

论述与研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 03. 001

臭氧-上向流BAC工艺对常规及新污染物的控制效果

宋欣¹, 李燕君², 黄慧¹, 刘奋强¹, 许钊¹, 王延益²,
杨锴³, 张锡辉²

(1. 深圳市深水龙华水务有限公司, 广东 深圳 518100; 2. 清华大学 深圳国际研究生院,
广东 深圳 518055; 3. 广东省广业装备制造集团有限公司, 广东 广州 510275)

摘要: 为了解“臭氧-上向流生物活性炭”深度处理工艺对新污染物及其他痕量污染物的去除效果,对深圳市某深度处理水厂进行了为期一年的调研与监测。结果表明,该深度处理工艺可以有效去除常规污染物,在一年的监测期内,其出水 COD_{Mn} 、TOC与氨氮的平均浓度分别为0.49、0.9、0.014 mg/L。荧光类有机物主要由深度处理工艺去除,去除率在50%以上;同时,可将生物可同化有机碳(AOC)的去除率从常规工艺的11.4%提升至41.4%,但在检测期内出厂水的AOC均不能满足生物稳定性要求。经深度处理后,出厂水中二甲基三硫醚(DMTS)、2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)均能满足深圳市饮用水标准要求。“臭氧-上向流生物活性炭”深度处理工艺对37种药品及个人护理品(PPCPs)和8种内分泌干扰物(EDCs)具有较好的去除效果,平均去除率分别为85.9%和80.4%,有效控制了新污染物对人体健康造成的风险,但出水炔雌醇风险熵值仍远高于高风险限值(冬季为27.7,夏季为169.6),需要重点关注。

关键词: 自来水厂; 深度处理; 臭氧-上向流生物活性炭; 可同化有机碳; 嗅味物质; 新污染物

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)03-0001-08

Control of Conventional and Emerging Contaminants by Ozone-Upflow Biological Activated Carbon Process

SONG Xin¹, LI Yan-jun², HUANG Hui¹, LIU Fen-qiang¹, XU Zhao¹,
WANG Yan-yi², YANG Kai³, ZHANG Xi-hui²

(1. Shenzhen Shenshui Longhua Water Co. Ltd., Shenzhen 518100, China; 2. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 3. Guangdong Guangye Equipment Manufacturing Group Co. Ltd., Guangzhou 510275, China)

Abstract: In order to understand the removal effect of advanced treatment processes on emerging pollutants and other trace pollutants, a one-year investigation and monitoring was conducted on the ozone-upflow biological activated carbon (O_3 -BAC) process of a advanced treatment water plant in Shenzhen City. The results indicated that the advanced treatment process could effectively remove conventional pollutants, with average concentrations of COD_{Mn} , TOC, and ammonia nitrogen in the effluent being 0.49

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2022B0111130001)

通信作者: 张锡辉 E-mail: zhangxh@sz.tsinghua.edu.cn

mg/L, 0.9 mg/L, and 0.014 mg/L, respectively. Fluorescent organic compounds were mainly removed by the advanced treatment process, with a removal rate of over 50%. The advanced treatment process could improve the removal rate of assimilable organic carbon (AOC) from 11.4% in conventional processes to 41.4%, but the AOC in the effluent did not meet the biological stability requirements during the monitoring period. After advanced treatment, the effluent concentrations of DMTS, 2-MIB and GSM met Shenzhen's drinking water standard. The O_3 -BAC process demonstrated good removal efficiency for 37 PPCPs and 8 EDCs, with average removal rates of 85.9% and 80.4%, respectively. The advanced treatment process could effectively control the risk of emerging contaminants on human health, but the risk entropy value of estrone in the effluent was still much higher than the high-risk limit value (27.7 in winter and 169.6 in summer), which required special attention.

Key words: water treatment plant; advanced treatment; ozone-upflow biological activated carbon; AOC; odorous substances; emerging contaminants

目前,我国大部分自来水厂采用传统的净水工艺,主要去除浊度、色度、微生物等。但是,传统净水工艺对原水中的嗅味物质^[1-2]、药品及个人护理品(PPCPs)、内分泌干扰物(EDCs)等新污染物^[3]的去除效率较低,这类物质已经成为影响水质健康的重要污染物。为了提高出水水质,很多水厂采用“臭氧-生物活性炭”作为深度处理工艺,臭氧作为一种强氧化剂,能够首先将难降解的大分子有机物分解为小分子物质,进而被活性炭吸附或被其表面的微生物降解去除,这两种技术手段的有机结合能够有效提升水质,并对多种常规工艺难以降解的污染物起到良好的去除效果^[4-5]。

