

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.11.002

长江下游湖库型水源的高品质饮用水处理工艺中试

鲍任兵, 李鹏程, 贾旭超, 王文生, 蔡世颜, 夏娜, 程珊,
邹磊

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对长江下游地区湖库型水源的高pH、高藻及有机物复杂的水质特性,通过规模为120 m³/d的中试,系统评估了不同净水工艺的处理效能及关键水质指标风险控制能力。重点考察了“二氧化碳+预臭氧”预处理与“臭氧-活性炭”“超滤/纳滤”深度处理工艺对浊度、残余铝、有机物及臭味物质的协同控制机制。结果表明,采用二氧化碳调节原水pH至7.2~7.6,可显著优化铝形态分布,使砂滤出水余铝降至0.15 mg/L以下;“臭氧-活性炭+超滤”组合工艺对浊度、高锰酸盐指数和2-甲基异莰醇(2-MIB)的去除率分别达99.4%、60%和85%以上,出水水质稳定且较优。综合技术和经济分析,推荐采用“二氧化碳+预臭氧+混凝沉淀+砂滤+臭氧-活性炭+超滤”作为高品质供水的核心工艺,该多级屏障体系在有效控制溴酸盐生成风险的同时,具备强抗冲击负荷能力,为长江下游湖库型水源的高品质供水工艺选择提供了重要依据。

关键词: 湖库型水源; 高品质饮用水; 二氧化碳; 臭氧-活性炭; 超滤; 纳滤

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)11-0008-08

Pilot Study on High-quality Drinking Water Treatment Technology for Lake-Reservoir Type Water Sources in Lower Reaches of the Yangtze River

BAO Renbing, LI Pengcheng, JIA Xuchao, WANG Wensheng, CAI Shiyang,
XIA Na, CHENG Shan, ZOU Lei

(Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan
430010, China)

Abstract: In response to the high pH, high algae, and complex organic matter characteristics of lake-reservoir type water sources in the lower reaches of the Yangtze River, a pilot-scale test with a capacity of 120 m³/d was conducted to systematically evaluate the treatment efficacy and risk control capability for key water quality indicators of different treatment processes. The study focused on the synergistic control mechanisms of “carbon dioxide + pre-ozonation” pretreatment combined with “ozone-activated carbon” and “ultrafiltration/nanofiltration” advanced treatment processes for turbidity, residual aluminum, organic matter, and odor-causing substances. The results demonstrated that adjusting the raw water pH to 7.2–7.6 using carbon dioxide significantly optimized aluminum speciation distribution, reducing residual aluminum in sand-filtered effluent to below 0.15 mg/L. The combined process of “ozone-activated carbon + ultrafiltration” achieved removal rates of over 99.4% for turbidity, 60% for

基金项目: 湖北省建设科技计划项目(KY-S-S-2023-007)

通信作者: 邹磊 E-mail: 10027238@qq.com

permanganate index, and 85% for 2-MIB, with stable and superior treated water quality. Based on comprehensive technical and economic analysis, the “carbon dioxide + pre-ozonation + coagulation-sedimentation + sandfiltration + ozone-activated carbon + ultrafiltration” process is recommended as the core treatment train for high-quality drinking water treatment process. This multi-barrier system effectively controls bromate formation risks while exhibiting strong resistance to shock loads, providing crucial technical support for the selection of high-quality water supply processes for lake-reservoir type water sources in the lower Yangtze River region.

Keywords: lake-reservoir type water source; high-quality drinking water; carbon dioxide; ozone-activated carbon; ultrafiltration; nanofiltration

随着社会经济快速发展和居民生活水平的显著提升,对饮用水安全与品质的需求已从基础的“合格达标”转向“优质健康”,水质指标逐渐与国际接轨。为了满足更高标准的供水水质要求,深度处理工艺的应用规模逐年扩大,成为应对高品质供水需求的有效途径^[1]。根据《中国城镇水务行业年度发展报告》(2023)统计分析数据,以地下水为水源的水厂中,采用简易处理的占比达到52.93%,深度处理仅占3.15%;以地表水为水源的水厂,采用常规处理的达到85.23%,深度处理的只有14.67%。其中,臭氧-活性炭是应用最广泛的深度处理工艺,通过臭氧氧化、活性炭吸附及生物降解能够有效去除溶解性有机物和消毒副产物前驱物,尤其适用于高锰酸盐指数较高的原水。超滤凭借0.02~0.10 μm的孔径,能够显著降低浊度并几乎完全截留“两虫”等致病性微生物,在保障生物安全的同时减少消毒副产物生成;而纳滤则能进一步截留1~10 nm的小分子物质,对无机盐、小分子有机物和天然有机物的去除率接近90%,并几乎完全去除溶解性有机碳(DOC),从而有效控制臭味物质与新污染物^[2]。

