

## 三种反硝化滤池深度脱氮中试\*

高守有<sup>1</sup> 刘雷斌<sup>1</sup> 钱 静<sup>2</sup> 涂晓光<sup>3</sup> 黄 鸥<sup>1</sup> 李 艺<sup>1</sup>

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司,北京 100082; 2. 合肥市排水管理办公室,合肥 454600;  
3. 柏林水务合肥王小郢污水处理有限公司,合肥 454650)

**摘要:**以污水厂实际二级出水为处理目标,通过中试试验研究了陶粒滤料反硝化生物滤池、固定床反硝化砂滤池和连续过滤连续反冲砂滤池的特性。以甲醇作为外加碳源,3种滤池均可实现出水平均总氮小于5 mg/L。不足量投加外加碳源会出现出水亚硝态氮的积累。当进水TN为15 mg/L左右时,为达到出水TN小于5 mg/L,生物滤池、固定床砂滤池和连续过滤砂滤池建议滤速分别为不大于8.5、2.6、2.2 m/h;滤池反硝化碳源投加比例分别为4.28、3.0、3.2 g 甲醇/gTN;对应的反硝化容积负荷平均值分别为1.1、0.8、1.2 kg/(m<sup>3</sup>·d)。进水组分分析发现,有机氮不是出水总氮小于5 mg/L的限制因素。

**关键词:**反硝化滤池;中试试验;深度脱氮

DOI: 10.13205/j.hjgc.201409012

### PILOT STUDIES OF THREE DENITRIFY FILTERS ON ADVANCED NITROGEN REMOVAL

Gao Shouyou<sup>1</sup> Liu Lebin<sup>1</sup> Qian Jing<sup>2</sup> Tu Xiaoguang<sup>3</sup> Huang Ou<sup>1</sup> Li Yi<sup>1</sup>

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd, Beijing 100082, China;  
2. Hefei Drainage Management Bureau, Hefei 454650, China;  
3. Berlinwasser Wangxiaoying Wastewater Treatment Co., Ltd, Hefei 454650, China)

**Abstract:** Pilot experiments on secondary effluent from municipal wastewater treatment plant were carried out to study three typical denitrify filters, DN biofilter, deep bed DN sand filter and continuous flow sand filter. Methanol was added as external carbon source, and all filters could get effluent TN less than 5 mg/L. Insufficient carbon dosages could cause accumulation of nitrite in effluent. When the concentration of influent nitrogen was general 15 mg/L, DN biofilter, deep bed DN sand filter and continuous flow sand filter were suggested to operate under filter velocity of 8 m/h, 5.2 m/h and 6.2 m/h, respectively; external carbon source dosage were 4.28, 3.0 and 3.2 gram per gram nitrogen removal, and the relative denitrify volume load were 1.1, 0.8 and 1.2 kg/(m<sup>3</sup>·d) to achieve effluent total nitrogen of less than 5 mg/L. Component analysis showed that organic nitrogen did not affect the aim of less than 5 mg/L total nitrogen in effluent.

**Keywords:** denitrify filter; pilot experiments; nitrogen removal

巢湖是我国五大淡水湖之一,依据国家对巢湖水环境治理的目标,在“十一五”工作的基础上,以改善巢湖水质为目标,削减入湖河流氮、磷等主要污染负荷为重点,围绕其五大支流水系之一的南淝河开展水环境综合整治工作。各类反硝化滤池已经成功用于二级出水的深度脱氮<sup>[1-2]</sup>。本次研究以合肥王小郢污水厂实际二级出水为处理目标,通过现场中试试验研究陶粒滤料反硝化生物滤池、固定床反硝化砂滤池和

连续过滤连续反冲砂滤池3种不同反硝化滤池的适用性,并结合组分分析探讨设计出水 $\rho$ (TN) $\leq 5$  mg/L、 $\rho$ (COD) $\leq 30$  mg/L的可行性,为示范工程工艺比选及设计提供参考。

#### 1 试验部分

##### 1.1 材料

参与试验的3种反硝化滤池工艺分别为陶粒滤料反硝化生物滤池(以下简称“生物滤池”)、固定床反硝化砂滤池(以下简称“固定床砂滤池”)和连续过滤连续反冲砂滤池(以下简称“连续流砂滤池”),采

\* 水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07303-02)。

收稿日期:2013-11-05

用污水厂实际二级出水作为滤池进水,以甲醇作为碳源、PAC 作为除磷药剂进行滤池反硝化脱氮和除磷研究。试验装置主要参数如下:

