水处理厂提标改造等措施,进一步降低污染负荷,确保排污口水质达到地表水Ⅳ类水体标准( $TN \leq 15 \text{ mg/L}$ )。而该区域已没有充足的土地采用湿地等其他处理措施,必须通过厂内改造实现出水达标。出水标准对比见表 2。

表 2 出水标准对比

Tab. 2 Comparison of effluent quality standards

项 目	COD	$BOD_5$	SS	TN	$NH_3 - N$	TP
一级 A 标准	50	10	10	15	5(8)	0.5
DB 13/2796—2018 重点控制区排放限值	40	10	10	15	2.0(3.5)	0.4
地表水Ⅳ类标准 ( $TN \leq 15 \text{ mg/L}$ )	30	6	5	15	1.5(3.0)	0.3
注: 括号内数值为水温 $< 12^\circ\text{C}$ 时的控制指标。						

本次提标改造设计进水水质参考累计频率为 85% 的实际进水数据,同时适当留有余量,具体数据见表 3。

表 3 提标改造工程设计进、出水水质

Tab. 3 Design influent and effluent quality of upgrading and reconstruction project

项目	COD	$BOD_5$	SS	TN	$NH_3 - N$	TP
进水	410	110	220	70	45	4
出水	30	6	5	15	1.5(3.0)	0.3

根据实际运行情况,污水处理厂达到一级 A 标准都需要运营人员付出大量精力精确运行。在缺少深度处理工艺的前提下,无法保证 TP、SS 等指标稳定达到新的出水标准要求。

### 2.3 污水处理厂现状占地及新征地

该污水处理厂现状厂区非常紧凑,北侧为综合楼,工艺处理及附属建(构)筑物位于厂区东南侧。除综合楼两侧绿地外,仅有厂区西侧宽度为 30 ~ 45 m 的不规则条状空地可用于建设新建构筑物。本次改造工程需要完善和新建的建(构)筑物较多,且需保证改造期间不能停水,为保证出水达标,根据规划及周边现状,新增占地面积  $1.75 \text{ hm}^2$ 。

## 3 提标改造思路

### ① 预处理系统

现有预处理系统土建满足使用要求,但设备老化较为严重。改造期间不能停水,且新征占地面积

受限,综合考虑后确定利用原预处理系统,仅更换设备。

进水 $SS/BOD_5$ 比值为2,表明进水无机悬浮固体组分含量偏高,因此有必要设置初沉池强化进水无机悬浮固体的去除,以提高生物处理系统的运行效能和稳定性。而进水 $BOD_5/TN$ 比值为1.57,表明进水碳氮比偏低,因此初沉池的设置还应尽可能保留进水中的碳源。本工程设置初沉发酵池,停留时间短,在节省占地的同时可避免水力停留时间长导致的碳源过度损失,还可将部分慢速生物降解有机物变为易生物降解有机物,改善碳源质量<sup>[1]</sup>。

## ② 二级处理系统

本工程需要强化对 $COD$ 和 $BOD_5$ 的去除,应选用抗冲击负荷能力强、有利于去除难生物降解有机物的长泥龄延时曝气的生化处理工艺<sup>[2]</sup>。现状CWSBR工艺对有机物、氮、磷、 $SS$ 去除效果均一般,且未充分利用池容,运行存在问题。需要改造现状CWSBR生物池,并新建二沉池。

经计算,现状生物池池容满足需求,生物池便于改造,且分格改造可实现改造期间不停水,最终确定将原生物池改造为改良 $A^2O$ 除磷脱氮工艺。

考虑到未来出水 $TN$ 提标的可能性,在充分利用生物池池容的同时,于生物池内设置后缺氧区和后好氧区,形成“回流污泥反硝化改良Bardenpho工

艺”,在后缺氧段利用内源代谢物质或外加碳源进一步进行反硝化,强化生物池脱氮能力<sup>[3]</sup>。为降低好氧区末端 $DO$ 对缺氧区的影响,提高反硝化速率,在好氧区末端设置一个非曝气区(即脱气区)。

## ③ 深度处理系统

要使出水 $TP$ 降到 $0.3\text{ mg/L}$ 以下,单纯依靠生物除磷是比较困难的,因此必须增加化学除磷<sup>[4]</sup>。现状污水处理厂为保证出水 $TP \leq 0.5\text{ mg/L}$ ,已采取在生物池内投加大量除磷剂等措施。经综合比较,本工程选用高效沉淀池工艺,该工艺占地面积小、处理效率高。

本工程要求出水 $SS \leq 5\text{ mg/L}$ ,故采用应用成熟、处理效果好的高效沉淀池+深床滤池组合工艺,对 $SS$ 和 $TP$ 具有较好的去除效果<sup>[5]</sup>。

