

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.007

## 细砂滤料的过滤性能及运行效果

彭进湖, 何孙胃, 陈丽珠, 巢 猛

(东莞市水务集团供水有限公司, 广东 东莞 523000)

**摘 要:** 基于提升滤后水水质对石英砂粒径的选用问题,通过中试研究了两种不同粒径分布的石英砂过滤性能,探讨细砂滤料使用的可行性。研究表明,细砂的滤后水浊度更低,能解决高浊度的突发性水质问题;细砂对无脊椎动物的截留效果显著,并能有效应对轮虫等小尺寸生物风险;细砂滤料保持并提升了滤池对有机物和氨氮的去除能力;细砂的水头损失增长更快,降低进水浊度能有效延长其运行时间;对比于其他深度处理工艺,细砂滤料拥有部分膜处理功能,无需增加净水厂用地。

**关键词:** 细砂; 过滤; 滤后水水质; 浊度

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0040-06

## Filtration Performance and Operation Effect of Fine Sand Filter

PENG Jin-hu, HE Sun-wei, CHEN Li-zhu, CHAO Meng

(Dongguan Water Group Water Supply Co. Ltd., Dongguan 523000, China)

**Abstract:** In view of selection of quartz sand particle size for improving the quality of filtered water, the filtration performance of two kinds of quartz sand with different particle size distribution was studied by pilot test, and the feasibility of using fine sand was discussed. Turbidity in water filtered by fine sand was lower, and the sudden water quality problem with high turbidity could be solved. Fine sand had a significant retention effect on invertebrate zooplankton, and could effectively deal with biological risk of small size organisms such as rotifers. The fine sand could also maintain and improve the removal capacity of organic matters and ammonia nitrogen. The head loss of fine sand increased faster, and the operation time could be effectively prolonged by reducing turbidity in influent. Compared with other advanced treatment processes, the fine sand filter had part of membrane treatment function, and did not need to increase the footprint area of a water treatment plant.

**Key words:** fine sand; filtration; quality of filtered water; turbidity

作为常规水处理工艺的重要环节,过滤效果的提升有助于改善出水水质。现代过滤理论普遍认为,快滤池过滤过程中,滤料对水中悬浮物的截留能力与其表面特性以及所提供的颗粒表面积有关。石

英砂滤料是当前国内水厂过滤采用的主要滤料之一<sup>[1]</sup>。近年来,石英砂粒径对滤后水水质影响的相关研究逐渐受到国内学者的关注。周超<sup>[2]</sup>通过监测生产滤池和模型滤池实验,发现石英砂滤料的有

效粒径越小,对水中颗粒物的去除效果越好;郭远庆<sup>[3]</sup>研究发现,小粒径滤料对  $UV_{254}$  和 DOC 的去除效果较好;杨长生<sup>[4]</sup>发现,过小粒径的石英砂滤料对滤后水浊度的提升并不显著,反而产生更多应用上的副效应。为了满足设计标准,目前净水厂使用的石英砂滤料的粒径范围为 0.5~1.2 mm。笔者对该粒径范围内,不同粒径级配的石英砂滤料进行中试研究,通过对滤后水浊度、氨氮、有机物、无脊椎动物含量、水头损失等指标进行对比,探讨了细砂滤料的过滤效果,旨在为净水厂升级改造提供技术参考。

1 实验部分

1.1 实验条件

实验在南方某中试基地内的两组制水工艺流程(A组和B组)中进行,滤池类型为普通快滤池,见图1。

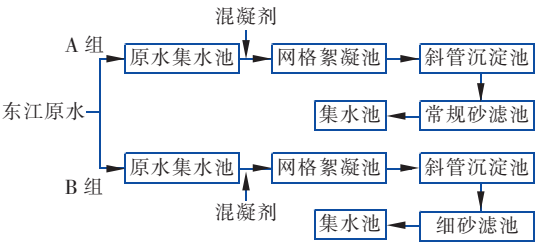


图1 中试基地内制水工艺流程

Fig.1 Process flow of water production in pilot plant

本次实验以东江水为原水,其浊度为 9.86~52.69 NTU、pH 值为 6.6~6.9、 $COD_{Mn}$  为 1.36~4.89 mg/L、TOC 为 2.56~3.23 mg/L、氨氮为 0.03~0.23 mg/L。调节上述两组工艺流程的进水量为 5 m<sup>3</sup>/h,采用液体聚合氯化铝(PAC)作为混凝剂,其投量根据实验要求进行调节。出水口阀门开度恒定,过滤初期滤速设定为 8 m/h。过滤初期进水液位为 100 mm,溢流液位为 600 mm,以滤池运行到进水溢流作为一个反冲洗周期,滤池反冲洗方案为气冲 4 min 后水冲 15 min,气冲强度为 16.2 L/(s·m<sup>2</sup>),水冲强度为 7.9 L/(s·m<sup>2</sup>)。

