

改性生物砂滤池对污染物的去除效果及微生物特性

李 川¹, 郭 鸣^{2,3}, 王 让^{2,3}, 李思敏^{2,3}, 田 琦¹

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 3. 河北工程大学 河北省水污染控制与水生态修复工程技术研究中心, 河北 邯郸 056038)

摘 要: 针对石英砂滤料表面去除污染物有限、生物覆膜量不足等问题,以基于复合改性石英砂的生物砂滤池为研究对象,分析了不同生物砂滤池(普通石英砂、表面重构石英砂及表面重构亲水改性石英砂)的除污效果及微生物特性。结果表明,普通生物砂滤池对 COD 的平均去除率为 54.9%,表面重构、表面重构亲水改性生物砂滤池对 COD 的平均去除率分别为 74.9%、79.5%;普通生物砂滤池对氨氮的去除率为 74.7%,表面重构、表面重构亲水改性生物砂滤池对氨氮的平均去除率分别为 78.2%、86.3%。3 种石英砂滤料表面生物量的分布相似,均为沿程递减,其中亲水和阳离子改性生物砂滤池的滤料表面生物量最大,普通生物砂滤池的滤料表面生物量最小。滤池中层滤料表面微生物活性最高,且附着在亲水改性石英砂表面的微生物活性相对最高。

关键词: 生物砂滤池; 复合改性; 除污效果; 微生物特性

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)05-0094-05

Analysis of Pollutants Removal and Microbial Characteristics of Modified Biological Sand Filter

LI Chuan¹, GUO Ming^{2,3}, WANG Rang^{2,3}, LI Si-min^{2,3}, TIAN Qi¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Hebei Engineering Research Center for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: To solve the problem of limited pollutant removal of quartz sand filter media and insufficient amount of biofilm, a variety of modified biological sand filters were analyzed, which included ordinary sands, surface reconstituted sands, and surface reconstituted hydrophilic modified sands. Pollutants removal efficiency and microbial characteristics were analyzed. It was found that the average removal rate of COD was 54.9% for the ordinary biological sand filter, and those for the surface reconstituted and hydrophilic modified sand filters were 74.9% and 79.5%, respectively. The removal rate of $\text{NH}_3 - \text{N}$ in the ordinary biological sand filter was 74.7%, and those for the surface reconstituted and hydrophilic modified sand filters were 78.2% and 86.3%, respectively. The distribution of surface biomass of quartz sand filter media was similar, and all of them decreased along the process. The largest biomass was identified on the surface of filter media of hydrophilic modified sand filters, and the lowest

was identified on the filter media of ordinary sand filters. Microbial activity test results showed the microbial activity on the surface of the filter in the middle range was the highest. The microbial activity on the surface of the hydrophilic modified sand was the highest.

Key words: biological sand filter; composite modification; pollutant removal efficiency; microbial characteristics

石英砂滤料作为生物砂滤池的核心部分,其特性直接影响着生物膜的形成、生长与脱落,最终决定着处理单元的净化效果。石英砂具有机械强度高、耐腐蚀性好等优势,但其表面光滑且呈负电性、孔隙率和比表面积均较小,降低了其表面生物膜的成膜效率,并限制其表面复杂生物膜的形成^[1],在一定程度上限制了生物砂滤池的除污效果及应用。

针对这一问题,主要的解决方案是对滤料进行表面改性,以改善滤料的吸附、截污和微生物成膜性能^[2-4]。但课题组前期研究表明^[1-3],仅仅通过表面改性,易导致改性涂层固着强度不足而在水流剪切力下脱落,这不但缩短了滤料的使用寿命,且会造成二次污染。针对这一问题,课题组提出了复合改性工艺,即首先对石英砂表面结构进行重构,提高其表面粗糙度、孔隙度等,然后再进行表面官能团涂覆改性,以达到改性强度高、耐久长的特点。为研究复合改性石英砂滤料在生物反应器中的运行特点,笔者分别以普通石英砂、表面重构石英砂及表面重构亲水改性石英砂为滤料构建石英砂生物滤池(分别记为1[#]、2[#]、3[#]滤池),研究了不同生物滤池对COD、NH₃-N的去除效果,并分析了不同石英砂滤料表面的生物量及生物活性,以期复合改性石英砂生物滤池的工程应用提供理论基础。

