

# 反粒度生物滤池处理污染源水的研究

刘宏远<sup>1</sup>, 叶守开<sup>1</sup>, 朱海涛<sup>2</sup>, 邢岚英<sup>1</sup>, 沈卫民<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 嘉兴市水务集团有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

**摘 要:** 针对嘉兴地区污染源水,进行了上向流反粒度生物滤池应用研究,以期实现在低能耗条件下去除氨氮和浊度,同时达到保护后续臭氧/活性炭工艺的目的。研究表明,在进水氨氮为1.57~4.02 mg/L、浊度为1.01~2.86 NTU,反粒度生物滤池气水比为1:4(水温低于10℃时降为1:5),滤速为11 m/h的条件下,反应器稳定运行期间出水氨氮为0.02~0.60 mg/L,平均去除率达到91%;出水浊度<0.55 NTU,平均去除率达到84%,保护了后续臭氧/活性炭工艺。反粒度生物滤池单位运行能耗只有同期运行的生物接触氧化池的14%~18%。此外,反粒度生物滤池对亚硝酸盐氮、COD<sub>Mn</sub>、UV<sub>254</sub>和TOC都有一定的去除效果。

**关键词:** 污染源水; 上向流反粒度生物滤池; 氨氮; 浊度

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)03-0052-05

## Treatment of Contaminated Source Water Using Reverse Grain Biological Filter

LIU Hong-yuan<sup>1</sup>, YE Shou-kai<sup>1</sup>, ZHU Hai-tao<sup>2</sup>, XING Lan-ying<sup>1</sup>, SHEN Wei-min<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Jiaxing Water Investment Group Co. Ltd., Jiaxing 314000, China)

**Abstract:** An up-flow reverse grain biological filter was used to remove ammonia nitrogen and turbidity from the contaminated source water in Jiaxing with low energy consumption, and to protect the subsequent ozone/biological activated carbon process in the meantime. The operation conditions of the filter included ammonia nitrogen concentrations from 1.57 to 4.02 mg/L, turbidities between 1.01 NTU and 2.86 NTU, a gas-water ratio of 1:4 (adjusted to 1:5 when the water temperature was below 10℃) and a filtration rate of 11 m/h. The results indicated that the effluent ammonia nitrogen was from 0.02 to 0.60 mg/L and the turbidity was less than 0.55 NTU, with an average removal efficiency of 91% and 84%, respectively. The low effluent turbidity implied that the subsequent ozone/biological activated carbon process was protected. In addition, the filter achieved a good performance in nitrite nitrogen, COD<sub>Mn</sub>, UV<sub>254</sub> and TOC removal. According to the energy consumption calculation, the unit operation energy consumption of the reverse grain biological filter was as low as 14% to 18% of that of the biological contact oxidation tank operated in the same period.

**Key words:** contaminated source water; up-flow reverse grain biological filter; ammonia nitrogen; turbidity

嘉兴地区水源水的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和氨氮浓度长期处于  $4 \sim 8 \text{ mg/L}$  和  $0.5 \sim 4 \text{ mg/L}$ , 是典型的氨氮、有机物污染的河网水质。针对这一问题, 大量学者采用常规处理工艺加生物处理工艺, 并结合臭氧/生物活性炭深度处理工艺保证出水氨氮  $\leq 0.5 \text{ mg/L}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}} \leq 3 \text{ mg/L}$ <sup>[1]</sup>。钱东等<sup>[2]</sup>对比研究了生物接触氧化池和生物滤池的处理效能, 结果表明生物滤池和生物接触氧化池在气水比为  $1:1$  和  $1.5:1$  的条件下, 对氨氮的去除率分别达到  $85\%$  和  $70\%$  以上; 付斌等<sup>[3]</sup>进行了悬浮陶粒-活性炭双层填料曝气生物滤池处理高氨氮原水的试验研究, 在进水氨氮为  $3.04 \sim 3.52 \text{ mg/L}$ 、滤速为  $8.5 \text{ m/h}$ 、气水比为  $1:1$  的条件下, 滤池出水氨氮为  $0.50 \sim 0.91 \text{ mg/L}$ , 平均去除率在  $80\%$  左右; 肖伟民<sup>[4]</sup>进行了粗滤料反粒度过滤技术及其在饮用水处理中的应用研究, 结果表明在进水浊度为  $30 \text{ NTU}$  左右的情况下, 粗滤料反粒度过滤技术的平均滤速高达  $16 \text{ m/h}$ 、滤后水平均浊度  $< 1 \text{ NTU}$ 、运行周期长达  $14 \sim 24 \text{ h}$ 。笔者进行了上向流反粒度生物滤池作为臭氧/活性炭工艺前置生物处理单元处理污染源水的研究, 期望反粒度生物滤池达到去除氨氮、浊度(保护后续臭氧/活性炭工艺稳定运行)和节约能耗的目的。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 处理工艺流程及试验目的