实验采用的石英砂滤料均产自佛山市,中试基地 A 组滤池填入水厂常规粒径分布的石英砂滤料, B 组滤池填入小粒径比例较多的细砂滤料,填充高度均为 1 000 mm。根据 CJ/T 43—2005 附录 A 进行测定, A 组、B 组滤料的粒径分布如表 1 所示。其中,  $D_{10}(A) = 0.74$  mm, 孔隙率  $\varepsilon(A) = 0.35$ ,  $K_{80} = 1.64$ ;  $D_{10}(B) = 0.52$  mm,  $\varepsilon(B) = 0.41$ ,  $K_{80} = 1.73$ 。

表 1 A、B 组滤料的粒径分布情况

Tab.1 Particle size distribution of filters in group A and B

粒径范围/mm	A 组滤料/%	B 组滤料/%
>2.36	0.00	0.10
1.4~2.36	0.20	0.10
1.0~1.4	73.10	11.50
0.55~1.0	26.00	53.30
0.50~0.55	0.30	29.80
0.212~0.50	0.40	4.50
0.18~0.212	0.00	0.50
0.106~0.18	0.00	0.20
<0.106	0.00	0.00

1.2 实验方法

通过调节 PAC 投量,控制进水浊度达到 1~9 NTU,考察不同粒径滤料在不同浊度条件下的过滤性能。实验于 2018 年 1 月—8 月进行,期间对其出水浊度进行不定期检测。同时,在高浊度(7~8 NTU)、中浊度(3~4 NTU)、低浊度(1 NTU)等滤池进水条件下,于东江原水中投加 1.5 mg/L 氨氮药剂,并分别对 A、B 组的进出水进行取样并放至 6℃ 冰箱进行保存,于两天内进行检测。此外,分别在不同进水浊度和不同季节条件下,通过浮游生物网对滤池进水和出水中无脊椎动物进行收集,洗脱并定容至 50 mL 比色管中,滴加 1 mL 鲁哥试剂进行固定保存,并于两天内进行检测。

1.3 分析项目及方法

浊度采用哈希 2100Q 浊度仪进行测定;氨氮采用水杨酸盐分光光度法进行测定;TOC 指水体中溶解性和悬浮性有机物含碳总量,以碳的数量表示水中含有机物的总量,通过 TOC 仪进行检测; $COD_{Mn}$  采用酸性高锰酸钾滴定法进行检测;无脊椎动物含量:取 1.0 mL 固定液于玻璃玻片中,采用电子显微镜进行观察分类并计数。

2 结果与讨论

2.1 对出水浊度的影响

在不同进水浊度下,不同粒径石英砂滤料的滤后水浊度情况如图 2 所示。可以看出,在相同进水浊度下,B 组出水浊度皆比 A 组要低,进水浊度越高,这种现象越发显著。当进水浊度达到 6 NTU 以上时,A 组出水浊度开始出现大于 1.0 NTU 的现象,超出国标限值,而 B 组仍能保证较低的滤后水浊度。因此,当进水出现异常情况时,细砂滤料更能有效应对。

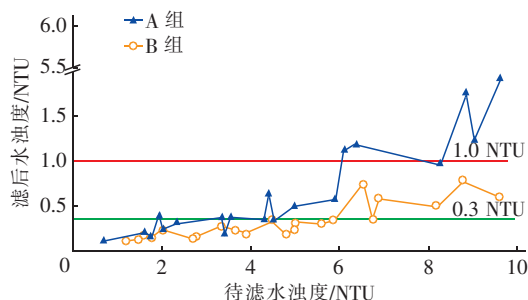


图2 不同粒径石英砂滤料的出水浊度情况

Fig. 2 Turbidity of effluent by quartz sand filters with different particle sizes

