

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.008

# 不同填料曝气生物滤池处理微污染河水的效果

聂中林<sup>1,2</sup>, 马赫<sup>1</sup>, 梁鹏<sup>1</sup>, 黄霞<sup>1</sup>

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 分别以陶粒、沸石-陶粒、两种弹性纤维材料为填料,在有效体积为150 L的填充床中,对曝气生物滤池(BAF)处理模拟城市微污染河水中氨氮和有机物的效果进行了试验,并对比了4种填料的特点和运行效果。结果表明:两种颗粒填料的氨氮硝化负荷要高于纤维填料,颗粒填料和纤维填料BAF的最佳HRT分别为1 h和1.5 h。在HRT为1 h时沸石-陶粒组合填料和陶粒填料的平均氨氮去除率分别为94.6%和93.7%,在HRT为1.5 h时两种纤维填料的平均氨氮去除率分别为89.5%和92.6%,且颗粒填料对氨氮的去除主要集中在填料高度60~100 cm的部分。水力停留时间对两种颗粒填料的进水压力和出水浊度影响较大,而对纤维填料影响较小。在气水比为2时,4种填料对氨氮和COD的去除效果好于气水比为1和3时的去除效果。纤维填料BAF的投资成本更高,但运行成本要明显低于颗粒填料BAF。

**关键词:** 沸石; 陶粒; 纤维填料; 曝气生物滤池; 微污染

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0041-08

## Treatment Effect of Micro-polluted River Water by Biological Aerated Filters with Different Media

NIE Zhong-lin<sup>1,2</sup>, MA He<sup>1</sup>, LIANG Peng<sup>1</sup>, HUANG Xia<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Treatment effects of biological aerated filters (BAFs) on ammonia nitrogen and organic matter in urban micro-polluted river water were explored. Ceramsite, zeolite-ceramic composite and two kinds of elastic fiber materials were utilized as fillers in the packed bed with an effective volume of 150 L, and characteristics and performances of the four kinds of fillers were compared. Nitration loads of ammonia nitrogen of the two granular fillers were higher than those of the fiber fillers, and the optimal HRTs of the granular filler BAF and fiber filler BAF were 1 h and 1.5 h, respectively. The average ammonia nitrogen removal efficiencies of zeolite-ceramic composite filler and ceramic filler were 94.6% and 93.7% respectively when HRT was 1 h, and those of two fiber fillers were 89.5% and 92.6% respectively when HRT was 1.5 h. In addition, the removal of ammonia nitrogen by the granular filler was mainly concentrated on the filler height of 60–100 cm. HRT had a great influence on the inlet pressure and effluent turbidity of the two kinds of granular fillers, but it had little effect on the fiber fillers. When gas-water ratio was 2, the removal efficiencies of ammonia nitrogen and COD of the four

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-004)

通信作者: 黄霞 E-mail: xhuang@tsinghua.edu.cn

fillers were better than those when the gas-water ratios were 1 and 3. The investment cost of fiber filler BAF was higher, but the operational cost was significantly lower than granular filler BAF.

**Key words:** zeolite; ceramsite; fiber filler; biological aerated filter; micro-pollution

微污染河水是指受到较低浓度污染的河水,污染物以氨氮和 COD 为主,其浓度远低于城市生活污水,如不妥善处理,可能导致水体富营养化、影响工农业用水<sup>[1-2]</sup>,针对微污染河水开发高效低成本的处理技术具有重要的现实意义。

曝气生物滤池(BAF)用于处理微污染河水具有处理效率高、占地面积小、投资运营成本低等优点<sup>[3-4]</sup>,尹宇鹏等<sup>[5]</sup>采用以陶粒为填料的降流式BAF处理氨氮浓度为1.03和2.50 mg/L的微污染河水,氨氮去除率分别为84%和76%;瞿艳芝等<sup>[6]</sup>对比了G-BAF(固定化曝气生物滤池)和CAS(活性污泥法)两种工艺处理微污染河水的效果,证明BAF工艺更适用于微污染水体的深度处理。

填料是BAF的核心组成部分,目前常用的填料有陶粒、焦炭、石英砂、沸石、活性炭等。陶粒具有生物附着性强、挂膜性能良好、耐冲击力强等优点<sup>[7]</sup>,是目前BAF中的常用填料,但其价格较高(1 000~2 000元/t);沸石对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 具有较强的吸附能力和选择性离子交换性能,且成本明显低于陶粒<sup>[8]</sup>,但其耐冲击负荷较差,单独采用沸石作为填料的BAF实际应用还较少<sup>[9-10]</sup>。笔者采用沸石-陶粒组合填料BAF,减小反冲洗对沸石的冲击,同时利用沸石低成本、氨氮去除率高的优势,实现微污染河水的高效低成本处理。