试验在嘉兴市某水厂进行, 反粒度生物滤池为某中试工艺的生物处理单元, 该中试工艺流程为: 原水→折板反应平流沉淀池→上向流反粒度生物滤池→臭氧柱(三级)→上向流活性炭池→微絮凝池→砂滤池→清水池。本文重点研究反粒度生物滤池去除氨氮和浊度的效果, 并且预设反粒度生物滤池出水浊度为  $1.5 \text{ NTU}$ , 主要是保护反粒度生物滤池后续臭氧/生物活性炭工艺稳定运行; 同时也研究了其他相关污染物的去除情况。

### 1.2 反粒度生物滤池装置

图1为反粒度生物滤池装置示意。反粒度生物滤池反应器采用 Q235A 钢质壳体, 设备主体直径为  $1000 \text{ mm}$ , 高度为  $2700 \text{ mm}$ , 总体积为  $2.12 \text{ m}^3$ 。采用石英砂滤料, 具体分布情况如下: 粒径为  $2.0 \sim 4.0 \text{ mm}$  的砾石承托层厚度为  $0.15 \text{ m}$ ; 粒径为  $1.6 \sim 2.0 \text{ mm}$  的石英砂级配滤料厚度为  $0.4 \text{ m}$ ; 粒径为  $1.2 \sim 1.6 \text{ mm}$  的石英砂级配滤料厚度为  $0.4 \text{ m}$ ; 粒径为  $0.8 \sim 1.2 \text{ mm}$  的石英砂级配滤料厚度为  $0.5 \text{ m}$ 。

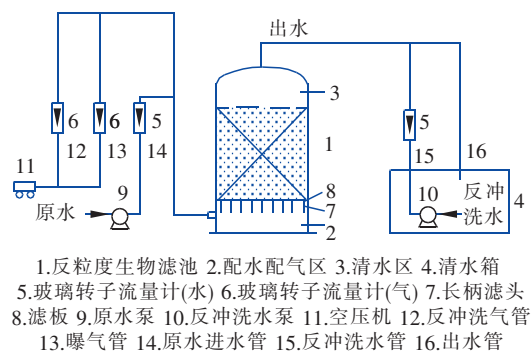


图1 反粒度生物滤池装置示意

Fig.1 Schematic diagram of reverse grain biological filter

### 1.3 反粒度生物滤池运行工况

以平流沉淀池出水作为试验原水, 反粒度生物滤池运行工况如下: 进水流量为  $8.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 滤速为  $11 \text{ m/h}$ , 运行周期为  $72 \text{ h}$ , 气水比为  $1:4$  (低温期降为  $1:5$ )。反冲洗分4个步骤, 分别是: ①单独气洗阶段, 空气强度约为  $14.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 气体流量为  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ , 反冲时间为  $4 \text{ min}$ ; ②气水联合反冲洗阶段, 空气强度继续保持为  $14.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 利用待滤水(原水)进行气水联合反冲洗, 水反冲洗强度为  $3 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 冲洗水流量为  $8.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 反冲时间为  $6 \text{ min}$ ; ③单独水反冲阶段, 利用原水进行单独水反冲洗, 水反冲洗强度为  $3 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 冲洗水流量为  $8.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 反冲时间为  $4 \text{ min}$ ; ④正冲洗阶段, 利用滤后水从上至下进行正向冲洗, 正冲洗强度为  $6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 冲洗水流量为  $17.0 \text{ m}^3/\text{h}$ , 冲洗  $4 \text{ min}$ 。

