

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.010

# 短流程水处理工艺对南水北调中线原水的净化效果

赵新娟<sup>1</sup>, 董芸<sup>1</sup>, 张耀明<sup>2</sup>, 赵亮<sup>1</sup>, 蒋建伟<sup>2</sup>, 尹硕<sup>2</sup>,  
刘伯一<sup>1</sup>

(1. 天津市华森给排水研究设计院有限公司, 天津 300190; 2. 天津中法芥园水务有限公司, 天津 300121)

**摘要:** 针对南水北调中线原水水质特点,采用溶气气浮+臭氧氧化+炭砂过滤组合工艺对其进行中试研究。通过对工艺参数的优化,混凝剂采用三氯化铁和聚合氯化铝,其中三氯化铁最佳投加量为 15 mg/L,聚合氯化铝最佳投加量为 30 mg/L。气浮单元最佳溶气压力为 0.45 MPa,最优回流比为 10%,臭氧最佳投加量为 1.5 mg/L,炭砂滤柱的最佳滤速为 8 m/h。在浊度为 1.21~1.42 NTU、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为 2.3~2.8 mg/L、藻类计数为  $1.192 \times 10^4 \sim 1.256 \times 10^4$  个/L 的原水水质条件下,出水浊度 < 0.15 NTU,浊度去除率为 90%~93%, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  去除率为 40%~50%,藻类去除率为 93%~95%。可见,该工艺对浊度、藻类和有机物的去除率较高,南水北调中线原水适合采用该工艺进行处理。

**关键词:** 短流程水处理工艺; 南水北调中线原水; 溶气气浮; 臭氧氧化; 炭砂过滤  
**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)17-0055-05

## Purification Performance of Short-flow Water Treatment Process for Raw Water from Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

ZHAO Xin-juan<sup>1</sup>, DONG Yun<sup>1</sup>, ZHANG Yao-ming<sup>2</sup>, ZHAO Liang<sup>1</sup>, JIANG Jian-wei<sup>2</sup>,  
YIN Shuo<sup>2</sup>, LIU Bo-yi<sup>1</sup>

(1. Tianjin Hua Miao Research & Design Institute of Water & Wastewater Co. Ltd., Tianjin 300190, China; 2. Tianjin Sino French Jieyuan Water Co. Ltd., Tianjin 300121, China)

**Abstract:** According to the quality characteristics of raw water from the middle route of South-to-North Water Diversion Project, a pilot study of the combined process consisting of dissolved air floatation, ozonation and carbon sand filtration for purifying the raw water was carried out. Ferric chloride and polyaluminium chloride were selected as coagulants through the optimization of process parameters, and the optimum dosages of ferric chloride and polyaluminium chloride were 15 mg/L and 30 mg/L, respectively. The optimum dissolved gas pressure of the air flotation unit was 0.45 MPa, and the optimum reflux ratio was 10%. The optimum dosage of ozone was 1.5 mg/L, and the filtration velocity suitable for carbon sand filtration was 8 m/h. When the raw water quality was as follows: turbidity of 1.21~1.42 NTU,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  of 2.3~2.8 mg/L and algae count of 11.92 million cells/L to 12.56 million cells/L, the turbidity of effluent was less than 0.15 NTU and the removal efficiencies of turbidity,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and algae count were 90%~93%, 40%~50% and 93%~95%, respectively. Therefore, the process had high removal efficiencies of turbidity, algae and organic matter, suggesting that it was suitable to treat raw water from the middle route of South-to-North Water Diversion Project.

