

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.007

臭氧/生物活性炭流化床预处理对净水效率的影响

王 赫¹, 彭锦玉², 王全勇², 刘 欣³, 王小毛⁴, 张 永³,
赵成萱¹

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120; 3. 中国石化集团胜利石油管理局有限公司供水分公司, 山东 东营 257000; 4. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘 要: 以黄河水库水为原水,探究前置式臭氧/生物活性炭流化床作为预处理工艺对净水效率的影响,并与作为末端深度处理的后置式臭氧/生物活性炭工艺进行对比。当采用前置式臭氧/生物活性炭作为预处理工艺时,出水中总有机碳(TOC)、生物可降解溶解性有机碳(BDOC)、氨氮浓度比后置式分别降低了11.8%、12.7%和72.1%,颗粒物数和浊度分别可降至 (125 ± 8) CNT/mL和 (0.16 ± 0.03) NTU;出水中溴酸盐、甲醛等氧化副产物均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求。前置式臭氧/生物活性炭流化床和常规处理工艺对污染物的去除具有协同作用,各项出水指标全面优于后置式臭氧/生物活性炭工艺。这可以为微污染原水的高效净化研究和工程实践提供指导。

关键词: 前置式臭氧/生物活性炭; 流化床; 微污染原水; 溴酸盐

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0046-07

Effect of Ozone/Biological Activated Carbon Fluidized Bed Pretreatment on Water Purification Efficiency

WANG He¹, PENG Jin-yu², WANG Quan-yong², LIU Xin³, WANG Xiao-mao⁴,
ZHANG Yong³, ZHAO Cheng-xuan¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. China Urban Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100120, China; 3. Water Supply Branch of Sinopec Shengli Petroleum Administration Co. Ltd., Dongying 257000, China; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The effect of pre-type ozone/biological activated carbon (O_3 -BAC) fluidized bed pretreatment on purification efficiency of raw water from a reservoir in Yellow River basin was investigated, and the treatment performance was compared with the terminal advanced treatment process of post-type O_3 -BAC. When the pre-type O_3 -BAC process was adopted, the total organic carbon (TOC), biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) and ammonia nitrogen (NH_3 -N) in the effluent were reduced by 11.8%, 12.7% and 72.1% respectively compared with those in the effluent when the post-type O_3 -BAC process was adopted, and the particle number and turbidity in the effluent were reduced to (125 ± 8) CNT/mL and (0.16 ± 0.03) NTU, respectively. The oxidation by-products such as bromate and formaldehyde in the effluent all met the limits specified in *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022). The pre-type O_3 -BAC fluidized bed and conventional treatment process had a synergistic

effect on pollutants removal, and all indicators in the effluent were superior to those in the effluent from the post-type O_3 -BAC process. The results can guide the development and engineering practice of efficient purification process for micro-polluted raw water treatment.

Key words: pre-type ozone/biological activated carbon; fluidized bed; micro-pollution raw water; bromate

臭氧/生物活性炭(O_3 -BAC, 以下称“臭氧生物炭”)处理工艺集氧化、吸附与生物降解于一体^[1-3], 已经成为水厂最为常见的深度处理工艺。在水厂设计中, 一般将臭氧生物炭置于常规工艺后, 即“常规处理工艺+臭氧生物炭”, 具有活性炭负荷小、截留性好、运行简便的特点^[4-5]。近年来水体微污染状况依然严峻, 原水有机物指标持续升高以及藻类暴发频率增加, 不利于破坏胶体稳定性, 导致常规处理工艺效率低下^[6-7]。虽然已采用预氧化、预氯化等预处理工艺, 但仍存在常规工艺处理出水中 COD_{Mn} 和浊度偏高的问题, 给后置式臭氧活性炭工艺带来了负面影响, 主要体现在活性炭吸附饱和平衡时间缩短, 炭粒表面微生物滋生过快, 其上附着的生物膜有随水流进入清水池的风险^[8-11]。因此, 针对微污染原水的特点, 提出将臭氧生物炭作为预处理工艺, 形成臭氧生物炭+常规处理工艺组合, 为适应进水浊度的变化, 防止悬浮物在反应器内累积, 活性炭以流化床形式运行。前置式臭氧生物炭通过对原水氧化除藻、改善悬浮颗粒的表面特性以及去除部分有机物这三种途径, 与常规处理工艺形成协同作用, 有利于提高全流程净水效率。

