



水厂活性炭滤池换炭方式对生产运行的影响

吴瑾妤 石鲁娜 焦洁 胡侃

(无锡市水务集团有限公司, 无锡 214031)

摘要: W 市 Z、X、D 水厂的臭氧-生物活性炭滤池已运行超过 8 年, 面临大规模炭滤池换炭问题, 为探寻最佳换炭方式, 3 家水厂分别采用了活性炭滤料的全换和半换 2 种方式进行对比。主要研究相同水源条件下 2 种换炭方式对生产运行的影响。研究结果表明, 2 种换炭方式在并网运行 5 个月, 活性炭滤料表面生物量稳定, 均成功挂膜。相比于半换炭, 全换炭方式对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、 TOC 和消毒副产物等去除效果更佳, 并且可以深入检查配水系统等隐蔽工程。但是, 全换炭用炭量大, 需要全部更换承托层, 总体投入成本较大, 短期投资效益较低。因此, 选择全换炭还是半换炭方式, 各厂应结合自身实际情况确定。

关键词: 臭氧活性炭工艺; 活性炭更换; 生物挂膜; 水厂运营

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1002-8471(2021)04-0021-07

DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2021.04.004

引用本文: 吴瑾妤, 石鲁娜, 焦洁, 等. 水厂活性炭滤池换炭方式对生产运行的影响[J]. 给水排水, 2021, 47(4): 21-27. WU J Y, SHI L N, JIAO J, et al. Effect of carbon substitution ways on the performance of activated carbon filter in water treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(4): 21-27.

Effect of carbon substitution ways on the performance of activated carbon filter in water treatment plant

WU Jinyu, SHI Luna, JIAO Jie, HU Kan

(Wuxi Water Group Co., Wuxi 214031, China)

Abstract: With considering ozone-biological activated carbon filters of Z, X, D water treatment plants in W city have been in regular operation since April, 2011, they need to be updated to keep the function. For this purpose, Z, X, D water treatment plants have proposed two updated versions for pre-tests. This paper aims to do impact analysis of two updated versions on the operation of water treatment plants under different water conditions. Experiment results indicate that the plan of replacing all carbon performs better than the plan of updating half carbon in terms of removing COD_{Mn} , UV_{254} , TOC and THMs. The updated ozone-biological activated carbon filters are operating stably, and are filmed as expected after 5 months operation for both updating schemes. In addition, the concealed work, take the water distribution systems as an example, can be checked during the period of replacing all carbon. However, the high cost of this plan may result in low investment returns. Therefore, it is complex to choose the update plan and it really depends on the project context.

Keywords: Biological activated carbon filter; Carbon substitution; Biofilm; Operation of water plant



1 项目背景

W 市水司拥有以长江为水源的 C 水厂,以太湖为水源的 N 水厂、Z 水厂、X 水厂、D 水厂,现日供水能力为 245 万 m³/d(含 50 万 m³/d 备用水量)。太湖水源水厂臭氧-生物活性炭工艺均于 2011 年 4 月投产使用,臭氧-生物活性炭滤池(下称炭滤池)采用翻板滤池、下向流且滤池设计参数相似。

综合目前行业内通用活性炭的失效判别标准评价 Z 水厂(设计产水量 60 万 m³/d,日常供水负荷为 46%)、X 水厂(设计产水量 25 万 m³/d,日常供水负荷为 71%)和 D 水厂(设计产水量 60 万 m³/d,日常供水负荷为 64%)炭滤池状态^[1-2]:3 个水厂炭滤池经过长期运行,已形成了较为成熟的生物膜,碘吸附值、亚甲基蓝吸附值衰减明显(分别降至 200 g/g 与 60 g/g 以内),远低于《江苏省城镇供水厂臭氧-生物活性炭工艺运行管理指南》的标准;滤池出水虽符合国家标准,但对有机物的去除效果已接近《江苏省城镇供水厂生物活性炭失效判别和更换导则》的限值,炭滤池的处理能力和抗冲击能力逐渐衰退^[3]。而水厂生物活性炭工艺应在保证水质达标的基础上,预留一定应对水源水质突发污染和抗水量突变冲击的能力。先选取具有代表性、水质处理效果较弱、活性炭本身的理化指标较低以及炭层损失较大的 10 个炭滤池进行首批换炭工程,并对首批换炭工程实施效果进行深入研究,指导开展后续大规模换炭工作。

