

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.09.007

不同流向活性炭滤池在实际生产运行中的对比分析

康 雅, 高红涛, 沈 磊, 许登阁, 王 琰, 巫京京
(郑州楷润市政工程设计有限公司, 河南 郑州 450007)

摘 要: B水厂和S水厂是郑州市首次采用臭氧/生物活性炭工艺的水厂,2013年对老厂进行升级改造,在原有常规处理工艺的基础上增加了深度处理工艺,分别采用下向流和上向流活性炭滤池。为比较二者对北方水体的适应性,对两水厂活性炭滤池的运行状况开展了长期运行监测。结果显示:运行7年后两水厂相比,下向流水厂活性炭的吸附性能指标衰减更严重,强度和粒径则无明显差异;出水水质在稳定运行后无明显差异,两种炭滤池对 COD_{Mn} 的去除效果相当;生物膜方面,下向流滤池挂膜较为迅速,但由于位于工艺段末端,存在生物泄漏风险;运行管理方面,由于上向流滤池无需定时强制反冲洗,更为节能。综合判断,针对原水水质稳定优良的地区,上向流活性炭滤池表现更优。

关键词: 生物活性炭滤池; 下向流; 上向流; 净水效果; 深度处理

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)09-0045-05

Comparison of Activated Carbon Filter with Different Flow Directions in Actual Operation

KANG Ya, GAO Hong-tao, SHEN Lei, XU Deng-ge, WANG Yan, WU Jing-jing
(Zhengzhou Kairun Municipal Engineering Design Co. Ltd., Zhengzhou 450007, China)

Abstract: B waterworks and S waterworks are the first waterworks to adopt ozone/biological activated carbon process in Zhengzhou City. In 2013, the original conventional treatment processes were upgraded by adding advanced treatment processes of downflow and upflow activated carbon filters, respectively. The long-term operation and monitoring of the activated carbon filters in the two waterworks were carried out to compare their adaptability to water bodies in northern China. After 7 years of operation, the adsorption index of the downflow activated carbon filter deteriorated more seriously, and there was no significant difference in strength and particle size of the activated carbon. The effluent quality was similar after stable operation, and the two activated carbon filters had similar removal efficiencies of COD_{Mn} . In terms of biofilm, the attached growth of biofilm was faster in the downflow filter. However, there was a risk of biological leakage as it was located at the end of the process. In terms of management, the upflow filter needed no regular forced backwashing, indicating that it was more energy-saving. Therefore, the upflow activated carbon filter showed a better performance in areas with stable raw water quality.

Key words: biological activated carbon filter; downflow; upflow; purification performance; advanced treatment

臭氧/生物活性炭是集臭氧氧化、活性炭吸附、生物处理于一体的给水处理技术。水中的有机物及

其他还原性物质经臭氧氧化后分解,提高了水中有机物的可生化性和可吸附性;同时经臭氧氧化后的活性炭进水含有较高浓度的溶解氧,可以为活性炭滤池中好氧微生物提供较好的生长环境,通过活性炭表面细菌的生物活性降解水中杂质、净化原水,在一定程度上使活性炭再生,延长活性炭的使用寿命和再生周期。

生物活性炭滤池分为下向流和上向流两种模式。下向流模式与砂滤池过滤方式相同,由上部进水,经过活性炭层、砂滤层和支撑层后自底部出水,单格吸附池出水经翻水堰后汇总至出水总渠;上向流模式则由吸附池底部进水,原水向上流穿越支撑层和活性炭层,经过处理的水经活性炭层上部收集系统后汇集至出水总渠^[1]。郑州市B水厂和S水厂分别采用下向流和上向流活性炭滤池工艺,截至目前,两水厂运行均已超过7年,炭滤池运行以及活性炭挂膜情况均已稳定。笔者从炭滤池出水水质指标、活性炭物理性能指标以及炭表面生物种类数量等方面进行综合比较,旨在考察两种炭滤池对北方水体的适应性。

