

# 活性炭/超滤工艺提升和保障二次供水安全性研究

曾庆品<sup>1</sup>, 李 星<sup>1</sup>, 杨艳玲<sup>1</sup>, 刘永旺<sup>1,2</sup>, 赵 锂<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中国建筑设计研究院有限公司, 北京 100044)

**摘 要:** 提出了以超滤(UF)和颗粒活性炭(GAC)为基础的二次供水保障措施,对比了UF、GAC以及GAC/UF工艺对二次供水水质的保障作用。结果表明,UF可以进一步改善二次供水的感官指标并提高生物安全性。GAC可以更显著地去除有机物,同时对金属污染物也有一定的去除效果,但GAC能够消耗余氯,无法保障饮用水的生物安全性,还会出现浊度增加和颗粒物泄漏等问题。GAC/UF工艺可以充分发挥GAC和UF的除污染特性,补加消毒剂后能够更有效地改善感官、微生物和有机物指标,从而全面提高和保障饮用水水质。可见,GAC和UF工艺作为二次供水水质保障屏障具有良好的可行性和适用性。

**关键词:** 二次供水; 超滤; 活性炭; 水质保障

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0044-05

## Improvement and Guarantee of Secondary Water Supply Safety by Using Activated Carbon/Ultrafiltration Process

ZENG Qing-pin<sup>1</sup>, LI Xing<sup>1</sup>, YANG Yan-ling<sup>1</sup>, LIU Yong-wang<sup>1,2</sup>, ZHAO Li<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Secondary water supply guarantee measures were put forward based on ultrafiltration (UF) and granular activated carbon (GAC) technologies, and the guarantee effects of UF, GAC and GAC/UF technologies on water quality of secondary water supply were compared. The results showed that UF could further improve sensory indicators and bio-safety of secondary water supply. GAC could remove organic matter more significantly, and it also had a certain removal effect on metal contaminants. However, GAC could consume the residual chlorine which reduced the bio-safety of drinking water, and it also led to problems of turbidity increase and particles leakage. The GAC/UF process could utilize the decontamination characteristics of GAC and UF, and the addition of disinfectants could more effectively improve the sensory, microbial and organic indicators, so quality of drinking water was comprehensively improved and guaranteed. Therefore, GAC and UF processes had good feasibility and applicability as security barriers of water quality of secondary water supply.

**Key words:** secondary water supply; ultrafiltration; activated carbon; water quality security

我国饮用水安全保障强调“从源头到龙头”的多级屏障体系,但现阶段水质保障技术多集中在对

水源水和水厂进水的处理,而对市政管网和二次供水的保障技术则非常有限。由于市政管网和二次

供水系统中均未设置针对水质提升和水质保障的设施,因此自来水在输配到建筑物的二次供水系统时,经常会出现水质明显下降甚至超标的问题,近年来大多水质问题都与二次供水有关。根据我国多个城市二次供水的水质监测和调研情况,污染物主要包括浊度、色度、肉眼可见物等感官指标,余氯、大肠菌群、细菌总数等微生物指标,以及有机物、消毒副产物、铁、锰、铝等化学安全性指标<sup>[1~5]</sup>。

超滤(UF)对浊度、颗粒物、微生物等有极佳的截留效能<sup>[6]</sup>,可有效改善二次供水的感官指标和微生物指标;颗粒活性炭(GAC)对溶解性有机物、色度、臭味、消毒副产物等有良好的去除效果<sup>[7]</sup>,可有效改善二次供水的化学指标。UF和GAC是绿色物化净水技术,可避免二次污染及安全性风险问题,是可行的二次供水水质保证措施。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验用水

试验用水为某大学实验室的二次供水,具体水质如下:浊度为0.076~0.158 NTU,平均为0.103 NTU;溶解性有机物(DOC)为1.879~2.424 mg/L,平均为2.223 mg/L;UV<sub>254</sub>为0.009~0.012 cm<sup>-1</sup>,平均为0.011 cm<sup>-1</sup>;余氯为0.05~0.46 mg/L,平均为0.163 mg/L;细菌总数为0~3 CFU/mL,平均为1.5 CFU/mL;pH值为7.31~7.65,平均为7.45;总铁为0.088~0.161 mg/L,平均为0.119 mg/L;总铝为0.039~0.070 mg/L,平均为0.053 mg/L。