此外,颗粒填料填充密度高、易堵塞,反冲频繁<sup>[11-12]</sup>,且反冲强度较高,运行和维护成本大大提高。弹性纤维填料投资成本高于颗粒填料,但其具有生物附着性强、挂膜快、脱膜容易、运行周期长、反冲洗成本低、耐冲击负荷能力强等优点<sup>[13-14]</sup>,对于城市微污染河水的处理具有很大的应用潜力。

笔者采用了较大处理规模的升流式曝气生物滤池(处理量 $3\sim 4\text{ m}^3/\text{d}$ ),分别采用陶粒填料、沸石-陶粒组合填料和两种弹性纤维填料处理模拟城市微污染河水,以出水氨氮 $<1\text{ mg/L}$ 、COD $<30\text{ mg/L}$ 为处理目标,通过对比不同填料的运行及污染物去除效果,考察两种颗粒填料BAF和两种纤维填料BAF对微污染河水中氨氮等污染物的去除性能及各自的运行特点,在两类填料(颗粒、纤维)处理微污染河

水性能测试的基础上,比较两类填料装置技术的优劣,并在相同规模下比较其成本,基于不同运行周期选取填料,明确两类填料装置的适用条件,为实际城市河道水质净化提供参考。

## 1 试验装置与方法

试验装置如图1所示,有机玻璃滤柱的有效高度为120 cm,内径为40 cm。两种颗粒填料BAF的指标见表1。纤维填料1(聚酯纤维、涤纶和丙纶)购自浙江金华金陵环保公司,纤维填料2(涤纶和锦纶)购自河北石家庄益生环保公司,两种纤维填料(见图2)BAF的填充率均约为15%。上向流方式运行,在底部设有曝气管和进水管,从布水板开始从下到上每20 cm设一取样口,共7个取样口。

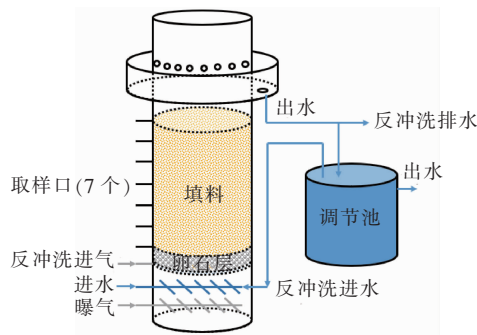


图1 BAF装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of BAF device

表1 陶粒和沸石填料主要指标

Tab.1 Main indicators of ceramsite and zeolite fillers

填料种类	粒径/mm	真密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	堆积密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	空隙率/ %
陶粒	3~5	1.782	0.926 7	48
天然斜发沸石	2~4	2.5	1.19	52.4



a. 纤维填料1 b. 纤维填料2

图2 纤维填料

Fig.2 Fiber fillers

## 2 进水水质

进水水质参照北运河污染段水质,采用北京市上庄镇稻香湖再生水厂进水和中水,按3:7的比例配制模拟微污染河水,进水水质见表2。

表2 模拟河水水质及实际微污染水质对比

Tab.2 Comparison of simulated river water quality and actual micro-polluted water quality

项 目	进水指标	北运河水质指标
COD/(mg · L <sup>-1</sup> )	50 ~ 70	22 ~ 109
氨氮/(mg · L <sup>-1</sup> )	8 ~ 12	3 ~ 20
TN/(mg · L <sup>-1</sup> )	13 ~ 17	7 ~ 33
浊度/NTU	9 ~ 15	3.9 ~ 24.7
水温/℃	24.2 ~ 25.8	8 ~ 28

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 不同HRT下的氨氮去除

水力停留时间(HRT)是影响处理效果的重要因素,由于在预试验过程中发现HRT为1h时纤维填料对氨氮的去除率较低,故将纤维填料HRT下限设置为1h,且考虑到颗粒填料比表面积更大、表面附着生物量更高,将颗粒填料的HRT下限设置为0.5h,因此对颗粒填料和纤维填料设置不同水力停留时间,其中颗粒填料HRT分别为3、1.5、1、0.75和0.5h(见图3),纤维填料HRT分别为3、2、1.5、1.25和1h(见图4)。