2 实施方法

2.1 换炭

(1)前期准备工作。换炭前期准备主要包括:换炭炭池的确定、活性炭和砂滤料招标、购买相关配件耗材、编制施工方案等。Z 水厂、X 水厂、D 水厂均设置全换炭炭池(100%比例更换新炭)、半换炭炭池(50%比例更换新炭)和对比炭池(未更换活性炭的旧炭池)进行对比研究。新换炭种采用压块破碎炭。

(2)换炭施工。施工过程主要包括取炭、清池检查、装填砂炭以及调试运行,炭滤池滤料更换过程见图 1,3 个水厂换炭施工共 61 天。

(3)换炭后运行效果评价。换炭运行后关注运行参数、有机物等指标去除情况、活性炭理化指标及水质指标等变化,分析评价换炭后运行效果。

2.2 原水水质

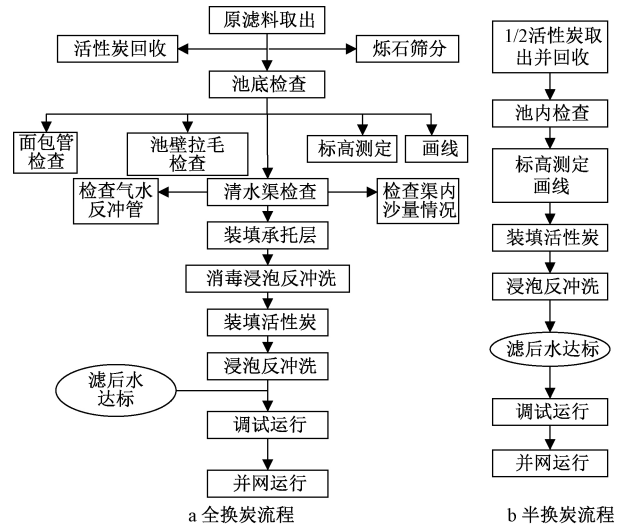


图 1 炭滤池滤料更换流程

Fig.1 The material update process of activated carbon filters

Z 水厂、X 水厂、D 水厂均以太湖为水源,其中 Z 水厂、X 水厂原水取自同一取水口,取水口均位于太湖贡湖沙渚水源地;D 水厂取水口位于太湖贡湖东水源地。原水水质情况见表 1。

表 1 原水水质

Tab.1 The description of raw water

指标	Z 水厂、X 水厂			D 水厂		
	平均	最高	最低	平均	最高	最低
浊度/NTU	56	286	8	35	299	10
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	4.78	5.88	3.25	3.46	6.17	1.87
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.10	2.55	0.07	0.12	0.62	0.04
pH	8.0	9.8	5.9	8.0	8.9	7.4
藻类/(万个·L ⁻¹)	1582	6000	800	1667	9900	110
TOC/(mg·L ⁻¹)	3.73	5.54	2.30	3.65	5.46	2.46
亚硝酸盐氮/(mgN·L ⁻¹)	0.013	0.094	0.003	0.017	0.102	0.002
氯化物/(mgCl·L ⁻¹)	47	62	30	38	53	25

2.3 检测指标及方法

常规水质指标 COD_{Mn}、氨氮、TOC、亚硝酸盐氮、三卤甲烷均根据《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006)相关规定进行检测。活性炭物理指标碘吸附值、亚甲基蓝吸附值根据《煤质颗粒活性炭试验方法》(GB/T 7702)测定。活性炭上生物量采用脂磷法测定。UV₂₅₄ 采用紫外分光光度计法测定。

