

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 19. 011

针对北方某大型水库原水的预处理工艺研究

李洪清¹, 田宝义², 赵新娟¹, 董芸¹, 潘恬豪³, 阳洋¹

(1. 天津水务集团华森规划勘测设计研究院有限公司, 天津 300220; 2. 天津水务集团有限公司, 天津 300203; 3. 苏伊士环境科技<北京>有限公司, 北京 100026)

摘要: 针对北方某大型水库原水水质问题,开展了高速气浮+臭氧氧化+粉末活性炭脉冲吸附组合工艺的预处理中试研究。当原水高锰酸盐指数为5.4~9.6 mg/L、藻类计数为 $(8\,320\sim19\,640)\times 10^4$ 个/L、叶绿素a为51.97~83.63 $\mu\text{g/L}$ 时,组合工艺处理后的出水高锰酸盐指数 $<3\text{ mg/L}$,去除率 $>60\%$;藻类计数 $<2\,000\times 10^4$ 个/L,去除率达86%~93%;叶绿素a $<1\text{ }\mu\text{g/L}$,去除率 $>98\%$ 。当原水中2-甲基异莰醇(2-MIB) $\leq 200\text{ ng/L}$ 时,组合工艺出水2-MIB $\leq 10\text{ ng/L}$;当原水2-MIB在200~400 ng/L之间时,组合工艺出水2-MIB $\leq 30\text{ ng/L}$,去除率 $>88\%$ 。当原水碱度较低时,投加碳酸氢钠后,组合工艺出水碱度高于原水碱度。试验结果表明,该组合工艺对藻类、有机物和2-MIB的去除率较高,对于高藻、高嗅味水库原水,适合采用此组合工艺进行预处理,处理后的水质能够满足下游以常规处理为主的净水厂对原水水质的要求。

关键词: 原水预处理; 高速气浮; 臭氧氧化; 粉末活性炭脉冲吸附

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)19-0074-06

Pre-treatment Process of Raw Water from a Large Reservoir in Northern China

LI Hong-qing¹, TIAN Bao-yi², ZHAO Xin-juan¹, DONG Yun¹, PAN Tian-hao³,
YANG Yang¹

(1. Tianjin Water Group Huamiao Design & Research Institute of Planning & Surveying Co. Ltd.,
Tianjin 300220, China; 2. Tianjin Water Group Co. Ltd., Tianjin 300203, China; 3. SUEZ
Environmental Technology <Beijing> Co. Ltd., Beijing 100026, China)

Abstract: A pilot-scale study was conducted to evaluate the pre-treatment effectiveness of an integrated process combining high-speed flotation, ozonation, and pulse adsorption of powdered activated carbon on the raw water quality sourced from a large reservoir in northern China. When the permanganate index of raw water ranged from 5.4 mg/L to 9.6 mg/L, the algae count was between 83.2 million per liter and 196.4 million per liter, and chlorophyll a concentration ranged from 51.97 $\mu\text{g/L}$ to 83.63 $\mu\text{g/L}$, the permanganate index of the effluent from the combined process was reduced to below 3 mg/L, achieving a removal efficiency exceeding 60%. The algae count was effectively reduced to below 20 million per liter, with a removal efficiency of 86% to 93%. Chlorophyll a concentration was reduced to below 1 $\mu\text{g/L}$, with a removal efficiency of above 98%. When the concentration of 2-methylisoborneol (2-MIB) in raw water was not more than 200 ng/L, the concentration of 2-MIB in the effluent of the combined treatment process was below 10 ng/L. When the 2-MIB concentration in raw water ranged from 200 ng/L to 400 ng/L, the 2-MIB concentration in the effluent of the combined process remained below 30 ng/L, with a removal efficiency

exceeding 88%. When the alkalinity of the raw water was relatively low, the alkalinity of the effluent from the combined process exceeded that of the raw water after the addition of sodium bicarbonate. This integrated process demonstrated a relatively high removal efficiency for algae, organic matters, and 2-MIB. It is therefore well-suited for use as a pre-treatment method for raw water sourced from reservoirs characterized by high algae count and high odor. The treated effluent quality met the intake requirements of downstream water purification plants that primarily employ conventional treatment processes.

