

# 饮用水臭氧生物活性炭净化效果与传统工艺比较

黎 雷, 高乃云, 张可佳, 徐飞飞

(同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 高浓度有机物, 高  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的黄浦江原水经预臭氧→高密度澄清池→砂滤→后臭氧→生物活性炭组合处理工艺后, 水质明显优于传统处理工艺. 其中臭氧生物活性炭部分对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  (高锰酸盐指数) 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率分别达到 30.4% 和 18.9%. 由于预臭氧相对预氯化能更好地发挥其氧化助凝作用, 组合工艺中常规工艺部分对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率分别达 29.6% 和 81.0%, 而传统工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率仅分别为 22.3% 和 61.5%. 考察了 2 种工艺出水藻毒素、溴酸盐浓度、三卤甲烷生成潜能以及相对分子质量分布等指标, 表明组合处理工艺更容易去除小分子有机物(臭氧生物活性炭部分对小于  $<1$  kD 的有机物去除率大于 70%), 三卤甲烷生成潜能比传统工艺降低 41%, 且藻毒素和溴酸盐指标均低于我国饮用水标准. 由于组合处理工艺能基本去除  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 可以采用自由氯消毒用以解决传统氯胺消毒带来的亚硝胺等消毒副产物风险和氯胺的气味问题. 在高温季节组合工艺澄清池中出现藻类大量生长的现象, 可能与臭氧持续消毒时间较短有关, 可通过联合预臭氧和预氯化工艺对组合处理工艺中预处理方式进行改造.

**关键词:** 臭氧; 生物活性炭;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ; 有机物

**中图分类号:** X 703.1

**文献标识码:** A

## Comparison of $\text{O}_3$ - BAC Combination and Conventional Processes on Removal of Pollutants for Treating Drinking Water

LI Lei, GAO Naiyun, ZHANG Kejia, XU Feifei

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The treatment effect of the combination process (pre-ozonation → high-density clarifier → sand filter → post ozonation → biological activated carbon(BAC) filter) was much better than that of the conventional process in treating the Huangpu River water, which is especially suit to high organic

material and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in water. The removal efficiencies of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  by the post ozonation-BAC process were up to 30.4% and 18.9% respectively. And as the pre-ozonation process played a better role than pre-chlorination process in aid-coagulation, the removal efficiencies of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  were up to 29.6% and 81% respectively in traditional part of combination process. However, the removal efficiencies of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  were only 22.3% and 61.5% in the conventional process. In addition, the concentrations of algae toxins, trihalomethanes, bromate, molecular weight distribution and the related parameters of the BAC effluent were also investigated. The results show that the organic material with low molecular weight can be more easily removed by the post ozonation-BAC processes (removal efficiency of organic material with molecular weight less than 1 kD is more than 70%). Trihalomethanes formation potential is 41% less than that of the conventional process. Besides, the microcystin and bromate concentrations are lower than drinking water standards in China. Moreover, the free chlorine disinfection can be used because the  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  can be mostly removed by the combination process, which can avoid the generation of nitrosamine as well as the odor and test problem by chloramine disinfection. However, the combination process also has some disadvantages such as the growth of algae on the purification structures during high-temperature season as the reaction time of ozone is relatively short. This problem may be solved by the combined pre-ozonation and pre-chlorination process.

**Key words:** ozone; biological activated carbon;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ; organic material

臭氧( $\text{O}_3$ )具有强氧化性, 并且能去除水中色度、溶解性有机物(DOM)和臭味. 其强氧化能力可以破坏有机物的分子结构<sup>[1-3]</sup>, 因此目前对  $\text{O}_3$  如何更有

收稿日期: 2009-05-31

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008ZX07421-002, 2008ZX07421-004); 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2008AA06A412); 住房和城乡建设部研究开发资助项目(2009-K7-4)

作者简介: 黎 雷(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为饮用水处理技术. E-mail: lilei87296281@126.com

高乃云(1950—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为饮用水处理技术. E-mail: gaonaiyun@tongji.edu.cn

效地去除饮用水中有机物的研究,成为给水处理中关注的重点.生物活性炭是多年来活性炭在饮用水处理的应用实践中产生的.采用生物活性炭比单独采用活性炭吸附具有提高出水水质、延长活性炭的再生周期、减少后氯化的投氯量和降低三卤甲烷的生成量等优势<sup>[4-5]</sup>.臭氧活性炭组合工艺从一定意义上提高了活性炭的处理效率.