笔者以黄河水库水为试验对象, 通过中试对比, 探究臭氧生物炭分别作为预处理工艺与末端深度处理工艺时, 净水工艺全流程对水中污染物的去除效果, 并检测副产物的生成情况, 同时简要阐述预处理工艺的作用机理, 以期探索针对微污染原水高效可行的净水新工艺。

1 材料和方法

1.1 原水水质

2021年夏秋季, 在济南市济阳区某水厂进行中试, 连续试验天数为150 d。试验原水为黄河水库水, 试验期间每日对原水水质进行检测, 进水水质如下: COD_{Mn} 为1.88~4.35 mg/L, 平均为3.57 mg/L; 总有机碳(TOC)为2.31~4.28 mg/L, 平均为3.68 mg/L; 生物可降解溶解性有机碳(BDOC)为1.12~1.79

mg/L, 平均为1.36 mg/L; 氨氮(NH_3-N)为0.08~0.22 mg/L, 平均为0.17 mg/L; 浊度为2.88~12.84 NTU, 平均为5.33 NTU; 颗粒物数为5 315~10 094 CNT/mL, 平均为9 112 CNT/mL; 溴离子浓度为67.88~116.15 $\mu\text{g/L}$, 平均为79.50 $\mu\text{g/L}$; 试验期间水温为18~25 $^{\circ}\text{C}$, 平均为22 $^{\circ}\text{C}$; 进水pH采用盐酸调节, 范围为7.2~8.0。

1.2 试验装置

两组净水工艺采用完全相同的设备, 不同的是, 图1为臭氧生物炭作为预处理工艺(即前置式), 活性炭反应器采用下进水, 活性炭为流化床形式; 图2为臭氧生物炭作为末端深度处理工艺(即后置式), 活性炭反应器采用上进水, 活性炭为固定床形式。试验处理水量为1.0 m^3/h , 混凝采用机械混合+三级机械絮凝, 聚铝(PAC)有效成分投加量为5 mg/L; 砂滤柱填充高度为1.4 m, 滤速为6 m/h。

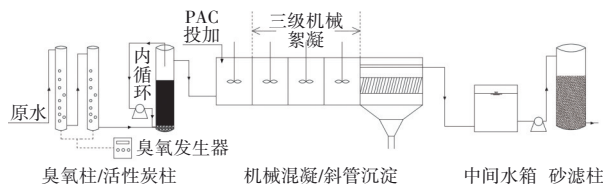


图1 前置式臭氧生物炭工艺流程

Fig.1 Flow chart of the pre-type O_3 -BAC process

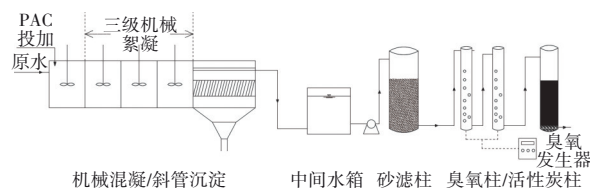


图2 后置式臭氧生物炭工艺流程

Fig.2 Flow chart of the post-type O_3 -BAC process

臭氧生物炭的工艺参数如下: 臭氧由氧气源臭氧发生器产生, 臭氧发生器浓度控制为100 g/m^3 , 进气流量为0.5 L/min, 臭氧投加量为3 mg/L。接触方式为微孔曝气头曝气, 采用同体积两级串联反应柱1:1投加, 臭氧接触时间为15 min。炭层厚度为1.5 m, 下部鹅卵石垫层厚度为0.3 m, 空床停留时间