Key words: raw water pre-treatment; high-speed flotation; ozonation; pulse adsorption of powdered activated carbon

北方某大型水库原水除总氮和高锰酸盐指数外,其他指标可以达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水体标准。总氮超Ⅴ类水体标准,高锰酸盐指数达到Ⅳ类水体标准。此外,该水库还存在全年2-甲基异莰醇(2-MIB)嗅味超标和春、夏季藻类暴发问题。2020年—2023年,藻类计数 $>3\,000\times 10^4$ 个/L的时间段占比从49%增至75%,2-MIB >10 ng/L的时间段占比超过90%^[1]。

溶气气浮可稳定产生10~100 μm 的微气泡,使其黏附于絮体上,实现絮体强制性上浮,达到固液分离的目的。因其除藻效果好、藻毒素释放概率低、经济性好,被广泛应用于水体除藻^[2]。相对于传统溶气气浮,高速气浮是一种具有较高水力负荷的气浮类型。高速气浮的絮凝时间一般可以控制在5~10 min,其经特殊设计的接触区和分离区可使水力负荷达到20~40 m^3/h ^[3-4]。针对水库原水春、夏季藻类暴发问题,推荐采用高速气浮工艺。

在臭氧氧化2-MIB过程中,除臭氧分子直接氧化外,很大程度上是由于臭氧分解产生羟基自由基($\cdot\text{OH}$)作用的结果^[5-7]。它破坏水中2-MIB的分子结构,将其转化为小分子物质,从而达到除臭效果。由于活性炭具有较大的比表面积,能够促进2-MIB向其内部径向扩散,充分发挥了粉末活性炭的吸附能力,从而能降低水中2-MIB浓度,因此投加粉末活性炭可以有效去除水中2-MIB^[8-9]。原水2-MIB浓度高,粉末活性炭投加量大,为了不影响下游净水厂的运行,推荐采用粉末活性炭脉冲吸附工艺,它是一种粉末活性炭悬浮型的吸附池。吸附池进水采用脉冲配水方式,按一定周期充水和放水,使斜管区下方形成悬浮炭泥层交替膨胀和收缩,增加原水藻类和2-MIB与炭泥层的接触,增强吸附效果,从而强化对污染物的去除。过剩的炭泥会通过

隔墙顶部溢流至污泥浓缩区,浓缩区底部设有泥斗,并由装有自动阀的管道间断性排出^[10]。悬浮层内炭泥停留时间约为3~5 d,既保证了粉末活性炭利用率,又能满足对粉末活性炭的回收需求。针对水库原水2-MIB超标问题,推荐采用臭氧预氧化+粉末活性炭吸附工艺。基于上述分析,笔者考察了高速气浮+臭氧氧化+粉末活性炭脉冲吸附组合工艺对北方某大型水库原水中藻类、有机物和2-MIB的去除效果,旨在为存在上述污染物的水库原水预处理工艺设计与应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置由高速气浮单元、臭氧氧化单元和粉末活性炭脉冲吸附单元构成(见图1)。高速气浮单元的设计流量为15.2 m^3/h ,涵盖混合区、两级串联反应区、接触区、分离区和溶气水设备。其中,混合时间为3~4 min,一级反应时间为0.9 min,二级反应时间为6.1 min,分离区的表面负荷为39.4 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,回流比为10%。臭氧氧化单元的设计流量同样为15.2 m^3/h ,接触时间为5 min。粉末活性炭脉冲吸附单元的设计流量为2.3 m^3/h ,包含三级串联混合区、真空区、配水稳流区、悬浮炭泥层(吸附区)、斜管区、集水区和炭泥浓缩区,单级混合时间为1.8 min,吸附区上升流速为8 m/h 。