改造前生物池出水 $COD$ 长期稳定在 $50\text{ mg/L}$ 左右,通过高效沉淀池+深床滤池组合工艺,在去除 $SS$ 的过程中可去除部分悬浮性 $COD$ ( $10\text{ mg/L}$ 左右),剩余 $COD$ 多为不可生物降解溶解性 $COD$ 。为使 $COD$ 稳定达标( $\leq 30\text{ mg/L}$ ),必须采用高级氧化工艺。本工程进水以生活污水为主,因此选用技术成熟、应用相对广泛的臭氧高级氧化工艺。

## 4 提标改造工程工艺设计

### 4.1 工艺流程

本次提标改造工程设计工艺流程如图2所示。

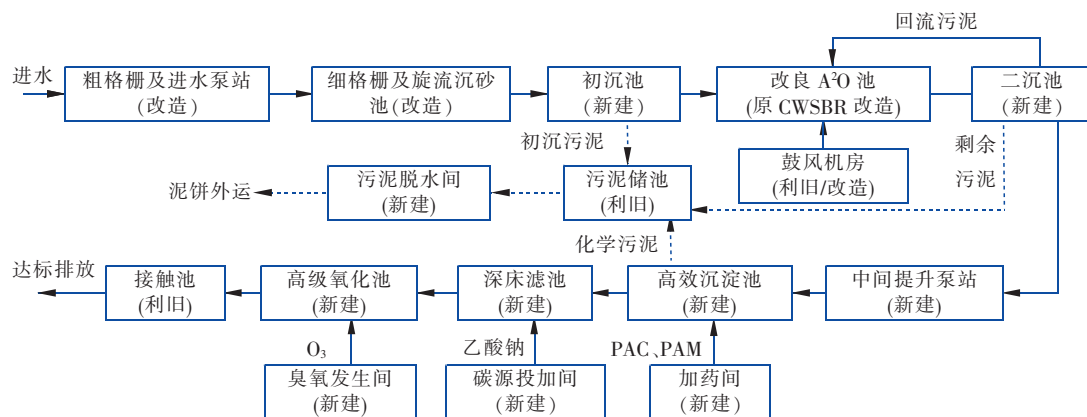


图2 提标改造工艺流程

Fig.2 Process flow chart of upgrading and reconstruction

### 4.2 主要构筑物设计参数

#### ① 粗格栅及进水泵站改造

现状粗格栅间及进水泵站可满足工程要求,建(构)筑物利旧,更换2台回转式格栅除污机,格栅宽度为 $1\,200\text{ mm}$ ,格栅间隙为 $20\text{ mm}$ , $N=2.2\text{ kW}$ 。

#### ② 细格栅及沉砂池改造

对细格栅及沉砂池进行改造,更换2台回转式格栅除污机,格栅宽度为 $2\,000\text{ mm}$ ,间隙为 $3\text{ mm}$ , $N=2.2\text{ kW}$ ;更换立式叶轮搅拌器2套,直径 $1.5\text{ m}$ ,功率 $1.5\text{ kW}$ ;更换空气提升系统2套, $Q=2.50$

$\text{m}^3/\text{min}$ ,  $P = 60 \text{ kPa}$ ; 更换砂水分离器 1 套, 功率  $0.75 \text{ kW}$ 。

### ③ 初沉发酵池

新建辐流式初沉发酵池 2 座, 单池直径为  $25 \text{ m}$ , 中央进水, 周边出水。在两座初沉发酵池之间设一座配水井、一座污泥泵房。初沉发酵池峰值水量时表面水力负荷为  $3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 有效水深  $4.0 \text{ m}$ , 沉淀时间  $1.19 \text{ h}$ , 出口堰负荷为  $2.78 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。采用半桥式中心传动刮泥机, 直径  $20 \text{ m}$ , 功率  $4.0 \text{ kW}$ 。沿池壁安装 4 台低转速潜水推流器, 直径  $1.8 \text{ m}$ , 功率  $2.2 \text{ kW}$ , 使池内形成较厚的悬浮污泥层, 在强化无机颗粒的同时, 可促进污泥厌氧发酵, 提高生物池进水  $C/N$  值, 并改善碳源质量。

### ④ 生物池改造

在原 CWSBR 生物池内增加混凝土导流墙、内回流渠道、外回流污泥管, 将 CWSBR 生物池改造为改良式  $A^2/O$  生物池, 同时设置后缺氧区和后好氧区, 在好氧区末端设置一个非曝气区 (即脱气区), 降低好氧区末端  $DO$  对缺氧区的影响, 提高反硝化速率。

