

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.15.006

基于陶瓷超滤+纳滤的汉江水源高品质供水工艺路线

鲍任兵¹, 李鹏程¹, 章诗璐¹, 镇祥华¹, 邹磊¹, 龙霞武²,
张少辉², 程永康³

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 武汉理工大学
土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 3. 浙江天行健水务有限公司, 浙江 绍兴
312300)

摘要: 针对汉江水源水质季节性波动及高品质供水需求,通过构建以“陶瓷超滤膜+纳滤膜”为核心的双膜短流程净水工艺中试系统,对比分析了采用预臭氧、预氯化及连续臭氧氧化等不同预处理组合下各净水工艺的处理效能、碳排放强度及运行成本。结果表明,“预臭氧-混凝沉淀-陶瓷超滤膜-纳滤膜-消毒”工艺能高效应对汉江水源季节性水质波动,对高锰酸盐指数的去除率 $\geq 98\%$,对POP_s实现几乎完全去除,对PPCP_s的去除率提升至79%以上,对EDCs和PFC_s的去除率在50%以上;典型嗅味物质2-MIB的去除主要依靠纳滤单元,去除率在50%左右;出水TDS稳定控制在 (130 ± 4) mg/L,有效保障了供水口感与生物安全;为实现绿色低碳高效运行,提出季节性调控策略,在冬季和春季原水水质稳定期,采用“臭氧氧化-陶瓷超滤膜-纳滤膜-消毒”超短流程,实现经济效益与环境效益的协同。

关键词: 汉江水源水; 陶瓷超滤膜; 纳滤膜; 新污染物; 碳排放强度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)15-0038-09

High-quality Water Supply Process Route for the Hanjiang River Source Water Based on Ceramic Ultrafiltration-Nanofiltration Combined Process

Bao Renbing¹, Li Pengcheng¹, Zhang Shilu¹, Zhen Xianghua¹, Zou Lei¹,
Long Xiawu², Zhang Shaohui², Cheng Yongkang³

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd.,
Wuhan 430010, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of
Technology, Wuhan 430070, China; 3. Zhejiang Tianxingjian Water Co. Ltd., Shaoxing
312300, China)

Abstract: In response to the seasonal fluctuations in the raw water quality of the Hanjiang River and the demand for high-quality water supply, a pilot-scale dual-membrane short-process water treatment system centered on “ceramic ultrafiltration + nanofiltration” was established. The study comparatively analyzed the treatment efficiency, carbon emission intensity, and operational costs of different process combinations incorporating pretreatment options such as pre-ozonation, pre-chlorination, and continuous ozone oxidation. The results indicated that the process train of “pre-ozonation-coagulation-

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2026AFC1185)

通信作者: 镇祥华 E-mail: gongda1996@163.com

sedimentation-ceramic ultrafiltration-nanofiltration-disinfection” effectively addresses the seasonal variability in Hanjiang River water quality. It achieved a permanganate index removal rate of $\geq 98\%$, near-complete removal of POPs, a PPCPs removal rate exceeding 79%, and removal rates of over 50% for both EDCs and PFCs. The removal of the typical odor compound 2-MIB relied primarily on the nanofiltration unit, achieving a removal rate of approximately 50%. The effluent TDS was consistently maintained at (130 ± 4) mg/L, effectively ensuring both the taste and biological safety of the water supply. To promote green, low-carbon, and efficient operation, a seasonal adjustment strategy could be implemented. During winter and spring, when the raw water quality is stable, an ultra-short process of “ozonation-ceramic ultrafiltration-nanofiltration-disinfection” can be adopted. Under this operating condition, a synergy between economic and environmental benefits will be achieved.

Keywords: Hanjiang River source water; ceramic ultrafiltration; nanofiltration; emerging contaminants; carbon emission intensity

随着《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的全面实施与各地水质提标行动的推进,我国饮用水安全保障体系正从“合格供水”向“高品质供水”转型。这对水处理技术的污染物精准控制、高效净化与水质波动适应性提出了更高要求。然而,我国多数流域水源普遍存在复合污染问题,典型特征为富营养化引发的季节性藻类暴发、水质剧烈波动及伴生的臭味、藻源性有机物污染等^[1]。在此背景下,用地受限的城市水厂如何通过工艺革新,在有限空间内实现抗冲击负荷、深度净化与低碳运行的多目标协同,已成为行业发展的核心挑战。以“超滤+纳滤”为核心的双膜短流程工艺,兼具优异的微生物屏障性能、对溶解性有机物与臭味物质的高效截留能力,以及对药品及个人护理用品(PPCPs)等新污染物的深度控制优势^[2-3],已成为高品质供水的核心技术方向之一,且适配用地受限水厂的改造需求。

