

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.013

# 反硝化滤池反冲洗效能综合影响因素及微生物种群

王悦, 王海, 石烁辉, 黄韬, 何磊, 周健  
(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 采用正交实验考察了水冲洗强度、水单独漂洗时间、气水联合冲洗时间、气冲洗强度、滤料粒径对反硝化滤池反冲洗效能及微生物种群的综合影响。结果表明,当以反硝化滤池运行周期、耗水量、系统恢复时间作为反冲洗效能的综合评价指标时,各因素对综合评价指标影响的显著性次序为:水冲洗强度>气水联合冲洗时间>气冲洗强度>滤料粒径>水单独漂洗时间;得出气水联合反冲洗最优工况参数如下:滤料粒径为 2~4 mm、气冲洗强度为 15 L/(m<sup>2</sup>·s)、水冲洗强度为 10 L/(m<sup>2</sup>·s)、气水联合冲洗时间为 8 min。PCR-DGGE 分析结果表明,反冲洗对滤料层生物量、生物种群多样性有显著影响,对滤料层生物活性、微生物种群丰度影响不显著。

**关键词:** 反硝化生物滤池; 气水联合反冲洗; 微生物种群; 正交实验; PCR-DGGE  
**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0076-05

## Comprehensive Influencing Factors of Backwashing Efficiency of Denitrifying Biofilter and Its Microbial Community

WANG Yue, WANG Hai, SHI Shuo-hui, HUANG Tao, HE Lei, ZHOU Jian  
(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Effects of water washing intensity, water washing time, gas and water combined washing time, gas washing intensity, filler particle size on backwashing efficiency and microbial community of denitrifying biofilter were investigated by orthogonal experiment. When the operation cycle, water consumption and system recovery time of the denitrifying biofilter were selected as the comprehensive evaluation index of the backwashing efficiency, the significant order of each factor affecting the comprehensive evaluation index was: water washing intensity, gas and water combined washing time, gas washing intensity, filler particle size and water washing time. The optimum conditions were as follows: particle size of 2-4 mm, gas washing intensity of 15 L/(m<sup>2</sup>·s), water washing intensity of 10 L/(m<sup>2</sup>·s), and gas and water combined washing time of 8 min. The results of PCR-DGGE analysis showed that the backwashing had significant effects on the biomass and biodiversity of the filter layer. However, it had little effect on the biological activity and microbial community abundance of the filter layer.

**Key words:** denitrifying biofilter; gas and water combined backwashing; microbial community; orthogonal experiment; PCR-DGGE

基金项目: 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项 (cstc2015shms-ztzc20003); 重庆市研究生科研创新项目 (CYB17005)

通信作者: 周健 E-mail:15523829081@126.com

污水厂尾水深度处理的难点在于脱氮。反硝化生物滤池因具有启动周期短、处理效能高、投资运行成本低等优势,被广泛应用于污水深度脱氮领域<sup>[1-3]</sup>。对生物滤池进行适当的反冲洗是维持其处理效能的必要环节<sup>[4]</sup>,反冲洗效果的好坏直接影响滤池处理效果和工作周期,是维持反硝化生物滤池高效运行的关键。目前,关于反硝化滤池的研究,主要集中在运行条件对高效脱氮的影响方面<sup>[5-9]</sup>,反冲洗工况参数对系统效能及微生物种群的影响却鲜有报道。基于此,笔者以中试规模的上向流反硝化生物滤池为研究对象,采用气水联合反冲洗方式,以反硝化滤池运行周期、耗水量、系统恢复时间作为反冲洗效能的综合评价指标,通过正交实验考察滤料粒径、气水反冲洗强度、气水联合反冲洗时间、水单独漂洗时间等反冲洗关键工况参数对系统反冲洗效能的综合影响,确定反冲洗最优工况参数;并在此基础上,探讨反冲洗对系统生物量、生物活性以及微生物种群多样性的影响,旨在为反硝化生物滤池深度脱氮提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 原水水质

本实验采用人工配水模拟城镇污水厂强化二级处理出水,其水质如下:COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、SS 浓度分别为 25~35、2~6、14~18、18~22、0.8~1.2、8~16 mg/L,平均值分别为 30、4、16、20、1.0、12 mg/L;pH 值为 7.5~8.0,平均值为 7.7。