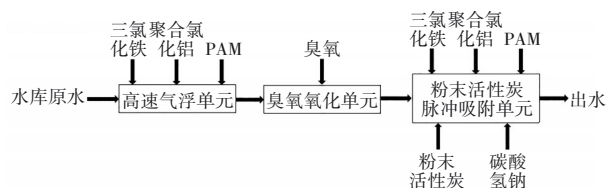


图1 组合工艺流程

Fig.1 Flow chart of combined treatment process

1.2 试验用水的处理药剂

试验投加的水处理药剂包括聚合氯化铝溶液、

三氯化铁溶液、粉末活性炭、阴离子型聚丙烯酰胺(PAM)和食品级碳酸氢钠。其中,聚合氯化铝溶液中氧化铝(Al_2O_3)的含量为10.8%,盐基度为74.5%,密度为 1.26 g/cm^3 ,水不溶物含量为0.1%,pH为4.1。三氯化铁溶液中主要成分的含量为42.5%,密度为 1.41 g/cm^3 ,水不溶物含量为0.5%,pH为4.0。煤质粉末活性炭的目数为300目,吸附碘值 $\geq 800\text{ mg/g}$ 。

1.3 试验方法

试验分为单元试验和组合工艺试验。单元试验是针对高速气浮单元和粉末活性炭脉冲吸附单元,在设计参数条件下分别进行单独运行试验。通过调整药剂投加量,考察各单元对污染物的去除效果。具体药剂投加量见表1。其中,粉末活性炭脉冲吸附单元中粉末活性炭投加量为 30 mg/L 。检测数据涵盖原水、高速气浮单元出水或粉末活性炭脉冲吸附单元出水的藻类计数和2-MIB浓度。

表1 药剂投加量

Tab.1 Dosage of reagents $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

高速气浮单元			粉末活性炭脉冲吸附单元		
三氯化铁(以原液计)	聚合氯化铝(以原液计)	PAM(固体)	三氯化铁(以原液计)	聚合氯化铝(以原液计)	PAM(固体)
	20	0.1		20	0.1
	20	0.1		20	0.1
	20	0.1	10.5	20	0.1
24	20	0.1	10.0	20	0.1
24	20		20.0	10	0.1
38	10	0.1	20.0	10	0.1
38	10	0.1			
38	10	0.1			
38	10	0.1			
20		0.1			
20		0.1			

组合工艺试验是将高速气浮单元、臭氧氧化单元和粉末活性炭脉冲吸附单元在设计参数条件下联合运行。在组合工艺试验初期,按照单元试验结果投加药剂,却出现出水铝、铁超标的情况,因此对药剂投加量进行了调整。调整后的加药量如下:在高速气浮单元投加 20 mg/L 三氯化铁(以原液计)和 0.1 mg/L PAM(固体);在臭氧氧化单元投加 2 mg/L 臭氧;在粉末活性炭脉冲吸附单元投加 $30\sim 50\text{ mg/L}$ 粉末活性炭、 10.5 mg/L 三氯化铁(以原液计)、 $10\sim 20\text{ mg/L}$ 聚合氯化铝(以原液计)、 0.1 mg/L PAM(固

体)和 $30\sim 37\text{ mg/L}$ 碳酸氢钠(固体)。其检测数据包括原水、高速气浮单元出水、臭氧氧化单元出水和粉末活性炭脉冲吸附单元出水的藻类计数、叶绿素a、2-MIB,以及组合工艺进、出水的高锰酸盐指数、浊度、碱度、pH、余铝、余铁等。

1.4 原水水质和检测方法

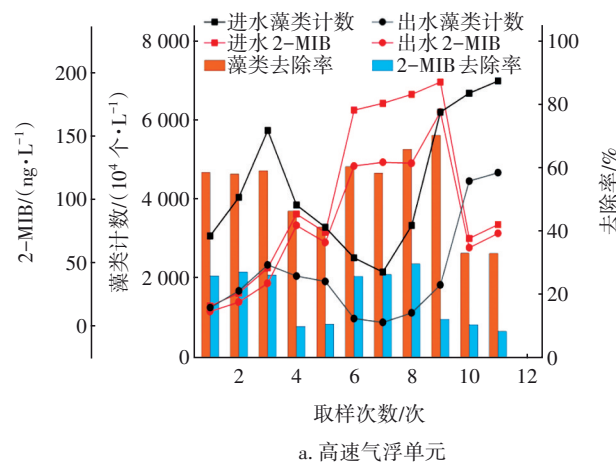
试验期间,该水库原水水质情况如下:水温为 $23\sim 31\text{ }^\circ\text{C}$,pH为 $7.8\sim 9.2$,浊度为 $3.8\sim 14.7\text{ NTU}$,藻类计数为 $(2\ 175\sim 19\ 640)\times 10^4$ 个/L,叶绿素a为 $51.97\sim 83.63\text{ }\mu\text{g/L}$,2-MIB为 $16.2\sim 576\text{ ng/L}$,土臭素为 $5.5\sim 13.2\text{ ng/L}$,碱度(以 CaCO_3 计)为 $77.1\sim 94.5\text{ mg/L}$,高锰酸盐指数为 $5.4\sim 9.6\text{ mg/L}$ 。