汉江作为南水北调中线工程的核心水源,其水质安全具有跨区域战略意义。受水文气候与人为活动影响,汉江水源水质呈现出典型的季节性波动特征,藻密度、高锰酸盐指数(COD_{Mn})与浊度等指标在特定时段显著攀升^[4-5],同时水中检出小分子有机污染物、PPCPs等微量新污染物,对采用常规工艺的水厂稳定运行构成严重挑战。常规工艺与单一超滤工艺难以有效控制小分子臭味物质与新污染物,而纳滤膜的纳米级筛分与荷电截留特性,可精准匹配汉江水源中小分子极性污染物的去除需求。因此,探究可自适应汉江水源水质波动、抗冲击能力强、运行成本可控的高品质与低碳供水工艺路

线,不仅具有迫切的工程应用价值,也可为同类流域特大城市的供水安全保障提供技术范式。

本研究聚焦汉江武汉段水源水质特征,构建以“陶瓷超滤+纳滤”为核心的短流程净水工艺,对比不同膜前预处理组合下系统对常规污染物、特征臭味物质、新污染物的去除效能,同步耦合评估工艺的碳排放强度与运行成本,提出适配汉江水源水质、兼顾高品质出水与低碳高效运行的技术方案,以期为我国城市饮用水水质的系统性升级提供可复制、可推广的工程参考。

1 材料与方法

1.1 试验流程与运行参数

中试装置位于武汉市以汉江为水源的某自来水厂,设计进水流量为 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。系统工艺流程如图1所示,主要包括进水罐、预臭氧单元、预氯化单元、机械混合池、网格絮凝池、斜管沉淀池、中间水箱、陶瓷超滤膜单元、纳滤膜单元、消毒池,配套设置在线水质监测系统与自动控制系统。

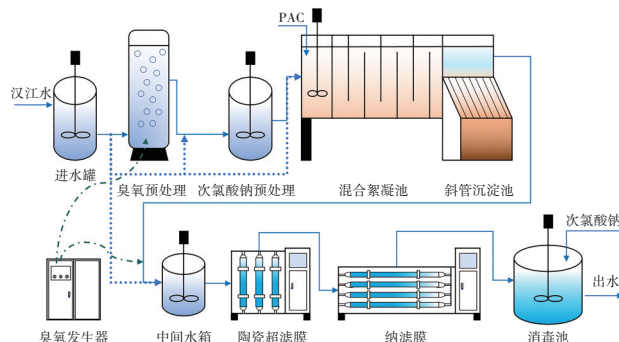


图1 中试工艺流程

Fig.1 Process flow chart of pilot test

为了保障供水水质安全,重点考察采用不同预处理组合时双膜短流程工艺的处理效能、碳排放强度及运行成本。共采用4种工艺流程,流程1:汉江水-预臭氧-混凝沉淀-陶瓷超滤膜(间歇臭氧清洗)-纳滤膜-消毒-出水;流程2:汉江水-预氯化-混凝沉淀-陶瓷超滤膜(间歇臭氧清洗)-纳滤膜-消毒-出水;流程3:汉江水-混凝沉淀-臭氧氧化-陶瓷超滤膜-纳滤膜-消毒-出水;流程4:汉江水-臭氧氧化-陶瓷超滤膜-纳滤膜-消毒-出水。

臭氧预处理的停留时间为5 min,臭氧投加量为0.8 mg/L,采用水射器投加。次氯酸钠预处理的停留时间为30 min,投加量为0.5 mg/L。机械混合池的混合时间为40 s,机械搅拌转速可调。网格絮凝池的絮凝时间为20.5 min,聚合氯化铝(PAC)投加量为2.5~3.5 mg/L(以 Al_2O_3 计)。斜管沉淀池的斜管长1 m,倾角为 60° ,内切圆内径为35 mm,管内上升流速为2.0 mm/s。陶瓷超滤膜的回收率接近100%,孔径为0.03 μm ,反洗周期采用30~120 min,膜前臭氧清洗投加量为2.7~5.4 mg/L,膜前连续臭氧氧化投加量为0.8~2.0 mg/L。纳滤膜的回收率为80%,采用三段式布置,各段膜数量比例为4:2:1,孔径为1 nm,物理水冲间隔时间为300 min。消毒池的有效接触时间为35.3 min。

1.2 水质检测与分析方法

高锰酸盐指数采用DKK-TOA COD分析仪和酸性高锰酸盐滴定法测定;氨氮采用Amtax NA8000氨氮自动检测仪测定;颗粒数使用2200 PCX Particle Counter测定;浊度采用哈希1720E在线浊度仪和哈希2100AN台式浊度仪测定;电导率采用雷磁电导率仪测定;溶解性总固体(TDS)采用便携式TDS分析仪测定;2-甲基异莰醇(2-MIB)采用顶空固相微萃取-气质联用法测定^[6];新污染物采用高效液相色谱仪测定,并配备Waters C18反相色谱柱(4.6 mm $\times$ 150 mm, 5 μm)和紫外检测器。

