

述评与讨论

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 04. 001

O₃-BAC工艺:前置、中置与后置的性能对比

吕 森¹, 李振邦², 王全勇²

(1. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 2. 山东华城工程技术
有限公司, 山东 济南 250101)

摘 要: 臭氧-生物活性炭(O₃-BAC)深度处理工艺可根据其与常规工艺的相对位置,分为前置、中置与后置O₃-BAC三种模式,为明确各工艺在污染物去除方面的特征,对比了前置、中置与后置O₃-BAC工艺的作用机制与设计参数,并从有机物、臭味物质、氨氮、浊度等关键水质指标的去除效率及生物安全性等多个维度综合评估其实际处理效能。结果表明,前置O₃-BAC工艺优先去除原水有机物、臭味物质、藻类和氨氮,可强化常规处理,避免微生物泄漏;中置工艺采用微膨胀运行的中置-上向流BAC滤池,省去二次提升,但运行效率受进水量影响较大,有时需增设微絮凝来保障后续过滤效果;后置工艺作为常规处理后的终端保障,可进一步改善水质,但面临生物降解与泄漏控制的矛盾,通常结合超滤膜保障出水的生物安全性。净水厂需要结合不同原水水质和净水目标,合理选择工艺类型,保证水质安全。

关键词: 深度处理; 前置O₃-BAC; 中置O₃-BAC; 后置O₃-BAC; 有机物; 臭味物质
中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)04-0001-09

O₃-BAC Process: Performance Comparison of Pre-, Mid-, and Post-positioned Configurations

LÜ Miao¹, LI Zhenbang², WANG Quanyong²

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shandong Huacheng Engineering Technology Co. Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: The ozone-biological activated carbon (O₃-BAC) advanced treatment process, based on its relative position to the conventional treatment process, can be divided into three modes: pre-, mid-, and post-positioned O₃-BAC. To clarify the characteristics of each process in pollutant removal, a systematic comparison was conducted on the action mechanisms and design parameters of the pre-, mid-, and post-positioned O₃-BAC processes. Their actual treatment efficiency was comprehensively evaluated from multiple dimensions, including the removal efficiency of key water quality indicators such as organic matters, taste and odor compounds, ammonia nitrogen, and turbidity, as well as biological safety. The results indicate that the pre-positioned O₃-BAC process preferentially removes raw water organic matters, taste and odor compounds, algae, and ammonia nitrogen, thereby enhancing conventional treatment and preventing microbial leakage. The mid-positioned process utilizes a mid-positioned-upflow BAC filter operating under slight expansion conditions, eliminating the need for secondary lifting. However, its operational efficiency is significantly influenced by the inflow rate. Sometimes, micro-flocculation needs

通信作者: 王全勇 E-mail: wangquanyong177@163.com

to be added to ensure subsequent filtration effectiveness. The post-positioned process serves as a terminal safeguard following conventional treatment, further improving water quality. Nevertheless, it faces the challenge of balancing biological degradation with the control of biological leakage, and is typically combined with ultrafiltration membranes to ensure the biological safety of the effluent. Overall, water treatment plants must rationally select the process type based on different raw water qualities and purification objectives to ensure water safety.

Keywords: advanced treatment; pre-positioned O_3 -BAC; mid-positioned O_3 -BAC; post-positioned O_3 -BAC; organic matter; taste and odor compounds

水是生命之源,确保饮用水安全与优质关乎人类健康与社会可持续发展。随着工业化推进和环境污染加剧,传统给水处理工艺面临诸多挑战^[1]。臭氧-生物活性炭(O_3 -BAC)工艺融合了 O_3 氧化、活性炭吸附和生物降解作用,能够高效去除有机物、氨氮、色度、臭味等,在给水处理领域得到了广泛应用^[2-3]。

根据 O_3 -BAC在净水处理流程中与常规工艺的位置关系,可将其划分为前置、中置和后置三种典型应用模式。 O_3 -BAC工艺最早采用后置模式,即混凝沉淀+过滤+ O_3 接触氧化+BAC滤池,该模式将 O_3 -BAC置于常规工艺之后,对滤后水进行深度处理,旨在进一步去除残留的难降解有机物与消毒副产物前体物,提升出水水质。但是,在实际运行中发现,后置-下向流BAC滤池存在微生物泄漏问题^[4-5]。为优化工艺性能,发展出了中置模式,即混凝沉淀+ O_3 接触氧化+BAC滤池+(微絮凝)+过滤,该模式将 O_3 -BAC滤池置于混凝沉淀与过滤之间,处理沉淀出水,依靠重力流,因此省去了二次提升,有时借助微絮凝强化过滤性能,避免微生物泄漏,但是除浊、除嗅效果有限^[6]。近几年发展出前置模式,即臭氧/双氧水(O_3/H_2O_2)高级氧化+BAC流化床+混凝沉淀+过滤,该模式秉持“优先去除有机物,再去颗粒”理念,将 O_3/H_2O_2 -BAC流化床置于流程最前端,直接处理原水,在高效去除有机物及臭味物质的同时,可强化混凝、节能降耗、深度降浊,实现深度处理与常规工艺协同增效^[7-8]。

尽管 O_3 -BAC工艺在饮用水处理领域已有较多实践,但目前对不同配置方式在作用机制、设计参数及水质处理效果等方面的差异尚缺乏系统总结。基于此,笔者对比了三种 O_3 -BAC工艺的结构特点、技术原理与实际性能,可为工艺优化与工程设计提