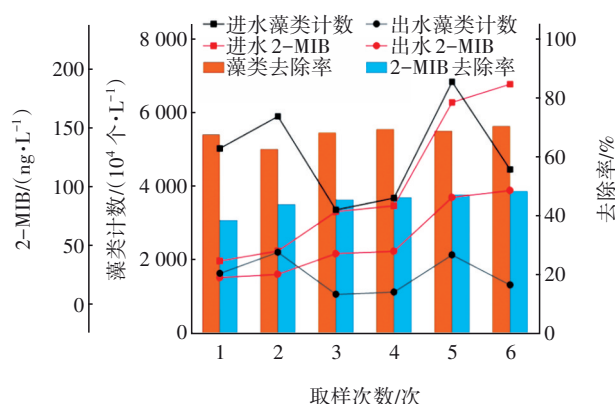
水温和pH采用电极法测定,浊度采用浊度仪测定,藻类数量采用显微平板计数法测定,叶绿素a采用分光光度法测定,2-MIB采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法测定^[11],碱度采用电位滴定法测定,铝(溶)离子采用铬天青S分光光度法测定,铁(溶)离子采用二氮杂菲分光光度法测定,高锰酸盐指数(以 O_2 计)采用酸性高锰酸钾滴定法测定。

2 结果与讨论

2.1 单元试验

单元试验时间为6月2日—7月16日,在此期间考察了高速气浮单元和粉末活性炭脉冲吸附单元的独立运行效果,如图2所示。从图2(a)可以看出,高速气浮单元对藻类的去除效果较好,去除率在 $33\%\sim 70\%$,不过对2-MIB的去除率低于 30% 。当三氯化铁和聚合氯化铝投加比例约为4:1时,高速气浮单元对藻类的去除效果达到最优,去除率可以达到 70% 。





b. 粉末活性炭脉冲吸附单元

图2 高速气浮单元和粉末活性炭脉冲吸附单元运行结果

Fig.2 Test results of high-speed flotation unit and powdered activated carbon pulse adsorption unit

从图2(b)可以看出,粉末活性炭脉冲吸附单元对藻类和2-MIB的去除效果均较为出色。其中,对藻类的去除率为62%~70%,对2-MIB的去除率为38%~48%。另外,通过对比发现,相较于单独投加聚合氯化铝,三氯化铁和聚合氯化铝联合投加时对污染物的去除效果更佳。

2.2 组合工艺试验

组合工艺试验时间为7月17日—9月19日,考察了高速气浮+臭氧氧化+粉末活性炭脉冲吸附组合工艺对目标污染物的去除效果,同时分析了投加碳酸氢钠后进水与出水碱度的变化,以及不同加药量下余铝和余铁情况。

对藻类的去除效果如图3所示。当原水藻类计数在 $(8\,320\sim19\,640)\times10^4$ 个/L时,组合工艺出水藻类计数 $<2\,000\times10^4$ 个/L,总去除率达到86%~93%。

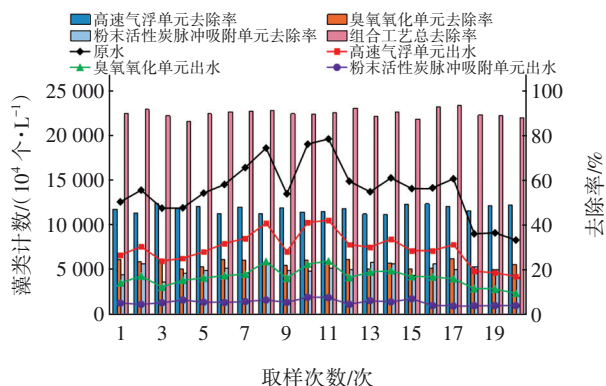


图3 对藻类的去除效果

Fig.3 Removal effect of algae

降低混凝剂投加量后,高速气浮单元和粉末活性炭脉冲吸附单元对藻类的去除率较单元试验均

有所下降。其中高速气浮单元去除率为45%~50%,臭氧氧化单元去除率为20%~25%,粉末活性炭脉冲吸附单元去除率约为14%~23%。三个单元对藻类的去除效果排序为:高速气浮单元>臭氧氧化单元>粉末活性炭脉冲吸附单元。

