

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.13.010

# 高温季节深度处理水厂二氧化碳控铝研究

凌卫卫

(上海南汇自来水有限公司, 上海 201300)

**摘要:** 高温季节原水中藻类大量繁殖,导致其pH升高,对水厂出水的铝控制带来了挑战。惠南水厂新建了 $44\times 10^4$  m<sup>3</sup>/d的二氧化碳调节pH工艺,在2022年8月开展了二氧化碳控铝试验,并对全过程水质进行分析。结果表明:以青草沙水库为水源的臭氧/生物活性炭工艺水厂在原水水温超过29℃的高温季节,通过投加二氧化碳气体使沉淀池出水pH控制在 $7.2\pm 0.1$ ,避免了混凝剂聚铝的过量投加,确保沉淀池出水的铝控制在0.20~0.30 mg/L,出厂水平均pH为7.41,出厂水的铝稳定低于0.08 mg/L。通过对该水厂各工艺段出水的pH和铝等指标进行检测,探究了臭氧/生物活性炭深度处理水厂对铝的去除机理,为高温季节自来水厂控铝提供了技术支撑。

**关键词:** 控铝; 二氧化碳; 高温季节; 深度处理; 臭氧/生物活性炭; 水厂

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0066-05

## Carbon Dioxide for Aluminum Control in Water Treatment Plant with Advanced Treatment Process in High Temperature Season

LING Wei-wei

(Shanghai Nanhui Water Supply Co. Ltd., Shanghai 201300, China)

**Abstract:** Algae blooms of raw water in high temperature season lead to the increase in raw water pH, which poses a challenge to aluminum control in water treatment plant. Huinan Water Treatment Plant has built a new carbon dioxide pH regulation process with scale of  $44\times 10^4$  m<sup>3</sup>/d. The carbon dioxide aluminum control test was carried out in August 2022, and the water quality of the whole process was analyzed. When the temperature of raw water from Qingcaosha Reservoir exceeded 29℃ in high temperature season, the pH of precipitated effluent was controlled at  $7.2\pm 0.1$  by adding carbon dioxide gas, which avoided the excessive dosage of coagulant (polyaluminum), and ensured that the aluminum in precipitated effluent was controlled between 0.20 mg/L and 0.30 mg/L, the average pH of the product water was 7.41 and the aluminum in the product water stabilized below 0.08 mg/L. The removal mechanism of aluminum in ozone/biological activated carbon advanced treatment process was explored through the detection of pH and aluminum in each unit of the water treatment plant, so as to provide technical support for the control of aluminum in water treatment plants in high temperature season.

**Key words:** aluminum control; carbon dioxide; high temperature season; advanced treatment; ozone/biological activated carbon; water treatment plant

上海南汇自来水有限公司下属惠南水厂采用常规处理+臭氧/生物活性炭深度处理工艺,水源为青草沙水库。该水库地处长江下游,水中氮磷较丰富,

库容量大且停留时间长,季节性产生藻类消耗水中的二氧化碳和碳酸盐,导致pH升高,同时产生藻源性有机物,影响原水水质<sup>[1]</sup>。原水pH、水温上升会

促进四羟基合铝酸根离子在混凝沉淀工艺段的生成,导致水中总铝浓度升高,所以夏季的高温对原水高pH水厂的控铝形成了挑战<sup>[2-5]</sup>。惠南水厂于2021年11月完成了臭氧/生物活性炭深度处理工艺改造,于2021年12月完成了规模为 $44 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的“气/液”投加 $\text{CO}_2$ 降pH控铝工艺设备的安装调试<sup>[6-7]</sup>。针对上述情况,笔者在2022年7月—8月开展了以青草沙水库为水源的臭氧/生物活性炭工艺水厂制水全系统投 $\text{CO}_2$ 控铝研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 水厂工艺及原水水质

惠南水厂设计制水量为 $44 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用“二氧化碳投加—预臭氧—混凝—沉淀—砂滤—臭氧/生物活性炭—消毒”工艺,其流程见图1。

