

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 03. 007

预处理及深度处理技术强化天津某水厂净水工艺

李旭枫^{1,2}, 周瑶³, 常晶^{1,2}, 王少坡^{1,2}, 李荣光³

(1. 天津城建大学 环境与市政工程学院, 天津 300384; 2. 天津城建大学 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384; 3. 天津水务集团滨海水务有限公司, 天津 300308)

摘要: 滦河水质季节波动较大,仅采用“混凝-沉淀-过滤-消毒”的常规工艺处理,冬季运行压力较大。以引滦原水为研究对象,采用臭氧预氧化、臭氧深度氧化、活性炭过滤、臭氧/活性炭组合处理等技术对常规工艺进行强化,考察各工艺对浊度、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 等指标的控制能力。结果表明:若要求出水 COD_{Mn} 低于1.0 mg/L,采用1.0 mg/L的后臭氧强化工艺即可实现;若对 COD_{Mn} 的控制要求达到0.85 mg/L,应选用1.0 mg/L的预臭氧强化工艺,但此工艺对 UV_{254} 的控制能力较后臭氧弱;对浊度而言,活性炭过滤的效果优于两种臭氧强化工艺,炭滤池出水浊度可降至0.12 NTU;最优的出水效果来自1.0 mg/L后臭氧/活性炭组合强化工艺,浊度可降至0.10 NTU以下, COD_{Mn} 和 UV_{254} 分别降至0.50 mg/L和0.043 cm^{-1} ,可为饮用水厂的提标改造提供技术参考。

关键词: 滦河原水; 臭氧氧化; 活性炭; 强化处理

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)03-0046-07

Enhanced Purification Process of a Waterworks in Tianjin by Pretreatment and Advanced Treatment Technology

LI Xu-feng^{1,2}, ZHOU Yao³, CHANG Jing^{1,2}, WANG Shao-po^{1,2}, LI Rong-guang³

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin Water Group Binhai Water Co. Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: The water quality of Luanhe River fluctuates greatly in seasons, and the treatment performance is poor when there is only the conventional process consisting of coagulation, sedimentation, filtration and disinfection. The conventional process for the treatment of raw water from Luanhe River was enhanced by techniques such as pre-ozonation, advanced ozonation, activated carbon filtration and combined treatment of ozonation and activated carbon, and the ability of each process to control turbidity, COD_{Mn} , UV_{254} and other indicators was investigated. The post-ozonation enhanced process with ozone concentration of 1.0 mg/L could realize the COD_{Mn} in effluent less than 1.0 mg/L. The pre-ozonation enhanced process with ozone concentration of 1.0 mg/L should be selected when the COD_{Mn} in effluent was required to be less than 0.85 mg/L. However, the process demonstrated a weaker ability for UV_{254} control

基金项目: 天津水务集团有限公司科技项目(2021KY-03)

通信作者: 李荣光 E-mail: lirongguang83@163.com

compared with post-ozonation. For turbidity control, the performance of activated carbon filtration was better than that of the two ozonation enhanced processes, and the turbidity of the effluent from the carbon filter was decreased to 0.12 NTU. The combined post-ozonation and activated carbon enhanced process with ozone concentration of 1.0 mg/L had the best effluent quality, and the turbidity, COD_{Mn} and UV_{254} were less than 0.10 NTU, 0.50 mg/L and 0.043 cm^{-1} , respectively, indicating that the results could provide technical reference for the upgrading of drinking water plants.

Key words: raw water from Luanhe River; ozonation; activated carbon; enhanced treatment

天津市是北方地区典型的缺水型城市,人均水资源占有量仅为 165 m^3 ,为全国平均数的 1/15。引滦入津工程通过开发和利用滦河水资源,在很大程度上缓解并改善了天津的供水状况^[1]。目前,研究表明冬季滦河水温度较低, COD_{Mn} 、pH、碱度较高^[2],该水质条件不利于混凝^[3],因此现行“混凝-沉淀-过滤-消毒”工艺的处理压力较大。《天津市供水规划(2020—2035年)》指出,对以引滦为主水源的地表水厂率先实施深度处理工艺提升改造,新建或重建的水厂要同步建设深度处理系统。

