

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.12.015

# 前置臭氧-生物流化床工艺用于水厂提质改造

彭锦玉<sup>1,2</sup>, 李振邦<sup>1</sup>, 张坤乾<sup>3</sup>, 付成胜<sup>1</sup>, 李玉江<sup>2</sup>, 王全勇<sup>1</sup>

(1. 山东华城工程技术有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东大学 环境科学与工程学院, 山东 济南 250100; 3. 高密市引调水工程运营维护中心, 山东 潍坊 261500)

**摘要:** 为进一步提高供水水质,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求,山东某水厂(处理水量为 $4\times 10^4$  m<sup>3</sup>/d)在常规工艺前增设了臭氧催化氧化-生物流化床工艺。新工艺投产后,滤池出水2-MIB与GSM降至检出限以下,氨氮降至0.02 mg/L以内,DOC降至2.7 mg/L,其中新增工艺对溶解性有机碳(DOC)去除贡献占比为88.8%,高通量测序结果表明生物流化床上负载了*Gemmatimonas*等微生物;沉淀池出水颗粒物总数自改造前的15 959 CNT/mL降至4 963 CNT/mL,形成的絮体具有三维密实的立体结构,滤后水颗粒物总数降至416 CNT/mL,浊度度降至0.08 NTU;供水水质全面提升,且在连续运行中稳定可靠。实践证明,先行去除水中有机物的设计思路在该水厂行之有效,不但可高效去除2-MIB、DOC、氨氮等污染物,也提高了混凝脱稳效率,强化了后续常规处理工艺对颗粒物的去除效果。

**关键词:** 臭氧催化氧化; 生物流化床; 2-甲基异莰醇; 溶解性有机碳; 颗粒物

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)12-0094-07

## Application of Pre-ozone and Biological Fluidized Bed in Updating and Transformation of Waterworks

PENG Jin-yu<sup>1,2</sup>, LI Zhen-bang<sup>1</sup>, ZHANG Kun-qian<sup>3</sup>, FU Cheng-sheng<sup>1</sup>,  
LI Yu-jiang<sup>2</sup>, WANG Quan-yong<sup>1</sup>

(1. Shandong Huacheng Engineering Technology Co. Ltd., Jinan 250101, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China; 3. Gaomi City Water Diversion Project Operation and Maintenance Center, Weifang 261500, China)

**Abstract:** In order to enhance water quality and comply with *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022), the ozone catalytic oxidation and biological fluidized bed process was constructed before the conventional process at a waterworks in Shandong, with water treatment capacity of  $4\times 10^4$  m<sup>3</sup>/d. After the operation of the new process, the concentrations of 2-methylisoborneol (2-MIB) and geosmin (GSM) in the filter effluent were reduced to below the detection limit. Ammonia nitrogen was reduced to within 0.02 mg/L, and dissolved organic carbon (DOC) was reduced to 2.7 mg/L. Notably, the additional process contributed 88.8% to the removal of DOC, and high-throughput sequencing revealed the presence of microorganisms such as *Gemmatimonas* on the biological fluidized bed. Regarding turbidity and particulate matter, the total particle matter amount in the sedimentation effluent decreased from 15 959 CNT/mL before the retrofit to 4 963 CNT/mL, and the formed flocs had a three-dimensional dense

structure. The total particle matter amount in the filtered water further decreased to 416 CNT/mL, and turbidity decreased to 0.08 NTU, resulting in a comprehensive improvement of supply water quality, and the process exhibited stability during continuous operation. This demonstrates the design concept of proactively removing organic matter is effective, which not only efficiently removes 2-MIB, DOC, and ammonia nitrogen, but also enhances the coagulation and destabilization efficiency, and strengthens removal effect of turbidity and particulate matter in the subsequent conventional treatment process.

