

# 3 种填料曝气生物滤池处理效能及硝化特性对比

张守彬<sup>1,2</sup>, 邱立平<sup>2</sup>, 杜茂安<sup>1</sup>, 马 军<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090;

2. 济南大学 土木建筑学院, 济南 250022)

**摘 要:** 为考察天然斜发沸石、页岩陶粒和石灰岩碎石曝气生物滤池的处理效能, 利用模型试验对比分析 3 种填料滤池的氨氮及 pH 空间分布特征, 探讨进水负荷及 pH 对 3 种滤池硝化效率的影响规律. 结果表明, 在较高的进水 pH ( $\text{pH} > 6.5$ ) 条件下, 沸石 BAF 的氨氮去除能力优于石灰岩 BAF 和陶粒 BAF. 提高进水有机物负荷、氨氮负荷到一定程度将抑制曝气生物滤池的硝化效率, 增加进水 pH 可有效提高 3 种填料 BAF 的氨氮去除率. 沸石、陶粒和石灰岩曝气生物滤池均具有较好的有机物和悬浮物去除能力, 沸石 BAF 和石灰岩 BAF 的硝化除氮效率优于陶粒 BAF. 石灰岩 BAF 能够很好地适应进水 pH 的变化, 具有稳定的硝化效率, 比较适于处理低 pH 和高氨氮负荷的污水.

**关键词:** 曝气生物滤池; 硝化特性; pH; 沸石; 陶粒; 石灰岩

**中图分类号:** TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 0367-6234(2009)02-0057-04

## Treatment efficiency and nitrification properties in three biological aerated filters (BAF) with different media

ZHANG Shou-bin<sup>1,2</sup>, QIU Li-ping<sup>2</sup>, DU Mao-an<sup>1</sup>, MA Jun<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** A parallel pilot-scale study was carried out on treatment efficiency and nitrification properties of three biological aerated filters (BAF) filled with zeolite, ceramist and carbonate media, respectively. The distribution of ammonium nitrogen and pH value in the filter bed of the three BAFs and the influence of influent loading and pH on nitrification were also investigated. It was observed that the nitrification performance in zeolite BAF was better than that of carbonate BAF and ceramist BAF when the influent pH value was more than 6.5. The nitrification in all three BAFs was inhibited when increased the influent organic matter and ammonia loading to a certain degree, and enhanced by increasing the influent pH value. Results show that all three BAFs have promising COD and SS removal efficiencies, and the nitrification performance in zeolite BAF and carbonate BAF is superior to that of ceramist BAF. The carbonate BAF is considered more suitable to treat the wastewater with higher ammonia concentration and lower pH value, which has stable nitrification efficiency and better adaptability to varied influent pH values.

**Key words:** biological aerated filter (BAF); nitrification properties; pH value; zeolite; carbonate; ceramist

收稿日期: 2007-03-23

基金项目: 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目 (2005BS08008); 山东省自然科学基金资助项目 (Y2006B39); 山东省教育厅科技计划项目 (J06D1); 济南大学博士基金资助项目 (B0501).

作者简介: 张守彬 (1980—), 男, 博士研究生, 讲师;  
杜茂安 (1946—), 男, 博士, 教授, 博士生导师;  
马 军 (1962—), 男, 特聘教授, 博士生导师.

曝气生物滤池是一种适合中小型点源污水处理与回用的新型生物处理技术<sup>[1]</sup>. 随着 BAF 工程应用的不断增加, 深入研究 BAF 的运行特性、参数优化及其影响规律, 不断提高 BAF 处理工艺的高效性和稳定性, 已经成为 BAF 研究的当务之急<sup>[2]</sup>. BAF 以颗粒填料为生物膜载体, 同时, 填料床又兼具过滤截留和固液分离的功能, 填料性能对其处理

效能、工程造价及运行费用影响较大<sup>[3]</sup>. 因此, 填料特性研究是 BAF 的核心问题之一<sup>[4]</sup>.

天然沸石、陶粒和石灰岩碎石是比较常见的 BAF 填料, 在相关研究中取得了较好的应用效果<sup>[4-8]</sup>, 但是, 在同等条件下的对比研究却未见报道. 本文对比考察了天然斜发沸石 BAF、页岩陶粒 BAF 和石灰岩碎石 BAF 对 COD、氨氮、总氮、浊度和总磷的去除效能, 重点分析了 3 种滤池的硝化特性及影响因素, 以期探讨提高反应器处理效率和运行稳定性的技术方法, 为 BAF 的优化设

计和运行管理提供参考.