3 结果与讨论

3.1 换炭后有机物指标变化

3.1.1 换炭后炭滤池进出水 COD_{Mn} 和 UV₂₅₄ 变化



规律

炭滤池去除效果受活性炭使用年限和水质的影响,特别是 2 种作用的污染物去除有效性也会有所不同。图 2~图 4 对比了全换和半换炭方式下的 Z 水厂、D 水厂炭滤池对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除情况。无论是全换炭还是半换炭,炭滤池在投运初期对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除效果最好(Z 水厂全换炭池对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 月均去除率于投运首月达最高,分别为 60%和 47%),之后随着运行时间推移,去除效果均有所下降并逐步趋于稳定。换炭后运行初期,全换炭池对有机物的去除主要依靠物理吸附,半换炭池则通过物理吸附和生物降解共同作用去除有机物,对比炭池(即未更换活性炭的炭滤池,已运行 9 年)因活性炭使用年限较长,主要依靠生物降解作用去除水中有机物。随着运行时间增加,全换炭滤池的生物降解能力逐渐增强,物理吸附能力逐渐减弱,两项功能趋向相对平衡;由于换炭量减半,半换炭滤池更容易也更快实现两项功能相对平衡。

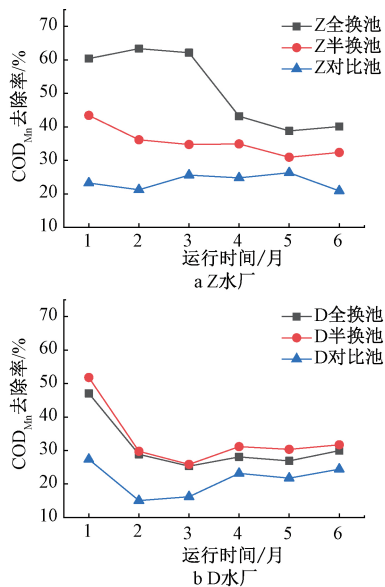


图 2 全换炭和半换炭方式下炭滤池对 COD_{Mn} 去除效率

Fig.2 COD_{Mn} removal ratios of the two updating schemes

具体而言,对比两种换炭方式:Z 水厂、X 水厂炭滤池全换炭方式对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 去除效果始终优于半换炭方式;运行半年后,两厂全换炭池对 COD_{Mn} 去除率基本稳定在 40%左右,半换炭池稳定在 30%左右;对于 UV_{254} 的去除率,Z 水厂全换炭、Z 水厂半换炭、X 水厂全换炭、X 水厂半换炭分别为

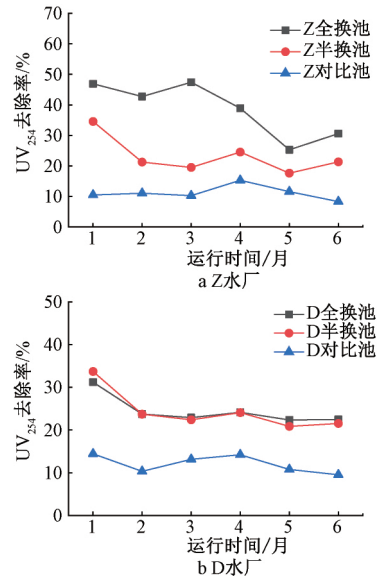


图 3 全换炭和半换炭方式下炭滤池对 UV_{254} 去除效率

Fig.3 UV_{254} removal ratios of the two updating schemes

30%、21%、20%、15%。D 水厂炭滤池全换炭与半换炭差异较小,运行半年后对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 去除率分别稳定在 30%和 22%左右(见图 2 和图 3)。产生这种差异的原因主要是 Z 水厂、X 水厂和 D 水厂的源水水质、供水负荷及工艺参数不同。但对于单厂而言,换炭后的 COD_{Mn} 和 UV_{254} 去除效果均优于对比炭池。

