

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.05.009

炭-砂与砂-炭滤池对低温低浊水净化效能的比较

苑蕊^{1,2}, 韩梅³, 刘永泽^{1,2}, 邹放³, 谢若激³

(1. 北京林业大学环境科学与工程学院 水体污染源控制技术北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学环境科学与工程学院 污染水体源控制与生态修复技术北京市高等学校工程研究中心, 北京 100083; 3. 北京市自来水集团有限责任公司 北京市供水水质工程技术研究中心, 北京 100012)

摘要: 从全流程角度出发,以北方常规净水工艺为例,通过中试探究了炭-砂与砂-炭滤池对冬季低温低浊水的净化效能,考察不同组合顺序下最终出水消毒副产物的生成情况。结果表明,相比于常规砂滤-活性炭滤池(炭池后置)工艺,活性炭滤池-砂滤池(炭池前置)工艺出水浊度降低,大粒径颗粒物减少了13.07%;炭池前置工艺对 UV_{254} 和TOC的去除率分别提高了3.5%和2.7%;同时,炭池前置工艺消毒副产物的生成量低于炭池后置工艺。炭池前置工艺可强化滤池对低温低浊水中污染物的去除效能,可以作为提升北方地区水厂水质的一种手段。

关键词: 低温低浊水; 炭池前置/后置工艺; 净化效能; 消毒副产物

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)05-0057-06

Performances of Carbon-Sand Filter and Sand-Carbon Filter for Purification of Low Temperature and Turbidity Water

YUAN Rui^{1,2}, HAN Mei³, LIU Yong-ze^{1,2}, ZOU Fang³, XIE Ruo-wei³

(1. Beijing Key Lab for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center for Water Pollution Source Control & Eco-remediation, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Beijing Engineering Research Center for Drinking Water Quality, Beijing Waterworks Group Co. Ltd., Beijing 100012, China)

Abstract: This paper investigated the performances of conventional water purification processes in northern China (carbon-sand filter and sand-carbon filter) for purification of low temperature and turbidity water in a pilot experiment in winter, and analyzed the formation of disinfection by-products in the final effluent under different combination sequences from the perspective of the whole process. Compared with the conventional sand-activated carbon filter (carbon filter postposition), the turbidity of the effluent from activated carbon-sand filter (carbon filter preposition) was lower, and the particulates with large particle size were reduced by 13.07%, and the removal rates of UV_{254} and TOC were increased by 3.5% and 2.7%, respectively. In addition, the disinfection by-products yield of activated carbon-sand

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52070014)

通信作者: 刘永泽

E-mail: liuyongze@bjfu.edu.cn;

韩梅

E-mail: hithanmei@163.com

filter was lower than that of sand-activated carbon filter. The activated carbon-sand filter enhanced the removal rate of pollutants in low temperature and turbidity water. The results are meant to provide technical support for water quality improvement of waterworks in northern China.

Key words: low temperature and turbidity water; carbon filter preposition/postposition process; purification efficiency; disinfection by-products

我国北方饮用水源在冬季呈现低温低浊的特点,低浊水中颗粒物少,有效碰撞效率低,不利于絮体的形成与沉淀;低温下混凝剂水解速率下降,影响混凝沉淀效果,导致混凝沉淀工艺对颗粒物和有机物(包括消毒副产物前体物)的去除效果较差。为保障出水水质安全性,从净水全流程角度考虑,需强化后段滤池工艺对颗粒物及有机物的去除。

目前净水工艺普遍采用砂滤-炭滤的顺序,但砂滤池对水中有机物的去除能力有限,而活性炭滤池内颗粒活性炭粒径较大,对颗粒物及微生物的截留作用弱,出水存在生物安全隐患^[1]。活性炭滤池出水中的颗粒组分包括微小颗粒物、生物颗粒及颗粒物附着有机物,其中部分有机物在后续消毒工艺中会生成消毒副产物,对出水水质造成影响,而砂滤池对颗粒物具有良好的截留效果。因此,为提高出水水质安全性,活性炭滤池前置工艺被提出并逐渐应用于旧水厂炭-砂滤池改造与污染物应急处置^[2-3],结果显示,在合适的运行条件下,炭-砂滤池可以有效提高净水工艺对有机物和氨氮的去除效果^[4-6]。然而,炭池前置工艺对低温低浊水的净水效能尚未有系统评价。