供参考。

1 作用机制

1.1 前置 O_3 -BAC

前置 O_3 -BAC工艺将 O_3 -BAC置于给水处理工艺最前端(见图1),其核心在于利用 O_3 的强氧化性与BAC流化床的物理吸附和生物降解作用,优先实现对原水中有机物的深度去除。该工艺首先利用 O_3 的强氧化性攻击原水中的大分子有机物,通过开环、断链将其转化为小分子物质(分子质量 <1 ku),为后续BAC吸附和生物降解创造有利条件;同时 O_3 能去除藻类繁殖、有机物污染等导致的原水臭味和色度,还能氧化还原性物质(如 Fe^{2+} 、 SO_3^{2-})以消除其对后续常规处理的干扰^[9-10]。更为重要的是, O_3 诱导有机物极性发生变化,使其羧基团数量显著增加,从而增强有机物的电负性,这在后续混凝过程中可强化带负电有机物与带正电混凝剂之间的电中和与吸附架桥作用,显著改善絮体形成效果,从而提升对颗粒物和胶体的去除效果^[11]。为适应原水特征,进一步增强 O_3 氧化池的氧化性并控制 O_3 氧化副产物(溴酸盐)风险。前置 O_3 -BAC工艺通过投加 O_3 和 H_2O_2 来构建 O_3/H_2O_2 高级氧化体系,其利用 H_2O_2 与 O_3 产生大量羟基自由基($\cdot OH$),可高效去除2-甲基异茨醇(2-MIB)和土臭素(GSM)等臭味物质,并能有效抑制溴酸盐生成^[7]。其后设置的上流式BAC流化床则承接氧化出水,发挥吸附-生物降解-助凝三重协同作用。颗粒活性炭处于完全流化状态,传质效率高,表面不断摩擦以消除表面钝化,可持续高效吸附水中残留的有机物、臭味物质和部分重金属离子等污染物^[12],颗粒活性炭微米级孔道内附着的丰富生物膜还可以进一步降解氧化产物^[13],实现有机物和氨氮的深度去除。此外,前置- O_3/H_2O_2 +BAC流化床出水中流失的粉炭及脱落

的生物膜可作为后续混凝阶段的絮体晶核,促进水中悬浮物形成密实絮体;流化床内的微生物胞外分泌物可促进架桥混凝,避免微生物泄漏的同时还能提高低温低浊原水的混凝效率^[8]。

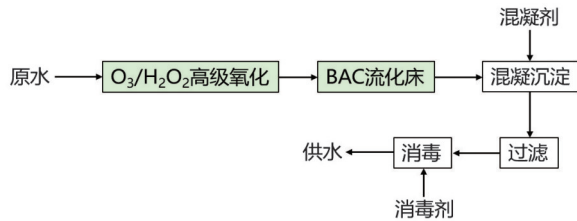


图1 前置O₃-BAC工艺流程

Fig.1 Flow chart of pre-positioned O₃-BAC process

1.2 中置O₃-BAC

中置O₃-BAC工艺将O₃接触氧化和中置-上向流BAC滤池置于给水处理工艺混凝沉淀的后端、过滤的前端(见图2)^[14]。与前置O₃-BAC工艺不同,此工艺首先通过混凝沉淀去除水中部分悬浮杂质和少量大分子有机物,再通过O₃-BAC深度处理残留的难降解有机物,最后利用过滤控制浊度和微生物泄漏。与传统后置O₃-BAC工艺不同,中置O₃-BAC工艺通过流程调整,利用重力流实现O₃氧化与BAC的直接串联,经过O₃氧化后的水自下而上流入BAC滤池,避免二次提升^[15]。同时,O₃氧化能提高部分有机物的可生化性,有利于中置-上向流BAC滤池中微生物摄取利用,提高有机物的生物降解效果,从而提升整体工艺对有机物的去除效率^[16]。

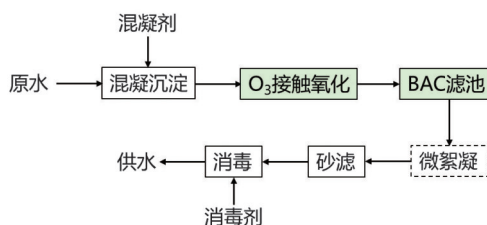


图2 中置O₃-BAC工艺流程

Fig.2 Flow chart of mid-positioned O₃-BAC process

但是,中置-上向流BAC滤池仅依赖进水量实现炭层微膨胀,进水量变化引起的上升流速变化会影响炭层膨胀率,水量低时易导致炭层积泥,水量高时积泥会释放,影响出水水质。另一方面,中置-上向流BAC滤池在运行过程中,因颗粒炭磨损而流失的炭粉及脱落的生物膜与沉后水中残余的微小絮体混合,增加了悬浮物浓度及非脱稳颗粒数量,影响过滤效果。为此,有时会在过滤前增设微絮

凝,通过投加混凝剂,对颗粒进行二次电中和脱稳,提高滤料的黏附截留效率,避免微生物泄漏,但会加重过滤负荷,滤池反洗比较频繁^[17]。

1.3 后置O₃-BAC

后置O₃-BAC工艺将O₃接触氧化和后置-下向流BAC滤池置于给水处理工艺的末端(见图3)^[18],其核心目标是进一步去除经常规工艺处理后水中残留的有机物,特别是难降解的中小分子有机物及消毒副产物前体物。通过O₃氧化作用,改变有机物分子结构和可生化性,使其更易被后置-下向流BAC滤池生物降解,为避免O₃氧化产生溴酸盐等有害副产物,需通过精确控制O₃投加量或投加适量氨氮等手段加以控制^[19-20]。BAC单元则主要依靠BAC吸附及其表面附着生物膜的生物降解作用,实现对有机物的深度去除。