(EBTC)为19 min,活性炭实际接触时间约15 min。为既保证流化效果,又避免进水流量过大,前置式采用臭氧段出水再内回流的形式,控制炭层膨胀率为30%。后置式炭池由进水流量控制活性炭接触时间,滤速为8 m/h。

活性炭采用粒状破碎炭,取自山东省聊城某净水厂,已使用1.5年,其性能指标如下:粒径范围为0.5~1.5 mm,碘吸附值与亚甲蓝吸附值分别为682.2、98.2 mg/g,比表面积为734.5 m²/g。

1.3 分析项目及方法

生物量:脂磷法^[12],采用氯仿甲醇萃取填料中脂类组分,最终采用钼酸铵分光光度法测定总磷浓度(单位活性炭的含磷量),以nmol/g表示;TOC(代替COD_{Mn})、DOC:岛津TOC-V_{CPH}总有机碳分析仪;BDOC:悬浮培养法,先将待测水样通过0.45 μm微滤膜去除不溶性物质,随后接种土著菌,在(20±0.5)℃条件下避光培养28 d以上,同时测定水样中DOC的变化量,当DOC恒定不变时,计算培养前后DOC之差即为水样的BDOC;NH₃-N:纳氏试剂分光光度法;颗粒物数(>2 μm):IBR激光颗粒计数器;浊度:HACH 2100N浊度仪;溴酸盐:离子色谱法;甲醛:乙酰丙酮分光光度法。

2 结果与讨论

2.1 有机物去除效果对比

前置式与后置式净水工艺各处理单元出水中TOC、BDOC的变化见图3。

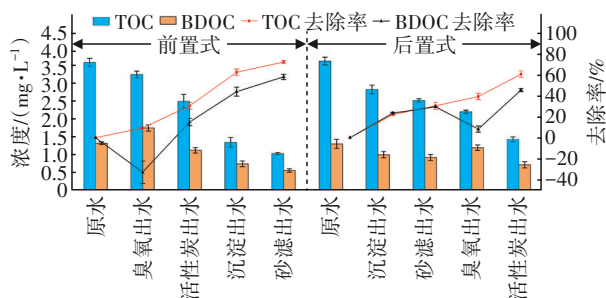


图3 前置式与后置式臭氧生物炭各处理单元出水中TOC、BDOC的变化

Fig.3 Change of TOC and BDOC in effluent of each treatment unit of pre-type and post-type O₃-BAC processes

由图3可知,前置式工艺对TOC的总体去除率为(72.5±1.5)%,臭氧生物炭、混凝沉淀、砂滤单元对TOC的去除率分别为(30.5±3.1)%、(32.2±3.3)%、(9.8±2.1)%;后置式工艺对TOC的总体去

除率为(60.7±3.1)%,臭氧生物炭、混凝沉淀、砂滤单元对TOC的去除率分别为(30.3±0.4)%、(22.1±1.1)%、(8.3±4.5)%。分析去除率存在差异的主要原因,其一为原水中颗粒上黏附的有机物在臭氧强氧化作用下,发生分解并脱落,解除或局部解除有机物在胶体及微小颗粒物表面的包被^[13],使其自身的化学特征得以表露,改变胶体带电性使其稳定性降低,更有利于混凝反应;其二为高藻条件下,混凝等常规工艺受到影响^[7,14],而前置式工艺的预氧化作用大幅降低了藻类浓度,促进了混凝过程的进行。此外,臭氧氧化增加了水中小分子羧酸浓度,与Ca²⁺、Mg²⁺反应生成小颗粒沉淀或络合物,与生物炭出水携带的生物颗粒、胞外分泌物共同改善了混凝条件,从而提高了TOC去除率^[15]。