鉴于两种滤池的特性及低温低浊水处理的问题,笔者以北方净水工程为例,通过中试探究炭池前置工艺对低温低浊水的净水效能,同时考察出水消毒副产物的生成情况,旨在为北方地区低浊度水厂的改扩建和原工艺的提标改造提供技术支撑及案例指导。

1 材料与方法

1.1 试验装置与方法

试验在北京某净水厂的中试基地进行,进水为水厂原水,即南水北调水在团城湖调蓄后出水。净水处理中试工艺为原水-混合反应池-斜管沉淀池-砂滤池-活性炭滤池-清水池-出水。系统流程如图1所示,可以经砂滤池后中间水罐处调转阀门调换砂滤池、活性炭滤池顺序。中试系统设计规模为1

m³/h,各工艺单元主要设计参数如下:混合反应池水力停留时间(HRT)=20 min;斜管沉淀池斜管长(L)=1 m,斜管倾角 $\alpha=60^\circ$;砂滤池粒径 $d_{10}=0.9$ mm,滤层厚度 $h_1=1.2$ m,滤速 $v_1=8$ m/h;炭滤池滤层厚度 $h_2=1.5$ m,滤速 $v_2=8$ m/h。

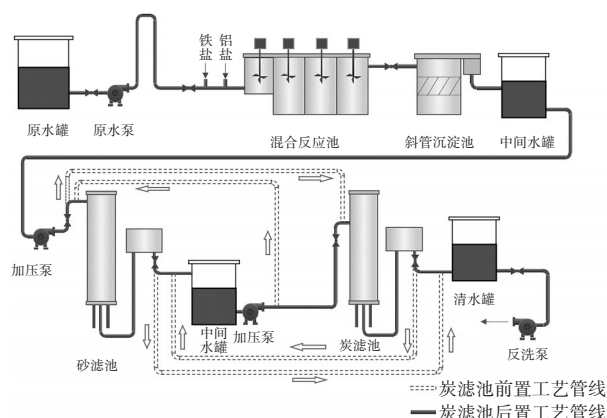


图1 净水处理工艺系统流程

Fig.1 Flow chart of water purification process

试验在2021年12月21日—2022年1月7日进行,在12月21日—29日期间进行炭池前置工艺试验,炭池前置工艺出水即砂滤池出水;12月30日—1月7日进行炭池后置工艺试验,炭池后置工艺出水即炭滤池出水。每日采集水样包括:原水、沉淀池出水、砂滤池出水、炭滤池出水。原水及沉淀池出水水质见表1。

表1 原水及沉淀池出水水质

Tab.1 Quality of raw water and sedimentation tank effluent

项目	浊度/ NTU	UV ₂₅₄ / cm ⁻¹	pH	TOC/ (mg·L ⁻¹)	水 温/℃
原水	0.363~ 0.864	0.043~ 0.050	8.138~ 8.521	3.05~ 3.48	3.5~ 5.0
沉淀池 出水	0.683~ 1.740	0.033~ 0.043	7.739~ 7.804	2.73~ 3.14	2.0~ 4.0

注: 数据通过中试在线仪表监测所得。

由原水浊度和水温可知,其属于典型的低温低浊水。砂滤池及活性炭滤池经水质监测后,均设定

为48 h反冲洗一次。

1.2 水质指标及其检测方法

1.2.1 常规指标分析方法

采用总有机碳分析仪测定总有机碳(TOC);水样经0.45 μm 聚醚砜(PES)滤膜过滤后,采用紫外可见分光光度计测定 UV_{254} ,采用荧光分光光度计测定荧光光谱(发射光谱为280~500 nm,激发光谱为200~400 nm);采用气相色谱/质谱联用仪检测三氯甲烷(CHCl_3);采用PTV1000在线浊度仪及2100AN浊度仪测定浊度。