生物滤池试验装置为长方体型式,长×宽×高为:1.0 m×0.8 m×5.05 m;配水室高度为 1.1 m;卵石承托层 0.3 m 陶粒填料  $\phi 2 \sim 5$  mm 填料层高度为 2.5 m。试验进水从底部由提升泵打入,污水经配水渠,由长柄滤头将来水均匀地布入滤料层,处理后水从顶部的出水口流出(图 1)。

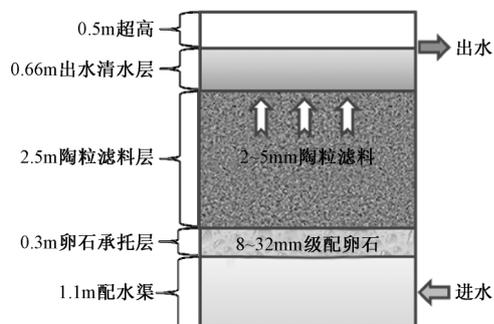


图 1 生物滤池试验装置

Fig. 1 Experiment equipment of upflow biofilter

固定床砂滤池试验装置为圆柱体形式,内径 590 mm 高 5.7 m 滤料层厚度 2.4 m 滤料采用 2~4 mm 石英砂介质。试验进水由提升泵直接打入滤池顶部配水,从上至下流过滤层,从滤池底部出水(图 2)。

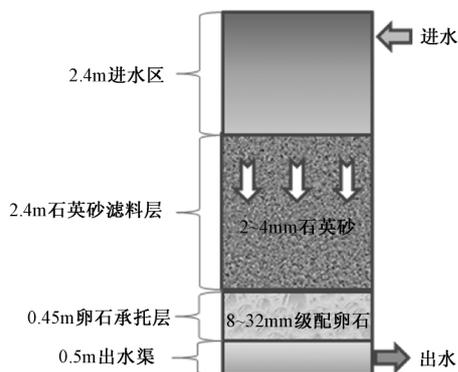


图 2 固定床砂滤池试验装置

Fig. 2 Experiment equipment of downflow denitrify sand filter

连续流反硝化砂滤池试验装置采用柱形钢体结构,设备高 4.2 m,内径 0.96 m 砂床高度 2.0 m 滤料粒径 1.0~1.6 mm。采用底部中心进水,过滤后上部出水,池体中部设有气提装置,保证砂层不断循环流动,实现同时过滤同时反冲洗的目的(图 3)。

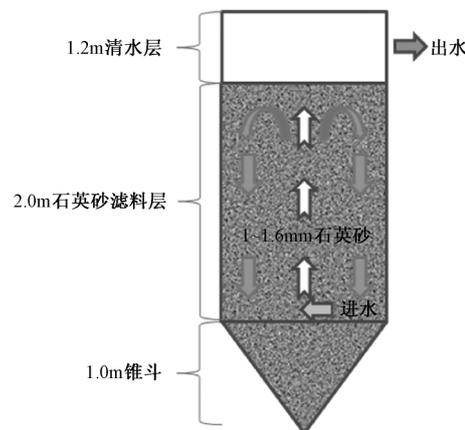


图 3 连续流砂滤池试验装置

Fig. 3 Experiment equipment of continuous flow sand filter

各滤池系统试验进出水均采用电磁流量计计量;甲醇、PAC 采用电磁隔膜泵投加。生物滤池和固定床反硝化砂滤池反冲洗周期主要根据滤池的水头损失确定,其反冲洗水量与气量通过转子流量计计量;滤料层的压力变化通过测压管测定;连续流砂滤池采用连续过滤连续反洗的运行方式,洗砂水量采用计量桶计量。

### 1.2 试验进水水质

试验期间,原水取自合肥王小郢污水厂一期工程二沉池出水。为保证试验进水满足反硝化中试装置要求,试验进水氨氮质量浓度  $\leq 1.5$  mg/L,在试验进水对应的氧化沟内增加曝气量,使氧化沟出水尽可能完全硝化。试验期间滤池进水水质指标见表 1。

### 1.3 水样采集与检测

各试验装置均采用 E + H 自动等比例采样仪 (ASP STATION 2000) 自动取样,采集 24 h 混合样进行测定。

表 1 试验进水水质

Table 1 Quality of experiment influent

项目	$\rho(\text{TN}) /$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{NO}_3^- - \text{N}) /$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{NO}_2^- - \text{N}) /$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{NH}_3 - \text{N}) /$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{COD}) /$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{TP}) /$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{SS}) /$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{DO}) /$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	水温/ $^{\circ}\text{C}$
范围	9.8~24.4	7.34~20.1	0~2.6	0.3~7.7	24~93	0.13~4.6	5~18	1.8~5.7	14.9~30.5
均值	18.4	13.3	0.6	2.2	48.9	1.0	9.9	3.8	24.9

