

工程实例

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.20.014

水厂应对“龙舟水”期间高浊原水的措施及成效

李婷¹, 张祥社¹, 吴雪雅², 黄婷婷¹, 陈海松¹, 王长平¹

(1. 深水龙岗水务集团有限公司, 广东 深圳 518055; 2. 深圳市环境水务集团有限公司, 广东 深圳 518031)

摘要: 深圳某水厂在“龙舟水”期间原水水质波动明显, 浊度最高值从平时的131 NTU增至1 000 NTU。此外, COD_{Mn}、NH₄⁺-N、铁、锰和色度等其他指标也增长至少75%, 给供水安全带来巨大风险。针对这一问题, 该水厂总结过去多年应对“龙舟水”水质变化的经验, 建立高锰酸钾预氧化药剂、PAC混凝剂与原水浊度的线性关系, 制定从调蓄水量、增加预氧化、优化药剂投加和排泥周期到加强原水预警等一系列科学应对措施, 取得较为显著的效果。实践表明: 在原水水质突跃式变化情况下, 尤其在原水浊度持续超过500 NTU、原水锰高于0.5 mg/L的情况下, 出厂水平均浊度和锰分别能够达到低于0.15 NTU和0.05 mg/L, 远低于相应的出厂水标准(1 NTU和0.1 mg/L), 其他出厂水水质指标均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。

关键词: 龙舟水; 水质突变; 浊度; 除铁除锰; 预氧化

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)20-0094-06

Measures and Effectiveness of a Waterworks in Addressing High Turbidity Raw Water during “Dragon Boat Rain” Period

LI Ting¹, ZHANG Xiang-she¹, WU Xue-ya², HUANG Ting-ting¹, CHEN Hai-song¹, WANG Chang-ping¹

(1. Shenshui Longgang Water Group Co. Ltd., Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen Water and Environment Group Co. Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract: “Dragon boat rain” refers to the persistent and large-scale heavy precipitation that occurs around the Dragon Boat Festival, typically in South China. Affecting by geographic position, the raw water quality of a waterworks in Shenzhen fluctuates significantly during this period. The maximum turbidity increases from the typical 131 NTU to 1 000 NTU. In addition, other parameters such as COD_{Mn}, NH₄⁺-N, Fe, Mn, and chromaticity have increased by at least 75%, posing substantial risks to the safety of water supply. Efficient response to such abrupt water quality changes is critical for ensuring secure potable water supply. To address this challenge, the waterworks synthesized years of operational experience in managing “dragon boat rain” impacts. Linear relationships were established between potassium permanganate pre-oxidation dosage, PAC dosage, and raw water turbidity. This waterworks formulated and implemented a comprehensive suite of scientific countermeasures, including the regulation of water quantity, enhanced pre-oxidation process, optimization of chemical dosage and sludge disposal,

基金项目: 广东省住房和城乡建设厅2025年科技创新计划自主选题项目(20250225K0009)

通信作者: 王长平 E-mail: wcp_4356@163.com

and strengthened early raw water quality warning. These integrated measures yielded significant practical outcomes: even during periods of abrupt raw water quality deterioration—particularly when turbidity exceeded 500 NTU and manganese levels surpassed 0.5 mg/L—the treated water consistently maintained average turbidity below 0.15 NTU and manganese levels below 0.05 mg/L, values significantly below the regulatory standards for treated water quality (1 NTU and 0.1 mg/L, respectively), with all other treated water parameters complying with the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022).

Key words: dragon boat rain; water quality variation; turbidity; removal of Fe/Mn; pre-oxidation process

“龙舟水”是指在端午节前后出现的持续性、大范围强降水现象,往往出现在我国华南地区。每年5月开始,广东地区进入“龙舟水”时期。水源地受暴雨影响,原水水质极易发生突发性波动,各类污染物浓度均有增加,浊度甚至会上升至平时的5~10倍。深圳某水厂采用“穿孔旋流混凝-平流沉淀-翻板滤池过滤-次氯酸钠消毒”的常规处理工艺,日常投加药剂主要为液体聚合氯化铝(PAC)、熟石灰和次氯酸钠。传统处理工艺难以应对高浊度原水,大量悬浮物不仅增加各工艺单元的运行负担,还给出水水质安全带来风险,对水厂日常生产运行构成挑战,例如,投药量增加,滤池负荷增大,颗粒易穿透沉淀池,甚至导致V型滤池堵塞、板结、过水不畅等。因此,采取有效措施应对水质波动、优化传统水厂运行管理方式非常必要。