1.2.2 颗粒物

颗粒物的数量由浊度体现;颗粒物的粒径分布采用激光粒度仪检测。

2 结果与讨论

2.1 不同滤池工艺对浊度的去除效果

不同滤池工艺对浊度的去除效果如图2所示。

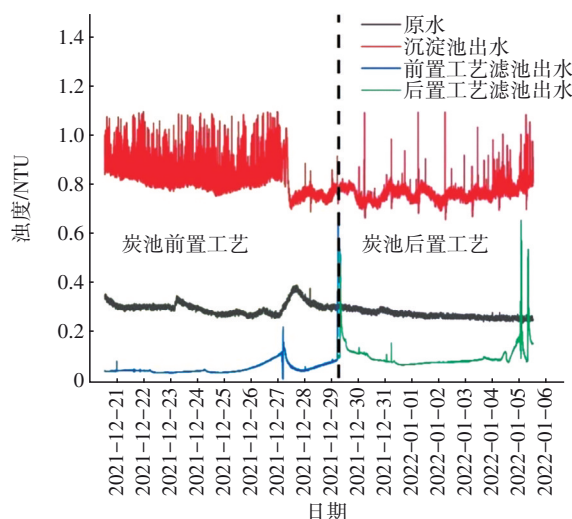


图2 不同滤池工艺对浊度的去除效果

Fig.2 Turbidity removal of different filter processes

由图2可知,在沉后水浊度相对较差且不稳定的情况下,炭池前置工艺的出水浊度比炭池后置工艺低,且更稳定,最终出水平均浊度为0.05 NTU。炭池后置工艺的出水浊度较稳定,但在过滤周期后期存在偶尔升高的情况(如2022年1月5日),这是由于生长在活性炭滤层上的生物膜随滤池长期运行老化脱落,成为出水中的絮体颗粒^[7],使出水浊度升高,最终出水平均浊度为0.09 NTU。可以看出,炭池前置工艺通过在活性炭滤池后设置砂滤池,可以有效截留絮体颗粒,对滤池工艺的出水浊度起到保障作用。值得注意的是,由于颗粒负荷较高,为

保障出水水质,炭池前置工艺的反冲洗周期由144 h降至48 h;而砂滤池进水负荷降低,其运行周期由24 h延长至48 h。炭滤池反冲洗频率对炭的使用寿命及附着微生物的影响仍需通过长期运行来验证。

2.2 不同滤池工艺对颗粒物的去除效果

由2.1节可知,两种工艺出水均可达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)对浊度限值(≤ 1 NTU)的要求,为了更深入考察两种滤池工艺对颗粒物的截留作用,采用颗粒粒径分布进一步分析,结果如图3所示。