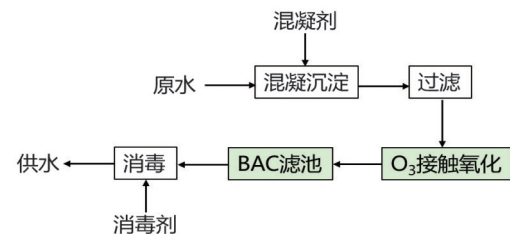


图3 后置O₃-BAC工艺流程

Fig.3 Flow chart of post-positioned O₃-BAC process

然而,该后置O₃-BAC工艺也面临滤池堵塞、生物膜异常增殖及微生物泄漏风险等问题^[21]。其运行效果受后置-下向流BAC滤池进水污染物负荷影响显著,若前端常规处理工艺受原水藻类和有机物影响,处理效率下降,并使进水负荷过高时,会加速后置-下向流BAC滤池堵塞或生物膜过度滋生,进而增加微生物泄漏风险。因此,需通过定期反冲洗、在后置-下向流BAC滤池后采用超细格网拦截微型动物并耦合超滤工艺以及严格控制常规工艺出水水质等措施,维持后置-下向流BAC滤池的长期稳定运行^[22]。

2 设计参数

2.1 O₃氧化池

前置、中置与后置O₃-BAC工艺中O₃氧化池的运行条件不同。前置O₃-BAC工艺中O₃投加量为1.0~3.0 mg/L^[10,18],中置O₃投加量为0.5~1.5 mg/L^[14,16],后置O₃投加量为0.5~2.0 mg/L^[23-24];O₃接触时间分别为10~15、15、10~14 min。实际工程运行证明,将O₃-BAC置于给水处理全流程工艺的最

前端,并没有增加 O_3 投加量和接触时间,这是因为原水中溶解性有机质(DOM)可以促进 O_3 产生 $\cdot OH$,并参与氧化过程^[25]。区别于中置和后置 O_3 氧化池采用的传统曝气盘或文丘里射流器投加 O_3 ,前置 O_3 氧化池采用自激脉冲空化射流曝气器投加 O_3 , O_3 在空化射流器作用下瞬时扩散,溶解转移效率高,可控制无效分解;脉冲曝气形成的气液混合团可提高混合效果和 O_3 气液转移效率^[26]。此外,原水中的有机氮经 O_3 氧化后会转化为氨氮,氨氮能抑制溴酸盐的产生^[18],但为保证2-MIB的去除效果同时避免溴酸盐的产生,在前置 O_3 氧化池内投加 H_2O_2 , O_3 与 H_2O_2 的投加质量比一般为5:1~10:1^[9,27]。

2.2 BAC滤池

三种 O_3 -BAC工艺的BAC滤池在进水方式、流态控制及滤料特性方面存在差异,具体见表1。

表1 前置、中置和后置BAC滤池参数对比

Tab.1 Comparison of technical parameters among pre-, mid-, and post-positioned BAC filters

| 项目 | 前置 | 中置 | 后置 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 进水方式 | 上向流 | 上向流 | 下向流 |
| 炭层膨胀率/% | 30~50 | ≥25 | 0 |
| 炭的碘吸附值/(mg/g) | 800~900 | 900~1 000 | 900~1 000 |
| 炭粒径/mm | 0.40~1.50 | 0.30~0.84 | 0.65~2.36 |
| 炭层厚度/m | 1.5~3.0 | 1.0~3.0 | 1.5~2.4 |
| 滤速/(m/h) | 20~60 | 10~12 | 6~12 |
| 接触时间/min | 7~10 | 10~15 | 9~18 |

前置- O_3/H_2O_2 +BAC流化床采用上向流进水方式并配备内循环泵,上升流速稳定在20~60 m/h,维持30%~50%的炭层膨胀率以防止颗粒物积累。采用碘吸附值为800~900 mg/g的微米级孔道的颗粒活性炭(如煤质压块破碎炭),活性炭机械强度要求达到95%。在高速流化表面剪切状态下,微米级孔道可作为微生物繁殖场所。工程运行证明,该工艺具有一定的抗低温能力;运行中炭颗粒不断碰撞摩

擦,表面不断更新,难以被生物膜全部覆盖,能够保留活性炭的吸附本性和生物膜特性。该工艺不需要换炭,只需每年补充8%~10%磨损流失的活性炭,相当于10~12年使用寿命;活性炭粒径根据空床上升流速确定,一般为0.40~1.50 mm,炭层厚度为1.5~3.0 m,接触时间为7~10 min^[8,10]。

中置-上向流BAC滤池上升流速由进水流量决定,一般设计为10~12 m/h,膨胀率设计为不低于25%。实际运行发现,膨胀率受进水流量影响较大,在运行水量偏低时,活性炭层膨胀率降低,炭层中容易积累沉淀出水带来的悬浮杂质。该工艺采用碘吸附值为900~1 000 mg/g的纳米级微孔活性炭(如柱状/压块破碎炭),细菌一般在颗粒炭裂隙和表面繁殖,运行2~3年后,炭表面基本被生物膜全部覆盖。活性炭的粒径根据上升流速选择,一般选择小粒径活性炭,粒径范围为0.30~0.84 mm,炭层厚度为1.0~3.0 m,接触时间为10~15 min^[14-15]。

