

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.004

# 南方某常规工艺水厂应对原水低2-MIB的工艺优化

郭晓鸣, 谢耀华, 黄慧, 刘奋强  
(深圳市深水龙华水务有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 为了应对《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)对2-甲基异莰醇(2-MIB)限值的新要求,针对原水低浓度2-MIB(10~25 ng/L)的去除问题,在南方某常规工艺水厂开展了生产性试验,考察了前加氯、粉末活性炭单独投加以及和高锰酸钾联用的去除效果和经济学。结果表明,前加氯会造成出厂水中2-MIB浓度升高,而在原水泵站投加粉末活性炭的效果优于在反应池内投加。更重要的是,粉末活性炭与高锰酸钾联用不仅能达到与单独粉末活性炭相当的去除效果,而且成本更低。研究证实,在常规工艺水厂中,采用在原水泵站投加粉末活性炭与厂内投加高锰酸钾的方法,能够有效去除原水中低浓度的2-MIB,确保出厂水水质符合新的国家标准。

**关键词:** 2-甲基异莰醇; 常规工艺; 前加氯; 粉末活性炭; 高锰酸钾

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0022-06

## Process Optimization for a Conventional Water Treatment Plant in Southern China to Address Low Levels of 2-MIB in Raw Water

GUO Xiao-ming, XIE Yao-hua, HUANG Hui, LIU Fen-qiang  
(Shenzhen Longhua Water Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** To address the new requirements for the limit of 2-MIB in the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022), a production-scale experiment was conducted at a conventional water treatment plant in southern China to tackle the removal of low concentrations of 2-MIB (10-25 ng/L) in the raw water. The study employed different treatment methods, including pre-chlorination, the separate addition of powdered activated carbon (PAC), and its combined application with potassium permanganate, to evaluate their removal efficiency and cost-effectiveness. The results indicated that pre-chlorination led to an increase in the concentration of 2-MIB in the finished water, whereas the addition of PAC at the raw water pump station was more effective than adding it in the reaction tank. More significantly, the combination of PAC with potassium permanganate not only achieved the same removal effect as PAC alone, but also had a lower cost. The research confirms that the strategy of adding PAC at the pump station in conjunction with potassium permanganate within the plant can effectively remove low concentration of 2-MIB in the raw water, ensuring that the finished water meets the new standards.

**Key words:** 2-MIB; conventional water treatment process; pre-chlorination; powdered activated carbon; potassium permanganate

南方某常规工艺水厂以管道水作为主要水源,同时以水库水作为应急备用水源。该水厂面临的主要问题是原水频繁出现臭味物质,这一情况在秋

冬季节(9月—12月)尤为显著,往往导致出厂水臭味异常,从而引发用户投诉。经检测发现,原水中的致臭物质主要为2-甲基异莰醇(2-MIB)<sup>[1]</sup>。根据

相关研究,2-MIB主要来源于藻类和放线菌的代谢活动<sup>[2]</sup>。2-MIB作为一种含有叔醇基团的半挥发性有机化合物,传统水处理工艺难以对其进行有效去除。为此,水厂通常在常规处理流程之前实施预处理,如预氧化、吸附等,以增强对2-MIB的去除效果。然而,仅依赖前加氯或高锰酸钾预氧化,对2-MIB的去除效果并不理想<sup>[3]</sup>。相比之下,吸附是一种更为有效的2-MIB去除手段,常用的吸附剂有粉末活性炭(PAC)、颗粒活性炭、沸石等,在应对偶发性臭味污染事件时,PAC因其较高的经济性而成为首选<sup>[4]</sup>。

2023年4月1日实施的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)在扩展指标中新增了对2-MIB的要求,其限值设定为10 ng/L,这无疑对采用常规工艺的水厂运行管理和应急处理能力提出了更为严格的要求,促使水厂必须采取更为高效的处理措施来确保水质安全<sup>[5]</sup>。