此外还发现,当控制进水浊度在 1.2 NTU 以下时,细砂滤料的出水浊度基本在 0.1 NTU 以下,达到了微滤以及超滤出水水平,并且出水浊度稳定。而常规石英砂滤料出水浊度要达到 0.1 NTU,对进水浊度要求较高,需在 0.8 NTU 以下,这对混凝剂的投加量控制要求较高,极易出现混凝剂投加过量等不良效应。此外,进水浊度越低,常规砂滤出水浊度波动越大。

表2 不同时期与浊度下滤前水和滤后水中的无脊椎动物含量

Tab. 2 Content of invertebrate zooplankton in influent and effluent at different stages and turbidity

项 目	2018-01-18	2018-03-05	2018-03-29	2018-05-29	2018-06-27	2018-07-17
进水浊度/NTU	0.86	0.84	2.51	8.75	3.10	5.78
生物密度/ (个·m <sup>-3</sup> )	A组进水	3 611	51 067	10 828	80 000	51 531
	A组出水	833	868	489	6 343	3 930
	B组进水	45 965	94 771	18 781	79 333	56 504
	B组出水	495	74	209	858	820

同时,从进水浊度与浮游动物含量可以看出,在考察的浊度范围下,无脊椎动物的总含量与进水浊度以及季节的相关性不显著,这可能与无脊椎动物的小体积和透明的生物性质以及种群间的竞争生长有关<sup>[6]</sup>。即使总量处于相同数量级,但在不同季节调节下,不同无脊椎动物分布可能存在差别。对收集的无脊椎浮游动物进行分类计数,发现在不同季节下,进水中无脊椎浮游动物的种类存有较大差别。在1月—3月,进水中无脊椎动物以大尺寸的哲水蚤以及桡足幼体为主,而5月—7月时小尺寸的轮虫和桡足幼体成为原水中的优势种群。

考察不同粒径石英砂对不同种类的无脊椎动物的去除效果,结果见图3。对比哲水蚤,水厂常规石英砂对轮虫、桡足幼体等小尺寸浮游动物的去除效果较差,而对于小尺寸的无脊椎动物,细砂的截留率仍能保持在 99% 以上,表现出良好的去除能力。

作为供水水质的一项重要综合指标,出水浊度一直受到净水厂的重视。降低浊度,有利于降低水中的藻密度、有机物含量,降低 Ames 致突变率,降低病毒传染病的发病病例,提高变形虫、贾第氏虫的去除率,对保障饮用水安全有重大作用<sup>[5]</sup>。只需控制适当的进水浊度,不用改变原有生产工艺,细砂滤料便能有效降低出水浊度,提升水质,甚至达到微滤和超滤的出水水平。

## 2.2 对出水无脊椎动物含量的影响

不同浊度条件下进出水中的无脊椎动物含量见表2。可以看出,B组出水中无脊椎动物含量皆比A组要低,同时,细砂对无脊椎动物的去除率达到约 99%,而净水厂常规石英砂对无脊椎动物的去除率只有 92% 左右。此外,当进水中含有较高数量的无脊椎动物时,B组出水中的无脊椎动物数量仍保持在较低水平;而常规石英砂对无脊椎动物的过滤效果随季节有较大变化,在1月—3月时,粗砂滤料仍能保持较好的去除效果,但在5月份之后,粗砂滤后水中的无脊椎动物含量显著升高。

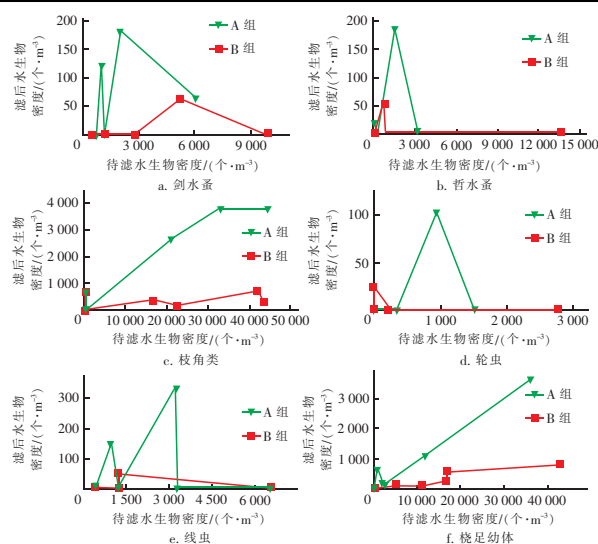


图3 不同粒径石英砂对无脊椎动物的去除效果

Fig. 3 Removal of invertebrate zooplankton by quartz sand with different particle sizes