1.2 实验装置

实验采用反硝化生物滤柱作为反应器。滤柱直

径为 200 mm,总高度为 3.2 m,总容积为 100.5 L;滤料层高度为 1.5 m,有效容积为 47.1 L;底部承托层高度为 0.4 m,装载粒径分别为 16~32、8~16 mm 的卵石;自承托层顶部起每 300 mm 设 1 个取样口。实验装置如图 1 所示。

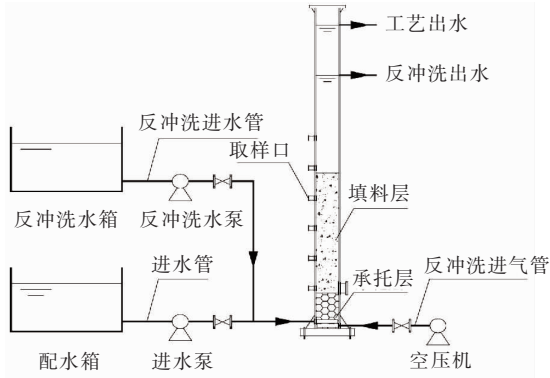


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1.3 实验方法

1.3.1 反硝化滤池反冲洗效能综合影响因素

采用正交实验考察滤料粒径(*S*)、气冲洗强度(*G*)、水冲洗强度(*W*)、气水联合冲洗时间(*T<sub>s</sub>*)、水单独漂洗时间(*T<sub>w</sub>*)对反硝化滤池反冲洗效能的综合影响。采用 5 因素 3 水平的正交实验,根据前期预实验结果,确定实验因素的水平如表 1 所示。反应器在 C/N 值为 6.0、水力负荷为 3 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 容积负荷为 0.77 kgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(m<sup>3</sup>·d) 的条件下运行,当水头损失达到 1.2 m(约为 12 kPa) 时进行反冲洗,测试各工况下反冲洗结束及恢复正常运行过程中,反应器出水及沿程的水质指标(COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、TN 等)。

表 1 正交实验因素水平

Tab. 1 Level of orthogonal experiment factors

因素水平	滤料粒径 <i>S</i> / mm	气冲洗强度 <i>G</i> / (L·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	水冲洗强度 <i>W</i> / (L·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	气水联合冲洗时间 <i>T<sub>s</sub></i> /min	水单独漂洗时间 <i>T<sub>w</sub></i> /min
1	1~2	5	5	4	1
2	2~4	15	10	6	3
3	4~8	25	15	8	5

1.3.2 气水联合反冲洗对微生物种群的影响

根据正交实验结果,对滤料粒径为 2~4 mm 的滤柱采用最优反冲洗工况进行反冲洗。在反应器正常运行及反冲洗结束时,对滤料层高度分别为 30、60、90、120、150 cm 处的滤料进行沿程取样,对系统微生物种群进行 PCR-DGGE 测试分析。滤柱内生

物量采用脂磷法<sup>[10]</sup>和 MLVSS 法测定;生物活性采用 TTC-脱氢酶活性法<sup>[11]</sup>测定。

2 结果及讨论

2.1 反硝化滤池反冲洗效能综合影响因素

正交实验结果见表 2,极差分析结果见表 3,方差分析结果见表 4。

表2 正交实验结果

Tab.2 Orthogonal experiment results

实验号	实验方案							实验结果				
	$S$	$G$	$W$	$T_s$	$T_w$	空白	空白	运行周期/h	恢复时间/h	耗水率 $\eta_w/\%$	恢复率 $\eta_r/\%$	评价指标 $1 - \eta_w - \eta_r/\%$
1	1	1	1	1	1	1	1	6	3	7.64	50	42.36
2	1	2	2	2	2	2	2	42	5	3.93	11.9	84.17
3	1	3	3	3	3	3	3	52	10	7.08	19.23	73.69
4	2	1	1	2	2	3	3	8	3	10.31	37.5	52.19
5	2	2	2	3	3	1	1	36	4	6.62	11.11	82.27
6	2	3	3	1	1	2	2	60	10	2.36	16.67	80.97
7	3	1	2	1	3	2	3	10	3	16.5	30	53.5
8	3	2	3	2	1	3	1	30	3	6.61	10	83.39
9	3	3	1	3	2	1	2	14	5	7.2	35.71	57.09
10	1	1	3	3	2	2	1	36	5	8.66	13.89	77.45
11	1	2	1	1	3	3	2	8	3	10.31	37.5	52.19
12	1	3	2	2	1	1	3	50	8	2.57	16	81.43
13	2	1	2	3	1	3	2	28	3	5.89	10.71	83.40
14	2	2	3	1	2	1	3	50	5	3.97	10	86.03
15	2	3	1	2	3	2	1	16	5	6.3	31.25	62.45
16	3	1	3	2	3	1	2	22	3	14.17	13.64	72.19
17	3	2	1	1	1	2	3	6	2	7.64	33.33	59.03
18	3	3	2	3	2	3	1	33	8	6.11	24.24	69.65