3.1.2 换炭后炭滤池进出水 TOC 变化

图 4 对比了全换炭和半换炭方式下炭滤池对 TOC 的去除情况。对比炭池因运行年限较长,对 TOC 的去除效果相对偏低;对比期内 Z 水厂、X 水厂、D 水厂对比炭池对 TOC 去除率均值分别为 20%、13%和 25%。Z 水厂、X 水厂全换炭方式对 TOC 去除率明显高于其半换炭方式,运行半年期间 TOC 去除率均值,Z 水厂全换炭、Z 水厂半换炭、X 水厂全换炭、X 水厂半换炭分别为 48%、27%、33%、21%。D 水厂全换炭池与半换炭池对 TOC 去除效果相近,运行半年 TOC 去除率均值均在 38%左右。

综上,基于 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、TOC 等有机物的去除情况分析,Z 水厂、X 水厂全换炭方式优于半换炭,D 水厂全换炭与半换炭方式差异不大。深入分析发现,供水负荷和滤池结构设计是导致 Z 水厂、X 水厂与 D 水厂在两种换炭方式中有机物去除结果

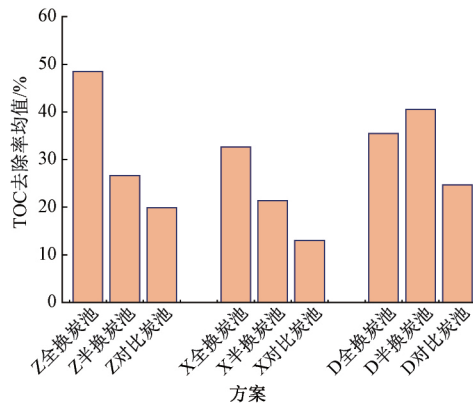


图 4 换炭运行半年炭滤池对 TOC 去除率

Fig.4 TOC removal ratios of the ozone-activated carbon filter during half a year of operation

存在差异的主要原因。受进水渠配水不均影响,而且 D 水厂全换炭池液位、清水阀开度、水头损失等均高于其半换炭池,全换炭池负荷偏高,停留时间缩短,难以充分发挥新炭对有机物吸附去除效果。而且 D 水厂半换炭池能够保留原炭池的部分生物活性,可以通过生物降解去除有机物,在一定程度上提升了半换炭池的有机物去除表现。

3.2 换炭后炭滤池进出水消毒副产物变化

预处理和臭氧—生物活性炭深度处理工艺可以有效提高对三卤甲烷生成势的控制效果^[4]。图 5 对比了全换炭和半换炭方式下,炭滤池出水的三卤甲烷检出情况。对比炭池因活性炭使用年限较长,对于三卤甲烷去除作用不明显,换炭能大幅提高对三卤甲烷的去除效果。3 个水厂炭滤池对三卤甲烷去除规律相似:全换炭方式>半换炭方式>对比炭池(未换炭)。与陶辉等^[5-6]研究结论相似,全旧炭对消毒副产物前体物去除效果较弱,随着新炭填充比例的增加,对消毒副产物前体物的去除率逐渐升高。

对比三个厂全换炭池出水三卤甲烷变化趋势,换炭投运后第 1—3 月,D 水厂、Z 水厂出水三卤甲烷基本无检出,X 水厂检出在 0.1 mg/L 以下;换炭投运后第 4—6 月 Z 水厂三卤甲烷检出在 0.1 mg/L 以下,X 水厂在 0.2 mg/L 以下,D 水厂平均在 0.3 mg/L;3 个厂炭池出水三卤甲烷检出情况总体有所上升,一方面与活性炭吸附能力稍有下降有关;另一方面与后期步入夏季太湖原水水质变差(藻类、COD_{Mn} 等指标上升),而且水厂加氯量有所上升相