现状 CWSBR 生物池总容积  $62\,200 \text{ m}^3$ , 改造后改良式  $A^2/O$  生物池总停留时间为  $21.66 \text{ h}$ , 其中预缺氧池  $1.17 \text{ h}$ 、厌氧池  $1.17 \text{ h}$ 、缺氧池  $7.3 \text{ h}$ 、好氧池  $10.8 \text{ h}$  (含脱气区  $0.5 \text{ h}$ )、后缺氧池  $0.8 \text{ h}$ 、后好氧池  $0.42 \text{ h}$ 。设计污泥浓度  $3\,500 \text{ mg/L}$ , 最大污泥回流比为  $100\%$ , 最大混合液回流比为  $300\%$ , 泥龄为  $16 \text{ d}$ , 污泥负荷为  $0.069 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ , 产泥率为  $0.79 \text{ kgDS/kgBOD}_5$ , 剩余污泥量 (绝干) 为  $11.7 \text{ t/d}$ 。曝气系统总曝气量  $21\,200 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $20^\circ\text{C}$ ), 已有鼓风机满足使用要求, 利用原有风机。生物池内利用原有空气主管为每格生物池单独布气, 增设空气支管, 布置刚玉曝气头  $10\,500$  个。脱气区设 10 台混合液回流泵,  $Q = 800 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H = 10 \text{ kPa}$ , 其中 2 台冷备。厌氧区、缺氧区、脱气区设 16 套潜水推进器,  $D = 1\,800 \text{ mm}$ ,  $N = 5.5 \text{ kW}$ ; 24 套潜水搅拌机,  $D = 380 \text{ mm}$ ,  $N = 7.5 \text{ kW}$ 。

### ⑤ 二沉池及回流污泥泵房

新建辐流式二沉池 2 座, 周边进水周边出水, 单池直径为  $38 \text{ m}$ 。采用中心驱动的单管吸泥机。表面负荷为  $1.27 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ; 沉淀时间为  $4.9 \text{ h}$ ; 有效水深为  $4.5 \text{ m}$ 。回流污泥泵按回流比  $100\%$  配备, 4 台 (3 用 1 备),  $Q = 700 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H = 50 \text{ kPa}$ 。

### ⑥ 中间提升泵站

新建中间提升泵站 1 座, 平面尺寸为  $10.85 \text{ m} \times 9.7 \text{ m}$ , 有效水深  $3 \text{ m}$ 。采用潜水泵, 共设 4 台 (3 用 1 备),  $Q = 960 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H = 110 \text{ kPa}$ 。

### ⑦ 高效沉淀池

新建高效沉淀池 1 座, 分为 2 组, 每组包括混合池、絮凝池、沉淀池, 停留时间分别为  $145 \text{ s}$ 、 $16 \text{ min}$ 、 $100 \text{ min}$ 。混合池设 4 台搅拌器,  $N = 5.5 \text{ kW}$ ; 絮凝池设 2 台搅拌器,  $N = 7.5 \text{ kW}$ ; 悬挂式中心驱动刮泥机  $\varnothing 16 \text{ m}$ ,  $N = 0.75 \text{ kW}$ 。回流污泥泵 4 台 (2 用 2 备),  $Q = 50 \sim 100 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H = 200 \text{ kPa}$ ; 剩余污泥泵 2 台,  $Q = 50 \sim 100 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H = 200 \text{ kPa}$ 。采用乙丙共聚蜂窝斜管, 长度  $1 \text{ m}$ , 安装角度  $60^\circ$ 。PAC 最大投加量为  $30 \text{ mg/L}$ , PAM 最大投加量为  $1 \text{ mg/L}$ 。高效沉淀池内设 PAC 投加泵 4 台 (3 用 1 备),  $Q = 200 \text{ L/h}$ ,  $H = 300 \text{ kPa}$ ; PAM 投加泵 3 台 (2 用 1 备),  $Q = 500 \sim 1\,000 \text{ L/h}$ ,  $H = 200 \text{ kPa}$ 。

### ⑧ 深床滤池及反冲洗机房

新建 1 座反硝化深床滤池, 平面尺寸为  $34.89 \text{ m} \times 30.2 \text{ m}$ 。设 5 格, 单排布置, 每格设有独立的进水闸门、出水阀门, 运行时可根据流量调整深床滤池的实际运行池数。

深床滤池设置有混合池、滤池、废水调节池、清水池以及反冲洗机房等。滤池设计滤速为  $6.54 \text{ m/h}$ , 强制滤速为  $7.85 \text{ m/h}$ , 气洗强度为  $110 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 水洗强度为  $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 反冲洗周期  $24 \text{ h}$ 。滤池内设砾石承托层,  $d = 3 \sim 38 \text{ mm}$ ,  $h = 450 \text{ mm}$ ; 石英砂滤料层, 有效粒径  $1.7 \sim 3.35 \text{ mm}$ ,  $K = 1.35$ ,  $h = 2\,440 \text{ mm}$ 。深床滤池乙酸钠 ( $20\%$ ) 最大投加量为  $1\,000 \text{ L/h}$ 。