深圳某水厂采用“前置臭氧-上向流生物活性炭”深度处理工艺,作为华南地区第一座采用该工艺的水厂,有必要对工艺的稳定效能进行系统性监测。为此,对该水厂的深度处理工艺进行了为期一年的调查研究与监测分析,并着重关注深度处理工艺对新污染物及其他痕量污染物的去除效果。

1 材料与方法

1.1 水厂工艺及取样点

所研究的水厂以东江为水源,设计规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中一期设计规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用“混凝-沉淀-过滤-消毒”等常规处理工艺,于2007年8月建成通水。二期于2020年12月建成通水,在常规工艺基础上增加了“前置臭氧-上向流生物活性炭”深度处理工艺,具体工艺流程见图1。水厂常规处理工艺包括预臭氧、混凝和沉淀单元。其中,预臭氧发挥杀藻与改善絮凝的作用,而混凝和沉淀工

艺主要去除非溶解性颗粒物;深度处理工艺用于去除水中的溶解性微量有机物,包括主臭氧单元与生物活性炭单元,其中主臭氧的氧化作用能够将部分难生物降解有机物转化为易生物降解物质,使其在生物活性炭滤池中通过吸附和微生物降解而被去除。深度处理出水再经砂滤与消毒处理后被送入供水管网。对原水、常规处理工艺出水、深度处理工艺出水与出厂水进行为期一年的监测分析。

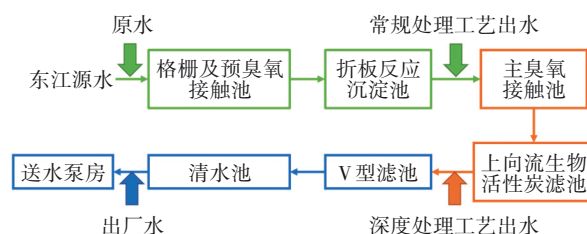


图1 深圳某水厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of water treatment process of a water treatment plant in Shenzhen

1.2 分析项目与方法

现场监测的水质指标主要包括溶解氧(DO)、pH、浊度等,分别使用便携式多参数测定仪、pH计、便携式浊度仪进行测定。送回实验室的水样需于 4°C 下避光保存,24 h 内完成各项指标的检测。其中, COD_{Mn} 采用酸性高锰酸钾法测定; UV_{254} 采用比色法测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂法测定;荧光类物质使用 F-7000 荧光分光光度计进行检测,激发波长(λ_{ex})与发射波长(λ_{em})分别为 200~450 nm 与 240~600 nm;可同化有机碳(AOC)采用 Hammes 等人设计的流式细胞仪法测定^[6];二甲基三硫醚(DMTS)、

2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)类嗅味物质采用顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用法(HS-SPME-GC-MS)测定;PPCPs和EDCs采用LC-MS/MS测定^[7]。原水及各工艺段PPCPs和EDCs对人体健康风险采用美国环保署(EUSEPA)推荐的风险系数(RQ)法进行评估。RQ值通过水中污染物的实际浓度与预测的无影响浓度(PNEC)的比率来计算^[7],使用的PNEC值来自于已有研究^[8-10]。

2 结果与分析

2.1 对常规污染物的去除效果

2.1.1 对常规指标的去除

监测显示,原水水质受季节变化影响显著,所有常规指标在夏季时达到最高值。上向流活性炭单元要求控制进水浊度 <1 NTU^[11],监测期间尽管原水浊度受降雨影响而变化较大,但经常规工艺处理后均低于1 NTU(平均去除率为96.1%),保障了上向流活性炭单元的稳定运行。经过深度处理工艺以后,出水浊度均小于0.5 NTU,去除率提升至97.1%。后置砂滤池能够进一步降低浊度,使出厂水的浊度始终保持在较低的水平(0.14 NTU)。

常规工艺对 COD_{Mn} 有一定的去除效果,平均去除率在50.0%左右。经过深度处理工艺之后,出水 COD_{Mn} 均保持在较低水平,基本小于1 mg/L;夏季时去除效果最佳,平均去除率达到70.2%,表明高温提高了活性炭池中的生物活性,强化了其对污染物的去除。全年出厂水 COD_{Mn} 平均值为0.49 mg/L,符合深圳市《生活饮用水水质标准》(DB 4403/T 60—2020)的要求(<2 mg/L)。常规工艺对 UV_{254} 的全年平均去除率为47.4%,经深度处理后平均去除率提升至74.8%,上向流活性炭池出水及出厂水的 UV_{254} 值分别保持在0.010和0.007 cm^{-1} 的低水平。水厂现行深度处理工艺具备对腐殖质类大分子物质的去除能力,且去除率几乎不受季节影响。