### 1.4 检测项目与方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  采用分光光度法检测;  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  采用酸性高锰酸钾滴定法检测; 浊度采用 HACH 2100N 浊度仪检测;  $\text{UV}_{254}$  采用分光光度法检测; TOC 采用岛津 TOC-L 分析仪检测; 水温采用 HACH HQ40d 便携式多参数分析仪检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对氨氮的去除效果

图2是2015年3月—2016年1月反粒度生物滤池对氨氮的去除情况。A、B、C、D、E 分别代表试验的5个阶段, 即启动阶段(2015年3月1日—18日)、系统调试优化阶段(2015年3月19日—6月30日)、常温稳定运行阶段(2015年7月1日—8月31日)、冲击负荷运行阶段(2015年9月1日—12月9日)、低温稳定运行阶段(2015年12月10日—2016年1月25日)。试验期间水温变化范围为  $0.8$

~33.6℃,以10℃为界,分为低温期(水温<10℃)和常温期(水温≥10℃),启动阶段和低温稳定

运行阶段处于低温期,其他阶段处于常温期。调试优化阶段主要进行反冲洗优化、气水比优化等研究。

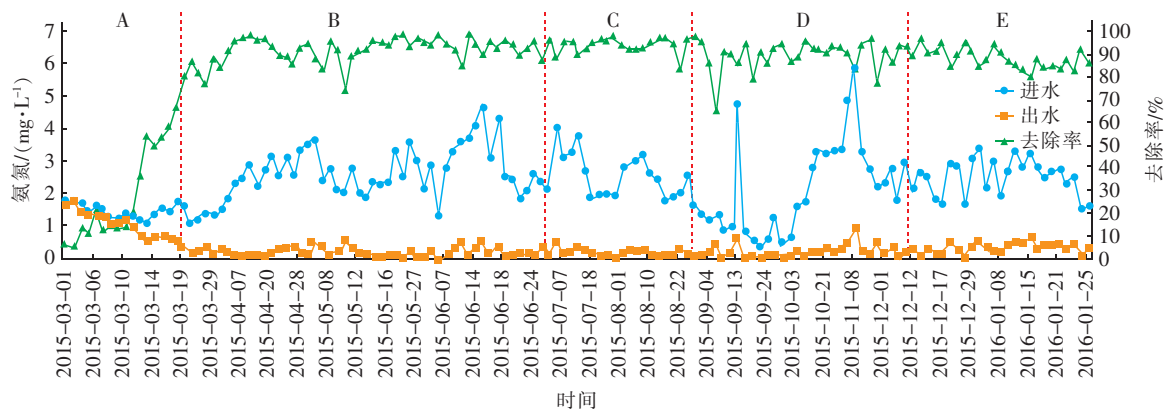


图2 反粒度生物滤池对氨氮的去除效果

Fig. 2 Ammonia nitrogen removal efficiency by reverse grain biological filter

### 2.1.1 启动阶段氨氮的去除效果

在启动阶段,反粒度生物滤池进水氨氮浓度范围为1.05~1.83 mg/L,出水氨氮浓度范围为0.14~1.72 mg/L。在启动运行前10 d,反粒度生物滤池对氨氮的去除率都在20%以下,从第11天开始去除率迅速上升,运行至第18天,反粒度生物滤池对氨氮的去除率达到87%,认为此时滤池已达到稳定状态。反粒度生物滤池对氨氮的去除主要依靠生物作用<sup>[5]</sup>,较高的氨氮去除率也意味着硝化细菌已经稳定生长。

### 2.1.2 常温期氨氮的去除效果

在常温期,反粒度生物滤池进水氨氮为1.81~4.02 mg/L,出水氨氮为0.02~0.47 mg/L,去除率为84%~99%,平均去除率为94%。在常温稳定运行阶段,反粒度生物滤池对氨氮有很好的去除效果。该阶段温度较高,适宜微生物生长繁殖,微生物活性较高,有利于对氨氮的去除。