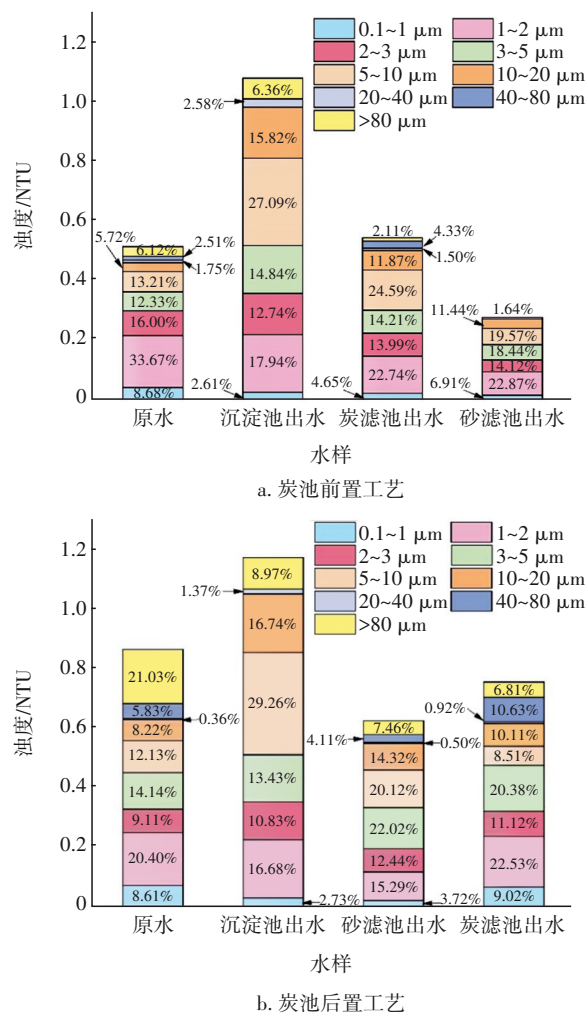


图3 各工艺单元出水中颗粒物粒径分布

Fig.3 Particle size distribution in effluent of each process unit

由图3可知,试验期间,两种工艺沉淀池出水(即滤池进水)中浊度及颗粒物粒径分布相对稳定,较大粒径颗粒物($>10 \mu\text{m}$)占比相差不大,分别为24.76%及27.08%。炭池前置工艺中,滤池工艺进水的浊度和颗粒物主要在活性炭滤池去除,砂滤池

进一步截留炭滤池出水中的颗粒物,最终出水水质较好,其中大粒径颗粒物占比由19.81%降低至13.08%。而在炭池后置工艺中,砂滤池虽然具有较好的去除浊度与颗粒物的能力,但活性炭滤池中脱落的生物膜会使出水浊度及大粒径颗粒物占比增加。砂滤池出水浊度为0.625 NTU,但炭滤池出水又增加至0.754 NTU,同时发现大粒径颗粒物占比由26.39%增加至28.47%。由此可知,炭池前置工艺在去除颗粒物上具有较大优势。

