

两段曝气生物滤池处理生活污水的净化效能

王春荣¹, 李 军², 王宝贞³, 张国柱⁴

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京工业大学 北京水质科学与环境恢复工程重点实验室, 北京 100022 3. 哈尔滨工业大学 水污染控制研究中心, 哈尔滨 150090; 4. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 深圳 518055)

摘 要: 采用两段曝气生物滤池进行了生活污水的试验研究, A 段反应器进水负荷分别控制在 9.17、15.59 和 22.01 m³/(m²·d), 气水体积比为 6:1, B 段反应器气水体积比控制在 2:1, 温度在 18~20℃。经过近 3 个月的试验运行, 结果表明, 在稳态运行条件下, 该系统出水稳定优质 ($\rho_{\text{sCOD}} < 30 \text{ mg/L}$, $\rho_{\text{NH}_3\text{-N}} < 4.0 \text{ mg/L}$, $\rho_{\text{ss}} < 10 \text{ mg/L}$, 无色无味透明), 做进一步的消毒处理后可作生活杂用水。而在负荷变化及实施反冲洗等非稳态条件下, 系统出水的 sCOD、氨氮、TN 和 TP 出水质量浓度仍保持较低值。试验表明, 要维持两段 BAF 系统持续稳定运行, 预处理、适当的反冲洗强度和良好的启动条件是必要的。

关键词: 两段曝气生物滤池(BAF); 稳态运行; 非稳态运行; 去除率

中图分类号: X 701.1

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2006)12-1071-06

20 世纪 80 年代末, 曝气生物滤池(biological aerated filter, 简称 BAF)在欧洲开始发展起来^[1]。作为一项新的污水处理技术, 进入 90 年代后, 掀起了对曝气生物滤池研究和开发的热潮^[2-3]。它是一种固定膜生物处理工艺, 其中的载体填料对运行有重要影响, 而外在的运行条件如水力停留时间、温度、溶解氧、水力负荷、有机负荷以及反冲洗方式都对 BAF 的运行有重要影响。

目前, 有关专家就稳态条件下生物膜系统的处理情况也做了大量研究^[4-7]。“稳态”生物膜系统是^[8]: 当液体质量浓度一定时, 反应器内的生物膜即没有净增长也没有净脱落时的状态。稳态的生物膜将一直稳定地去除污染物, 直到质量浓度达到某一极限值(S_{min}), 此时部分生物膜受到破损, 稳态运行受到破坏。因此, 提高或降低有机负荷或水力负荷就能破坏生物膜的稳态运行, 引起生物膜的增长或脱落, 造成“非稳态运行”。

本文针对 BAF 的运行特点, 采用两段曝气生物滤池进行生活污水处理, 研究了稳态及非稳态运行阶段系统的运行情况, 证实了系统具有良好的处理效果, 并探讨了长期稳定运行的控制条件和注意事项, 为实际运行提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验装置

本试验装置如图 1, 2 个反应器均由有机玻璃加工而成, 外形为圆柱形, 直径 10 cm, 其中 A 段反应器高 1.8 m, B 段反应器高 2 m, 有效容积分别为 9.8 L 和 11.8 L。

两反应器均装有火山岩填料, 粒径 3~5 mm, 具体填料特性见表 1。

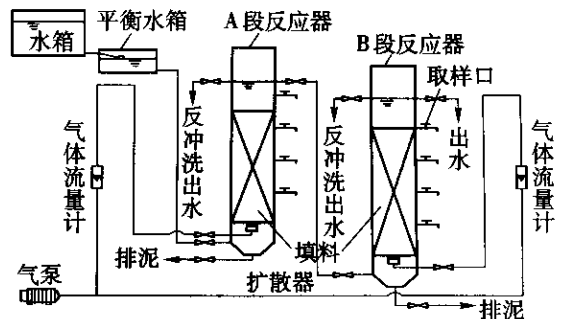


图 1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

收稿日期: 2005-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助(50678008)北京市自然科学基金资助(8052005)北京市科技新星计划项目资助(9558100800)。

作者简介: 王春荣(1978-), 女, 内蒙古赤峰人, 讲师。

万方数据

表 1 火山岩填料特性
Tab.1characteristic of lava-media

填料	占反应器的体积/%		堆积密度/ (kg · m ⁻³)	实际密度/ (kg · m ⁻³)	孔隙度/%
	A 段	B 段			
火山岩	67	70	0. 628 × 10 ³	1. 673 × 10 ³	62. 5

1.2 原水及试验方法

本试验用水为生活污水,取自北方某大学家属区,其主要水质参数见表 2. 该水质为经过筛网过滤后的原水水质.

