

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.01.007

不同粒径砂滤池处理微污染水源水的运行效果评价

张晓娜, 胡小芳, 何嘉莉, 巢 猛

(东莞市水务集团供水有限公司, 广东 东莞 523112)

摘 要: 针对微污染水源水,通过生产性试验对比不同粒径砂滤池对颗粒数、无脊椎动物、氨氮、荧光溶解性有机物和消毒副产物的去除效果,并结合出水阀开度分析滤池水头损失的变化情况。结果表明,细砂滤池出水颗粒数明显低于常规砂滤池,更能保障出水水质;细砂滤池对无脊椎动物的平均去除率为97%,控制效果更稳定;细砂滤池抗氨氮冲击负荷的能力更强,响应更快,相比常规砂滤池,氨氮去除量可提高0.80 mg/L。三维荧光光谱分析表明,待滤水主要包含芳香性蛋白质物质和溶解性微生物代谢产物类物质,细砂滤池对荧光溶解性有机物的去除效果略好于常规砂滤池。细砂滤池对消毒副产物前体物控制效果更佳。在相同运行时间内,细砂滤池水头损失增长率高于常规砂滤池,应根据进水水质合理调整细砂滤池反冲洗周期。

关键词: 微污染水源水; 砂滤池; 粒径; 三维荧光光谱; 运行效果

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)01-0045-06

Evaluation of Operational Performance of Filter Packed with Different Particle Size Sands for Treating Micro-polluted Source Water

ZHANG Xiao-na, HU Xiao-fang, HE Jia-li, CHAO Meng

(Dongguan Water Group Water Supply Co. Ltd., Dongguan 523112, China)

Abstract: This paper compared the performances of two filters packed with different particle size sands for the removal of particulates, invertebrates, ammonia nitrogen, fluorescent dissolved organic matter and disinfection by-products from micro-polluted source water through productive tests, and analyzed the change of filter head loss in combination with the opening of outlet valve. The particulates in effluent from the fine sand filter were significantly lower than that of the conventional sand filter, indicating that the former had better effluent quality. The fine sand filter demonstrated an average removal rate of 97% for invertebrates, and showed a more stable control performance. The fine sand filter had stronger capacity in resistance to shock load and faster response to ammonia nitrogen, and its ammonia nitrogen removal was increased by 0.80 mg/L compared with the conventional sand filter. Three-dimensional fluorescence spectrum analysis showed that the water to be filtered mainly contained aromatic protein substances and soluble microbial metabolites, and the performance of the fine sand filter for fluorescent dissolved organic matter removal was slightly better than that of the conventional sand filter. In contrast, the fine sand filter demonstrated better performance for control of the precursors of disinfection by-products. In the same operating period of time, the growth rate of head loss of the fine sand filter was higher than that of the conventional sand filter, so the backwashing cycle of the fine sand filter should be adjusted reasonably according to the influent quality.

Key words: micro-polluted source water; sand filter; particle size; three-dimensional fluorescence spectrum; operating performance

传统处理工艺在国内自来水厂应用较为广泛,但该工艺对水质指标的去除效果有限,越来越难以满足人们对饮用水水质的要求。增加生物预处理或者臭氧/活性炭以及超滤等深度处理工艺可以进一步提升供水水质,但这些工艺往往存在占地面积大、运行成本高等问题^[1-2],限制了在老旧水厂的推广应用。因此,寻求一种适用于老旧水厂升级改造、可有效提高供水水质的工艺迫在眉睫。

过滤利用滤料层的物理截留作用去除水体中的颗粒物,其是传统处理工艺中去除悬浮物至关重要的环节。砂滤料由于化学性能稳定、机械强度大、成本低,是国内外最为常用的滤料。有研究表明^[3-4],砂滤料对水体中悬浮物的截留效果与其表面特性及比表面积有关,砂滤料粒径越小,其对浊度、颗粒数、无脊椎动物等水质指标的改善效果越明显。笔者以南方地区微污染水源水为研究对象,对传统处理工艺水厂的砂滤池进行升级改造,将常规砂滤料更换为细砂滤料,通过开展生产性试验,考察不同粒径级配砂滤料的过滤性能,评价细砂滤料滤池在水质提升方面的优越性,旨在为老旧水厂工艺升级改造提供参考。