1 试验材料与方法

1.1 石英砂改性方法

石英砂滤料的表面结构是影响生物膜附着性能的主要因素之一,滤料的粗糙度越大,越有利于生物膜的形成^[5]。试验采用BOE腐蚀液对石英砂表面进行重构,再以Piranha溶液对表面重构石英砂进行二次改性进而得到表面重构亲水改性石英砂(以下简称亲水改性石英砂)。

1.2 试验装置及运行条件

为反映以不同改性石英砂为滤料的生物砂滤池的除污效果以及滤池内部的微生物生长和分布情况,采用3组同等条件的生物砂滤池作为试验装置,如图1所示。滤池采用内径为100 mm的有机玻璃

柱,柱高为1 000 mm,承托层厚为100 mm,石英砂滤层厚为500 mm,顶部清水区高为250 mm,侧部开有溢流口并回流至原水箱,使进水流速略大于出水,以维持水位及水压恒定。

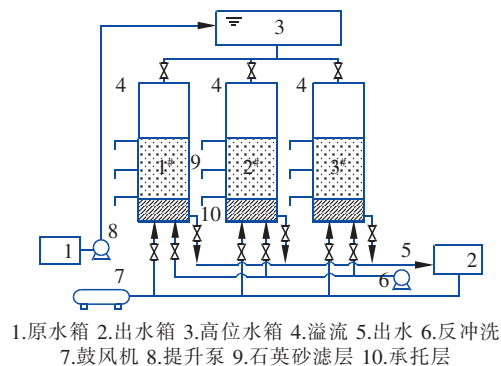


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

生物砂滤池在室温(25~30℃)条件下运行,进水流量为200 L/d,水力停留时间(HRT)为0.48 h,好氧段DO浓度维持在4~5 mg/L。

1.3 进水水质

原水为人工配水,以乙酸钠为碳源,氯化铵和硝酸钠为氮源,磷酸氢二钠和磷酸二氢钠为pH值缓冲溶液,并投加适量的矿物质和微量元素,以满足微生物的生长需求。原水COD约为80 mg/L、氨氮约为15 mg/L。

1.4 分析项目及方法

NH₃-N、COD按照国家标准方法测定,DO和温度采用WTW340i测定仪测定。

在距承托层上部100、300、500 mm处分别设有取样口,取样口自上而下分别定义为上层、中层和下层,分别对取自不同高度取样口的石英砂滤料的生物量进行测定,测定方法如下:首先将反应器中的污水排空,用自制取样器从各层取样口取出适量石英砂滤料;用蒸馏水缓缓冲洗滤料以去除表面悬浮物,将附着生物膜的石英砂滤料置于120℃烘箱中烘干至恒质量(约需4 h),置于干燥皿中冷却30 min,准确称量滤料的质量并记为M;最后将滤料置于250

mL 锥形瓶中,加入 150 mL、约 0.5 mol/L 的氢氧化钠溶液,并置于 100 Hz 的超声波(50 ℃)下洗脱 30 min,将样品烘干并准确称量记为 m 。则生物量 W 可表示为:

$$W = (M - m) / m \quad (1)$$

微生物活性以微生物的耗氧速率(SOUR)表征,SOUR 测定方法如下:首先将反应器中的污水排空,用自制取样器从上、中、下层取样口取出适量石英砂滤料;称取 50 g 石英砂滤料置于 200 mL 烧杯中,用无菌水小心冲洗 3 次,将上述滤料转移至 200 mL 溶解氧瓶中,加入 100 mL 经过预曝气充氧的无菌试验用水;在保证溶解氧瓶中无气泡的条件下,将溶解氧探头置于溶解氧瓶内并密封;将溶氧瓶放置在电磁搅拌器上中速搅拌,同时记录溶解氧随时间的变化情况。该试验设置空白,在溶解氧瓶中加入等量的经预曝气充氧的无菌蒸馏水,然后测定并记录瓶内溶解氧的变化情况。根据石英砂滤料表面的生物量情况可分别求出单位质量生物膜在单位时间的耗氧速率,则 $\text{SOUR} = \text{SOUR}_{\text{滤料}} - \text{SOUR}_{\text{空白}}$,单位为 $10^{-3} \text{ mgO}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})$ 。