水样由专人负责编号并送样至合肥市排水监测站,并按照标准方法进行测定<sup>[3]</sup>。

### 1.4 试验设计

通过不同碳源投加量和过滤速度等参数变化,考察滤池在实际进水条件下的适用性和反应器性能。

考虑进水中含有溶解氧,反硝化过程中所需的碳源有机物(以 BOD<sub>5</sub> 表示)总量用下式计算<sup>[4]</sup>:

$$\rho(C) = 2.86\rho(\text{NO}_3^- - \text{N}) + 1.71\rho(\text{NO}_2^- - \text{N}) + \rho(\text{DO})$$

实际投加过程中,参考相关经验值,并按照甲醇与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 比值为 3 的原则来进行校核上述计算,考虑本工程实际进水溶解氧浓度较高,在此基础上适当增加碳源投加量来消除溶解氧对反硝化的影响。

试验过程分为 9 个阶段,从 2011 年 3 月中旬设备到场安装调试完成后至 9 月初试验结束,历时 5 个半月。具体试验目标、工况及试验时间详见表 2。

表 2 试验进度安排表

Table 2 the Experiment schedule

序号	试验目标	试验工况	试验时间 (历时天数)
1	挂膜	设备调试、挂膜阶段	3 月中旬—04.01 (约 15 d)
2	不外加碳源处理效果	不投加甲醇	04.02—04.12(11 d)
3	去除 5 mg/L 硝酸盐氮	外加 17 mg/L 甲醇	04.13—04.22(10 d) 08.15—08.22(8 d)
4	去除 10 mg/L 硝酸盐氮	外加 32 mg/L 甲醇	04.23—05.18(26 d)
5	去除 15 mg/L 硝酸盐氮	外加 46 mg/L 甲醇	05.19—06.01(14 d)
6	各家设备最大过滤能力	滤速确定	06.02—06.13(12 d)
7	各设备最佳脱氮效果	根据进水 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 含量 量定/足量投加甲醇	06.14—06.29(16 d)
8	达标运行参数研究	根据各家设备情况 足量投加甲醇	06.30—07.19(20 d) 07.20—08.14(25 d)
9	除磷脱氮研究	同时脱氮、除磷对 各家设备的影响	07.20—07.28(9 d) 08.23—09.03(12 d)

## 2 结果及讨论

各滤池首先进行原水直接进水驯化、挂膜过程,调试运行约 15 d 开始试验。首先进行 14 d 的无碳源投加试验,由于缺乏反硝化碳源,各滤池均无脱氮效果,滤池进、出水总氮变化不大,滤池内溶解氧水平较高。

### 2.1 去除 5 mg/L 总氮试验研究

本阶段实际投加 17 mg/L 甲醇,目标为去除 5 mg/L 左右的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,试验历时 10 d。

投加碳源后 2~3 d,出水总氮即出现明显下降趋势。生物滤池、固定床砂滤池和连续流砂滤池的平均总氮去除量分别为 2.8、1.8、2.2 mg/L,试验最后一日总氮去除量分别为 4.0、3.8、4.8 mg/L,3 种滤池启动速度未观察到明显区别(图 4)。

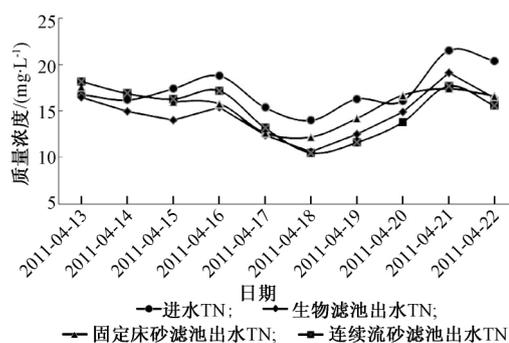


图 4 滤池进、出水总氮变化

Fig. 4 Variations of TN concentrations

3 种滤池在运行中,都出现了亚硝态氮不断累积的情况,试验最后一日生物滤池、固定床砂滤池和连续流砂滤池出水中亚硝态氮分别为 3.7、6.0、5.9 mg/L(图 5)。根据反硝化的机理,硝态氮反硝化为氮气需要经过亚硝态氮阶段,由于碳源投加不足,使反硝化反应进行不彻底,导致滤池出水中亚硝态氮积累。