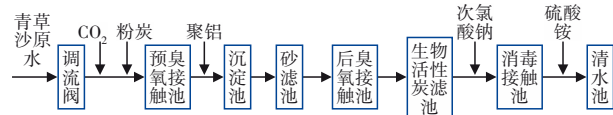


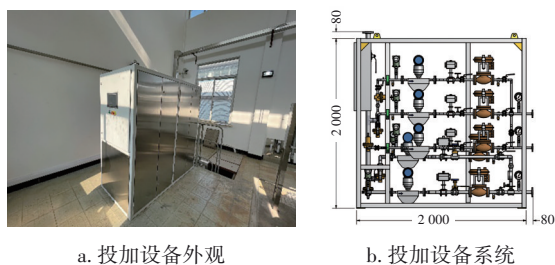
图1 惠南水厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of Huinan Water Treatment Plant

2022年7月—8月惠南水厂的制水量为 $36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,由于受到连续高温影响,此时该厂原水水温上升至 $27 \sim 31^\circ\text{C}$ ,相较2021年同期上升 $3 \sim 4^\circ\text{C}$ ;原水pH为 $8.1 \sim 8.9$ ,藻密度为 $(883 \sim 1\,960) \times 10^4$ 个/L,平均 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为 $2.07 \text{ mg/L}$ 。

### 1.2 $\text{CO}_2$ 投加系统

惠南水厂 $\text{CO}_2$ 投加系统见图2。采用“气/液”投加系统,通过蒸发液体 $\text{CO}_2$ ,直接投加 $\text{CO}_2$ 气体,设计投加浓度为 $4 \sim 18 \text{ mg/L}$ 。加注点为进厂原水管,即在原水管道安装气体喷射混合系统,利用液态 $\text{CO}_2$ 汽化后产生的压力,通过减压阀调压至 $0.6 \sim 0.8 \text{ MPa}$ 。



a. 投加设备外观

b. 投加设备系统

图2 “气/液”二氧化碳精确调节pH设备

Fig.2 “Gas/liquid”  $\text{CO}_2$  precise adjusting pH equipment

该系统控制原理见图3。根据原水及投加 $\text{CO}_2$ 后沉淀池进水在线pH仪的实时数据,以及沉淀池

进水的设定pH进行判定,优化调整 $\text{CO}_2$ 气体投加浓度。通过气体质量流量计实时调节 $\text{CO}_2$ 气体调流阀开度,改变 $\text{CO}_2$ 投加量,使pH的控制精度为 $\pm 0.1$ 。同时在砂滤出水安装在线余铝仪,后反馈调节进沉淀池前的设定pH,使该系统形成闭环控制,从而高效调节原水pH,达到控铝目标。

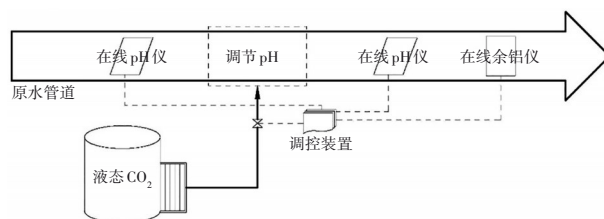


图3 “气/液”投加工艺流程

Fig.3 Flow chart of “gas/liquid” dosing process

### 1.3 试验方法与仪器

对上海市惠南水厂生产全流程水质进行监测分析,各工艺段出水水质检测指标包括pH、Al。原水经离心处理后检测Al,其余过程水及出厂水直接进样检测Al(总铝)。混凝单元投加常规聚合氯化铝(pH为4.0,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为10.5%)。

采用pH仪测定水样pH、水温;采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定水样中铝浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 常规工艺段投 $\text{CO}_2$ 调pH控铝方式

惠南水厂采用液体聚合氯化铝作为混凝剂,由于铝是典型的两性金属,当pH大于8.1或小于6.2时, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀都可以再溶于水生成 $\text{AlO}_2^-$ 或 $\text{Al}^{3+}$ ,增加水中溶解性铝的浓度。图4为砂滤池出水铝与温度的关系。