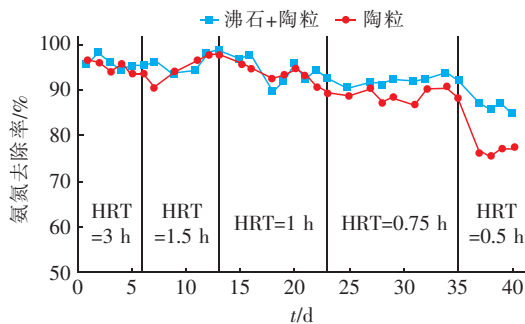


图3 颗粒填料BAF在不同HRT下的氨氮去除率变化

Fig.3 Change of ammonia nitrogen removal rate of granular filler BAF under different HRT

由图3可以看出,在水力停留时间 $\geq 1$ h时,两种颗粒填料BAF的氨氮去除率十分接近,氨氮去除率大于90%,出水氨氮浓度均稳定在0.5mg/L,沸石-陶粒组合填料和陶粒在HRT为1h时的平均氨氮去除率分别为94.6%和93.7%。当HRT缩短到0.75h时,沸石-陶粒组合填料的氨氮去除率仍稳定在90%以上,陶粒填料的氨氮去除率开始出现下降,部分出水氨氮浓度已超过1mg/L,平均氨氮

去除率为89%。HRT缩短到0.5h时,进水氨氮负荷过高,且进水流速较快,导致氨氮去除率及稳定性均明显下降,沸石-陶粒组合填料的氨氮去除率为88%,而陶粒填料的氨氮去除率下降到80%以下,此时两种填料的氨氮去除率分别为0.44和0.37 kgNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/(m<sup>3</sup>·d)。

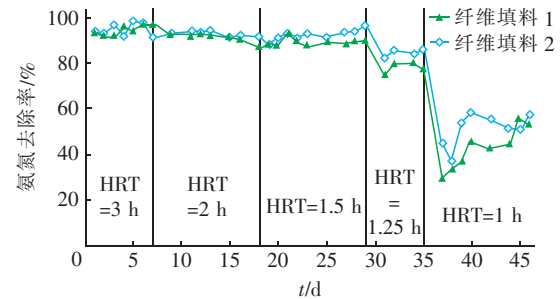


图4 纤维填料BAF在不同HRT下的氨氮去除率变化

Fig.4 Change of ammonia nitrogen removal rate of fiber filler BAF under different HRT

由图4可以看出,当HRT $\geq 1.5$ h时,两种纤维填料BAF均具有较高的氨氮去除率,出水氨氮浓度均稳定在0.5mg/L,纤维填料1和纤维填料2在HRT为1.5h时的平均氨氮去除率分别为89.5%和92.6%。当HRT缩短到1.25h时,两种纤维填料的氨氮去除率同时出现下降,且纤维填料1的下降幅度略大于纤维填料2,此时纤维填料1的平均氨氮去除率为78%,平均出水氨氮浓度约为2.1mg/L,而纤维填料2的平均氨氮去除率约为85%,平均出水氨氮浓度为1.4mg/L。而HRT缩短到1h时,填料表面微生物对氨氮的去除负荷达不到进水的氨氮负荷,且进水流速较快,填料对污染物的截留作用降低,导致两种纤维填料BAF的氨氮去除率及稳定性均出现明显下降,此时两种纤维填料的硝化负荷分别为0.17、0.16 kgNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/(m<sup>3</sup>·d),氨氮去除率仅为40%左右,出水氨氮浓度达到5mg/L,不能满足地表Ⅳ类水要求。

为了使BAF稳定运行且出水氨氮 $< 1$ mg/L,沸石-陶粒BAF应控制HRT在0.75h以上,陶粒BAF应控制HRT在1h以上,而两种纤维填料BAF的HRT应控制在1.5h以上。

### 3.2 不同填料高度的氨氮去除

反应器共设有7个取样口,各取样口间距为20cm,从下到上的取样口编号分别为1~7号,其中沸石-陶粒组合填料BAF在1~4号取样口高度范围内为陶粒填料,在4~7号取样口高度范围内为沸石

填料。在 HRT 为 1 h、气水比为 2 的条件下稳定运行时,分别从两种颗粒填料 BAF 不同高度取样口取 3 个平行样,测定各个高度下的出水氨氮浓度,并对其各高度范围内的氨氮去除负荷进行分析,结果如图 5 所示。

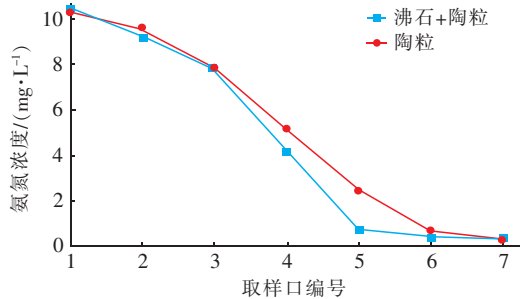


图 5 不同高度下两种颗粒填料 BAF 的出水氨氮浓度

Fig. 5 Effluent ammonia nitrogen concentration of two granular fillers BAF at different heights