1 材料与方法

1.1 工艺改造

南方地区某水厂采用传统处理工艺,水厂原水取自D江南支流,属于微污染水源水。试验期间原水水质如下:COD_{Mn}为1.01~2.56 mg/L(平均值为1.88 mg/L)、TOC为1.041~3.524 mg/L(平均值为2.684 mg/L)、UV₂₅₄为0.012~0.052 cm⁻¹(平均值为0.036 cm⁻¹)。

水厂砂滤池采用恒水位、等滤速、均质滤层V型滤池,单个滤池设计处理水量为729 m³/h,过滤面积为84 m²,设计滤速为9.12 m/h。选取1个滤池进行改造,将原有的常规砂滤料换成细砂滤料,并与常规石英砂滤池进行比较。其中,A滤池为细砂滤池,有效粒径 d_{10} =0.52 mm,孔隙率 ε_0 =0.37,均匀系数 K_{60} =1.32,砂层厚度为1.0 m;B滤池为常规砂滤池,有效粒径 d_{10} =0.88 mm,孔隙率 ε_1 =0.42,均匀系数 K_{60} =1.35,砂层厚度为1.2 m。两个滤池承托层技术

参数相同,均铺设有效粒径为2~4 mm、厚度为0.05 m的粗石英砂。A滤池过滤周期为30 h,反冲洗方式为先气冲再水冲。其中,气冲3 min,强度为20.5 L/(m²·s);水冲8 min,强度为5 L/(m²·s)。B滤池过滤周期为38 h,反冲洗方式为先气冲再气水混冲,最后水冲。其中,单独气冲时间为4 min,强度为20.5 L/(m²·s);气水混冲时间为6 min,气冲强度为20.5 L/(m²·s),水冲强度为5 L/(m²·s);单独水冲时间为3 min,水冲强度为5 L/(m²·s)。

1.2 试验方法

采用GR-1500A台式激光颗粒物分析仪测定砂滤料的颗粒数(粒径≥2 μm可被检出);采用水杨酸盐分光光度法测定氨氮;采用重氮偶合分光光度法测定NO₂⁻-N;采用吹扫捕集气相色谱-质谱仪测定三氯甲烷;使用荧光光度计测量三维荧光光谱。

无脊椎动物样品采用浮游生物网(网衣孔径为75 μm)挂网浓缩富集,过水量为1~2 m³。浓缩后的无脊椎动物用纯水从滤网中洗脱下来,并定容至一定体积,加入鲁哥试剂进行固定。利用显微镜鉴定无脊椎动物的类别和数量。

2 结果与讨论

2.1 对颗粒数的去除效果

有研究表明^[5],相比常规砂滤池,细砂滤池在去除浊度方面有明显的优势。但浊度指标存在一定的局限性,特别是对于低浊水体,水体中的微颗粒并不能通过浊度进行准确表征。相比浊度,颗粒数指标更能准确反映水体中粒径≥2 μm的悬浮颗粒物含量。分析细砂滤池和常规砂滤池对颗粒数的控制效果,结果如图1所示。可以看出,A滤池出水中粒径≥2 μm的颗粒数整体上低于B滤池出水,说明细砂滤池对颗粒数的去除效果更佳。有研究表明^[6],当水体中粒径≥2 μm的颗粒数≤50个/mL时,耐氯病原体给生活饮用水带来的风险明显降低。A滤池出水粒径≥2 μm的颗粒数为18~1 552个/mL,均值为118个/mL;B滤池出水粒径≥2 μm的颗粒数为31~2 242个/mL,均值为192个/mL。与常规砂滤池相比,在相同进水水质条件下,细砂滤池更能保障供水水质安全。