**Key words:** ozone catalytic oxidation; biological fluidized bed; 2-methylisoborneol; dissolved organic carbon (DOC); particulate matter

《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)新增 2-甲基异莰醇(2-MIB)、土臭素(GSM)等水质指标要求;同时,随着原水中藻类、有机物、内分泌干扰物等浓度的升高,采用常规处理工艺的净水厂普遍存在工艺改造与水质提升需求。臭氧-活性炭深度处理工艺可有效去除水中有机物、氨氮、微污染物,因此成为水厂改造工艺的首选<sup>[1-2]</sup>,但原水中藻类、有机物等会影响常规处理工艺效率<sup>[3-4]</sup>,进入臭氧活性炭工艺单元后浊度和有机物仍维持较高浓度,导致吸附工段活性炭使用寿命缩短、微生物滋生过快,存在微生物泄漏风险。

考虑到原水中有机物对常规处理工艺效率的影响,拟将臭氧催化氧化-生物流化床工艺置于常规处理工艺前端,首先利用臭氧催化氧化去除来水中的难降解有机物。研究表明,单独臭氧氧化工艺对 2-MIB 与 GSM 等嗅味物质去除能力有限,反应速率常数 $<10\text{ mol}/(\text{L}\cdot\text{s})^{[5-6]}$ ,而催化氧化产生的羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )与 2-MIB 和 GSM 的反应速率常数 $>10^9\text{ mol}/(\text{L}\cdot\text{s})^{[7-8]}$ 。催化氧化出水进入生物流化床,利用活性炭载体的流化提高传质效率,通过负载的生物作用去除臭氧氧化产生的小分子有机物及氨氮等,从而提高后续常规处理工艺的效率。

前置臭氧催化氧化-生物流化床工艺用于工程实践尚属全国首例,分析工艺建成后对嗅味物质、溶解性有机碳(DOC)、氨氮和浊度等污染物去除效果,一方面可研究深度处理工艺前置对净水全流程的影响,从生物学层面揭示前置流化床工艺的微生物种群特征;另一方面可为同类净水厂满足新标准、实现高品质供水提供技术借鉴与案例支撑。

1 项目概况

1.1 工艺流程及水质水量

山东某水厂建于 2012 年,设计供水能力为  $4\times$

$10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,原水为引黄水库水。主体工艺为管道混合/自旋转微涡絮凝/A 型斜板沉淀/V 型滤池/消毒,工艺流程见图 1。

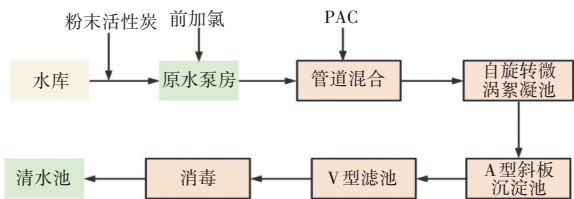


图 1 改造前水处理工艺流程

Fig.1 Process flow chart of water treatment before renovation

为应对季节性的嗅味问题,厂区在水库来水中投加粉末活性炭进行吸附。

不同季节的原水水质见表 1。

表 1 不同季节的原水水质

Tab.1 Raw water quality in different seasons

水质指标	夏季	冬季
浊度/NTU	7.81~10.62	3.83~6.14
高锰酸盐指数/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	3.52~7.05	3.22~6.83
2-MIB/( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )	50~300	10~40
GSM/( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )	8~100	5~20
藻类/( $10^4\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$ )	2 000~20 000	1 500~3 000

由表 1 可见,该水厂进水中高锰酸盐指数、藻类数量高,由藻类衍生的 2-MIB 与 GSM 浓度高,处理难度相对较大。

1.2 改造前工艺运行情况

通过对该水厂近 5 年运行情况进行综合分析,发现提质改造前工艺主要存在以下问题:

① 原水中 2-MIB 与 GSM 浓度较高,为降低嗅味物质浓度,厂区采用粉末活性炭吸附,造成沉淀池出水浊度较高、滤池过滤周期较短,同时由于粉炭吸附作用有限,一旦进水 2-MIB 与 GSM 浓度超

70 ng/L, 现有处理工艺出水中臭味物质浓度难以满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。

② 原水中浓度较高的有机物和藻类增加了颗粒物表面电位和胶体稳定性, 导致混凝效率较低, 水厂只能通过增加药剂投加量来提高混凝沉淀效率(一般PAC投加量不低于50 mg/L, 10%有效浓度), 当原水pH>8.5时, 出现铝离子超标。