生产实践表明,在常规工艺水厂中,当原水中的2-MIB浓度超过10 ng/L时,出厂水存在较高的2-MIB超标风险。近年来,南方某常规工艺水厂面临的水源臭味问题尤为突出,其原水中的2-MIB浓度常常处于10~25 ng/L之间,导致出厂水多次出现2-MIB超标现象,有时甚至出现出厂水的2-MIB浓度高于原水的情况。面对这一挑战,该水厂在原水泵站安装了粉末活性炭一体化投加系统,并持续对此进行探索,旨在开发出一套适用于常规水处理工艺的2-MIB去除方法。以该常规工艺水厂为研究对象,对2-MIB的去除方法进行了深入分析与优化,以确保出厂水质满足新国标要求。

## 1 水厂概况及试验方法

### 1.1 水厂概况

南方某水厂的工艺流程见图1。

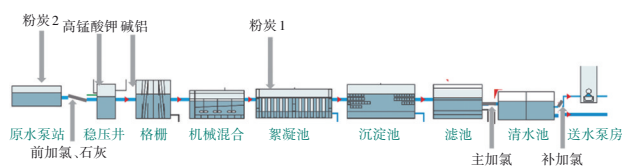


图1 水厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of a water treatment plant

该水厂设计规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,原水取自北线二期供水管道茜坑分水口,经由原水泵站提升后,通过一根DN1 600的原水管输送(原水管长度约为

1.2 km)至厂区稳压井,经过稳压井后,原水进入混合反应沉淀池,在混凝沉淀过程中去除大部分污染物,然后流入V型砂滤池。过滤后进行加氯消毒,再进入清水池,最后通过送水泵房输送至管网。

从原水泵站到厂区稳压井的时间约为15 min,混合时间为48 s,絮凝时间为22 min,沉淀时间为2.3 h,V型滤池的滤速为6.84 m/h,清水池容积为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。原水泵站设粉末活性炭一体式投加装置,于2023年底投入使用。该装置能够将预先溶解的粉末活性炭直接投加到原水管道中,投量在5~40 mg/L之间。进稳压井前,投加石灰与次氯酸钠(有效氯含量 $\geq 10\%$ ),在稳压井上设置高锰酸钾投加点。在进入混合池前的管道上投加碱铝。在反应池前端,水厂还设置了一个厂内粉末活性炭投加点,以便在应急情况下快速投加活性炭,增强对臭味物质的去除能力。V型滤池采用自动反冲洗,周期一般为24 h或48 h。滤后投加次氯酸钠消毒,经清水池后输送至管网。

### 1.2 生产性试验方法

试验是在实际生产环境中进行的,这意味着每次试验的调整都是针对整个水处理工艺流程。每次调整工艺参数后,为了确保能够准确反映调整效果,会在6 h后进行取样——这个时间间隔是基于从原水进入水厂到出厂完成整个处理过程所需的时间。取样后检测水样中的2-MIB浓度。

### 1.3 试验材料

次氯酸钠的有效氯含量为10%。煤质粉末活性炭的碘吸附值 $\geq 900 \text{ mg/g}$ ,亚甲蓝值 $\geq 150 \text{ mg/g}$ ,粒度 $\leq 325$ 目,pH为6~10,比表面积 $\geq 900 \text{ m}^2/\text{g}$ 。高锰酸钾为工业高锰酸钾,深紫色且具有金属光泽,高锰酸钾含量 $\geq 99.4\%$ 。

### 1.4 样品采集与检测

样品的采集严格遵循以下方法:使用25 mL棕色玻璃瓶作为取样容器,在各个指定的取样点进行取样。取样前首先使用待采集水样对瓶子内部进行三次润洗。取样时,需缓慢装取,直至水样溢出,随后立即盖上瓶盖并拧紧,然后将瓶子倒置,检查瓶内是否有气泡。如果发现有气泡,必须重新取样,直至瓶内无气泡才视为取样成功。样品包括泵站原水、厂内原水(进入水厂后的原水)及出厂水。