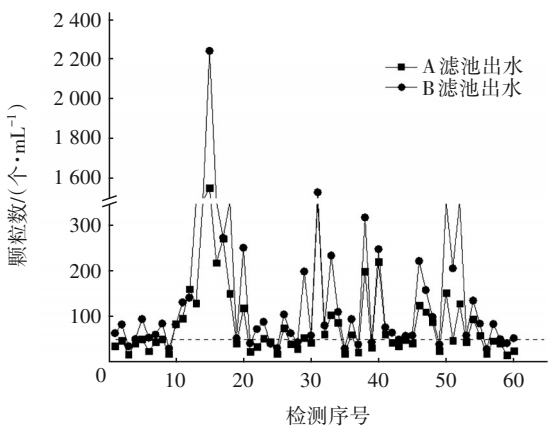


图1 不同粒径砂滤池出水颗粒数

Fig.1 Effluent particle of sand filter with different particle size sands

2.2 对无脊椎动物的去除效果

无脊椎动物不仅带来感官问题,它还可以作为水媒病原体携带者产生潜在的生物安全性^[7]。砂滤池可以通过物理截留作用去除无脊椎动物,是保障饮用水中无脊椎动物数量处于较低水平的有效手段^[8]。在待滤水无脊椎动物数量不同的条件下,分析细砂滤池和常规砂滤池对无脊椎动物的控制效果,结果如图2所示。可以看出,滤池过滤对无脊椎动物的去除效果显著,待滤水无脊椎动物数量越多,其去除效果越好。试验期间待滤水无脊椎动物

的数量为242~33 399 个/ m^3 ,A滤池出水无脊椎动物数量为15~29 个/ m^3 ,平均去除率为97%;B滤池出水无脊椎动物数量为68~401 个/ m^3 ,平均去除率为90%,细砂滤池对无脊椎动物的去除效果优于常规砂滤池。同时可以看出,细砂滤池对无脊椎动物的控制效果更稳定。即使待滤水无脊椎动物数量处于较高水平,A滤池出水中的指标仍保持较低水平,而常规砂滤池因其拦截效果欠佳导致部分无脊椎动物穿透滤池。

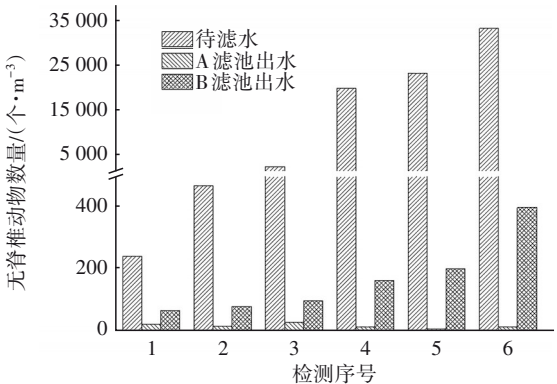


图2 不同粒径砂滤池对无脊椎动物的去除效果

Fig.2 Removal effect of invertebrates by sand filter with different particle size sands

对收集的无脊椎动物进行分类计数,进一步分析滤后水中无脊椎动物的种类,结果见表1。

表1 不同粒径砂滤池出水无脊椎动物的种类和数量

Tab.1 Species and numbers of invertebrates in effluent of sand filter with different particle size sands

项 目	待滤水		A滤池出水		B滤池出水	
	数量/(个· m^{-3})	体型大小/ μm	数量/(个· m^{-3})	体型大小/ μm	数量/(个· m^{-3})	体型大小/ μm
哲水蚤	1 300	500~1 200	—	—	18	300~600
猛水蚤	200	150~500	—	—	0	0
枝角类	400	200~250	—	—	0	0
轮虫类	21 500	50~700	15	50~100	129	150~300
线虫类	200	500~1 000	—	—	0	0
桡足幼体虫	7 100	150~400	—	—	259	100~400

从表1可以看出,待滤水中主要有哲水蚤、猛水蚤、枝角类、轮虫类、线虫类、桡足幼体虫等无脊椎动物,其中轮虫的占比较大,约占总数的70.03%。待滤水中无脊椎动物具有体型大、数量多的特点,滤后水无脊椎动物种类少、数量少、体型小,说明过滤对无脊椎动物的控制效果良好。其中,A滤池出水中哲水蚤、猛水蚤、枝角类、线虫类、桡足幼体虫等体型较大的无脊椎动物均无检出,仅有少部分体型大小约为50~100 μm 的轮虫类穿透滤层;而B滤