③ 沉淀出水浊度高(>2 NTU), 造成滤池反冲洗频繁(1~2次/d), 厂区的水耗、电耗负担较大, 增加了水厂的运行成本。

## 2 水厂提质改造工艺方案

### 2.1 工艺思路

由于来水中藻类、有机物浓度较高, 预氧化难以起到明显效果, 若先进行混合/絮凝等常规处理, 则原水中有机物等会造成常规处理工艺效率下降, 这也是沉淀池出水浊度高、反洗频繁的原因。因此, 工艺设计时将臭氧催化氧化-生物流化床前置, 形成以“臭氧催化氧化-生物流化床+原有常规处理”的新工艺流程(见图2)。利用高级氧化(臭氧/双氧水催化氧化系统产生 $\cdot\text{OH}$ )协同生物作用, 优先去除水中的臭味物质和有机物, 以及氨氮、微量难降解有机污染物, 应对原水水质变化, 提高后续常规工艺处理效率; 生物流化床中脱落的生物膜碎片等通过常规给水处理工艺去除, 规避生物泄漏的潜在风险。

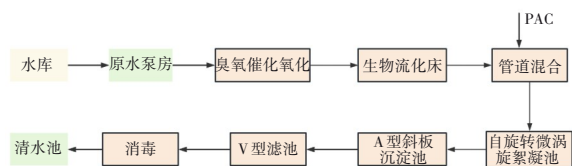


图2 改造后的水处理工艺流程

Fig.2 Process flow chart of water treatment after renovation

### 2.2 前置臭氧催化氧化-生物流化床设计

臭氧催化氧化-生物流化床分臭氧催化氧化池和生物流化床两部分(见图3)。设计过程中将臭氧催化氧化-生物流化床设为1个独立系列, 同时实现分格检修, 每个系列设置1组射流泵及对应的自激射流空化曝气系统, 1组双氧水投加泵, 分4个点进行药剂投加, 确保药剂与原水最大程度地接触混合, 充分发挥其效能。每个投加点的臭氧投加通过臭氧分气器进行调节分配。

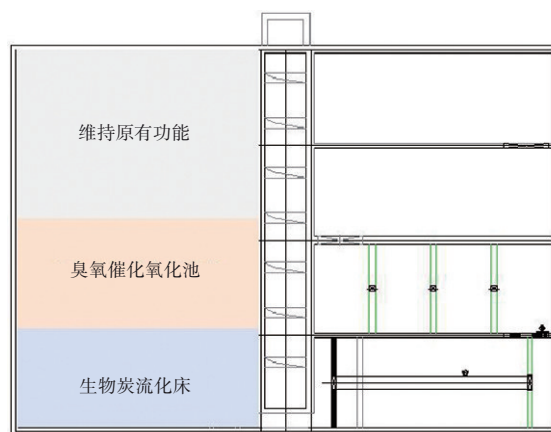


图3 臭氧催化氧化-生物流化床工程布设

Fig.3 Layout of ozone catalytic oxidation-biological fluidized bed

臭氧催化氧化池的内壁进行防腐处理, 设计水深4.5 m, 停留时间15 min, 顶部加盖封闭。生物流化床底部增设布水装置、反冲洗气管, 承托层高度0.5 m, 设计水深4.5 m, 流化床填料高度2 m, 停留时间15 min, 上升流速25 m/h。

设计原水臭氧最大投加量为4 mg/L, 臭氧质量分数为10%, 选用臭氧制备量2.5 kg/h的2台液氧源臭氧发生器。双氧水采用立式储罐, 有效容积1 m<sup>3</sup>; 计量泵:  $Q=20$  L/h,  $P=0.25$  MPa,  $N=0.25$  kW, 2台, 1用1备, 变频。按照前期中试结果, 双氧水按 $m(\text{O}_3):m(\text{H}_2\text{O}_2)=5:1\sim10:1$ 的比例投加,  $\text{H}_2\text{O}_2$ 浓度为7.5%。

### 2.3 检测项目与分析方法

2-MIB和GSM: 采用《生活饮用水臭味物质 土臭素和2-甲基异莰醇检验方法》(GB/T 32470—2016)测定; 氨氮: 采用《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)测定; DOC: 将水样经过0.45 μm的滤膜过滤后测定TOC含量; 浑浊度: 采用哈希浊度仪L2300测定; 颗粒数: 采用绿洁激光颗粒物分析仪测定。