常规工艺对TOC的年平均去除率为36.0%,经过深度处理工艺后,TOC浓度持续下降,达到1 mg/L左右,出厂水的TOC浓度在0.6~1.2 mg/L之间,平均值为0.9 mg/L,符合深圳市DB 4403/T 60—2020要求($\text{TOC}<3$ mg/L)。原水中的氨氮经过常规工艺处理以后浓度显著降低,年平均去除率为40.1%。经过深度处理工艺后,氨氮浓度持续下降,去除率提升至68.9%,出厂水浓度均未超过0.02 mg/L。

生物可同化有机碳(AOC)是用于评价水质生物稳定性的重要指标^[6]。常规处理工艺对AOC的全年平均去除率为11.4%,出水平均浓度为 (216.4 ± 8.8) $\mu\text{g/L}$,且去除效果并不稳定,冬季时其去除率最低可降至1.0%,这说明常规处理工艺并不能有效去除AOC(见图2)。深度处理工艺中的活性炭池在去除AOC方面发挥了最主要的作用,活性炭持续发挥的吸附作用保障了出水的生物稳定性。此外,尽管进水AOC受季节影响波动较大,夏季的高温条件也同时提升了滤池中的微生物活性,生物降解效能增强,经过深度处理工艺之后AOC浓度能够在一年的监测期内稳定在135.6~151.4 $\mu\text{g/L}$,平均去除率提升至41.4%。尽管如此,出厂水浓度均高于50 $\mu\text{g/L}$,意味着末端管网水存在一定微生物生长风险。为进一步控制出厂水AOC浓度,可以优化滤池中活性炭的性能或提升活性炭池的效能,如延长水力停留时间,从而进一步强化对AOC的去除。

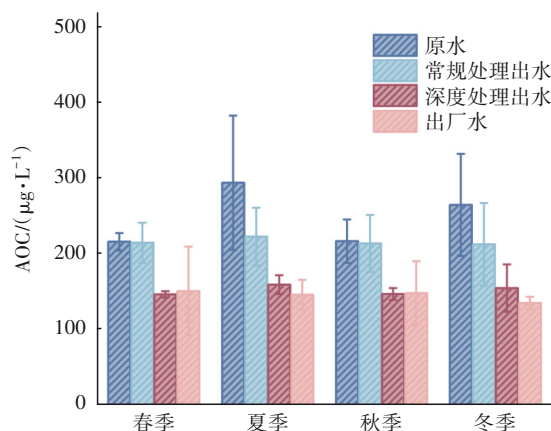


图2 常规及深度处理工艺中AOC的变化规律

Fig.2 Changes of AOC in conventional and advanced treatment processes

将该水厂“前置臭氧-上向流生物活性炭”工艺对常规水质指标的去除效果与国内其他水厂的“后置臭氧-下向流生物活性炭”工艺^[12-21]进行对比后发现,前置臭氧-上向流生物活性炭工艺对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除效果优于后置臭氧-下向流生物活性炭工艺,与文献中上向流工艺对天然有机物(NOM)具备优异的去除效果一致。该水厂对 COD_{Mn} 的去除率达到了61.4%,单独BAC滤池的平均去除率约为25%。对于浊度,一般认为上向流BAC工艺中水流自下而上流过炭柱,会使BAC体积膨胀25%~30%,相比下向流BAC工艺而言活性炭颗粒间的空隙更

大,因此对颗粒物的去除效果稍低。该水厂由于在BAC滤池后设有V型滤池,因此出水浊度可以稳定在较低水平,对浊度的去除率>99%,并优于部分下向流BAC工艺^[19]。该水厂的上向流生物活性炭工艺对DOC的去除效果也优于部分下向流BAC工艺。综合而言,该水厂的“前置臭氧-上向流活性炭工艺”充分发挥了上向流工艺微生物分布均匀、COD_{Mn}去除率高的优势,同时合理设计工艺流程,将工艺前置,并在后续增加砂滤池,避免了上向流工艺出水浊度高的缺点,保障了饮用水水质安全。

2.1.2 对荧光类有机物的去除

采用三维荧光光谱识别水样中各类有机物的转化及去除规律。分析显示,原水中富含荧光类蛋白质(区域I和II),富里酸类物质(区域III)和溶解性微生物代谢产物(SMP,区域IV)次之,腐殖酸类物质最少(区域V)。经过常规工艺处理后,各区域荧光强度都有所下降,但去除效果并不显著。积分结果表明(见图3),酪氨酸类蛋白质(区域I)、SMP(区域IV)、腐殖酸类物质(区域V)所对应的荧光强度均下降不足50.0%,而色氨酸类蛋白质(区域II)和富里酸类物质(区域III)仅分别去除7.1%、18.4%。经深度处理工艺后,出水中5个区域的峰强度都进一步下降,无明显特征峰。深度处理工艺对5种区域所代表的有机物的去除率分别为64.3%、48.8%、55.1%、62.2%和81.2%,即各类荧光类有机物得到了有效去除。