由于黄浦江属于微污染水源,所以上海大部分水厂采用的传统处理工艺,对其中溶解性有机物、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和铁锰的去除有限,难以满足日益严格的水质标准,为此迫切需要采用深度处理工艺.本研究以上海杨树浦水厂及国家“八六三”示范工程项目为依托,在已完成的小试和中试成果的基础上,对比研究了实际生产中组合工艺与传统工艺在去除污染物特性中的差异,并进行了机理分析,以期为微污染水源的处理提供参考.

1 材料与方法

1.1 原水水质

实验期间,测试了原水 COD<sub>Mn</sub>(高锰酸盐指数)、DOC(溶解性有机碳)、UV<sub>254</sub>(紫外吸收)、浑浊度、pH 值、水温、DO(溶解氧)和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 等参数(表 1).

表 1 试验期间黄浦江原水主要水质参数

Tab.1 Main water qualities of Huangpu River during the experimental period

水质参数	变化范围	平均值
$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	4.61~6.79	5.52
$\rho(\text{TOC})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	4.27~6.72	5.41
$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	0.118~0.167	0.134
浑浊度(NTU)	7.83~25.50	13.50
pH 值	7.09~7.40	7.21
水温/℃	18.2~31.0	24.7
$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.07~0.63	0.31
$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	3.74~5.21	4.22

1.2 2 种工艺及参数

传统和组合工艺的处理水量都为 6 000 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>.传统工艺流程:黄浦江原水→预氯化→折板絮凝→平流沉淀→砂滤.组合处理工艺流程:黄浦江原水→预臭氧→高密度澄清→后絮凝→砂滤→后臭氧→生物活性炭过滤.根据黄浦江水源水污染物特性优化得出了 O<sub>3</sub>投加浓度、接触时间等关键参数,确定了活性炭选择标准、活性炭工艺空床接触时间和反冲洗方式等工艺参数(表 2).试验时间为 2008 年

3—8 月.

表 2 传统工艺与组合处理工艺的运行参数  
Tab.2 Operating parameters of combination processes and conventional treatment processes

工艺	运行阶段	参数
组合工艺	预臭氧接触池	接触时间 3 min, O <sub>3</sub> 投加量 1.5 mg · L <sup>-1</sup>
	高密度澄清池	进水投加聚合硫酸铝 60~65 mg · L <sup>-1</sup> (以十八水合硫酸铝计),后絮凝投加絮凝剂聚丙烯酰胺(PAM)投加量为 0.12 mg · L <sup>-1</sup>
	V 型砂滤池	滤速 9.9 m · h <sup>-1</sup> ,砂床厚 1.3 m,反冲洗周期 36 h,气水联合冲洗
	后臭氧接触池	接触时间 3 min,按质量比为 5 : 3 : 2 分 3 级投加,投加总量 2.5 mg · L <sup>-1</sup>
	生物活性炭滤池	滤速 9.9 m · h <sup>-1</sup> ,炭床厚度为 2.0 m,反冲洗周期 120 h
传统工艺	预氯化池	氯气 2~3 mg · L <sup>-1</sup> (当氨氮浓度过小时需另加氨)
	絮凝沉淀池	聚合硫酸铝 20~50 mg · L <sup>-1</sup> (以十八水合硫酸铝计)
	快滤池	滤速 12 m · h <sup>-1</sup> ,砂床厚 75.0 cm,反冲洗周期 12 h,单独水冲

1.3 分析方法

溴酸根离子采用离子色谱仪(ICS21000)分析<sup>[6]</sup>,DO 采用便携式溶解氧分析仪(JPB-607)测定, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂分光光度计(UV-2102 PCS, 尤尼柯)测定,相对分子质量分布采用凝胶色谱仪(LC-10ATVP, 岛津)测定,微囊藻毒素(MC-LR)采用高效液相色谱仪(LC-2010AHT, 岛津)测定<sup>[7]</sup>, 浑浊度采用浊度仪(2100N, 哈希)测定, COD<sub>Mn</sub>采用酸性高锰酸钾法测定,溶解性总碳采用 TOC 仪(TOC-V<sub>CPH</sub>, 岛津)测定,三卤甲烷和卤乙酸(US EPA551.1, 552.3)采用气相色谱仪(GC2010, 岛津)测定.