表 2 生活污水的水质情况
Tab.2 Quality of domestic wastewater

项目	$\rho_{SS}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho_{sCOD}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho_{TN}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho_{DO}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH
范围	60. 21 ~ 98. 64	145. 6 ~ 330. 2	34. 30 ~ 40. 38	38. 18 ~ 49. 22	0. 9 ~ 1. 6	6. 5 ~ 8. 18
平均值	75. 8	236. 5	38. 20	45. 10	1. 2	7. 2

两反应器均从底部进水,汽水同向. A 段反应器启动时投加一定量的 SBR 池沉降污泥作为种泥,闷曝 3 d 后改为连续流进水,系统运行 15 d 后对 COD 和 NH₃-N 的去除率分别达到 70% 和 30% ,至此标志挂膜成功. B 段反应器在此试验前,一直进行高氨废水的脱氮处理,已经连续运行 8 个月,其中微生物主要以硝化菌为主,经过 15 d 的启动运行具有良好的脱氮效果. 系统启动后,A 段反应器分别在 9. 17、15. 59 和 22. 01m³/(m² · d)的水力负荷下运行,汽水比 6: 1,水温为 18 ~ 20℃ ;B 段汽水比 2: 1,运行时测定各反应器进、出水及各取样口处的 sCOD、SS、NH₃-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN、pH 值和 DO,以考察反应器内稳态及非稳态运行时污染物的去除效果.

2 结果及讨论

2.1 稳态运行时两段反应器污染物的去除效果

图 2(a)表示了系统稳定运行后,两段 BAF 进出水 sCOD 的质量浓度及去除效率随时间的变化曲线.

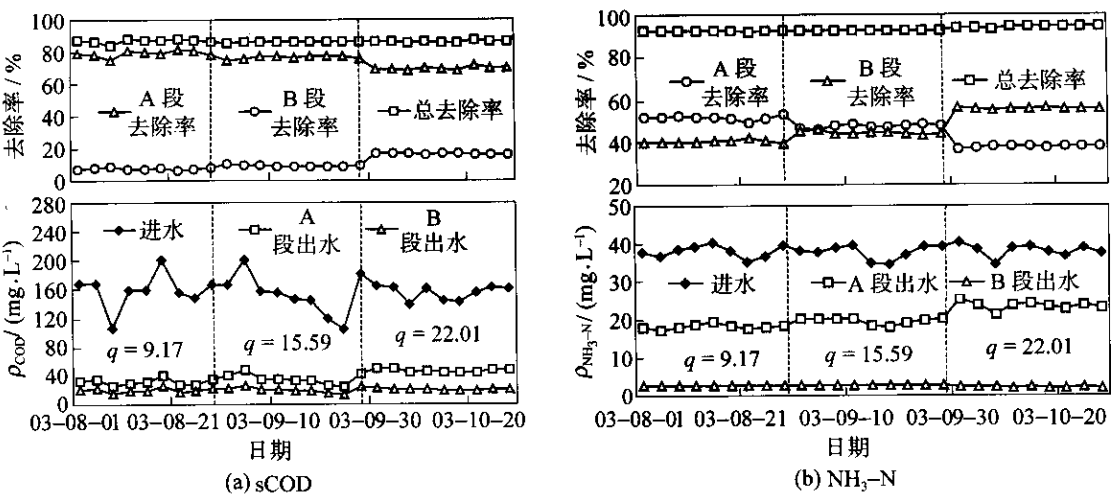


图 2 进出水浓度及去除率的变化

Fig.2 Variation of concentration and removal

A 段反应器主要进行脱碳处理,随着进水负荷的提高 sCOD 去除率有所降低,当负荷分别为 9.17、15.59 和 22.01 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,平均 sCOD 去除率分别为 80.2%、76.8% 和 69.2%,表明 A 段反应器在供氧充足的情况下,sCOD 的去除率与进水负荷呈负相关性,也说明水力停留时间越长越有利于 sCOD 的去除. B 段反应器主要功能是脱氮,sCOD 的去除率,介于 7.71%~16.43% 之间,研究发现 A 段出水 sCOD 质量浓度越高(即负荷越高),B 段的 sCOD 去除率就越高.从长期的运行结果来看,系统出水 sCOD 均保持在 30 mg/L 以下,尽管因负荷的变化导致 A 段出水 sCOD 有波动,但经过 B 段反应器的再次处理后,系统出水的 sCOD 去除率仍保持稳定、出水水质较好.