2.3 不同滤池工艺对有机物的去除效果

2.3.1 对 UV_{254} 及TOC的去除效果

不同滤池工艺对 UV_{254} 及TOC的去除效果如图4所示。

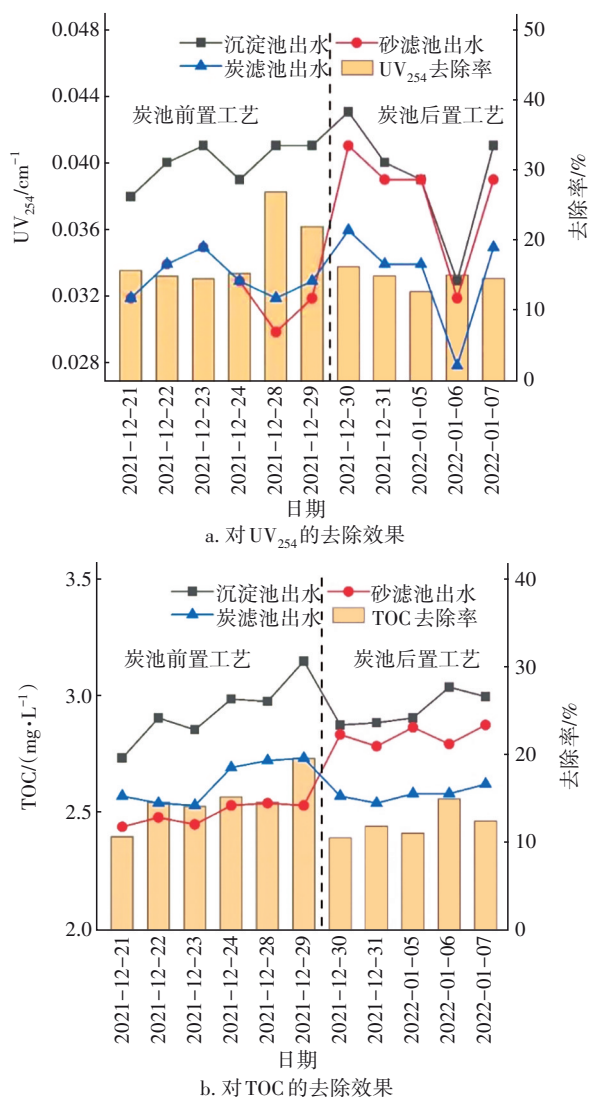


图4 不同滤池工艺对 UV_{254} 及TOC的去除效果

Fig.4 UV_{254} and TOC removal of different filter processes

由图4可知,两种滤池工艺对 UV_{254} 及TOC均有

去除效果,炭池前置工艺中末端砂滤池出水 UV_{254} 和TOC的平均值分别为 $0.0327 cm^{-1}$ 和 $2.495 mg/L$,对 UV_{254} 和TOC的平均去除率分别为18.3%和14.8%;炭池后置工艺中末端炭滤池出水 UV_{254} 及TOC的平均值分别为 $0.0334 cm^{-1}$ 和 $2.578 mg/L$,对 UV_{254} 及TOC的平均去除率分别为14.8%和12.1%。因此,炭池前置工艺对 UV_{254} 及TOC的去除效果略优于炭池后置工艺。研究表明^[8],滤后水 UV_{254} 与三卤甲烷前体物(THMFP)和卤乙酸前体物(HAAFP)等消毒副产物之间存在明显的线性关系。因此,采用炭池前置工艺可以降低消毒副产物生成的风险,保障出水的化学安全性。

值得注意的是,两种滤池工艺对 UV_{254} 及TOC的去除率均偏低,且起主要作用的是炭滤池,砂滤池的去除能力有限。经分析可知,南水北调水中有机物的相对分子质量较小,主要依靠活性炭滤池的吸附作用与生物作用去除^[9]。为保证出水水质达标,本研究炭滤池的反冲洗周期为48 h,由于运行周期较短可能导致活性炭滤池的生物作用不明显,仅以吸附作用为主,对有机物的去除能力有限。

2.3.2 三维荧光光谱分析

根据溶解性有机物激发波长(λ_{Ex})、发射波长(λ_{Em})的荧光峰位置,三维荧光光谱图主要分为5个区: $\lambda_{Ex} < 250 nm$ 、 $\lambda_{Em} < 350 nm$ 为I区和II区,与芳香族蛋白质有关; $\lambda_{Ex} < 250 nm$ 、 $\lambda_{Em} > 350 nm$ 为III区,与小分子类富里酸有关; $\lambda_{Ex} > 250 nm$ 、 $\lambda_{Em} < 380 nm$ 为IV区,与溶解性微生物代谢产物有关; $\lambda_{Ex} > 250 nm$ 、 $\lambda_{Em} > 380 nm$ 为V区,与分子质量较大的类腐殖酸有关。

对不同滤池工艺进、出水的三维荧光光谱进行体积积分计算,结果如图5所示。三维荧光光谱分析结果与2.3.1节相符。在炭池前置工艺中,活性炭滤池出水较沉淀池出水在III区、IV区、V区的荧光峰体积积分均减小,说明活性炭滤池对较高浓度的有机物去除效果明显,随后在砂滤池出水中I和II区、IV区体积积分减小,说明进一步去除了芳香族蛋白质及溶解性微生物代谢产物;在炭池后置工艺中,砂滤池出水中I和II区、IV区的体积积分减小,说明砂滤对芳香族蛋白质及溶解性微生物代谢产物有一定的去除作用,随后在活性炭滤池中III区、V区体积积分减小,说明炭滤对类富里酸及类腐殖酸有机物有较强的去除作用,但I和II区、IV区体积积分略有增加,即芳香族蛋白质及溶解性微