2 结果与讨论

2.1 溶解氧与滤池挂膜的关系

试验的第 1 步是活性炭挂膜,按照一般工程经验,这里以炭滤池出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量浓度降低 40%~50%为挂膜成功标志.挂膜成功时间为 20 d 左右(3 月底—4 月中旬).此外整条生产线调试稳定后砂滤池对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 也有明显去除,是由于 O<sub>3</sub>分解起到的充氧作用使各流程 DO 大大提高(表 3)而促使砂粒表面的生物生长.对组合处理工艺中的砂滤池、炭滤池和传统工艺中的砂滤池取样进行显微镜镜检,发现组合工艺中砂滤池滤料表面和炭滤料表面长有生物膜,其中炭滤料上的菌胶团比砂滤料上菌胶团密实且粗大.而传统工艺的砂滤池滤料上几

乎看不到生物膜,这不仅与 DO 有关,也与水中较高的氯的质量浓度有关.

表 3 组合工艺各流程中 DO 质量浓度变化  
Tab.3 DO concentration variety in different treating processes

流程	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
原水	4.22
预臭氧	9.46
澄清池出水	7.70
砂滤池出水	6.95
后臭氧	9.87
活性炭池出水	7.07

## 2.2 浑浊度去除对比

给水处理中主要依靠澄清工艺来去除浑浊度.平流沉淀池是最早使用的沉淀设备,由于其性能稳定,适应水质变化能力较强等优点而仍在使用.根据接触絮凝的原理开发出来的澄清池是利用高浓度絮体区实现接触絮凝功能,因此无需另设絮凝池,而且澄清池比传统混凝沉淀工艺节约 10%~30% 的药剂,且污泥质量浓度可达  $30 \sim 550 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  [8],有效减少了后续污泥浓缩负荷.此外,通过镜检发现预臭氧工艺较预氯化工艺絮体密实和粗大.图 1 是 2 种工艺对浑浊度的去除率比较.

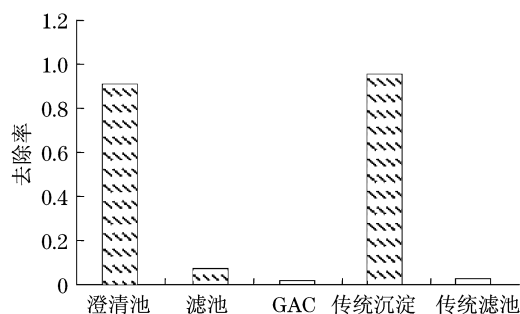


图 1 两种工艺对浑浊度去除率对比

Fig.1 Comparison of turbidity removal efficiency by two different processes

图 1 中,澄清池、滤池、GAC(颗粒活性炭)分别对应组合工艺中的高密澄清池、砂滤池以及生物活性炭滤池出水;传统沉淀及传统滤池代表传统工艺中的沉淀池以及滤池出水.传统工艺中沉淀池对浑浊度的去除率略高于组合处理工艺中的高密澄清池,主要是因为澄清池采用单边出水,负荷较大、抗冲击能力稍弱.但组合工艺中砂滤池对浑浊度的去除要优于传统处理工艺,主要由于澄清池后的后絮凝过程使水中细小颗粒再次聚集并在通过滤池时被去除,此外预臭氧分解使水中 DO 大幅上升促进滤池

内生物生长,同时也有利于细小颗粒的吸附去除.活性炭滤池对浑浊度几乎没有去除,而且还出现过出水浑浊度比进水大的现象,主要与炭粒和生物流失有关.

组合处理工艺和传统工艺对浑浊度总去除率分别为 99.0% 和 98.9%,并都能达到生活饮用水卫生标准.组合处理工艺并不具备明显的优势.

## 2.3 有机物去除对比

相关研究指出 [9-10],  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,  $\text{UV}_{254}$  等有机物指标与三氯甲烷、卤乙酸生成潜能有较好的相关性,因此比较了 2 种工艺对有机物的去除效果.