### 1.2 试验流程

试验流程如图1所示。

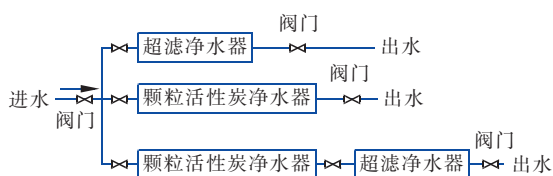


图1 试验流程

Fig.1 Schematic diagram of experimental process

试验装置包括市售内压式UF净水器和GAC净水器。UF净水器额定流量和工作压力分别为1.6 L/min和0.1~0.3 MPa,采用的中空纤维超滤膜平均孔径为0.01 μm。GAC净水器额定流量和工作压力分别为1.6 L/min和0.08~0.35 MPa,采用椰壳活性炭。UF净水器采用错流过滤方式,GAC净水器为常规过滤方式。

## 1.3 分析项目及方法

浊度采用散射光浊度仪测定,UV<sub>254</sub>采用紫外可见分光光度计测定,DOC采用总有机碳分析仪测定,颗粒数和粒径分布采用颗粒计数仪测定,余氯采用便携式余氯测定仪检测,总铁采用邻二氮菲法测定,总铝采用铬天青S法测定,细菌总数采用平板计数法测定,蛋白质和腐殖质采用荧光光度计测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 颗粒污染物

试验结果表明,当UF、GAC和GAC/UF的进水浊度分别为0.114、0.098和0.096 NTU时,出水浊度分别为0.039、0.138和0.037 NTU;相应的进水颗粒数分别为13.9、15.8和15.5个/mL,出水颗粒数分别为1.9、80.1和1.6个/mL。可见,UF能有效去除浊度和颗粒物,但单独采用GAC装置则出水产生了较明显的浊度升高和颗粒泄漏问题,增加了颗粒物和微生物污染的风险。

图2为GAC装置进、出水颗粒物的粒径分布情况。出水中2~3、3~5和5~8 μm的颗粒分别增加了652.4%、391.1%和104%。出水浊度和颗粒物数量增加主要是由于颗粒泄漏造成的,而GAC/UF对浊度和颗粒物有很好的截留效果,这主要是由于超滤膜可以有效截留GAC泄漏的颗粒物,保障了出水水质的安全性。

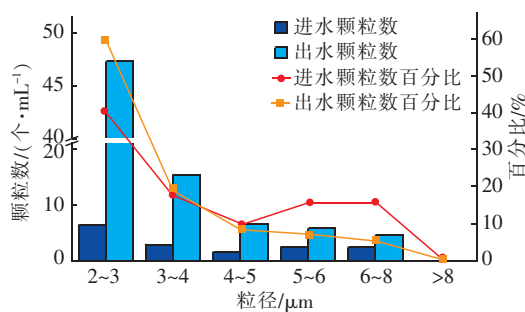


图2 GAC装置进、出水颗粒物的粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of influent and effluent in GAC device

## 2.2 生物安全性分析

### 2.2.1 余氯

当UF、GAC和GAC/UF的进水余氯分别为0.106、0.253、0.131 mg/L时,出水余氯分别为0.081、0.016、0.001 mg/L,余氯消减率分别为23.6%、93.7%和99.2%。可以看出,UF对余氯的影响较小,GAC和GAC/UF对余氯的消减作用较

大,其出水余氯浓度远低于  $0.05 \text{ mg/L}$ 。这是因为 UF 对污染物的去除以机械截留作用为主,并辅以膜的吸附作用,UF 孔径无法截留余氯,导致 UF 对余氯的消减作用较小。GAC 对余氯的去除是吸附作用与化学作用的共同结果,GAC 除了对余氯的吸附作用外,还可以通过化学反应进一步降低余氯含量<sup>[8]</sup>。因此,采用 GAC 和 GAC/UF 工艺时,需要补充消毒剂。