### 2.1.3 低温期氨氮的去除效果

低温期稳定运行阶段,由于水源水中溶解氧浓度上升,气水比由1:4调降为1:5,其余条件与常温期稳定运行阶段保持一致。由图2可知,在低温期内,反粒度生物滤池进水氨氮为1.57~3.41 mg/L,出水氨氮为0.08~0.60 mg/L,平均去除率为88%。对比可知,反粒度生物滤池在低温期对氨氮的平均去除率比常温期低6%,出水氨氮平均浓度比常温期高0.15 mg/L。虽然低温期对氨氮的去除率有小幅下降,但相比常用生物处理单元,反粒度生

物滤池在低温期对氨氮的去除率仍较高。分析原因可能是反粒度生物滤池反应器在低温期内仍有不同种类微生物<sup>[5]</sup>,从而对氨氮的去除率仍较高。但与常温期相比,低温期微生物活性有所降低,故而对氨氮的去除效能有一定下降。

### 2.1.4 冲击负荷阶段氨氮的去除效果

在冲击负荷运行阶段,控制反应器进水氨氮浓度处于0.45~5.95 mg/L范围内,以考察反应器应对氨氮冲击负荷的效果。由图2可知,反粒度生物滤池在进水氨氮为0.45~5.95 mg/L的条件下,出水氨氮为0.03~1.07 mg/L,平均去除率为89%。冲击负荷阶段虽然反粒度生物滤池有3 d存在出水氨氮浓度超过0.5 mg/L的问题,但试验发现经过后续臭氧/活性炭工艺处理,最终出水氨氮浓度仍然稳定小于0.5 mg/L,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。与正常氨氮浓度相比,反粒度生物滤池在冲击期进水氨氮浓度变化较大时,对氨氮的去除率仍能维持在较高水平,原因可能是虽然进水氨氮浓度较高,但该阶段处于常温期,微生物量较大且活性高。

## 2.2 对亚硝酸盐氮的去除效果

反粒度生物滤池对亚硝酸盐氮的去除效果见图3。可知,常温期稳定运行阶段,进水亚硝酸盐氮浓度为0.002~0.516 mg/L,出水亚硝酸盐氮浓度为0.096~0.310 mg/L,平均去除率为40%。低温期稳定运行阶段,进水亚硝酸盐氮浓度为0.070~0.189 mg/L,出水亚硝酸盐氮浓度为0.016~0.175