臭氧作为一种极强的氧化剂,具有良好的消毒效果和较强的氧化能力^[3],在净水过程的各个阶段均有广泛应用。臭氧工艺按照其所处位置可分为臭氧预氧化和臭氧深度氧化两种。臭氧预氧化主要置于常规混凝工艺之前,在去异嗅味及色度、去除藻类和氨氮、降低铁锰含量以及助凝等方面都可以发挥重要作用^[4]。王笑^[5]的研究发现,星沙水厂使用臭氧预氧化工艺进行提质改造后,出水浊度、 COD_{Mn} 、氨氮较常规处理工艺分别降低了 25.30%、11.08%、26.32%。臭氧深度氧化主要置于常规过滤工艺之后,是指利用臭氧的强氧化能力,去除常规处理工艺出水中的残余微生物、病原性寄生虫(如贾第鞭毛虫、隐孢子虫)及减少氯化消毒副产物的形成^[6],同时实现对微生物消毒杀菌的作用。当原水中溴离子浓度过高时,会产生消毒副产物溴酸盐^[7],因此在采用臭氧氧化技术时可以考虑增加后续处理措施,如活性炭工艺。吉志一^[8]的研究发现,金山水厂采用臭氧/生物活性炭深度处理工艺后,全年出水浊度稳定低于 0.2 NTU, COD_{Mn} 稳定低于 1.1 mg/L,生物可降解溶解有机碳(BDOC)低于 0.2 mg/L,达到优质水指标要求。此外,活性炭的吸附作用在去除消毒副产物的基础上,又可进一步提高对有机物的去除效果^[9-10]。

本研究以引滦水为原水,在天津市某水厂构建连续流小试装置,采用臭氧预氧化、臭氧深度氧化、活性炭过滤和臭氧/活性炭组合处理 4 种技术强化常规工艺,考察其对冬季来水的处理效果及适用性,以为水厂提升改造中新工艺技术路线和关键参数的确定提供数据支持。

1 材料与装置

1.1 试验装置

小试工艺流程如图 1 所示。该装置均由亚克力板材制成,包括预臭氧接触池、混合池、旋流絮凝池、平流沉淀池、调蓄池、V 型滤池、后臭氧接触池和活性炭滤池。常规工艺由混合池、旋流絮凝池、平流沉淀池、调蓄池、V 型滤池组成。控制阀门 1、2 可引入预臭氧工艺;控制阀门 3、4 可引入后臭氧工艺;控制阀门 5、6 可引入活性炭工艺;同时控制阀门 3、4、5、6 可引入后臭氧/活性炭组合工艺。

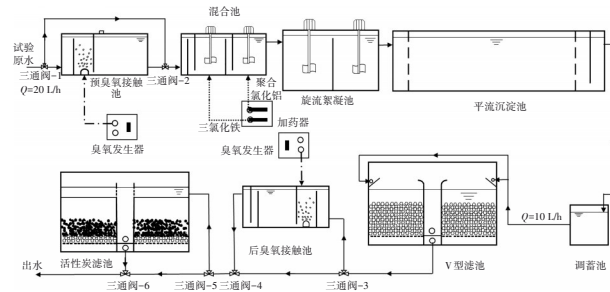


图1 小试工艺流程

Fig.1 Process diagram for small-scale test

臭氧均为单点位微孔曝气投加,臭氧接触池全密封,顶部设尾气收集破坏装置。预臭氧至平流沉淀池阶段流量为 20 L/h,之后各阶段流量为 10 L/h,中间设置调蓄池调节流量。预臭氧投加量为 0.5~2.0 mg/L,接触时间为 4 min;混合池为两级串联混合,单级混合时间为 60 s,采用三氯化铁和聚合氯化铝(PAC)联合投加;旋流絮凝池分为 4 格,共设置 5 个进出水孔,搅拌机辅助推流,转速递减,过孔流速

比为1:0.8:0.6:0.4:0.3,总絮凝时间为22 min;平流沉淀池停留时间为2 h;V型滤池滤料厚为6 cm;后臭氧接触池接触时间为10 min;活性炭滤池滤料厚为6 cm,滤料下层设砂垫层,活性炭运行时间为3 d。