对叶绿素a的去除效果如图4所示。可知,当原水叶绿素a浓度为51.97~83.63 $\mu\text{g/L}$ 时,组合工艺出水叶绿素a浓度 $<1\,\mu\text{g/L}$,总去除率 $>98\%$ 。就各单元去除率而言,高速气浮单元为10%~30%,臭氧氧化单元为60%~81%,粉末活性炭脉冲吸附单元约为6%~13%。三个单元对叶绿素a的去除效果排序为:臭氧氧化单元>高速气浮单元>粉末活性炭脉冲吸附单元。值得注意的是,臭氧在水中的氧化还原电位为2.07 V,仅次于氟(2.87 V),臭氧作为一种强氧化剂,能够破坏有机物的分子结构^[12]。在臭氧与叶绿素a的接触反应中,臭氧通过氧化叶绿素a分子中的碳碳双键和碳氢键,实现对叶绿素a的高效去除。

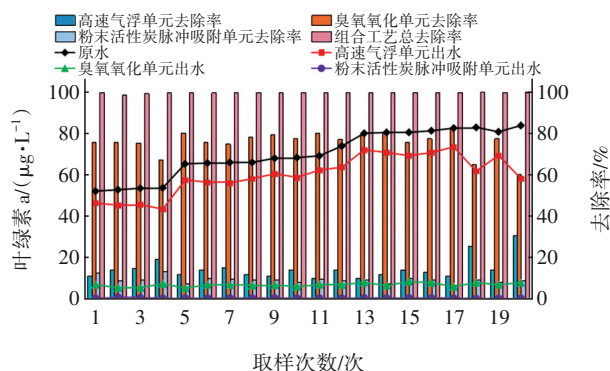


图4 对叶绿素a的去除效果

Fig.4 Removal effect of chlorophyll a

根据原水水质,设置了两个2-MIB处理目标:

- ①当原水2-MIB $\leq 200\,\text{ng/L}$ 时,出水2-MIB $\leq 10\,\text{ng/L}$;
- ②当原水2-MIB为200~400 ng/L 时,出水2-MIB $\leq 30\,\text{ng/L}$ 。对2-MIB的去除效果如图5所示。可以看出,当原水2-MIB为130.4~576 ng/L 时,组合工艺出水可以满足上述处理目标,总去除率为88%~96%。其中,高速气浮单元的去除率为6%~15%,臭氧氧化单元为15%~46%,粉末活性炭脉冲吸附单元为42%~70%。当原水2-MIB达到576 ng/L 时,组合工艺出水2-MIB为45.2 ng/L 。

高速气浮单元对2-MIB的去除效果不明显,对2-MIB的去除主要是通过臭氧氧化作用和粉末活性

炭脉冲吸附作用,三个单元对2-MIB的去除效果排序为:粉末活性炭脉冲吸附单元>臭氧氧化单元>高速气浮单元。

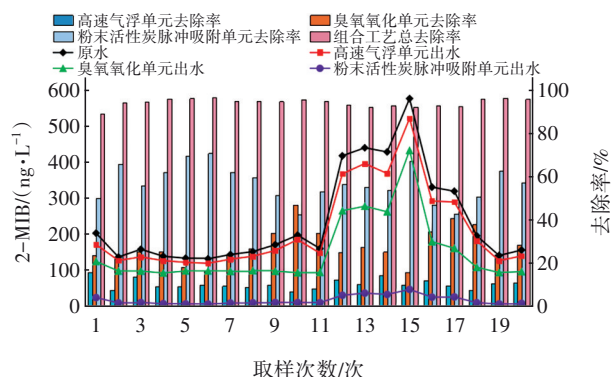


图5 对2-MIB的去除效果

Fig.5 Removal effect of 2-MIB

高锰酸盐指数方面,原水为5.4~9.6 mg/L,经组合工艺处理后,出水为1.82~2.94 mg/L,去除率为61%~72%。臭氧与粉末活性炭组合有明显的协同作用,有助于强化对有机物的去除。其中,臭氧可将大分子有机物氧化成小分子有机物^[13],粉末活性炭可有效去除小分子有机物^[14]。