图 2(b)为系统运行稳定后,各段进出水氨氮质量及去除率随时间的变化曲线.系统对氨氮的去除率为 91.54%~93.96%;A 段反应器对氨氮的去除率介于 37.18%~52.88% 之间,且随水力负荷的增加,氨氮去除率呈下降趋势;B 段为脱氮段,氨氮去除率达到 39% 以上.由于 B 段反应器进行生活污水处理前,一直进行氨氮废水的处理,因此其中的硝化菌数量较多,致使废水中的氨氮得以充分硝化,系统出水氨氮质量浓度均在 4 mg/L 以下.

图 3(a)为各段进出水 TN 质量浓度及去除率随时间的变化情况. A 段反应器对 TN 平均去除率为 19.8%;TN 的去除主要是在 B 段发生,且随着 B 段进水负荷的增加,TN 的去除率明显升高,这是因为当 B 段气水比控制在 2:1 时,反应器底部主要进行氮的硝化作用,随着硝化作用的进行,反应器中上部溶解氧浓度降低,生物膜内部的缺氧和厌氧层厚度增加,在生物膜外部发生硝化作用的同时,内部缺氧及厌氧层也进行着反硝化作用.由于 A 段负荷高时,B 段进水 COD 质量浓度相对较高,致使反硝化过程有充足的碳源,反硝化效果好,这也解释了为什么 A 段进水水力负荷高时,系统出水的 COD 和 TN 质量浓度相对较低.

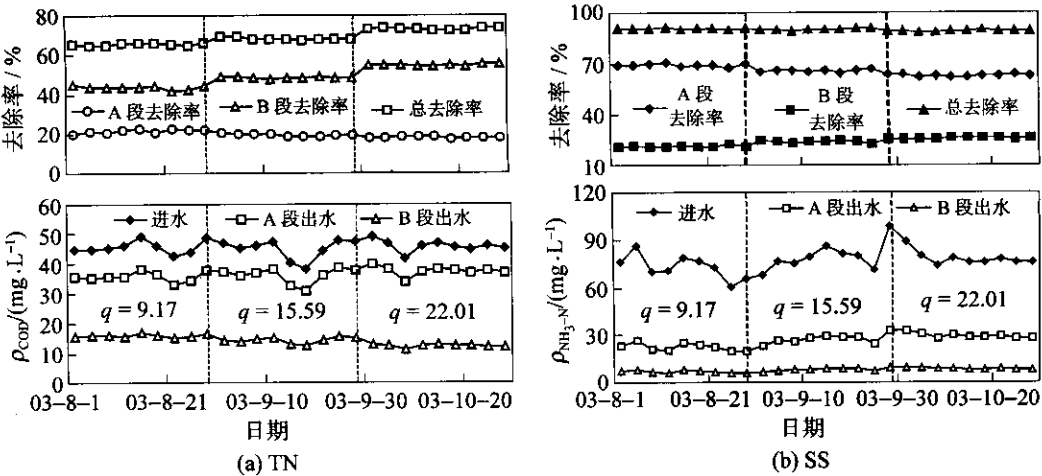


图 3 进出水浓度及去除率随时间的变化曲线
Fig. 3 Variation of concentration and removal

由于系统原水是经过筛网过滤后的污水,所以进水 SS 没有太大的悬浮颗粒,进水质量浓度介于 60.2~98.6 mg/L 之间,平均质量浓度 75.8 mg/L .图 3(b)表示系统稳定运行后的各段进出水 SS 浓度及去除率变化情况. A 段反应器随负荷的增加对 SS 的去除率呈下降趋势,在水力负荷为 9.17、15.59 和 22.01 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,A 段平均去除率分别为 68.9%、65.5% 和 62.4%.

分析认为,进水负荷较大时,出水携带的 SS 也较多,经过 B 段反应器的再次过滤截留后,出水的 SS 较稳定,基本介于 6~9.8 mg/L 之间,平均出水浓度为 7.3 mg/L ,表明两段 BAF 对 SS 具有良好的去除效果,SS 总去除率达 90.4%.

通过系统对各污染物的净化效能可以看出,如果对系统出水再进行消毒处理可满足生活杂用水的回用标准.