池出水可检出体型大小约为100~600 μm 的哲水蚤、轮虫类和桡足幼体虫。有研究表明^[9],无脊椎动物体型越小,次氯酸钠对其灭活效果越好。穿透细砂滤池体型幼小的无脊椎动物更易于被后续消毒过程有效去除。因此,细砂滤池更能保障供水水质安全。

2.3 对氨氮的去除效果

夏季汛期,水厂水源水受城市内涝影响,存在短时间(1~2 d)氨氮升高的现象。跟踪分析汛期不

同粒径砂滤池对氨氮的去除效果,结果如图3所示。可知,在待滤水氨氮浓度短时间升高情况下,细砂滤池对氨氮的去除效果明显优于常规砂滤池。当待滤水氨氮浓度低于1.30 mg/L时,A滤池出水氨氮均能满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)限值要求,而B滤池出水氨氮浓度则未能达标。当待滤水氨氮浓度为1.94 mg/L时,A滤池出水氨氮浓度为0.71 mg/L,氨氮去除量可达1.23 mg/L,而B滤池对氨氮的去除量仅为0.43 mg/L。相比常规砂滤池,细砂滤池可以使氨氮去除量提高0.80 mg/L。

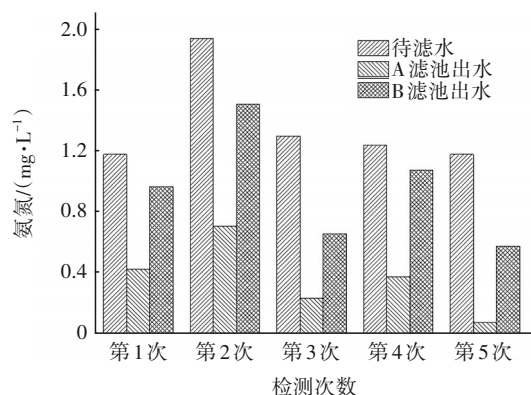


图3 不同粒径砂滤池出水氨氮情况

Fig.3 Ammonia nitrogen concentration in effluent of sand filter with different particle size sands

从长期运行经验来看,当待滤水长期处于高氨氮情况时,砂滤池对氨氮的去除量基本能达到1.0 mg/L。但在氨氮浓度短时间升高的条件下,常规砂滤池对氨氮的去除效果不理想。这是因为氨氮主要通过砂滤层生物作用被去除。在非汛期,待滤水氨氮长期处于低浓度状态,砂滤料表面硝化细菌也处于休眠状态,当待滤水氨氮浓度突然升高时,长期处于贫营养状态的微生物未能及时响应,抗氨氮冲击负荷的能力较弱。细砂滤池在待滤水氨氮浓度突然升高的情况下,对氨氮的去除优势更明显。可能是因为细砂滤池的砂滤料粒径较小,比表面积较大,有利于更多的微生物在滤料表面附着生长,其需要的响应时间更短,抗冲击负荷能力更强。

不同粒径砂滤池出水亚硝态氮浓度如图4所示。可以看出,细砂滤池出水亚硝态氮浓度明显高于常规砂滤池。究其原因,主要是在氨氮生物降解过程中,首先被亚硝化细菌转化为亚硝态氮,然后再被硝化细菌转化为硝态氮,当硝化细菌未能及时将亚硝态氮转化为硝态氮时,滤池出水就存在

亚硝态氮累积的现象,这也验证了细砂滤池的氨氮生物降解作用优于常规砂滤池。

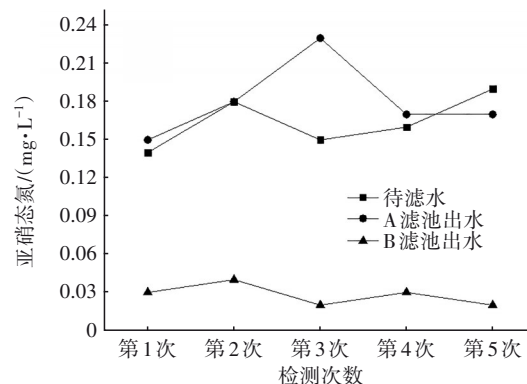


图4 不同粒径砂滤池出水亚硝态氮浓度

Fig.4 Nitrite nitrogen concentration in effluent of sand filter with different particle size sands