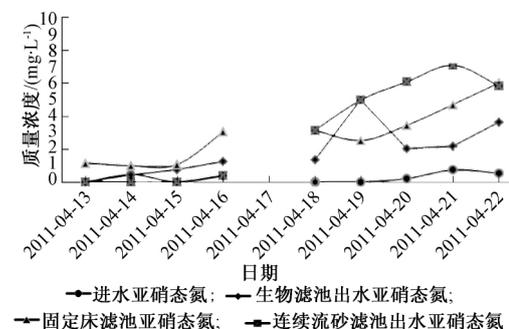


图 5 滤池出水亚硝态氮变化情况

Fig. 5 Variations of effluent nitrite concentrations

相关研究报道显示,采用乙酸钠作为碳源不足量投加时,会出现亚硝态氮的积累情况。在反硝化系统启动初期、低温等系统中会出现亚硝态氮的积累<sup>[5]</sup>。在后续试验中,实施滤池不足量投加碳源,对亚硝态氮的累积情况进行了验证试验。

当开始不足量投加碳源后,运行第 2 天各滤池出水中均开始出现亚硝态氮,其中连续流砂滤池出水亚硝态氮增加最为明显,经过 8 d 运行,试验最后一日亚硝态氮出水浓度达到 7.1 mg/L。生物滤池出水亚硝态氮增长较缓慢,试验最后一日亚硝态氮出水浓度达到 2.9 mg/L。固定床砂滤池试验周期内没有观察到明显的出水亚硝态氮累积趋势,亚硝态氮出水浓度在 0.37~0.69 mg/L(图 6)。

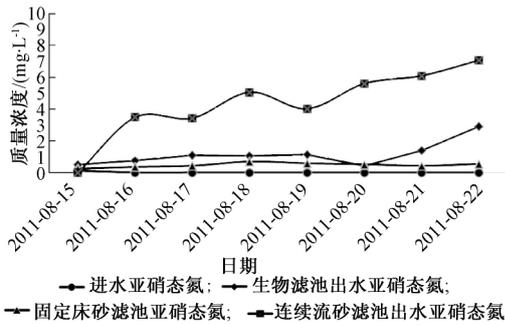


图6 滤池出水亚硝态氮变化

Fig. 6 Variation of effluent nitrite concentrations

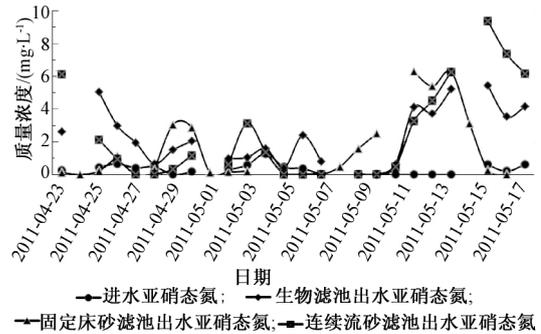


图8 滤池出水亚硝态氮变化情况

Fig. 8 Effluent nitrite concentrations

## 2.2 去除 10 mg/L 的总氮试验研究

本阶段试验 3 种滤池均外加 32 mg/L 甲醇, 运行 26 d, 进、出水总氮变化情况如图 7。

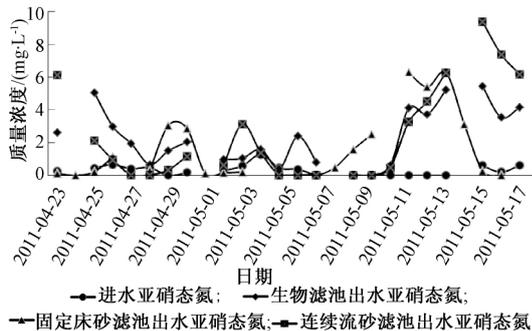


图7 滤池进、出水总氮变化

Fig. 7 Variations of TN concentrations

期间进水总氮平均浓度为 18.6 mg/L, 生物滤池、固定床砂滤池和连续流砂滤池对总氮的去除量平均为 9.2, 9.8, 8.7 mg/L。

出水亚硝态氮的检测结果如图 8 所示。生物滤池、固定床砂滤池和连续流砂滤池出水中亚硝态氮平均浓度分别为 4.4, 1.5, 2.4 mg/L。对比发现, 生物滤池和连续流砂滤池出水亚硝态氮积累峰值为 5.5 mg/L 和 9.4 mg/L 时, 进水总氮值达到 27.7 mg/L。碳源不足量投加时, 容易出现出水亚硝态氮积累。固定床砂滤池在不足量碳源投加的情况下, 不容易出现出水亚硝态氮积累。

结合上一阶段投加 17 mg/L 甲醇试验, 分析发现碳源投加不足是亚硝态氮积累的主要原因, 而一旦进水碳源投加量增加或者接近足量投加, 亚硝态氮积累情况可以迅速得到控制。