在填料高度约 40 cm 以下的部分,填料均为陶粒,对氨氮的去除效果接近。在填料高度 60 cm 附近为沸石和陶粒两种填料的交界,两种填料间存在一定的混合,而在此处对氨氮的去除负荷开始出现明显提高,沸石-陶粒组合填料的氨氮去除负荷达到  $0.53 \text{ kgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,而陶粒填料的氨氮去除负荷约为  $0.39 \text{ kgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,沸石-陶粒组合填料的氨氮去除速率要明显高于陶粒填料。在填料高度为 80 cm 左右时,沸石-陶粒组合填料对氨氮的转化基本完成,出水氨氮浓度达到  $0.5 \text{ mg/L}$  以下,此时氨氮去除负荷已经较低;而陶粒 BAF 在填料高度为 100 cm 左右时对氨氮的转化才基本完成,出水氨氮浓度达到稳定。因此,两种颗粒填料 BAF 的硝化主要发生在填料高度约 50 cm 以上的反应器中上部分,在下端的硝化作用相对较弱,且沸石-陶粒组合填料 BAF 的氨氮转化速率更高。

对两种纤维填料在 HRT 为 1.5 h、气水比为 2 的条件下稳定运行时各高度的出水氨氮浓度进行测量,结果如图 6 所示。与颗粒填料不同,两种弹性纤维填料除离进水口最近的 1 号取样口外,其他取样口的出水氨氮浓度基本一致,且其他取样口的 DO、COD 及浊度也基本一致,主要原因是由于两种纤维填料空隙率高,在曝气作用下装置内部存在内循环,不同高度的水体发生混合。相比于颗粒填料 BAF 的推流式流态,纤维填料 BAF 内部各取样口的水质基本一致,为混合流形式,其中出水氨氮浓度均小于

$0.5 \text{ mg/L}$ ,当氨氮浓度  $< 2.3 \text{ mg/L}$  时,氨氮硝化符合一级反应,速率常数为  $0.23 \text{ d}^{-1[15]}$ 。

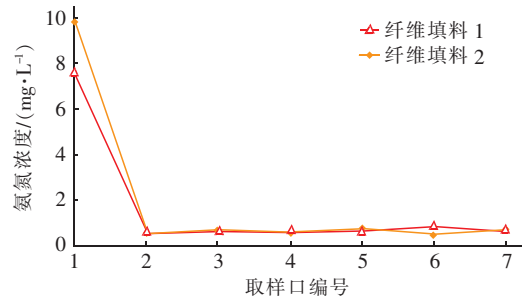


图 6 不同高度下两种纤维填料 BAF 的出水氨氮浓度

Fig. 6 Effluent ammonia nitrogen concentration of two fiber fillers BAF at different heights

### 3.3 不同HRT下的COD去除效果

4 种填料 BAF 在不同 HRT 下的出水 COD 浓度如图 7 所示。可见,出水 COD 浓度随着 HRT 的缩短而提高。在相同的 HRT 条件下,陶粒 BAF 的 COD 去除率略高于沸石-陶粒组合填料,纤维填料 2 的 COD 去除效果略好于纤维填料 1。为了保证出水 COD 浓度  $< 30 \text{ mg/L}$ ,应控制两种颗粒填料 BAF 的  $\text{HRT} > 1 \text{ h}$ ,两种纤维填料 BAF 的  $\text{HRT} > 1.5 \text{ h}$ 。

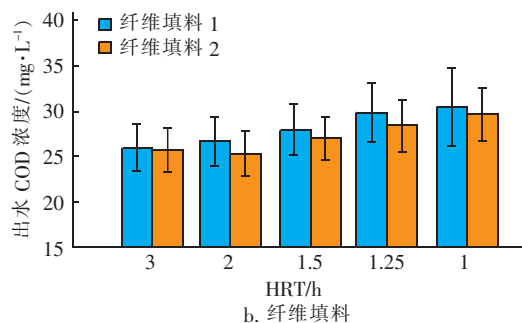
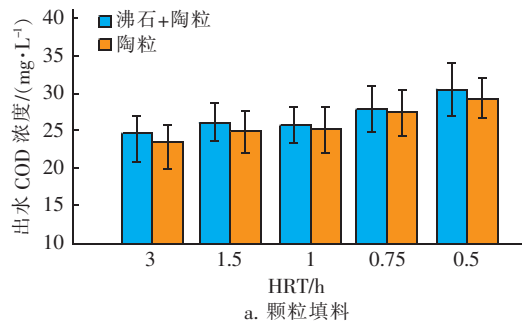