1 工艺流程

郑州市B水厂和S水厂的工艺流程见图1。

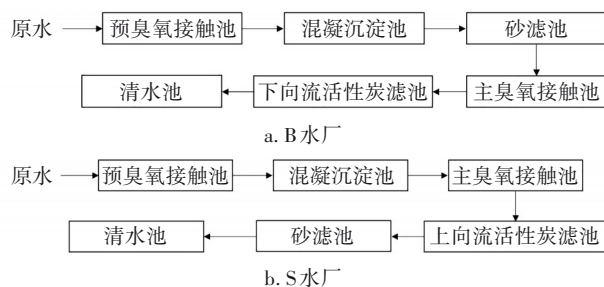


图1 两水厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of the two waterworks

B水厂的下向流活性炭滤池设置于砂滤池之后,在水厂的深度处理改造项目中,属于常规处理构筑物不动、后续增加深度处理单元的情况。作为净水厂的最后一道处理工序,为防止生物泄漏,活性炭滤料底部增设了石英砂滤层,其厚度为0.6 m。S水厂的上向流活性炭滤池设置在砂滤池之前,只吸附,不除浊度,其脱落的生物膜由后续砂滤池进行截留。上向流活性炭滤池能较好地解决炭滤池生物量非常大、存在严重生物泄漏风险的问题,在改造工程中,适用于滤池前构筑物均能进行改造的

情况。

2 结果与讨论

2.1 炭滤池出水指标比较

选取 COD_{Mn} 、氨氮和浊度3个指标,对两水厂进水和出水水质以及炭滤池对污染物的平均去除率进行跟踪分析。两水厂对 COD_{Mn} 的去除情况见图2。可知,两水厂的进水水质比较稳定,2015年以前进水为黄河水^[2], COD_{Mn} 平均值为2.57 mg/L,出厂水 COD_{Mn} 平均值为1.39 mg/L;2015年以后两水厂原水切换为南水北调水,进水 COD_{Mn} 有所降低,平均值维持在2.23 mg/L左右,出厂水 COD_{Mn} 平均值为1.29 mg/L。生物活性炭对 COD_{Mn} 的去除大致可以分为两个阶段:第一阶段为活性炭使用初期(前3个月),依靠活性炭的吸附作用而对 COD_{Mn} 有较好的去除效果,此阶段生物降解的贡献相对较小,去除率一般可稳定在30%以上;第二阶段为活性炭上附着生物膜成熟后直至使用寿命结束,此阶段活性炭吸附与生物降解共同实现对 COD_{Mn} 的去除,去除率范围为15%~25%。两个水厂对 COD_{Mn} 的去除率差别不大。由于B水厂下向流炭滤池的进水流向使得活性炭持续堆积、炭粒表面生物膜迅速成长和衰退等原因,运行前4年其对 COD_{Mn} 的去除率呈较大幅度的下降趋势,之后又开始上升。相对而言,S水厂对 COD_{Mn} 的去除率变化更为平稳,主要是因为上向流炭滤池持续稳定的水流冲击,使得炭表面的生物膜生长增殖以及脱落的速度较下向流缓慢,呈现出平稳更新换代的态势。

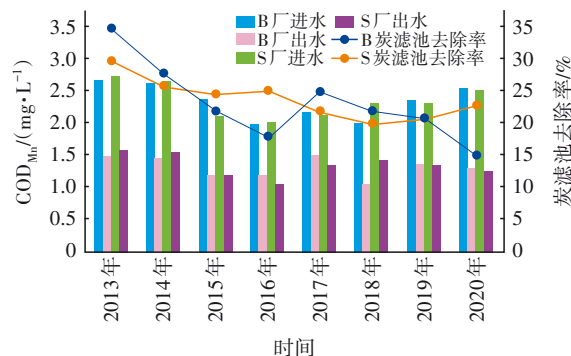


图2 COD_{Mn} 去除效果

Fig.2 COD_{Mn} removal effect

图3为两水厂对氨氮的去除效果。可知,两水厂的进水氨氮情况相似,2015年切换为南水北调水后,进厂水氨氮降低,均在0.15 mg/L以下,出厂水氨氮常年低于0.02 mg/L。2015年B水厂和S水厂

炭滤池对氨氮的去除率分别为31.43%和26.31%,此后前者对氨氮的去除率持续上升,维持在50%左右;S水厂则由于炭滤池进水氨氮水平较低,持续处于对氨氮的零去除状态。但是两水厂的出水氨氮浓度相近,均小于0.02 mg/L。由于炭滤池位置和进水水质的差异,B水厂的下向流活性炭滤池对氨氮的去除率较高且稳定。

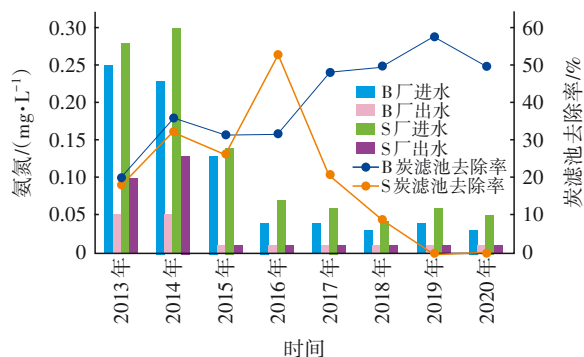


图3 氨氮去除效果

Fig.3 Ammonia nitrogen removal effect

由于原水有机物浓度较低,两水厂炭滤池出水 COD_{Mn} 和氨氮浓度无差异。两种工艺对比结果显示:上向流炭滤池出厂水 COD_{Mn} 略低,氨氮出水效果则差别不大。结合不同原水情况可以发现,对于 COD_{Mn} 较高的原水,上向流滤池比下向流处理效果更好;对于氨氮的去除,两种工艺差异不明显。