2 结果与讨论

2.1 生物砂滤池对常规污染物的去除效果

图 2 为各组生物砂滤池在稳定运行状态下对 COD 和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的平均去除率。

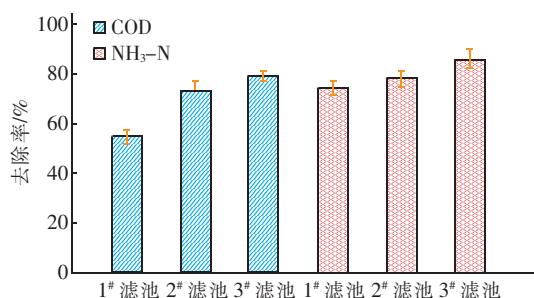


图 2 不同生物砂滤池对 COD 及 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效果

Fig. 2 COD and $\text{NH}_3 - \text{N}$ removal efficiency of different biological sand filters

如图 2 所示,普通石英砂生物滤池对 COD 的平均去除率为 54.9%,亲水改性石英砂和表面重构石英砂生物滤池对 COD 的平均去除率分别为 79.5% 和 74.9%。COD 的去除效果主要与石英砂滤料的吸附性能以及附着在滤料表面微生物的数量和活性有关。亲水改性石英砂表面浸润性良好,可促进污水中有机物及溶解氧传递至生物膜内部,微生物活

性较大,代谢能力强,因此亲水改性石英砂生物滤池对 COD 的去除率较高。表面重构石英砂生物滤池对 COD 的去除率明显高于普通石英砂生物滤池,这表明复杂的表面结构和较大的比表面积会促进微生物在石英砂表面的生长,从而提高滤料表面微生物的数量和活性,强化了生物滤池的处理效果。

由图 2 还可知,普通石英砂生物滤池对氨氮的去除率为 74.7%,经表面结构改性处理后对氨氮的去除率增加至 78.2%,再经亲水改性处理后对氨氮的去除率进一步提升至 86.3%。氨氮的去除效果主要与石英砂滤料的表面特性及硝化细菌的丰度与活性有关。在生物砂滤工艺中,石英砂滤料表面附着生物膜的厚度较小,氧传质效率较高,生物膜内部微生物活性较高,因此反应器系统对氨氮的去除率主要受 AOB 和 NOB 丰度的影响。普通石英砂和表面重构石英砂生物滤池的氨氮去除率相差不大,而表面重构石英砂的生物量却明显高于普通石英砂的生物量,且微生物活性相当,因此可以推断,普通石英砂的表面性质更有利于 AOB 和 NOB 的生长。

2.2 生物砂滤池微生物特性分析

图 3 为不同沿程高度(上层、中层、下层)石英砂滤料表面生物量的分布情况。

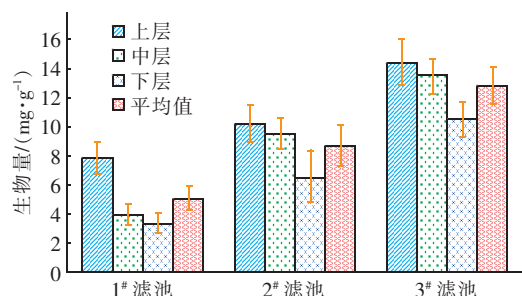


图 3 不同石英砂滤料表面的生物量

Fig. 3 Biomass on the surface of different quartz sands

由图 3 可知,各生物砂滤池内部滤料表面生物量自上而下均呈逐渐减小的趋势,造成这一现象的原因主要有两点:一是由于石英砂滤料的截留吸附作用,上层滤料优先截留污水中的微生物和部分悬浮型营养物质,滤料表面生物量明显较大,甚至会造成反应器的堵塞;二是在滤料吸附和微生物降解作用下,污水中有机物沿着水流方向逐渐递减,因此下层滤料附近有机物的浓度较低,微生物生长受到抑制,因此生物量相对较少。