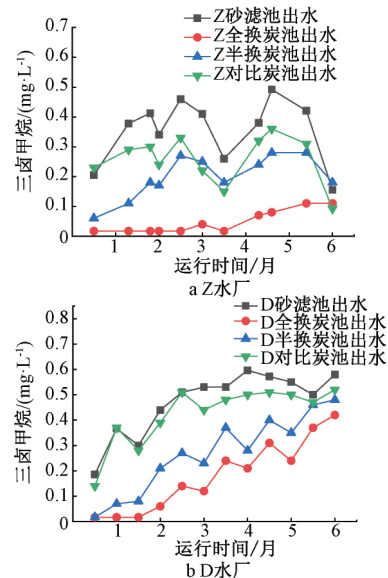


图 5 全换炭和半换炭方式下炭滤池三卤甲烷检出情况

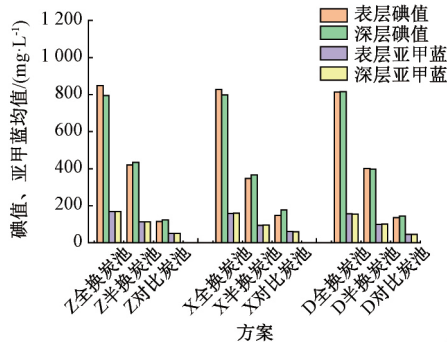
Fig.5 THMs concentration of the two updating schemes

关。与已有研究一致^[7],随着加氯量的增加,三卤甲烷生成量呈上升趋势。后续可以通过去除消毒副产物前体物和改进加氯方式,进一步控制消毒副产物的产生。

3.3 碘吸附值和亚甲蓝吸附值指标变化趋势

图 6 对比了全换炭和半换炭方式下,炭滤池活性炭碘值和亚甲蓝值的变化情况。3 个厂原炭池使用炭种虽有所不同,但各厂半换炭池在不同采样深度收集的碘值和亚甲蓝值未出现明显差异,说明新投加炭与原有炭总体混合均匀。随着运行时间增长,碘值、亚甲蓝值总体呈下降趋势,其中碘值降幅更明显。运行半年后,3 个厂全换炭池、半换炭池、对比炭池碘值分别在 800 mg/g、400 mg/g 和 140 mg/g,对应亚甲蓝值分别在 160 mg/g、100 mg/g 和 50 mg/g;3 个厂全换炭池碘值、亚甲蓝值半年衰减率均值分别为 23% 和 17%,进一步佐证了已有换炭研究关于压块炭炭滤池运行半年碘值也有明显衰减的结论^[5]。

各厂对比炭池经过 9 年的运行,目前活性炭碘值在 110~180 mg/g,亚甲蓝值在 45~60 mg/g,衰减幅度分别达到 85% 和 72%。前期研究发现^[3],Z 水厂、X 水厂、D 水厂炭滤池在 2011—2018 年运行期间,碘值变化规律相似,第一年运行衰减较高,特别是运行后的半年内衰减明显,之后每年衰减率相



注:表层指炭层自上而下 10 cm 处取样,深层指炭层自上而下 150 cm 取样,新炭未投运前碘值和亚甲蓝值平均在 1 050 mg/g 和 190 mg/g。

图 6 运行半年后炭滤池表层、深层活性炭碘值、亚甲蓝值情况

Fig.6 Iodine value and methylene blue value on the surface and deep layer of activated carbons after half a year operation

对稳定。

3.4 换炭后炭滤池生物挂膜

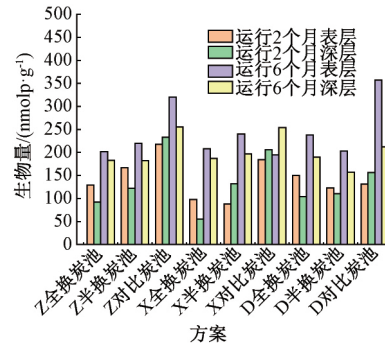
3.4.1 炭滤池活性炭生物量变化

换炭运行以来炭滤池的活性炭生物量变化情况如图 7 所示。全换、半换炭池表层生物量总体高于深层生物量。运行初期恰逢冬季,水温偏低,全换、半换炭滤池生物量增长较缓慢,之后水温逐渐升高,生物量增长明显加快,运行 5 个月时,生物量基本稳定,各厂炭滤池成功挂膜,与 2011 年炭滤池投运生物挂膜时间基本一致。换炭运行半年后,3 个厂活性炭生物量生长情况各有不同,D 水厂全换炭池活性炭生物量高于半换炭池,Z 水厂、X 水厂全换与半换炭池活性炭生物量数量相近;但对比炭池的生物量明显高于全换、半换炭池,进一步说明,当炭滤池运行年限较长,活性炭理化指标衰退后,炭滤池主要依赖生物降解作用去除有机物^[8]。