2.4 对荧光溶解性有机物的去除效果

不同粒径砂滤池出水溶解性有机物荧光光谱如图5所示。三维荧光光谱可划分为5个区域: I区($\lambda_{Em} < 330$ nm, $\lambda_{Ex} < 250$ nm)代表含苯环蛋白质类有机物, II区(330 nm $< \lambda_{Em} < 380$ nm, $\lambda_{Ex} < 250$ nm)代表芳香性蛋白质类有机物, III区($\lambda_{Em} > 380$ nm, $\lambda_{Ex} < 250$ nm)代表富里酸类有机物, IV区($\lambda_{Em} < 380$ nm, $\lambda_{Ex} > 250$ nm)代表溶解性微生物代谢产物类有机物, V区($\lambda_{Em} > 380$ nm, $\lambda_{Ex} > 250$ nm)代表腐殖酸类有机物。

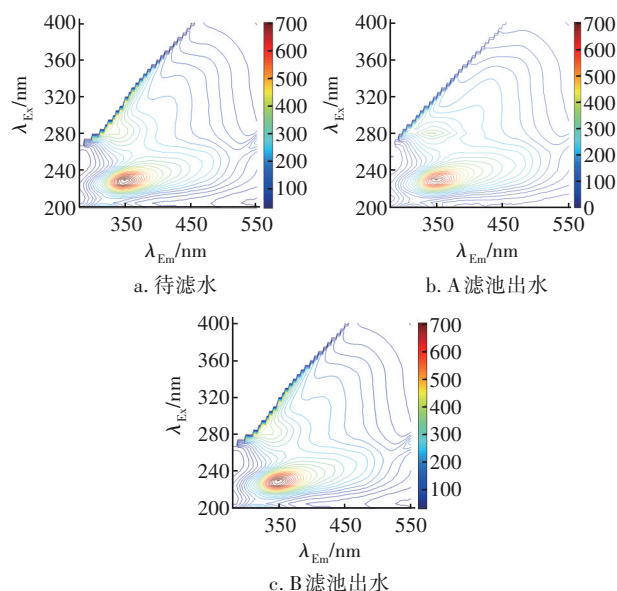


图5 不同粒径砂滤池出水溶解性有机物荧光光谱

Fig.5 DOM fluorescence spectrum of effluent of sand filter with different particle size sands

由图5可知,待滤水、A滤池出水和B滤池出水

在区域Ⅱ和Ⅳ均有明显的特征峰,说明待滤水中溶解性有机物主要由芳香性蛋白质类有机物和溶解性微生物代谢产物类有机物组成。

通过对待滤水、A滤池出水和B滤池出水DOM荧光光谱各区域的荧光强度进行计算,定量分析各区域标准体积分布情况,结果如图6所示。可以看出,A滤池和B滤池对荧光溶解性有机物的去除率分别为22.98%、12.19%。相比常规砂滤池,细砂滤池对荧光溶解性有机物的控制效果更佳。原因是水体中颗粒物主要通过物理截留作用被去除,而对于溶解性有机物,主要通过砂滤料表面生物膜的接触絮凝和生物降解作用被去除。砂滤料粒径越小,比表面积越大,滤料表面附着生长的生物量越多,生物作用越强。因此,细砂滤料对荧光溶解性有机物的去除效果更好。

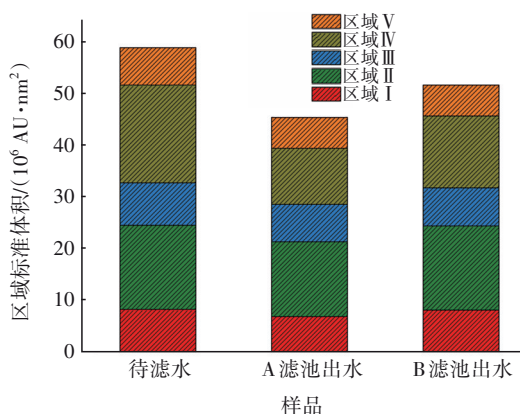


图6 不同粒径砂滤池出水DOM荧光强度分布

Fig.6 Fluorescence intensity distribution of effluent of sand filter with different particle size sands