BDOC表示水中溶解性有机物中能被异养菌利用(无机化和合成细胞体)的部分,反映了工艺出水在配水管网中的生物稳定性。由图3可知,前置式工艺对BDOC的总体去除率为(58.2±2.5)%,臭氧、生物炭、混凝沉淀、砂滤各单元对BDOC的去除率分别为(-32.9±1.1)%、(47.9±1.4)%、(29.1±0.8)%、(14.1±1.8)%;后置式工艺对BDOC的总体去除率为(45.5±1.5)%,臭氧、生物炭、混凝沉淀、砂滤各单元对BDOC的去除率分别为(-21.4±2.9)%、(37.4±3.5)%、(23.4±0.7)%、(6.1±0.6)%,两者去除效果差别较大。前置式臭氧生物炭在臭氧投加时可以显著提高水中溶解氧浓度,同时生物炭出水含有的微生物可在常规处理过程中继续发挥其生物降解作用^[16],通过试验数据可知在常规处理过程中BDOC持续降低,说明前置式臭氧生物炭工艺有效强化了常规处理工艺对BDOC的去除率。而对于后置式臭氧生物炭工艺,单独生物炭的BDOC去除率低于生物炭与常规处理二者协同的去除率。此外细菌的溶解性胞外分泌物对后置式臭氧生物炭出水中BDOC的影响也不容忽视^[17],其一般为大分子多糖和蛋白质类物质,这部分物质也提高了出水中BDOC浓度;而在前置式工艺中,生物炭出水经过后续的常规工艺处理后,大部分大分子胞外分泌物可在混凝过程中通过吸附和络合得到去除。综上分析,前置式臭氧生物炭工艺对BDOC表现出更好的去除效果。

2.2 氨氮去除效果对比

中试期间,原水氨氮变化幅度较大,在2021年

10月选取6次氨氮检测结果,前置式与后置式臭氧 生物炭工艺对氨氮的去除效果见表1。

表1 前置式与后置式臭氧生物炭工艺对氨氮的去除效果

Tab.1 Removal of ammonia nitrogen by pre-type and post-type O₃-BAC processes mg·L⁻¹

项 目	原水氨氮	前置式臭氧生物炭工艺出水氨氮				后置式臭氧生物炭工艺出水氨氮			
		臭氧出水	生物炭出水	沉淀出水	砂滤出水	沉淀出水	砂滤出水	臭氧出水	生物炭出水
1	0.14	0.33	0.11	0.08	<0.02	0.11	<0.02	0.21	0.07
2	0.08	0.23	0.09	0.06	<0.02	0.08	<0.02	0.22	0.06
3	0.11	0.45	0.18	0.15	<0.02	0.10	<0.02	0.41	0.19
4	0.21	0.35	0.10	0.10	<0.02	0.16	<0.02	0.16	0.05
5	0.09	0.31	0.13	0.11	<0.02	0.09	<0.02	0.26	0.09
6	0.16	0.56	0.29	0.22	<0.02	0.14	<0.02	0.48	0.18
均值±标准差	0.13±0.05	0.38±0.11	0.16±0.07	0.13±0.05	<0.02	0.11±0.03	<0.02	0.31±0.12	0.11±0.06

由表1可知,经臭氧氧化后,两组工艺皆表现为氨氮浓度升高,这是由于臭氧氧化含氮有机物生成氨氮。在前置式工艺中,出水氨氮均小于0.02 mg/L,后置式工艺出水氨氮介于0.05~0.19 mg/L,前置式工艺对氨氮的平均去除率提高了72.1%。数据对比发现,在前置式与后置式工艺中,臭氧氧化后出水氨氮基本相同,说明在原水氨氮浓度较低的情况下,臭氧氧化有机氮生成的氨氮,是出水中氨氮的主要来源。前置式与后置式的生物炭出水氨氮浓度差别较小,说明两者生物炭对氨氮的降解效率基本相同。相较于后置式工艺,前置式工艺中臭氧氧化出水的氨氮不仅经过生物炭进行第一次生物降解去除,还通过常规处理工艺(尤其是砂滤池)进行了第二次降解去除,因此出水氨氮浓度较低。由此可知,前置式工艺全流程氨氮去除效率较高的原因是,在臭氧投加后溶解氧充足的条件下,常规处理工艺中砂滤池滤料的生物膜活性得到增强,对氨氮进行了二次生物降解。