### 2.2.2 微生物

当 UF、GAC 和 GAC/UF 的进水细菌总数分别为  $1.7$ 、 $1.3$  和  $1.5 \text{ CFU/mL}$  时,出水细菌总数分别为  $0.3$ 、 $42.7$  和  $0.5 \text{ CFU/mL}$ 。可以看出,UF 和 GAC/UF 的出水细菌总数明显降低,而 GAC 的出水细菌总数呈现显著增加的趋势。理论上,UF 可以截留全部细菌,但出水中仍能检测到极少数细菌的存在,这可能是由部分膜丝的破损以及取样、检测过程中的误差和污染等因素造成的。因此,UF 能高效截留各种微生物,并且当进水细菌总数含量较高时,出水指标仍远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的限值,能够最大程度地保障出水水质的生物安全性<sup>[9]</sup>。GAC 的出水细菌总数大幅度增加,主要是由于 GAC 显著消减了余氯,同时 GAC 有利于微生物的附着和生长,使得出水中的细菌数增加明显<sup>[10]</sup>。

### 2.3 金属污染物

试验分析了铁和铝的粒径分布情况,结果表明,铁的粒径主要分布在  $100 \text{ ku} \sim 0.45 \mu\text{m}$  和  $>0.45 \mu\text{m}$  区间,分别占  $12.4\%$  和  $85.5\%$ ,表明铁主要以较大的颗粒形态存在,易被超滤膜截留。粒径分布在  $>0.45 \mu\text{m}$ 、 $100 \text{ ku} \sim 0.45 \mu\text{m}$ 、 $30 \sim 100 \text{ ku}$ 、 $10 \sim 30 \text{ ku}$  以及  $<10 \text{ ku}$  的铝颗粒分别占  $34.4\%$ 、 $19.8\%$ 、 $14.5\%$ 、 $9.7\%$  和  $21.6\%$ ,可见铝的粒径和形态分布范围较大,其中  $<100 \text{ ku}$  的铝颗粒占  $45.8\%$ ,对于主要依靠机械筛分作用去除污染物的 UF,对铝的截留效果相对较差。

当 UF、GAC 和 GAC/UF 的进水铁含量分别为  $0.127$ 、 $0.107$  和  $0.122 \text{ mg/L}$  时,出水铁含量分别为  $0.013$ 、 $0.096$  和  $0.008 \text{ mg/L}$ 。相应的进水铝含量分别为  $0.051$ 、 $0.054$  和  $0.053 \text{ mg/L}$ ,出水铝含量分别为  $0.036$ 、 $0.038$  和  $0.019 \text{ mg/L}$ 。经计算,UF 对铁和铝的去除率分别为  $89.8\%$  和  $29.4\%$ ;GAC 对铁和铝的去除率分别为  $10.3\%$  和  $29.6\%$ ;GAC/UF 对铁

和铝的去除率分别为  $93.4\%$  和  $64.2\%$ 。可见,UF 对铁的截留效果显著,对铝的截留效果较差,这与上述结果一致,说明 UF 可以有效截留较大粒径的铁,而对较小粒径的铝则截留效果不佳。GAC 工艺除铁效果较差,但除铝效果略优于除铁,这可能与活性炭的吸附作用以及铁和铝的粒径和形态分布有关。GAC/UF 的铁和铝去除率比 UF 分别提高了  $3.6$  和  $34.8$  个百分点,比 GAC 分别提高了  $83.1$  和  $34.6$  个百分点,可见 GAC/UF 工艺对铁的截留主要是 UF 的作用,且组合工艺中 UF 和 GAC 对铝均有较好的截留效果。

### 2.4 有机污染物

#### 2.4.1 $\text{UV}_{254}$ 和 DOC

图3为不同分子质量的 DOC 和  $\text{UV}_{254}$  分布。二次供水中的有机物以小分子物质为主,分子质量  $<1 \text{ ku}$  的 DOC 和  $\text{UV}_{254}$  分别占  $72.6\%$  和  $53.6\%$ ,分子质量  $>100 \text{ ku}$  的仅占  $6.9\%$  和  $9.5\%$ 。