1.2 原水水质

试验期间以滦河水为水源的天津某水厂2022年1月—2月的原水水质见表1。

表1 原水水质

Tab.1 Raw water quality

项目	范围
pH	7.99~8.40
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	2.9~4.9
浊度/NTU	2.23~13.6
温度/°C	2.0~6.0
碱度/(mg·L ⁻¹)	140~180
UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	0.089~0.106

1.3 分析项目及方法

浊度采用HACH 2100N型浊度仪测定;COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾滴定法测定;UV₂₅₄采用紫外-可见分光光度法测定;臭氧采用靛蓝二磺酸钠分光光度法测定;pH采用HACH SC200 pH计测定;铝离子采用铬天青S分光光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 常规工艺处理效果

为探寻常规工艺的最大处理能力,通过改变混凝剂投加量考察常规工艺对各指标的控制效果,结果见表2。经混凝-沉淀-过滤后浊度的去除率在90%以上。当PAC投加量(以Al₂O₃计)为17 mg/L时,浊度和COD_{Mn}的去除效果均达到最优,其中出水浊度降至0.30 NTU以下,COD_{Mn}降至1.5 mg/L以下。UV₂₅₄是衡量水中有机物指标的一项重要参数,在波长为254 nm处,水中的不饱和有机物如腐殖质、芳香族有机化合物等含苯环或共轭双键的物质具有强烈的紫外吸收作用^[10]。UV₂₅₄与水中的有机物、色度、消毒副产物前体物都有较好的相关性^[11],因此,对UV₂₅₄的去除效果可间接反映工艺对有机物、色度、消毒副产物前体物的控制能力。在17 mg/L的PAC投加量下,混凝-沉淀-过滤工艺对UV₂₅₄的去除率仅为22.22%,继续提高PAC投加量对UV₂₅₄的去除影响不大,滤后出水UV₂₅₄在0.075~0.095 cm⁻¹之间。

表2 不同PAC投加量下常规工艺的处理效果

Tab.2 Conventional process treatment effect under different PAC dosages

PAC投加量/(mg·L ⁻¹)	出水浊度/NTU	浊度去除率/%	出水COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} 去除率/%	出水UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	UV ₂₅₄ 去除率/%
11	0.328	90.01	1.56	44.28	0.095	10.37
17	0.212	93.89	1.41	55.93	0.075	22.22
22	0.320	90.58	1.54	46.89	0.078	21.33
28	0.309	91.17	1.61	48.06	0.080	19.80
34	0.256	92.68	1.43	53.11	0.076	21.46

滤后出水铝离子与PAC投加量成正比,PAC投加量为11、17、22、28、34 mg/L时,对应的滤后出水铝离子分别为0.019、0.025、0.043、0.059、0.066 mg/L,其中34 mg/L的PAC投加量下出水铝离子浓度约为17 mg/L投加量的3倍。综合考虑污染物控制效果和铝离子溶出浓度,确定常规工艺的PAC最佳投加量为17 mg/L。

2.2 预臭氧对常规工艺的强化效果

采用臭氧预氧化技术来强化常规工艺,PAC投加量采用17 mg/L,臭氧投加量分别为0.5、1.0、1.5、2.0 mg/L,反应时间为4 min,考察不同臭氧投加量下预臭氧-常规处理工艺对浊度、COD_{Mn}和UV₂₅₄的去除效果,结果见图2。