pH和碱度的变化如图6所示。可知,当向水体中投加30~37 mg/L碳酸氢钠后,组合工艺的出水碱度均高于进水,出水pH在7~8之间,平均值为7.8。这是因为碳酸氢钠在水体中会发生水解反应,其碳酸根会与水中的氢离子结合,形成碳酸氢根离子,进而导致水体中氢离子浓度降低。随着氢离子不断被消耗,水的电离平衡促使更多氢氧根离子产生,使得溶液的pH升高。此外,由于碳酸氢钠水解提高了水体中碳酸氢根浓度,所以水体的碱度也随之增加。

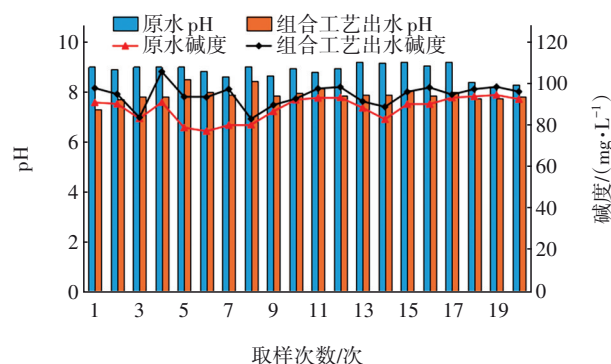


图6 pH和碱度的变化

Fig.6 Change in pH and alkalinity

通过调整三氯化铁和聚合氯化铝投加量,组合工艺出水的余铝(溶解态)均值为0.05 mg/L,余铁(溶解态)均值为0.01 mg/L,均低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)限值要求。这里的溶解态是指水样经0.45 μm膜过滤后测试的铁和铝含量,而组合工艺出水中不溶解的余铝、余铁可在下游净水厂的混凝沉淀工艺中被去除。

3 结论

① 采用高速气浮+臭氧氧化+粉末活性炭脉冲吸附组合工艺对北方某大型水库原水进行预处理后,出水藻类计数 $<2\,000\times 10^4$ 个/L,去除率为86%~93%;出水叶绿素a $<1\,\mu\text{g/L}$,去除率 $>98\%$;当原水2-MIB $\leq 200\,\text{ng/L}$ 时组合工艺出水2-MIB $\leq 10\,\text{ng/L}$,当原水2-MIB在200~400 ng/L之间时出水2-MIB $\leq 30\,\text{ng/L}$;组合工艺对高锰酸盐指数的去除效果显著,去除率 $>60\%$;在粉末活性炭脉冲吸附单元进水端投加30~37 mg/L碳酸氢钠后,组合工艺出水碱度高于进水,pH在7~8之间。

② 北方某大型水库原水适合采用该组合工艺进行预处理,出水水质可满足下游以常规处理为主的净水厂对原水水质的要求。

参考文献:

- [1] 苏晓,韩正双,张楠,等. 天津某水库2-MIB季节性变化规律及来源分析[J]. 中国给水排水,2020,36(16): 39-45.
SU Xiao, HAN Zhengshuang, ZHANG Nan, et al. Seasonal variation rule and source analysis of 2-MIB in a reservoir of Tianjin [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16): 39-45 (in Chinese).
- [2] 袁俊,朱光灿,吕锡武. 气浮除藻工艺的比较及影响因素[J]. 净水技术,2012,31(6): 25-28, 76.
YUAN Jun, ZHU Guangcan, LÜ Xiwu. Comparison and influence factors of algae removal with air-flotation processes [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(6): 25-28, 76 (in Chinese).
- [3] 何才昌. 高速气浮在伊朗大型海水淡化工程的应用[J]. 中国给水排水,2023,39(18): 141-146.
HE Caichang. Application of high-speed air flotation in large seawater desalination project in Iran [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 141-146 (in Chinese).
- [4] 刘云奎. 净水厂气浮单元的系统性工艺优化及技术改