长江下游地区作为我国经济核心区,普遍采用“长江-湖泊”多水源互补供水模式。然而,湖库型水源因水文条件封闭、自净能力弱,面临富营养化、季节性藻类暴发、臭味物质超标等问题^[3],严重影响出水水质安全。另外,长江下游地区残余铝问题凸显,如上海市的原水偏碱性,黄浦江等水源pH基本在8左右。原水的pH对铝存在形态有较大影响,当进水pH>7.5时将生成较多的溶解态 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$,降低混凝效果,导致出水余铝增多。为了提高出水水质,以往水厂通常采用投加盐酸或硫酸等方式调节pH,但存在成本高、安全隐患大、pH波动大等问题。

因此,为应对不断提高的饮用水水质标准,现有水厂的水质提标及扩容改造是当前发展的必然选择。

为有效提升长江下游地区湖库型水源水厂的出水水质,本研究通过开展不同工艺流程的对比试验,重点考察了“二氧化碳+预臭氧”预处理,以及“臭氧-活性炭”“超滤”“纳滤”深度处理对水质变化的有效性,以期为该地区水厂水质提标或新建提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置

中试采用当地湖水及长江水为主要水源,试验规模为120 m³/d。试验流程如图1所示,考察6组不同工艺流程的污染物去除效果及出水水质情况。

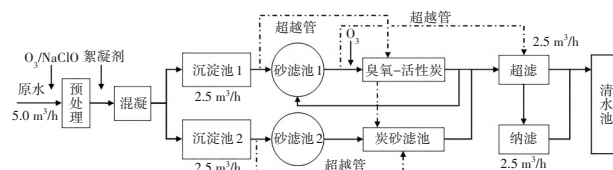


图1 中试工艺流程

Fig.1 Process flow of pilot test

中试装置的二氧化碳投加设备、预臭氧接触池及机械絮凝池设计规模均为5.0 m³/h,后分为两组深度处理线,单组设计规模为2.5 m³/h,其中一组为沉淀池1、砂滤池1、后臭氧接触池、活性炭滤池,另一组为沉淀池2、砂滤池2、炭砂滤池,后续两组同时接入超滤膜及纳滤膜系统。膜处理单元设计规模为2.5 m³/h,可实现不同深度处理线的切换运行。预处理采用二氧化碳+预臭氧或次氯酸钠两种方式,其中二氧化碳投加量为1.2~12.0 mg/L,预臭氧或次氯酸钠投加量为0.5~1.0 mg/L;絮凝剂采用聚合氯化铝(PACl),投加量(以 Al_2O_3 计)为2~5 mg/L。

二氧化碳采用“气-液”投加方式,投加点为原水箱至预处理接触池连接管。预臭氧接触池的有效容积为 0.42 m^3 ,接触时间为 5 min ,臭氧投加量为 $0.5\sim 1.0\text{ mg/L}$ 。机械絮凝池的有效容积为 1.84 m^3 ,絮凝时间为 22.12 min 。沉淀池(两组)的清水区液面负荷为 $5.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。砂滤池(两组)的石英砂滤料高度为 1.0 m ,滤速为 8 m/h 。后臭氧接触池的有效容积为 0.42 m^3 ,总接触时间为 10 min ,采用三段式串联,接触时间分别为 $2、4、4\text{ min}$,臭氧投加量为 $0.5\sim 2.0\text{ mg/L}$,三段臭氧投加量之比为 $3:2:1$ 。活性炭滤池的活性炭滤料高度为 2 m ,填充 $8\text{ 目}\times 30\text{ 目}$ 柱状破碎炭,滤速为 10 m/h 。炭砂滤池的石英砂滤料高度为 0.6 m ,规格为 $0.50\sim 1.25\text{ mm}$;活性炭滤料高度为 1.4 m ,规格为 $8\text{ 目}\times 30\text{ 目}$ 煤质活性炭,滤速为 8 m/h 。超滤膜系统膜丝材料为聚偏氟乙烯(PVDF),有效膜面积为 77 m^2 ,公称膜孔径为 $0.02\text{ }\mu\text{m}$ 。纳滤膜系统的有效膜面积为 8.4 m^2 ,进水流道为 0.71 mm 。

1.2 原水水质

试验在9月—11月进行,其间原水的pH为 $7.70\sim 8.54$,高锰酸盐指数为 $2.10\sim 3.72\text{ mg/L}$,温度为 $17\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$,藻含量为 $300\sim 1\,100\text{ 万个/L}$,浊度为 $12.30\sim 22.37\text{ NTU}$,2-甲基异莰醇(2-MIB)为 $8.7\sim 13.4\text{ ng/L}$,土霉素(GSM)为 $2.7\sim 3.8\text{ ng/L}$ 。