图4为两水厂各工艺点浊度的变化情况。2015年两水厂原水由黄河水变为南水北调水,进厂水浊度平均值由2.30 NTU降低至1.45 NTU,出厂水浊度变化不大,常年保持在0.10~0.20 NTU。上向流滤池不截留浊度,炭滤池出水浊度平均值为0.50 NTU;下向流滤池位于工艺段末端,其出水浊度约等于出厂水浊度。虽然两水厂工艺不同,但出水浊度指标无明显差异。

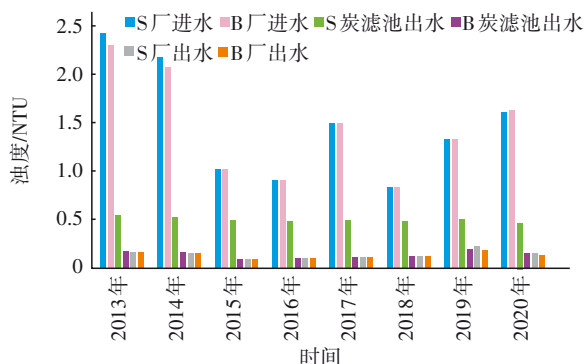


图4 浊度变化情况

Fig.4 Change of turbidity

2.2 活性炭理化指标比较

采用碘值和亚甲基蓝值表征活性炭的吸附性能,采用强度和粒径表征活性炭颗粒的磨损程度,对两水厂所用活性炭持续进行取样检测。

图5为两种炭滤池活性炭碘值的变化情况。可知,两水厂的碘值存在显著差异。运行初期,B水厂活性炭碘值衰减剧烈,第一季度由新炭的848 mg/g迅速衰减到671 mg/g,之后衰减速率逐渐趋缓,到第一年年末,衰减为657 mg/g,运行7年后衰减至227 mg/g,为新炭的27%;S水厂活性炭碘值前期衰减较B水厂缓慢,第一季度由新炭的923 mg/g衰减到888 mg/g,到第一年年末,衰减为718 mg/g,运行7年后衰减至314 mg/g,为新炭的34%。综合比较两个水厂,S水厂的活性炭情况相对较好。

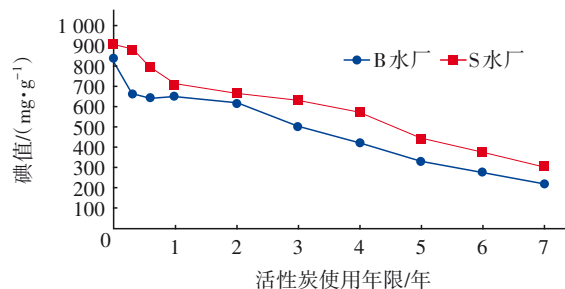


图5 活性炭碘值变化情况

Fig.5 Change of iodine value of activated carbon

图6为两种炭滤池活性炭亚甲基蓝值的变化情况。与碘值相似,运行初期B水厂亚甲基蓝值的衰减明显较快,一年后两者衰减至相同水平。运行7年后,两水厂活性炭的亚甲基蓝值由新炭的170 mg/g左右衰减到小于75 mg/g(低于检出限)。

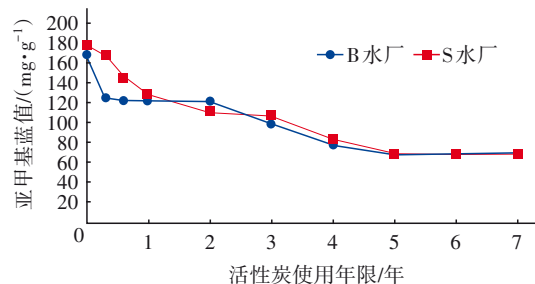


图6 亚甲基蓝值变化情况

Fig.6 Change of methylene blue value of activated carbon

综合碘值和亚甲基蓝值的变化情况可知,目前S水厂炭滤池活性炭的吸附性能指标衰减较慢,其吸附性能总体优于B水厂。

两水厂活性炭强度和粒度的分布情况分别见

图7和图8。下向流活性炭滤池的定期反冲洗和上向流炭滤池的持续膨胀运行均会对活性炭产生摩擦,依靠空气与炭颗粒以及炭颗粒之间相互摩擦可以去除颗粒上附着的过量生物膜及颗粒物,同时会导致颗粒粒径降低。由图7可知,生物活性炭的机械强度在使用过程中变化相对较小,使用7年时仍维持在95%以上;两水厂相比,B水厂活性炭强度降低的情况更明显。两水厂投产至今均未进行大规模的活性炭增补,由图8可知,两活性炭中间粒径比例均维持在95%左右,粒度减小情况不明显。