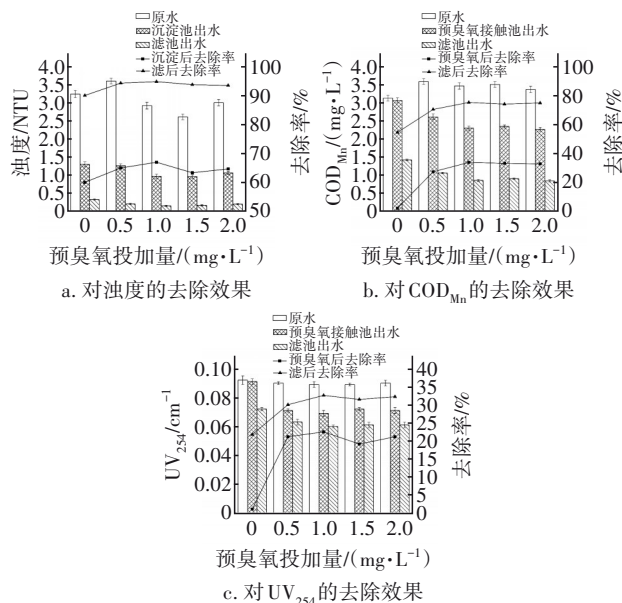


图2 不同预臭氧投加量下的工艺处理效果

Fig.2 Pollutants removal under different pre-ozonation dosages

由图2(a)可知,原水浊度在2.61~3.60 NTU波动,在预臭氧工艺中加入0.5~2.0 mg/L臭氧后,滤后水浊度降至0.20 NTU以下,其中,臭氧投加量为1.0 mg/L时浊度去除率最高,浊度可降至0.15 NTU。可见,与常规工艺相比,增加预臭氧工艺可以进一步降低滤后水浊度。但随着臭氧投加量增至2.0 mg/L,浊度去除率略有下降,这可能是因为臭氧可以氧化附着在颗粒上的有机物,改变团聚现象,破坏颗粒和胶体的稳定性,但较高剂量的臭氧会将一些较大颗粒分解成较小颗粒,从而不利于这些颗粒在混凝沉淀过程中被去除^[12]。

由图2(b)可知,增加预臭氧工艺可以明显提高对 COD_{Mn} 的控制效果,在预臭氧投加量仅为0.5 mg/L时, COD_{Mn} 去除率即达到70.62%,约为常规工艺的1.26倍。值得注意的是,在0.5 mg/L的臭氧投量下,预臭氧接触池出水 COD_{Mn} 较进水下降约30%,这可能与臭氧的氧化特性有关。氧化主要改变有机物的分子质量,而矿化效果并不显著。但臭氧对有机物的氧化具有选择性,会优先攻击含有不饱和官能团的有机物^[13],而这类有机物也正是高锰酸钾的优先攻击对象^[14]。石晶晶等^[15]的研究表明,当臭氧投加量为3 mg/L、臭氧接触时间为10 min时,预臭氧氧化单元的 COD_{Mn} 去除率为31%;王剑等^[16]的研究表明,预臭氧单元对 COD_{Mn} 有一定去除效果,当臭氧投加量为0.67 mg/L时,其对 COD_{Mn} 的去除率为10%。因此,经过臭氧预处理后,水中某些可以被高锰酸钾氧化的有机物可能被转化成难以被氧化的有机物,反映在指标上即为 COD_{Mn} 的下降。

随着臭氧投加量增加至1.0 mg/L, COD_{Mn} 去除率达到最高即75.48%,滤后出水 COD_{Mn} 降至0.85 mg/L。当臭氧投加量继续增加到2.0 mg/L时, COD_{Mn} 去除率趋于稳定。这可能是因为引滦原水中的有机物数量有限,随着臭氧投加量的增加,原水中反应活性比较高的有机物基本被氧化,臭氧投加量继续增加后氧化产生了部分小分子的有机物,而它们与臭氧的反应活性较低,难以进一步去除;另外,部分易絮凝的有机物通过氧化作用转变为难絮凝状态的小分子有机物,可能也会干扰混凝效果^[17]。

由图2(c)可知,原水 UV_{254} 变化范围为0.089~0.092 cm^{-1} ,当臭氧投加量从0 mg/L增加到1.0 mg/L时, UV_{254} 去除率与臭氧投加量呈正相关,且在预臭氧接触池中即可实现对 UV_{254} 的显著去除。当臭氧

投加量为1.0 mg/L时,滤池出水 UV_{254} 降至0.060 cm^{-1} ,去除率达到最高即32.58%。但是当臭氧投加量继续增加至2.0 mg/L时, UV_{254} 去除率变化较小,原因可能是水体中能被臭氧氧化改变其物化性质的颗粒物浓度是有限的,其数量变化不足以影响系统的整体去除效果^[17]。

综上所述,预臭氧氧化对常规工艺有显著强化效果,尤其是在臭氧投加量为1.0 mg/L时,工艺出水浊度可以降至0.15 NTU,与常规工艺出水相比进一步下降; COD_{Mn} 降至0.85 mg/L,去除率达到75.48%,约为常规工艺的1.35倍; UV_{254} 降低至0.060 cm^{-1} ,去除率为32.58%,约为常规工艺的1.47倍。