微生物多样性组成谱分析: 采用Illumina平台对群落DNA片段进行双端(Paired-end)测序, 对16S\_V3V4a区进行扩增, 引物F: ACTCCTACGGGAGGCAGCA, 引物R: GGACTACHVGGGTWTC-TAAT。

絮体形貌: 采用捷克TESCAN MIRA LMS扫描电子显微镜, 将沉淀池絮体进行真空冷冻干燥, 干燥后的样品喷金, 观察形貌与结构。



3 工程应用效果及分析

2023年9月,该工程通水运行并完成调试。新工艺运行后臭氧投加量为2 mg/L,双氧水投加量为0.4 mg/L,接触氧化时间为15 min。常规工艺运行参数、药剂投加量等仍按新工艺投产前执行。为比较投产前后的水质变化,在投产前后各取5 d厂区进出水及各工艺出水水样,求平均值。投产前集中取样检测时间为8月20日—25日,水温20~22℃;投产前集中取样检测时间为9月25日—30日,水温19~21℃。

3.1 嗅味物质去除效果

新工艺投产前后2-MIB和GSM及其去除率变化见图4。

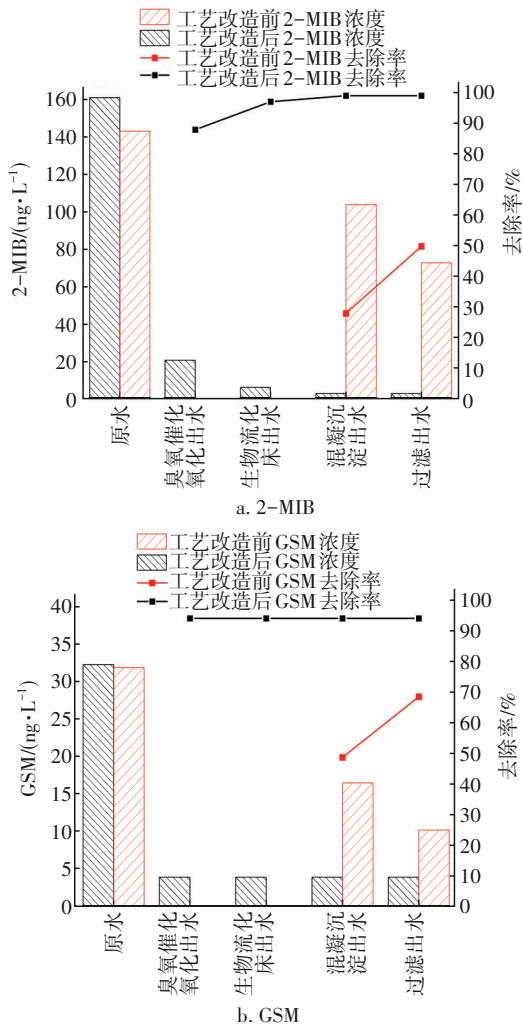


图4 新工艺投产前后2-MIB和GSM浓度及其去除率变化

Fig.4 Changes of 2-MIB and GSM concentration and their removal rates before and after the implementation of the new process

由图4可见,新工艺投产前原水2-MIB均值为142.4 ng/L,经混凝沉淀处理后降至103.2 ng/L,经过滤处理后降至72 ng/L;原水GSM均值为31.8 ng/L,经混凝沉淀处理后降至16.4 ng/L,经过滤处理后降至10.1 ng/L。虽然后续工艺还能去除一部分嗅味物质,但出厂水仍存在超标风险(标准要求2-MIB和GSM限值均不得高于10 ng/L)。混凝沉淀去除效率较低的原因在于2-MIB和GSM是挥发性有机化合物,在水中以弱极性低分子形式存在,不易被混凝剂捕获或凝聚<sup>[9]</sup>。滤池具有一定去除效率的原因是在长期运行过程中可截留、滋生部分微生物。取石英砂滤池微生物进行高通量测序,系统发育树及丰度占比前5的菌属见表2。

表2 石英砂滤池微生物菌群丰度分布(前5)