1.3 试验方法

开展不同工艺流程的对比试验,分析对浊度、残余铝、有机物、臭味物质等污染物的去除效果。其中,流程1:预处理+混凝沉淀+砂滤+臭氧-活性炭;流程2:预处理+混凝沉淀+臭氧-活性炭+砂滤;流程3:预处理+混凝沉淀+砂滤+臭氧-活性炭+超滤;流程4:预处理+混凝沉淀+臭氧-炭砂滤池+超滤;流程5:预处理+混凝沉淀+超滤+纳滤;流程6:预处理+混凝沉淀+砂滤+臭氧-活性炭+超滤+纳滤。

1.4 分析项目及方法

1.4.1 水质指标

pH采用便携式水质分析仪测定;浊度采用台式浊度仪测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})按照《生活饮用水标准检验方法 第7部分:有机物综合指标》(GB/T 5750.7—2023)测定;Zeta电位采用Malvern Zetasizer Nano ZS90测定;总铝采用ICP-OES光谱仪测定,测定前先酸化处理;铝离子采用分光光度计测定;溴酸盐采用ICS-1100 Dionex型热电阴离子色谱仪测

定^[4];2-MIB和GSM采用顶空固相微萃取-气质联用法测定^[5];藻含量采用《水质 浮游植物的测定 滤膜-显微镜计数法》(HJ 1215—2021)测定。

1.4.2 风险熵(R_i)计算

为了更好地对比不同流程的综合水质指标控制效果,用各流程下的出水浊度、残余铝、有机物及2-MIB浓度与水质标准限值的比值作为水质控制风险指标,即风险熵(R_i)。风险判定依据:当 $R_i<100\%$ 时指标达标, R_i 越接近0风险控制效果越好;当 $R_i=100\%$ 时指标刚好达到标准限值,存在超标风险;当 $R_i>100\%$ 时指标超标, R_i 越大则超标风险越高。

2 结果与讨论

2.1 浊度去除效果及工艺协同机制

原水浊度在 $12.30\sim 22.37\text{ NTU}$ 之间,流程1~6的出水平均浊度分别为 $0.15、0.11、0.06、0.10、0.07、0.06\text{ NTU}$,均在 0.20 NTU 以下,说明所有工艺流程均能有效降低浊度,但效能与稳定性存在显著差异。对比流程1和流程2发现,后者出水浊度更低,为 $0.08\sim 0.17\text{ NTU}$,且出水水质更稳定,平均去除率为 99.33% 。研究表明^[6-7],活性炭滤池长期运行中滋生的生物膜可能导致微生物泄漏,此时后置砂滤工艺可发挥关键拦截作用,有效控制出水浊度波动。然而在试验运行中发现,沉淀池出水浊度偏高($1\sim 3\text{ NTU}$)且存在跑泥风险,流程2中的活性炭滤池作为前置过滤单元,未沉降的絮体进入活性炭滤池后,会填充滤料孔隙,导致其堵塞周期由设计的 5 d 缩短至 3 d ,显著增加了反冲洗频率和运行维护成本。这表明“臭氧-活性炭+砂滤”工艺虽能提升出水水质,但对前段混凝沉淀效果提出了极高要求,需采用优化絮凝搅拌强度或投加助凝剂等措施,强化沉淀池出水水质^[8]。

流程3和流程4的出水浊度均稳定在 0.12 NTU 以下,去除率为 $99.39\%\sim 99.45\%$,显著优于单一过滤工艺。这表明超滤膜通过其精确的物理筛分作用,几乎能完全截留包括胶体颗粒、细菌乃至病毒在内的所有悬浮物质,实现了对浊度的极限控制。流程5和流程6的纳滤膜出水浊度进一步降至 0.10 NTU 以下,去除率达到 99.60% 以上,这主要得益于纳滤膜更致密的分离层对更小尺度溶质和胶体的截留作用。另外,流程4采用“臭氧-炭砂滤池+超滤”的集约化设计,通过滤料层的“吸附-截留”协同

作用达到与传统分置滤池相当的效果,为水厂紧凑化设计提供了技术支撑。

在对混凝剂投加量进行优化后,对不同处理单元的出水浊度进行了长期监测,砂滤池出水浊度为0.10~0.23 NTU,整体波动较大,多次出现0.20 NTU及以上的较高值,存在超标风险;活性炭滤池通过吸附与生物降解作用,出水浊度波动幅度相对较小,在0.09~0.17 NTU之间,出水稳定性有所提升,基本可满足指标限制要求;超滤和纳滤出水浊度可实现0.1 NTU以下,表现出最优的抗冲击能力,其中纳滤出水浊度变异系数仅为0.12,远低于砂滤池的0.35,这一特性对保证高品质供水的稳定性至关重要(见图2)。