### ⑨ 高级氧化接触池

新建高级氧化接触池 1 座。分 2 个系列, 每个系列可以单独运行。臭氧最大投加量为  $15 \text{ mg/L}$ , 氧化接触池停留时间  $60 \text{ min}$ 。

### ⑩ 臭氧发生器间及变配电间

新建臭氧发生器间及变配电间 1 座, 平面尺寸为  $22.9 \text{ m} \times 19.4 \text{ m}$ 。设臭氧发生器 3 台,  $20 \text{ kg/h}$ , 采用液氧源。臭氧发生器间外设液氧站, 平面尺寸为  $14 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 。

### ⑪ 碳源投加间

新建碳源投加间 1 座。生物池乙酸钠投加泵共 5 台, 大小泵搭配, 其中大泵 2 台,  $Q = 3\,000 \text{ L/h}$ ,



$H=700$  kPa;小泵3台, $Q=300$  L/h, $H=700$  kPa。  
深床滤池乙酸钠投加泵2台(1用1备), $Q=500$  L/h, $H=400$  kPa。

## 5 运行效果

污水厂提标改造工程完成后的运行数据(2020年10月—12月)见表4。可见出水水质较之前大幅度提高,已达到设计标准。

表4 提标改造后的实际进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality after upgrading and reconstruction  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
实际85%概率进水	393	107	212	67	46.4	4.32
实际平均进水	221	65	146	48	36.6	3.54
实际85%概率出水	26.2	5.7	4.4	12.8	0.7	0.25
实际平均出水	17.8	4.2	2.8	11.2	0.5	0.21

改造后出水TN优于改造前,而碳源投加量有所降低,表明生物池强化反硝化能力的同时,提高了碳源的有效利用率。高效沉淀池和深床滤池的运行,保证了出水SS和TP的稳定达标,也降低了除磷剂的消耗量。由于生物池对碳源的有效利用,二级处理出水COD和BOD<sub>5</sub>较低,臭氧投加量低于设计值,有时不投加臭氧。改造后电耗约 $0.48 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$ ,20%乙酸钠投加量约 $0.58 \text{ L} / \text{m}^3$ ,污水处理成本约 $2.42 \text{ 元} / \text{m}^3$ 。

## 6 结论

针对污水厂实际运行情况,提出基于地表Ⅳ类水体标准的提标改造工程设计方案:污水生物处理采用改良式 $A^2O$ 工艺;三级处理采用高效沉淀池+反硝化深床滤池+高级氧化池组合工艺。在新增占地面积较小,并充分利用原有建(构)筑物及设备设施的情况下,使该污水厂出水水质大幅度提高,出水稳定达标,为类似污水处理厂提供了提标改造思路。

## 参考文献:

- [1] 李鹏峰,郑兴灿,孙永利,等. 高效初沉发酵池处理城市污水的中试研究[J]. 中国给水排水,2012,28(5):

5-8.

LI Pengfeng, ZHENG Xingcan, SUN Yongli, et al. Pilot-scale study on efficient primary sedimentation tank with fermentation for treatment of municipal sewage[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(5): 5-8 (in Chinese).

- [2] 邱明海. 昆明市第十四污水处理厂工程设计技术方案[J]. 给水排水, 2019, 45(1): 31-34.

QIU Minghai. Technical design scheme of the Fourteenth Wastewater Treatment Plant project in Kunming City[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(1): 31-34 (in Chinese).

- [3] 王舜和,李朦,郭淑琴. 多级AO与多模式AAO工艺在污水厂的应用对比[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 48-51, 57.

WANG Shunhe, LI Meng, GUO Shuqin. Application and comparison between multistage AO and multi-mode AAO in wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10): 48-51, 57 (in Chinese).

- [4] 刘议安,冯凌溪,王平,等. 高出水标准下的北京门头沟地下式再生水厂的设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(2): 73-75, 90.

LIU Yi'an, FENG Lingxi, WANG Ping, et al. Design of Beijing Mentougou underground reclaimed water plant with high effluent quality requirement [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2): 73-75, 90 (in Chinese).

- [5] 冯硕,李振川,冯凯. 北京市中心城区再生水厂技术路线总结及探讨[J]. 给水排水, 2020, 46(2): 20-24.

FENG Shuo, LI Zhenchuan, FENG Kai. Summarization and discussion of reclaimed water treatment process in Beijing central area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(2): 20-24 (in Chinese).

作者简介:李士松(1988-),男,山东德州人,硕士,工程师,主要从事市政给排水工程设计、水环境治理工作。

E-mail: lishisong16@cemi.com.cn

收稿日期:2020-11-24

修回日期:2021-04-15

(编辑:孔红春)