2.3 后臭氧对常规工艺的强化效果

采用后臭氧深度氧化技术来强化常规工艺,PAC投加量为17 mg/L,后臭氧投加量分别为0.5、1.0、1.5、2.0 mg/L,臭氧接触时间为10 min,考察了不同臭氧投加量下常规-后臭氧组合工艺对浊度、 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除效果,如图3所示。

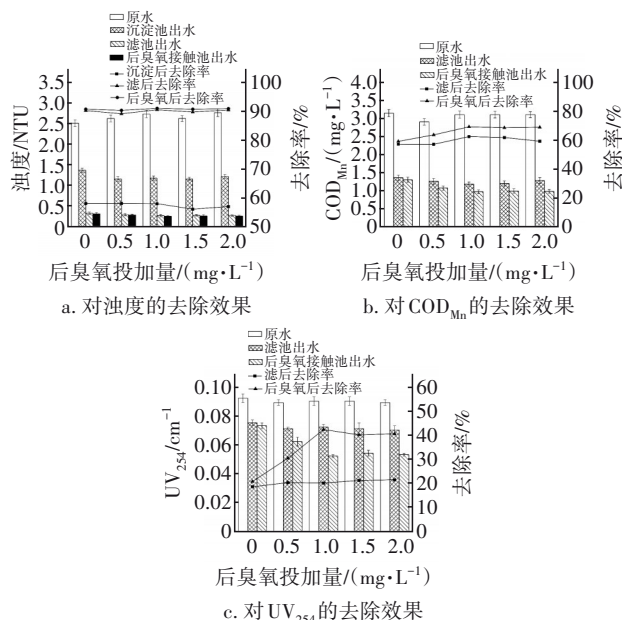


图3 不同后臭氧投加量下的工艺处理效果

Fig.3 Pollutants removal under different post-ozonation dosages

由图3(a)可知,不同后臭氧投加量下常规-后臭氧组合工艺出水浊度为0.26~0.28 NTU,与常规工艺出水浊度相比无明显下降。浊度的去除主要在沉淀池和V型滤池完成,后臭氧对浊度的去除贡献较小。

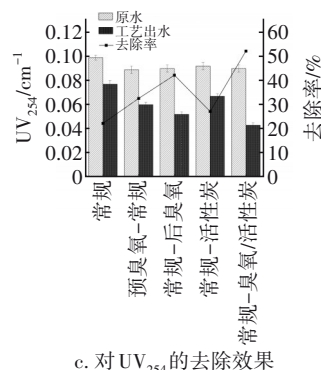
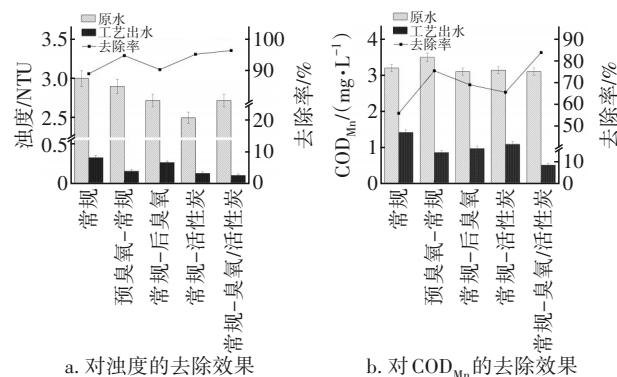
臭氧可去除部分在常规处理阶段无法去除的难降解有机物,因此增加后臭氧工艺后, COD_{Mn} 的去除效果有一定提升,如图3(b)所示。其中,当后臭氧投加量为 1.0 mg/L 时, COD_{Mn} 去除率达到最高即 69.03% ,出水 COD_{Mn} 可降至 1.0 mg/L 以下,继续增加臭氧投加量, COD_{Mn} 去除率则趋于稳定。值得注意的是,后臭氧工艺对 COD_{Mn} 的强化控制效果弱于预臭氧工艺,可能是因为原水中有有机物浓度有限而臭氧氧化具有选择性,预臭氧强化过程可面对水中所有臭氧化活性高的有机物,因而对 COD_{Mn} 的去除贡献较大;而当采用后臭氧时,常规工艺已去除约 55% 的 COD_{Mn} ,残留有机物中臭氧化活性高的有机物较少,因而对 COD_{Mn} 的去除贡献相对较小。