2.5 对消毒副产物生成潜能的控制效果

在待滤水、A滤池出水和B滤池出水水样中加入20 mg/L的NaClO溶液(以有效氯计),密封后于暗处反应72 h,以三卤甲烷为控制指标,分析不同粒径砂滤池对消毒副产物生成潜能的控制效果。当待滤水三氯甲烷前体物浓度为47.47 $\mu\text{g/L}$ 时,两种砂滤池出水三氯甲烷前体物浓度均低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)限值(60 $\mu\text{g/L}$)。其中,细砂滤池对三卤甲烷前体物的去除率为35.50%,常规砂滤池为9.25%,相比常规砂滤池,细砂滤池对消毒副产物生成潜能的控制效果更好。

2.6 水头损失变化情况

滤池运行时间越长,截留的悬浮物越多,水头损失越大。生产性试验采用V型滤池,通过控制出

水阀开度实现恒水位等速过滤。在高浊度待滤水(平均浊度为2.34 NTU)和低浊度待滤水(平均浊度为1.23 NTU)两种工况下,监测细砂滤池和常规砂滤池在一个运行周期内出水阀开度,考察细砂滤池和常规砂滤池水头损失的变化情况,如图7。

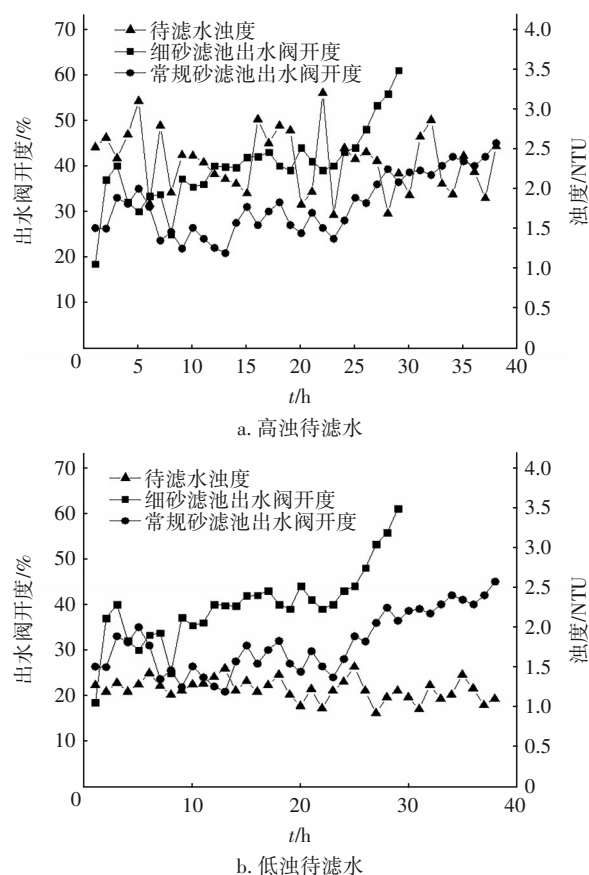


图7 不同粒径砂滤池出水阀开度变化情况

Fig.7 Variation of outlet valve opening of sand filter with different particle size sands

从图7可知,随着滤池运行时间增加,不同浊度工况下两种滤池出水阀开度均增大,说明滤池水头损失逐渐升高。在相同运行时间下,细砂滤池水头损失增长率比常规砂滤池高,反冲洗周期比常规砂滤池短。为应对高浊度待滤水,细砂滤池较适宜的反冲洗周期为24 h,常规砂滤池为35 h;而为应对低浊度待滤水,细砂滤池反冲洗周期可延长至30 h,常规砂滤池为38 h。究其原因,相比常规砂滤池,细砂滤池截留的悬浮物更多,水质净化效果更佳,水头损失增长率更高。因此,细砂滤池在运行过程中应根据进水水质条件合理调整反冲洗周期。