采用在《生活饮用水标准检验方法第8部分:有机物指标》(GB/T 5750.8—2023)的基础上优化的气

相色谱-质谱法(GC-MS)测定水中的2-MIB浓度<sup>[6]</sup>。具体信息如下:仪器为Trace-1300-ISQ(美国ThermoFisher);进样器为CTC三合一自动进样器(美国ThermoFisher);色谱柱为DB-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm,美国Agilent公司);萃取头为50/30 μm 二乙烯基苯/羧基/聚二甲基硅氧烷(美国Supelco)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 前加氯对2-MIB的去除效果

试验时间为2021年—2023年,水厂采用了前加氯预处理,投加量为1.0 mg/L,在此期间监测到原水2-MIB浓度为6.11~24.84 ng/L,出厂水2-MIB浓度为8.56~24.42 ng/L(见图2)。可见,现有的前加氯工艺未能有效去除2-MIB,甚至造成了2-MIB在水处理过程中的生成或迁移,导致出厂水2-MIB浓度高于原水的现象,从而影响了出水水质。

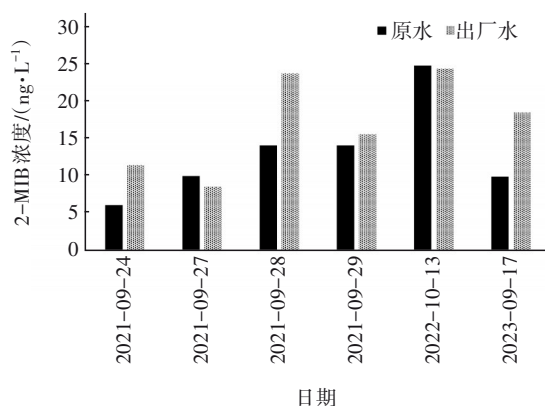


图2 前加氯对原水中2-MIB的去除效果

Fig.2 Removal effect of 2-MIB in raw water by pre-chlorination

研究表明<sup>[7-8]</sup>,次氯酸钠作为预氧化剂在应用过程中展现出较强的细胞膜穿透能力,能够迅速对藻细胞产生作用,导致其失活。然而,这种作用机制可能具有双重效应:一方面,它能够破坏藻细胞,但另一方面,这也可能导致藻细胞内部的2-MIB被释放到水体中。由于次氯酸钠的氧化能力有限,它无法完全降解2-MIB,这可能导致水体中胞外2-MIB浓度增加,与水厂实际生产中观察到的现象相吻合。因此,在水源出现藻类繁殖或2-MIB浓度异常的情况下,应谨慎考虑使用预氧化剂。在此种情况下,水厂需要综合考虑预氧化剂对进水中藻细胞的影响,进行全面的风险评估,以决定是否采用以及如何采用预氧化处理。

### 2.2 厂内投加PAC对2-MIB的去除效果

有研究指出,粉末活性炭吸附是去除水中嗅味物质,尤其是2-MIB的一种有效方法<sup>[9-11]</sup>。在2021年和2022年原水中出现2-MIB时,水厂停止前加氯投加,并开启了厂内粉末活性炭投加。由于原水泵站粉末活性炭投加系统尚未建设完成,水厂仅能在反应池中投加粉末活性炭,投加量为15 mg/L,对2-MIB的去除效果如图3所示。当原水中的2-MIB浓度在8.74~17.87 ng/L时,尽管在反应池投加了15 mg/L的粉末活性炭,但出厂水中的2-MIB浓度仍高达7.97~12.35 ng/L,去除率仅为8%~41%,这表明整体去除效果并不理想,2-MIB浓度仍超出新国标要求。这可能是反应池的水力条件差导致粉末活性炭吸附动力弱造成的。在水厂的实际操作中,粉末活性炭溶解后直接投加在反应池存在一些局限性:反应池内水力条件逐渐趋于稳定,混合效果不理想,导致粉末活性炭未能与水中的2-MIB充分接触;此外,投加的粉末活性炭可能会被反应池中形成的矾花直接包裹,并随之沉降池底,从而减少了粉末活性炭与水中污染物的接触面积和时间,导致对2-MIB的去除效果不佳。