从图 3 还可知,各组生物砂滤池的生物量也不

尽相同。普通石英砂表面的平均生物量最低,仅为 5.06 mg/g,这主要是因为普通石英砂表面光滑,微生物受水流剪切力影响较大而容易脱落;相对于普通石英砂来说,表面重构石英砂的生物量增加明显,平均生物量提高至 8.76 mg/g,这主要是因为重构石英砂表面分布的沟槽可削弱水流对微生物的冲刷作用,同时规则的沟槽会在细菌生长过程中产生接触诱导效应^[6-8],导致细胞核区高度增大,细胞的活性和增殖能力增强;亲水改性石英砂表面的生物量最高,平均生物量为 12.80 mg/g,这主要是因为亲水改性石英砂的表面浸润性良好,可有效促进污水中有机物及溶解氧向生物膜内部传质,微生物活性大,增殖能力强,而且附着在亲水改性石英砂表面的水膜厚度更大,可缓冲水流对生物膜的冲刷作用,减少微生物的流失,因此亲水改性石英砂更有利于生物膜的形成。

2.3 改性生物砂滤池的生物活性分析

微生物的耗氧速率(SOUR)是指单位质量的微生物在单位时间内消耗的溶解氧量,直接反映了微生物代谢速率的快慢^[9-11]。滤池上层、中层、下层石英砂滤料表面微生物的 SOUR 值如图 4 所示。可以看出,各组石英砂滤料表面的微生物活性均沿着水流方向呈先升高再降低的趋势,而滤料表面的生物量沿着水流方向则呈逐渐降低的趋势。可见,在生物砂滤池内部,微生物量与微生物活性的分布并不一致。

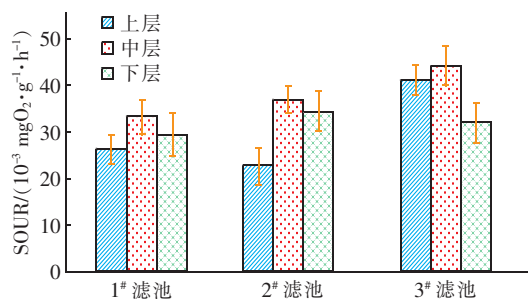


图4 不同石英砂滤料的微生物活性

Fig. 4 Microbial activity on different quartz sands

分析认为,生物砂滤池采用底部曝气、顶端进水的运行方式,滤池顶部有机物浓度较高,且对悬浮物的截留吸附行为更明显,溶解氧浓度相对较低,而滤池底部有机物浓度较低,气流产生的湍流作用更明显。当污水从生物砂滤池的顶端自上而下流动时,上层滤料优先截留污水中的悬浮物,而这些悬浮物

多为高分子有机物,可生化性较差,微生物难以迅速将其降解而逐渐形成生物膜的一部分,生物膜厚度逐渐增加^[12],逐渐影响了生物膜内部微生物与污水中有机物与溶解氧的传质,造成生物膜内部微生物底物匮乏、溶解氧不足,微生物逐渐老化,且由于滤池上部受曝气产生的扰动作用较弱,生物膜受到的冲刷效果较差,老化生物膜难以脱落,生物膜更新速率较慢,微生物活性受到限制,因此上层滤料的表面生物量虽然较大,但微生物活性却相对较低;当污水流至滤池中部,基于上层滤料的截留吸附作用,悬浮物和大分子有机物含量显著降低,但由于上层滤料表面的微生物活性较低,对有机物的生化代谢降解效率较差,滤池中部污水的 BOD₅ 含量并未明显降低,且可生化性较强,同时水中溶解氧含量相对较高,因此生物膜中微生物在底物和溶解氧均充足的情况下,中层滤料表面的微生物活性最高;经上、中层滤料的截留吸附和微生物代谢反应后,污水中有机物含量显著降低,因此 BOD₅ 含量成为微生物生长的主要限制因素,同时,滤池底部区域因曝气而产生的湍流作用更为明显,生物膜容易脱落,更新速率较快,稳定生物量相对较低,因此下层滤料的微生物活性相对较低。