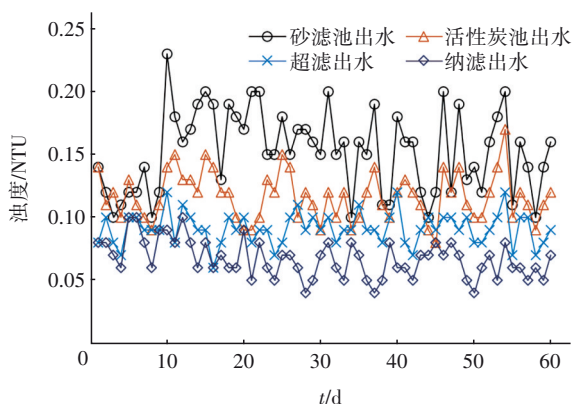


图2 不同处理单元出水浊度控制情况

Fig.2 Control effect of turbidity in effluent from different treatment units

2.2 残余铝控制机制及pH调控技术优化

本试验面临的一个突出问题是原水pH偏高,呈现典型碱性特征,全年42%时段的pH超过8.30。研究表明,在高pH条件下(>8.30),铝系混凝剂(如PACl)的水解产物会从电中性的 $Al(OH)_3$ 胶体向带负电的溶解性 $Al(OH)_4^-$ 形态转变^[9]。在流程1运行工况下,当原水pH从8.21升至8.54时,砂滤单元出水总铝浓度由0.223 mg/L升高至0.268 mg/L,其中溶解性铝比例从55.67%增大至62.31%(见图3)。通过PACl投加对比试验发现,原水总铝浓度低于0.05 mg/L,而沉淀池出水总铝浓度普遍超过0.40 mg/L,说明残余铝主要源自混凝剂投加。有研究表明,当pH>8.30时,PACl水解产物中羟基络合态铝占比超过75%,此类带负电荷的可溶性铝形态难以被滤料吸附截留,导致铝离子穿透滤层的概率增加2~3倍^[10]。该发现为优化高pH原水条件下的

混凝工艺参数提供了理论依据。

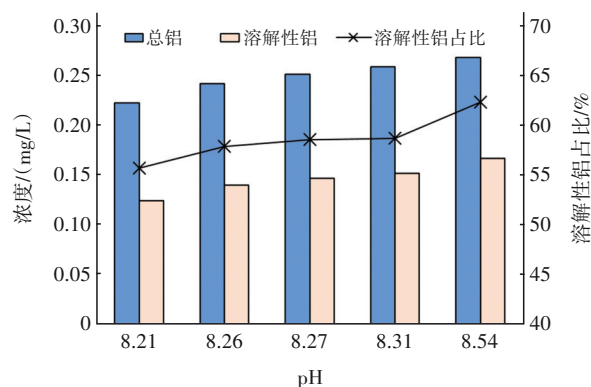


图3 不同pH下铝形态变化

Fig.3 Aluminum speciation at different pH

针对上述问题,本研究采用 CO_2 替代强酸进行原水pH调控^[11]。通过向原水投加2.4~10.8 mg/L二氧化碳,将原水pH从8.30以上稳定降至7.20~7.60的最佳混凝区间后,水体中 $Al(OH)_3$ 胶体占比从62%提升至78%~85%,其表面Zeta电位由-38 mV逆转至12 mV,极大地增强了与水中带负电胶体颗粒的电中和与吸附架桥能力。通过pH调控协同混凝作用,PACl投加量从常规的3.0~4.0 mg/L降低至2.0~3.0 mg/L,降低了30%以上;砂滤出水总铝浓度稳定控制在0.15 mg/L左右,活性炭滤池出水更可降至0.12 mg/L以下,从源头解决了铝超标难题。在保障水质安全的同时,实现了混凝剂投量与余铝浓度的双重优化。

流程1~6的出水余铝分别为0.10、0.08、0.06、0.07、0.03、0.02 mg/L,去除率分别为63.90%、71.93%、77.78%、73.18%、88.93%、92.96%。各流程下砂滤池出水余铝均低于0.20 mg/L;超滤膜凭借0.02 μm 孔径的物理截留,可将余铝降至0.10 mg/L以下(去除率>70%),这不仅截留了颗粒态铝,还通过膜表面的吸附作用去除部分胶体态铝;纳滤膜则通过“电荷排斥+孔径筛分”协同作用,使出水余铝低于0.05 mg/L,几乎完全截留溶解态铝。值得注意的是,流程1和2的出水余铝稳定在0.12 mg/L以下,满足地方标准,但其稳定性依赖于投加 CO_2 调控pH与臭氧-活性炭的协同作用,进一步吸附残留的溶解态铝。可见对于极限除铝,膜技术是最终保障。