mg/L,平均去除率为-15%,这可能是因为反应器出现了亚硝酸盐氮的积累。对比可知,在低温期反粒度生物滤池对亚硝酸盐氮的去除率有较大幅度降

低,即反粒度生物滤池对亚硝酸盐氮的去除效果受温度影响较大,主要原因可能在于低温影响了硝化菌的活性,从而造成亚硝酸盐氮积累。

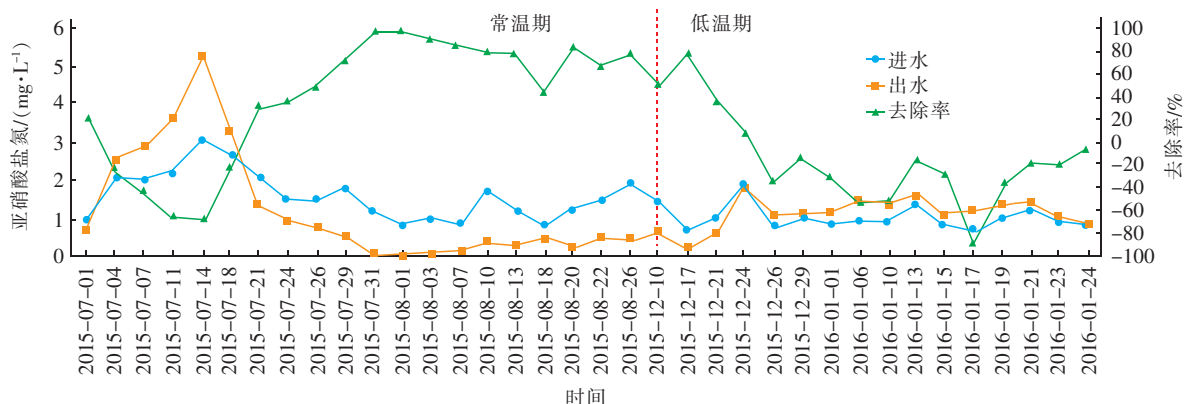


图3 反粒度生物滤池对亚硝酸盐氮的去除效果

Fig. 3 Nitrite nitrogen removal efficiency of reverse grain biological filter

### 2.3 对有机物指标的去除效果

常温期稳定运行阶段,进水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为 2.78 ~ 5.28 mg/L,出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为 1.94 ~ 3.78 mg/L,平均去除率为 21%。低温期稳定运行阶段,进水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为 3.31 ~ 4.87 mg/L,出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为 2.78 ~ 4.12 mg/L,平均去除率为 17%。对有机物的去除率较低,原因一方面可能是反应器进水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度较小;另一方面可能是在反粒度生物滤池前的混凝沉淀工艺已去除了大量非溶解性有机物,而过滤对溶解性有机物的去除率又较低(过滤对 DOC 的去除率约为 8%)<sup>[6]</sup>,从而反应器对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率较低。对比可知,低温期反粒度生物滤池对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率比常温期低 4%,温度对去除  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的影响较小。

反粒度生物滤池进水 TOC 为 2.71 ~ 5.35 mg/L,出水 TOC 为 2.33 ~ 4.89 mg/L,平均去除率为

12%,去除率较低,这与钱东等的研究结果一致<sup>[2]</sup>。

常温期进水  $\text{UV}_{254}$  为 0.078 ~ 0.123  $\text{cm}^{-1}$ ,出水  $\text{UV}_{254}$  为 0.062 ~ 0.093  $\text{cm}^{-1}$ ,平均去除率为 19%;低温期进水  $\text{UV}_{254}$  为 0.065 ~ 0.092  $\text{cm}^{-1}$ ,出水  $\text{UV}_{254}$  为 0.056 ~ 0.082  $\text{cm}^{-1}$ ,平均去除率为 18%。低温期和常温期对  $\text{UV}_{254}$  的去除率都较低,且反粒度生物滤池对  $\text{UV}_{254}$  去除率受温度的影响较小。对  $\text{UV}_{254}$  去除率低的原因可能是,  $\text{UV}_{254}$  主要代表的是含苯环或共轭双键的芳香类或烃类有机物,此类有机物一般需靠吸附作用去除,生物作用和截留作用对该类有机物的去除效果较差<sup>[7]</sup>,从而去除率较低。