碳和营养素的获取水平,以及滤池的运行条件(如预臭氧化、温度、反冲洗、过滤特性和接触时间等)都会对滤池中微生物生物量及群落结构产生影响^[9-12]。本文研究进一步补充说明,生物活性炭滤池吸附降解性能不仅与生物量集中相关,还与炭滤池生物群落的组成结构相关。优化生物活性炭滤池微生物群落结构和提高微生物代谢能力,可以有效提高炭滤池对有机物的处理能力。

3.4.2 换炭后炭滤池亚硝氮变化规律

图 8 跟踪对比了换炭运行后炭滤池出水的亚硝



注:表层指炭层自上而下 10 cm 处取样,深层指炭层自上而下 150 cm 取样。

图 7 换炭运行半年表层和深层炭层生物量情况

Fig.7 Comparison of biomass on the surface and deep layer of activated carbons during half a year of operation

氮变化情况,对比期间 3 个厂炭滤池进水亚硝氮指标均小于 0.001 mg/L。换炭后运行初期 3 个厂各炭滤池出水的亚硝氮指标基本都小于 0.001 mg/L,运行 4—5 个月,3 个厂全换炭池出水的亚硝氮浓度升高,出现亚硝氮的累积现象。

全换炭池运行一段时间后活性炭表面出现微生物并且数量逐渐增长,好氧微生物类群(异养菌与自养硝化菌)相互竞争^[13],导致滤床在一定深度内溶解氧被消耗,滤床被自然分成好氧区与缺氧区,在好氧区发生硝化反应和有机物的降解反应,在缺氧区则会出现反硝化细菌并发生反硝化反应^[14]。亚硝化菌比硝化菌对氧气的耐受度要强,在氧气不太充足的条件下,亚硝化作用仍然在进行而硝化作用受到限制,会出现亚硝酸盐累积;反硝化反应中,亚硝酸盐的还原酶比硝酸盐的还原酶容易受到外界环境如碳源等的影响,当碳源不足时反硝化反应不彻底,亚硝酸盐不能还原为氮气,也会出现亚硝酸盐累积。综上,炭滤池出水亚硝酸盐累积结束后,可认为微生物数量相对稳定,挂膜基本完成。赵胜楠等^[15]在反硝化生物滤池的挂膜实验研究中也观察到类似的亚硝酸盐累积现象。

3.5 换炭后炭滤池的氨氮处理效果

换炭运行半年后,受水源水质波动影响,2020 年 6 月 9 日至 10 日,N 水厂源水氨氮突升,Z 水厂、X 水厂进厂原水氨氮同步升高,最高达 1.28 mg/L (N 水厂预处理出厂水为 Z 水厂、X 水厂进厂原水,因输水管道长度差异,Z 水厂、X 水厂进厂原水稍有

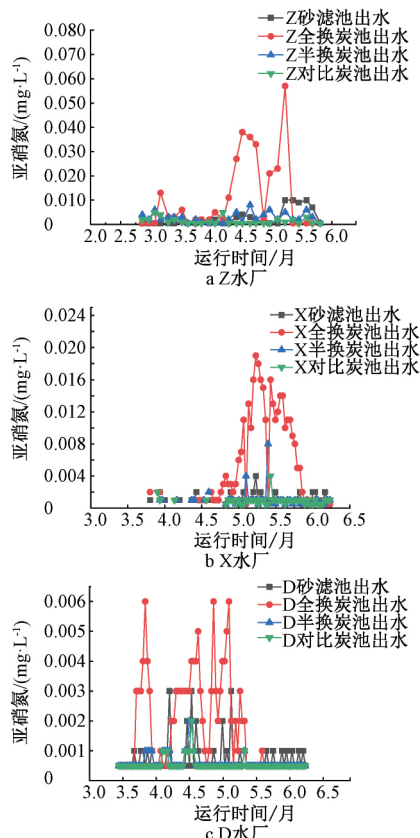


图 8 炭滤池出水亚硝酸盐含量

Fig.8 Nitrite nitrogen concentration in effluent water of the ozone-activated carbon filter after carbon updated