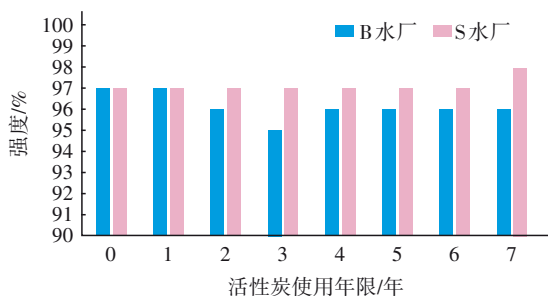
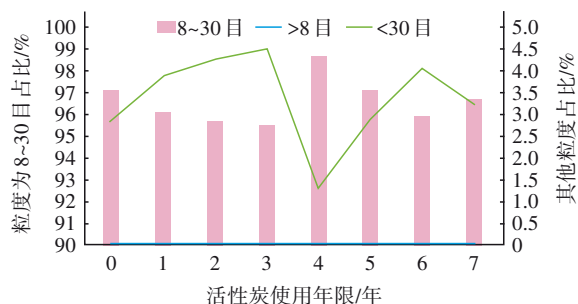
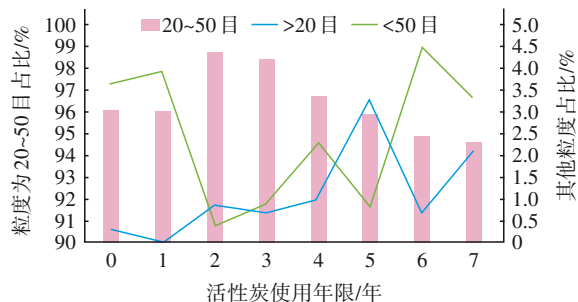


图7 活性炭强度变化

Fig.7 Change of mechanical strength of activated carbon



a. B水厂



b. S水厂

图8 活性炭粒度分布变化

Fig.8 Particle size distribution of activated carbon

经过7年的连续监测可知,虽然两水厂活性炭的吸附性能指标下降显著,但其机械强度和粒径分布均无明显下降趋势;而且,目前深度处理工艺对 COD_{Mn} 、氨氮的去除率以及其他出厂水指标均保持

稳定,出厂水质良好,还不能判定为活性炭使用寿命接近临界点^[2]。

2.3 炭表面生物膜情况比较

两水厂活性炭滤池内的生物检测结果见表1。可知在炭滤池投产前期,最先出现原生动物,而后逐渐向后生动物过渡;运行5年时生物链达到最完整状态,原生动物和后生动物并存,且数量均达到峰值;5年以后种类和数量均开始衰减,重新变成以原生动物为主。

表1 两水厂生物数量及种类分布

Tab.1 Biomass and species distribution in waterworks

时 间	B 水厂		S 水厂	
	生物量/ ($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$)	优势生物	生物量/ ($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$)	优势生物
2014年	39	原生动物	31	原生动物
2015年	54	原生动物	49	原生动物
2016年	557	原生动物	68	原生动物
2017年	138	原生、后生动物共存	106	原生、后生动物共存
2018年	126	原生、后生动物共存	143	原生、后生动物共存
2019年	28	原生、后生动物共存	26	原生、后生动物共存
2020年	10	原生动物	44	原生动物

生物量的变化情况和种类变化趋势相吻合,生物活性炭颗粒上附着的生物量(采用脂磷法测定,以P计)在其使用前期呈现递增的趋势,至5年时达到最大值,之后两水厂的活性炭生物量均呈明显下降趋势。原因在于微生物或者生物膜主要附着在活性炭的大孔道及其表面,而对特定的活性炭而言,其大孔容积及炭粒表面的面积是一个相对确定的数值,所能容纳的生物量必然会存在一定的限值;同时生物群落本身也存在更新换代的新陈代谢过程,到5年左右两个水厂均出现了活性炭生物膜脱落再生长的趋势。