图 7 4 种填料 BAF 在不同 HRT 下的出水 COD 浓度

Fig. 7 Effluent COD concentration of four fillers BAF under different HRT

### 3.4 不同HRT下的浊度去除效果

4 种填料 BAF 在不同 HRT 下的出水浊度如图



8所示。可见,出水浊度随着HRT的缩短而提高;在进水浊度约9~15 NTU的条件下,通过两种颗粒填料的出水浊度对比可以看出,沸石-陶粒组合填料的出水浊度要略低于陶粒填料,且沸石-陶粒组合填料的出水浊度更为稳定。通过两种弹性纤维填料间的对比可以看出,纤维填料2对浊度的去除效果要优于纤维填料1,且纤维填料2的出水浊度更为稳定。由于颗粒填料的空隙率低于纤维填料,因此对污染物的截留作用要略高于弹性纤维填料,但HRT为1.5 h时纤维填料2的出水浊度基本维持在3 NTU以下。

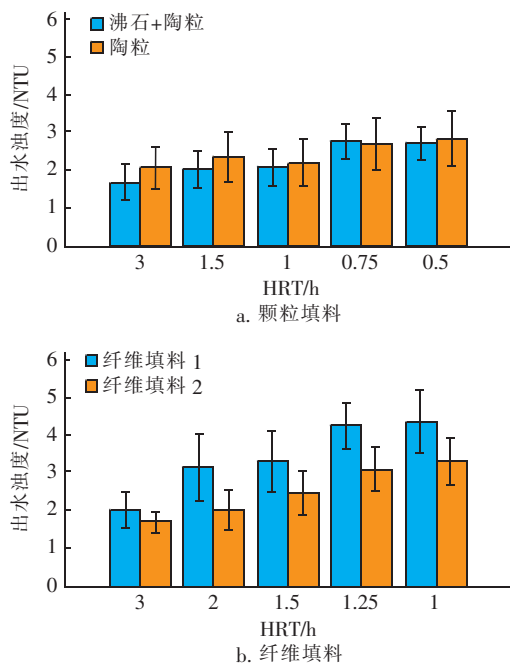


图8 4种填料BAF在不同HRT下的出水浊度

Fig. 8 Effluent turbidity of four fillers BAF under different HRT

### 3.5 进水压力变化及运行周期

反冲洗后开始连续运行7 d,各反应器的进水压力变化情况如图9所示(a、b、c、d分别指沸石-陶粒、陶粒、纤维1、纤维2填料)。可见随着HRT缩短,初始进水压力变大,当压力增加30%时需要反冲洗,两种颗粒BAF不同条件下的反冲洗周期如表3所示。当HRT=1 h时,反洗周期为5~6 d,当HRT为0.5 h时,反冲洗周期为2~3 d,比较相同HRT下的斜率可知,沸石-陶粒组合填料的压力增长速度要高于陶粒填料,这是由于沸石填充后空隙率较小,更容易堵塞。两种弹性纤维填料由于空隙率较大,进水压力几乎不随时间发生变化,不需要频繁反冲。

繁反冲。

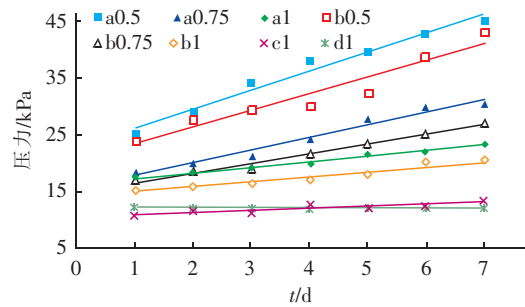


图9 不同HRT下4种填料BAF的进水压力变化

Fig. 9 Inlet pressure change of four fillers BAF under different HRT

表3 两种颗粒填料BAF不同HRT下的反冲洗周期

Tab. 3 Backwash cycle of two granular fillers BAF under different HRT

填料种类	编号	HRT/h	初始压力/kPa	斜率	反冲洗周期/d
沸石-陶粒	a0.5	0.5	25.5	3.303 6	2~3
	a0.75	0.75	18.6	2.246 4	2~3
	a1	1	17.6	1.017 9	5~6
陶粒	b0.5	0.5	24.0	2.939 3	2~3
	b0.75	0.75	17.2	1.735 7	3
	b1	1	15.6	0.875 0	5~6