不同)。表 2 列出了全换炭和半换炭方式下的各工艺段出水的氨氮情况。原水氨氮升高期间,Z 水厂、X 水厂半换炭池与对比炭池对氨氮去除效果较好,炭滤池出水氨氮均 < 0.02 mg/L,而全换炭池对氨氮去除效果相对较差,Z 水厂、X 水厂炭滤池出水氨氮分别为 0.07 mg/L 和 0.2 mg/L。

表 2 全换炭和半换炭方式下的各工艺段出水氨氮

Tab.2 Ammonia nitrogen concentration in effluent water of each processes of the two updating schemes (mg/L)

水厂	原水	沉淀池出水	砂滤池出水	臭氧出水	全换炭池出水	半换炭池出水	未换炭池出水	出厂水
Z 水厂	1.1	0.66	0.64	0.59	0.07	< 0.02	< 0.02	< 0.02
X 水厂	1.28	0.74	0.41	0.44	0.2	< 0.02	< 0.02	< 0.02

臭氧-生物活性炭工艺主要通过生物降解作用去除水中氨氮。半换炭池因保留有原炭池培养成熟的生物菌群,易于微生物菌落的生长繁殖,当原水氨氮突然升高,菌落中所含的亚硝化菌、硝化菌及反硝化菌通过协同作用可有效去除水中氨氮。但全换炭

池换炭后需重新培养微生物菌群,由于之前进水水质较好(氨氮水平偏低等),硝化菌及反硝化菌生长繁殖缓慢,在进水氨氮浓度突然升高时,表现出氨氮去除能力不足。综上,相比于全换炭池重新培养生物菌群,半换炭池因保留有原炭池中丰富成熟的生物菌群,可缩短其菌群驯化培养时间,短期内生物活性更强,对于原水水质变化适应性更强。

4 换炭建议

基于 Z 水厂、X 水厂、D 水厂的换炭运行情况对比分析可以发现,臭氧-活性炭滤池全换炭方式的总体效果优于半换炭方式。对比已有类似水厂更换活性炭的案例^[5-6,16-17];随着换炭比例的升高,水质处理效果逐渐升高,但也存在全换炭方式与一定比例换炭方式水质处理效果相近的情况。综合来看,基于活性炭的性能和水质处理等方面考虑,全换炭方式表现优于半换炭方式,而且便于全面检查池底配水系统等隐蔽工程;但基于换炭的经济成本及旧炭利用多方因素考量,半换炭方式的经济性更高,而且生物挂膜速度更快,但存在难以检查池底、难以检验新炭质量的弊端。在同等资金投入的情况下,对于整个炭滤池系统而言,半换炭方式可以更新更多表层理化性能较差的旧炭,投资效益更大。因此,半换炭和全换炭方式各有优劣,水厂应结合实际情况予以确定。

5 结论与建议

(1) 相比于半换炭方式,全换炭方式的综合水质处理效果更佳。对于 COD_{Mn}、UV₂₅₄、TOC 等有机物的去除,Z 水厂、X 水厂全换炭方式优于半换炭;D 水厂由于其特殊性,全换炭与半换炭效果差异不大。对于消毒副产物三卤甲烷的去除,3 个水厂全换炭方式明显优于半换炭。换炭运行半年后,炭滤池对 COD_{Mn} 去除,Z 水厂、X 水厂全换炭池基本在 38%,半换炭池在 30%;D 水厂全换、半换炭池均在 30% 左右。

(2) 换炭后运行半年时间内,活性炭碘值、亚甲蓝值指标呈下降趋势,碘值降幅更明显。运行半年后,全换炭池碘值、亚甲蓝分别降至 800 mg/g 和 160 mg/g,半换炭池碘值、亚甲蓝分别降至 400 mg/g 和 100 mg/g。