1.3 碳排放核算

碳排放核算参考《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》中的方法,仅考虑电力消耗和材料消耗间接碳排放强度(CES_d 和 CES_{cl})。

2 结果与讨论

2.1 汉江水源水质特征与处理需求分析

水质监测显示,汉江水质呈典型季节性波动特征,主要受流域内降水、水温及藻类生长周期影响。

如图2所示,在2022—2023年期间,藻类数量在每年2—3月及8—11月明显上升,最高达 $(600\sim 700)\times 10^4$ 个/L; COD_{Mn} 多数时间低于4 mg/L,但在3—5月及7—9月有所升高,藻类暴发后期(3—5月)更是达到4~6 mg/L,这主要是藻细胞死亡破裂释放大量的胞内有机物所致;浊度大部分时间低于50 NTU,仅3—4月及9—10月明显升高,最高超100 NTU;氨氮整体稳定且低于0.5 mg/L, pH介于7.74~8.73之间,水温变化范围为4~35 $^\circ\text{C}$ 且7—8月温度最高。综合来看,监测期内该水源地水质指标多数符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅱ类水体要求,仅藻类暴发后期 COD_{Mn} 为Ⅲ类水体标准。

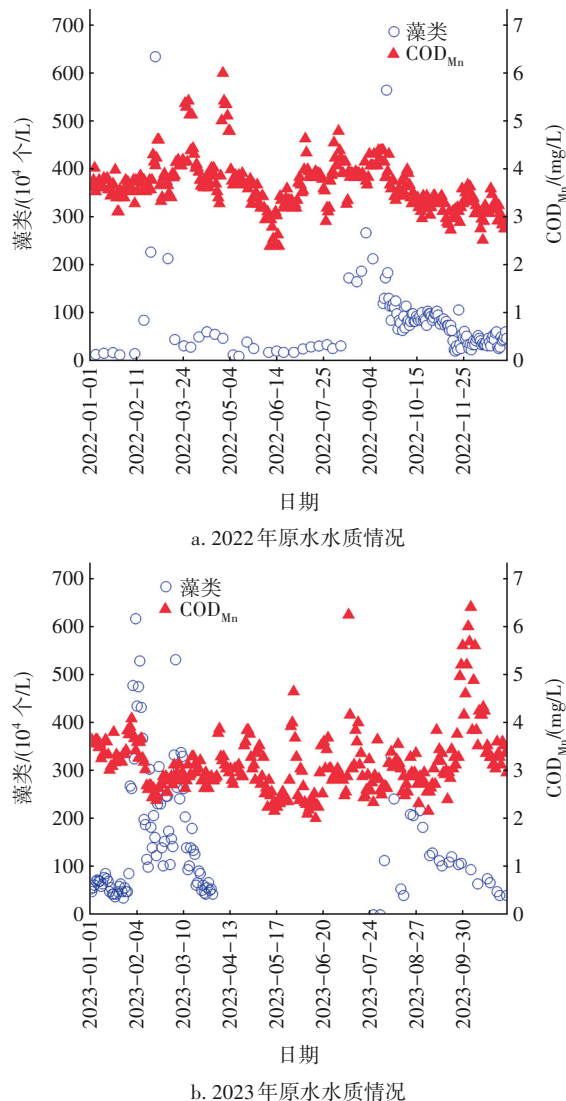


图2 2022年和2023年汉江水源水质变化情况

Fig.2 Water quality of Hanjiang River in 2022 and 2023

随着高品质饮用水要求的提高,PPCPs、内分泌

干扰物(EDCs)、全氟碳化物(PFCs)和持久性有机污染物(POPs)等微量新污染物的环境风险与控制技术受到行业广泛关注^[7-8]。通过检测汉江水源中这四类共31项新污染物指标,发现共检测出20种新污染物,其中双酚A浓度最高(43.6 ng/L),然后依次为避蚊胺(32.0 ng/L)、四环素(29.5 ng/L)、全氟辛酸(20.6 ng/L),其余均低于20 ng/L。具体而言,PPCPs共检出11种,即卡马西平、磺胺嘧啶、磺胺甲恶唑、四环素、氧氟沙星、诺氟沙星、罗红霉素、避蚊胺、咖啡因、对羟基苯甲酸甲酯、三氯生,浓度分别为2.6、1.1、5.8、29.5、7.5、10.5、0.9、32.0、5.5、13.1、10.0 ng/L,金霉素、土霉素、强力霉素、红霉素未检出;EDCs共检出3种,即壬基酚、对壬基酚、双酚A,浓度分别为6.1、7.7、43.6 ng/L,而雌酮、炔雌醇、17 α -雌二醇、17 β -雌二醇、雌三醇未检出;PFCs共检出3种,即全氟丁酸、全氟辛酸、全氟丁基磺酸,浓度分别为0.8、20.6、1.4 ng/L,全氟乙基磺酸、全氟辛烷磺酸则未检出;POPs共检出3种,即四氯联苯、六氯联苯、林丹,浓度分别为9.8、5.6、9.6 ng/L。