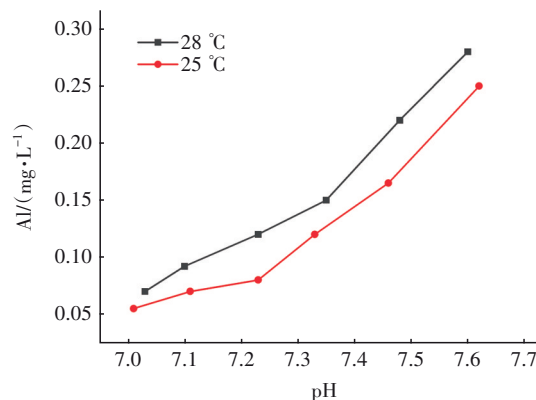


图4 砂滤池出水铝浓度与温度的关系

Fig.4 Relationship between aluminum and temperature in sand filter effluent

由图4可知,高水温将进一步提高沉淀池净水

污泥中 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的溶解度。常规工艺在水温为 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 时,沉淀池进水pH需控制在 $7.1\sim 7.2$ ,确保砂滤池出水铝 $\leq 0.1\text{ mg/L}$ 。

惠南水厂全过程工艺段Al的检测结果见图5。可知,原水平均pH为 $8.46$ , $\text{CO}_2$ 投加量为 $8\sim 16\text{ mg/L}$ 、液体聚铝投加量为 $25\sim 30\text{ mg/L}$ ,投加 $\text{CO}_2$ 后沉淀池进水pH控制为 $7.17$ ,沉淀池出水铝为 $0.20\sim 0.30\text{ mg/L}$ ,砂滤池出水铝为 $0.08\sim 0.10\text{ mg/L}$ ,砂滤池出水平均pH为 $7.26$ 。经提升泵房水泵混合及后臭氧接触池曝气处理后,溶解在水中的 $\text{CO}_2$ 部分被释放出来,炭滤池进水平均pH上升至 $7.46$ 。但由于砂滤池出水浊度已低于 $0.1\text{ NTU}$ ,其出水铝均为溶解性铝,因此经后臭氧氧化后炭滤池进水铝没有随pH的升高而上升。炭滤池平均进水铝浓度为 $0.084\text{ mg/L}$ ,远低于国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)和上海市《生活饮用水水质标准》(DB 31/T 1091—2018)中出水铝 $\leq 0.2\text{ mg/L}$ 的要求。

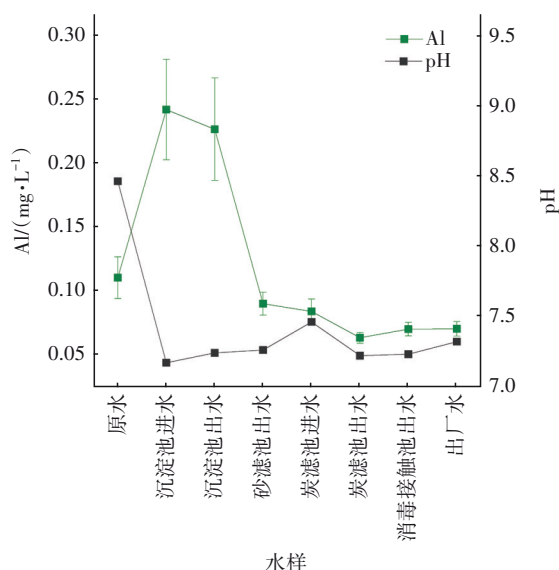


图5 制水全过程Al的去除效果

Fig.5 Removal effect of Al in the entire process of water production

在高水温条件下,水中铝的溶解度升高,水厂需严格控制沉淀池进水pH,并进一步优化混凝剂的投加量,同时优化沉淀池排泥及滤池反冲洗周期,防止沉淀池净水污泥及砂滤池截留矾花中铝的释放。

对砂滤池反冲洗水中铝进行检测,其中总铝为 $10.8\text{ mg/L}$ 、浊度为 $65\text{ NTU}$ (按惠南水厂28格砂滤池、单格过滤面积为 $95\text{ m}^2$ 、滤速为 $10\text{ m/h}$ 、砂滤池反