(3) 换炭运行 5 个月后,炭滤池活性炭生物量基



本稳定,炭滤池成功挂膜,有效帮助炭滤池充分发挥其生物降解作用。

(4)当原水氨氮突然升高,Z 水厂、X 水厂半换炭池、对比炭池氨氮去除效果优于全换炭池。不同于全换炭池需要重新培养生物菌群,半换炭池因留有原炭池中丰富成熟的生物菌群,短期内生物活性更强,对于原水水质变化适应性更强。

综上,从活性炭的性能和水质处理等方面考虑,全换炭方式优于半换炭方式,同时,全换炭方式可以全面检查池底配水系统等隐蔽工程。但全换炭所需资金投入较大,短时间内半换炭方式的经济性更好,生物挂膜速度更快。两种换炭方式的长期运行情况如何,还有待进一步观察。因此,半换炭或者部分换炭和全换炭方式各有优劣,各水厂在臭氧-活性炭滤池换炭决策时应结合实际情况予以确定。

参考文献

- [1] 黄汗青,吴婉华,吴声达,等. 水厂生物活性活性炭滤池炭滤料长期运行的性能变化及更换周期探讨 [J]. 给水排水, 2018, 44(5): 39-41.
- [2] 刘成,杨瑾涛,李聪聪,等. 生物活性炭在应用过程中的变化规律及其失效判定探讨 [J]. 给水排水, 2019, 45(2): 9-16.
- [3] 胡淑圆,石鲁娜,管跃武,等. 水厂活性炭滤池长期运行的跟踪分析 [J]. 给水排水, 2019, 45(11): 13-17.
- [4] 毛玉琴,应海儿,杨宏伟. 不同净水工艺对含溴水体消毒副产物生成势的影响 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(5): 1-6.
- [5] 陶辉,韩锦辉,徐春蕾. 给水厂生物活性炭更换方式评价 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 121-126.
- [6] 李海泉,安娜,张金松. 生物活性炭滤池换炭方式与效能评价 [J]. 广东化工, 2014, 41(7): 41-43+33.
- [7] 何嘉莉,张晓娜,陈丽珠,等. 生物活性炭与臭氧/活性炭工艺控制 DBPs 前体物比较 [J]. 中国给水排水, 2016, 32(09): 50-52,57.
- [8] PIAI L, BLOKLAND M, VAN DER WAL A, et al. Biodegradation and adsorption of micropollutants by biological activated carbon from a drinking water production plant [J]. Journal of hazardous materials. 2020, 7: 122028.
- [9] NEMANI V A, MCKIE M J, TAYLOR-E, et al. Impact of bio-filter operation on microbial community structure and performance [J]. Journal of water process engineering, 2018, 24: 35-41.
- [10] ZHANG S Y, COURTOIS S, GITUNGO S, et al. Microbial community analysis in biologically active filters exhibiting efficient removal of emerging contaminants and impact of operational conditions [J]. Science of the total environment, 2018, 640-641, 1455-1464.
- [11] OH S, HAMMES F, LIU W T. Metagenomic characterization of biofilter microbial communities in a full-scale drinking water treatment plant [J]. Water research, 2018, 128: 278-285.
- [12] LU Z D, SUN W J, LI C, et al. Effect of granular activated carbon pore-size distribution on biological [J]. Water research, 2020, 177: 115768.
- [13] 胡万超,赵琛,王巧娟,等. 饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 [J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3604-3611.
- [14] 江肖良,李孟,张少辉,等. 4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 [J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5503-5513.
- [15] 赵胜楠,高会杰. 反硝化生物滤池的挂膜实验研究 [J]. 现代化工, 2016, 36(2): 145-147.
- [16] 代荣. O₃-BAC 处理水质及活性炭寿命跟踪研究 [J]. 给水排水, 2011, 47(12): 16-20.
- [17] 滕颖. 采用不同换炭方式后水厂活性炭滤池的运行性能 [J]. 净水技术, 2020, 39(S1): 74-78.



通信作者:吴瑾妤,女,1988 年出生,江西上饶人,硕士,工程师。主要研究方向为给水处理工艺、运行管理。

E-mail:Jinyu880110@163.com

收稿日期:2020-10-14