尽管检出的20种物质浓度均远低于GB 5749—2022的限值,但其在水源中的普遍存在仍不容忽视。双酚A、避蚊胺、四环素等物质的检出,反映了城市生活污水和农业面源污染的潜在影响。虽然

当前浓度水平对健康风险影响有限,但从“高品质饮用水”和风险防范的角度出发,对这些低浓度、长期暴露的新污染物进行有效控制,是工艺选择中必须考虑的前瞻性需求。综上,汉江水源水的处理难点在于应对季节性、复合型的污染冲击,特别是藻类暴发引起的嗅味污染和藻源有机物污染,以及微量新污染物的深度控制需求。

2.2 不同净水工艺对常规污染物的去除效能

2.2.1 预处理单元净水效能

流程1~3在2022年10—11月开展试验,而流程4在2023年3月开展试验,两段试验原水水质接近。流程1~4运行期间原水水质及膜前预处理水质(双膜单元进水水质)如表1所示。对比可知,流程4因无预氧化及混凝沉淀前处理,膜前预处理出水的浊度、颗粒数、COD_{Mn}、电导率及TDS均高于流程1~3,会大幅加剧膜孔堵塞和滤饼层污染,缩短清洗周期。试验结果表明,无臭氧投加时,流程4仅运行130 min超滤跨膜压差(TMP)即突破100 kPa的临界阈值;当膜前连续臭氧投加量为2.0 mg/L时,稳定运行时长可增加至6 h。而流程1~3经前置单元处理后,浊度和COD_{Mn}等大幅降低,超滤膜化学清洗周期可延长至7~10 d,表明预氧化联合混凝沉淀的膜前预处理,是保障后续膜系统稳定运行的关键。

表1 各工艺流程的膜前预处理出水水质

Tab.1 Effluent quality of membrane pretreatment in each process flow

项目	原水水质	流程1	流程2	流程3	流程4
浊度/NTU	39.22±12.24	2.67±0.14	2.68±0.18	3.00±0.23	22.99±6.52
颗粒数/(个/mL)	—	79.67±42.36	139.67±103.00	175.33±87.64	786.29±351.84
COD _{Mn} /(mg/L)	2.90±0.53	1.76±0.13	1.73±0.07	1.72±0.16	2.90±0.27
氨氮/(mg/L)	0.231±0.120	0.007±0.003	0.012±0.007	0.028±0.008	—
电导率/(μ S/cm)	270.67±12.35	339.00±4.00	294.33±4.16	322.67±8.33	408.74±47.69
TDS/(mg/L)	162±6.67	180±2.00	166±2.52	176±3.61	190±1.00

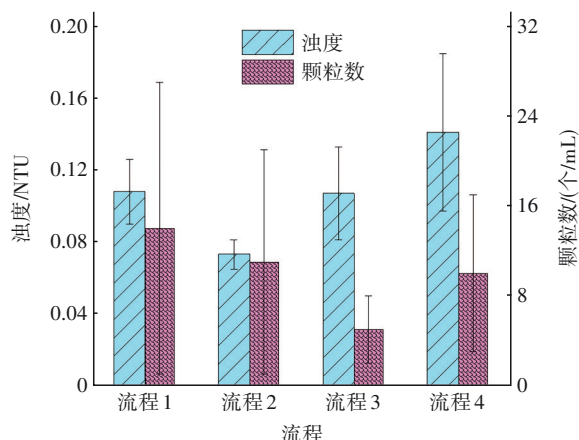
对比流程1~3的预处理效能,预臭氧或预氯化结合混凝沉淀可显著降低出水浊度与颗粒数,这主要是预氧化可破坏藻类细胞和水中胶体颗粒的有机保护层,降低胶体 ζ 电位,促进颗粒脱稳;同时可将难混凝的大分子天然有机物(NOM)氧化为易混凝的小分子组分,提升混凝去除效率^[9]。此外,预臭氧对氨氮的氧化作用更显著,可进一步降低膜前进水的氨氮浓度。预氯化对TDS和电导率的控制效果更优,原因在于投加次氯酸钠可微调混凝体系的离子强度,优化混凝效果;而臭氧氧化有机物会产