后置-下向流BAC滤池一般采用由BAC(上层)与石英砂(下层)组成的双层滤料结构,其中BAC层和中置一样,也采用碘吸附值为900~1 000 mg/g的纳米级微孔活性炭(如柱状/压块破碎炭);炭粒径为0.65~2.36 mm,炭层厚度为1.5~2.4 m,石英砂粒径为0.5~0.7 mm,砂层厚度为0.1~0.6 m,滤速为6~12 m/h,接触时间为9~18 min^[21,24,28]。该工艺通过双层滤料优化过滤效率,控制生物泄漏,但有时难以取得理想效果。

3 处理效果

为科学分析3种工艺对有机物、臭味物质、氨氮和浊度等水质指标的去除效果,本研究选取的原水涵盖引黄水库水、黄河水库水、东江水、黄浦江上游水等典型饮用水水源,其基础水质参数(如水温、pH、DO等)具有显著共性特征。此外,不同工艺对应的工程案例实际运行参数见表2。

表2 不同工艺对应的工程案例实际运行参数

Tab.2 Actual operational parameters of engineering cases corresponding to different processes

| 工艺及案例 | | O_3 投加量/(mg/L) | O_3 接触时间/min | 炭粒径 | 炭层厚度/m | 停留时间/min |
|-------|-----------------------------|------------------|----------------|------------|---------|----------|
| 前置 | 山东省L水厂引黄水库水 ^[8] | 2.00~4.00 | 30.00 | 0.4~0.6 mm | 2.0~3.0 | 10.00 |
| | 山东某水厂引黄水库水 ^[10] | 2.00 | 15.00 | | 2.0 | 15.00 |
| | 济南市济阳区黄河水库水 ^[18] | 3.00 | 15.00 | 0.5~1.5 mm | 1.5 | 15.00 |
| 中置 | 济南某水厂引黄水库水 ^[29] | 1.50~3.00 | 15.00 | 20×50目 | 3.0 | 15.00 |
| | 深圳某水厂东江水 ^[30] | | | | | |
| | 闵行水厂黄浦江上游水 ^[31] | 1.50~3.00 | 15.00 | | 2.2 | 16.90 |

续表2(Continued)

| 工艺及案例 | | O ₃ 投加量/(mg/L) | O ₃ 接触时间/min | 炭粒径 | 炭层厚度/m | 停留时间/min |
|-------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------|--------|----------|
| 后置 | 金泽水厂太浦河原水 ^[4] | 1.36 | 12.00 | 0.7~2.0 mm | | 30.00 |
| | 济南市济阳区黄河水库水 ^[18] | 3.00 | 15.00 | 0.5~1.5 mm | 1.5 | 15.00 |
| | 福建某河流拦河闸前水库水 ^[24] | 0.60~2.00 | 13.50 | 8×20目 | 2.4 | 17.37 |
| | 闵行水厂黄浦江上游水 ^[31] | 1.50~3.00 | 15.00 | | 2.2 | 16.90 |
| | 深圳某水厂水库水 ^[32] | 0.40~2.00 | 11.95 | | 1.8 | 12.00 |

3.1 有机物

前置、中置和后置O₃-BAC工艺对有机物的去除效果见表3。

表3 前置、中置和后置O₃-BAC工艺对有机物的去除效果Tab.3 Removal effect of organic matters by pre-, mid-, and post-positioned O₃-BAC processes

| 工艺及案例 | | 指标 | 原水浓度/(mg/L) | 出厂水浓度/(mg/L) | 去除率/% |
|-------|-----------------------------|-------------------|-------------|--------------|-------|
| 前置 | 山东省L水厂引黄水库水 ^[8] | COD _{Mn} | 2.30~7.00 | <1.20 | >75.0 |
| | | TOC | 3.68 | 1.01 | 72.5 |
| | 济南市济阳区黄河水库水 ^[18] | BDOC | 1.36 | 0.57 | 58.2 |
| 中置 | 济南某水厂引黄水库水 ^[29] | COD _{Mn} | 1.33~3.56 | 0.54~1.22 | 57.8 |
| 后置 | 济南市济阳区黄河水库水 ^[18] | TOC | 3.68 | 1.45 | 60.7 |
| | | BDOC | 1.36 | 0.74 | 45.5 |

前置O₃-BAC工艺对引黄水库水COD_{Mn}的去除率可以达到75.0%以上,高于中置O₃-BAC工艺(57.8%)^[8,29];对黄河水库水的总有机碳(TOC)和生物可降解溶解性有机碳(BDOC)的去除率分别能达到72.5%和58.2%,较后置O₃-BAC工艺分别提高19.4%和27.9%^[18]。分析原因,前置O₃-BAC工艺采用O₃/H₂O₂高级氧化和传质效率更高的BAC流化床技术代替常规O₃接触氧化和BAC滤池,有效提高了有机物去除率;将其置于常规工艺前端,出水中高溶解氧环境可强化常规工艺的生物作用,二者协同增效,能高效去除残留的有机物、胞外分泌物和生物膜碎屑,从而提高有机物去除率。中置O₃-BAC工艺的上向流BAC滤池膨胀率处于不稳定状态,影响了传质效率,中置-上向流BAC滤池出水中含有胞外分泌物等代谢产物及后生动物,这部分物质难以通过砂滤被去除,同时砂滤池受中置-上向流BAC滤池出水浊度不稳定的影响,难以达到最优过滤效率,因此难以获得较高的有机物去除率。对于后置O₃-BAC工艺,为优先保证出水浊度并控制生物泄漏,必须进行严格控制后置-下向流BAC滤