2.2 非稳态运行时两段反应器污染物的去除效果

“非稳态运行”是指在水力负荷变化及实施反冲洗后,反应器从一个稳定状态达到另一个稳定状态的时间段。

实际运行过程中,进水负荷的变化是经常的现象,而对于曝气生物滤池来说反冲洗也是维持生物膜高活性的必要步骤,针对以上 2 种运行工况,对曝气生物滤池去除污染物的效果进行了试验。试验发现,当水力负荷变化时,系统对 SS、氨氮、TN 的影响不是很明显,总的来说,负荷增加后其去除效果主要在 A 段有变化,且基本发生在负荷变化 2 h 后,随之达到去除效率最低点,经过 2~3 h 的适应期后,处理效果再次达到稳定。而 sCOD 的去除效果在此期间变化较明显,图 4(a)为负荷从 $9.17 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 升高到 $15.59 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,各段反应器对 sCOD 去除率的变化曲线。负荷增加后,A 段 sCOD 的去除效果变化明显,而 B 段的去除效果保持稳定,确保了系统出水的稳定性。增加负荷后,A 段出水 sCOD 浓度并没有立即发生变化,在施加负荷近 2 h 后,去除率有所下降,到 3 h 去除率仅为 45%;系统不断地适应,在水力负荷增加近 5 h 后 A 段反应器的 sCOD 去除率得以恢复,系统逐步达到稳态运行。

图 4(b)为负荷从 $15.59 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增加到 $22.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,系统对 sCOD 的去除效果。与图 4(a)的结果相似,增加负荷,A 段反应器的 sCOD 去除率有所变化,B 段反应器运行稳定。与图 4(a)结果不同的是,负荷较大时进一步调整负荷对 sCOD 去除率的影响减小,A 段 sCOD 去除率最低点也是在施加负荷 3 h 后达到,但该值却增加到 57.5%。BAF 反应器在高负荷下运行时,对流量变化具有良好的抗冲击能力。

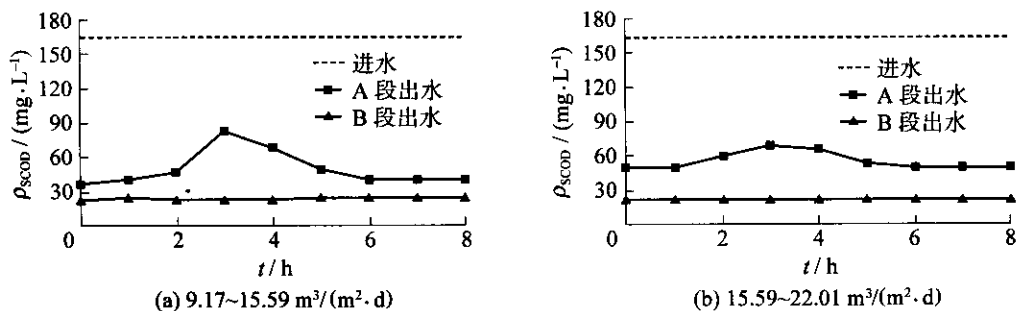


图 4 不同负荷下系统出水 sCOD 的变化规律

Fig.4 Variation of sCOD with different hydraulic loading rate

试验还考察了反冲洗后各参数的变化情况,其中 A 段反应器因进水有机物浓度较高,在运行过程中反冲洗较频繁,基本在 1.5~2 d 反冲洗 1 次,而 B 段反应器的反冲洗频率较低,控制在 7~10 d 冲洗 1 次,这是因为 B 段反应器进水 sCOD 质量浓度较低,主要进行硝化及反硝化作用,生物膜增长缓慢。试验期间在负荷为 $15.59 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时对 A 段反应器进行反冲洗而 B 段反应器正常运行进行试验跟踪,结果表明,反冲洗后 1 个周期内,A 段的 sCOD、氨氮、TN 和 TP 去除率略有变化,经过 B 段的进一步处理后,出水仍保持稳定,而 SS 则变化明显。

图 5(a)为 1 个周期内系统 sCOD 随时间的变化规律。反冲洗结束初期 A 段出水 sCOD 质量浓度,达到 87.5 mg/L (进水 156.5 mg/L) 经过近 5~6 h 的恢复,出水 sCOD 质量浓度开始达到稳定,在反冲洗后的 6~36 h 内,A 段 sCOD 的去除率保持稳定,且在整个周期内 B 段的出水 sCOD 质量浓度均较稳定。