由图3(c)可知,相较于 COD_{Mn} ,后臭氧强化常规工艺对 UV_{254} 的去除更显著。尤其在臭氧投加量为 1.0 mg/L 时,后臭氧接触池出水 UV_{254} 可降至 0.052 cm^{-1} ,去除率约为常规工艺的 1.9 倍,约为预臭氧-常规工艺的 1.3 倍。常规工艺使得大部分有机物得以去除,此时加入臭氧,可更有针对性地氧化含苯环或共轭双键的不饱和类有机物,这可能是加入后臭氧工艺后 UV_{254} 去除效果提升更加明显的原因。

综上所述,后臭氧对常规工艺的强化作用主要表现为对有机物的去除。在后臭氧投加量为 1.0 mg/L 时效果最佳,工艺出水 COD_{Mn} 降至 0.96 mg/L , UV_{254} 更是降至 0.052 cm^{-1} ,较预臭氧-常规工艺对 UV_{254} 的控制能力更强,但后臭氧对浊度去除的提升效果不明显。

2.4 活性炭及臭氧/活性炭的强化效果

采用活性炭和臭氧/活性炭技术来强化常规工艺,考察对浊度、 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除效果,同时与常规工艺、预臭氧-常规工艺、常规-后臭氧工艺进行对比分析,结果见图4。



c. 对 UV_{254} 的去除效果

图4 不同强化工艺的处理效果

Fig.4 Effects of different enhanced treatment processes

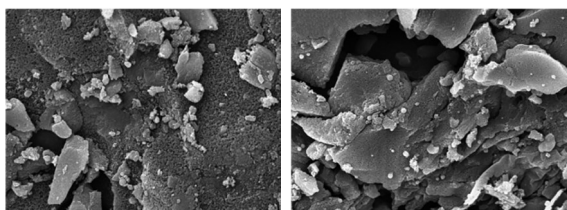
由图4(a)可知,预臭氧通过助凝作用,对浊度的控制效果较后臭氧明显,但浊度最低仅降至 0.15 NTU 。而活性炭滤池的加入可大幅改善浊度控制效果,单独活性炭强化处理后工艺出水浊度可低至 0.12 NTU ,臭氧/活性炭联合强化处理后浊度可降至 0.10 NTU 以下,这可能缘于炭滤池的二次过滤作用。

由图4(b)可知,对 COD_{Mn} 而言,当采用活性炭强化处理时,去除率的提升效果相比其他工艺最不显著,出水 COD_{Mn} 为 1.08 mg/L ,低于预臭氧和后臭氧的强化效果,后者可分别使出水 COD_{Mn} 降至 0.85 和 0.96 mg/L 。这可能与有机物的分子质量分布有关,滦河原水以大分子有机物为主,而活性炭对天然大分子有机物的吸附效果不佳,其主要去除对象是与活性炭微孔尺寸更接近的小分子有机物^[18]。但采用臭氧/活性炭强化处理时,出水 COD_{Mn} 可降至 0.5 mg/L 以下, COD_{Mn} 去除率达到 83.87% ,为各工艺最大值。臭氧/活性炭联用工艺的优势在于臭氧可将天然大分子有机物分解,转化为易被活性炭去除的小分子有机物^[19]。

活性炭对有机物的去除通常存在两种机制,炭吸附和炭表面微生物的降解。本研究中活性炭滤池的运行时间为 3 d ,且属于冬季低温运行状态,平均水温为 $2.0 \sim 6.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,因此推测主要作用机制为活性炭吸附,这可以从活性炭使用前后的电镜照片得到验证。如图5所示,使用 3 d 后的活性炭颗粒轮廓明显,表面未发现显著的微生物存在迹象。

由图4(c)可知,单独活性炭强化常规工艺对 UV_{254} 去除效果的提升不显著,出水 UV_{254} 为 0.067 cm^{-1} ,去除率约为常规工艺的 1.23 倍,而臭氧的强化作用可将 UV_{254} 控制在 $0.052 \sim 0.060 \text{ cm}^{-1}$ 。而将