**Key words:** short-flow water treatment process; raw water from middle route of South-to-North

Water Diversion Project; dissolved air flotation (DAF); ozonation; carbon sand filtration

南水北调中线来水水质优良,主要水质指标可满足《地表水环境质量标准》Ⅱ类要求,其浊度低、有机物含量低、硬度低<sup>[1]</sup>。天津段南水北调中线原水的浊度不超过3 NTU,最低达到0.13 NTU;COD<sub>Mn</sub>均小于3 mg/L,最低为1.4 mg/L;藻类计数值在高发期超过1 000×10<sup>4</sup>个/L,但低于2 000×10<sup>4</sup>个/L。此外,在每年4月底至11月中旬,当南水北调中线原水水温高于10℃时会出现平流沉淀池或斜管沉淀池絮体上浮的问题。严重时,沉淀池上层悬浮一层泥渣,需要每日定期排出。根据试验结果,向南水北调中线原水中投加混凝剂后,在阳光下1~2 h会有大量小气泡出现,同时会有大量絮体上浮至水面。

针对南水北调中线原水的水质情况,由于传统沉淀工艺难以应对,因此推荐采用溶气气浮(DAF)工艺<sup>[2]</sup>,该工艺因除藻效果好、藻毒素释放率低、经济性好,被广泛应用于水体除藻<sup>[3]</sup>。南水北调中线原水虽然近期有机物含量低,但原水经过长距离输送到天津,途经了700多座村庄和各种大小桥梁,会受到有机物污染(甚至突发水污染)。结合目前新建、改造水厂均存在占地紧张的问题,可采用臭氧+炭砂过滤组合工艺进行处理。炭砂过滤工艺是一种双层滤料过滤工艺,上层为颗粒活性炭滤料,其与臭氧工艺相结合可以去除水中的有机物,下层设石英砂滤料,可截留颗粒物(包括上层活性炭层脱落的生物膜)<sup>[4-5]</sup>。笔者探索了溶气气浮+臭氧氧化+炭砂过滤短流程组合工艺对南水北调中线原水的净化效果,分析了藻类、浊度和有机物等指标的变化情况,旨在为以该水源为原水的自来水厂设计及应用提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验装置

试验装置如图1所示,其由管式静态混合器、旋流水力反应池、气浮单元、臭氧接触单元、炭砂滤柱组成。池体采用碳钢制作,内部刷防腐涂料。试验装置设计流量为3 m<sup>3</sup>/h,旋流水力反应池总反应时间为17 min,分6格,每格进水流速为1.0~0.2 m/s。气浮单元采用部分回流式压力溶气气浮法,共分为三段,第一段为接触区,第二段为分离区,第三段上

部为排渣区,下部为清水出水区。接触区上升流速为10.7 mm/s,分离区的表面负荷为6.25 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),采用水力排渣。臭氧最大投加量为2.5 mg/L,接触时间为12 min。炭砂滤柱的滤层总高度为2 500 mm,其中下层为石英砂,厚度为1 200 mm,粒径范围为0.50~1.00 mm,  $d_{10}=0.53$  mm,  $K_{80}=1.6$ ,上层为颗粒活性炭,厚度为1 300 mm,采用8目×30目煤质活性炭,炭砂滤柱采用单独气冲和单独水冲,其中气冲强度为55 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),水冲强度为58 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)。

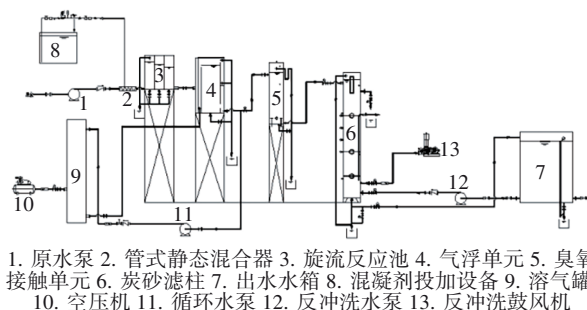


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

原水通过原水泵加压进入中试系统,在管式静态混合器前投加混凝剂(三氯化铁和聚合氯化铝),混合以后进入旋流反应池,形成絮体的原水进入气浮接触区与加压溶气水混合,絮体与微气泡充分接触后进入气浮分离区,浮渣上浮至表面并通过水力排渣方式从水中被去除。气浮出水进入臭氧接触单元,投加臭氧对原水中的有机物进行氧化,再进入炭砂滤柱。