图 5(b)为系统中的 SS 在 1 个周期内的变化情况。A 段 SS 在反冲洗后的最初 2 h 基本上没有去除,有时出水浓度甚至高于进水浓度,这是因为反冲洗后部分残余生物膜被冲出所致。4~5 h 后,随着生物膜的生长,SS 去除率恢复,8 h 后 SS 去除率达到稳定,持续到下个周期前 2~3 h,出水 SS 又开始增加,准备进行下次的反冲洗。B 段 SS 在 A 段反冲初期因进水 SS 的突然增大,出水 SS 也相对较高,最高达到 33.5 mg/L ,但随着 A 段 SS 去除率的恢复,B 段反应器在反冲 4~5 h 后恢复正常,且在后期的运行过程中出水 SS 基本维持在 10 mg/L 以下。分析认为,在实施反冲洗的过程中,主要采用气水联合反冲,而单独水冲历时 6 min,不足以将脱落的生物膜完全漂洗掉,造成反冲洗后的 1~2 h 内,出水 SS 很高,因此有必

要延长单独水冲的时间。在后续的实验中将单独水冲历时提高到 8min ,反冲后出水 SS 降低 ,保证了良好的出水效果。

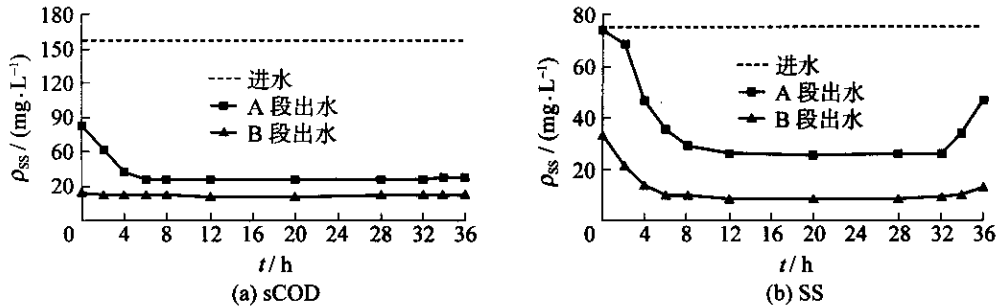


图 5 反冲洗后一个周期内随时间的变化规律
Fig. 5 Variation of during one period after backwashing

以上的试验结果表明 ,当 A 段负荷变化时 ,A 段反应器各污染参数的变化在时间上均表现出滞后性 ,且变化幅度较小 ,表明曝气生物滤池具有良好的抗冲击能力 ,这要归于火山岩填料良好的孔隙度 ,大量的微生物寄居在其中 ,当负荷发生变化时 ,表现出极佳的缓冲能力。此外 ,当实施反冲洗后 ,尽管 A 段出水各参数有所变化 ,但经过 B 段的处理 ,系统出水良好。

2.3 反应器长期稳定运行的主要控制条件和注意事项

- 1) 做好 B 段反应器的启动工作。B 段反应器主要是进行脱氮处理 ,启动过程应尽量使接种污泥的 C/N 控制在较低水平 ,待 B 段反应器运行基本稳定后再与 A 段反应器相连。
- 2) 保持 A 段反应器内曝气量适当。A 段反应器主要目的是部分脱碳 ,因此曝气量不宜过大 ,目的是为 B 段反应器创造较佳的 C/N。
- 3) 适当的反冲洗强度及充足的反冲洗历时是维持 BAF 稳定运行的重要因素。
- 4) 必要的预处理是 BAF 稳定运行的前提。试验结果表明 ,BAF 在一个周期的运行过程中 ,sCOD、氨氮、TN 和 TP 的去除波动均很小 ,变化最大的是 SS 的浓度 ,因此 ,要减小 BAF 进水的 SS 浓度 ,预处理是非常必要的。

3 结论

- 1) 两段 BAF 进行生活污水处理 ,无论在稳态还是非稳态条件下 ,出水水质均良好。稳态运行时系统出水的 $\rho_{sCOD} < 30\text{mg/L}$, $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) < 4\text{mg/L}$, $\rho_{SS} < 10\text{mg/L}$,且出水无色无味。而负荷变化及反冲洗后 ,各污染物浓度在 A 段有所变化 ,经过 B 段再处理 ,系统出水即保持稳定 ,表明采用两段 BAF 进行生活污水处理能达到持续稳定运行 ,具有实际的应用价值。
- 2) 系统总 sCOD 去除率达 87.5% 以上 ,主要是在 A 段完成 ,B 段通过进一步氧化和反硝化作用也去除部分 sCOD ,并对维持系统的稳定出水起到了关键性作用。
- 3) 系统对氨氮的去除率达到 91.5% 以上 ,主要依靠 B 段的硝化作用。
- 4) 良好的启动条件、适当的反冲洗强度及充足反冲洗历时、必要的预处理是维持系统长期稳定运行的前提。