池滋生的生物膜,炭层下面虽然设置了砂滤层,但对于非脱稳的生物膜碎屑和游离的后生动物,砂滤层黏附截留效率难以提高。相比前置和中置工艺,后置-下向流BAC滤池基质持有量最低,导致其生物量主要分布于炭层上部1/3处,且活性炭表面因炭层固定,更易发生颗粒物沉积钝化^[15,18],因此后置O₃-BAC工艺难以取得最优的有机物去除率。

3.2 嗅味物质

前置、中置和后置O₃-BAC工艺对嗅味物质的去除效果见表4。前置O₃/H₂O₂-BAC流化床工艺对高嗅味原水(如2-MIB为600 ng/L,GSM为100 ng/L)具有很好的去除效果,去除率接近100%^[8,10];中置和后置O₃-BAC工艺对较低嗅味原水具有较好的去除效果^[30,32],但对2-MIB和GSM的整体去除率低于前置工艺。这是因为对2-MIB和GSM的去除主要依赖O₃氧化单元,前置O₃-BAC工艺采用O₃/H₂O₂高级氧化,提高了对2-MIB和GSM的氧化效率。另据研究,在原水中投加O₃去除2-MIB的效果优于在砂滤之后投加,这是因为原水中的天然有机物(NOM)可以激发O₃产生·OH^[25,33]。

表4 前置、中置和后置O₃-BAC工艺对嗅味物质的去除效果Tab.4 Removal effect of taste and odor compounds by pre-, mid-, and post-positioned O₃-BAC processes

| 工艺及案例 | | 指标 | 原水浓度/(ng/L) | 出厂水浓度/(ng/L) | 去除率/% |
|-------|----------------------------|-------|-------------|--------------|-------|
| 前置 | 山东省L水厂引黄水库水 ^[8] | 2-MIB | 600.0 | <5.0 | >99 |
| | | GSM | 100.0 | <3.8 | >99 |
| | 山东某水厂引黄水库水 ^[10] | 2-MIB | 160.3 | <2.2 | >99 |
| | | GSM | 32.3 | <3.8 | >88 |
| 中置 | 深圳某水厂东江水 ^[30] | 2-MIB | 24.0±10.3 | 3.2±2.0 | 87 |
| | | GSM | 33.5±12.2 | 3.1±3.0 | 91 |
| 后置 | 深圳某水厂水库水 ^[32] | 2-MIB | 10.0~30.0 | 2.3~3.3 | 77~89 |
| | | | 30.0~100.0 | 2.4~3.0 | 92~97 |

3.3 氨氮

前置、中置和后置O₃-BAC工艺对氨氮的去除

效果见表5。由于前置 O_3 -BAC工艺通过投加 O_3 形成高溶解氧状态下的BAC流化床和砂滤对氨氮进行了两次生物降解,出水氨氮浓度可降至极低水平($<0.02\text{ mg/L}$)^[10,18],且优于中置和后置工艺^[18,31]。从理论上讲,中置 O_3 -BAC工艺对氨氮也进行了高溶解氧状态下BAC和砂滤的两次生物降解,但未表现出较高的氨氮去除率。分析原因,首先,这可能与BAC选型、中置-上向流BAC滤池膨胀率不稳定,以及炭层积泥带来的负面影响有关,另外砂滤池在微絮凝高负荷状态下,反洗频率较高,无法高效发挥硝化功能。后置 O_3 -BAC工艺中 O_3 投加在砂滤之后,与前置和中置 O_3 -BAC工艺相比,砂滤池溶解氧水平偏低,对氨氮去除率有一定影响。其次,砂滤出水经过 O_3 氧化后,氨氮浓度有所升高,增加了后置-下向流BAC滤池的进水氨氮负荷。相对而言,在后置 O_3 -BAC工艺对氨氮的去除过程中砂滤池没有发挥较高的作用,只进行了后置-下向流BAC滤池一次高溶解氧状态下的生物降解,所以出水氨氮浓度相对偏高^[18,31]。

表5 前置、中置和后置 O_3 -BAC工艺对氨氮的去除效果
Tab.5 Removal effect of ammonia nitrogen by pre-, mid-, and post-positioned O_3 -BAC processes

| 工艺及案例 | | 原水氨氮/ (mg/L) | 出厂水氨氮/ (mg/L) | 去除 率/% |
|-------|-----------------------------|-----------------|------------------|-----------|
| 前置 | 山东某水厂引黄水库水 ^[10] | 0.13 | <0.02 | >85 |
| | 济南市济阳区黄河水库水 ^[18] | 0.17 | <0.02 | >88 |
| 中置 | 闵行水厂黄浦江上游水 ^[31] | 0.25~1.50 | 0.40 | 60 |
| 后置 | 济南市济阳区黄河水库水 ^[18] | 0.17 | 0.11 | 35 |
| | 闵行水厂黄浦江上游水 ^[31] | 0.25~1.5 | 0.40 | 60 |