### 1.2 原水水质及分析方法

试验原水为天津段南水北调中线原水。试验分为两个阶段,第一阶段主要是优化运行参数,该阶段(8月份)原水水质如下:温度为27~30℃、pH为8.3~8.4、浊度为1.10~1.46 NTU、COD<sub>Mn</sub>为2.2~2.6 mg/L。第二阶段为长期运行试验,该阶段(9月份)原水水质如下:温度为22~27℃、pH为8.3~8.4、浊度为1.21~1.42 NTU、COD<sub>Mn</sub>为2.3~2.8 mg/L、藻类计数为1 192×10<sup>4</sup>~1 256×10<sup>4</sup>个/L。

温度采用温度计测定,pH采用pH检测仪测定,浊度采用浊度仪测定,COD<sub>Mn</sub>采用酸性高锰酸钾法测定,藻类采用显微平板计数法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 运行参数的确定

#### 2.1.1 混凝剂投加量

气浮和沉淀工艺对混凝的要求不同,沉淀工艺要求混凝后的絮体 $>100\ \mu\text{m}$ ,而气浮工艺要求混凝后的絮体 $<100\ \mu\text{m}$ ,最佳粒径范围为 $10\sim30\ \mu\text{m}$ 。为了实现絮体与微气泡之间的良好黏附,气浮工艺还要求混凝后的絮体表面负荷较小、疏水性较强<sup>[6]</sup>。根据天津地区某净水厂的运行经验,混凝剂采用三氯化铁和聚合氯化铝,其既可以防止夏季高藻期碱度较低时,由于三氯化铁投加量的增大导致pH迅速下降,进而影响混凝效果,又可以在低温低浊期降低铝盐的投加量,保证出厂水的铝含量达标。聚合氯化铝和三氯化铁的性质如下:主要成分的含量分别为 $10.8\%$ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )和 $42.5\%$ ,密度分别为 $1.26$ 和 $1.41\ \text{g}/\text{cm}^3$ ,水不溶物含量分别为 $0.1\%$ 和 $0.5\%$ ,pH分别为 $4.1$ 和 $4.0$ ,聚合氯化铝的盐基度为 $74.5\%$ 。

当原水浊度为 $1.36\sim1.42\ \text{NTU}$ 时,联合投加三氯化铁和聚合氯化铝后,气浮对浊度的去除效果见表1。

表1 不同混凝剂投加量下气浮对浊度的去除效果

Tab.1 Effect of air flotation on turbidity removal under different coagulant dosages

编号	三氯化铁投加量/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	聚合氯化铝投加量/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	出水浊度/ NTU	浊度去除率/%
1 <sup>#</sup>	5	10	1.01	27.86
2 <sup>#</sup>	5	20	0.96	31.43
3 <sup>#</sup>	5	30	0.84	40.00
4 <sup>#</sup>	5	40	0.76	45.71
5 <sup>#</sup>	10	10	0.86	38.57
6 <sup>#</sup>	10	20	0.80	42.86
7 <sup>#</sup>	10	30	0.75	46.43
8 <sup>#</sup>	10	40	0.66	52.86
9 <sup>#</sup>	15	10	0.79	43.57
10 <sup>#</sup>	15	20	0.69	50.71
11 <sup>#</sup>	15	30	0.61	56.43
12 <sup>#</sup>	15	40	0.60	57.14

由表1可以看出,浊度去除率随着混凝剂投加量的增加而升高,且从絮体外观来看,随着混凝剂投加量的增加,絮体更为密实。当三氯化铁投加量为 $15\ \text{mg}/\text{L}$ 、聚合氯化铝投加量为 $30\ \text{mg}/\text{L}$ 时,即可实现很好的混凝效果。继续增大混凝剂投加量对提高浊度去除率的效果不明显,并且当三氯化铁投加量 $>15\ \text{mg}/\text{L}$ 时,气浮出水色度增加明显,可达到 $20$ 度;当铝盐投加量 $>40\ \text{mg}/\text{L}$ 时,出水铝浓度超过 $0.2$