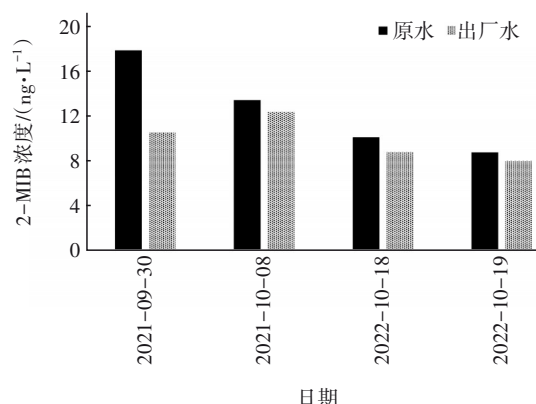


图3 厂内投加粉末活性炭对原水中2-MIB的去除效果

Fig.3 Removal effect of PAC on 2-MIB in raw water

### 2.3 泵站单独投加PAC对2-MIB的去除效果

在面临出厂水2-MIB必须满足新国标要求的压力下,水厂于2023年在原水泵站建成了一体化粉末活性炭投加系统,随即在原水泵站投加粉末活性炭开展试验研究。在原水2-MIB浓度为10.52~12.89 ng/L的条件下,采用湿法将粉末活性炭投加至原水管道内,投加量为15 mg/L,原水管道混合时间为15 min,停止厂内前加氯及厂内粉末活性炭投加,结果如图4所示。



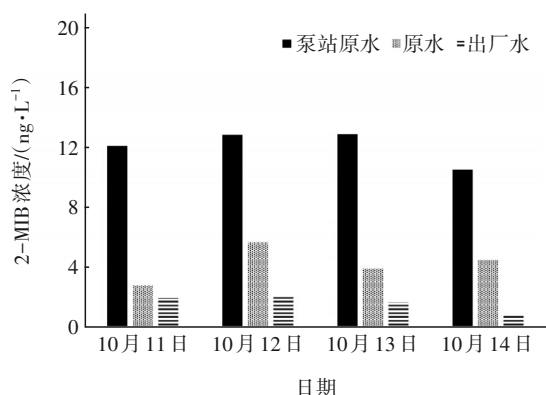


图4 在泵站投加 PAC 对 2-MIB 的去除效果

Fig.4 Removal effect of 2-MIB by adding PAC at pumping station

由图4可知,在原水泵站投加粉末活性炭后,同批次原水进厂后2-MIB浓度显著降低至2.77~5.66 ng/L,这表明仅在原水管道内投加粉末活性炭的条件下,2-MIB去除率可达到56%~77%。随后,经过常规工艺处理后,出厂水2-MIB浓度进一步降低至0.74~2.05 ng/L,整体去除率在84%~93%。由此可见,在原水泵站投加粉末活性炭对2-MIB具有较好的去除效果。这可能是由于原水管道内水力条件较好,有助于粉末活性炭与2-MIB的充分接触和吸附,这与文献[12]的研究结果相一致。在本试验条件下,粉末活性炭投加量为15 mg/L、吸附时间为15 min,相较于其他文献研究,其投加量偏低、吸附时间偏短,但同样取得了良好的去除效果,这说明对于原水2-MIB浓度较低的常规工艺水厂,粉末活性炭投加量为15 mg/L、吸附时间为15 min较为合适。同时,文献[13]指出,当粉末活性炭投加量足够时,延长吸附时间对2-MIB的去除率没有太大影响。这意味着在确保足够投加量的前提下,可以不必过分延长吸附时间,从而优化处理流程和降低成本。