生物代谢产物有所增加,佐证了活性炭滤池出水会携带生物颗粒的现象。相比于炭池后置工艺,炭池前置工艺能够降低活性炭滤池出水的生物安全性隐患,保障出水品质。

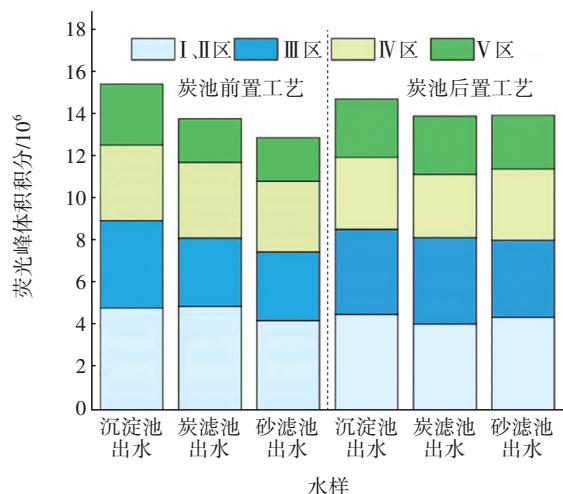


图5 不同滤池工艺进、出水的三维荧光体积分

Fig.5 Three dimensional fluorescence volume integration of influent and effluent of different filter processes

2.4 不同滤池工艺对消毒工艺的影响

2.4.1 余氯的变化

分别在两种滤池组合工艺出水中投加1.5 mg/L的NaClO反应2及24 h,测定水中余氯浓度。结果显示,反应2 h后余氯分别为1.19和1.16 mg/L,反应24 h后余氯分别为0.48和0.45 mg/L。余氯满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求。两种滤池工艺出水NaClO的消耗速率相似,余氯变化相差不大。

2.4.2 UV_{254} 的变化

分别在两种滤池组合工艺出水中投加1.5 mg/L的NaClO反应2及24 h,测定水中 UV_{254} 的变化。在较短时间内(2 h),炭池前置和后置工艺出水 UV_{254} 变化相差不大, UV_{254} 分别降低了1.58%、2.93%;与NaClO反应24 h后,两工艺出水 UV_{254} 分别降低了9.21%、20.98%,炭池后置工艺出水 UV_{254} 的减少量为炭池前置工艺的两倍之多。这表明在炭池后置工艺出水中有机物更易被NaClO氧化,生成消毒副产物的风险亦高于炭池前置工艺。

2.4.3 三氯甲烷生成量的变化

分别在两种滤池组合工艺出水中投加1.5 mg/L的NaClO反应2及24 h,测定水中的三氯甲烷生成量。两种滤池工艺出水反应2及24 h后,三氯甲烷

生成量均不超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的限值($\leq 60 \mu\text{g/L}$)。反应2及24 h时,炭池后置工艺出水中三氯甲烷的生成量(2 h为 $9.5255 \mu\text{g/L}$,24 h为 $34.8080 \mu\text{g/L}$)均高于炭池前置工艺出水(2 h为 $5.8717 \mu\text{g/L}$,24 h为 $31.3377 \mu\text{g/L}$)。反应2 h时炭池后置工艺出水三氯甲烷的生成量高达炭池前置工艺出水的1.6倍。炭池后置工艺出水携带更多蛋白质类、微生物代谢产物及腐殖质类有机物,易被NaClO氧化生成消毒副产物,与 UV_{254} 的变化情况相符^[10]。而由于砂滤池进一步去除了活性炭滤池出水中的芳香族蛋白质及溶解性微生物代谢产物,炭池前置工艺出水有机物中消毒副产物前体物减少,消毒副产物的生成量低于炭池后置工艺。