2.3 有机物去除路径与溴酸盐风险控制

原水高锰酸盐指数为2.10~3.72 mg/L,以溶解性天然有机物(NOM)为主,包括腐殖酸、富里酸及

藻类胞外分泌物。6种工艺流程均能有效去除有机污染物,出水高锰酸盐指数分别为1.20、1.03、0.96、1.41、0.62、0.40 mg/L(相应的去除率分别为50.00%、57.08%、60.00%、41.25%、74.17%、83.33%),均低于1.50 mg/L的控制标准,但去除率和稳定性差异显著。其中流程5和6对高锰酸盐指数的去除率最高,分别为74.17%和83.33%,出水浓度稳定控制在0.70 mg/L以下。流程1、2和3的高锰酸盐指数去除效果相近,出水浓度在0.70~1.50 mg/L之间,可见臭氧-活性炭单元是去除有机物的核心,其对高锰酸盐指数的去除贡献率约为30%~40%,主要依靠臭氧将大分子有机物分解为易降解小分子,继而在活性炭滤池的吸附作用及微生物群落的生物降解作用下高效去除^[12]。流程4的去除率最低,其根本原因在于炭砂滤池中的活性炭填料高度(1.4 m)低于专用活性炭滤池(2.0 m),导致吸附容量和生物量显著减少,处理能力受限。这一发现对集约化设计提出了警示,即不能单纯为了节省占地而牺牲关键工艺单元的有效容积。

本研究还重点关注了臭氧投加过程中的潜在风险——溴酸盐的生成。当原水含有溴离子(Br^-)时,臭氧会将其氧化为致癌物溴酸盐(BrO_3^-)。研究表明^[13],当原水中 Br^- 浓度超过0.15 mg/L时,投加臭氧超过1.0 mg/L会带来 BrO_3^- 超标的水质风险。试验过程中发现,当预臭氧投加量为0.5 mg/L、主臭氧投加量为1.0 mg/L时,出水 BrO_3^- 浓度达到0.005 8 mg/L,已超出设计标准要求。为了降低出水超标风险,将主臭氧投加量降低至0.5 mg/L,并采用三段式投加,可将出水 BrO_3^- 浓度稳定控制在0.002~0.004 mg/L的安全区间,实现了有机物去除效能与消毒副产物风险控制平衡,同时实现总臭氧投加量降低30%。其机理在于分段投加提高了臭氧利用率,减少了过量臭氧与 Br^- 的反应时间,同时降低了中间产物(如 HOBr/OBr^-)向 BrO_3^- 的转化效率^[14]。因此,本研究不同流程对比试验中采用的预臭氧和主臭氧投加量均为0.5 mg/L。

如图4所示,经过2个月的数据监测,砂滤池达标率仅53.8%,反映出常规过滤对有机物的去除能力有限;活性炭滤池达标率为93.3%,但当原水高锰酸盐指数 >3.5 mg/L时仍存在超标风险;而臭氧-活性炭+超滤组合工艺的达标率为100%,这是因为超滤截留了活性炭滤池泄漏的生物膜与胶体,避免

了有机物的二次释放,形成“氧化-吸附-截留”的多作用体系,显著提升了系统抗冲击能力。

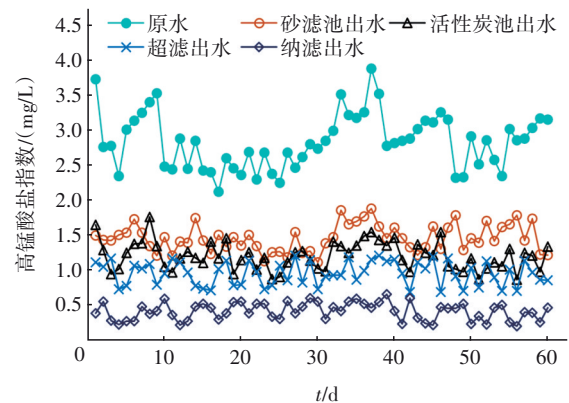


图4 不同处理单元出水高锰酸盐指数控制情况

Fig.4 Control effect of permanganate index in effluent from different treatment units

2.4 嗅味物质的溯源与全过程控制

根据嗅味物质检测结果,原水中2-MIB浓度为8.7~13.4 ng/L(超标),而GSM浓度为2.7~3.8 ng/L(低于5 ng/L标准),表明藻类代谢是主要嗅味来源。这与长江下游湖库型水源的富营养化特征密切相关,监测数据表明高温期藻密度峰值达1 100万个/L,低温期维持在280~400万个/L,其中9月—10月硅藻、绿藻占比超80%,是引发胞外分泌物积累与嗅味物质生成的主要因素。如图5所示,流程1~6的出水2-MIB浓度均低于5 ng/L,其中流程4因其活性炭容量不足,去除率仅为60%~70%,明显低于其他流程,出水2-MIB为4.6 ng/L;其他流程的2-MIB去除率均可达到85%以上,出水稳定低于2 ng/L,说明臭氧-活性炭工艺和纳滤膜均可满足嗅味物质的去除要求。结合之前的研究结果,臭氧-活性炭单元能够有效分解并吸附嗅味物质,并且处理效能显著优于臭氧+炭砂滤池工艺。纳滤工艺表现出最优异的去除效果,出水2-MIB浓度低于1 ng/L,去除率超过90%。