- 造[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16): 101-105.
- LIU Yunkui. Process optimization and technological upgrading of air flotation unit in a waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40 (16) : 101-105 (in Chinese).
- [5] 苏晓,贾霞珍,胡建坤,等. 饮用水中Geosmin和2-MIB去除技术研究现状及展望[J]. 给水排水, 2021, 47(S1): 517-523.
- SU Xiao, JIA Xiazhen, HU Jiankun, *et al.* Research status and prospect of geosmin and 2-MIB removal technology in drinking water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(S1): 517-523 (in Chinese).
- [6] 高蕴宸. 粉末活性炭-臭氧工艺去除水中嗅味中试研究[J]. 给水排水, 2022, 48(S1): 705-710.
- GAO Yuncheng. Pilot study on the removal of odor of water by powdered activated carbon-ozone process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(S1): 705-710 (in Chinese).
- [7] 王瑞杰,王慕,杨舒,等. 太湖流域某净水厂嗅味物质变化特征研究[J]. 给水排水, 2021, 47(3): 25-29.
- WANG Ruijie. WANG Mu, YANG Shu, *et al.* Variety characteristics of odor and taste compounds in water plant of Taihu basin [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(3): 25-29 (in Chinese).
- [8] 李一兵,方华,韩正双,等. 活性炭指标对吸附去除2-MIB和土臭素效能的影响[J]. 工业水处理, 2021, 41(10): 91-96.
- LI Yibing, FANG Hua, HAN Zhengshuang, *et al.* Effect of powder activated carbon indicators on the adsorption removal efficiency of 2-MIB and geosmin [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(10): 91-96 (in Chinese).
- [9] 宣雍祺,周丽,邓慧萍,等. 生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3864-3869.
- XUAN Yongqi, ZHOU Li, DENG Huiping, *et al.* Odorants removal and microbial characteristics in treatment of micro-polluted source water with biological powdered activated carbon-ultrafiltration combined process [J]. Environmental Science, 2016, 37 (10) : 3864-3869 (in Chinese).
- [10] 赵新娟,刘伯一. 短流程超滤膜工艺在凌庄水厂的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 71-74.
- ZHAO Xinjuan, LIU Boyi. Application of short process ultrafiltration membrane in Lingzhuang Waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (10) : 71-74 (in Chinese).
- [11] 誉绚仪,陈锋,华勃. 固相微萃取-气质联用法测定水中痕量土臭素和二甲基异茨醇[J]. 环境科技, 2015, 28(1): 48-53.
- YU Xuanyi, CHEN Feng, HUA Bo. Determination of geosmin and 2-methylisoborneolin water with solid microextraction-GC/MS [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 28(1): 48-53 (in Chinese).
- [12] 陆纳新,袁君,高乃云,等. 不同预氧化剂和臭氧-生物活性炭工艺对水中有机物和氨氮的去除效果[J]. 净水技术, 2014, 33(S2): 98-101, 112.
- LU Naxin, YUAN Jun, GAO Naiyun, *et al.* Removal effect of different pre-oxidants and ozone-BAC process for organic compounds and ammonia in water [J]. Water Purification Technology, 2014, 33 (S2) : 98-101, 112 (in Chinese).
- [13] 宋亚丽,陈珂波,朱文芳,等. 臭氧对超滤膜处理钱塘江水中有机物的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(4): 362-366, 374.
- SONG Yali, CHEN Kebo, ZHU Wenfang, *et al.* Effect of ozone on organic matter in raw water of Qiantang River during ultrafiltration process [J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39 (4) : 362-366, 374 (in Chinese).
- [14] 董秉直,高昊旻,胡孟柳. 臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2732-2739.
- DONG Bingzhi, GAO Haoyang, HU Mengliu. Effects and mechanism of the combination of ozone-PAC as a pretreatment for the reduction of membrane fouling [J]. Environmental Science, 2018, 39 (6) : 2732-2739 (in Chinese).

作者简介:李洪清(1976-),男,天津人,本科,正高级工程师,主要从事市政给排水工程设计工作。

E-mail:hmlhq2011@126.com

收稿日期:2024-08-06

修回日期:2024-09-16

(编辑:任莹莹)