2 种工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{UV}_{254}$  的去除率见图 2,首先预臭氧把一部分本来无法被高锰酸钾氧化的有机物转化成易被氧化的有机物,提高了  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  值,而其对  $\text{UV}_{254}$  去除明显,前后臭氧去除率总和可达 64.8%,这主要源于  $\text{O}_3$  对有机物中不饱和键的针对性.组合处理工艺的高密澄清池对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率明显高于传统工艺中的平流沉淀池,是因为预臭氧相对预氯化能更好地发挥其对有机物的氧化助凝作用,此外澄清池中高浓度絮体区絮体对有机物也有一定的吸附作用.传统工艺中滤池对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除主要靠滤料截留作用,因此对水中溶解性有机物去除率较低,而组合处理工艺中的砂滤池由于预臭氧的充氧作用促进了池中生物的生长,起到了生物降解和吸附作用,故相对传统工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除有一定提高.组合处理工艺中的臭氧活性炭部分对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除效果是非常明显的,去除率达到 30.4%,出水的  $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$  值基本在  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右,符合  $<3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  生活饮用水卫生标准要求,很好地解决了传统工艺处理黄浦江原水时出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  无法达标的问题.

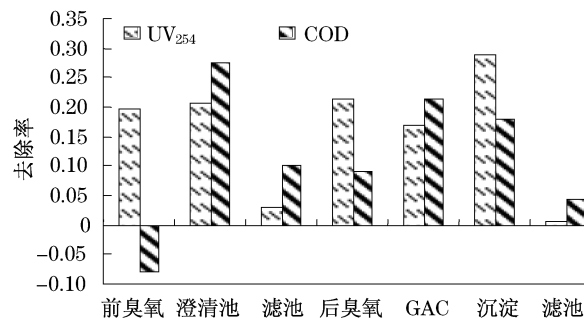


图 2 2 种工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{UV}_{254}$  去除率对比

Fig.2 Comparison of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and  $\text{UV}_{254}$  removal efficiency by two different processes

综上,组合工艺中常规工艺部分对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{UV}_{254}$  的去除率分别达 29.6% 和 43.3%,而传统工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{UV}_{254}$  的去除率仅分别为 22.3% 和 29.4%。组合工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{UV}_{254}$  的去除优势不仅体现在后续的深度处理部分,前面的常规处理部分也优于传统处理工艺。整个组合处理工艺后的出水更加安全。

#### 2.4 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除对比

两种工艺对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除对比见图 3。传统工艺中沉淀池对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率较大,均值为 58.9%。滤池对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率为 2.6%。

组合处理工艺中氨氮变化在处理流程中的变化比较复杂,首先预臭氧出水的氨氮比原水高近 3 倍,除了水质从进水口输送到预臭氧池可能变化以外,另一原因可能是  $\text{O}_3$  把部分有机氮转化为氨氮,贺道红等<sup>[11]</sup>的研究也得出类似结论,Gunten<sup>[12]</sup>对其机理进行了详细的讨论。

澄清后氨氮质量浓度仍比原水高 1.2 倍,相对预臭氧出水去除率为 60% 左右,砂滤池对氨氮有较好的去除,相对澄清出水去除率 > 85%,再次证明砂滤池中存在生物降解作用。砂滤池出水的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  相对原水去除率为 80% 左右,效果明显优于传统工艺。经过后续的深度处理后,氨氮的质量浓度低于检测限,因此整个工艺对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率几乎达到 100%。

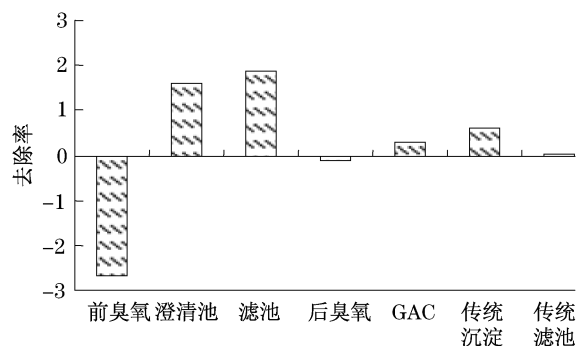


图 3 2 种工艺对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率对比

Fig. 3 Comparison of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  removal efficiency by two different processes