2.3 颗粒物、浊度去除效果对比

水中颗粒物主要包括无机悬浮微粒、细菌、病毒、囊孢等。颗粒物不仅影响出水浊度,还会为细菌提供附着场所和保护作用,降低消毒剂的灭活效率^[18-19],直接影响出水生物安全,降低出水水质。在3 d的运行周期内,对比前置式与后置式臭氧生物炭工艺对大于2 μm颗粒物及浊度的去除效果,结果见图4。可知,两工艺中颗粒物去除率均在95%以上,前置式和后置式工艺最终出水颗粒物数分别为(125±8)、(261±20) CNT/mL,浊度分别为(0.16±0.03)、(0.34±0.07) NTU。结果表明,经臭氧氧化

后颗粒物数与浊度有所增加。初步推测其原因是小分子羧酸与钙镁离子产生小颗粒沉淀,以及胶体颗粒表面吸附的有机物被氧化剥落,改变了其表面特性,增强了胶体颗粒的聚集,表现为大于2 μm的颗粒物数增加。前置式和后置式工艺沉淀出水的浊度降幅分别为4.22、3.55 NTU,前置式工艺混凝效果的提升,得益于臭氧生物炭预处理。预臭氧产生的微生物胞外物质虽增大了浊度,但同时增加了颗粒间碰撞几率,改善了混凝条件,从而提高了混凝单元对浊度的去除效果。因此,前置式臭氧生物炭净水工艺通过利用自身工序特点及臭氧生物炭预处理单元的助凝作用,以完整的常规处理工艺作为颗粒物和浊度的去除手段,效果优于后置式臭氧生物炭工艺。

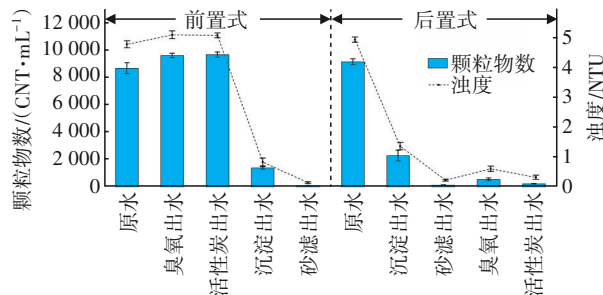


图4 前置式与后置式臭氧生物炭工艺对颗粒物、浊度的去除效果

Fig.4 Removal of particles and turbidity by pre-type and post-type O₃-BAC processes

2.4 前置式与后置式炭层生物量对比

试验进行70 d后,在前置式与后置式两炭柱距进水口30、90、150 cm(进水段、中段、出水段)处分别取活性炭,测定其附着的生物量,结果见图5。

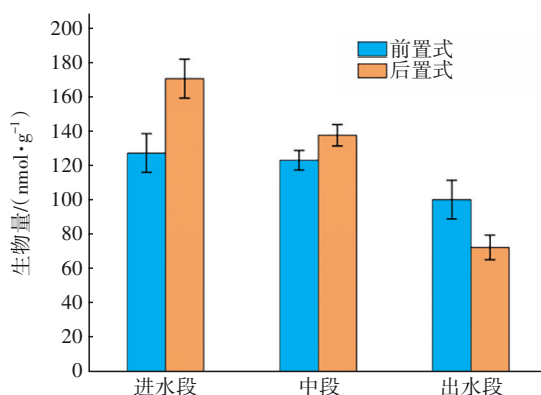


图5 前置式与后置式生物炭不同炭层的生物量分布

Fig.5 Biomass distribution of different carbon layers in pre-type and post-type BAC