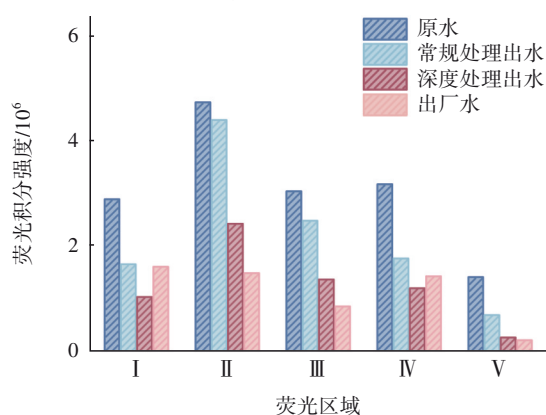


图3 不同工艺出水的三维荧光光谱荧光区域积分强度

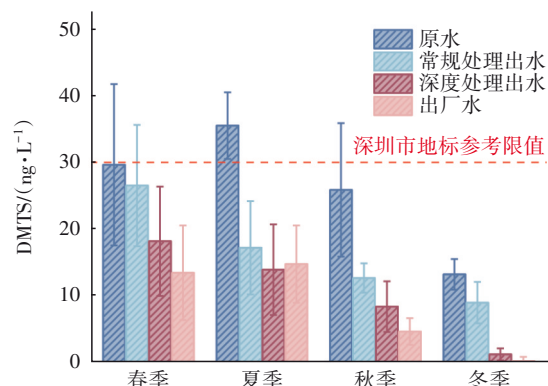
Fig.3 Fluorescence integral intensity of different processes effluent

2.2 对新污染物的控制效果

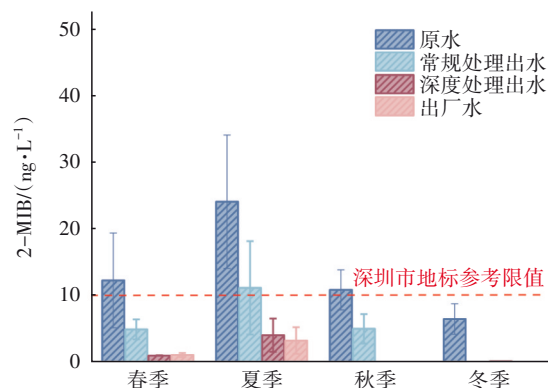
2.2.1 嗅味物质

图4显示了原水中三种嗅味物质的季节变化规

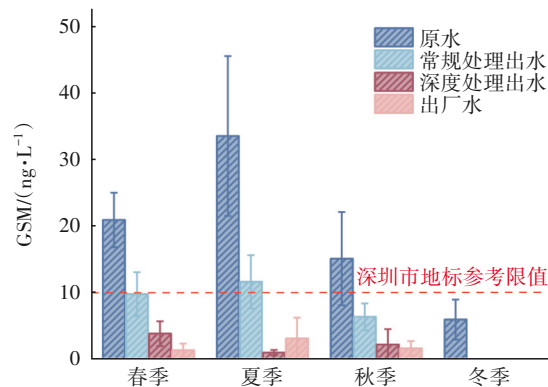
律及在各工艺段的去除效果。原水中嗅味物质浓度表现为夏季>春季>秋季>冬季。已有大量研究表明^[1],水中土臭素(GSM)、二甲基异茨醇(2-MIB)和二甲基三硫醚(DMTS)等嗅味物质的产生与藻类、放线菌和真菌等微生物的生长有关,广东地区春季及夏季气温较高,东江水体中微生物的密度和代谢强度提高,包括嗅味物质的各种次生代谢产物释放量也随之增加。



a. DMTS变化规律



b. 2-MIB变化规律



c. GSM变化规律

图4 常规及深度处理工艺中DMTS、2-MIB和GSM的变化

Fig.4 Changes in DMTS, 2-MIB and GSM in conventional and advanced treatment processes

以原水中嗅味物质浓度最高的夏季为例,分析各处理工艺对嗅味物质的去除效果。夏季原水中DMTS、2-MIB、GSM的浓度分别为 (35.6 ± 5.1) 、 (24.0 ± 10.3) 、 (33.5 ± 12.2) ng/L,经常规工艺处理后,三种嗅味物质浓度分别降至 (17.2 ± 6.8) 、 (11.1 ± 7.1) 、 (11.6 ± 3.5) ng/L,去除率仅介于51.5%~65.3%,常规工艺并不能将三种嗅味物质浓度控制至深圳地标限值以内。深度处理工艺可以进一步去除嗅味物质,出厂水中三种嗅味物质的浓度分别为 (14.8 ± 5.8) 、 (3.2 ± 2.0) 、 (3.1 ± 3) ng/L,均能满足深圳市《生活饮用水水质标准》(DB 4403/T 60—2020)的要求。