$\text{mg}/\text{L}$ 。

#### 2.1.2 溶气压力和回流比

气浮溶气压力和回流比不但影响处理效果,还影响该工艺的产水率和动力消耗,因此确定最佳的溶气压力和回流比对气浮工艺具有重要意义。在原水浊度为 $1.36\sim1.42\ \text{NTU}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为 $2.6\sim2.8\ \text{mg}/\text{L}$ 条件下,溶气压力和回流比对出水浊度和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的影响如图2所示。可以看出,随着溶气压力和回流比的增大,气浮出水浊度和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除率均有所升高,但当溶气压力达到 $0.45\ \text{MPa}$ 、回流比达到 $10\%$ 时出现转折点,低于上述数值去除率变化幅度较大,高于上述数值后去除率变化幅度很小。综合考虑污染物去除率和电耗情况,确定气浮最佳溶气压力为 $0.45\ \text{MPa}$ 、最佳回流比为 $10\%$ 。

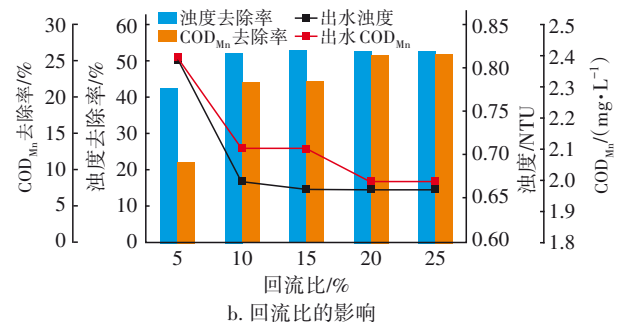
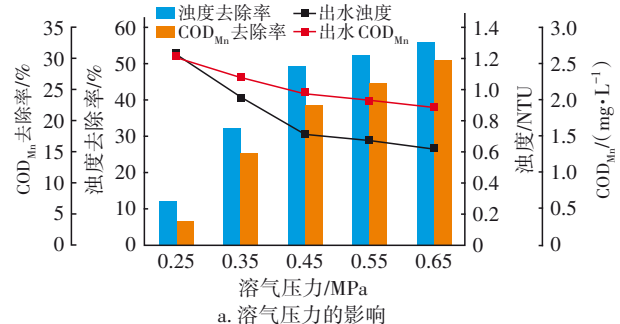


图2 溶气压力和回流比对出水浊度和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的影响

Fig.2 Effect of dissolved air pressure and reflux ratio on turbidity and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  of effluent

#### 2.1.3 臭氧投加量

当气浮出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为 $2.0\sim2.1\ \text{mg}/\text{L}$ 、炭砂滤柱的滤速为 $8\ \text{m}/\text{h}$ 时,臭氧投加量对臭氧接触单元和炭砂滤柱出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的影响如图3所示。可以看出,臭氧接触单元出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 下降不显著, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 主要是被后续炭砂滤柱去除。这说明投加臭氧并不能使有机物被彻底氧化成无机物,而是氧化成一系列中间产物,这些产物通过后续活性炭的吸附或生物膜降解被去除。本试验的最佳臭氧投加量为 $1.5$



mg/L,当投加量小于该值时 $COD_{Mn}$ 去除率随着投加量的增加而升高;当大于该值时, $COD_{Mn}$ 去除率随着投加量的增加反而下降。

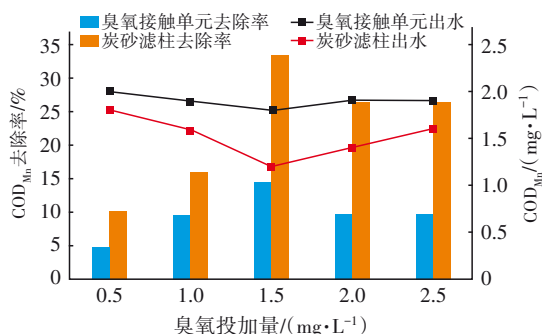


图3 臭氧投加量对 $COD_{Mn}$ 去除效果的影响

Fig.3 Effect of ozone dosage on  $COD_{Mn}$  removal

#### 2.1.4 炭砂滤柱的滤速

当气浮出水浊度为0.50~0.54 NTU、 $COD_{Mn}$ 为1.8~1.9 mg/L、臭氧投加量为1.5 mg/L时,考察炭砂滤柱的滤速对出水浊度、 $COD_{Mn}$ 的影响,结果如图4所示。可以看出,随着滤速的增大,浊度和 $COD_{Mn}$ 的去除率基本呈现降低的趋势。当滤速为8 m/h时,对浊度和 $COD_{Mn}$ 的去除效果较好;低于该值时,浊度和 $COD_{Mn}$ 的去除率变化不明显;高于该值时去除率明显下降,因此炭砂滤柱的最佳滤速为8 m/h。