1 水质突变情况

深圳某水厂的设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,原水取自东江干线,水质优良,基本可达到地表水Ⅱ类标准,自投产以来,运行良好,出水水质满足《生活饮

用水卫生标准》(GB 5749—2022)。

“龙舟水”期间,东部干线原水水质波动显著,原水水质对比如表1所示。由表1可知,与1月—3月水质相比,5月—6月原水水质波动显著,尤其是浊度增幅最为突出,由原来最高值131 NTU增至1 000 NTU。此外,其他指标数值也增长至少75%, COD_{Mn} 最高值由原来的3.68 mg/L增至7.68 mg/L,上升108.70%, NH_4^+-N 由0.16 mg/L增至0.28 mg/L,上升75%,铁由0.23 mg/L增至0.51 mg/L,上升121.74%,锰由0.09 mg/L增至0.19 mg/L,上升111.11%。

“龙舟水”期间常有大暴雨或突发性阵雨,初期雨水冲刷地面,地表径流中浊度、有机物、铁、锰等污染物浓度显著增加,因国内目前尚未建设完善的初期雨水径流收集处理设施,导致初期雨水径流往往直接排入地表水体,使东江干线水源水质突变,从而使水厂原水水质呈突发性波动。因此,在原水水质发生突发性、突跃式的波动情况下,为保障水厂的供水安全,需做好系统性保障工作。

表1 不同时期原水水质对比

Tab.1 Comparison of raw water quality at different periods

时间	pH	$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	浊度/NTU	水温/ $^{\circ}\text{C}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	铁/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	锰/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	色度/度
1月—3月	6.6~7.1	1.62~3.68	7.68~131	14~21	0.02~0.16	0.08~0.23	0.05~0.09	15~60
5月—6月	6.8~7.2	1.78~7.68	30.4~1 000.0	22~28	0.13~0.28	0.12~0.51	0.07~0.19	30~120

2 水厂应对措施

2.1 增加高锰酸钾预氧化

针对原水浊度、铁、锰和 COD_{Mn} 高的水质波动现象,投加高锰酸钾进行预氧化可强化污染物去除效果^[1-2]。主要作用:①高锰酸钾具有强氧化性,可加速水中有机物降解^[3]。有机物的碳碳双键被破坏,转化为小分子有机物或者被矿化为 CO_2 ,有效降低

COD_{Mn} ,减轻后续单元的有机负荷^[4-5]。②可提高铁、锰价态,促进铁、锰在后续单元沉降^[6]。高锰酸钾中的+7价锰被还原为+4价,原水中的+2价锰被氧化为+4价,转换为水合态的 MnO_2 。水中溶解态的 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} ,在中性条件下生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀。③高锰酸钾氧化的中间产物——新生态水合二氧化锰,一方面可以强化催化氧化有机物,另一

方面二氧化锰在水中溶解度很小、比表面积较大,具有较好的吸附卷扫效果,可有效强化后续混凝单元的混凝效果^[7-8]。

根据原水水质变化规律及多年的生产运行经验,该水厂确定在配水井投加高锰酸钾药剂进行预氧化。高锰酸钾通过加药泵送至配水井,利用水力混合均匀。经反复实践,构建了预氧化高锰酸钾投加量与原水浊度变化的相关性曲线(见图1),用于指导实际生产。高锰酸钾的投加量主要根据进水浊度调整,随着进水浊度增加,逐步增大高锰酸钾投加量,确保出厂水水质达标。尽管高锰酸钾预氧化效果显著,但高锰酸钾投加量过多将导致出水色度超标及锰污染,且处理成本较高,因此需科学、严格地控制高锰酸钾投加量。该厂设置了高锰酸钾控制上限,即最大投加量不超过原水中锰含量2倍,且反应池末端不能出现红色尾水,以避免出水锰超标。