生物量的测定主要是直接或间接测定生物膜中的细胞数量或质量、原生质及细胞中的某些组分(如胞外多聚物、总蛋白质、肽聚糖)。由图5可知,前置式生物炭进水段、中段、出水段生物量分别为 (127.4 ± 10.2) 、 (123.3 ± 5.6) 、 (100.5 ± 11.2) nmol/g,后置式生物炭进水段、中段、出水段生物量分别为 (170.5 ± 11.2) 、 (137.7 ± 6.2) 、 (72.8 ± 7.2) nmol/g。试验结果表明,前置式生物炭平均生物量较后置式降低了9.9 nmol/g。此外,前置式生物炭进水段和

中段生物量基本相当,出水段略低,在流化状态下生物炭的微生物空间分布更均匀。推测原因为前置式生物炭采用上向流进水,生物炭在流化过程中存在一定生物量流失,脱落的生物膜可随出水进入后续工艺;而后置式采用下向流进水,上层脱落的生物膜可被下层截留,因此对于后置式下向流生物炭,微生物大量聚集于炭层进水段,进水段生物量远大于中段和出水段。

2.5 氧化副产物的生成

溴酸盐的生成与原水溴离子浓度、臭氧投加量、pH、温度等因素有关,其中臭氧投加量的优化对保证溴酸盐达标尤为重要,前置式与后置式臭氧活性炭工艺生成的溴酸盐浓度如表2所示。可知,前置式与后置式生物炭出水溴酸盐浓度均在0.005 mg/L以下,未出现超标。并且,臭氧段出水的溴酸盐浓度在经过活性炭后有所下降,原因为溴酸盐与活性炭表面接触反应^[20],溴酸盐被还原成溴离子,或直接被活性炭吸附。另外,检测结果显示原水、两种工艺总出水的甲醛均在检出限(0.05 mg/L)以下,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求。

表2 前置式与后置式臭氧生物炭工艺生成的溴酸盐浓度

Tab.2 Bromate concentration generated by pre-type and post-type O₃-BAC processesmg·L⁻¹

取样日期	原水	前置式臭氧出水	前置式生物炭出水	后置式臭氧出水	后置式生物炭出水
2022-06-28	<DL	0.007	0.003	0.006	<DL
2022-06-29	<DL	0.009	0.003	0.006	0.003
2022-07-10	<DL	0.005	<DL	0.010	0.004
2022-07-11	<DL	0.009	0.005	0.007	<DL
2022-07-12	<DL	0.005	0.003	0.012	0.004

注: <DL表示低于检出限,未检出。

2.6 臭氧生物炭预处理工艺机理及适用条件

对微污染原水而言,净水工艺的主要去除目标是有机物、颗粒物及部分微生物。有机物的存在形式分为溶解态和悬浮态,悬浮态有机物常与悬浮颗粒物互相吸附形成难以沉降的颗粒,而水库水还要面临藻类的污染。常用的后置式臭氧生物炭净水机理体现在优先去除悬浮颗粒物,然后去除有机物,从而实现净水目标。当原水的有机物和藻类浓度较高时,常规工艺的处理效率大幅度降低,给生物炭滤池带来较大的有机负荷,导致生物膜滋生较快,出水中的生物膜碎片和胞外分泌物影响出水水质。后置式臭氧生物炭作为水质控制的最后一道

屏障,在实际应用中应尽量提高常规处理工艺净水效率,降低生物炭的有机负荷。

前置式臭氧生物炭工艺改变了传统后置式的净水机理,以首先去除有机物和藻类为出发点,进而改善常规处理的净水效率,实现全流程净水效果的提高。其机理主要体现在三个方面:一是臭氧氧化解除了有机物对胶体颗粒的包被,改变了胶体稳定性,使混凝沉淀单元的效率得到提高;二是附着在炭颗粒表面上的丰富微生物,在高效去除有机物的同时,分泌并携带胞外物质,在混凝过程中起到架桥功能的助凝作用^[21],而颗粒物和脱落的生物膜碎片形成初级絮凝核心,改善了混凝条件;三是臭

氧化的高效除藻功能,可有效改善沉淀效果。因此,在试验期间前置式臭氧生物炭表现出显著优于后置式的净水效能,适用于原水有机物和藻类浓度相对较高、预处理技术复杂、常规处理工艺净水效率难以提升的场合,是一种新型高效的净水工艺。