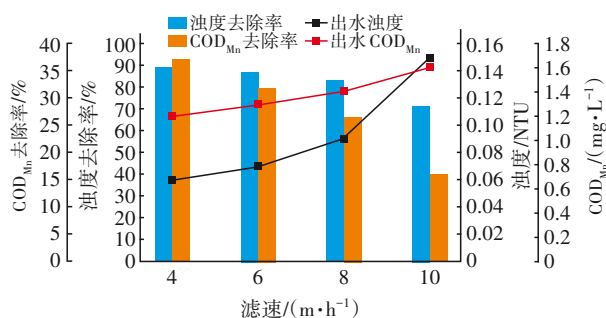


图4 滤速对浊度和 $COD_{Mn}$ 去除效果的影响

Fig.4 Effect of filtration rate on turbidity and  $COD_{Mn}$  removal

#### 2.2 长期运行试验

长期运行试验中,三氯化铁投加量为15 mg/L,聚合氯化铝投加量为30 mg/L,旋流反应时间为17 min,气浮单元接触室上升流速为10.7 mm/s,分离区的表面负荷为 $6.25 m^3/(m^2 \cdot h)$ ,气浮溶气压力为0.45 MPa,回流比为10%,臭氧投加量为1.5 mg/L,炭砂滤柱的滤速为8 m/h,对浊度、 $COD_{Mn}$ 、藻类的去除效果如图5所示。