Tab.2 Abundance distribution of microbial communities in quartz sand filter media (top 5)

序号	菌属	菌群丰度/%	说明
1	A0389	9.5	属于拟杆菌门的革兰氏阴性杆菌,能够利用有机物和亚硝酸盐进行反硝化作用
2	A4b	6.6	参与氮循环
3	Rhizorhapis	4.8	能够分泌纤维素酶,分解纤维素等多糖类物质,将纤维素水解为葡萄糖单元,从而利用纤维素作为碳源和能源
4	Amphiplicatus	3.2	利用有机物和亚硝酸盐进行反硝化作用
5	Meiothermus	3.0	利用多种有机物作为碳源和能源进行异养反硝化

由表2可见,这些微生物均与氮循环及降解有机物有关,这也证实了滤池可利用微生物的氧化分解作用去除部分有机物。

新工艺投产后,原水2-MIB均值为160.3 ng/L,经臭氧催化氧化处理后降至20 ng/L,经生物炭流化床处理后降至5.5 ng/L,再经混凝沉淀处理后无法检出(<2.2 ng/L);原水GSM均值为32.2 ng/L,经臭氧催化氧化处理后,GSM未检出(<3.8 ng/L)。可见,新增工艺对2-MIB与GSM均有较好的去除效果。

取流化床填料上微生物进行高通量测序,系统发育树及丰度占比前5的菌属见表3。由表3可见,该工艺运行30 d后,流化床填料上占比前5位的微生物均具备有机物降解功能,部分微生物可参与氮循环转化,证实了流化床生物炭的微生物作用。

表3 生物流化床微生物菌群丰度分布(前5)  
Tab.3 Abundance distribution of microbial communities in biological fluidized bed (top 5)

序号	菌属	菌群丰度/%	说明
1	<i>Gemmatimonas</i>	12.0	可与其他微生物共同形成生物膜,用于分解和降解有机物质,减少水中的有机负荷;部分菌株参与氮循环,包括氨氧化和硝化过程 <sup>[10]</sup>
2	<i>Hydrogenophaga</i>	9.9	主要参与有机物的降解和氮循环
3	<i>Rhodobacter</i>	3.9	红杆菌科,可在好氧或缺氧条件下生长,主要参与有机物的降解和氮循环,包括氮气还原和氮氧化过程
4	<i>Thermomonas</i>	3.5	主要参与有机物的降解和氮循环
5	<i>Haliscomenobacter</i>	2.8	可与其他微生物一起形成生物膜,广泛用于生物滤池和废水处理系统

### 3.2 氨氮及溶解性有机碳(DOC)去除效果

新工艺投产前后氨氮和DOC变化见图5。

由图5(a)可见,新工艺投产前原水氨氮浓度均值为0.13 mg/L,经混凝沉淀处理后降至0.09 mg/L,经过滤处理后无法检出(<0.02 mg/L);由于生物膜的作用,过滤工艺段在氨氮去除贡献占比较大。新工艺投产后,原水氨氮均值同为0.13 mg/L,经臭氧催化氧化处理后,由于臭氧氧化部分有机氮生成了氨氮,使得氨氮升高至0.30 mg/L;出水进入生物流化床,在微生物及炭吸附共同作用下氨氮降至0.12 mg/L,经混凝沉淀处理后降至0.09 mg/L,再经过滤处理后无法检出(<0.02 mg/L)。

由图5(b)可见,新工艺投产前原水DOC均值为7.6 mg/L,经混凝沉淀处理后降至6.1 mg/L,经过滤处理后降至5.2 mg/L。过滤工艺对DOC的去除率为14.8%,分析是由于原水DOC分子质量较大,虽经混凝沉淀去除了部分大分子有机物,但进入滤池段的有机物可生化性依然较差,微生物对其去除率偏低。新工艺投产后,原水DOC均值为8.1 mg/L,经臭氧催化氧化处理后降至6.7 mg/L,这表明在臭氧氧化及自由基的作用下,部分有机物已被矿化为CO<sub>2</sub>;进入生物流化床后DOC降至3.3 mg/L,生物炭对DOC的去除率为50.7%,分析是由于臭氧氧化对有机物进行开环、断链,将其分解为易生化的小分子有机物,再加上臭氧投加后溶解氧快速升高至10 mg/L以上,有效地促进了微生物发挥作用。此外,