2.2.2 药品及个人护理品

分别在冬季和夏季对原水、出厂水及各工艺段出水的PPCPs进行检测,结果如图5所示(受篇幅所限,仅给出各工艺段出水中含量最高的15种PPCPs的变化趋势)。

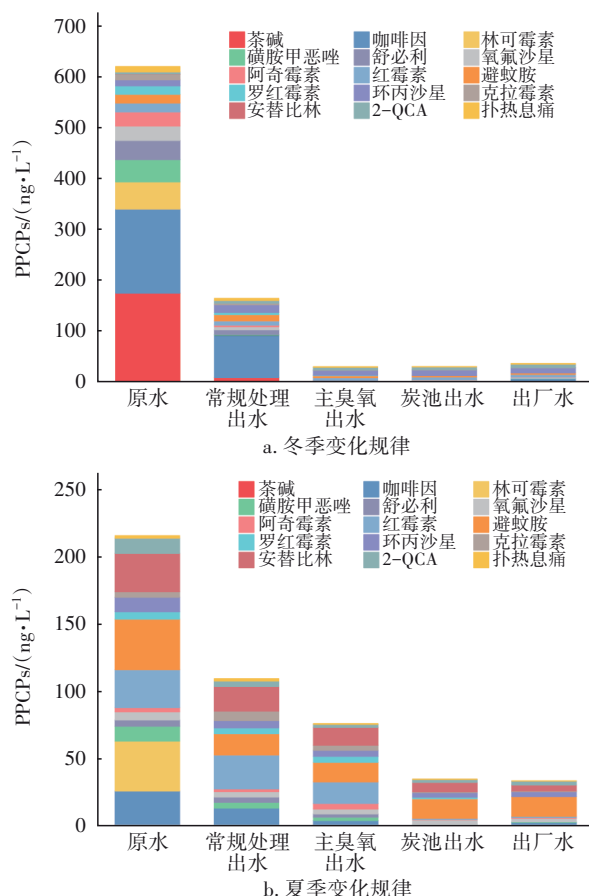


图5 PPCPs在冬季和夏季的变化规律

Fig.5 PPCPs change pattern along the processes during winter and summer

冬季时37种拟检测PPCPs在原水中均有检出,总浓度高达691.8 ng/L,其中浓度较高(>10 ng/L)的种类包括阿奇霉素、克拉霉素、罗红霉素、氧氟沙星、避蚊胺(DEET)、环丙沙星、扑热息痛、红霉素、咖啡因、林可霉素、磺胺甲恶唑、舒必利、磺胺吡啶和茶碱,浓度最高的三种PPCPs分别为茶碱(176.3 ng/L)、咖啡因(164.9 ng/L)与林可霉素(53.4 ng/L),咖啡因和茶碱的高浓度水平与其他人之前的报告一致,这是由于消费者大量饮用茶、咖啡等所致^[22]。夏季PPCPs总浓度为256.3 ng/L,检出的PPCPs种类减少至33种,高浓度(>10 ng/L)的种类包括避蚊胺、林可霉素、安替比林、红霉素、咖啡因、2-喹喔啉羧酸(2-QCA)、磺胺甲恶唑及环丙沙星。冬季原水中PPCPs的浓度明显高于夏季,这是由于冬季为流感等各种疾病高发时期,造成水体中各药物种类和浓度更高,而夏季由于蚊虫滋生,避蚊胺浓度(37.5 ng/L)高于其他PPCPs。林可霉素的检出浓度在两个季节均较高,分别为53.4和37.1 ng/L。

水厂常规处理工艺对PPCPs的总体去除效果一般,冬季及夏季的去除率分别为66.9%及44.6%,出水总浓度分别为228.8、142.1 ng/L,部分PPCPs仍远高于10 ng/L的浓度限值,在多种PPCPs中,林可霉素虽然在进水中浓度较高,但经过常规工艺处理后几乎被完全去除。经两段工艺处理后,出厂水中PPCPs总浓度在冬季与夏季仅为原水的9.7%和20.1%,显示出深度处理工艺对总体浓度有较好的控制,但总浓度在冬季和夏季仍分别高达67.3 ng/L与51.5 ng/L。

由图5可知,在不同季节主臭氧都能发挥较好的作用,经主臭氧处理后,冬季和夏季的总体PPCPs浓度分别降至60.5 ng/L和100.6 ng/L,相比较而言,冬季的臭氧氧化效果更好,去除率比夏季高30.5%,这是由于在痕量级别的浓度下,进水污染物总浓度提高更容易体现臭氧的氧化效果。在冬季主臭氧单元对进水中浓度最高的两种PPCPs均有不错的去除效果,与常规工艺出水相比,茶碱、咖啡因经臭氧氧化后单元去除率达到94.0%和99.5%。生物活性炭的吸附和生物氧化作用同时发挥对PPCPs的去除效果^[23],冬夏两季活性炭池出水的PPCPs总浓度分别为56.7 ng/L和50.7 ng/L,夏季活性炭池的效能与冬季相比有显著提升,与主臭氧单元出水相比,经活性炭池处理后总去除率从冬季的