## 2.3 去除 15 mg/L 的总氮试验研究

本阶段试验 3 种滤池均外加 46 mg/L 甲醇, 运行 14 d, 进、出水总氮变化情况如图 9 所示。

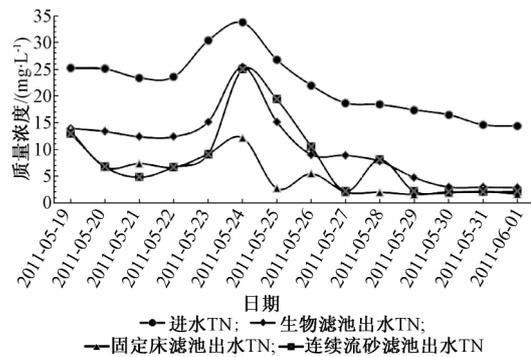


图9 滤池进、出水总氮变化

Fig. 9 Variations of TN concentrations

期间进水总氮平均浓度为 22.2 mg/L, 生物滤池、固定床砂滤池和连续流砂滤池对总氮的去除量平均为 11.6, 16.8, 14.0 mg/L。

出水亚硝态氮的检测结果如图 10 所示。5 月 26 日—6 月 11 日期间, 进水总氮降低到 20 mg/L 以下, 固定床砂滤池出水 TN 浓度稳定小于 5 mg/L, 平均总氮的去除量最大; 3 种滤池出水亚硝态氮浓度稳定运行后均小于 1 mg/L。足量投加碳源后, 亚硝态氮积累的情况可得到控制; 连续流砂滤池和生物滤池出现出水亚硝态积累峰值与进水总氮浓度峰值存在明显的相关性。

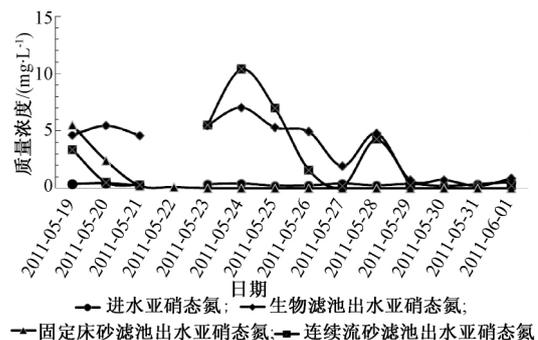


图10 滤池亚硝酸盐浓度变化

Fig. 10 Variations of nitrite concentrations

## 2.4 过滤速度试验研究

用进水流量计折算滤池每日的平均过滤速度。在不同碳源投加量的情况下,生物滤池、固定床滤池和连续流砂滤池的过滤速度分别为 7~8, 5~6, 6~8 m/h。本阶段试验目的是进一步明确各滤池的过滤速度。

试验在 6 月 2 日—6 月 13 日进行,历时 12 d。生物滤池试验滤速由 7.8 m/h 逐渐提高到试验结束时的 9.6 m/h,滤池进水及出水氮元素变化见图 11。根据进水总氮情况确定碳源投加 32 mg/L。

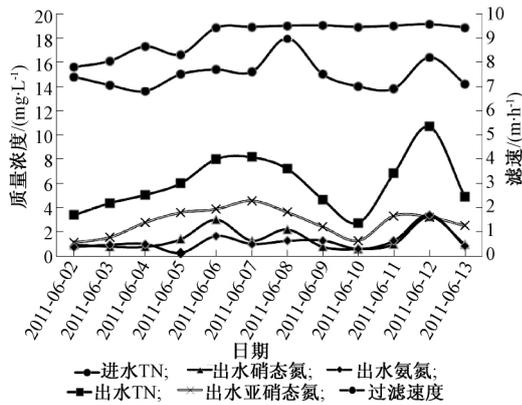


图 11 不同滤速条件下进、出水氮元素变化  
Fig. 11 Nitrogen concentration variations of BAF under different filter velocities

试验期间进水总氮平均浓度为 15.0 mg/L,生物滤池出水总氮、硝态氮、亚硝态氮和氨氮的平均浓度分别为 6.0, 1.4, 2.8, 1.2 mg/L。滤池在 9.6 m/h 滤速条件下运行较平稳,滤床阻力增加较快,反冲洗频率增加,反冲洗水量约占进水的 3% 左右。

固定床滤池出水总氮、硝态氮、亚硝态氮和氨氮的平均浓度为 4.6, 1.3, 1.3, 1.2 mg/L (图 12)。平均滤速在 6.6 m/h 的条件下运行较平稳,滤床阻力增加较快,驱氮及反冲洗频率增加,反冲洗水量约为进水的 4% 左右。

连续流砂滤池出水总氮、硝态氮、亚硝态氮和氨氮的平均浓度为 8.3, 2.5, 2.5, 1.5 mg/L (图 13)。平均滤速在 8.8 m/h 时,处理效果下降,出水总氮浓度明显高于生物滤池和固定床砂滤池,反冲洗水量约为进水的 10% 左右。