当进水中无脊椎动物含量处在同一水平时,细砂出水中无脊椎动物含量仍能一直保持较低水平,而当进水中小尺寸无脊椎动物为优势种群时,常规石英砂因对其拦截效果欠佳而导致出水中无脊椎动物含量显著升高。因此,当水体暴发小尺寸的生物风险时,细砂滤料才能更有效应对并处理其冲击,保证供水安全。

2.3 对出水有机物和氨氮的影响

以 TOC、COD<sub>Mn</sub> 作为评估有机物含量的综合指标,在本次考察的进水浊度范围内,进水中的 COD<sub>Mn</sub>、TOC 和氨氮含量基本不受浊度高低的影响,这从侧面也反映出在该有机物和氨氮浓度水平下,混凝剂的投加对有机物和氨氮的去除能力比较有

限。东江原水中的有机物、氨氮仍然需要滤池进一步去除。因此,选择低浊度进水条件下净水厂常规用砂和细砂的进出水有机物、氨氮情况进行评估,结果如表 3 所示。通过对比可知,相比于净水厂的常规用砂,细砂出水中的有机物和氨氮含量都有一定程度的降低。由于此次考察的石英砂滤料为新填充的滤料,对有机物的去除能力主要与其生物膜挂膜能力有关。生物膜挂膜能力与滤料本身的特性有关<sup>[7]</sup>,而在相同类型的滤料条件下,细砂滤料的粒径更小,能够有效增加滤料的表面积,这在一定程度上增强了其生物膜挂膜能力,使其对有机物和氨氮的去除能力不但没有降低,反而得到了进一步的提升,从而保证了出水水质。

表 3 进出水中有机物和氨氮含量及其去除率

Tab.3 Content and removal rate of organic matter and ammonia nitrogen in influent and effluent

项 目	进水/ (mg · L <sup>-1</sup> )	A 组		B 组	
		出水/(mg · L <sup>-1</sup> )	去除率/%	出水/(mg · L <sup>-1</sup> )	去除率/%
TOC	2.36 ~ 2.56	1.78 ~ 2.12	7.31 ~ 9.26	1.69 ~ 2.03	8.56 ~ 11.18
COD <sub>Mn</sub>	1.77 ~ 2.01	1.61 ~ 1.81	7.12 ~ 15.46	1.52 ~ 1.78	10.33 ~ 22.32
氨氮	1.46 ~ 1.54	0.46 ~ 0.61	63.56 ~ 69.12	0.28 ~ 0.39	67.11 ~ 79.56

2.4 对水头损失与反冲洗周期的影响

以滤池液面高度表征滤池运行过程中水头损失的变化,对不同进水浊度条件下常规滤池和细砂滤池的滤池液面高度进行考察,这期间对运行过程中出水浊度变化进行记录,其结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,进水浊度越高,水头损失增长得越快,滤池运行时间越短。同时,进水浊度越高,常规滤砂和细砂的水头损失增长速率的差距就越大,即为了更有效地利用细砂、延长滤池的过滤周期,进水浊度要控制在较低水平。

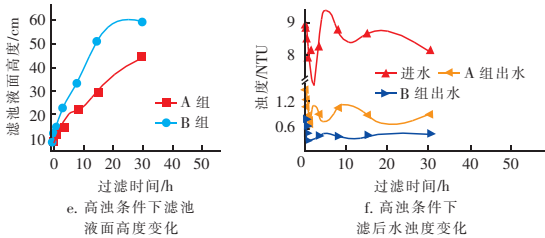
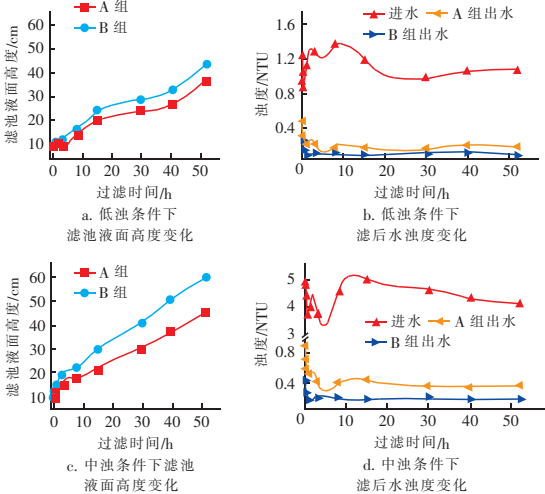