3.4 浊度

浊度作为饮用水生物安全性的重要间接表征指标,其去除效果与微生物(如微型动物、细菌)泄漏风险密切相关。相关研究证实,浊度与水中微型动物(如轮虫、线虫)检出率、细菌总数呈显著正相关,当出水浊度稳定控制在 0.1 NTU 以下时,微型动物残留率和细菌泄漏率符合饮用水安全标准^[34]。前置 O_3 -BAC工艺通过 O_3/H_2O_2 高级氧化作用增强有机物的电负性,再结合BAC流化床出水中脱落的生

物膜与炭粉为混凝提供絮体晶核,胞外分泌物促进架桥絮凝,二者协同强化常规工艺,其对浊度去除效果最为优异(见表6),其出厂水浊度可降至 0.08 NTU 以下^[10]。中置 O_3 -BAC工艺通过后续砂滤池保障出厂水浊度,但中置-上向流BAC滤池出水中含有脱落的生物膜和磨损炭粉,有时虽增设微絮凝,但仍会对砂滤运行产生一定影响,最终导致出厂水浊度相对偏高($0.10\sim 0.25\text{ NTU}$)^[29-30]。后置 O_3 -BAC工艺由于后置-下向流BAC滤池同时发挥生物降解和过滤作用,后置-下向流BAC滤池的进水有机负荷和微生物生长状态对出水浊度影响较大。在原水有机物和藻类浓度较低时,常规工艺处理效率较高,砂滤池出水浊度较低,后置-下向流BAC滤池出水浊度也较低(0.11 NTU)^[24];但在原水有机物浓度较高或常规工艺处理效率降低时,后置-下向流BAC滤池进水有机负荷升高易引起生物膜过度滋生,导致出水浊度升高甚至微生物穿透滤池,为此在后置-下向流BAC滤池后增设超细拦网以拦截大型水生生物,甚至增设超滤膜过滤来降低浊度,使出水浊度达到 0.10 NTU ^[4],同时解决了供水生物安全问题。

表6 前置、中置和后置 O_3 -BAC工艺对浊度的去除效果
Tab.6 Removal effect of turbidity by pre-, mid-, and post-positioned O_3 -BAC processes

| 工艺及案例 | | 原水浊度/ NTU | 出厂水浊 度/NTU | 去除 率/% |
|-------|------------------------------|--------------|---------------|-----------|
| 前置 | 山东某水厂引黄水库水 ^[10] | 8.92 | ≤ 0.08 | >99.00 |
| 中置 | 济南某水厂引黄水库水 ^[29] | 0.97~8.76 | 0.10~0.25 | 94.81 |
| | 深圳某水厂东江水 ^[30] | 14.00 | 0.14 | 99.00 |
| 后置 | 福建某河流拦河闸前水库水 ^[24] | 11.53 | 0.11 | 99.00 |
| | 金泽水厂太浦河原水 ^[4] | 35.50 | 0.10 | 99.70 |

4 运行能耗

不同位置的 O_3 -BAC工艺在运行能耗方面具有显著差异。在实际运行过程中,三种 O_3 -BAC工艺的 O_3 投加量差异较小, O_3 制备能耗基本相同。除 O_3 制备能耗外,前置 O_3 -BAC工艺中的BAC流化床需要 $1.5\sim 2.0\text{ m}$ 扬程的内循环泵以维持 $30\%\sim 50\%$ 的炭层膨胀率,中置 O_3 -BAC工艺需要 O_3 接触池与中置-上向流BAC滤池形成 $1.2\sim 1.5\text{ m}$ 水力高差,以维持炭层微膨胀状态,而后置 O_3 -BAC工艺则需要增设二次提升泵站,提升高度一般为 $3\sim 4\text{ m}$,因此后

置O₃-BAC工艺克服炭滤池阻力的提升能耗高于前置-O₃/H₂O₂+BAC流化床和中置-上向流BAC滤池。此外,3种O₃-BAC工艺的炭池反洗方式及反洗周期不同,前置-O₃/H₂O₂+BAC流化床和中置-上向流BAC滤池反洗均仅采用气洗方式,反洗周期约为30 d^[14],而后置-下向流BAC滤池则采用气水联合反冲洗方式,夏季反洗周期为3~5 d,冬季反洗周期为7~8 d^[28,35],因此后置-下向流BAC滤池的反洗能耗高于前置-O₃/H₂O₂+BAC流化床和中置-上向流BAC滤池。综合比较发现,后置O₃-BAC工艺运行能耗较高,前置O₃-BAC工艺和中置O₃-BAC工艺运行能耗基本一致。

5 结论与展望

① O₃-BAC工艺基于氧化、吸附与生物降解协同作用实现有机物和氨氮的去除,在生物反应过程中必然产生微生物繁殖形成的颗粒物和代谢产物等副产物,其与常规工艺的组合模式影响供水水质指标;同时,原水中藻类、DOC浓度及常规工艺处理效率也影响O₃-BAC的位置选择。

② 中置和后置O₃-BAC工艺已经在行业里广泛应用,在运行中需谨慎研究如何提高有机物和臭味物质的去除率,规避生物泄漏风险并实现深度降浊,以提高供水水质的安全性。

③ 前置O₃-BAC工艺突出了优先去除原水中有机物的净水理念,实现了O₃-BAC深度处理工艺与常规工艺的协同增效,提高了有机物、浊度和臭味物质的去除率,是一种具有发展前景的净水工艺。

④ O₃-BAC工艺作为当前给水深度处理领域应用最广泛的主流技术,未来应在超低基质下生物降解模型开发、新型活性炭制备、高效率的高级氧化与生物反应器开发,以及结合人工智能等方面加大研究力度,以期提升净水效率,强化对新污染物及水质变化问题的应对能力,为保证供水安全提供坚实的技术支撑。

参考文献:

[1] AFONSO A C, SAAVEDRA M J, GOMES I B, et al. Current microbiological challenges in drinking water [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 72: 107614.