冲洗周期为 $40\text{ h}$ 、单次冲洗水量为 $174\text{ m}^3$ 、水厂制水量为 $36\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、沉淀池出水铝为 $0.226\text{ mg/L}$ 、砂滤池出水铝为 $0.090\text{ mg/L}$ 计算,得出反冲洗水中铝应为 $16.75\text{ mg/L}$ )。实际砂滤池反冲洗废水中总铝与计算值接近,偏差原因主要是在砂滤池反冲洗废水调节池取样,其搅拌机不能使水样得到充分混合。

## 2.2 臭氧/生物活性炭工艺对水中铝的去除效果

惠南水厂深度处理工艺段铝的测试结果见图6。可知,砂滤池出水铝为 $0.090\text{ mg/L}$ ,经后臭氧氧化后铝为 $0.084\text{ mg/L}$ 。选取 $10^\#\sim 13^\#$ 炭滤池滤格进行检测,其出水平均铝浓度分别为 $0.072$ 、 $0.075$ 、 $0.054$ 、 $0.052\text{ mg/L}$ ,由于受炭滤池生物泄漏影响,出水铝存在一定波动,炭滤池总渠出水铝为 $0.063\text{ mg/L}$ 。消毒接触池出水铝为 $0.070\text{ mg/L}$ ,二级泵房出厂水铝为 $0.070\text{ mg/L}$ ,砂滤池出水经后臭氧/生物活性炭处理后铝的去除率提高了30%。

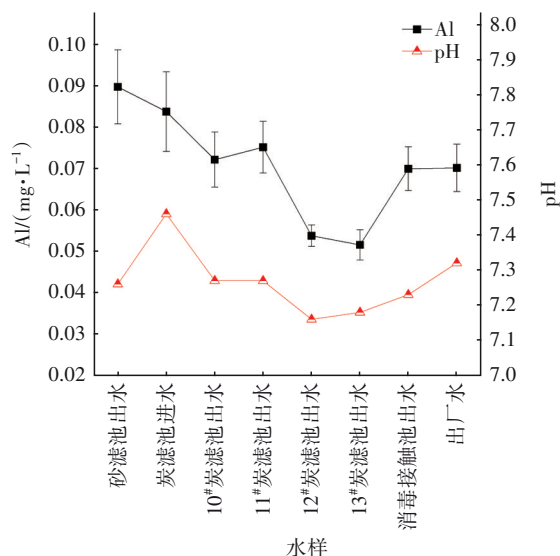


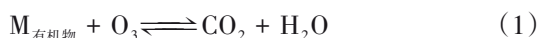
图6 臭氧/生物活性炭对铝的去除效果

Fig.6 Removal effect of ozone/biological activated carbon on aluminum

## 2.3 臭氧/生物活性炭工艺对水中铝的去除机理

臭氧/生物活性炭工艺通过臭氧氧化将大分子有机物分解成小分子有机物,产生大量溶解氧,并利用颗粒活性炭内部存在的大量微小孔隙吸附小分子有机物,通过在活性炭周围形成的生物膜进一步分解小分子有机物生成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ,见式(1)和式(2)。由图6可知,经活性炭滤池处理后pH由 $7.46$ 下降至 $7.22$ ,式(3)的平衡向左移动,生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀物,通过炭滤池活性炭的吸附过滤截留下来。

在消毒接触池投加次氯酸钠后出厂水 pH 上升至 7.32, 不会因为投  $\text{CO}_2$  控铝而偏低。



对活性炭滤池反冲洗水中铝进行检测, 总铝为 0.89 mg/L [按惠南水厂 18 格炭滤池、单格过滤面积为 106  $\text{m}^2$ 、滤速为 10  $\text{m/h}$ 、炭滤池反冲洗周期为 4 d、炭滤池水冲强度为 28  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、水冲时间为 10 min、水厂制水量为  $36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  计算, 得出反冲洗水中铝应为 3.36 mg/L]。由于惠南水厂新炭(使用时间为 9 个月)的孔容积较高, 大量微小孔隙可以吸附  $\text{Al}(\text{OH})_3$  沉淀物, 而气冲和水冲的强度不足以将其完全冲洗出来, 导致实际炭滤池冲洗废水中总铝较计算值偏小。因此降低炭滤池进水铝浓度, 可以减少生物活性炭分解有机物后产生的  $\text{Al}(\text{OH})_3$  总量, 将有助于减轻活性炭滤池微小孔隙堵塞, 延长生物活性炭换炭周期。