臭氧与活性炭工艺结合使用,对 UV_{254} 的去除效果提升显著,出水 UV_{254} 为 0.043 cm^{-1} ,去除率约为常规工艺的2.35倍。臭氧氧化作用使不饱和双键断开、苯环开环,从而使芳香性有机物浓度降低,后续依靠活性炭对苯环类化合物和小分子物质的吸附作用,实现对 UV_{254} 的显著去除。



a. 活性炭使用前 b. 活性炭使用3 d后

图5 活性炭使用前后的扫描电镜照片

Fig.5 SEM photos of activated carbon before and after use

综上所述,可通过在常规工艺的基础上选择不同强化工艺以获得不同的污染物去除效果。其中,单一炭滤池可将 COD_{Mn} 由常规工艺的 1.41 mg/L 降至 1.08 mg/L ;增设预臭氧或后臭氧工艺后,能使其控制在 1.0 mg/L 以下,且预臭氧效果更优;若要控制在 0.5 mg/L 以下,建议增设臭氧/活性炭工艺。若要将出水 UV_{254} 控制为 $0.052\sim 0.060\text{ cm}^{-1}$,可选择预臭氧或后臭氧强化常规工艺,若要显著提升对 UV_{254} 的去除效果,需采用臭氧/活性炭工艺作为常规工艺的强化,出水 UV_{254} 可稳定控制在 0.050 cm^{-1} 以下。

3 结论

① 在 17 mg/L 的最佳PAC投加量下,常规工艺可将浊度、 COD_{Mn} 和 UV_{254} 分别控制在 0.30 NTU 、 1.5 mg/L 和 0.075 cm^{-1} 以下。

② 两种臭氧强化工艺的最佳臭氧投加量均为 1.0 mg/L 。其中,预臭氧可将浊度和 COD_{Mn} 强化去除至 0.15 NTU 和 0.85 mg/L ;后臭氧的优势则主要表现为对 UV_{254} 的去除,可降至 0.052 cm^{-1} ,但对浊度和 COD_{Mn} 的控制不如预臭氧作用显著。

③ 单独活性炭过滤对常规工艺的强化效果主要表现在对浊度的去除,出水浊度可降低至 0.12 NTU ;臭氧/活性炭联用工艺的强化效果最佳,浊度可降至 0.10 NTU 以下, COD_{Mn} 和 UV_{254} 可分别降至 0.50 mg/L 、 0.043 cm^{-1} 。

参考文献:

[1] 周广刚,姚德贵.天津市引滦引江水资源优化配置思

考[J].中国防汛抗旱,2019,29(12):58-60.

ZHOU Guanggang, YAO Degui. Thoughts on the optimal allocation of water resources in Tianjin [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(12): 58-60 (in Chinese).

[2] 刘婷婷.根据水质特征判断管网漏水的研究[J].供水技术,2022,16(2):34-35,39.

LIU Tingting. Study on judging the leakage of pipe network based on the characteristics of water quality [J]. Water Technology, 2022, 16(2): 34-35, 39 (in Chinese).

[3] 曲久辉.饮用水安全保障技术原理[M].北京:科学出版社,2007.

QU Jiuhui. Principles of Drinking Water Safety and Security Technology [M]. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese).

[4] GUNTEN U V. Ozonation of drinking water: part II. disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine [J]. Water Research, 2003, 37(7): 1469-1487.

[5] 王笑.某自来水厂臭氧预处理提质试验及改造设计与运行调试研究[D].长沙:湖南农业大学,2020.

WANG Xiao. Study on the Design and Operation Commissioning of a Waterworks in Changsha [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020 (in Chinese).

[6] 吴亚慧.花都水厂深度处理工艺研究[D].广州:华南理工大学,2020.

WU Yahui. Research on Advanced Treatment Technology of Huadu Water Plant [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020 (in Chinese).

[7] 张鹏程.预臭氧-常规处理-臭氧生物活性炭工艺对太湖原水的中试研究[D].兰州:兰州交通大学,2016.

ZHANG Pengcheng. Pilot Study on the Raw Water of Taihu Lake by Pre-ozonation-Conventional Treatment-Ozone Biological Activated Carbon Process [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016 (in Chinese).