1 实 验

1.1 实验装置与材料

试验装置采用 3 座同尺寸上向流有机玻璃曝气生物滤池, 单池直径 150 mm, 高 2.5 m. 填料物理特征见表 1, 填料填装高度 1.8 m. 实验用水以葡萄糖、蛋白胨、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4$  配制, 按体积比 10% 加入生活污水以补充营养成分, 用  $\text{HCl}$ 、 $\text{NaOH}$  和  $\text{NaHCO}_3$  调节酸碱度 (表 2).

表 1 填料的物理性质

填料种类	粒径 mm	密度 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	堆积密度 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	孔隙率 %	比表面积 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
斜发沸石	3~5	2324	1116	42.4	6.58
石灰岩碎石	3~5	2868	2262	38.7	3.56
页岩陶粒	3~5	1598	1194	55.8	4.16

表 2 模拟生活污水水质

COD $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	氨氮 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	总氮 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	总磷 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	亚硝态氮 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	硝态氮 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH
132~485.5	22.6~57.4	31.1~68.2	4.7~9.1	0~0.01	0~0.01	5.2~8.1

1.2 实验方法

实验期间水温为  $18 \sim 28^\circ\text{C}$ , 气水比 5:1. 设计最大水头 1.2 m, 实际运行时水头损失达到 1 m 即进行反冲洗, 按气—气+水—水的程序进行气水联合反冲洗, 时间依次为 2~3 min, 3~5 min, 9~11 min, 冲洗气强度  $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 水强度  $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .

COD、TP、氨氮、TN 等指标的测定均按标准方法进行<sup>[9]</sup>, 取样时间为反冲洗后 8~20 h, 采样频率为每个稳定状态至少取样 3 次, 周期为 12~36 h. SS 因测定比较繁琐, 且在低质量浓度时准确性差, 故采用浊度表征<sup>[4]</sup>.

2 结果与讨论

2.1 不同填料曝气生物滤池的处理效能对比

在进水 COD 132~485.5 mg/L, 氨氮 22.6~57.4 mg/L, 总氮 31.1~68.2 mg/L, 总磷 4.7~9.1 mg/L, pH 5.2~8.1, 水温  $18 \sim 28^\circ\text{C}$ , 气水比 5:1, HRT 0.4~2.5 h 的运行条件下, 3 种填料曝气生物滤池对 COD、氨氮、浊度、总氮和总磷的平均去除率如图 1 所示.

图 1 表明, 实验中沸石、陶粒和石灰岩填料 BAF 均表现出良好的有机物和悬浮物去除能力. 其中陶粒 BAF 的有机物去除率稍优于沸石 BAF 和石灰岩 BAF, 其原因可能和页岩陶粒 BAF 较高

的孔隙率有关 (表 1). 曝气生物滤池对有机物和悬浮物的去除主要通过生物氧化及物理截留作用完成, 去除率的高低主要由填料床的累积活性生物膜量和纳污率决定. 填料的表面特性、比表面积和几何形态特征的差异是影响有机物和悬浮物去除效率的主要因素<sup>[3]</sup>, 而填料几何形态特征又决定了滤床的空隙率大小. 图 1 中沸石 BAF 的浊度去除率稍高于石灰岩 BAF, 应该与沸石填料具有良好的离子交换和吸附性能有关<sup>[5-6]</sup>.

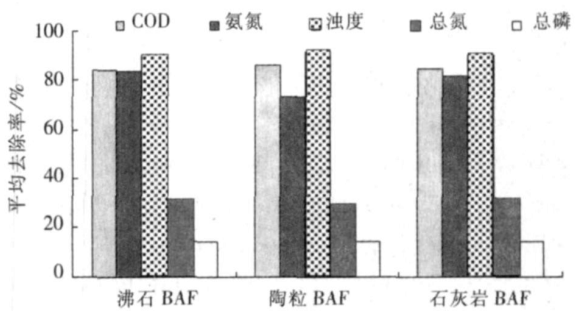


图 1 3 种填料曝气生物滤池的处理效能对比

图 1 中 3 个 BAF 的总氮和总磷去除率分别在 30% 和 15% 左右, 说明单级曝气生物滤池的总氮和总磷的去除能力较差, 而且不同填料 BAF 的生物脱氮除磷能力没有明显差异.