## 2.4 惠南水厂出厂水铝的控制效果

惠南水厂对铝的去除效果见图 7。可知, 高温季节惠南水厂原水平均 pH 为 8.39、水温为 30  $^\circ\text{C}$ 、平均聚铝投加量为 28 mg/L、 $\text{CO}_2$  投加量为 11 mg/L。通过投  $\text{CO}_2$  控制沉淀池出水 pH 为  $7.2 \pm 0.1$  时, 出厂水平均 pH 为 7.41, 平均铝浓度为 0.064 mg/L、稳定低于 0.08 mg/L。

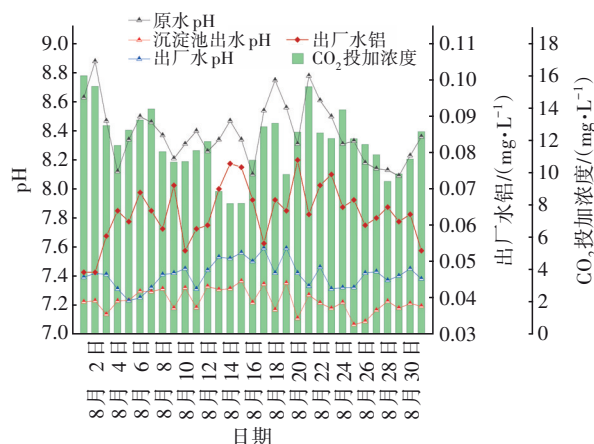


图7 惠南水厂对铝的去除效果

Fig.7 Removal effect of aluminum in Huinan Water Treatment Plant

与同期南汇自来水公司下属北水厂(水源为青草沙水库, 制水规模为  $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 工艺为常规+臭

氧/生物活性炭, 采用加酸聚铝调 pH 控铝) 进行比较, 结果见图 8。在原水水温为 30  $^\circ\text{C}$  时, 北水厂加酸聚铝投加量为 50 mg/L, 沉淀池出水平均 pH 为 7.27、出厂水平均 pH 为 7.20、平均铝浓度为 0.075 mg/L。采用  $\text{CO}_2$  调 pH 的控制精度为  $\pm 0.1$ , 因此惠南水厂出厂水的铝指标更稳定。

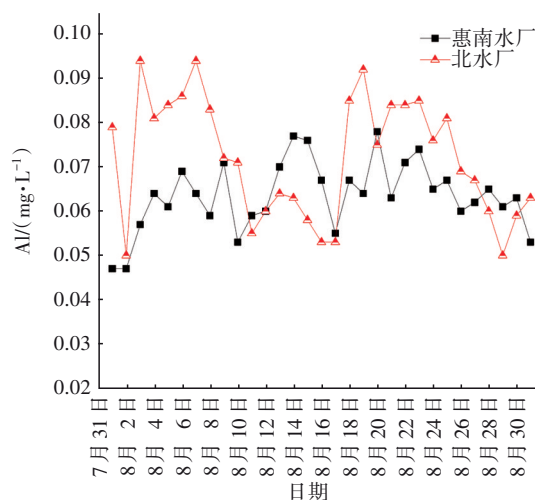


图8 两水厂对铝的去除效果

Fig.8 Removal effect of aluminum in the two water treatment plants

## 2.5 控铝成本分析

通过对惠南水厂、北水厂两种调 pH 控铝工艺进行比较可知,  $\text{CO}_2$  调 pH 控铝效果优于加酸混凝剂, 可减少近 22 mg/L 的聚铝投加量, 混凝工艺段药剂成本可减少 121 元/ $10^4 \text{ m}^3$ ; 净水污泥产量可减少 0.12 t/ $10^4 \text{ m}^3$ , 净水污泥处置费可减少 67 元/ $10^4 \text{ m}^3$ , 合计减少费用 188 元/ $10^4 \text{ m}^3$ 。按制水量约  $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  计算,  $\text{CO}_2$  调 pH 控铝工艺较加酸聚铝工艺节约费用近 200 万元/年。