生多种小分子羧酸,这些酸性副产物可与阳离子结合形成亲水性小分子,难以通过常规混凝去除^[10]。

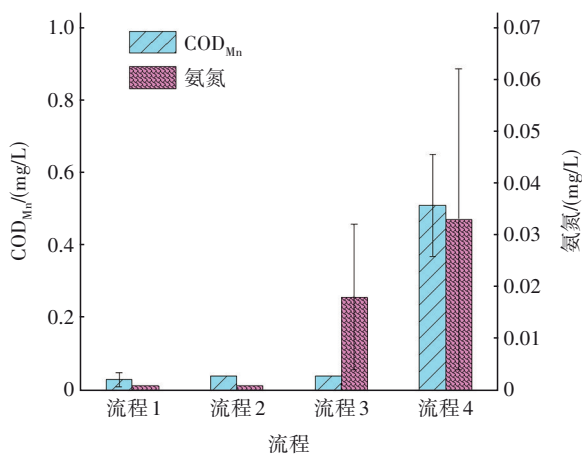
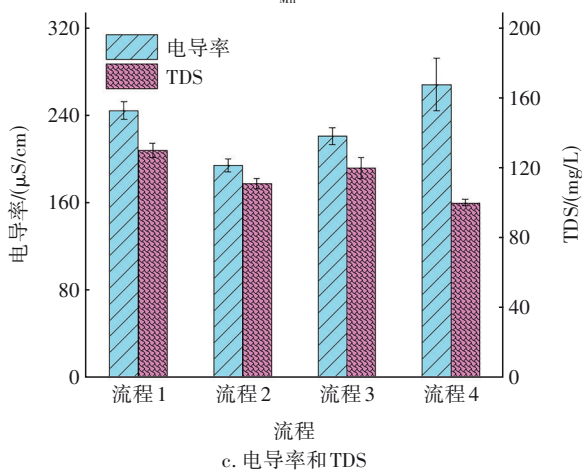
2.2.2 各工艺流程整体净水效能

流程1~4下系统产水浊度均低于0.15 NTU, COD_{Mn}低于0.06 mg/L,氨氮浓度低于0.04 mg/L, TDS低于130 mg/L,常规水质指标均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求(见图3)。经计算,流程1~4对浊度的去除率分别为95.95%、97.27%、96.39%和99.39%。其中流程1~3对浊度的去除主要依靠“预处理+超滤”的协同作用,预处

理去除了大部分悬浮固体,陶瓷超滤膜则通过物理筛分实现深度净化,出水浊度稳定低于0.15 NTU,为后端纳滤膜提供了低浊、低胶体的优质进水,可有效避免悬浮物对纳滤膜流道的堵塞与膜面的物理污染,是保障纳滤膜长期稳定运行的关键前置屏障。



a. 浊度和颗粒数

b. COD_{Mn}和氨氮

c. 电导率和TDS

图3 流程1~4的产水水质

Fig.3 Treated water quality of processes 1 to 4

在颗粒数控制方面,流程3产水效果最优,出水颗粒数稳定低于10个/mL;结合表1可知,流程3的膜前进水颗粒数明显高于流程1及流程2,表明陶瓷超滤膜单元采用连续臭氧氧化,可有效提升颗粒数去除效果,优化出水水质^[11]。流程4下全部污染物去除负荷直接由超滤膜承担,长期运行将大幅提升膜污染风险与运行能耗。

在有机物去除方面,流程1~4对COD_{Mn}的去除率分别为98.29%、97.69%、97.68%和82.40%,其中流程1和流程2的去除效果最佳,出水已低于检测限,充分体现了“预氧化-混凝沉淀-膜分离”多级屏障的协同增效作用。流程4对COD_{Mn}的去除效果最差,一方面是因为缺少预氧化及混凝沉淀对有机物的前置削减,增大了超滤的有机负荷;另一方面是在膜前连续投加臭氧,虽可氧化分解部分大分子有机物、减轻有机污染,但同时也将大分子有机物分解为更多小分子物质,可能穿透超滤膜,最终引起出水COD_{Mn}偏高^[12];此外,臭氧气泡的冲刷作用会扰动膜表面凝胶层,使部分截留的有机物重新释放至水体。因此,膜前臭氧的投加策略需在水质提升和膜污染控制之间寻求平衡。另外,纳滤膜是实现TDS可控截留的核心单元,流程1~4的出水TDS浓度主要由纳滤膜的脱盐性能决定。流程1~4的出水TDS浓度相对偏低,相关研究建议国内饮用水中TDS的最低可接受水平为100 mg/L^[13]。除流程4的出水TDS低于100 mg/L外,流程1~3的出水TDS均超过了100 mg/L,有效保障了供水口感与生物安全。

双膜系统呈现出明确的分级净化特征,预处理与陶瓷超滤单元主要去除水中悬浮态、胶体态有机物与大分子溶解性有机物,对COD_{Mn}的去除贡献占比约为60%~70%;纳滤膜则通过纳米级筛分与荷电吸附作用,截留透过陶瓷超滤的小分子溶解性有机物,对COD_{Mn}的去除贡献占比约为30%~40%,是实现出水COD_{Mn}降至极低水平的核心单元。

2.3 双膜工艺对特征污染物的深度净化能力

2.3.1 嗅味物质的控制效能

监测数据显示高温期藻密度峰值达到600×10⁴个/L以上,是引发胞外分泌物积累与嗅味物质生成的主要因素。2-MIB作为典型的小分子亲水性藻代谢产物,难以被常规工艺与超滤膜截留,是饮用水嗅味控制的难点。试验期间原水2-MIB浓度仅为4~8 ng/L,为验证高藻期双膜系统对2-MIB的去除