#### 2.4 PAC与高锰酸钾联用对2-MIB的去除效果

高锰酸钾与粉末活性炭联用能够有效去除藻类产生的臭味物质,且这种方式还可以减少粉末活性炭的用量,从而达到了节约药剂成本的目的<sup>[14-16]</sup>。为此,考察了在原水泵站投加10 mg/L粉末活性炭与水厂内投加0.2 mg/L高锰酸钾时对2-MIB的去除效果,结果见图5。在泵站原水2-MIB浓度为9.67~23.67 ng/L的条件下,经过原水管道内粉末活性炭的吸附,原水到达厂内后2-MIB浓度降至3.84~10.56 ng/L,去除率为55%~60%。随后,再经

厂内高锰酸钾预氧化、常规工艺处理后,最终出厂水的2-MIB浓度下降至2.86~4.93 ng/L,整体去除率为54%~88%。这一结果表明,联合工艺与单独在泵站投加15 mg/L粉末活性炭的效果基本相当。同时,试验结果还表明,高锰酸钾作为预氧化剂去除2-MIB可以避免藻细胞释放胞内2-MIB至水体中,这可能是由于高锰酸钾对藻类的氧化有所滞后,不如次氯酸钠更易穿透细胞膜。此外,高锰酸钾被还原后产生的中间产物二氧化锰具有一定的吸附能力,可以吸附一定量的2-MIB,从而进一步提高了对2-MIB的去除效果。

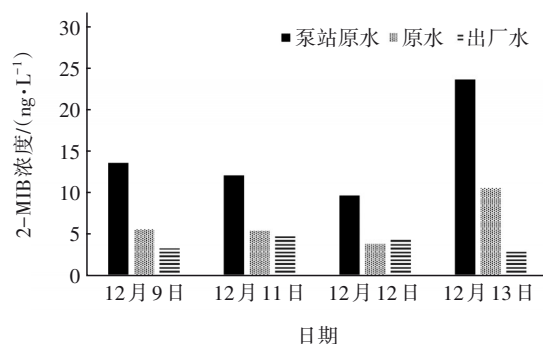


图5 PAC与高锰酸钾联用对原水中2-MIB的去除效果

Fig.5 Removal of 2-MIB in raw water by the combination of PAC and potassium permanganate

2.3节和2.4节的结果表明,两组生产性试验的出厂水2-MIB浓度均达到了国家标准,并且保持在较低水平。对两种工艺进行经济性比较,水厂采购粉末活性炭、高锰酸钾的单价分别为7200和19500元/t,按照供水量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 计,单独投加15 mg/L粉末活性炭的费用约为21600元/d;而在联用工艺中,由于粉末活性炭的投加量减少,且高锰酸钾用量相对较低,整体成本下降至15180元/d。即在获得同样去除效果的情况下,粉末活性炭和高锰酸钾联用的方式更加经济。

#### 2.5 降低PAC投量对联用工艺去除2-MIB的影响

当原水中的2-MIB浓度进一步降至约10 ng/L时,水厂为确保出厂水2-MIB达标,并进一步降低药剂费用,将泵站PAC投加量降低至5 mg/L,并在厂内投加0.2 mg/L的高锰酸钾,结果如图6所示。

由图6可知,当泵站原水中的2-MIB浓度在7.22~10.56 ng/L时,进厂原水的2-MIB浓度降至5.98~7.77 ng/L,去除率达到了16%~40%,出厂水的2-MIB浓度为2.65~4.14 ng/L,整体去除率为43%~

75%,即出厂水的2-MIB浓度稳定达标。这表明,即使是在降低粉末活性炭投加量的情况下,结合高锰酸钾预氧化处理,出厂水中的2-MIB浓度仍然能够稳定达标,并且保持在较低水平,远低于10 ng/L的限值。