图 1 中 3 座 BAF 的氨氮去除率差异较大, 依次为沸石 BAF (83.6%) > 石灰岩 BAF (81.6%) > 陶粒 BAF (73.5%). 图 2 是实验期间 3 种填料

BAF的进出水氨氮质量浓度及氨氮去除率的逐日变化情况.由图 2可知,沸石 BAF和石灰岩 BAF不仅表现出较强的氨氮去除能力,而且在不同负荷条件下具有稳定的氨氮去除效率;而陶粒 BAF尽管也表现出良好的氨氮去除能力,但是其稳定性较差,去除率波动幅度明显大于前两者.

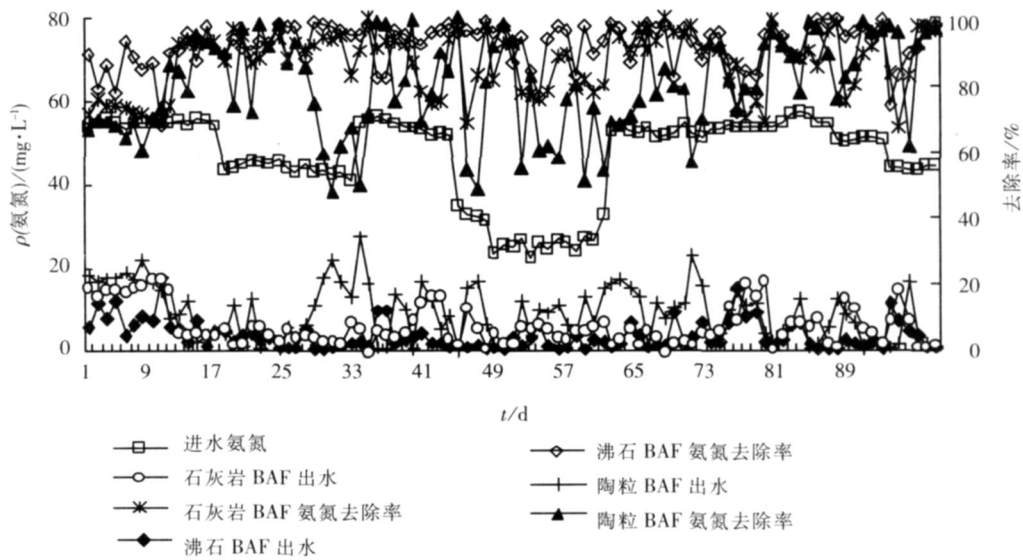


图 2 不同填料曝气生物滤池对氨氮的去除曲线

2.2 不同填料曝气生物滤池的沿程空间变化特征

为了进一步解析填料性能对 BAF硝化特性的影响规律,在水温 20~22℃,水力停留时间 1.25 h,气水比 5:1的运行条件下,考察了 BAF滤床空间内的氨氮及去除率的沿程分布情况(图 3).

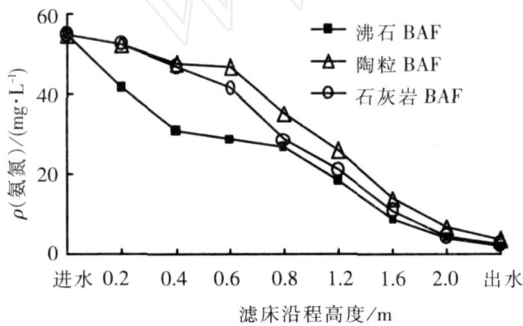


图 3 3种填料曝气生物滤池氨氮浓度的沿程分布

图 3中 3座 BAF的氨氮空间分布表现出不同的变化趋势:沸石 BAF的氨氮质量浓度先在 0~0.4 m空间中急速下降,然后在 0.4~0.8 m空间内缓慢降低,最后在 0.8~2 m空间内近乎线性下降;陶粒 BAF和石灰岩 BAF,其氨氮质量浓度则是先缓慢降低(0~0.6 m),再快速下降(0.6~2 m).图 3的结果表明,由于填料性能的差异,不同 BAF填料床具有不同的氨氮沿程去除特征.单级 BAF的氨氮去除规律是和有机物、悬浮物的去除密切相关的(图 4).