表3 正交实验极差分析结果

Tab.3 Range analysis results of orthogonal experiment

因子	运行周期/h							评价指标 $1 - \eta_w - \eta_r/\%$						
	$S$	$G$	$W$	$T_s$	$T_w$	空白	空白	$S$	$G$	$W$	$T_s$	$T_w$	空白	空白
$K_{j1}$	194	110	58	140	180	178	157	411.3	381.1	325.3	374.1	430.6	421.4	417.6
$K_{j2}$	198	172	199	168	183	170	174	447.3	447.1	454.4	435.8	426.6	417.6	430.0
$K_{j3}$	115	225	250	199	144	159	176	394.8	425.3	473.7	443.5	396.3	414.5	405.9
$k_{j1}$	32.3	18.3	9.7	23.3	30	29.7	26.2	68.6	63.5	54.2	62.4	71.8	70.2	69.6
$k_{j2}$	33	28.7	33.2	28	30.5	28.3	29	74.6	74.5	75.7	72.6	71.1	69.6	71.7
$k_{j3}$	19.2	37.5	41.7	33.2	24	26.5	29.3	65.8	70.9	79.0	73.9	66.1	69.1	67.7
$\Delta k$	13.1	19.2	32	9.9	6.5	3.2	3.1	8.7	11.0	24.7	11.6	5.7	1.2	2.1

表4 方差分析结果

Tab.4 Analysis of variance results

方差来源	评价指标 $1 - \eta_w - \eta_r$			
	平方和	自由度	均方差	$F$ 值
$S$	239.966	2	119.983	7.20
$G$	376.691	2	188.345	11.30
$W$	2 170.927	2	1 085.463	65.13
$T_s$	483.018	2	241.509	14.49
$T_w$	117.163	2	58.582	3.51
误差	52.511	4	13.128	
总和		14		

注:  $F_{0.05}(2,4) = 6.94$ 。以  $1 - \eta_w - \eta_r$  作为综合评价指标,各水平在给

定的  $\alpha$  为 5% 下检验,比较各影响因素  $F$  值的大小,得到各因素对综合评价指标影响的显著性次序为:水冲洗强度 > 气水联合冲洗时间 > 气冲洗强度 > 滤料粒径 > 水单独漂洗时间。水单独漂洗时间对综合评价指标影响不显著,从节能角度考虑可以省去水单独漂洗阶段,并且为最大程度减少耗水量,结合实际工程<sup>[7]</sup>,水冲洗强度宜为  $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。根据实验结果,得出生物滤池反冲洗最优工况如下:滤料粒径为  $2 \sim 4 \text{ mm}$ 、气冲洗强度为  $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、水冲洗强度为  $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、气水联合冲洗时间为  $8 \text{ min}$ 。在最优气水联合反冲洗工况下运行反应器,在  $68 \text{ d}$  的连续运行期间出水  $\text{TN}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{COD}$  均值

分别为 1.76、0.33、35.8 mg/L, 平均去除率分别为 91.20%、67.00%、70.10%, 出水水质稳定达到 V 类水体标准。在实验期间, 反应器反冲洗周期平均为 10 d, 略高于 Shanableh 等<sup>[12]</sup> 构建的两级生物滤池反冲洗周期(7~8 d), 且反冲洗后系统出水水质恢复至 V 类水体标准时间约为 5 h; 反冲洗水量约为处理达标水量的 0.76%。