性能,在流程1的运行下,向陶瓷超滤膜前的中间水箱(即沉后水)投加2-MIB标准溶液,使得超滤进水2-MIB浓度分别为 (34.40 ± 1.14) 和 (72.20 ± 1.30) ng/L,结果如图4所示。

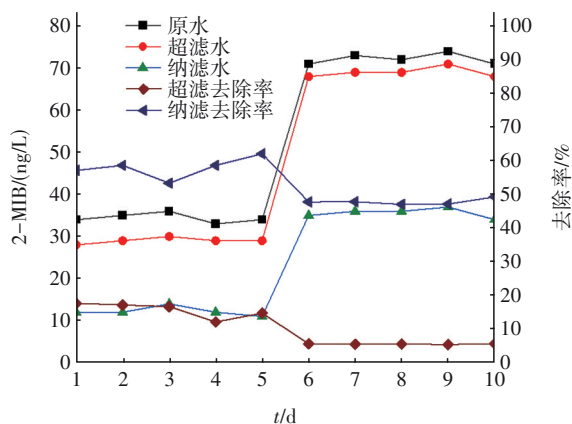


图4 不同沉后水2-MIB浓度下双膜各单元出水2-MIB浓度
Fig.4 2-MIB concentration in effluent of double membrane under different 2-MIB concentrations in settled water

陶瓷超滤膜对两组不同浓度2-MIB的去除率分别为 $(15.66 \pm 2.27)\%$ 和 $(5.50 \pm 0.13)\%$,表明陶瓷超滤膜对2-MIB的去除能力较弱,原因是其分子尺寸远小于超滤膜孔径,其有限的去除效果归因于膜表面滤饼层的吸附与截留作用。纳滤膜对两组浓度2-MIB的去除率分别达到 $(57.96 \pm 3.07)\%$ 和 $(47.81 \pm 0.88)\%$,是去除2-MIB的关键单元,其截留机理主要包括两方面,一是纳滤膜的孔径(1 nm)与2-MIB的分子尺寸匹配,通过尺寸排阻效应实现主体截留;二是纳滤膜表面的聚酰胺活性层具有一定的疏水性,可通过溶解-扩散效应对2-MIB分子实现辅助吸附去除。然而,纳滤膜的出水2-MIB浓度分别为 (12.20 ± 1.10) 和 (35.60 ± 1.14) ng/L,仍然高于GB 5749—2022的限值要求(10 ng/L)。

双膜对2-MIB的去除主要依靠纳滤膜。当双膜单元进水2-MIB在34~72 ng/L范围内时,纳滤膜对2-MIB的去除率稳定在50%左右。据此推算,若将双膜单元进水2-MIB浓度控制在10~20 ng/L范围内,纳滤膜出水2-MIB可稳定低于10 ng/L;当原水中的2-MIB浓度高于20 ng/L时,可开启预臭氧及混凝沉淀单元,控制超滤进水2-MIB低于20 ng/L,保障出水达标;当原水的嗅味物质浓度更高或无预处理单元时,可耦合高锰酸钾预氧化及粉末活性炭吸附强化2-MIB去除^[14],或者在原水泵站投加粉末活

性炭,将原水中的2-MIB降至20 ng/L以下,再经陶瓷超滤膜和纳滤膜处理实现出水水质达标。

2.3.2 新污染物的去除效能

为考察双膜短流程净水工艺对新污染物的去除效果,在流程1下开展PPCPs、EDCs、PFCs和POPs四类新污染物指标检测。试验期间设置两组平行工况:工况1为陶瓷超滤膜前不投加臭氧,工况2为陶瓷超滤膜前连续投加1.2 mg/L臭氧。如图5所示,汉江水源中检出20种新污染物,其中双酚A浓度最高,经预氧化+混凝沉淀预处理后各类新污染物浓度均低于20 ng/L,再经“陶瓷超滤膜+纳滤膜”处理后,出水基本可降至10 ng/L以下,其中全氟辛酸和双酚A出水浓度最高,其余浓度均低于2 ng/L。