6.3%提升至夏季的49.6%,这可能是因为活性炭中用于降解各种PPCPs的特定菌株的丰度在夏季增加。对于原水中检出浓度较高的红霉素、咖啡因、磺胺甲恶唑、美托洛尔,活性炭单元对其去除率分别为94.5%、87.8%、88.3%、100.0%。然而对于夏季原水中高浓度的DEET,主臭氧和生物活性炭深度处理均难以进一步提升降解率,这是由于DEET含有的酰胺基团导致其对臭氧具有低反应性,且DEET的辛醇-水系数仅为2.02,活性炭可能更倾向于吸附更加疏水的有机物。

2.2.3 内分泌干扰物

EDCs在不同季节的检出浓度变化见图6。

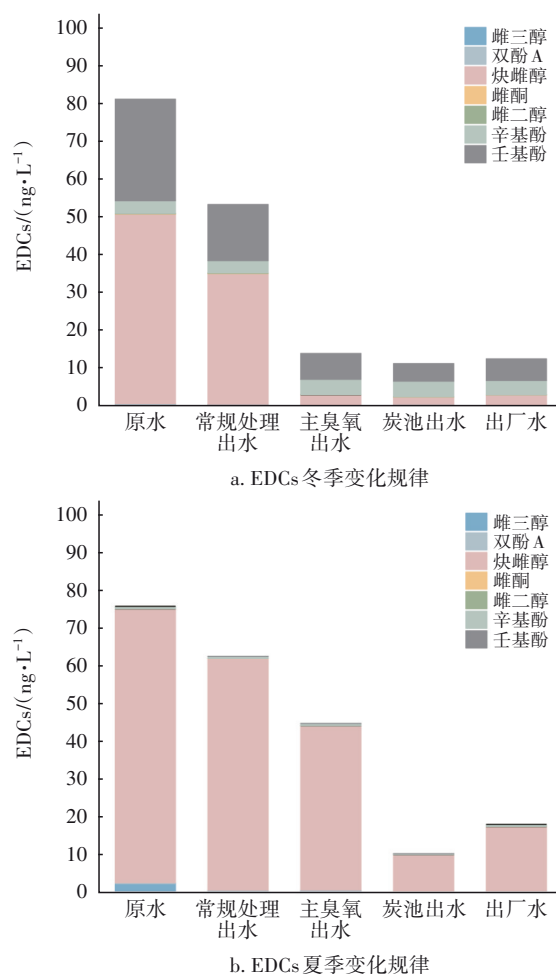


图6 EDCs在冬季和夏季的变化规律

Fig.6 EDCs change pattern along the processes during winter and summer

在冬季检测中,原水共检测到8种典型EDCs物质,总浓度为81.3 ng/L,检出浓度较高的物质(>10 ng/L)为炔雌醇、壬基酚,其浓度分别为50.1、26.9 ng/L。在夏季检测中,8种EDCs也均能检出,但总浓

度略有降低,高浓度EDCs为炔雌醇(72.5 ng/L),占总检出浓度的95.7%。雌三醇、双酚A、雌酮、雌二醇在两个季节的检出浓度都低于1 ng/L。常规工艺对EDCs的控制效果较差,主要通过预氧化单元的臭氧氧化作用去除,在冬季及夏季常规处理工艺对EDCs的去除率分别为34.3%和17.5%。水样经深度及末端消毒处理后,总去除率分别能达到84.4%、76.2%,出厂水的EDCs浓度分别降至12.6、18.0 ng/L。

在深度处理单元,臭氧氧化和活性炭的作用情况与去除PPCPs类似,同样也与进水总浓度和活性炭池中的生物活性有关,总体来说在冬夏两季经过深度处理后,EDCs浓度均能控制在原水的15%以下。在两次检测中炔雌醇浓度均远远高于其他EDCs,且因为其自身多支链和多环的结构特征,难以被完全氧化降解与吸附。尤其在夏季,经过深度处理后,炔雌醇仍保持较高的浓度。

2.2.4 新污染物风险熵

冬季原水中37种PPCPs的高RQ值($RQ>1$)物质为磺胺甲恶唑、氧氟沙星与阿莫西林。同时红霉素的环境风险熵也接近高风险限值。尽管咖啡因和茶碱在冬季的检出浓度较高(分别为164.9、176.3 ng/L),但是其风险值较低,只有茶碱风险值超过了低风险限值。在8种EDCs类物质中,处于高风险的物质为炔雌醇,其风险熵达到501.1。