活性炭本身对部分DOC有吸附作用,因此生物炭表现出对DOC较高的去除率。经混凝沉淀及过滤处理后,DOC降至2.7 mg/L,比新工艺投产前降低了48.1%。在这一过程中,臭氧催化氧化-生物流化床对DOC的去除占88.8%,后续常规工艺对DOC的去除占11.2%。

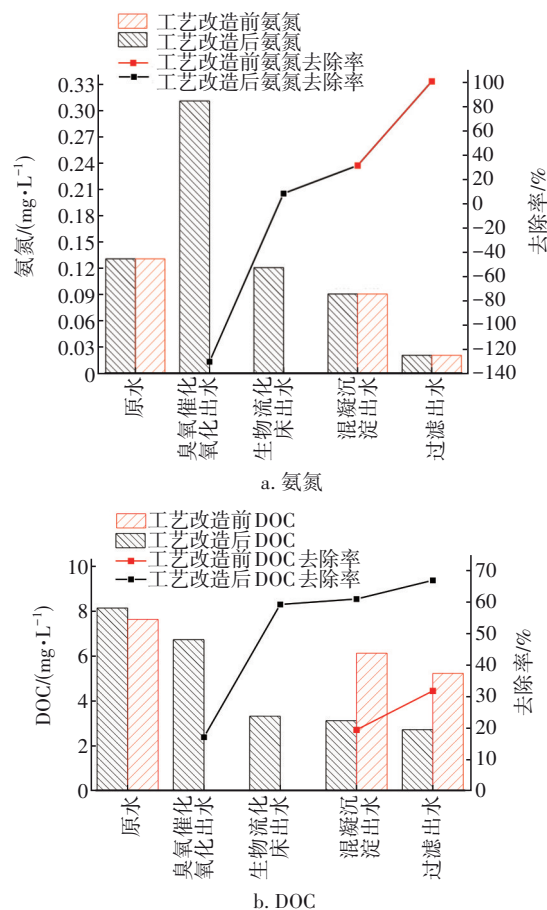


图5 新工艺投产前后氨氮和DOC浓度变化

Fig.5 Concentration changes of ammonia nitrogen and DOC before and after the implementation of the new process

### 3.3 浊度去除效果

工艺未升级前,原水浊度均值为8.41 NTU, Zeta电位为-9.59 mV;混凝沉淀处理后浊度为2.14 NTU,并且由于混凝剂与颗粒相互作用,中和了颗粒物表面部分负电荷,Zeta电位升高至-6.39 mV;石英砂滤池可过滤去除部分表面带电的颗粒物,浊度为0.45 NTU,Zeta电位继续升高至-4.24 mV。此外,在颗粒数层面,原水中颗粒物总数为29 199 CNT/mL,混凝沉淀处理后为15 959 CNT/mL,其中5 μm以下的颗粒物占比为72.1%;过滤后

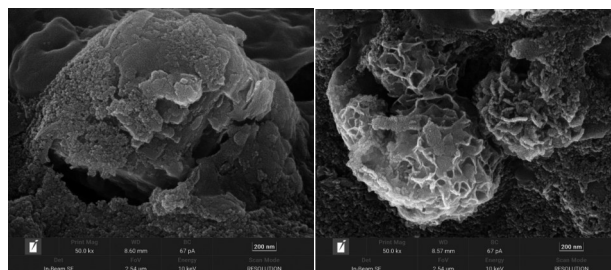
颗粒物总数降至 3 540 CNT/mL。

新工艺投产后,检测期间原水浑浊度均值为 8.92 NTU,原水 Zeta 电位为 -10.21 mV;臭氧氧化处理后浑浊度为 8.74 NTU,基本无明显变化,但由于在臭氧氧化过程中,颗粒表面物质发生氧化反应失去电子,使颗粒在溶液中的电荷状态更为正向<sup>[11]</sup>,Zeta 电位升高至 -5.82 mV;经过流化床处理后,浑浊度不降反升至 9.72 NTU,Zeta 电位降至 -9.10 mV,推测是由于流化床上微生物繁殖、生物量增加,从而导致水中生物体、胞外聚合物等悬浮颗粒增加;经混凝沉淀处理后浑浊度降至 0.96 NTU,比投产前降低 55.1%,Zeta 电位升高至 1.37 mV;经石英砂滤池过滤后浑浊度为 0.08 NTU,Zeta 电位降至 0.96 mV。