图 4 不同进水浊度下水头损失和出水浊度变化情况  
Fig.4 Change of head loss and filtered turbidity under different inlet turbidity

此外,在过滤初期,两种滤料的初滤水浊度都有不同程度升高,随着滤池的运行,滤后水浊度开始下降,细砂滤料在约 10 min 后出水浊度达到较低水平并趋于稳定,而常规滤料则需要约 20 min。同时,细砂滤料初滤水浊度较常规滤砂低。此外,在反冲洗程序下,未发现两组滤池有明显跑砂现象。

2.5 细砂滤料过滤与深度处理效果的对比

目前在净水厂比较常见的深度处理工艺主要是超滤技术和臭氧/生物活性炭。将这两种工艺与此次研究的细砂滤料进行对比,结果见表 4。超滤膜在东江原水的处理中主要在浊度和生物安全性上起到了极大贡献,能有效降低滤后水浊度以及生物量,为后续消毒工艺减轻负担。但是在有机物和氨氮问





题上,超滤膜处理乏力,这可能与东江原水中的有机物分子质量的分布特征有关<sup>[8]</sup>,高含量的小分子有机物超出了超滤膜的截留范围,导致其去除效果不明显。另外,超滤膜易堵塞,以及后期维护难、管理要求高等问题也是其应用的重点与难点。臭氧/生

物活性炭在有机物与氨氮的去除上效果显著,但易产生生物风险问题<sup>[9]</sup>,无脊椎动物的滋生不仅影响生活饮用水感官性状,还会引发一系列不良效应。同时,构筑物的加建和生产成本的增加也是臭氧/生物活性炭的又一关注点。

表4 细砂滤料与其他深度处理工艺的对比

Tab.4 Comparison between fine sand filter and other advanced treatment process

项 目	常规砂滤池	细砂滤池	超滤膜 <sup>[10]</sup>	臭氧/生物活性炭 <sup>[11-13]</sup>
COD <sub>Mn</sub> 去除率/%	13.04	17.83	13.6	43.9
TOC去除率/%	7.87	10.50	4.34	32.6
出水浊度	进水浊度 < 0.8 NTU 时,出水浊度 < 0.1 NTU	进水浊度 < 1.2 NTU 时,出水浊度 < 0.1 NTU	< 0.1 NTU	随臭氧投加量增加而降低
氨氮去除率/%	67.03	77.12	0	81.96
生物风险	弱	较常规砂弱	无	强

相比之下,细砂滤料对有机物和氨氮的去除能力不及臭氧/生物活性炭,但在有机物去除上与超滤膜相似,同时保留并提升了常规滤砂的氨氮去除能力。在浊度上,细砂滤后水比常规滤砂后水低,同时应急能力更强。对比常规滤砂,细砂对无脊椎动物的截留能力更强,反冲洗周期较短,且石英砂表面的物理性质有效阻碍了无脊椎动物的滋生。在生产管理和成本上,细砂与常规石英砂相类似,并且改造成本低,但截留污染物较多易导致反冲洗较常规滤砂频繁,而粒径小也易导致细砂在气水混冲过程中出现跑砂现象,因此采用气冲后直接进行水冲程序能有效减少上述现象,同时降低进水浊度,有效延长滤池的运行时间,提升其实用价值。