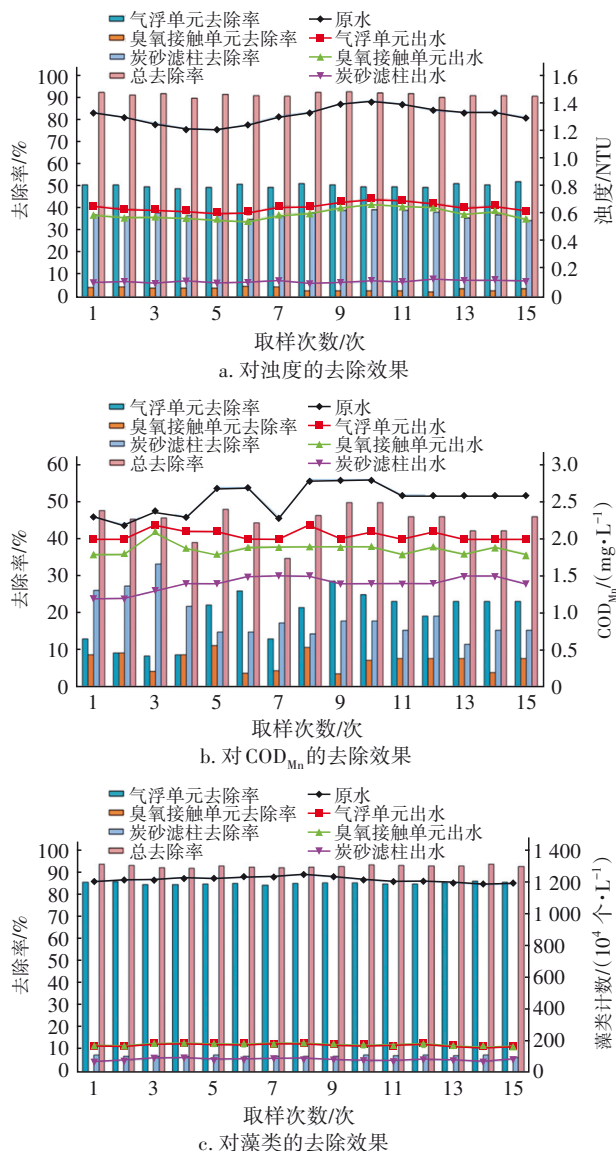


图5 长期运行试验结果

Fig.5 Results of long-term operation test

从图5可以看出,臭氧接触单元对浊度的去除效果不明显,其他两工艺段对浊度的去除效果为:气浮单元>炭砂滤柱,组合工艺对浊度的去除率为90%~93%,出水浊度<0.15 NTU。当原水 $COD_{Mn}$ 浓度 $\geq 2.6$  mg/L时,各工艺段对 $COD_{Mn}$ 的去除效果为:气浮单元>炭砂滤柱>臭氧接触单元;当原水 $COD_{Mn}$ <2.6 mg/L时,各工艺段对 $COD_{Mn}$ 的去除效果为炭砂滤柱>气浮单元>臭氧接触单元。组合工艺对 $COD_{Mn}$ 的去除率达到40%~50%。各工艺段对藻类的去除效果为:气浮单元>炭砂滤柱>臭氧接触单元,其中气浮单元对藻类的去除率大于85%,其他两工艺段对藻类的总去除率低于8%,组合工艺对藻类的去

除率达到93%~95%。

### 3 结论

溶气气浮+臭氧氧化+炭砂过滤组合工艺中,当三氯化铁投加量为15 mg/L、聚合氯化铝投加量为30 mg/L、气浮单元的溶气压力为0.45 MPa、回流比为10%、臭氧投加量为1.5 mg/L、炭砂滤柱的滤速为8 m/h时,对南水北调中线原水的净化效果较好。长期运行试验表明,该组合工艺能够使出水浊度<0.15 NTU,浊度去除率达到90%~93%;对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的去除效果明显,去除率可达40%~50%;同时,该组合工艺对藻类也有很好的去除效果,去除率可达93%~95%。

### 参考文献:

- [1] 林明利,张全,李宗来,等. 南水北调中线输水水质水量变化特征及城市供水应对措施建议[J]. 给水排水, 2016, 42(4):9-13.  
LIN Mingli, ZHANG Quan, LI Zonglai, et al. Characteristics of the variance of the water quality and quantity in the middle route of South-to-North Water Diversion Project and corresponding measures for urban water supply [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(4):9-13(in Chinese).
- [2] 王静超,马军,王静海. 气浮净水技术在给水处理中的应用及研究概况[J]. 工业水处理, 2004, 24(7):9-12.  
WANG Jingchao, MA Jun, WANG Jinghai. Survey and application of flotation to water treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2004, 24(7):9-12(in Chinese).
- [3] TEIXEIRA M R, ROSA M J. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove

cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa*: part II. the effect of water background organics [J]. Separation and Purification Technology, 2007, 53(1):126-134.

- [4] 镇祥华,李露,万年红,等. 给水厂炭砂滤池设计参数探讨[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16):81-85.  
ZHEN Xianghua, LI Lu, WAN Nianhong, et al. Discussion on design parameters of carbon-sand filter in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16):81-85(in Chinese).
- [5] 邓俊杰,劳志雄,陈明良,等. 强化老旧水厂常规处理工艺优化提升出水水质[J]. 中国给水排水, 2021, 37(2):85-89.  
DENG Junjie, LAO Zhixiong, CHEN Mingliang, et al. Optimizing and improving effluent quality by strengthening conventional water treatment process in an aging waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(2):85-89(in Chinese).
- [6] 王琳,张克峰,王永磊,等. 溶气气浮-炭砂过滤工艺处理低温低浊水质试验研究[J]. 供水技术, 2014, 8(6):17-21.  
WANG Lin, ZHANG Kefeng, WANG Yonglei, et al. Treatment experiment of low temperature and low turbidity raw water by dissolved air flotation-carbon and sand filtering process [J]. Water Technology, 2014, 8(6):17-21(in Chinese).

作者简介:赵新娟(1978-),女,天津人,本科,高级工程师,主要从事市政给排水工程设计工作。

E-mail:hmrbd@126.com

收稿日期:2021-03-02

修回日期:2021-05-24

(编辑:任莹莹)

尊法学法守法用法, 治水管水兴水护水