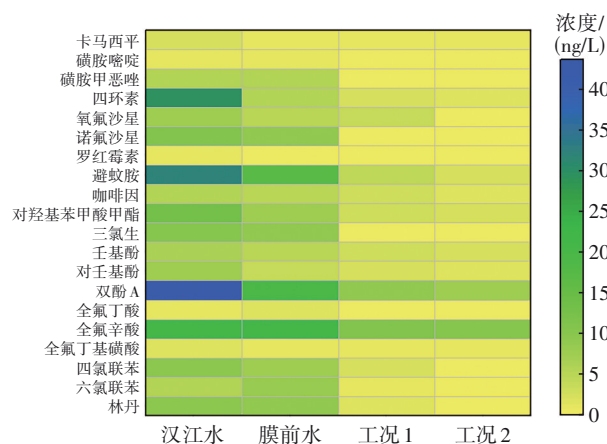


图5 各处理单元出水新污染物浓度

Fig.5 Emerging contaminants concentration of different treatment units

预处理及两种工况对新污染物的去除率见图6。预氧化+混凝沉淀预处理对PPCPs的去除效果存在显著差异,其中对四环素去除率最高达80%,卡马西平次之为61.54%,避蚊胺、对羟基苯甲酸甲酯、磺胺嘧啶、罗红霉素和氧氟沙星的去除率在30%~50%之间,诺氟沙星、三氯生、咖啡因和磺胺甲恶唑的去除率均不超过20%。双膜单元对分子质量较大或电荷性较强的PPCPs可实现近乎完全截留,工况1下磺胺甲恶唑去除率为91.38%,工况2下实现100%去除;氧氟沙星、避蚊胺和四环素在工况1下去除率分别为31.37%、76.02%和59.32%,工况2下分别提升至100%、87.72%和72.88%。此外,双膜对罗红霉素、咖啡因和对羟基苯甲酸甲酯的去除率整体在50%~70%之间,而对卡马西平这类小分子极性中性PPCPs的截留率仅为10%~

过简化预处理单元,省去预氧化与混凝沉淀环节,是总碳排放强度和运行费用最低的方案,但其全部污染物去除负荷均由膜系统承担,长期运行存在膜污染加剧、能耗上升的显著风险。流程3因采用连续臭氧投加,电耗最高,使其电耗相关碳排放与费用均为最高。流程1、2的碳排放与成本处于中等水平,二者核心差异在于流程2的药剂消耗成本略高于流程1,而流程1因预臭氧单元的臭氧制备需求,电耗略高于流程2。

从双膜系统的成本与碳排放构成来看,纳滤膜单元是双膜系统电耗的核心来源,占双膜系统总电耗的60%~70%,主要归因于其高压运行能耗;同时纳滤膜的药剂消耗(阻垢剂、清洗剂)占双膜系统总药耗的40%~50%,是影响运行成本与碳排放强度的关键单元。稳定的预处理与陶瓷超滤单元运行,可有效延长纳滤膜的化学清洗周期与使用寿命,降低膜元件更换带来的材料碳排放与经济成本。

2.5 面向高品质供水的低碳高效工艺路线构建

研究表明,以“陶瓷超滤膜+纳滤膜”为核心的四种短流程净水工艺均能有效处理汉江原水,产水各项指标均满足GB 5749—2022的要求,具备提供高品质饮用水的技术可行性。综合比较,建议将流程1“预臭氧—混凝沉淀—陶瓷超滤膜(间歇臭氧清洗)—纳滤膜—消毒”作为处理汉江原水的主体工艺,并根据汉江水质季节变化规律调整运行策略。

在冬季和春季(12月—次年4月):超越预臭氧和混凝沉淀单元,并将超滤膜前的臭氧清洗模式改为连续臭氧氧化(切换至流程4)。此阶段原水水质相对稳定,可充分发挥流程4的低成本、低碳排优势;在夏季和秋季(5—11月,特别是暴雨或藻类高发期8—11月):采用完整的流程1运行,确保工艺整体的抗冲击能力和产水稳定性;在水源水质发生突变时,可在流程1的基础上,将超滤膜前的间歇臭氧清洗调整为连续臭氧氧化,进一步提升系统对有机污染物和臭味物质的整体处理效能。

在流程1长达6个月的运行中,系统表现出良好的抗污染能力与运行稳定性。其中,陶瓷超滤膜在200 L/(m²·h)的恒通量下稳定运行,TMP始终控制在100 kPa以内,化学清洗周期维持在7~10 d;纳滤膜系统回收率稳定在75%~85%之间,各段最高TMP分别为81.5、72.5和36.0 kPa,且在整个运行期间未进行化学清洗。

3 结论

① 以“陶瓷超滤膜+纳滤膜”为核心的短流程工艺,能高效处理汉江原水,对COD_{Mn}的去除率达到98%以上,对POPs和PPCPs的去除率分别达到100%和79%以上,对EDCs和PFCs的去除率在50%以上,具备提供高品质饮用水的技术可行性。

② 在陶瓷超滤膜前连续投加臭氧,可有效缓解膜污染,使清洗周期延长至7~10 d;纳滤是实现高品质供水的核心单元,其对2-MIB的去除率约为50%,控制双膜单元进水2-MIB浓度在10~20 ng/L,是保证纳滤膜出水2-MIB稳定低于10 ng/L的必要条件。