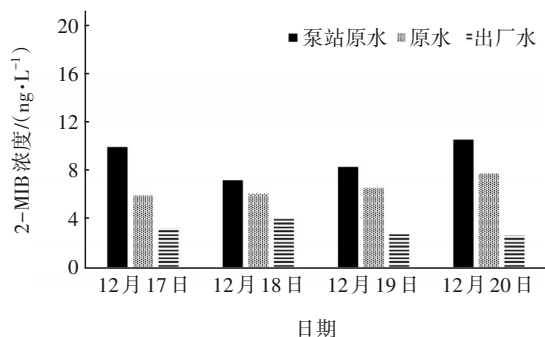


图6 泵站低量投加PAC与厂内高锰酸钾联用对2-MIB的去除效果

Fig.6 Removal of 2-MIB in raw water by the combination of low dosage PAC and potassium permanganate

### 3 结论

① 对于常规工艺水厂,当原水中出现藻源类2-MIB时,应谨慎选择次氯酸钠作为预氧化剂。必要时应停止前加次氯酸钠,避免藻细胞内部2-MIB释放到水中,造成出厂水2-MIB浓度升高的现象。

② 在原水泵站投加粉末活性炭对2-MIB的去除效果优于在厂内反应池中投加。

③ 在相近的2-MIB去除效果下,粉末活性炭与高锰酸钾联用的经济性优于单独投加粉末活性炭。

④ 在原水2-MIB浓度较低的情况下(10~25 ng/L左右),常规工艺水厂有效的应对措施是在原水泵站投加适量(5~15 mg/L)的粉末活性炭,再联用高锰酸钾,可使出厂水2-MIB浓度处于较低水平,满足10 ng/L的限值要求。

### 参考文献:

[1] 刘玉红,陈勇,俞蕴芳,等. 2-MIB在某深度处理水厂中的去除规律研究[J]. 中国给水排水,2018,34(1): 124-127.  
LIU Yuhong, CHEN Yong, YU Yunfang, *et al.* Removal of 2-MIB in a water plant with advanced treatment process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(1): 124-127 (in Chinese).

[2] 宋连心,王洪波,薄其馨,等. 饮用水中嗅味物质的检测与去除研究进展[J]. 应用化工,2024,53(4): 955-958,963.

SONG Lianxin, WANG Hongbo, BO Qixin, *et al.* Research progress in the detection and removal of odorants in drinking water [J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(4): 955-958,963 (in Chinese).

[3] 李学艳,马军,陈忠林,等. 若干氧化剂对水中嗅味物质2-MIB的氧化去除[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2007,24(1): 76-80.

LI Xueyan, MA Jun, CHEN Zhonglin, *et al.* Comparison on the removal of 2-methylisoborneol by several oxidants in drinking water [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2007, 24 (1): 76-80 (in Chinese).

[4] 张晓勇,张金池,于波. 饮用水中致嗅物质的去除技术和应急措施研究[J]. 环境科学与管理,2015,40(9): 142-145.

ZHANG Xiaoyong, ZHANG Jinchi, YU Bo. Removal and emergency measures of substance-induced olfactory in drinking water [J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(9): 142-145 (in Chinese).

[5] 肖丹,南军,范雅倩,等. 某自来水厂应对水源藻类突发污染的运行探索与实践[J]. 中国给水排水,2024, 40(3): 9-14.

XIAO Dan, NAN Jun, FAN Yaqian, *et al.* Exploration and practice of a waterworks to deal with sudden algae pollution in water source [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(3): 9-14 (in Chinese).

[6] 彭睿,张文艺. 南方水体中的2-甲基异莰醇和土臭素检测方法优化[J]. 净水技术,2023,42(11): 200-205.

PENG Rui, ZHANG Wenyi. Optimization of determination method for 2-MIB and geosmin in southern water body [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11): 200-205 (in Chinese).

[7] 庞一鸣,陈淑华,徐杭州,等. 伪鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)及其产生2-甲基异莰醇(2-MIB)的研究进展[J]. 生态学杂志,2021,40(5): 1530-1548.

PANG Yiming, CHEN Shuhua, XU Hangzhou, *et al.* Research progress on *Pseudanabaena* sp. and its metabolite 2-methylisoborneol (2-MIB) [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40 (5): 1530-1548 (in Chinese).