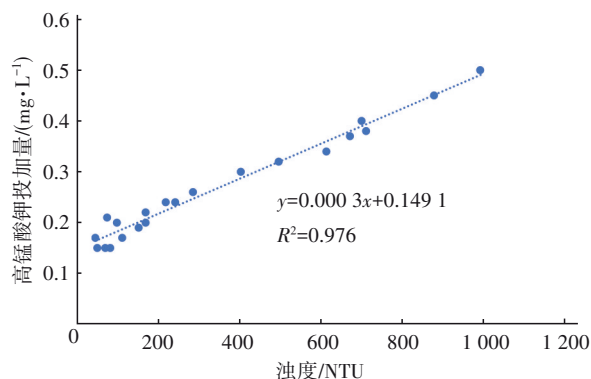


图1 原水浊度与高锰酸钾投加量的关系

Fig.1 Relationship between raw water turbidity and KMnO_4 dosing

2.2 优化混凝剂投加量

PAC是一种给水处理中常用的高分子混凝剂。在压缩双电层作用下,胶粒扩散层变薄、胶粒之间静电斥力降低而脱稳,发生凝聚。PAC水解缩聚产生的线性高分子聚合物,可以黏结架桥促进絮凝;水解产生的沉淀物在下沉过程中,会卷集网捕水中的颗粒物和胶体,形成较大的矾花,从而有效降低原水浊度。

石灰是一种常见的助凝剂,主要用于补充碱度,改善混凝条件。优化混凝剂PAC和助凝剂石灰投加量,调节原水pH,可强化混凝效果。混凝过程伴随着复杂的水解反应,会不断降低反应pH,而当

pH较低时,不利于混凝过程进行,因此需要通过投加石灰调节原水pH,使混凝过程控制在最佳pH范围,以保证混凝效果。在pH为5.50~7.75范围内,水中铝盐的存在形式主要为 $\text{Al}_3(\text{OH})_3^{3+}$,也是主要起混凝作用的形态^[9]。若pH超过8.0,PAC水解产物带负电,仅能起架桥作用,混凝效果下降^[10]。有研究^[11]表明,在高锰酸钾预氧化过程中pH为7.5时可以取得最佳混凝效果。

该厂基于上述强化混凝的原理及生产经验,通过加药泵将石灰送至反应池前端,利用水力混合均匀,投加石灰后原水pH控制在7.5左右。在保证出水达标的情况下,进水浊度与PAC投加量呈线性关系,如图2所示。

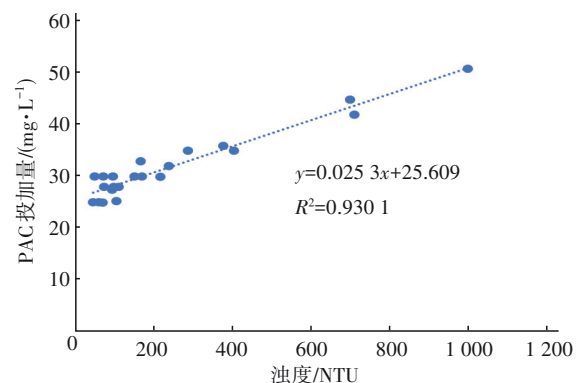


图2 原水浊度与PAC投加量的关系

Fig.2 Relationship between raw water turbidity and PAC dosing

由图2可知,随着原水浊度增加,PAC投加量逐步提高,在原水浊度为1000 NTU时,PAC投加量控制在50 mg/L左右。两者关系可为“龙舟水”期间浊度骤增的生产调整提供指引。

2.3 智慧厂站调控进水量、优化工艺运行

智慧厂站平台是“龙舟水”期间调控生产运行的重要平台。它主要包括数据访问层、基础平台层、业务逻辑层、展示层4个层次。数据访问层是各种信息数据来源的主要入口,包含对厂站内各种在线仪表、设备传感器、摄像头等数据的采集。基础平台层包括硬件服务器、网络、存储、网络安全设施、容灾系统、平台系统等,支撑系统的高效运行。业务逻辑层包括自控系统、安防监控及软件平台。自动化控制系统根据自来水厂工艺区别提供针对性的工艺控制系统、PLC控制系统、中控系统等控制策略及系统服务。安防监控包括视频监控、门禁、

道闸、周界安防、人员定位与智能穿戴等应用。软件平台包括智慧门户、智慧生产、智慧巡检、能耗管理、安全管理、知识与环境管理、决策分析等系统应用。展示层提供多种展现方式,包括电脑端、移动端、大屏端等。

在原水浊度为 500~1 000 NTU 的特殊时期,可通过智慧厂站平台优化调控水厂进水量。智慧厂站平台搭载智能工艺大脑,利用先进模型和算法搭建智慧系统,将设备运行参数监视、水质水量数据分析等工作交由智慧系统完成,并将监测、分析结果以可视化的方式呈现,帮助运行人员更高效、更安全地完成运行监控工作。管理人员可以提前在智慧厂站平台设置原水浊度报警限值,并上传应急水量调整方案。一旦浊度过高触发报警,在值班人员确认授权后,系统可以按照应急水量调整方案自动控制水泵与阀门,减少进水量,降低处理负荷,同时立即通过短信等形式通知技术人员,方便进行远程调控。