3 结论

① 当前置式臭氧生物炭作为预处理工艺时,净水工艺对 TOC 和 BDOC 的去除效果均优于后置式;而且生物炭与砂滤联合降解氨氮的作用优于单独生物炭,能够有效降解臭氧氧化所产生的氨氮,对控制氨氮有明显优势。

② 臭氧生物炭作为预处理工艺提高了混凝单元的浊度去除效果,可以实现较低浊度(<0.2 NTU)的优质出水。

③ 在试验进水条件下,后置式生物炭滤池平均生物量大于前置式,说明在试验水质的条件下,作为净水最后一道屏障的后置式臭氧生物炭的生物膜滋生较快,对出水水质的潜在影响不容忽视。

④ 臭氧生物炭作为预处理工艺,通过氧化除藻、氧化助凝、增加絮凝核心,与常规处理工艺形成协同作用,有利于提高全流程净水效率,从而增强对微污染原水的净水效果。同时预氧化产物在后续工艺得到有效去除,出水中溴酸盐和甲醛浓度均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求。

参考文献:

- [1] 张瀚中,韩梅,赵志伟,等. 炭龄对活性炭工艺去除南北调水中有有机物的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(3): 32-37.
ZHANG Hanzhong, HAN Mei, ZHAO Zhiwei, *et al.* Effect of carbon age on removal of organics in water from South-to-North Water Diversion Project by activated carbon process [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(3): 32-37 (in Chinese).
- [2] 张晓娜,何嘉莉,刘清华,等. 前置臭氧/活性炭与常规工艺处理微污染水的对比[J]. 中国给水排水, 2018, 34(3): 48-51.
ZHANG Xiaona, HE Jiali, LIU Qinghua, *et al.* Comparative analysis on treatment of micro-polluted source water by pre-ozonation/BAC process and conventional process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(3): 48-51 (in Chinese).
- [3] HESS A, MORGENROTH E. Biological activated carbon filter for grey water post-treatment: long-term TOC removal with adsorption and biodegradation [J]. Water Research X, 2021, 13: 100113.
- [4] 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).
- [5] 韩珀,康雅,高红涛,等. 深度处理水厂上下向流活性炭池运行分析[J]. 给水排水, 2019, 45(1): 20-23, 30.
HAN Po, KANG Ya, GAO Hongtao, *et al.* Operation analysis of up-flow and down-flow activated carbon filter in advanced water treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(1): 20-23, 30 (in Chinese).
- [6] 朱建文,吴浩汀. BAF+常规工艺+UF工艺在微污染源水处理中的应用展望[J]. 工业水处理, 2004, 24(1): 12-16.
ZHU Jianwen, WU Haoting. Prospects of the application of BAF+normal process+UF technology to the treatment of micro-polluted source water [J]. Industrial Water Treatment, 2004, 24(1): 12-16 (in Chinese).
- [7] 李柱,高乃云,王海亮,等. 藻类对净水工艺的影响及应对措施[J]. 中国给水排水, 2015, 31(14): 116-118.
LI Zhu, GAO Naiyun, WANG Hailiang, *et al.* Influence of algae on purification process and countermeasures [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(14): 116-118 (in Chinese).
- [8] 葛英亮. 净水工艺单元微生物群落结构及其生物风险研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
GE Yingliang. Study on the Microbial Community Structure and Biological Risk in Water Purification Process Unit [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).
- [9] 尤为,王庆,刘丽君,等. 净水厂生物活性炭池无脊椎动物群落结构研究[J]. 给水排水, 2012, 38(5): 9-15.
YOU Wei, WANG Qing, LIU Lijun, *et al.* Study of the invertebrate community structure in a biological