### 3.6 气水比对处理效果的影响

气水比对处理效果的影响见图10。

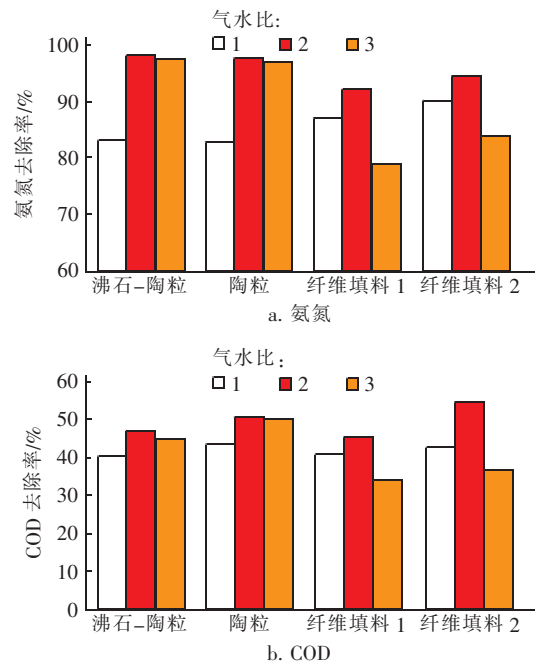


图10 4种填料BAF在不同气水比下的氨氮和COD去除率

Fig. 10 Ammonia nitrogen and COD removal rates of four fillers BAF at different gas-water ratios

当 HRT 为 1.5 h 时,4 种填料均在气水比为 2 时对氨氮和 COD 的去除效果最好,沸石-陶粒、陶粒、纤维填料 1、纤维填料 2 的平均氨氮去除率分别为 98.0%、97.7%、92.1%、94.5%,平均 COD 去除率为 47.1%、50.7%、45.3%、54.7%。当气水比为 3 时,对纤维填料的氨氮和 COD 去除率影响较大,这是曝气量提高使得纤维填料上微生物膜脱落速度较快所致。

#### 4 成本分析

##### ① 投资成本

表 4 4 种填料价格及吨水投资成本

Tab.4 Price of four kinds of fillers and investment cost per ton of water

项 目	填料总价(填料 150 L)/元	HRT/h	日处理水量(填料 150 L)/m <sup>3</sup>	设计使用 寿命/a	投资成本/ (元·m <sup>-3</sup> )
沸石-陶粒	160.8	1	3.6	3	0.04
				5	0.03
陶粒	250.2	1	3.6	3	0.06
				5	0.04
纤维填料 1	450	1.5	2.4	3	0.17
				5	0.10
纤维填料 2	600	1.5	2.4	3	0.23
				5	0.14

##### ② 运行成本

运行成本包括电费、人工费、材料费等,其中电费和材料费可进行比较。

按颗粒填料 BAF 的气水比为 2.5、纤维填料 BAF 的气水比为 1.5 进行计算。两种颗粒填料 BAF 的运行周期约为 6 d,两种纤维填料 BAF 的运行周期约为 12 d,两种颗粒填料 BAF 的 HRT 为 1 h,两种纤维填料 BAF 的 HRT 为 1.5 h,滤池的有效体积均为 150 L,在 12 d 内,颗粒填料 BAF 的总处理量为 43.2 m<sup>3</sup>,纤维填料 BAF 的总处理量为 28.8 m<sup>3</sup>。

颗粒填料 BAF 在 12 d 内需要进行两次反冲洗,其中反冲洗曝气量为 10 m<sup>3</sup>/h,反冲洗水量为 5 m<sup>3</sup>/h,而纤维填料 BAF 需要反冲洗 1 次,反冲洗曝气量为 6 m<sup>3</sup>/h,反冲洗水量为 3 m<sup>3</sup>/h,且 4 种填料的反冲洗均采用先气洗 5 min、再气水联合反洗 10 min 的方法。

以目前常用的 Turbomax 型号风机及飞力潜水排污泵为例,单位曝气量消耗电量约为 0.15 kW·h/m<sup>3</sup>,单位进水消耗电量约为 0.065 kW·h/m<sup>3</sup>,则对于颗粒填料 BAF,在 12 d 内的运行曝气和进水的耗电量为:43.2 m<sup>3</sup> × 2.5 × 0.15 kW·h/m<sup>3</sup> + 43.2