## 2.2 气水联合反冲洗对滤池微生物种群的影响

分别采用脂磷法和 MLVSS 表征生物滤池的生物量。研究结果表明: 生物量与滤料层沿程高度呈显著负相关, 生物量随滤料层高度的增加而减少, 总体上反冲洗对底部与顶部生物量影响较大、对中部生物量影响较小; 同时, 生物活性也表现出随滤料层高度增加而降低的趋势。与滤池正常工作时的生物量相比, 反冲洗结束后底部滤料层 30 cm 处生物量减少了 42.80% (MLVSS)、48.20% (脂磷), 而顶部滤料层 150 cm 处生物量增加了 9.11% (MLVSS)、35.38% (脂磷); 同时, 底部滤料层 30 cm 处生物活性降低了 37.04%, 顶部滤料层 150 cm 处生物活性增加了 38.54%, 可见底部和顶部滤料层的生物活性差距较大。

分析认为, 生物量和生物活性沿程逐渐减小是由于底部进水端基质浓度较高, 微生物菌群利用水中丰富的基质快速繁殖, 使得底部区域的生物量相对较高; 在滤料层中部区域, 底物中基质浓度降低至较低水平, 微生物菌群增殖受限于基质, 生物活性降低明显; 在滤料层上部区域, 水中基质浓度进一步降低, 使得生物量和生物活性大幅降低。此外, 与反冲洗后生物滤池中生物量的降低幅度相比, 滤池的生物活性降低幅度较小, 表明系统内微生物活性受到反冲洗的影响程度低于生物量受到的影响, 这说明反冲洗冲刷掉的生物膜主要是低活性的老化生物膜, 保留在系统内的微生物仍然具有较高活性, 这也是系统除磷脱氮效能可以在反冲洗后 5 h 内迅速恢复的原因。

不同滤料层生物样品的 DGGE 图谱如图 2 所示, 编号 1~5 分别代表滤池正常运行时滤料层的上层(150 cm)、中层(90 cm)、下层(30 cm)以及反冲洗后滤料层的上层(150 cm)、中层(90 cm)。可知, 在滤池正常运行时, 滤料层上、中、下层的条带分别为 16、22、15 条; 反冲洗结束后, 生物滤池上层和中层的条带分别为 15、11 条, 沿程微生物种群多样性

从大到小依次为: 滤料层 90 cm 处 > 滤料层 150 cm 处 > 滤料层 30 cm 处。同时, 由不同条带的相似性矩阵可知, 反冲洗前上层滤料中的微生物种群与中层、下层的相似度均为 85.2%, 中层与下层微生物种群的相似度为 80.5%, 表明滤池正常工作时, 沿程微生物种群多样性较相似。反冲洗结束后, 上层和中间滤料层的微生物种群相似度由 85.2% 降低为 55.9%, 表明反冲洗对于滤池沿程微生物种群的多样性影响显著。此外, 正常工作时的底部滤料层与反冲洗结束后的顶部滤料层微生物种群的相似度达到 88%, 表明反冲洗能将底部的生物菌群带至滤料层顶部。由图 2 还可知, 系统优势种群条带的亮度在反冲洗前、后始终保持较强, 表明整个系统的优势微生物种群具有较强的适应性和较为广泛的生态幅, 系统优势种群受反冲洗影响较小, 这些条带所代表的微生物菌群在系统整个运行过程中始终保持较高的含量和活性, 这是系统具有稳定处理效能的关键。此外, 反冲洗对于系统优势种群的丰度影响不显著。这也从微生物种群的角度揭示了系统除磷脱氮效能可以在反冲洗后 5 h 内迅速恢复的原因。

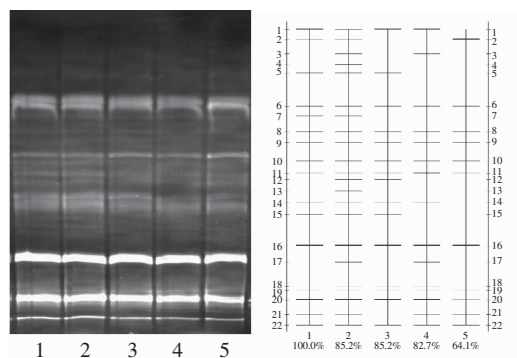


图2 不同滤料层生物样品的 DGGE 图谱

Fig. 2 DGGE spectra of biological samples from different filter layers

## 3 结论

① 以反硝化滤池运行周期、耗水量、系统恢复时间作为反冲洗效能的综合评价指标, 各因素对综合评价指标影响的显著性次序为: 水冲洗强度 > 气水联合冲洗时间 > 气冲洗强度 > 滤料粒径 > 水单独漂洗时间; 得到气水联合反冲洗最优工况如下: 滤料粒径为 2~4 mm、气冲洗强度为 15 L/(m<sup>2</sup>·s)、水冲洗强度为 10 L/(m<sup>2</sup>·s)、气水联合冲洗时间为 8 min。在该反冲洗条件下, 系统对 TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、COD 的平均去除率分别为 91.20%、67.00%、