此外,为稳定生产,管理人员可以根据用水需求,在智慧厂站系统设置每天的生产计划,利用供水低谷期将清水池蓄满,按供水高峰期供水总量的平均值调节进水量,靠清水池满足高峰期供水需求,避免频繁调整药剂投加量造成的水质波动。此外,高浊度的原水势必在沉淀池沉积大量的污泥,如果每天不能彻底排除,会造成水体发臭。因此,在智慧厂站平台将排泥周期由原来的 1 次/2 d 缩短为 2 次/d,加强沉淀池排泥处理,避免积泥和跑矾花现象发生。

2.4 完善水质预警机制、加强巡检

完善的水质预警机制是保障紧急事件妥善处理的基石。为应对原水突变带来的水质风险,水厂管理人员编制了《厂级内控指标》《原水水质突变应急预案》,并将相关制度和预案上传至智慧厂站平台。当原水突变时,平台自动触发预警,当班人员可通过在线水质监测实时捕捉原水数据波动,同步联动视频巡检系统对取水口、预处理等工艺段的动态画面进行确认,并立即上报班长,班长通过视频巡检复核确认后,通过智能管理平台同步推送信息至厂长,同时启动《原水水质突变应急预案》,实现水质波动情况的数字化追踪与可视化管理,确保处理过程高效有序。

此外,在原水异常时期,巡检模式升级为“智慧

巡检+人工复核”双轨制:智能巡检机器人每小时沿预设路线完成一次全流程巡检,数据实时传输至中控大屏并生成混凝效果评估结论,供工作人员参考。人工巡检频次提高为 1 次/3 h,重点核验智慧巡检反馈的异常点位。高清摄像头配合矾花图像识别算法,可以实时分析沉淀池内矾花生成情况,联动智能加药系统自动生成药量调节建议。系统建议和化验班组烧杯试验数据交叉验证,当班人员结合实际工况确认后执行,实现从“经验判断”到“数据驱动”的精准调控。

3 实践效果

某年“龙舟水”影响持续 4 d(6 月 12 日—15 日),原水浊度持续超过 500 NTU,该水厂实施了动态调控。6 月 14 日暴雨结束,6 月 15 日 16:00 原水浊度降至 30 NTU 左右,恢复正常水平。

6 月 12 日 09:00,该水厂进厂原水浊度由 30 NTU 增至 900 NTU。智慧厂站平台发现浊度持续增高,设置启动应急预案并加强智慧巡检,经值班人员复核确认后,迅速增加高锰酸钾投加量至 0.3 mg/L,调整 PAC 投加量至 40 mg/L,通过石灰投加控制絮凝水 pH 为 7.5。调控后 09:10—09:16 期间,反应池显现高锰酸钾氧化锰的特征红色,反应池末端红色完全消失,其间沉后水在线浊度仪数据未见波动。在药剂投加量调整后 2 h 20 min[此为沉淀池水力停留时间(HRT),对应时刻 11:20]采集沉淀池出水水样,浊度降至 1.5 NTU(去除率为 99.8%);沉淀水进入滤池后 30 min(此为过滤 HRT,对应时刻 11:50)取样检测,滤后水浊度稳定在 0.10~0.16 NTU。沉后水、滤后水取样均考虑各工艺段的 HRT,避免调控的滞后性影响。

此后,智慧厂站平台按进水流量、进水浊度动态调节 PAC、高锰酸钾及石灰投加量,并根据反应池积泥状况(原 1 次/24 h 未能排净)将排泥周期压缩至 1 次/18 h。每日通过烧杯试验校准药剂投量,并基于在线仪表持续监测——所有滤后水及出厂水水样均在调控措施实施 2 h 50 min 后采集,确保数据真实反映调控措施对出水的影响。

3.1 出水浊度

“龙舟水”期间,水厂原水及出厂水浊度变化如图 3 所示。由图 3 可知,在原水浊度持续超过 500 NTU 的情况下,水厂对出水浊度控制效果显著,出

水浊度在 0.10~0.16 之间,平均出水浊度低于 0.15 NTU,远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)(浊度 ≤ 1 NTU)。这说明,该水厂现行的浊度控制药剂投加方式、投加类别和投加剂量科学可行,可在原水浊度持续走高时借鉴。