## 3 结论

① 在高温季节采用常规+臭氧/生物活性炭工艺的水厂通过投加  $\text{CO}_2$  调 pH, 可以确保出厂水铝稳定低于 0.08 mg/L。

② 当原水水温超过 29  $^\circ\text{C}$  时, 建议将沉淀池出水 pH 稳定控制在  $7.2 \pm 0.1$ ; 对沉淀池进水开展混凝搅拌试验, 防止过量投加聚铝造成 Al 的释放, 确保沉淀池出水总铝控制在 0.20 ~ 0.30 mg/L。

③ 当原水水温超过 29  $^\circ\text{C}$  时, 经砂滤池、提升泵房水泵跌水混合, 并经臭氧接触池曝气处理后, 溶解在水中的  $\text{CO}_2$  部分被释放出来, 使炭滤池进水



平均pH上升至7.46,出厂水pH为7.32,不会因为控铝而偏低。

④ 混凝沉淀池对水中铝的去除机理主要是调节原水pH以及防止聚铝过量投加,同时优化沉淀池排泥周期,减少含 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 净水污泥中铝的释放;砂滤池对水中铝的去除机理主要是截留沉淀池出水矾花;炭滤池对水中铝的去除机理主要是分解小分子有机物,产生 $\text{CO}_2$ 使氢离子浓度上升,生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀物后通过炭滤池的吸附过滤从而去除。

⑤ 通过投加 $\text{CO}_2$ 调pH控铝工艺对pH的控制精度可达 $\pm 0.1$ ,可大幅降低混凝剂投加量,减少净水污泥处置量,降低生产运行成本。

#### 参考文献:

- [1] 朱宜平. 近十年来青草沙水库取水口水质变化趋势分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2022(3): 50-60.  
ZHU Yiping. Analysis of changes in water quality at the Qingcaosha Reservoir water intake over a period of 10 years [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2022(3): 50-60 (in Chinese).
- [2] 贺晓娟, 袁本松, 黄保平, 等. 高pH湖泊水处理中残余铝的影响因素及控制措施[J]. 净水技术, 2019, 38(3): 51-55.  
HE Xiaojuan, YUAN Bensong, HUANG Baoping, *et al.* Influence factors and control measures of residual aluminium in treatment of high pH value lake water [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(3): 51-55 (in Chinese).
- [3] 刘锦荣, 肖帆, 刘小东, 等. 小型水厂原水pH值异常升高的应对策略[J]. 中国给水排水, 2016, 32(17): 48-50.  
LIU Jinrong, XIAO Fan, LIU Xiaodong, *et al.* Coping strategy for abnormal increase in pH value of raw water in small-scale waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(17): 48-50 (in Chinese).
- [4] YANG Z L, GAO B Y, YUE Q Y, *et al.* Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid-kaolin synthetic water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1/3): 596-603.
- [5] 吴珍, 张盼月, 曾光明, 等. 不同铝形态去除水中腐殖酸的混凝特性[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1903-1907.  
WU Zhen, ZHANG Panyue, ZENG Guangming, *et al.* Coagulation characteristics of different Al species on humic acid removal from water [J]. Environmental Science, 2008, 29(7): 1903-1907 (in Chinese).
- [6] 吴雪飞. 二氧化碳投加在水厂处理高pH原水上的应用及效果[J]. 净水技术, 2022, 41(S1): 40-44, 249.  
WU Xuefei. Application and effect of carbon dioxide dosing on high pH value of raw water in WTP [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(S1): 40-44, 249 (in Chinese).
- [7] 陈德放, 李梅, 张华军, 等. 投加二氧化碳控制出厂水铝含量的生产性试验[J]. 中国给水排水, 2021, 37(23): 9-14.  
CHEN Defang, LI Mei, ZHANG Huajun, *et al.* Controlling aluminum content in finished water of waterworks by dosing carbon dioxide [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(23): 9-14 (in Chinese).

作者简介: 凌卫卫(1969-), 男, 上海人, 本科, 工程师, 主要从事给排水处理工艺研发应用及水务管理工作。

E-mail: 416860369@qq.com

收稿日期: 2023-03-03

修回日期: 2023-03-26

(编辑: 沈靖怡)