由于不同填料的曝气生物滤池在土建费用、设备费用等除填料以外的投资成本基本一致,且需要参照具体工程要求及处理规模进行分析,因此在此只对不同填料的投資成本进行分析对比。以填料有效体积为 150 L 计算,颗粒填料 BAF 的最佳 HRT 为 1 h,纤维填料 BAF 的最佳 HRT 为 1.5 h,其中陶粒价格约 1 800 元/t,沸石价格约 400 元/t,陶粒堆积密度为 0.926 7 g/cm<sup>3</sup>,沸石堆积密度为 1.19 g/cm<sup>3</sup>。填料寿命分别以 3 a 和 5 a 计算,则 4 种填料 BAF 的填料投资成本如表 4 所示。

m<sup>3</sup> × 0.065 kW·h/m<sup>3</sup> = 19.008 kW·h。

在 12 d 内颗粒填料 BAF 共需要反洗两次,反冲洗曝气和反冲洗进水的耗电量为:2 × [(5 + 10)/60 h × 10 m<sup>3</sup>/h × 0.15 kW·h/m<sup>3</sup> + 10/60 h × 5 m<sup>3</sup>/h × 0.065 kW·h/m<sup>3</sup>] = 0.858 kW·h。

在 12 d 内共处理水量为 43.2 m<sup>3</sup>,按电费为 0.8 元/(kW·h) 计算,则两种颗粒填料 BAF 的吨水运行成本约为:0.8 元/(kW·h) × (19.008 + 0.858) kW·h/43.2 m<sup>3</sup> = 0.37 元/m<sup>3</sup>。

两种弹性纤维填料 BAF 在 12 d 内的运行曝气和进水的耗电量为 8.352 kW·h,在 12 d 内纤维填料 BAF 共需反洗 1 次,反冲洗曝气和反冲洗进水的耗电量为 0.257 5 kW·h,在 12 d 内纤维填料 BAF 共处理水量为 28.8 m<sup>3</sup>,故纤维填料 BAF 的吨水运行成本约为 0.24 元/m<sup>3</sup>。

通过运行和投资成本分析可以看出,尽管两种纤维填料的价格要高于颗粒填料,且由于纤维填料 BAF 所需的 HRT 较长,因此在与颗粒填料保持相同的处理量时需要更大的滤池体积及更高的基建费用和投资成本,但纤维填料 BAF 的运行成本要明显低于颗粒填料,且由于对城市微污染河水的处理水量

较大,而颗粒填料容易出现较严重的堵塞,导致颗粒填料 BAF 对水泵和风机的损耗更大,在实际运行过程中功率也更高,因此当填料使用时间更长及装置长期运行时,纤维填料 BAF 的总成本反而要低于颗粒填料。

当填料更换周期  $>3$  a 时,建议选择纤维填料 1 或处理效果更稳定的纤维填料 2;当更换周期  $<3$  a 时,建议选择处理成本更低的沸石-陶粒组合填料。

## 5 结论

① 颗粒填料的氨氮去除效果要优于纤维填料,并且沸石-陶粒组合填料的氨氮去除效果高于陶粒填料,在水力停留时间为 0.5 h 条件下沸石-陶粒组合填料的氨氮去除负荷大约为  $0.44 \text{ kgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,而陶粒填料的氨氮去除负荷约为  $0.37 \text{ kgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。两种颗粒填料 BAF 的最佳 HRT 为 1 h,对氨氮的转化主要发生在填料的中上部分,且沸石的硝化速率更快。

② 当 HRT 为 1 h 时,纤维填料 2 的硝化负荷最高可达  $0.17 \text{ kgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,高于纤维填料 1 的  $0.16 \text{ kgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,为保证较高的污染物去除效果,纤维填料 BAF 的 HRT 应控制为 1.5 h。

③ 沸石-陶粒填料的出水浊度比陶粒填料更低、更稳定,但压力随时间增长更快。纤维填料的出水浊度虽略高于颗粒填料,但在运行过程中不存在压力的变化,可以通过出水浊度和氨氮的浓度来判断运行周期,其稳定运行时间较长,反冲洗成本较低。颗粒填料 BAF 的反冲洗周期通常为 5~6 d,而纤维填料的运行周期可以达到 12 d 以上。

④ HRT 为 1.5 h 时,4 种填料均在气水比为 2 时对氨氮和 COD 去除效果最佳;而纤维填料所需的气水比较小,运行成本较低。

⑤ 基于 150 L 规模填充床运行数据比较,综合投资成本和运行成本发现,填料更换周期为 3 a 时,两类填料综合成本相同,填料更换周期  $<3$  a 时,颗粒填料具有优势;填料更换周期  $>3$  a 时,纤维填料更具优势。

## 参考文献:

[1] 瞿艳芝,刘操,廖日红,等. 固定化微生物技术处理城市微污染河水研究[J]. 环境科学,2009,30(11): 3306-3310.  
Qu Yanzhi, Liu Cao, Liao Rihong, *et al.* Treatment of

micro-polluted river water by immobilized microorganism technique[J]. Environmental Science, 2009, 30(11): 3306-3310(in Chinese).