3 结论

在低温低浊水质条件下,炭池前置工艺的净水效能优于炭池后置工艺。相较于传统的炭池后置工艺,炭池前置工艺的出水浊度更低、更稳定,对大粒径颗粒物的去除率提高了13.07%;对 UV_{254} 的去除率提高了3.5%;对TOC的去除率提高了2.7%。炭池后置工艺中活性炭滤池出水存在携带生物颗粒的现象,而炭池前置工艺中后续砂滤池能够降低活性炭滤池出水的生物安全性隐患,保障出水品质。炭池前置工艺中投加NaClO后消毒副产物前体物的减少量、消毒副产物的生成量较炭池后置工艺分别降低了11.77%和9.97%。因此,从短期来看,炭池前置工艺在北方水厂低温低浊期可弥补絮凝沉淀效果较差的不足,有效强化滤池工艺对颗粒物及有机物的去除效能,减少消毒副产物的生成,提高出厂水品质。但由于炭池前置工艺中炭滤池进水浊度升高,需增加炭滤池反冲洗频率,这对炭滤池中活性炭使用寿命及微生物生长产生的影响还需要进一步长期运行监测方可更准确评估。

参考文献:

- [1] PEZESHK A, GAO Y, UCHINO K. Ultrasonic piezoelectric hypochlorous acid humidifier for disinfection applications [J]. Annual Research, 2004, 2: 73-84.
- [2] 王广智,李伟光,王锐,等. 炭砂滤池在松花江污染应急处理中的应用特性研究[J]. 给水排水, 2007, 33(8): 11-15.

- WANG Guangzhi, LI Weiguang, WANG Rui, *et al.* Study on emergent application of combined activated carbon and sand filter in the Songhua River pollution accident[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, 33(8): 11-15 (in Chinese).
- [3] 冯令艳, 袁一星, 吕炳南. 炭砂滤池去除硝基苯等微污染有机物的研究[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(15): 58-60.
- FENG Lingyan, YUAN Yixing, LÜ Bingnan. Study on removal of nitrobenzene and other organic micro-pollutants in carbon-sand filter [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(15): 58-60 (in Chinese).
- [4] MATILAINEN A, VIENO N, TUHKANEN T. Efficiency of the activated carbon filtration in the natural organic matter removal [J]. *Environment International*, 2006, 32(3): 324-331.
- [5] 冯硕, 张晓健, 陈超, 等. 炭砂滤池在饮用水处理中的研究现状及前景[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(4): 16-19.
- FENG Shuo, ZHANG Xiaojian, CHEN Chao, *et al.* Research status and prospect of GAC-sand dual media filters used in drinking water treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(4): 16-19 (in Chinese).
- [6] 镇祥华, 李露, 万年红, 等. 给水厂炭砂滤池设计参数探讨[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(16): 81-85.
- ZHEN Xianghua, LI Lu, WAN Nianhong, *et al.* Discussion on design parameters of carbon-sand filter in waterworks [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(16): 81-85 (in Chinese).
- [7] 镇祥华, 余琴芳, 何晓梅, 等. 某多水源水厂不同组合工艺流程的试验研究[J]. *给水排水*, 2020, 46(6): 72-78.
- ZHEN Xianghua, YU Qinfang, HE Xiaomei, *et al.* Study on the selection of different combination processes in multi-source water plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(6): 72-78 (in Chinese).
- [8] ANUMOL T, SGROI M, PARK M, *et al.* Predicting trace organic compound breakthrough in granular activated carbon using fluorescence and UV absorbance as surrogates [J]. *Water Research*, 2015, 76: 76-87.
- [9] 张瀚中. 基于南水北调水源活性炭滤池对有机物去除的提高技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- ZHANG Hanzhong. Research on Improvement Technology of Activated Carbon Filter on Organic Matter Removal in Source Water from the South-to-North Water Diversion Project [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020 (in Chinese).
- [10] 江钊泓, 毕然, 杜家豫, 等. 基于不同水厂水质调查的消毒副产物生成趋势及模型预测[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(2): 515-523.
- JIANG Gahong, BI Ran, DU Jiayu, *et al.* Disinfection by-products formation and model prediction based on water quality surveys of different drinking water treatment plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(2): 515-523 (in Chinese).

作者简介: 苑蕊 (1997-), 女, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要研究方向为给水处理。

E-mail: yuanr19970707@163.com

收稿日期: 2022-08-30

修回日期: 2022-10-11

(编辑: 沈靖怡)

大力推进水利薄弱环节建设,
提高防灾减灾能力