参考文献：

[1] PUJOL R ,HAMON M. Biofilters flexible reliable biological reactors[J]. Wat. Sci. Tech ,1994 ,29(10-11) :33-39.
[2] PUJOL R. Process improvements for upflow submerged biofilters[J]. Water 21 ,2000(4) :25-29.
[3] REBECCA M ,JOANNE Q ,STEPHENSON T. The effects of media size on the performance of biological aerated filters[J]. Water Research ,2001 ,35(10) :2514-2522.
[4] PUXNZVA N ,PAYRAUDEAU M ,THORNBERG D. Simultaneous nitrification and denitrification in biofilters with real time

aeration contro[J]. Wat. Sci. Tech ,2001 ,43(1) :269-276.

[5] 田文华,文湘华,钱易. 沸石滤料曝气生物滤池去除 COD 和氨氮[J]. 中国给水排水 ,2002 ,18(12) :13-15.
TIAN Wen-hua ,WEN Xiang-hua ,QIAN Yi. Use of zeolite medium biological aerated filter for removal of COD and ammonia nitrogen[J]. China Water and Wastewater ,2002 ,18(12) :13-15. (in Chinese)

[6] 肖文胜,徐文国,齐兵强. 上流式曝气生物滤池处理城市污水[J]. 中国给水排水 ,2003 ,19(2) :49-50.
XIAO Wen-sheng ,XU Wen-guo ,QI Bing-qiang. Up-flow biological aerated filter for municipal wastewater treatment[J]. China Water and Wastewater ,2003 ,19(2) :49-50. (in Chinese)

[7] 乔晓时,许云阁,全燮. Biofor 曝气生物滤池用于城市污水处理[J]. 中国给水排水 ,2004 ,20(7) :83-85.
QIAO Xiao-Shi ,XU Yun-hong ,QUAN Xie. Biofor aerated bio-filter process for municipal wastewater treatment[J]. China Water and Wastewater ,2004 ,20(7) :83-85. (in Chinese)

[8] RITTAMANN B E ,MCCARTY P L. Evaluation of steady-state biofilm kinetics[J]. Biotechnol Bioeng ,1980 ,22 :2359-2373.

Experimental Two-stage Biological Aerated Filter for Domestic Wastewater Treatment

WANG Chun-rong¹ ,LI Jun² ,WANG Bao-zhen³ ,ZHANG Guo-zhu⁴

(1. School of Chemical and Environmental Engineering ,China University of Mining and Technology ,Beijing 100083 ,China ;
2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science & Water Environment Recovery Engineering ,Beijing University of Technology ,Beijing 100022 ,China ;3. Water Pollution Control Research Center ,Harbin Institute of Technology ,
Harbin 150090 ,China ;4. Shenzhen Graduate School ,Harbin Institute of Technology ,ShenZhen 518055 ,China)

Abstract :Two-stage biological aerated filter was used for domestic wastewater treatment. The hydraulic loading rate of A-stage limited to $9.17\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $15.59\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ and $22.01\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ respectively and the ratio of air to water was 6 to 1 ,while the mtio of air to water was 2 to 1 at B-stage ,and temperature was kept in the range of 18 ~20℃ throughout the experiment. After 3-month operation ,the rosult shows that stable and advanced effluent with the results of sCOD <30mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ <4.0mg/L ,SS <10mg/L at steady state has been obtained ,and the chlorinated effluent well meets the quality standards of water reused for toilet flushing ,street flushing ,fire fighting and urban greening ;Meanwhile ,the sCOD ,ammonium ,total nitrogen and total phosphorous of the effluent also has been kept at lower level under the condition of non-steady state such as loading rate adjustment or backwashing. Moreover ,it is to maintain a stable operation of the BAF system ,pre-treatment ,suitable backwashing rate and good start-up conditions are quite necessary.

Key words :two-stage biological aerated filter (BAF) ;steady state ;non-steady state ;removal