3 结论

相比常规砂滤料,细砂滤池出水颗粒数更低、

对无脊椎动物的控制效果更好,更能保障出水水质。即使待滤水中无脊椎动物数量处于较高水平,细砂滤池仍可以控制滤后水中无脊椎动物数量处于较低水平。在待滤水氨氮浓度突然升高的情况下,细砂滤池对氨氮的去除效果更佳、响应时间更短,可以使氨氮去除量提高0.80 mg/L。三维荧光光谱分析表明,砂滤池进水主要由芳香性蛋白质类有机物和溶解性微生物代谢产物类有机物组成,细砂滤池对荧光溶解性有机物的去除效果略好于常规砂滤池。另外,细砂滤池对消毒副产物生成潜能的控制效果更佳。在相同运行条件下,细砂滤池水头损失增长率比常规砂滤池高,应根据进水水质合理调整反冲洗周期。

参考文献:

- [1] 崔婧,温汝青,何士忠,等. 北方某水厂臭氧/活性炭深度处理工艺设计[J]. 中国给水排水, 2015, 31(10): 58-60.
CUI Jing, WEN Ruqing, HE Shizhong, *et al.* Design of ozonation/BAC advanced treatment process in a waterworks in North China [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(10): 58-60 (in Chinese).
- [2] 李冬梅,李子亚,林洁漫,等. 微污染东平河原水的生物预处理特性与效果[J]. 中国给水排水, 2014, 30(19): 36-39.
LI Dongmei, LI Ziya, LIN Jieman, *et al.* Characteristics and efficiency of biological pretreatment of micropolluted source water from Dongping River [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(19): 36-39 (in Chinese).
- [3] 彭进湖,何孙胃,陈丽珠,等. 细砂滤料的过滤性能及运行效果[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 40-45.
PENG Jinhu, HE Sunwei, CHEN Lizhu, *et al.* Filtration performance and operation effect of fine sand filter [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 40-45 (in Chinese).
- [4] 梁越,周洋,吕平毓,等. 颗粒级配影响滤层系统细颗粒迁移试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(4): 152-158.
LIANG Yue, ZHOU Yang, LÜ Pingyu, *et al.* Experimental study on fine particle migration in filter layer system affected by particle gradation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(4): 152-158 (in Chinese).
- [5] 陈若娅,吴慧芳,李响,等. 粒径及滤层厚度对石榴石滤料的过滤性能影响研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(10): 1182-1187.
CHEN Ruoya, WU Huifang, LI Xiang, *et al.* Study on the influence of particle size and filter thickness on filtration performance of garnet filter material [J]. Environmental Pollution & Prevention, 2019, 41(10): 1182-1187 (in Chinese).
- [6] 刘宏远,周晓龙,朱海涛,等. 在线颗粒计数仪在自来水厂水质监控中的应用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(3): 44-47.
LIU Hongyuan, ZHOU Xiaolong, ZHU Haitao, *et al.* Application of online particle counter to water quality monitoring at waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(3): 44-47 (in Chinese).
- [7] 陈丽珠,巢猛,何孙胃. 净水厂水蚤类浮游动物的生物风险及影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 60-63.
CHEN Lizhu, CHAO Meng, HE Sunwei. Biosafety risk and influencing factors of daphnia zooplankton in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(1): 60-63 (in Chinese).
- [8] 尹文超,张金松,刘丽君. 饮用水系统中无脊椎动物问题研究[J]. 给水排水, 2012, 38(3): 107-113.
YIN Wenchao, ZHANG Jinsong, LIU Lijun. Study on the problems caused by invertebrates in drinking water systems [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(3): 107-113 (in Chinese).
- [9] 蔡雪,郭文东,周宇轩. 混凝预氧化组合工艺处理高氨水试验研究[J]. 供水技术, 2020, 14(5): 10-13.
CAI Xue, GUO Wendong, ZHOU Yuxuan. Experimental study on treatment of high ammonia water by coagulation and pre-oxidation process [J]. Water Technology, 2020, 14(5): 10-13 (in Chinese).

作者简介:张晓娜(1988-),女,广东揭阳人,硕士,高级工程师,主要研究方向为给水处理工艺技术研发与应用。

E-mail:741246917@qq.com

收稿日期:2022-02-24

修回日期:2022-05-10

(编辑:任莹莹)