[8] 胡增宝,乔龙君,何苗,等. 高锰酸钾+粉末活性炭联用去除2-MIB在水厂中的应用[J]. 城镇供水,2024

- (1):19-24.  
HU Zengbao, QIAO Longjun, HE Miao, *et al.* Application of potassium permanganate + powdered activated carbon to remove 2-MIB in water plant [J]. City and Town Water Supply, 2024 (1): 19-24 (in Chinese).
- [9] 闫慧敏,韩正双,白雪娟,等. 天津某水库含嗅味物质原水应急处理方式研究[J]. 海河水利, 2024(6): 91-97.  
YAN Huimin, HAN Zhengshuang, BAI Xuejuan, *et al.* Emergency treatment of raw water containing taste and odor compounds in a reservoir of Tianjin [J]. Haihe Water Resources, 2024 (6): 91-97 (in Chinese).
- [10] 顾玉蓉,李旭,董紫君,等. 深圳市某水库嗅味物质时空分布及去除研究[J]. 给水排水, 2021, 47(S2): 6-10, 17.  
GU Yurong, LI Xu, DONG Zijun, *et al.* Time space distribution of taste and odor compounds and their removal in a reservoir in Shenzhen [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(S2): 6-10, 17 (in Chinese).
- [11] 余梁,蒋旭,金晶,等. 超长咸潮期间松浦取水应急支援青草沙原水系统[J]. 中国给水排水, 2024, 40(12): 89-93.  
YU Liang, JIANG Xu, JIN Jing, *et al.* Practice of Songpu water intake emergency support for Qingcaosha Reservoir during the extraordinary saline tide [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40 (12): 89-93 (in Chinese).
- [12] 李俊民. 粉末活性炭吸附及强化混凝去除水中嗅味物质的效能研究[D]. 长春:吉林建筑大学, 2015.  
LI Junmin. The Removal of Taste and Odor Substances in Water by Powdered Activated Carbon Adsorption and Enhanced Coagulation [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2015 (in Chinese).
- [13] 苏晓,韩宏大,胡建坤,等. 预氧化联合PAC强化混凝沉淀去除引滦水中2-MIB[J]. 中国给水排水, 2023, 39(21): 27-33.  
SU Xiao, HAN Hongda, HU Jiankun, *et al.* Pre-oxidation combined with powdered activated carbon enhanced coagulation-sedimentation for removal of 2-methylisoborneol in water from Luanhe Diversion Project [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(21): 27-33 (in Chinese).
- [14] 陈忠林,王东田,李圭白,等. 高锰酸钾复合药剂除藻臭试验[J]. 中国给水排水, 2000, 16(11): 58-60.  
CHEN Zhonglin, WANG Dongtian, LI Guibai, *et al.* Potassium permanganate compound reagent to remove algal odor test [J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(11): 58-60 (in Chinese).
- [15] 殷祺,倪先哲,鞠佳伟,等. 东太湖原水2-MIB污染应急处理技术[J]. 净水技术, 2019, 38(11): 84-86, 128.  
YIN Qi, NI Xianzhe, JU Jiawei, *et al.* Technological process of emergency treatment for 2-MIB pollution in raw water of East Taihu Lake [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(11): 84-86, 128 (in Chinese).
- [16] 李思敏,碗莹,唐锋兵,等. 负载高锰酸钾活性炭强化混凝除藻效能[J]. 中国给水排水, 2020, 36(19): 67-71, 76.  
LI Simin, WAN Ying, TANG Fengbing, *et al.* Algae removal efficiency of coagulation enhanced by activated carbon loaded with potassium permanganate [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (19): 67-71, 76 (in Chinese).

作者简介:郭晓鸣(1992- ),女,河南鹤壁人,硕士,工程师,主要研究方向为饮用水处理技术。

E-mail:823389723@qq.com

收稿日期:2024-10-29

修回日期:2024-12-13

(编辑:李德强)