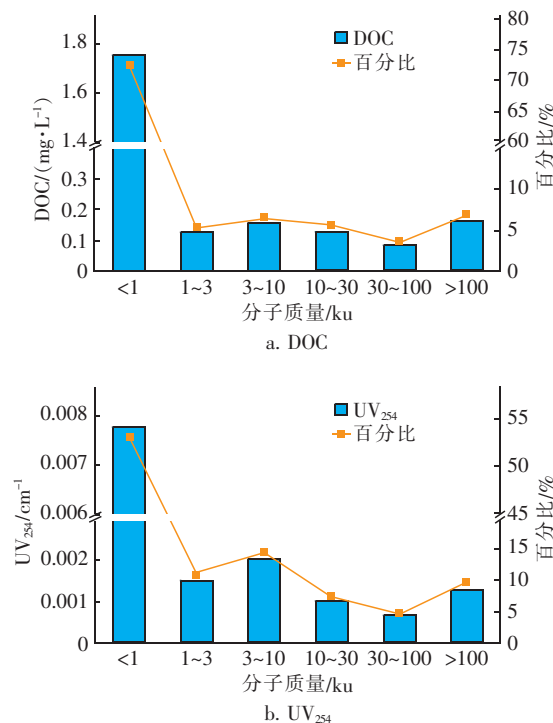


图3 不同分子质量的 DOC 和  $\text{UV}_{254}$  分布

Fig. 3 Distribution of DOC and  $\text{UV}_{254}$  with different molecular weight

当 UF、GAC 以及 GAC/UF 的进水 DOC 分别为  $2.228$ 、 $2.216$ 、 $2.226 \text{ mg/L}$  时,出水 DOC 浓度分别为  $2.128$ 、 $1.407$  和  $1.403 \text{ mg/L}$ ;相应的进水  $\text{UV}_{254}$  分别为  $0.0102$ 、 $0.0107$  和  $0.0118 \text{ cm}^{-1}$ ,出水  $\text{UV}_{254}$



分别为0.009 6、0.003 8和0.004 1  $\text{cm}^{-1}$ 。可见,UF对DOC和 $\text{UV}_{254}$ 的去除率分别为4.5%和5.9%,而GAC对DOC和 $\text{UV}_{254}$ 的去除率分别达到36.5%和64.5%,GAC/UF对DOC、 $\text{UV}_{254}$ 的去除率分别为37%和65.3%。

综上所述,UF对DOC和 $\text{UV}_{254}$ 的去除效果不佳,主要是由于UF对小分子有机物的截留效果较差,而水中分子质量 $<100\text{ ku}$ 的DOC和 $\text{UV}_{254}$ 百分比分别为93.1%和91.5%。GAC对DOC和 $\text{UV}_{254}$ 的去除效果较好,主要是因为GAC对分子质量 $<3\text{ ku}$ ,特别是分子质量为 $500\sim1\,000\text{ u}$ 的有机物的去除效果较好。

从图3还可以看出,分子质量 $<3\text{ ku}$ 的DOC和 $\text{UV}_{254}$ 分别占77.8%和64.3%,分子质量 $<1\text{ ku}$ 的相应值分别为72.6%和53.6%,可见能被GAC高效去除的有机物所占比例较高。另外,GAC对 $\text{UV}_{254}$ 的去除率高于DOC,表明GAC对芳香族类溶解性有机物有更好的去除效果。GAC/UF对DOC和 $\text{UV}_{254}$ 的去除率仅比GAC提高了0.5和0.8个百分点,说明GAC/UF工艺中的GAC对有机污染物的去除起主要作用。