夏季原水中高风险PPCPs($RQ>1$)为红霉素,此外,磺胺甲恶唑、阿莫西林、氧氟沙星均突破中风险限值。EDCs中雌二醇、雌酮均高于低风险限值,而炔雌醇远超高风险限值,达到724.6。

在冬季和夏季,经深度处理工艺处理后,水中高风险新污染物的种类分别由15、12种降至8、6种,有效降低了新污染物带来的风险。值得注意的是,尽管该深度处理工艺能够降低绝大部分新污染物的风险,冬季与夏季的出厂水炔雌醇风险仍然远高于高风险限值,分别达到27.7和169.6,因此,建议重点关注炔雌醇。阿莫西林、氧氟沙星的初始浓度相对较低,且两段工艺对风险值有较好的控制效果,但由于人体可接受的摄入量限值较低,在冬季和夏季的出厂水中,都超过了中风险限值。

3 结论

① 水厂深度处理工艺出水的各项常规指标

基本满足深圳市《生活饮用水水质标准》(DB 4403/T 60—2020)要求。三维荧光光谱分析显示,深度处理工艺有效去除了常规工艺难以去除的色氨酸和富里酸类物质,且对腐殖酸类物质的去除率最高,达到81.2%。需要注意的是,经深度处理工艺后,水中AOC浓度仍高于50 $\mu\text{g/L}$,不能满足水质生物稳定性要求,建议延长活性炭池停留时间以控制管网中微生物滋生的风险。

② 水厂深度处理工艺对臭味物质具有良好的去除效果。在原水DMTS、2-MIB、GSM浓度分别高达(35.6 \pm 5.1)、(24.0 \pm 10.3)、(33.5 \pm 12.2) ng/L的情况下,经深度处理工艺后分别降低到(14.8 \pm 5.8)、(3.2 \pm 2.0)、(3.1 \pm 3) ng/L,远低于深圳市地标限值。

③ 水厂深度处理工艺能够有效去除多种新污染物。在冬季和夏季进水PPCPs浓度为691.8、256.3 ng/L,EDCs浓度为81.3、75.7 ng/L的情况下,去除率分别可达90.3%、79.9%和84.4%、76.2%。经深度处理后,出厂水PPCPs的风险均未超过高风险值,然而,即使大部分EDCs的浓度经深度处理后得到控制,出厂水中炔雌醇的风险熵值在冬季和夏季仍分别达到27.7和169.6,远高于高风险限值,应该引起重点关注。

参考文献:

- [1] 李勇, 张晓健, 陈超. 我国饮用水中臭味问题及其研究进展[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 583–588.
LI Yong, ZHANG Xiaojian, CHEN Chao. Review on the tastes and odors compounds in drinking water of China[J]. Environmental Science, 2009, 30(2): 583–588 (in Chinese).
- [2] 于建伟, 李宗来, 曹楠, 等. 无锡市饮用水臭味突发事件致嗅原因及潜在问题分析[J]. 环境科学学报, 2007(11): 1771–1777.
YU Jianwei, LI Zonglai, CAO Nan, *et al.* Analyses on cause for odor and potential problems in water source during odor episode event in Wuxi[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007(11): 1771–1777 (in Chinese).
- [3] 喻峥嵘, 乔铁军, 张锡辉. 某市饮用水系统中药品和个人护理用品的调查研究[J]. 给水排水, 2010, 36(9): 24–28.
YU Zhengrong, QIAO Tiejun, ZHANG Xihui. Investigation on pharmaceuticals and personal care

products in drinking water system in a city[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(9): 24–28 (in Chinese).

- [4] 朱秋实, 陈进富, 姜海洋, 等. 臭氧催化氧化机理及其技术研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(4): 1010–1014, 1034.
ZHU Qiushi, CHEN Jinfu, JIANG Haiyang, *et al.* A review of catalytic ozonation: mechanisms and efficiency [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(4): 1010–1014, 1034 (in Chinese).
- [5] 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).
- [6] HAMMES F, SALHI E. Mechanistic and kinetic evaluation of organic disinfection by-product and assimilable organic carbon (AOC) formation during the ozonation of drinking water[J]. Water Research, 2006, 40(12): 2275–2286.
- [7] ZHANG K, ZHANG Z, WANG H, *et al.* Synergistic effects of combining ozonation, ceramic membrane filtration and biologically active carbon filtration for wastewater reclamation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 382: 121091.
- [8] DAI G, HUANG J, CHEN W, *et al.* Major pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in wastewater treatment plant and receiving water in Beijing, China, and associated ecological risks [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2014, 92(6): 655–661.
- [9] KOMORI K, SUZUKI Y, MINAMIYAMA M, *et al.* Occurrence of selected pharmaceuticals in river water in Japan and assessment of their environmental risk [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(6): 4529–4536.
- [10] HUANG B, LI X, SUN W, *et al.* Occurrence, removal, and fate of progestogens, androgens, estrogens, and phenols in six sewage treatment plants around Dianchi Lake in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(22): 12898–12908.
- [11] 陈皓坤, 吴俊业, 沈恺乐, 等. 不同流向臭氧生物活性炭工艺对比分析[J]. 净水技术, 2020, 39(2):