③ 为实现汉江水源的高品质、低碳高效供水,建议采用流程1作为主体工艺路线,并实施季节性运行策略:在冬季和春季水质相对稳定期,可超越预臭氧和混凝沉淀单元,切换至流程4模式以降低能耗、运行成本及碳排放强度;在夏季和秋季高藻、高有机物及暴雨频发期,则启用完整的流程1,确保系统的抗冲击能力和出水水质的稳定性。

参考文献:

- [1] 张孝洪,赖浩林,张可佳,等.多水源供水条件下的嗅味复合效应及综合去除效果[J].中国给水排水,2024,40(21):34-42.
Zhang Xiaohong, Lai Haolin, Zhang Kejia, et al. Odor compound effect and its comprehensive removal under the condition of multi-source water supply [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40 (21): 34-42 (in Chinese).
- [2] 李圭白,梁恒,白朗明,等.绿色工艺——第三代饮用水净化工艺的发展方向[J].给水排水,2021,47(9):1-5.
Li Guibai, Liang Heng, Bai Langming, et al. Green process: development direction of the third generation drinking water purification process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47 (9): 1-5 (in Chinese).
- [3] 周全,张垚,张程炯,等.超滤-纳滤双膜工艺处理黄河水的中试研究[J].中国给水排水,2024,40(21):43-47.
Zhou Quan, Zhang Yao, Zhang Chengjiong, et al. Pilot study on treatment of yellow river water through ultrafiltration-nanofiltration hybrid membrane process [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(21): 43-47 (in Chinese).

- [4] 袁哲, 雷智丰, 赵文斌, 等. 南水北调汉江水质变化后某水厂臭氧-活性炭深度处理工艺优化研究[J]. 给水排水, 2023, 49(4): 16-24.
Yuan Zhe, Lei Zhifeng, Zhao Wenyu, et al. Operation effect of O₃-BAC advanced treatment process in a water plant after water quality change of Hanjiang River due to the South-to-North Water Diversion Project [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49 (4) : 16-24 (in Chinese).
- [5] 史志皓, 朱海涛, 欧阳卓明, 等. 武汉市汉江原水悬浮物浓度与浊度对应关系的研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(21): 51-56.
Shi Zhihao, Zhu Haitao, Ouyang Zhuoming, et al. Relationship between suspended solid and turbidity in raw water from Han River in Wuhan [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(21): 51-56(in Chinese).
- [6] 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 Xinsheng. 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).
- [7] 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 Renbing, Zou Lei, Liu Haiyan, 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).
- [8] 侯立安, 张雅琴, 张林. 饮用水源新污染物防控发展方向的思考[J]. 给水排水, 2022, 48(4): 1-5.
Hou Li'an, Zhang Yaqin, Zhang Lin. Discussion on the development of prevention and control of new pollutants in drinking water sources [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(4): 1-5(in Chinese).
- [9] 李宗强, 束敏, 董立. 低浊水预氯胺、预氯化及预臭氧处理效能分析[J]. 中国给水排水, 2025, 41(21): 83-87.
Li Zongqiang, Shu Min, Dong Li. Performances of pre-chloramination, pre-chlorination, and pre-ozonation for treatment of low-turbidity water [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(21): 83-87(in Chinese).
- [10] 刘海龙, 付晶淼, 郭雪峰, 等. 臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 1918-1927.
Liu Hailong, Fu Jingmiao, Guo Xuefeng, et al. Effects of joint-reaction combined by ozonation and coagulation on aquatic organic matters [J]. Environmental Science, 2017, 38(5): 1918-1927(in Chinese).
- [11] 周婷如, 程翼, 段冬, 等. 高通量短流程陶瓷膜工艺运行稳定性研究[J]. 给水排水, 2024, 50(7): 33-41.
Zhou Tingru, Cheng Yi, Duan Dong, et al. Research on operational stability of high throughput short flow process with ceramic membrane [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(7): 33-41(in Chinese).
- [12] 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 Xianghua, Yu Qinfang, He Xiaomei, 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).
- [13] 舒为群, 黄玉晶, 曾惠, 等. 中国居民饮用水中钙镁及其相关指标适宜保留水平的探讨[J]. 给水排水, 2017, 43(10): 13-18.
Shu Weiqun, Huang Yujing, Zeng Hui, et al. Discussion on the appropriate retention levels of calcium, magnesium and related indicators in drinking water for Chinese residents [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(10): 13-18(in Chinese).
- [14] 郭晓鸣, 谢耀华, 黄慧, 等. 南方某常规工艺水厂应对原水低2-MIB的工艺优化[J]. 中国给水排水, 2025, 41(3): 22-27.
Guo Xiaoming, Xie Yaohua, Huang Hui, et al. Process optimization for a conventional water treatment plant in southern china to address low levels of 2-MIB in raw Water [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(3): 22-27(in Chinese).

作者简介: 鲍任兵(1991—), 男, 河南商丘人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水污染防治。

E-mail: rbingbao@163.com

收稿日期: 2025-12-23

修回日期: 2026-03-18

(编辑: 李德强)