## 2.5 最佳运行条件试验研究

试验分为 2 步: 第一步,根据设备各自特点选择过滤速度,运行 16 d; 第二步,不规定统一的碳源投加比例,目标为实现出水总氮小于 5 mg/L,并且碳源投

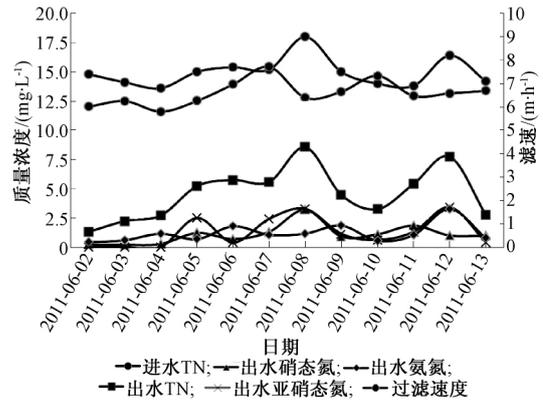


图 12 不同滤速条件下进、出水氮元素变化

Fig. 12 Nitrogen concentration variations of downflow denitrify sand filter under different filter velocities

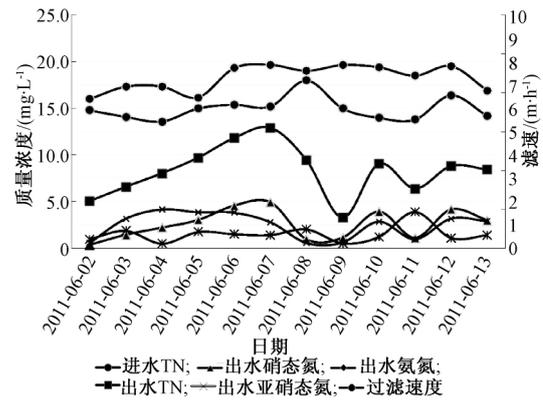


图 13 不同滤速条件下进、出水氮元素变化

Fig. 13 Nitrogen concentration variations of continuous recycle sand filter under different filter velocity

加不过量(要求出水 COD 不大于进水 COD),运行 46 d。运行周期进水总氮平均浓度均为 20.6 mg/L。生物滤池平均过滤速度为 8.3 m/h。整个运行周期内生物滤池平均出水总氮浓度为 4.4 mg/L; 第二步试验过程中,进水总氮平均浓度为 18.2 mg/L,出水平均 TN 浓度为 3.9 mg/L,亚硝态氮平均浓度为 0.5 mg/L。按照碳源投加不过量及出水 TN 小于 5 mg/L 的原则统计,试验过程中碳源甲醇/TN 投加比例为 2.9~5.12 g/g,平均投加比例为 4.28 g/g。期间反冲洗水比例占进水 2.8% (图 14)。

固定床砂滤池平均过滤速度为 6.1 m/h。整个运行周期内固定床砂滤池平均出水总氮浓度为 4.8 mg/L; 在第二步试验过程中,进水总氮平均浓度为 18.2 mg/L,出水平均 TN 浓度为 4.2 mg/L,亚硝态氮平均浓度为 0.5 mg/L。按照碳源投加不过量以及出水 TN 小于 5 mg/L 的原则统计,试验过程中碳源投加比例为 2.1~3.8 g/g,平均投加比例为 3.0 g/g。

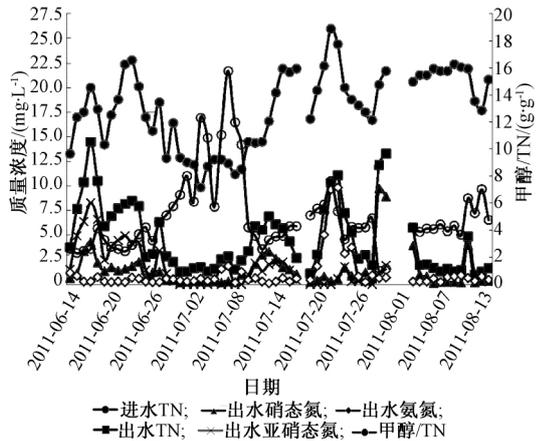


图 14 生物滤池进、出水氮元素变化

Fig. 14 Nitrogen concentration variations of BAF under optimized condition

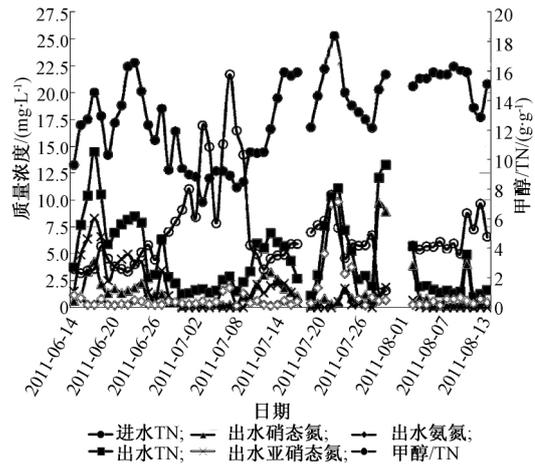


图 16 连续流砂滤池进、出水氮元素变化

Fig. 16 Nitrogen concentration variations of continuous recycle sand filter under optimized condition