- 57-65.
- CHEN Haokun, WU Junye, SHEN Kaile, *et al.* Comparative analysis of ozone/ biological activated carbon (O₃/BAC) processes with different flow directions [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(2): 57-65 (in Chinese).
- [12] 张良荣, 倪欣. 臭氧生物活性炭深度处理工艺在吴江第二水厂的应用[J]. *辽宁化工*, 2015, 44(7): 908-910.
- ZHANG Liangrong, NI Xin. Application of ozone-biological activated carbon advanced treatment process in the Second Waterworks of Wujiang City[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2015, 44(7): 908-910 (in Chinese).
- [13] 王继萍, 华伟, 蒋福春, 等. 臭氧-生物活性炭工艺去除 AOC 和有机的效果研究[J]. *给水排水*, 2014, 40(2): 11-15.
- WANG Jiping, HUA Wei, JIANG Fuchun, *et al.* Removal performance of assimilable organic carbon and organics by O₃-BAC [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 40(2): 11-15 (in Chinese).
- [14] 韩立能, 刘文君, 王占生, 等. 上/下向流生物活性炭处理效果比较[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012, 52(5): 677-681.
- HAN Lineng, LIU Wenjun, WANG Zhansheng, *et al.* Comparison of treatments using upflow and downflow biological activated carbon filters [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2012, 52(5): 677-681 (in Chinese).
- [15] 黄懿华, 徐宏梅, 张钰, 等. 苏州某给水厂强化 COD_{Mn} 去除效能研究[J]. *供水技术*, 2022, 16(3): 40-44.
- HUANG Yihua, XU Hongmei, ZHANG Yu, *et al.* Study on enhanced removal efficiency of COD_{Mn} in a waterworks in Suzhou[J]. *Water Technology*, 2022, 16(3): 40-44 (in Chinese).
- [16] 黄孟斌, 王刚, 王长平, 等. 饮用水臭氧-活性炭深度处理的生产试验研究[J]. *供水技术*, 2018, 12(2): 14-16.
- HUANG Mengbin, WANG Gang, WANG Changping, *et al.* Operation tests on the ozone-activated carbon advanced treatment of drinking water [J]. *Water Technology*, 2018, 12(2): 14-16 (in Chinese).
- [17] 侯宝芹, 张秋勉, 倪杭娟, 等. 臭氧-生物活性炭深度处理工艺对钱塘江原水处理研究[J]. *城镇供水*, 2016(5): 30-34.
- HOU Baoqin, ZHANG Qiumian, NI Hangjuan, *et al.* Study of ozone-biological activated carbon deep treatment process for Qiantang River raw water treatment [J]. *City and Town Water Supply*, 2016(5): 30-34 (in Chinese).
- [18] SONG A, LIU X, LIU Y, *et al.* Fate of organic pollutants in a full-scale drinking water treatment plant using O₃-BAC [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2015, 37(3): 257-268.
- [19] XU P, HE H, LI T, *et al.* Combining full-scale ozonation and biological activated carbon filtration (O₃-BAC) with pilot-scale nanofiltration (NF) to control disinfection by-product formation for treatment of Taihu Lake Water[J]. *Water*, 2023, 15(5): 843.
- [20] SHEN H, FAN H, WU N, *et al.* A comparison of removal efficiencies of conventional drinking water treatment and advanced treatment equipped with ozone-biological activated carbon process [J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(26): 4079-4089.
- [21] WU Y, ZHU G, LU X. Characteristics of DOM and removal of DBPs precursors across O₃-BAC integrated treatment for the micro-polluted raw water of the Huangpu River[J]. *Water*, 2013, 5(4): 1472-1486.
- [22] CHEN L, FU W, TAN Y, *et al.* Emerging organic contaminants and odorous compounds in secondary effluent wastewater: identification and advanced treatment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 408: 124817.
- [23] WANG Q, TANG X, ZENG W, *et al.* Pilot-scale biological activated carbon filtration-ultrafiltration system for removing pharmaceutical and personal care products from river water [J]. *Water*, 2022, 14(3): 367.

作者简介: 宋欣(1991-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为水处理技术。

E-mail: 1402178745@qq.com

收稿日期: 2023-05-19

修回日期: 2023-06-15

(编辑: 李德强)