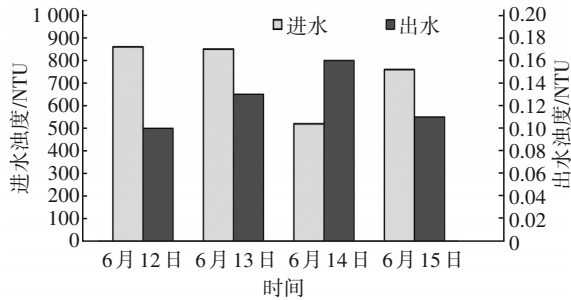


图3 “龙舟水”期间进、出水浊度变化

Fig.3 Variation of influent and effluent turbidity during “dragon boat rain” period

3.2 出水 pH

“龙舟水”期间,在原水中投加石灰调节 pH,强化混凝效果。进、出水 pH 的变化如图 4 所示。由图 4 可知,投加石灰后出厂水 pH 稳定在 7.5 左右,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。这说明,按照上述应对措施对原水增投石灰,不会造成出厂水 pH 超标,获得该良好效果的原因一方面是石灰投加量控制得当,另一方面是 PAC 水解会造成原水 pH 下降,从而有效平衡 pH。

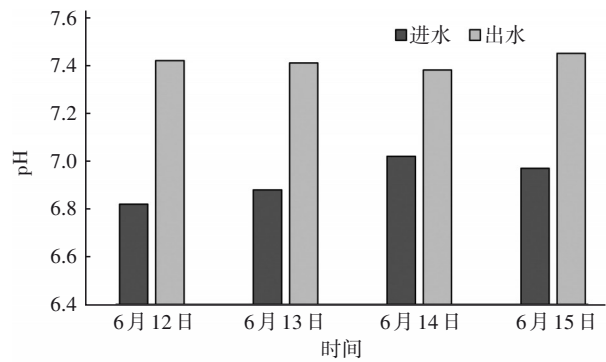


图4 “龙舟水”期间进、出水 pH 变化

Fig.4 Variation of influent and effluent pH during “dragon boat rain” period

3.3 其他出水指标

“龙舟水”期间,几次典型案例中其他原水及出厂水水质参数如表 2 所示。由表 2 可知,在原水浊度超出 500 NTU 时,原水中 COD_{Mn}、NH₄⁺-N、铁、锰和色度均出现较高浓度,最高值分别达到 7.68 mg/L、0.27 mg/L、2.74 mg/L、0.93 mg/L 和 130 度。在原水水质恶化的情况下,该厂实施科学系统的应对措施后,出厂水各项指标均能满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),除 COD_{Mn} 外,其他几项指标均控制在检测限以下。这说明,该水厂采取的水质突变应对措施科学有效,不仅能将显著突变指标(浊度)有效控制在限定范围内,其他各项指标均控制在极低标准,保障了供水水质安全。

表 2 “龙舟水”期间出厂水水质

Tab.2 Finished water quality during “dragon boat rain” period

时间	COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)		NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)		铁/(mg·L ⁻¹)		锰/(mg·L ⁻¹)		色度/度	
	原水	出厂水	原水	出厂水	原水	出厂水	原水	出厂水	原水	出厂水
6月12日	7.68	0.65	0.23	<0.02	0.93	<0.05	0.47	<0.05	120	<5
6月13日	5.74	0.81	0.22	<0.02	1.60	<0.05	0.93	<0.05	130	<5
6月14日	5.09	0.73	0.24	<0.02	2.74	<0.05	0.92	<0.05	120	<5
6月15日	4.44	0.73	0.27	<0.02	1.52	<0.05	0.64	<0.05	125	<5

注: 出水标准 COD_{Mn}≤3 mg/L, NH₄⁺-N≤0.5 mg/L, 铁≤0.3 mg/L, 锰≤0.1 mg/L, 色度≤15 度。

4 结论

① 每年 5 月—6 月进入“龙舟水”时期后,水厂原水水质波动显著,尤其是浊度增幅最为突出,由常规最高值的 131 NTU 增至 1 000 NTU。此外, COD_{Mn}、NH₄⁺-N、铁、锰和色度等其他指标也增长至少 75%。

② 面对水质突跃式变化,水厂采取的主要措施包括:强化药剂投加、缩短排泥周期、优化调控进水量、完善水源预警和加强常规巡检等。此外,科

学制定预氧化药剂(高锰酸钾)和混凝药剂(PAC)的投加关系曲线,按照进水浊度变化,调整药剂投加量。

③ 按照拟定应对措施实施后,“龙舟水”时期出厂水水质控制效果好,在原水浊度持续超过 500 NTU、原水锰高于 0.5 mg/L 的情况下,出水平均浊度低于 0.15 NTU,出水锰低于 0.05 mg/L,其他出厂水指标均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。