期间反冲洗水比例占进水的 8% (图 15)。

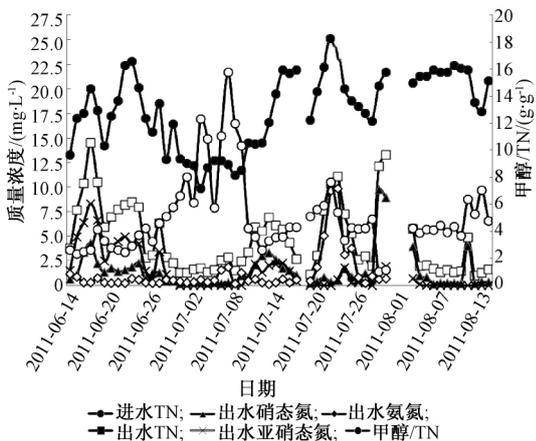


图 15 固定床砂滤池在优化运行条件下进、出水氮元素变化情况

Fig. 15 Nitrogen concentration variations of on sand filter under optimized condition

连续流砂滤池平均过滤速度为 7.0 m/h。整个运行周期内固定床砂滤池平均出水总氮浓度为 5.1 mg/L; 第二步试验过程中, 固定床砂滤池根据设备特点确定碳源投加比例, 进水总氮平均浓度为 17.3 mg/L, 出水平均 TN 浓度为 4.7 mg/L, 亚硝态氮平均浓度为 1.3 mg/L (图 16)。试验过程中碳源投加比例为 2.5~4.8 g/g, 平均投加比例为 3.2 g 甲醇/gTN。期间反冲洗水比例大于进水量 20%。反冲洗水比例高导致实际产水能力下降, 试验滤速过高, 或是反硝化负荷过高<sup>[6]</sup>。

各滤池对 SS 和 COD 均有一定的去除作用, 其中固定床砂滤池去除效果最好, 试验过程中进水平均 COD 为 48.9 mg/L, 出水平均 COD 为 39.3 mg/L, 稳定运行条件下 SS 在 5 mg/L 以下。生物滤池出水 SS

通常较两类砂滤池略高。3 种滤池 COD 去除率无明显差别。

## 2.6 反硝化容积负荷

在足量投加甲醇(最佳滤速下, 适量投加甲醇, 完全反硝化) 试验期间统计滤池的反硝化容积负荷, 结果见表 3。3 种工艺随着进水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的增加, 反硝化容积负荷逐渐增大。

表 3 不同工艺反硝化容积负荷统计

Table 3 Denitrify volume loads of different filter process

不同工艺 运行时间	反硝化容积负荷			平均值
	06.30—07.19	08.03—08.14	08.23—09.03	
生物滤池	0.70	1.37	1.14	1.1
固定床砂滤池	0.53	1.03	0.91	0.8
连续流砂滤池	0.69	1.64	1.37	1.2

## 2.7 滤池同步脱氮除磷试验

在脱氮试验过程中, 7 月 20—28 日以及 8 月 23 日—9 月 3 日之间, 分 2 个阶段进行同步脱氮除磷试验。第一阶段试验期间进水  $\rho(\text{TP})$  在 0.25~1.34 mg/L, 平均浓度为 0.64 mg/L。3 种滤池除磷效果均不明显。为进一步明确滤池的除磷特性, 第二阶段在进水中投加磷酸盐使进水总磷提高 1 mg/L 左右, 进水总磷平均浓度为 1.46 mg/L。PAC 投加量为 2.0 mol/L 的铝盐。第二阶段生物滤池、固定床砂滤池和连续流砂滤池总磷平均去除量为 0.52, 0.55, 0.60 mg/L。分析认为在较低的进水总磷浓度下, 由于存在一定比例的有机磷无法通过化学除磷去除, 投加 PAC 的比例需要进一步提高才可能获得更低的出水总磷。

化学除磷过程中,生物滤池、固定床砂滤池和连续流砂滤池3种工艺脱氮效果良好,出水平均总氮分别为2.66、2.43、2.87 mg/L。化学除磷没有对脱氮过程产生明显的不利影响。