### 3 结论

① 在同等进水浊度条件下,细砂的滤后水浊度更低,有利于将出水浊度控制在 0.1 NTU 以下;同时,细砂对于高浊度的突发性水质问题应对能力更强。

② 细砂对无脊椎动物的截留率达到约 99%,同时能有效应对轮虫、桡足幼体等小尺寸无脊椎动物的暴发风险。

③ 细砂滤料进一步提升了滤池对有机物以及氨氮的去除能力。

④ 细砂滤料的水头损失增长速度更快,降低进水浊度能有效延长滤池运行时间,同时,过滤初期出水浊度较高,但细砂的初滤水浊度较常规低。

⑤ 与其他深度处理工艺相比,细砂具有部分膜处理效果,保留并提升了砂滤池原有功能,同时无需增加水厂用地。

### 参考文献:

- [1] 王利平,崔永亮,康文庆,等. 石英砂均质滤料过滤性能的试验研究[J]. 包头钢铁学院学报,2001,20(2): 174-177.  
WANG Liping, CUI Yongliang, KANG Wenqing, et al. Study on the performance of filtration by uniform quartz sand media[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2001, 20(2): 174-177 (in Chinese).
- [2] 周超. 深床过滤对水中颗粒物截留效果的实验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.  
ZHOU Chao. Effects on Particle Retention in Water of Deep Bed Filtration[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014 (in Chinese).
- [3] 郭远庆. 过滤预处理对超滤膜污染控制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.  
GUO Yuanqing. Study on the Control of Ultrafiltration Membrane Fouling by Filtration Pretreatment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [4] 杨长生. 不同粒径的均质石英砂过滤性能研究[J]. 成都航空职业技术学院学报,2008,24(4): 47-49.  
YANG Changsheng. Study of function of filterability of homogeneous quartz sands of different grain diamters [J]. Journal of Chengdu Aeronautic Vocational & Technical College, 2008, 24(4): 47-49 (in Chinese).
- [5] 章诗芳,郑锋. 降低饮用水浊度 保障水质安全[J]. 净水技术,2005,24(2): 39-41.  
ZHANG Shifang, ZHENG Feng. Lowering the turbidity of the drinking water to protect the safety of the drinking water[J]. Water Purification Technology, 2005, 24(2): 39-41 (in Chinese).

- [6] 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).
- [7] 崔云亮,顾志峰,郑兴,等. 5种滤料在循环养殖系统中去除氨氮效果的比较[J]. 热带生物学报,2015,6(3):235-241.  
CUI Yunliang, GU Zhifeng, ZHENG Xing, *et al.* Comparison of five biofilter media in ammonia-removing efficiency in the recirculation aquaculture system[J]. Journal of Tropical Biology, 2015, 6(3):235-241(in Chinese).
- [8] 韩瑾,李星,杨艳玲,等. 东江水源水有机物分子量分布及其处理工艺选择[J]. 北京工业大学学报,2013,39(1):87-91.  
HAN Jin, LI Xing, YANG Yanling, *et al.* Organic matter molecular weight distribution and process selection for the raw water of East River[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(1):87-91(in Chinese).
- [9] 李小伟,刘丽君,杨宇峰,等. BAC滤池无脊椎动物滋生对饮用水安全性的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2008,35(12):64-69.  
LI Xiaowei, LIU Lijun, YANG Yufeng, *et al.* Influence of invertebrate colonization in biological activated carbon (BAC) filter on the safety of drinking water[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2008, 35(12):64-69(in Chinese).
- [10] 申露威,陈丽珠,钟惠舟,等. 几种超滤膜组合工艺处理东江原水中试研究[J]. 供水技术,2017,11(6):1-4.  
SHEN Luwei, CHEN Lizhu, ZHONG Huizhou, *et al.* Pilot study on Dongjiang River raw water treatment by UF combination processes[J]. Water Technology, 2017, 11(6):1-4(in Chinese).
- [11] 刘清华,陈丽珠,陈卓华. 不同的常规与深度处理水厂工艺对水质保障的应用研究[J]. 城镇供水,2016(6):61-65.  
LIU Qinghua, CHEN Lizhu, CHEN Zhuohua. Study on different conventional and advanced water treatment processes to water quality assurance in waterworks[J]. City and Town Water Supply, 2016(6):61-65(in Chinese).
- [12] 何嘉莉,张晓娜. 深度处理水厂活性炭滤池氨氮去除效果分析[J]. 水处理技术,2016,42(5):89-91,96.  
HE Jiali, ZHANG Xiaona. Analysis of ammonia nitrogen removal by the depth of water treatment activated carbon filter[J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(5):89-91,96(in Chinese).
- [13] 王逸群. 臭氧-活性炭工艺中溴酸盐的生成控制研究[D]. 济南:山东建筑大学,2017.  
WANG Yiqun. Control of Bromate Formation in Ozone-Activated Carbon Process[D]. Jinan:Shandong Jianzhu University, 2017(in Chinese).

作者简介:彭进湖(1989-),男,广东东莞人,硕士,环保工程师,研究方向为给排水处理工艺。

E-mail:2392025960@qq.com

收稿日期:2019-10-30

修回日期:2019-12-30

(编辑:刘贵春)

强化水资源监管,

落实最严格水资源管理制度