[2] 宋欣,李伟英,王悦,等. 臭氧/生物活性炭工艺对供水管网理化性质的影响[J]. *中国给水排水*, 2025, 41

(13): 79-86.

SONG X, LI W Y, WANG Y, et al. Impacts of ozone-biological activated carbon process on physicochemical properties of drinking water distribution networks [J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(13): 79-86 (in Chinese).

[3] 许子丽,陈卫,陶辉,等. O₃/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 Z L, CHEN W, TAO H, et al. Optimization of ozone action conditions in O₃/BAC process [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(11): 33-38 (in Chinese).

[4] 武珉辉,钱庆玲,刘爽,等. 后置臭氧-下向流活性炭工艺中臭氧投加量的中试优化[J]. *净水技术*, 2021, 40(10): 49-55.

WU M H, QIAN Q L, LIU S, et al. Pilot-scale optimization of ozone dosage in rear ozone downflow activated carbon process [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(10): 49-55 (in Chinese).

[5] 张晏晏,王晏,洪景涛,等. 青岛白沙河水厂臭氧-生物活性炭系统运行调试[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(22): 113-117.

ZHANG Y Y, WANG Y, HONG J T, et al. Commissioning of O₃/BAC system in Qingdao Baishahe water purification plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(22): 113-117 (in Chinese).

[6] 鲍娟,汪华耀,王帅,等. 臭氧/上向流BAC工艺去除二氯乙腈前驱物的优化[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(3): 30-36.

BAO J, WANG H Y, WANG S, et al. Optimization of precursor removal of dichloroacetonitrile (DCAN) in a ozonation and up-flow BAC filter [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(3): 30-36 (in Chinese).

[7] 彭锦玉,王小佺,丁纯健,等. 前置O₃/H₂O₂高级氧化工艺在净水厂提质改造中的应用及效果分析[J]. *给水排水*, 2023, 49(12): 1-7.

PENG J Y, WANG X M, DING C J, et al. Application and effect analysis of pre-ozonation-based advanced oxidation in improving drinking water quality [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(12): 1-7 (in Chinese).

[8] 姚恒军,彭锦玉,李振邦,等. 前置O₃/H₂O₂-生物炭流化床在水厂提标工程中的设计应用[J]. *净水技术*, 2024, 43(12): 195-204.

YAO H J, PENG J Y, LI Z B, et al. Design and

- application of pre-O₃/H₂O₂-biochar fluidized bed processes in WTP upgrading [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(12): 195-204(in Chinese).
- [9] PENG J Y, WANG Q Y, LI Z B, et al. Development of a novel advanced treatment process for high-algae-laden reservoir water: performance and mechanism [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 158: 281-295.
- [10] 彭锦玉, 李振邦, 张坤乾, 等. 前置臭氧-生物流化床工艺用于水厂提质改造[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(12): 94-100.
- PENG J Y, LI Z B, ZHANG K Q, et al. Application of pre-ozone and biological fluidized bed in updating and transformation of waterworks [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(12): 94-100(in Chinese).
- [11] HELMY Q, NOTODARMOJO S. Improvement of the raw drinking water quality from shallow well by ozone treatment [J]. *Materials Science and Engineering*, 2019, 620(1): 012052.
- [12] LIU X J, XU Q X, LI Z W, et al. Simultaneous removal of cationic heavy metals and arsenic from drinking water by an activated carbon supported nanoscale zero-valent iron and nanosilver composite [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 650: 129581.
- [13] XU L K, CANALES M, ZHOU Q Z, et al. Antibiotic resistance genes and the association with bacterial community in biofilms occurring during the drinking water granular activated carbon (GAC) sandwich biofiltration [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 460: 132511.
- [14] 刘建广, 李芳, 李世俊, 等. 臭氧-生物活性炭-砂滤组合工艺运行效果分析[J]. *净水技术*, 2017, 36(8): 72-79.
- LIU J G, LI F, LI S J, et al. Analysis of operation effect of combined processes of ozone-biological activated carbon-sand filtration [J]. *Water Purification Technology*, 2017, 36(8): 72-79(in Chinese).
- [15] 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 X N, HE J L, LIU Q H, 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).
- [16] 张晓娜, 何嘉莉, 刘清华, 等. 前置臭氧活性炭处理微污染水源水的中试[J]. *城镇供水*, 2018(6): 66-69.
- ZHANG X N, HE J L, LIU Q H, et al. Pilot study on treatment of micro-polluted source water by pre-O₃/BAC process [J]. *City and Town Water Supply*, 2018(6): 66-69(in Chinese).
- [17] 马天. 微絮凝-砂滤保障再生水的生物安全性研究[J]. *中国市政工程*, 2023(6): 40-43.
- MA T. Study on biological safety of micro-flocculation sand filtration to ensure regenerated water [J]. *China Municipal Engineering*, 2023(6): 40-43(in Chinese).
- [18] 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 H, PENG J Y, WANG Q Y, 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).
- [19] 程迪. 徐州市某地面水厂深度处理工艺试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- CHENG D. Experimental Study on Advanced Treatment Technology of a Surface Water Plant in Xuzhou [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2020(in Chinese).
- [20] 王永京, 冯思捷, 季雨晴, 等. 臭氧-生物活性炭工艺对臭味及溴酸盐控制的中试研究[J]. *给水排水*, 2016, 42(8): 27-32.
- WANG Y J, FENG S J, JI Y Q, et al. Pilot study on odor and bromate control using ozone-biological activated carbon process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(8): 27-32(in Chinese).
- [21] 张晓彦, 王广智, 李伟光, 等. 生物增强活性炭滤池的反冲洗方式研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2009, 25(2): 146-149.
- ZHANG X Y, WANG G Z, LI W G, et al. Study on method of backwash of enhancing biological activated carbon filter [J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Nature Science Edition)*, 2009, 25(2): 146-149(in Chinese).
- [22] 潘博伦, 刘岳峰, 李士雄, 等. 臭氧-活性炭技术应用中的次生风险问题研究综述[J]. *供水技术*, 2024, 18(5): 11-15.
- PAN B L, LIU Y F, LI T X, et al. Literature review on the secondary risk from ozone and biological activated