参考文献:

- [1] 王志红, 植许翌, 李炳萱, 等. KMnO_4 强化混凝耦合超滤去除湖库水中共存铁锰藻[J]. 中国给水排水, 2022, 38(5):1-8.
WANG Zhihong, ZHI Xujun, LI Bingxuan, *et al.* Potassium permanganate pre-oxidation enhanced coagulation coupled with ultrafiltration to remove co-existed iron, manganese and algae in lakes and reservoirs in South China [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(5):1-8 (in Chinese).
- [2] 董颖, 李乐, 武宏梅, 等. 基于水源地水质变化的 KMnO_4 预氧化技术应用研究[J]. 给水排水, 2020, 46(9):60-64.
DONG Ying, LI Le, WU Hongmei, *et al.* Applied on potassium permanganate pre-oxidation technology based on water quality change of water source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(9):60-64 (in Chinese).
- [3] WANG J, ZHOU L, GAO J, *et al.* Process optimization and mechanism revealing of KMnO_4 pre-oxidation coupled powdered activated carbon adsorption for 2-MIB removal [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 53: 103705.
- [4] 孔艳丽. 江苏某市水源地中特征污染物解析及强化常规除污染效能 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
KONG Yanli. Analysis of Characteristic Pollutants in Source Water and Pollutant Removal Efficiency of Enhancement Conventional Treatment Processes in a City of Jiangsu [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018(in Chinese).
- [5] 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 等. 化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 [J]. 环境科学, 2018, 39(3):1188-1194.
JIAN Zhiyu, CHANG Yangyang, WANG Lixin, *et al.* Removal of organic matter from water by chemical preoxidation coupled with biogenic manganese oxidation [J]. Environmental Science, 2018, 39(3):1188-1194 (in Chinese).
- [6] 王定昊, 彭国强, 王永和, 等. 高锰酸钾氧化沉淀应急处理水源锰超标的分析 [J]. 给水排水, 2021, 47(S2):43-47.
WANG Dinghao, PENG Guoqiang, WANG Yonghe, *et al.* Analysis of application of potassium permanganate oxidation precipitation in emergency treatment of water source exceeding manganese standard [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(S2):43-47 (in Chinese).
- [7] 徐满天, 唐玉朝, 胡伟, 等. KMnO_4 预氧化与混凝联合作用去除湖泊源水中 Mn^{2+} 的研究 [J]. 水处理技术, 2018, 44(6):46-51.
XU Mantian, TANG Yuchao, HU Wei, *et al.* Removal of Mn^{2+} from lake water source by combined oxidation with KMnO_4 coagulation [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(6):46-51 (in Chinese).
- [8] YANG M, LI K, WANG T, *et al.* Al and Mn speciation changes during the pre-oxidation with potassium permanganate and coagulation removing natural organic matter and its membrane fouling behavior [J]. Chemosphere, 2024, 346:140641.
- [9] 刘丽冰, 王希, 杨承刚, 等. 铝系混凝剂优势形态分析及其混凝特性 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(12):4249-4262.
LIU Libing, WANG Xi, YANG Chenggang, *et al.* The analysis of dominant species in aluminous coagulants and their coagulation properties [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(12):4249-4262 (in Chinese).
- [10] 甘振东, 李鑫玮, 张健, 等. 原水 pH 和出厂水残余铝偏高调控技术研究与应用 [J]. 给水排水, 2023, 49(1):47-52.
GAN Zhendong, LI Xinwei, ZHANG Jian, *et al.* Research and application of regulation technology for high pH of raw water and residual aluminum [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(1):47-52 (in Chinese).
- [11] 孙俊伟, 赵红星, 徐晓平, 等. 净水厂 KMnO_4 预氧化混凝沉淀处理的工艺控制技术 [J]. 武汉轻工大学学报, 2022, 41(2):38-43.
SUN Junwei, ZHAO Hongxing, XU Xiaoping, *et al.* Control technology of KMnO_4 pre-oxidation coagulation sedimentation process in water treatment plant [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2022, 41(2):38-43 (in Chinese).

作者简介:李婷(1986-),女,苗族,湖南湘西人,博士,高级工程师,主要从事供水安全保障及水处理循环再生等工作。

E-mail:litinghit@foxmail.com

收稿日期:2025-07-22

修回日期:2025-08-19

(编辑:衣春敏)