为研究2-MIB在不同工艺段的去除特性,针对流程6开展了全流程水质跟踪监测。原水2-MIB浓度为8.7 ng/L,经过预臭氧氧化后浓度反升至16.8 ng/L,经混凝沉淀后仍有15.2 ng/L。在其他流程下也发现相同的现象,沉后水2-MIB升高了2~8 ng/L, GSM升高了1~2 ng/L。研究表明,预氧化及PACl的投加会使藻细胞壁与细胞膜破裂,导致胞内嗅味物质释放到水中^[15]。这一现象说明针对高藻原水,需

严格控制预臭氧投加量,避免过度氧化导致嗅味物质“二次污染”,必要时可搭配投加藻毒素去除剂(如粉末活性炭),提前截留胞内嗅味物质。

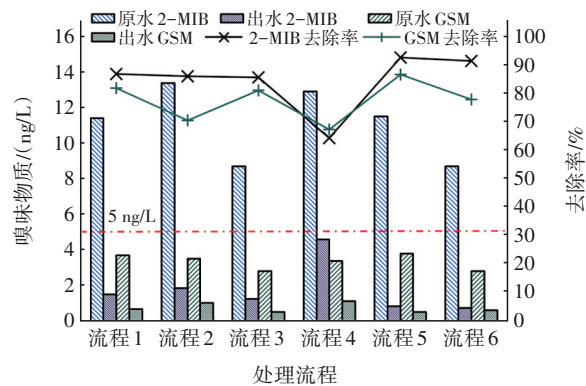


图5 不同处理流程对嗅味物质的去除效果

Fig.5 Removal effect of odor substances in different processes

在后续单元中,砂滤对2-MIB有一定的截留作用,在沉淀池出水的基础上去除率达64.5%,浓度降至5.4 ng/L。臭氧接触池出水2-MIB仍有4.8 ng/L,而活性炭滤池有明显的控制效果,出水2-MIB降低到1.5 ng/L,表明臭氧氧化对2-MIB分子具有分解作用,后续活性炭滤池通过吸附与生物降解的协同作用,进一步去除了残余嗅味物质,实现了68.8%的去除率,是出水稳定达标的重要保障。超滤对2-MIB也有一定去除效果,其出水浓度降至1.24 ng/L。纳滤膜凭借其极小的孔径,对嗅味物质表现出接近完全的截留能力,最终出水2-MIB浓度为0.75 ng/L,验证了组合工艺对嗅味物质的控制效能。值得注意的是,臭氧-活性炭+超滤组合工艺的出水2-MIB稳定在2.0 ng/L以下,兼顾了处理效果与经济性,而纳滤工艺虽效果最优,但运行能耗较高,需根据供水水质目标选择性采用。

2.5 综合净水效能及风险控制

通过对比各工艺流程的出水浊度、残余铝、有机物及2-MIB浓度风险熵(见图6),总结了流程1~6的工艺特点及适用范围:①流程1的浊度与有机物风险熵达100%,其核心短板在于缺乏末端保障单元,难以应对原水水质的波动;②流程4的有机物与2-MIB风险熵较高(85%~100%),反映出集约化工艺的处理能力局限性,仅适用于原水水质较好的场景;③流程3的各项风险熵<80%,通过构建“预处理调控-深度氧化-吸附降解-膜截留”的多屏障体系,

抗冲击能力强,可有效应对高pH、高藻、高有机物等复杂水质问题;④流程5、6的风险熵<50%,水质最优,但建设与运行成本较高,适合对水质有极致要求的场景。进一步分析表明,有机物是导致水质风险的核心因子(流程1~4的有机物风险熵均大于85%),因此新建水厂的工艺选择需以有机物去除为核心,兼顾残余铝、嗅味物质等特征污染物,同时平衡处理效果与经济性。

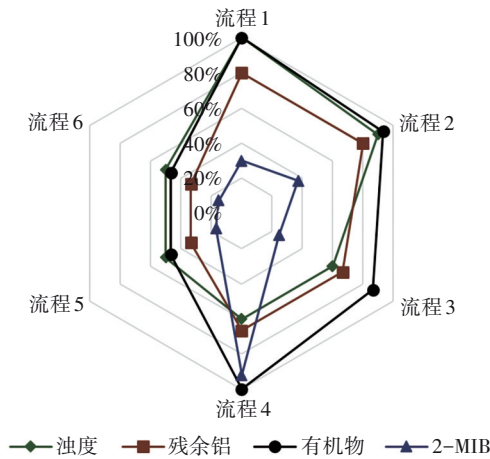


图6 不同处理流程水质指标控制风险

Fig.6 Control risks of water quality indicators in different processes

3 高品质供水工艺路线研究

为了提高长江下游湖库型水源水厂出水水质保障率,同时兼顾经济性,选取流程3、4和5进行出水水质保障情况和运行成本对比分析,结果见表1。

表1 高品质饮用水处理工艺比选

Tab.1 Comparison and selection of high-quality drinking water treatment processes