从表1微型动物的检测结果可以直观看出,B水厂下向流炭滤池中的生物种类和数量明显多于S水厂上向流炭滤池。生物活性炭吸附池中呈现出微生物群落的多样性,如不采取有效措施,细菌可能会吸附在活性炭的细小颗粒上并随水流出,从而加大出水微生物的风险性。B水厂的下向流活性炭滤池作为水厂的最后一道处理工序,其生物泄漏风

险需密切关注。

2.4 两水厂炭滤池综合比较

综合上述比较结果,就两水厂不同池型炭滤池的出水水质、活性炭理化指标以及生物膜生长情况进行对比,如表2所示。

表2 两水厂炭滤池综合对比

Tab.2 Comprehensive comparison of carbon filter in two waterworks

项 目	B水厂	S水厂
运行时间	2013年3月—2020年底,共8年	2013年9月—2020年底,共7.5年
COD _{Mn} 去除率/%	20	25
氨氮去除率/%	60	—
碘值/(mg·g ⁻¹)	227	314
亚甲基蓝值/(mg·g ⁻¹)	<75	<75
强度/%	96.395	97.125
生物量/(nmol·g ⁻¹)	7~10	26~44
微型生物	种类数量较多	种类数量较少
生物泄漏风险	大	小
换炭/添炭次数	无	无
运行管理难度	反冲洗周期为24~48 h,反冲洗水需排放,费水费电;需增设泵房,增加运行管理负担	反冲洗周期为16 d,且反冲洗水可以直接进后续砂滤池循环使用,省水省电;无提升泵房,节约运行成本

在运行过程中对两水厂进行持续对比发现,B水厂下向流炭滤池挂膜时间短,生物量增长快,在运行前期吸附效果和生物处理效果表现较好;而与之相对应,其活性炭的碘值和亚甲基蓝值等吸附性能指标衰减迅速。S水厂上向流滤池挂膜时间长,且由于水流冲击,生物膜处于持续脱落再生长的过程,生物降解作用见效慢但比较稳定;相较下向流滤池,其活性炭吸附性能衰减缓慢。另外在运行管理方面,由于水头损失的限制,下向流炭滤池的反冲洗次数要明显多于上向流炭滤池,在夏季微生物生长旺盛的季节,为防止炭滤池生物泄漏,还需要强制增加反冲洗频次。在节能方面,上向流滤池表现较好。

由表2可知,除氨氮外,两水厂炭滤池的比较结果均为S水厂更优。两水厂稳定运行后,出水水质无明显差异,两种炭滤池对COD_{Mn}的去除效果相当;上向流滤池在运行管理上更节能,且无生物泄漏风

险。针对原水水质稳定优良的地区,上向流活性炭滤池表现更优。

3 结论

① 从2013年投运至今,B水厂和S水厂活性炭的碘值分别由848、923 mg/g下降到227、314 mg/g;亚甲基蓝值分别由170、180 mg/g降到75 mg/g以下。上向流炭滤池中活性炭的吸附性能指标衰减较慢。

② 两水厂活性炭的强度和粒度指标较新炭均无明显衰减,说明两水厂炭滤池运行维护良好,活性炭仍保持较好的机械性能。

③ 由于下向流炭滤池的进水流向使得活性炭持续堆积,运行前期下向流炭滤池挂膜迅速;运行5年左右,两水厂无差别,炭表面均可形成稳定的生物膜,生物活性达到最大;由于处在工艺末端,下向流活性炭滤池存在生物泄漏风险。

④ 两水厂稳定运行后,出水水质无明显差异,两种炭滤池对COD_{Mn}的去除效果相当。

⑤ 上向流滤池在运行管理上更节能,且无生物泄漏风险,针对原水水质稳定优良的地区,上向流活性炭滤池表现更优。

参考文献:

- [1] 韩立能. 上向流生物活性炭工艺在饮用水处理中的应用研究进展[J]. 净水技术, 2016, 35(s1): 42-46. HAN Lineng. Research progress on application of up-flow biological activated carbon process in drinking water treatment [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(s1): 42-46 (in Chinese).
- [2] 刘建广, 张春阳, 查人光, 等. 饮用水深度处理工艺活性炭运行生命周期探讨[J]. 给水排水, 2011, 37(5): 35-40. LIU Jianguang, ZHANG Chunyang, ZHA Renguang, et al. Probe into the activated carbon operation lifecycle in advanced water treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(5): 35-40 (in Chinese).

作者简介:康雅(1980—),女,河北衡水人,硕士,高级工程师,主要研究方向为给水处理技术。

E-mail:kangya@zzwater.com.cn

收稿日期:2021-02-22

修回日期:2021-03-12

(编辑:沈靖怡)