综上所述,反粒度生物滤池对有机物的去除率较低,且基本不受温度的影响。

### 2.4 对浊度的去除效果

反粒度生物滤池对浊度的去除效果见图 4。

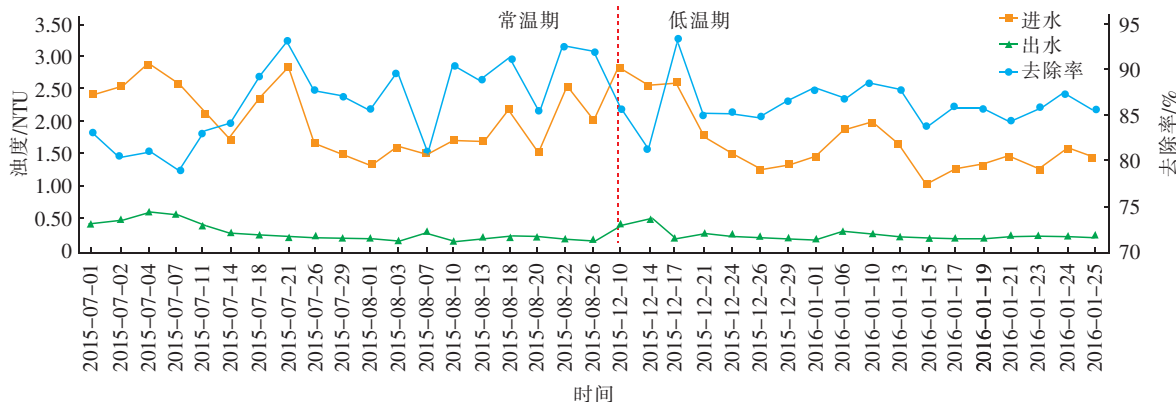


图4 反粒度生物滤池对浊度的去除效果

Fig. 4 Turbidity removal efficiency by reverse grain biological filter

由图4可知,在稳定运行期间,反粒度生物滤池运行周期为72 h,进水浊度为1.01~2.86 NTU,出水浊度为0.20~0.55 NTU,平均去除率为84%,出水浊度一直小于预设指标1.5 NTU,保护了后续臭氧/活性炭工艺。由反粒度生物滤池的过滤机理可知<sup>[4]</sup>,反粒度生物滤池去除浊度是整个滤层的作用,下层粗滤料可以截留原水中粒径较大的污染物,上层细滤料则可以截留粒径较小的污染物,从而实现了反粒度生物滤池滤层截污量大、出水浊度低和运行周期长的目的。

### 3 反粒度生物滤池对降低能耗的分析

将反粒度生物滤池与同期运行的生物接触氧化池<sup>[8]</sup>进行能耗对比分析,二者都按稳定运行时的工况参数计算。反粒度生物滤池运行能耗主要有曝气和反冲洗两个方面,运行工况如下:进水流量为8.5 m<sup>3</sup>/h,滤速为11 m/h,气水比为1:4(低温期为1:5),运行周期为72 h;生物接触氧化池不需要反冲洗,其运行能耗主要来自曝气,运行工况如下:进水流量为5 m<sup>3</sup>/h,气水比第一格为1:1、第二格为1:2,总曝气量为7.5 m<sup>3</sup>/h。计算结果如下:反粒度生物滤池在低温期和常温期的单位能耗分别为0.028、0.035 kW·h/m<sup>3</sup>,生物接触氧化池的单位能耗均为0.194 kW·h/m<sup>3</sup>。反粒度生物滤池运行能耗只有生物接触氧化池运行能耗的14%~18%,由此可见,反粒度生物滤池在降低运行能耗方面有明显优势。

### 4 结论

上向流反粒度生物滤池结合臭氧/活性炭深度处理工艺处理氨氮污染水源水时,常温期和低温期对氨氮都有较高的去除率,可保证工艺出水氨氮浓度在0.5 mg/L以下,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求;并且反粒度生物滤池对浊度也有较高的去除率,出水浊度在1.5 NTU以下,可保护后续臭氧/活性炭工艺稳定运行;同时,反粒度生物滤池运行能耗低,是一种较为理想的饮用水处理技术。

### 参考文献:

[1] 张燕,张富标,查人光,等. 浙江太湖河网地区饮用水

安全保障技术集成与示范[J]. 中国给水排水,2017,33(7):42-45.

[2] 钱东,诸水顺,宋淑芳,等. 生物接触氧化池和生物滤池对原水处理效能的对比[J]. 中国给水排水,2015,31(3):50-53.

[3] 付斌,陆少鸣,张菊萍,等. 悬浮陶粒-活性炭双层填料曝气生物滤池处理高氨氮原水的实验研究[J]. 水处理技术,2015,41(1):116-119.

[4] 肖伟民. 粗滤料反粒度过滤技术及其在饮用水处理中的应用研究[D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所,2006.

[5] Liu H Y, Zhu L Y, Tian X H, et al. Seasonal variation of bacterial community in biological aerated filter for ammonia removal in drinking water treatment[J]. Water Res, 2017,123:668-677.

[6] Li C M, Wang D H, Xu X, et al. Tracking changes in composition and amount of dissolved organic matter throughout drinking water treatment plants by comprehensive two-dimensional gas chromatography-quadrupole mass spectrometry[J]. Sci Total Environ, 2017,609:123-131.

[7] 何嘉莉,张晓娜,陈丽珠,等. 砂滤池去除氨氮和有机物随季节性的变化规律[J]. 供水技术,2015,9(2):10-12.

[8] 邢岚英. 反粒度生物滤池处理污染原水及优化运行研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2016.



作者简介:刘宏远(1971—),男,辽宁辽中人,博士,副教授,主要从事水处理技术研究。

E-mail: lhyzyy@zjut.edu.cn

收稿日期:2017-09-15