在选择出水消毒工艺上,目前传统工艺为了节省成本和控制消毒副产物的形成,选择氯胺消毒,但是随着高氮水中亚硝基二甲胺 (NDMA) 等亚硝氨类化合物的检出以及氯胺的口感问题的出现,氯胺消毒也面临巨大挑战。而深度处理后出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和有机物含量都很低,可以选择自由氯消毒,而且需要单独出厂,不能与传统氯胺消毒工艺出水合管出水,

否则根据折点加氯原理,水中自由氯和氯胺反应会导致余氯含量下降。

#### 2.5 有机物去除在相对分子质量分布上的差异

在运行周期内,取得主要构筑物后出水水样,经  $0.45 \mu\text{m}$  膜过滤后,用凝胶色谱法进行相对分子质量分布分析,考察各个构筑物在去除有机物的构成上的差异。各水样的相对分子质量分布见图 4,相对分子质量以  $\text{UV}_{254}$  含量来表示。

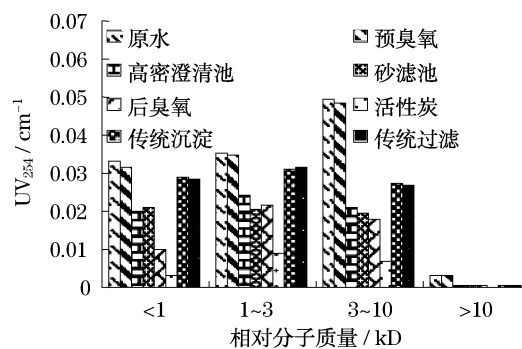


图 4 各工艺出水有机物相对分子质量分布

Fig. 4 Organics molecular weight distribution in outflow of each treatment processes

图 4 表明,黄浦江原水中 3~10 kD 的有机物  $\text{UV}_{254}$  值为  $0.049 \text{ cm}^{-1}$ ,占有机物总量的 40.9%,而分子量 < 3 kD 的高于 3~10 kD 的有机物,占有机物总量的 57%,剩余部分为 > 10 kD 的有机物。预臭氧对各相对分子质量区间的有机物去除率不高,但经过澄清池后各区间的有机物都大幅减少,其中 3~10 kD 区间的有机物去除的最多。砂滤池对有机物的去除率较小,其中 < 1 kD 的有机物相比澄清池后反而有所增加,可能与砂滤中生物代谢有关。传统处理工艺对有机物的去除主要集中在 3~10 kD 相对分子质量区间,对于 1~3 kD 区间内的小分子基本没有去除,验证了前面的预臭氧相比预氯化更能促进小分子有机物混凝沉淀去除的结论。也再次表明组合工艺相对于传统工艺的优势不仅仅体现在后续的深度处理部分,常规处理也有所加强。

由图 4 可见,组合工艺中,砂滤池出水经后臭氧处理后,分布在 1~3 kD 区间内的有机物质量浓度反而有所提高,3~10 kD 区间的则有所减少,后臭氧完成了有机物相对分子质量从大到小的迁移。之后的生物活性炭滤池对有机物能很好地去除,特别是对于相对分子质量 < 1 kD 的有机物去除率超过 70%。整个组合工艺很好地解决了传统工艺不能有效的去除相对分子质量 < 1 kD 区间内有机物的问题,从而进一步提高了出水的生物稳定性和安全性。

## 2.6 出水三卤甲烷生成潜能

目前,氯消毒是我国应用最广泛的消毒工艺.氯与水中天然有机物发生取代或加成反应会生成各种卤代物,从而影响人体健康.其中三卤甲烷生成潜能与水样加氯消毒后产生的消毒副产物有较好的相关性,能用来作为预测加氯消毒后产生消毒副产物的指标.

由图5可见,预臭氧后三卤甲烷总量有所增加;后臭氧后一溴二氯甲烷也略有增加,因此推测臭氧把大分子有机物氧化成小分子有机物的同时,也可能提高消毒副产物的生成潜能, Cipparone 等<sup>[13]</sup>的研究也得到类似结论.砂滤池后出水三氯甲烷生成潜能没有明显减少,整个工艺去除三卤甲烷生成潜能的最关键部分是生物活性炭滤池,其对三卤甲烷生成潜能的去除率达到52.9%,出水后三卤甲烷生成潜能仅为 $519 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,大大降低了消毒出水中过量消毒副产物产生的风险,消毒后的出水安全性得到保障.