新工艺投产后,流化床出水中颗粒物总数为 29 370 CNT/mL,经混凝沉淀处理后,颗粒物总数降至 4 963 CNT/mL,其中,5  $\mu\text{m}$  以内的颗粒物降幅较为明显,自改造前的 14 067 CNT/mL 降至 3 063 CNT/mL,小粒径颗粒物更易穿透滤池,5  $\mu\text{m}$  以内颗粒物的大幅降低使滤后水中的颗粒物数量随之降低;经过滤处理后,颗粒物总数降至 416 CNT/mL。新工艺投产前后扫描电子显微镜下沉淀池絮体形态变化见图 6。

图 6(a) 为原水直接混凝沉淀形成的絮体, 具有

典型二维絮体的特征,在平面上具有较大长度和宽度,絮体相对松散;图6(b)为相同放大倍数下,经臭氧催化氧化-生物流化床处理,再经混凝沉淀形成的絮体,在三个空间维度上都有显著的尺寸,形成了密实的立体结构,具有更好的沉降性能。研究<sup>[12]</sup>表明,与二维结构相比,三维絮体通常用于更彻底地去除悬浮物、有机物和其他污染物。这表明新工艺投产后,利用臭氧催化氧化、生物氧化及炭吸附等作用去除水中及颗粒物表面的有机物,提高了混凝脱稳效果,强化了常规工艺对浑浊度和颗粒物的去除。这也与前期工艺设计思路相符,即先行去除水中有机物等,提高颗粒物的脱稳与聚集效率。



a. 投产前

b. 投产后

图6 新工艺投产前后沉淀絮体形貌变化

**Fig.6 Morphology changes of precipitated flocs before and after the implementation of the new process**

### 3.4 工艺运行稳定性

新工艺投产后厂区连续运行数据如表4所示。

表4 新工艺投产后厂区运行情况

**Tab.4 Operation results after adding new process**

项目	原水		臭氧催化氧化出水		生物流化床出水		混凝沉淀出水		滤池出水	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
2-MIB/(ng·L <sup>-1</sup> )	103~188	157.4	10~24	17.4	4.1~7.3	6.1	<2.2	<2.2	<2.2	<2.2
GSM/(ng·L <sup>-1</sup> )	21.5~46.7	32.2	<3.8	<3.8	<3.8	<3.8	<3.8	<3.8	<3.8	<3.8
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.07~0.19	0.14	0.18~0.33	0.28	0.09~0.18	0.12	0.05~0.10	0.08	<0.02	<0.02
浑浊度/NTU	5.97~14.52	8.90	5.68~11.34	8.41	5.54~11.10	9.09	0.45~1.27	0.85	0.06~0.10	≤0.08

由表4可见,在新工艺投产后的连续运行过程中,2-MIB均值由157.4 ng/L降至17.4 ng/L,经生物流化床处理后降至6.1 ng/L,混凝沉淀处理后2-MIB<2.2 ng/L;经臭氧催化氧化处理后GSM无法检出。随着运行时间的延长,活性炭表面逐渐形成生物膜,建立了稳定的微生物群落,氮转化功能菌将氨氮氧化去除,流化床出水氨氮为0.09~0.18 mg/L,经过滤处理后稳定降至0.02 mg/L以内。另外,流化床出水浊度与进水相近或略高于进水。这表明流化床工艺对无机颗粒基本无拦截和去除能

力,且部分生物膜脱落导致流化床出水浑浊度升高。在长期连续运行过程中,混凝沉淀、过滤出水浑浊度分别为0.45~1.27 NTU与0.06~0.10 NTU,滤池出水浑浊度均值不高于0.08 NTU,表明该工艺可保持长期稳定的运行效果。