投药时3种滤池均出现滤池阻力增加较快,反冲洗频率变短的情况。滤池反冲洗过程同样存在成本以及对整个系统的水力负荷影响等问题,因此建议反硝化滤池以反硝化为主要目的,化学除磷主要在二级处理中完成,反硝化滤池前投药仅作为辅助和出水保障。

### 2.8 TN 和 COD 组分分析

2011年7月,对王小郢污水厂二级出水及各种滤池出水的COD和TN进行了组分分析,结果见表4。

从表4可知:滤池进水中溶解性惰性组分( $S_I$ )平均为37.9 mg/L和43.2 mg/L,因此要实现出水总

表4 滤池进水组分

**Table 4 Component analysis of filter influents**

日期	水样	$T_{COD}$	$S_{COD}$	$X_{COD}$	$S_S$	$X_S$	$S_I$	$f_{SI}$	$X_I$
07.14—07.28	一期出水	51	44	10	1.31	1.07	37.9	0.76	10.28
07.14—07.27	二期出水	48	56	3	1.61	0.41	43.2	0.88	2.87
07.20—07.28	固定床砂滤池出水	47.8	30.00		2.00	0.38	22.7		18.99
07.20—07.28	生物滤池出水	40.6	31.50		2.17	1.39	31.3		4.33
07.20—07.28	连续流砂滤池出水	42.5			4.51	0.63	18.3		3.20

COD 小于 30 mg/L,必须以滤池进水中的溶解性不可生物降解 COD 浓度作为限制条件。

从表5可知:多数时间进水氨氮含量较高,成为后续滤池处理出水TN过高的瓶颈。有机氮( $T_{ON}$ )滤池进水平均浓度为1.35 mg/L,3种滤池出水浓度为0.55~1.45 mg/L,不是出水总氮的限制性瓶颈。

表5 试验进水及出水N组分

Table 5 Component analysis of nitrogen in both influents and effluents

日期	水样	TN	$S_{TN}$	$S_{NH}$	$NO_3^- - N$	$NO_2^- - N$	$T_{ON}$	$S_{ON}$	$X_{ON}$	$X_{NI}$	$S_{NI}$
07.02—07.28	二级出水平均	19.06	18.84	3.79	13.26	0.66	1.35	1.13	0.22	0.0	1.25
07.16—07.28	生物滤池平均	5.22	4.84	2.68	0.85	0.49	0.55	0.49	0.19	0.10	0.47
07.16—07.28	固定床砂滤池平均	5.52	4.95	2.94	0.82	0.23	0.93	0.37	0.56	0.34	0.18
07.16—07.28	连续流砂滤池平均	7.07	6.62	2.81	0.17	2.07	1.45	0.97	0.48	0.17	0.76

### 3 结 论

1) 3种反硝化滤池工艺均可通过适量投加外碳源,使出水TN能稳定小于5 mg/L;在不足量投加反硝化碳源时可导致滤池出水中亚硝态氮的积累;反硝化等量的总氮,需要外加碳源量由少到多依次为固定床砂滤池、连续流砂滤池和生物滤池。

2) 在反硝化滤池中同步加药除磷会增加滤池负荷、缩短反冲洗周期且增大反洗水量。化学除磷应设置在二级处理或者独立的除磷处理单元中完成。

3) 要实现深度处理,工程设计出水 $\rho(COD) \leq 30$  mg/L,需要以滤池进水中的溶解性惰性组分COD浓度作为限制条件;二级出水有机氮平均浓度小于1.5 mg/L;经过反硝化滤池,设计出水 $\rho(TN) \leq 5$  mg/L的标准是可行的。

#### 参考文献

[1] Jeong J, Hidaka T, Tsuno H, et al. Development of biological filter as tertiary treatment for effective nitrogen removal: Biological filter

for tertiary treatment [J]. Water Research 2006; 40: 1127-1136.

[2] Gomez M A, Hontoria E, Gonzalez Lopez J, et al. Effect of dissolved oxygen concentration on nitrate removal from groundwater using a denitrifying submerged filter [J]. Journal of Hazardous Materials, 2002; 90: 267-278.

[3] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[4] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

[5] 葛勇涛, 焦阳, 李军, 等. 乙酸钠碳源强化生物滤池对二沉池出水的脱氮效果[J]. 中国给水排水 2011; 27(7): 98-100.

[6] Steven T, Summerfelt. Design and management of conventional fluidized-sand biofilters [J]. Aquacultural Engineering 2006; 34: 275-302.

#### 致谢

本试验的组分分析工作由同济大学杨殿海教授等协助完成,化验分析由合肥市排水监测站马先发总工等完成,在此一并表示感谢!

第一作者: 高守有(1977-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事污水处理及再生利用的研究。gsyhit@bmedi.cn