- activated carbon filter [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(5): 9–15 (in Chinese).
- [10] 刘丽君, 张金松, 安娜, 等. 生物活性炭滤池中无脊椎动物孳生问题与对策[J]. *给水排水*, 2009, 35(3): 14–18.
- LIU Lijun, ZHANG Jinsong, AN Na, *et al.* Problems and solutions of the invertebrates breeding in biological activated carbon filter [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(3): 14–18 (in Chinese).
- [11] 陈国强, 王剑, 张正德, 等. 臭氧/生物活性炭工艺的微生物泄漏控制研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(15): 36–41.
- CHEN Guoqiang, WANG Jian, ZHANG Zhengde, *et al.* Control of microbial leakage from ozonation-biological activated carbon process [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(15): 36–41 (in Chinese).
- [12] 于鑫, 张晓健, 王占生. 饮用水生物处理中生物量的脂磷法测定[J]. *给水排水*, 2002, 28(5): 1–5.
- YU Xin, ZHANG Xiaojian, WANG Zhansheng. Biomass examination by lipid-P method for drinking water bio-treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2002, 28(5): 1–5 (in Chinese).
- [13] 刘海龙, 李政剑, 赵虹, 等. 引黄水臭氧预氧化强化混凝处理及安全性研究[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(4): 58–61.
- LIU Hailong, LI Zhengjian, ZHAO Hong, *et al.* Pre-ozonation enhanced coagulation and its safety in treatment for water channeled from Yellow River [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2010, 32(4): 58–61 (in Chinese).
- [14] 杨崇豪, 陈纳, 张军峰. 黄河高藻污染原水的强化混凝处理[J]. *净水技术*, 2005, 24(3): 67–68.
- YANG Chonghao, CHEN Na, ZHANG Junfeng. Study on the enhanced coagulation of polluted Yellow River water with high density of algae [J]. *Water Purification Technology*, 2005, 24(3): 67–68 (in Chinese).
- [15] NIS N, WU C B, WANG Y L, *et al.* An extraction and precipitation process for the removal of Ca and Mg from ammonium sulfate rare earth wastewaters [J]. *Hydrometallurgy*, 2019, 187: 63–70.
- [16] 刘浔, 陆少鸣. 曝气生物滤池出水微生物在给水常规处理工艺中的作用[J]. *工业用水与废水*, 2008, 39(6): 19–21.
- LIU Xun, LU Shaoming. Effect of microorganisms in effluent from biological aerated filter on conventional feed water treatment process [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2008, 39(6): 19–21 (in Chinese).
- [17] 许子丽, 陈卫, 陶辉, 等. O_3 /BAC工艺中臭氧作用条件优化研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(11): 33–38.
- XU Zili, CHEN Wei, TAO Hui, *et al.* Optimization of ozone action conditions in O_3 /BAC process [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(11): 33–38 (in Chinese).
- [18] 祝玲, 刘文君, 袁永钦, 等. 生物活性炭工艺颗粒物分布及微生物安全性研究[J]. *给水排水*, 2009, 35(3): 23–28.
- ZHU Ling, LIU Wenjun, YUAN Yongqin, *et al.* Study on the particle distribution and biological safety of BAC process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(3): 23–28 (in Chinese).
- [19] LIN T, CHEN W, WANG L. Particle properties in granular activated carbon filter during drinking water treatment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(5): 681–688.
- [20] 霍志刚, 郑彦华, 邵爽. 臭氧/生物活性炭深度处理工艺的设计参数研究[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(13): 50–53.
- HUO Zhigang, ZHENG Yanhua, SHAO Shuang. Study on design parameters of ozonation and biological activated carbon processes [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(13): 50–53 (in Chinese).
- [21] 乔俊莲, 董磊, 徐冉, 等. 胞外分泌物对铜绿微囊藻混凝去除的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(6): 779–883.
- QIAO Junlian, DONG Lei, XU Ran, *et al.* Effect of extracellular organic matter on *Microcystis aeruginosa* coagulation removal [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(6): 779–883 (in Chinese).

作者简介: 王赫(1998–), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: sdwanghe1998@163.com

收稿日期: 2022-07-20

修回日期: 2022-08-26

(编辑: 沈靖怡)