## 4 结论

① 臭氧催化氧化-生物流化床对臭味物质具有显著的去除效率,经臭氧催化氧化-生物流化床工艺处理后,2-MIB浓度由160.3 ng/L降至5.5 ng/L,去除率为96.6%;滤池出水2-MIB与GSM分别自投



产前的72.0、10.1 ng/L降至无法检出。

② 高通量测序结果表明,生物流化床上颗粒炭负载的微生物对有机物、氨氮具有氧化分解作用,新工艺投产后,臭氧氧化后的原水氨氮浓度升高,经后续工艺处理后,砂滤出水氨氮降至0.02 mg/L以下,DOC自5.2 mg/L降至2.7 mg/L,比工艺投产前降低了48.1%,其中臭氧催化氧化-生物流化床工艺去除占88.8%。

③ 臭氧催化氧化-生物流化床可有效改善常规处理工艺效率,新工艺投产后,混凝沉淀出水颗粒物总数自15 959 CNT/mL降至4 963 CNT/mL,形成的絮体具有三维密实的立体结构,砂滤出水颗粒物总数自3 540 CNT/mL降至416 CNT/mL,浑浊度自0.45 NTU降至0.08 NTU,全面提升了供水水质。

#### 参考文献:

- [1] 王赫,彭锦玉,王全勇,等. 臭氧/生物活性炭流化床预处理对净水效率的影响[J]. 中国给水排水, 2023, 39(5): 46-52.
- WANG He, PENG Jinyu, WANG Quanyong, *et al.* Effect of ozone/biological activated carbon fluidized bed pretreatment on water purification efficiency [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(5): 46-52 (in Chinese).
- [2] HESS A, MORGENROTH E. Biological activated carbon filter for greywater post-treatment: long-term TOC removal with adsorption and biodegradation [J]. Water Research X, 2021, 13:100113.
- [3] 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).
- [4] 王娜. 腐殖质在混凝与预氧化工艺中的特性及对水处理效能的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- WANG Na. Properties of Humic Substances in Coagulation and Pre-oxidation Processes and Their Impact on Water Treatment Effectiveness [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).
- [5] CERÓN-VIVAS A, VILLAMIZAR LEÓN M P, CAJIGAS Á A. Geosmin and 2-methylisoborneol removal in drinking water treatment [J]. Water Practice and Technology, 2023, 18(1): 159-167.
- [6] SOYLUOGLU M, KIM D, ZAKER Y. Removal mechanisms of geosmin and MIB by oxygen nanobubbles during water treatment [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 443: 136535.
- [7] DONG F L, LIN Q F, LI C, *et al.* Impacts of pre-oxidation on the formation of disinfection byproducts from algal organic matter in subsequent chlor(am)ination: a review [J]. Science of the Total Environment, 2021, 754:141955.
- [8] BENIWAL D, TAYLOR-EDMONDS L, ARMOUR J, *et al.* Ozone/peroxide advanced oxidation in combination with biofiltration for taste and odour control and organics removal [J]. Chemosphere, 2018, 212: 272-281.
- [9] REN J, YANG S, LI L, *et al.* Mechanisms and application of the IAST-EBC model for predicting 2-MIB adsorption by PAC in authentic raw waters: correlation between NOM competitiveness and water quality parameters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 427: 127904.
- [10] ZENG Y, NUPUR, WU N, *et al.* *Gemmatimonas groenlandica* sp. nov. is an aerobic anoxygenic phototroph in the phylum Gemmatimonadetes [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 11:606612.
- [11] HU L, XIA Z. Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 342: 446-453.
- [12] 科瑞谭登. 水处理原理与设计——水处理技术(一) [M]. 第3版. 刘百仓等译. 上海: 华东理工大学出版社, 2016:183-185.
- CRITTENDEN J C. MWH's Water Treatment: Principles and Design [M]. 3rd ed. LIU Baicang, *et al.*, translated. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2016:183-185(in Chinese).

**作者简介:**彭锦玉(1988-),男,山东郓城人,博士研究生,高级工程师,主要从事饮用水除嗅工艺开发及深度降浊工艺优化工作。

**E-mail:** pjy876@163.com

**收稿日期:**2023-11-29

**修回日期:**2024-01-19

(编辑:衣春敏)