[8] 吉志一.基于长江下游水源的臭氧生物活性炭深度处理工艺优化研究[D].南京:东南大学,2018.

JI Zhiyi. Optimization of Advanced Treatment Process of Ozone Biological Activated Carbon Based on Water Sources in the Lower Reaches of Yangtze River [D]. Nanjing: Southeast University, 2018 (in Chinese).

- [9] 左社强,唐志坚,张平. 臭氧-生物活性炭饮用水处理技术及其应用前景[J]. 能源工程, 2003(1): 33-36.
ZUO Sheqiang, TANG Zhijian, ZHANG Ping. Ozone-biology active carbon drinking water treatment technology and its application prospect [J]. Energy Engineering, 2003(1): 33-36 (in Chinese).
- [10] 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 Xiaona, HE Jiali, LIU Qinghua, *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).
- [11] 李璇,刘武平,吕锡武. 微污染水源饮用水处理工艺中试试验对比分析[J]. 净水技术, 2016, 35(3): 68-74.
LI Xuan, LIU Wuping, LÜ Xiwu. Experimental comparison and analysis of pilot scale test for drinking water treatment processes of micro-polluted raw water [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(3): 68-74 (in Chinese).
- [12] YAN M Q, WANG D S, SHI B Y, *et al.* Effect of pre-ozonation on optimized coagulation of a typical North-China source water [J]. Chemosphere, 2007, 69(11): 1695-1702.
- [13] 赵赫,张宏伟,王亮,等. 臭氧预氧化对混凝-超滤处理微污染水的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(2): 215-220.
ZHAO He, ZHANG Hongwei, WANG Liang, *et al.* Effect of pre-ozonation on the performance of coagulation-ultrafiltration combined process for micro-polluted water treatment [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(2): 215-220 (in Chinese).
- [14] SUN H W. Comparison on permanganate and ozone as pre-oxidation agents[J]. Advanced Materials Research, 2014, 955/959: 3408-3413.
- [15] 石晶晶,朱光灿,戴小冬,等. 预臭氧-BAC工艺处理微污染原水参数优化与有机物去除特性[J]. 净水技术, 2014, 33(5): 11-16.
SHI Jingjing, ZHU Guangcan, DAI Xiaodong, *et al.* Optimization of parameters and characteristics of organics removal with preozonation-BAC processes for micropolluted raw water [J]. Water Purification Technology, 2014, 33(5): 11-16 (in Chinese).
- [16] 王剑,张正德. 臭氧预氧化与常规工艺联用处理西沱备用水源水的试验[J]. 净水技术, 2016, 35(S2): 33-41.
WANG Jian, ZHANG Zhengde. Investigation of combined between pre-oxidation and conventional processes for treatment of spare source water [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(S2): 33-41 (in Chinese).
- [17] 张剑桥,马军,袁媛,等. 低温低浊有机微污染水源水臭氧预氧化的效能研究[J]. 给水排水, 2016, 42(5): 52-56.
ZHANG Jianqiao, MA Jun, YUAN Yuan, *et al.* Study on the efficiency of preozonation for the treatment of organic micropolluted water with low temperature and low turbidity [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(5): 52-56 (in Chinese).
- [18] 陈仲贇,苏宇亮,孙文俊,等. 珠江水源水厂臭氧-生物活性炭工艺对有机微污染物的去除效果[J]. 净水技术, 2021, 40(11): 49-55, 70.
CHEN Zhongyun, SU Yuliang, SUN Wenjun, *et al.* Effect of organic micro pollutants removal by ozone-biological activated carbon process in WTP of Pearl River raw water [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 49-55, 70 (in Chinese).
- [19] 孔令宇,张晓健,王占生. 臭氧-生物活性炭与单独活性炭工艺处理效果比较[J]. 中国给水排水, 2006, 22(11): 49-51.
KONG Lingyu, ZHANG Xiaojian, WANG Zhansheng. Comparison of performance between O₃-BAC and GAC processes [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(11): 49-51 (in Chinese).

作者简介:李旭枫(1998-),男,山西忻州人,硕士研究生,主要研究方向为饮用水水质保障技术。

E-mail:m13294634193@163.com

收稿日期:2022-07-15

修回日期:2022-08-29

(编辑:沈靖怡)