图 4表明,曝气生物滤池对污染物的最大降解去除势在反应器空间内渐次出现,其顺序为浊度、COD和氨氮.在有机物存在的条件下,由于异养微生

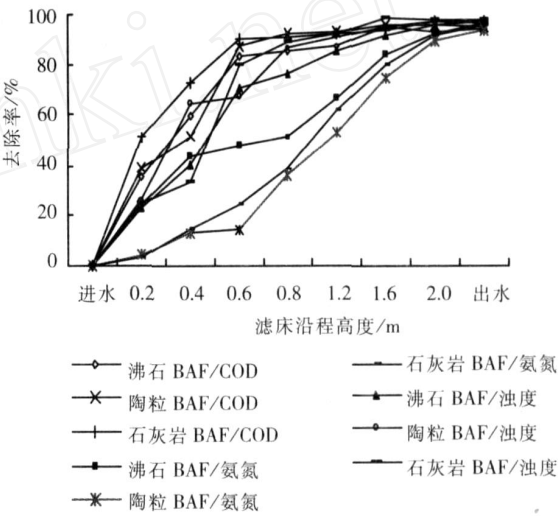


图 4 曝气生物滤池 COD、SS和氨氮去除率的沿程变化  
物的竞争优势,BAF进水端附近区域主要为有机物优势降解区,氨氧化细菌受溶解氧的限制而不能成为优势菌属,所以,氨氮去除能力较差;只有当有机物被消耗至一定程度,异养菌因底物缺乏而失去优势地位,氨氧化细菌才能在充足的溶解氧条件下大量氧化氨氮,表现为氨氮质量浓度的迅速下降,正如图 3中陶粒 BAF和石灰岩 BAF的氨氮质量浓度变化所示.沸石填料具有很强的吸附和离子交换能力,其氨氮去除是通过吸附作用、交换作用和生物氧化作用来完成的<sup>[10]</sup>.在进水端附近,生物硝化作用因有机负荷而受到抑制,但是沸石填料可通过吸附作用和交换作用降低水中氨氮质量浓度,表现出氨氮质量浓度的急速下降,经过短暂的平稳下降后,氨氧化过程发挥作用,氨氮质量浓度又迅速下降.这也正是

沸石 BAF 具有较强硝化能力的主要原因。

### 2.3 进水负荷对曝气生物滤池硝化效率的影响

为深入探讨不同填料曝气生物滤池的硝化特性规律,考察了进水 COD 负荷、氨氮负荷对 3 种填料曝气生物滤池氨氮去除率的影响,结果见图 5、6

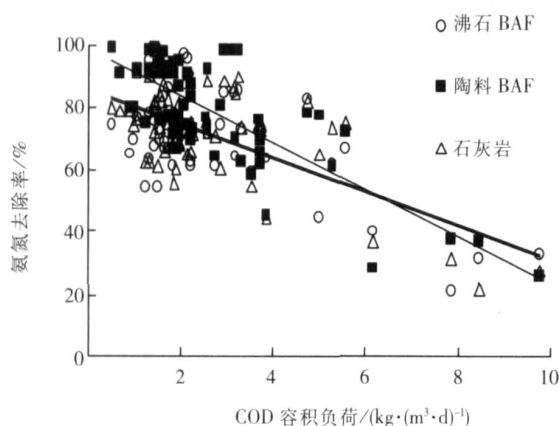


图 5 进水 COD 负荷对曝气生物滤池氨氮去除率的影响

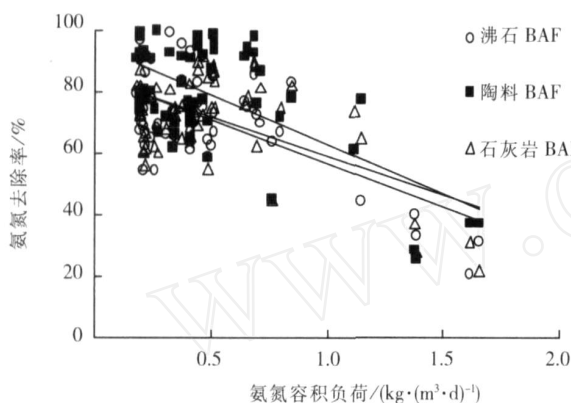


图 6 进水氨氮负荷对曝气生物滤池氨氮去除率的影响

由图 5、6 可知,随着进水 COD 负荷和氨氮负荷的不断增大,BAF 反应器对氨氮的去除率不断降低。当进水氨氮负荷小于  $1.2 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  时,3 座 BAF 模型反应器的氨氮去除率基本稳定在 60% ~ 90%;而当进水氨氮负荷增加至  $1.2 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  以上时,其氨氮去除率则显著下降。