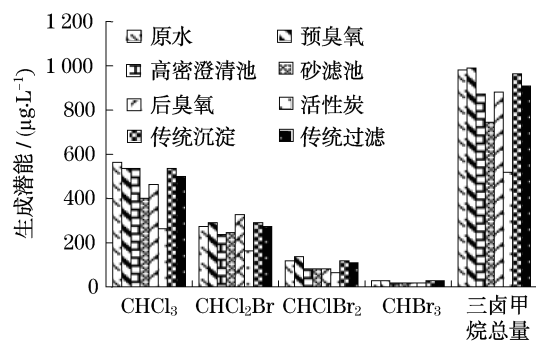


图5 各工艺出水中三卤甲烷生成潜能值

Fig.5 THMFPs in outflow of each treatment processes

## 2.7 组合处理对其他污染物的去除

$\text{O}_3$ 能和多种有机物反应,生成一系列中间产物.世界卫生组织(WHO)采用溴酸根作为臭氧副产物的指标之一.我国现行的饮用水水质标准中溴酸盐的指标值为 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ .黄浦江原水中溴化物质量浓度 $<50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,一般不会形成溴酸盐.活性炭出水溴酸盐质量浓度低于检测限( $<2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

原水中藻类代谢物藻毒素也是饮用水安全隐患之一,特别是淡水中的微囊藻毒素超标问题,许多国家出现的由藻毒素引发的事件大都与微囊藻毒素超标有关.用C-18 SPE活性炭吸附柱富集500倍后进行藻毒素含量分析,测得原水中微囊藻毒素 Microcystin-LR (MCLR)质量浓度为 $43 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ,传统工艺对小分子有机物的去除能力有限,组合处理工艺相对具有更好地去除效果.生物活性炭出水

中藻毒素的含量低于检测限( $10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ),远低于我国饮用水卫生标准( $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )

虽然臭氧生物活性炭工艺对黄浦江原水的组合处理应用前景非常广阔,但在实际应用中需要注意如下问题.首先,由于预臭氧持续时间较短,澄清池中絮体有机物质量浓度高,使得夏秋高温季节澄清池中存在藻类生长带来的出水藻类大于原水现象,此时出水浑浊度等其他指标均较平常有所下降.因此在夏秋高温季节可以采用臭氧、氯联合预处理方式取代单独预臭氧.

此外,组合工艺中活性炭出水浑浊度有时较砂滤池高,说明有细小炭粒和生物流失的现象存在.因此炭滤出水的细菌总数过高问题同样不容忽视,可以在之后增设膜处理装置或者砂滤池进一步提高水质.

## 3 结论

对于高有机物,高 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的黄浦江原水经预臭氧→高密度澄清池→砂滤→后臭氧→生物活性炭组合处理工艺后,水质均优于传统处理工艺且满足我国生活饮用水卫生标准.

组合工艺不仅依赖臭氧活性炭对有机物和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除,预臭氧的充氧作用使组合工艺的常规部分对污染物的去除也起到协同促进作用,并且组合处理工艺更容易去除小分子有机物(臭氧活性炭部分对 $<1 \text{ kD}$ 的有机物去除率大于70%),进一步保障了出水的生物稳定性和安全性.

组合工艺对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除解决了传统工艺使用氯胺消毒带来的口感问题和亚硝氨风险,同时对有机物去除率的提高也大大降低了三卤甲烷等消毒副产物生成风险.

## 参考文献:

- [1] Wataru N, Fahmi, Tsukasa M, et al. DOC removal by multistage ozonation-biological treatment [J]. Water Research, 2003, 37 (1):150.
- [2] Miltner R J, Shukiary H M, Summers R S. Disinfection byproduct formation and control by ozonation and biotreatment [J]. J AWWA, 1992, 84(11):53.
- [3] 吴红伟,刘文君,王占生. 臭氧组合工艺去除饮用水源水中有有机物的效果[J]. 环境科学, 2000, 21(7):29.  
WU Hongwei, LIU Wenjun, WANG Zhansheng, et al. Removal of organic matters from drinking water source by ozonecombined processes[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2000, 21(7):29.

(下转第1318页)