70.10%,出水水质稳定达到V类水体标准。

② 反冲洗对反硝化生物滤池滤料层的生物量、微生物种群多样性均有显著影响,对滤料层生物活性、微生物种群丰度影响不显著。上向流生物滤池随着滤料层高度的增加,生物量与生物活性均呈现降低趋势,底部与顶部生物量差异较大。

#### 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(6): 1127–1136.
- [2] DHIRITI R, KOMI H, RAJ B. Effect of carbon to nitrogen (C:N) ratio on nitrogen removal from shrimp production waste water using sequencing batch reactor [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2010, 37: 1105–1110.
- [3] 马秋莹, 李东, 封莉, 等. 前置反硝化生物滤池深度脱氮效能与影响因素[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(9): 4932–4936.  
MA Qiuying, LI Dong, FENG Li, *et al.* Nitrogen removal efficiency and influencing factors in a pre-denitrification biofilter system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(9): 4932–4936 (in Chinese).
- [4] MOORE R, QUARMBY J, STEPHENSON T. The effects of media size on the performance of biological aerated filters [J]. *Water Research*, 2001, 35(10): 2514–2522.
- [5] 王娟, 张志辉, 郑天龙, 等. 反硝化生物滤池稳定运行的影响因素研究[J]. *环境工程*, 2014, 32(6): 1–3, 7.  
WANG Juan, ZHANG Zhihui, ZHENG Tianlong, *et al.* Study on the related factors of denitrification biofilter in steady state [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(6): 1–3, 7 (in Chinese).
- [6] 宋慧敏. 反硝化滤池运行条件优化及其脱氮效果影响的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2012.  
SONG Huimin. Study on Optimum of Operation and Nitrogen Removing Efficiency on Denitrification Filter [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2012 (in Chinese).
- [7] 石东, 丁磊, 董良飞. 反硝化生物滤池脱氮的中试研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(1): 43–47.  
SHI Dong, DING Lei, DONG Liangfei. Pilot study on denitrification biofilter for nitrogen removal [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(1): 43–47 (in Chinese).
- [8] 郭甘霖, 任翔宇, 吴光学. 某再生水厂反硝化滤池脱氮性能与生物膜特征解析[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(19): 21–27.  
WU Ganlin, REN Xiangyu, WU Guangxue. Nitrogen removal and biofilm characteristics of a post-denitrifying biofilter in a full-scale reclaimed wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(19): 21–27 (in Chinese).
- [9] 陈小军, 黄韬, 刘石虎, 等. 污水厂尾水反硝化滤池生物/化学协同脱氮除磷研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(23): 27–32.  
CHEN Xiaojun, HUANG Tao, LIU Shihu, *et al.* Cooperative processes of denitrification filter and chemical for nitrogen and phosphorus removal in tail water from wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(23): 27–32 (in Chinese).
- [10] 齐鲁青, 汪晓军, 詹德明. 优化 TTC-脱氢酶还原法测定陶粒负载微生物活性[J]. *现代化工*, 2012, 32(3): 93–96.  
QI Luqing, WANG Xiaojun, ZHAN Deming. Study on determination of biofilm activity in BAF by TTC-dehydrogenase assay [J]. *Modern Chemical Industry*, 2012, 32(3): 93–96 (in Chinese).
- [11] 郑俊, 吴浩汀. 曝气生物滤池工艺的理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
ZHENG Jun, WU Haoting. Theory and Engineering Application of Biological Aerated Filter [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006 (in Chinese).
- [12] SHANABLEH A, ABEYSINGHE D, HIJAZI A. Effect of cycle duration on phosphorus and nitrogen transformations in biofilters [J]. *Water Research*, 1997, 31(1): 149–153.

作者简介: 王悦(1992–), 女, 河北张家口人, 硕士, 研究方向为城镇污水处理。

E-mail: 1425254885@qq.com

收稿日期: 2020-01-12

修回日期: 2020-05-12

(编辑: 刘贵春)