### 2.4 进水 pH 的影响

图 7 为进水 COD 负荷  $< 1.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,氨氮负荷  $< 1.0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,水温  $22 \sim 28^\circ\text{C}$ ,水力停留时间 1.25 h,气水比 5:1 时,3 种填料曝气生物滤池在不同进水 pH 条件下的氨氮平均去除率情况。

由图 7 可知,随着进水 pH 的提高,3 个曝气生物滤池的氨氮平均去除率逐渐增加,说明提高 pH 都能提高曝气生物滤池的硝化效能。当进水  $\text{pH} < 6.5$  时,由于受碱度供应不足的影响,硝化菌的活性受到抑制。但石灰岩填料能够在反应器运行过程中不断溶出碱度,可有效缓解硝化菌活性的酸性抑制,氨氮

去除率比较高;而沸石 BAF 尽管也受碱度不足影响,但其沸石填料具有很好的吸附和离子交换除氮能力,因此,3 个反应器的氨氮平均去除率依次为陶粒 BAF < 沸石 BAF < 石灰岩 BAF,并且其硝化能力的差异随着 pH 的下降愈加显著。随着进水 pH 不断提高,碱度供应充足,硝化菌活性逐步得到恢复,3 个反应器的氨氮去除率逐渐升高,此时沸石 BAF 的多功能除氮优势凸现出来,因此,当  $\text{pH} > 6.5$  时,不仅陶粒 BAF 的硝化能力得到显著提高,石灰岩 BAF 的氨氮去除率也随 pH 的提高而逐渐升高,而沸石 BAF 的硝化效率则超过前两者。可见,石灰岩 BAF 能够很好地适应进水 pH 的变化,而沸石 BAF 在较高的进水 pH 条件下更能发挥其高效除氮优势,因此,石灰岩 BAF 和沸石 BAF 较陶粒 BAF 具有更加稳定、高效的硝化效率。

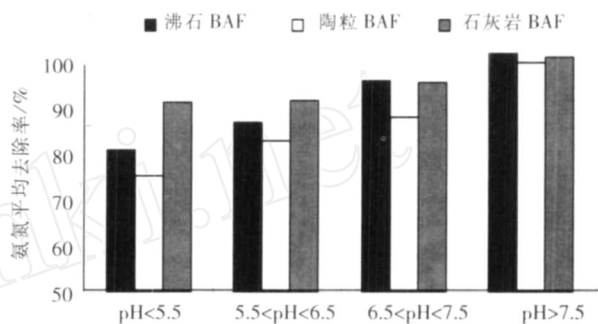


图 7 进水 pH 对不同填料曝气生物滤池氨氮去除率的影响

## 3 结 论

1) 沸石、陶粒和石灰岩曝气生物滤池均具有较好的有机物和悬浮物去除能力,填料物理性能对 BAF 有机物和悬浮物去除效能的影响较小。

2) 沸石 BAF 和石灰岩 BAF 的硝化效能优于陶粒 BAF,3 种填料床具有不同的氨氮空间分布特征,并与填料性能密切相关。提高进水有机物负荷、氨氮负荷到一定程度将抑制曝气生物滤池的硝化效率,增加进水 pH 可有效提高 3 种填料 BAF 的氨氮去除率。

3) 石灰岩 BAF 能够很好地适应进水 pH 的变化,具有稳定的硝化效率。石灰岩 BAF 对于处理低 pH 和高氨氮负荷的污水具有明显的优势。在较高的进水 pH 条件下,沸石 BAF 的氨氮去除能力优于石灰岩 BAF 和陶粒 BAF。

## 参考文献:

- [1] CHEN J J, MCCARTY D, SLACK D, *et al*. Full scale studies of a simplified aerated filter (BAF) for organic and a nitrogen removal [J]. Wat Sci and Technol, 2000, 41 (4 - 5): 1 - 4. (下转第 65 页)