#### 2.4.2 蛋白质和腐殖质

图4为UF、GAC和GAC/UF工艺进出水的三维荧光光谱。由图4(a)、(c)、(e)可知,进水中主要存在蛋白质(B峰)、紫外区域腐殖质(A峰)和可见光区域腐殖质(C峰)。由图4(a)和(b)可知,UF的蛋白质荧光强度消减率为29.5%,紫外区域和可见光区域腐殖质荧光强度消减率分别为23.8%和0.6%。从图4(c)和(d)可以看出,GAC的蛋白质荧光强度消减率为50%,紫外区域和可见光区域腐殖质荧光强度消减率分别为68.3%和59.3%。从图4(e)和(f)可以看出,GAC/UF的蛋白质荧光强度消减率为49.5%,紫外区域和可见光区域腐殖质荧光强度消减率分别为68.5%和59.6%。可见,UF可以去除部分蛋白质和紫外区域腐殖质,但对可见光区域腐殖质去除效果不明显,这与Saravia等人<sup>[11]</sup>的研究结果类似。GAC对蛋白质和腐殖质的去除效果明显优于UF,这与 $\text{UV}_{254}$ 的去除特性一致。另外,UF对GAC出水中的蛋白质和腐殖质基本没有去除作用,这与GAC/UF对 $\text{UV}_{254}$ 和DOC的去除规律一致,由于GAC有效去除了可被UF截留的蛋白质和腐殖质,因此可减轻UF的膜污染。

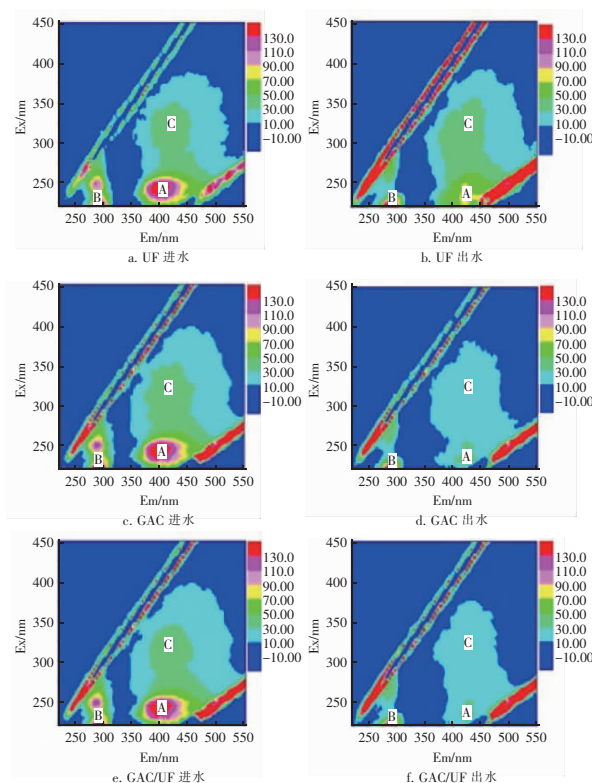


图4 UF、GAC和GAC/UF工艺进出水的三维荧光光谱

Fig. 4 Three-dimensional fluorescence spectra of influent and effluent in UF, GAC and GAC/UF

### 3 结论

① UF可以高效截留浊度、微生物、颗粒物以及铁等污染物,并且可以有效避免余氯过低的问题,是提高和保障饮用水感官指标和微生物指标的有效措施,但是其对有机物的去除效果相对较差。实践证明,对于有机物含量较低的二次供水,UF具有很好的适用性。

② GAC对有机物的去除效果较好,对铁和铝等金属污染物也有一定的去除作用,可有效提高化学安全性,但其出水无法保障水质的生物安全性,同时会出现浊度增加和颗粒物泄漏等问题,不适合单独作为二次供水的保障工艺。

③ GAC/UF工艺可以充分发挥GAC和UF的水质保障作用,可全面改善感官指标、微生物指标和化学指标,但需要补充消毒剂。

④ GAC/UF工艺能够全面提高和保障二次供水的水质,UF和GAC/UF工艺在补加消毒剂之后均适宜作为“从源头到龙头”的饮用水安全保障体系中的屏障,在二次供水中具有较好的可行性和适用性。