项目	出水水质保障情况	工艺特点	总运行成本/(元/m ³)
流程 3	浊度<0.1 NTU,残余铝<0.10 mg/L,高锰酸盐指数<1.5 mg/L,嗅味物质<2.0 ng/L	优势:出水水质好、运行管理经验丰富、工艺稳定、抗冲击负荷能力强;缺点:用地面积较大、总运行成本较高	1.17
流程 4	浊度<0.15 NTU,残余铝<0.10 mg/L,高锰酸盐指数≤1.5 mg/L,嗅味物质<5.0 ng/L	优势:节省用地、总运行成本较低、建设成本较低;缺点:应用案例少、炭砂滤料易混、对常规处理要求高	1.12
流程 5	浊度<0.1 NTU,残余铝<0.10 mg/L,高锰酸盐指数<1.0 mg/L,嗅味物质<1.0 ng/L	优势:出水水质优、占地面积最小、布置集中;缺点:建设投资大、抗冲击负荷能力低、产水量限制、运行能耗高	1.42

综合以上分析,针对长江下游湖库型水源水质特征及供水水质目标,充分考虑运维经验、处理效果、水源风险适应性及工程经济性,推荐采用“二氧化碳+预臭氧+混凝沉淀+砂滤+臭氧-活性炭+超滤”组合工艺(流程3),构建“预处理调控-深度氧化-吸附降解-膜截留”的多屏障协同处理体系。

在预处理单元,投加二氧化碳将原水pH调控至7.2~7.6,絮凝剂PACl投加量为2.0~3.0 mg/L,实现砂滤单元出水余铝稳定控制在0.15 mg/L以下。预臭氧投加量采用0.5 mg/L,对高锰酸盐指数的去除率提升近40%,有效降低后续处理单元的有机物负荷。深度处理采用“臭氧-活性炭+超滤”组合工艺,通过臭氧氧化、活性炭吸附、超滤膜截留三级作用机制,实现出水浊度<0.2 NTU、高锰酸盐指数<1.5 mg/L、残余铝<0.15 mg/L、溴酸盐<0.005 mg/L、嗅味物质<5 ng/L的高品质供水目标。同时,针对原水水质复杂性与工艺稳定性需求,在不同季节原水水质下,在运行中可采用超越管,在水质较好时超越臭氧-活性炭单元,降低运行成本;进水有机物较高时开启臭氧-活性炭,保证出水水质稳定达标。

4 结论与建议

① 针对长江下游地区原水高pH、高藻及有机物的复杂水质特征,“二氧化碳+预臭氧”预处理能有效调节pH至最佳混凝区间(7.2~7.6),显著提升铝形态稳定性,将砂滤出水余铝从0.268 mg/L降至0.15 mg/L以下,并降低混凝剂投加量30%以上;在深度处理工艺中,“臭氧-活性炭+超滤”组合展现出优异的综合性能,通过臭氧氧化、活性炭吸附与超滤膜截留的协同作用,出水浊度稳定低于0.1 NTU,高锰酸盐指数<1.5 mg/L,2-MIB<2.0 ng/L,溴酸盐可控制在0.004 mg/L以下,实现多屏障保障,抗冲击负荷能力强。

② 预处理+混凝沉淀+砂滤+臭氧-活性炭+超滤组合工艺(流程3)在出水水质、稳定性和运行经验方面综合表现最优,适用于大型水厂的高品质供水需求;预处理+混凝沉淀+臭氧-炭砂滤池+超滤组合工艺(流程4)通过集约化设计,虽建设成本及整体占地较小,但存在有机物与嗅味物质去除能力不足的风险,适用于水厂的紧凑化设计;预处理+混凝沉淀+超滤+纳滤组合工艺(流程5)的出水水质最优,但投资与能耗较高,适用于对水质有极致要求

的特定场景。

③ 长江下游湖库型水源水厂可采用“二氧化碳+预臭氧+混凝沉淀+砂滤+臭氧-活性炭+超滤”作为核心工艺,并设置超越管以根据水质灵活运行;同时加强原水水质监测与季节性调控,优化臭氧投加方式以控制溴酸盐生成,从而在保障水质全面达标的基础上,实现技术和经济性的最优平衡。

参考文献:

- [1] 陈燕波,潘名宾,司徒菲,等.基于饮用水安全优质保障的全流程水厂设计思考[J].净水技术,2022,41(7):1-6,26.
CHEN Y B, PAN M B, SITU F, et al. Consideration on the design of whole-process waterworks based the safety and quality guarantee of drinking water [J]. Water Purification Technology, 2022, 41 (7) : 1-6, 26 (in Chinese).
- [2] 鲍任兵,邹磊,刘海燕,等.高品质供水要求下水质提标及净水新技术应用思考[J].给水排水,2025,51(6):14-20.
BAO R B, ZOU L, LIU H Y, et al. Thoughts on water quality improvement and application of new water purification technologies under the requirement of high-quality water supply [J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(6): 14-20(in Chinese).
- [3] 胥驰,郭馥,周慧,等.湖库水体2-甲基异莰醇和土臭素的来源和影响因素分析[J].给水排水,2025,51(2):32-42.
XU C, GUO Y, ZHOU H, et al. Sources and influencing factors for 2-methylisobornyl and geosmin in lake and reservoir water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(2): 32-42(in Chinese).
- [4] 左绘雯,金鑫,金鹏康.臭氧混凝耦合工艺的溴酸盐消毒副产物生成特性[J].中国给水排水,2024,40(21):73-80.
ZUO H W, JIN X, JIN P K. Formation characteristics of bromate disinfection by-product in hybrid ozonation-coagulation process [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(21): 73-80(in Chinese).
- [5] 周鑫盛.顶空固相微萃取-气质联用法测定水中2种环状缩醛、2-甲基异莰醇和土臭素[J].净水技术,2024,43(增刊2):276-283.
ZHOU X S. Determination of two cyclic acetals, 2-methylisoborneol and geosmin in water samples by headspace-solid phase microextraction with gas

- chromatography/mass spectrometry[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(S2): 276-283(in Chinese).
- [6] 张易峰,陈洪斌,李坤. 净水厂生物活性炭滤池生物泄漏的调控技术述评[J]. 水处理技术, 2021, 47(1): 1-6.
- ZHANG Y F, CHEN H B, LI K. Review on bio-leakage control technology of bac filter in water purification plant [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(1): 1-6 (in Chinese).
- [7] 刘唯源,邓博苑,朱海龙,等. 基于分子生物学的前置生物活性炭工艺除污效能研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(21): 21-26.
- LIU W Y, DENG B Y, ZHU H L, et al. Efficacy of pre-BAC process for pollutant removal based on molecular biology [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(21): 21-26(in Chinese).
- [8] 镇祥华,余琴芳,何晓梅,等. 某多水源水厂不同组合工艺流程的试验研究[J]. 给水排水, 2020, 46(6): 72-78.
- ZHEN X H, YU Q F, HE X M, et al. Study on the selection of different combination processes in multi-source water plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(6): 72-78(in Chinese).
- [9] 吴福雨,李能能,樊小东,等. 混凝剂中的铝形态对黄河水源水中出水余铝的影响[J]. 环境工程学报, 2022, 16(12): 3926-3934.
- WU F Y, LI N N, FAN X D, et al. Effects of aluminum form in coagulant on residual aluminum in effluent of the source water of Yellow River [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(12): 3926-3934 (in Chinese).
- [10] 袁辉洲,柯水洲,涂家勇,等. pH对聚合铝形态分布与混凝效果的影响[J]. 工业水处理, 2016, 36(4): 50-53.
- YUAN H Z, KE S Z, XU J Y, et al. Influences of pH on polyaluminium chloride species distribution and coagulation effect [J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(4): 50-53(in Chinese).
- [11] 凌卫卫,马顺君,唐玉霖. “气/液”二氧化碳调pH控铝系统设计与应用[J]. 中国给水排水, 2024, 40(6): 91-96.
- LING W W, MA S J, TANG Y L. Design and application of the pH adjustment and aluminum control system by gas/liquid carbon dioxide[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(6): 91-96(in Chinese).
- [12] 孙雪瑾,吕杨,赫明水,等. 严寒地区某净水厂臭氧-生物活性炭工艺设计[J]. 中国给水排水, 2025, 41(16): 72-77.
- SUN X J, LÜ Y, HE M S, et al. Design of ozone-biological activated carbon process for a waterworks in severe cold region [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(16): 72-77(in Chinese).
- [13] 李旭枫,王少坡,周瑶,等. 天津某净水厂引江水强化处理技术研究[J]. 工业水处理, 2024, 44(5): 132-140.
- LI X F, WANG S P, ZHOU Y, et al. Enhanced treatment technology for Yangtze River water in a water purification plant in Tianjin [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(5): 132-140(in Chinese).
- [14] 高峰,高升,刘元元,等. 给水处理中溴酸盐控制技术的研究进展及其强化策略探讨[J]. 水处理技术, 2024, 50(5): 19-24.
- GAO F, GAO S, LIU Y Y, et al. Research progress and strengthening strategy of bromate control technology in water supply treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(5): 19-24(in Chinese).
- [15] 刘一夫,龚思成,刘佳伟,等. 典型藻源性嗅味物质及其去除工艺研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 10-18, 26.
- LIU Y F, GONG S C, LIU J W, et al. Research progress of typical algae-derived odorants and its removal processes [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 10-18, 26(in Chinese).

作者简介:鲍任兵(1991—),男,河南商丘人,硕士,高级工程师,研究方向为水处理技术创新与应用。

E-mail:rbingbao@163.com

收稿日期:2025-10-28

修回日期:2025-11-28

(编辑:李德强)