水处理工艺的优化奠定基础。

3)在本试验条件下,尿素水解成为 SBR 处理高质量浓度尿素废水的限速步骤,为提高尿素去除率,进水中有机物含量应维持一定水平。

4)尿素容积负荷对亚硝酸盐积累率、尿素去除效果、氨氮的去除效果影响较大,当尿素容积负荷控制在  $1.13 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  以下时,能够获得较高的尿素去除率和氨氮转化率。

## 参考文献:

- [1] JETTEN M S M. Towards a more sustainable municipal wastewater treatments system[J]. *Water Sci Tech*, 1997, 35(9): 171 - 180.
- [2] JETTEN M S. The anaerobic oxidation of ammonium[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1999, 22(5): 421 - 437.
- [3] RUIZ G, JESON D, CHAMY R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration[J]. *Wat Res*, 2003, 37(6): 1371 - 1377.
- [4] 郑婕,丁洪强. 二乙酰-胍法测定游泳池水中尿素的改进[J]. *环境与健康杂志*, 2000, 17(4): 233, 241.
- [5] ROBER A, BURN E, WAN Y Y, *et al* Bacterial ureases in infectious diseases[J]. *Microbes and Infection*, 2000, 2: 533 - 542.
- [6] ANTHONISEN A C, LOEHR R C, PRAKASAM T B S,

*et al* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. *Water Pollut Control Federation*, 1976, 48: 835 - 843.

- [7] 高大文,彭永臻,王淑莹. 控制 pH 实现短程硝化反硝化生物脱氮技术[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(7): 1664 - 1666.
- [8] SUTHERSAN S, GANCZARCEZYK J. Inhibition of nitrite oxidation during nitrification: Some observations[J]. *Water Pollut Res*, 1986, 21: 257 - 262.
- [9] GARRDO J M, BENTHUM van W A J, LOOSDRECHT van M C M, *et al* Influence of dissolved oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor[J]. *Biotechnol Bioeng*, 1997, 53: 168 - 175.
- [10] BERNETN, PENG D, DELGENE S J P, *et al* Nitrification at low oxygen concentration in biofilm reactor[J]. *Environ Eng*, 2001, 127: 266 - 272.
- [11] JAYAMOHAN S, OHGAKI S, HANKI K. Effect of DO on kinetics of nitrification[J]. *Water Supply*, 1988, 6: 141 - 148.
- [12] 高大文,彭永臻,王淑莹. 短程硝化生物脱氮工艺的稳定性[J]. *环境科学*, 2005, 26(1): 63 - 67.
- [13] 马文漪,杨柳燕. 环境微生物工程[M]. 南京:南京大学出版社, 1998.

(编辑 刘 彤)

(上接第 60 页)

- [2] 沈耀良. 曝气生物滤池工艺及运行控制[J]. *水处理技术*, 2005, 30(7): 7 - 10.
- [3] KENT T D, FITZPATRICK C S B, WILLIAMS S C. Testing of biological aerated filter (BAF) media[J]. *Wat Sci Tech*, 1996, 34(3 - 4): 363 - 370.
- [4] 邱立平. 曝气生物滤池组合工艺特性及生活污水处理效能[R]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学博士后研究报告, 2006.
- [5] YU Y, FENG Y, QIU L, *et al* Effect of grain - slag media for the treatment of wastewater in a biological aerated filter[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(11): 4120 - 4123.
- [6] HAN S, YUE Q, YUE M, *et al* Effect of sludge - fly ash ceramic particles (SFCP) on synthetic wastewater treatment in an A/O combined biological aerated filter[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(6): 1149 - 1155.

- [7] ROZIC M, STEFANONVIC S C, KURANJICA S. Ammonium nitrogen removal from water by treatment with clay sand zeolites[J]. *Wat Res*, 2000, 34(14): 3675 - 3681.
- [8] HE S, XUE G, KONG H. The performance of BAF using natural zeolite as filter media under conditions of low temperature and ammonium shock load[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(8): 291 - 295.
- [9] 国家环保总局《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.
- [10] DELATOLLA R, BERK D, TUFENKIJIN. Rapid and reliable quantification of biofilm weight and nitrogen content of biofilm attached to polystyrene beads[J]. *Wat Res*, 2008, 42(13): 3082 - 3088.

(编辑 刘 彤)