## 参考文献:

- [1] 张志鹏,杜志忠,刘志平,等. 2012—2013年北京市平谷区生活饮用水水质监测结果[J]. 职业与健康, 2015,31(17):2380-2382.  
Zhang Zhipeng, Du Zhizhong, Liu Zhiping, *et al.* Analysis on monitoring results of drinking water quality in Pinggu District of Beijing from 2012-2013[J]. Occupation and Health, 2015, 31(17):2380-2382 (in Chinese).
- [2] 叶玉龙,季海峰,吴云,等. 上海市金山区生活饮用水水质理化指标检测结果分析[J]. 中国校医, 2015, 29(1):15-16, 18.  
Ye Yulong, Ji Haifeng, Wu Yun, *et al.* Determination of physicochemical indexes of drinking water in Jinshan District, Shanghai City[J]. Chinese Journal of School Doctor, 2015, 29(1):15-16, 18 (in Chinese).
- [3] 黄培枝,王宝珍,陈剑锋,等. 2010—2012年厦门市二次供水水质监测结果分析[J]. 环境卫生学杂志, 2014, 4(6):557-558, 564.  
Huang Peizhi, Wang Baozhen, Chen Jianfeng, *et al.* Monitoring results of secondary water supply in Xiamen City in 2010-2012[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2014, 4(6):557-558, 564 (in Chinese).
- [4] 邢培志,冯波. 2012年—2013年成都市生活饮用水中19项元素指标的监测分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(17):2971-2972, 2976.  
Xing Peizhi, Feng Bo. Monitoring and analysis of the index of 19 elements in drinking water in Chengdu during 2012-2013[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2015, 25(17):2971-2972, 2976 (in Chinese).
- [5] 薛爱龙,蒋英,胡晓磐. 2011—2013年苏州市吴江区二次供水水质监测情况[J]. 职业与健康, 2015, 31(5):650-652, 655.  
Xue Ailong, Jiang Ying, Hu Xiaopan. Secondary water quality monitoring in Wujiang District of Suzhou City from 2011-2013[J]. Occupation and Health, 2015, 31(5):650-652, 655 (in Chinese).
- [6] 夏端雪,辛凯,马永恒,等. 超滤膜对水中颗粒物的去除效果研究[J]. 给水排水, 2011, 37(S1):19-22.  
Xia Duanxue, Xin Kai, Ma Yongheng, *et al.* Study on particle removal by ultrafiltration membrane[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(S1):19-22 (in Chinese).
- [7] 笱秀丽. 活性炭及联用工艺去除自来水中有有机物的效果[J]. 中国给水排水, 2008, 24(5):48-51, 56.  
Gou Xiuli. Organic removal from tap water by activated carbon and combined process[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(5):48-51, 56 (in Chinese).
- [8] 张怀旭,刘婉冬,李冰璟,等. 活性炭去除水中余氯的研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(5):63-68.  
Zhang Huaixu, Liu Wandong, Li Bingjing, *et al.* Activated carbon treatment for removing residual free chlorine in water[J]. Environmental Pollution & Control, 2008, 30(5):63-68 (in Chinese).
- [9] 傅金祥,卢善文,曲明,等. 超滤膜直接过滤处理低温低浊水的试验[J]. 净水技术, 2014, 33(5):68-72.  
Fu Jinxiang, Lu Shanwen, Qu Ming, *et al.* Experiment of water treatment of direct filtration under low temperature and low turbidity with ultrafiltration membrane process[J]. Water Purification Technology, 2014, 33(5):68-72 (in Chinese).
- [10] 祝玲,刘文君,袁永钦,等. 生物活性炭工艺颗粒物分布及微生物安全性研究[J]. 给水排水, 2009, 35(3):23-28.  
Zhu Ling, Liu Wenjun, Yuan Yongqin, *et al.* Study on the particle distribution and biological safety of BAC process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(3):23-28 (in Chinese).
- [11] Saravia F, Zwiener C, Frimmel F H. Interactions between membrane surface, dissolved organic substances and ions in submerged membrane filtration[J]. Desalination, 2006, 192(1/3):280-287.



作者简介:曾庆品(1990-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为饮用水安全保障技术。

E-mail:1500599785@qq.com

收稿日期:2018-02-28