[2] 左金龙. 微污染水源水水质特点及其处理工艺选择[J]. 中国给水排水,2012,28(16):15-18.  
Zuo Jinlong. Characteristics of micro-polluted source water quality and selection of its treatment process[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(16): 15-18(in Chinese).

[3] 马军,邱立平. 曝气生物滤池及其研究进展[J]. 环境工程,2002,20(3):7-11.  
Ma Jun, Qiu Liping. Biological aerated filter and its research progress [J]. Environmental Engineering, 2002, 20(3): 7-11(in Chinese).

[4] 朱加乐,林燕,王欣泽,等. 曝气生物滤池脱氮的研究进展[J]. 化工进展,2017,36(3):1077-1083.  
Zhu Jiale, Lin Yan, Wang Xinze, *et al.* Research progress on nitrogen removal by biological aerated filter [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(3): 1077-1083(in Chinese).

[5] 尹宇鹏,陆少鸣. 改进型降流式 BAF 处理微污染河水[J]. 水处理技术,2010,36(11):78-80,84.  
Yin Yupeng, Lu Shaoming. Study on modified down flowing BAF for treatment of micro-polluted river water [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(11): 78-80,84(in Chinese).

[6] 瞿艳芝,刘操,廖日红,等. G-BAF 和 CAS 处理微污染河水的对比研究[J]. 中国给水排水,2010,26(1): 60-62(in Chinese).  
Qu Yanzhi, Liu Cao, Liao Rihong, *et al.* Comparison of micro-polluted river water treatment by G-BAF and activated sludge process [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(1): 60-62(in Chinese).

[7] 刘金香,娄金生,陈春宁. 沸石-陶粒曝气生物滤池处理微污染水源水试验[J]. 工业用水与废水,2005, 36(4):10-12.  
Liu Jinxiang, Lou Jinsheng, Chen Chunng. Test of treatment of slightly polluted source water by zeolite-ceramics biological aerated filter[J]. Industrial Water & Wastewater, 2005, 36(4): 10-12(in Chinese).

[8] Rozic M, Cerjan-Stefanovic S, Kurajica S, *et al.* Ammoniacal nitrogen removal from water by treatment with clays and zeolites[J]. Water Res, 2000, 34(14): 3675-3681.

[9] 杜尔登,刘翔,王华,等. 沸石曝气生物滤池去除氨氮性能及生物学特征分析[J]. 环境污染治理技术与设

- 备,2006,7(9):88-93.
- Du Erdeng, Liu Xiang, Wang Hua, *et al.* Ammonia removal behavior and biological characteristics of zeolite media in a biological aerated filter[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(9):88-93(in Chinese).
- [10] Chang W S, Hong S W, Park J. Effect of zeolite media for the treatment of textile wastewater in a biological aerated filter[J]. *Process Biochem*, 2002, 37(7):693-698.
- [11] 郝兆亮. 曝气生物滤池处理微污染水优化研究[D]. 济南:山东建筑大学,2010.
- Hao Zhaoliang. The Optimal Treatment for Micro-polluted Water with BAF[D]. Jinan:Shandong Jianzhu University, 2010(in Chinese).
- [12] 李小琴. 沸石曝气生物滤池预处理微污染水源的试验研究[D]. 上海:东华大学,2009.
- Li Xiaoqin. The Study of Pretreatment of Micro-polluted Source Water by Zeolite BAF[D]. Shanghai: Donghua University, 2009(in Chinese).
- [13] 田伟君, 郝芳华, 翟金波. 弹性填料净化受污染入湖河流的现场试验研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(5):1308-1312.
- Tian Weijun, Hao Fanghua, Zhai Jinbo. Elasticity plastic filler for purification of polluted streams in situ entering lake[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5):1308-1312(in Chinese).
- [14] 张小东, 陈季华, 奚旦立. 生态填料在微污染水体处理中的应用[J]. *水处理技术*, 2008, 34(1):56-58.
- Zhang Xiaodong, Chen Jihua, Xi Danli. Application of ecological padding in micro-polluted water treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, 34(1):56-58(in Chinese).
- [15] 李娟英, 赵庆祥. 氨氮生物硝化分段动力学特性研究[J]. *安全与环境学报*, 2005, 5(4):46-48.
- Li Juanying, Zhao Qingxiang. Study on characteristic of subsection kinetics of nitrification[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(4):46-48(in Chinese).



作者简介:聂中林(1994-),男,河南驻马店人,硕士,助理工程师,主要从事水污染控制相关研究。

E-mail:nzlnpi@163.com

收稿日期:2019-07-11

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命