- carbon technology [J]. *Water Technology*, 2024, 18(5): 11-15(in Chinese).
- [23] 张振秀, 杨凯, 于建伟, 等. 臭氧活性炭-后置砂滤工艺对水中农药的控制效能[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5): 2315-2320.
- ZHANG Z X, YANG K, YU J W, et al. Pesticides removal evaluation for O₃/BAC with post filtration process in drinking water [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(5): 2315-2320 (in Chinese).
- [24] 毕爱军. 后置下向流臭氧-生物活性炭工艺深度处理工程应用[J]. *净水技术*, 2020, 39(8): 36-43.
- BI A J. Application of rear downward-flow ozone-bioactivated carbon process in advanced treatment project [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(8): 36-43(in Chinese).
- [25] HO L, NEWCOMBE G, CROUE J P. Influence of the character of NOM on the ozonation of MIB and geosmin [J]. *Water Research*, 2002, 36(3): 511-518.
- [26] JI H, LAN Y, NIE S, et al. Synergistic effect of hydrodynamic cavitation characteristics of self-excited oscillation cavity for degradation of dye wastewater [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 135116.
- [27] PENG J Y, WANG Q Y, LI Z B, et al. Pilot testing and engineering application of O₃/H₂O₂ process for 2-methylisoborneol and geosmin removal in drinking water treatment [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 60: 105140.
- [28] 李春芬. 连云港灌南县田楼水厂预处理、深度处理和消毒处理工艺设计[J]. *中国市政工程*, 2016(5): 36-38.
- LI C F. Process design of pretreatment, depth treatment & disinfection treatment of Tianlou water plant in Guannan County, Lianyungang [J]. *China Municipal Engineering*, 2016(5): 36-38(in Chinese).
- [29] 李浩, 贾瑞宝, 刘衍波. 济南鹊华水厂深度处理改造工程设计及运行分析[J]. *给水排水*, 2012, 38(4): 22-25.
- LI H, JIA R B, LIU Y B. Case analysis of advanced treatment project design and operation of Jinan Quehua water treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(4): 22-25(in Chinese).
- [30] 宋欣, 李燕君, 黄慧, 等. 臭氧-上向流BAC工艺对常规及新污染物的控制效果[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(3): 1-8.
- SONG X, LI Y J, HUANG H, et al. Control of conventional and emerging contaminants by ozone-upflow biological activated carbon process [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(3): 1-8(in Chinese).
- [31] 马玉英, 朱洁. 炭滤池前置或后置的运行效果比较[J]. *净水技术*, 2015, 34(5): 49-53.
- MA Y Y, ZHU J. Comparison of operation effect between pre-positioned and post-positioned activated carbon filters [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34(5): 49-53(in Chinese).
- [32] 许子荣, 肖帆, 陈铁成, 等. 采用臭氧-活性炭深度处理的水厂应对2-MIB的工艺组合优化[J]. *中国给水排水*, 2025, 41(6): 69-76.
- XU Z R, XIAO F, CHEN T C, et al. Optimization of ozone-activated carbon filtration process combination for 2-MIB removal in advanced treatment waterworks [J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(6): 69-76 (in Chinese).
- [33] 徐琛宇. 臭氧预氧化去除饮用水中嗅味物质效果与机理的研究:以太湖水为例[D]. 苏州:苏州科技学院, 2015.
- XU C Y. Study on the Effect and Mechanism of Ozone Pre Oxidation for Removing Odor in Drinking Water: Taking Taihu Water Source for Example [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015 (in Chinese).
- [34] ZIMOCHE I, PACIEJ J. Use of water turbidity as an identifier of microbiological contamination in the risk assessment of water consumer health [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2020, 199: 499-511.
- [35] 陈强, 孙天晓, 唐玉霖. 臭氧-生物活性炭池反冲洗水中的微生物群落研究[J]. *净水技术*, 2022, 41(12): 93-99.
- CHEN Q, SUN T X, TANG Y L. Study on microbial community in backwash water of ozone-biological activated carbon filter [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(12): 93-99(in Chinese).

作者简介:吕森(1986—),男,山东肥城人,硕士,高级工程师,主要从事给排水工程咨询、规划和设计工作。

E-mail:lvmiaos@smedi.com

收稿日期:2025-09-28

修回日期:2025-11-24

(编辑:任莹莹)