亲水改性石英砂表面的微生物活性相对最大,这可能是因为亲水改性石英砂表面附着的水膜促进了有机物和溶解氧的传质。表面重构石英砂的微生物活性较小,可能是因为其表面粗糙的结构导致沟槽内部与污水中溶解氧的传质受阻,大量微生物处于相对厌氧区域。

3 结论

① 普通石英砂生物滤池对 COD 的平均去除率为 54.9%,表面重构石英砂、亲水改性石英砂对 COD 的平均去除率分别为 74.9%、79.5%;普通石英砂对 NH₃-N 的去除率为 74.7%,表面重构石英砂、亲水改性石英砂对 NH₃-N 的平均去除率分别为 78.2%、86.3%。

② 生物砂滤池内部的微生物量自上而下呈递减趋势,上层滤料表面的生物量最大,下层滤料表面的生物量最小;亲水改性石英砂的生物量相对最大,普通石英砂的生物量相对最小。

③ 生物滤池中层滤料的微生物活性最高;亲水改性石英砂生物膜中微生物活性最高,而普通石英砂生物膜中微生物活性最低。

参考文献:

- [1] 李思敏,高沛,吕永康. 改性石英砂生物滤池深度处理污水厂二级出水[J]. 中国给水排水,2015,31(9): 104-108.
- Li Simin, Gao Pei, Lü Yongkang. Modified bio-sand filters for advanced treatment of secondary effluent of WWTP[J]. China Water & Wastewater,2015,31(9): 104-108 (in Chinese).
- [2] 李思敏,吕永康,杨晶,等. O_3 + MBSF 组合工艺深度处理污水厂二级出水[J]. 中国给水排水,2016,32(11):95-99.
- Li Simin, Lü Yongkang, Yang Jing, *et al.* O_3 /modified bio-sand filter for advanced treatment of secondary effluent from WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2016,32(11):95-99 (in Chinese).
- [3] 徐宇峰,王龙,郭劲松,等. CTMAB/SDS 改性沸石对水中痕量邻苯二甲酸酯吸附机制[J]. 环境工程学报,2013,7(10):3913-3920.
- Xu Yufeng, Wang Long, Guo Jinsong, *et al.* Mechanism of removal of trace phthalate esters with CTMAB/SDS zeolite [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2013,7(10):3913-3920 (in Chinese).
- [4] Li D, Lin J, Wang Y, *et al.* Optimum backwashing conditions and ammonium-nitrogen treatment efficiency of iron oxide modified sands coated in biofilm [J]. Water Sci Technol,2016,16(2):418-427.
- [5] Terada A, Yamamoto T, Igarashi R, *et al.* Feasibility of a membrane - aerated biofilm reactor to achieve controllable nitrification[J]. Biochem Eng J, 2006,28(2):123-130.
- [6] 褚淑伟,肖继波,张立钦,等. 竹纤维生物膜载体接触氧化法处理混合废水试验[J]. 林业科学,2012,48(12):83-88.
- Chu Shuyi, Xiao Jibo, Zhang Liqin, *et al.* Treatment of mixed wastewater with bamboo fiber biofilm carrier contact oxidation reactor [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012,48(12):83-88 (in Chinese).
- [7] 曹宏斌,李玉平,陈艳丽,等. 生物膜接触氧化法处理苯胺废水[J]. 环境科学学报,2004,24(1):33-37.
- Cao Hongbin, Li Yuping, Chen Yanli, *et al.* Treatment of aniline by contact biological oxidation on the biofilm [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2004,24(1):33-37 (in Chinese).
- [8] 赖颖真,陈江. 钛表面微沟槽形貌对人牙龈成纤维细胞接触诱导效应的比较研究[J]. 中华口腔医学杂志,2015,50(1):33-37.
- Lai Yingzhen, Chen Jiang. Comparative study on contact guidance activity of human gingival fibroblasts on microgroove surfaces [J]. Chinese Journal of Stomatology,2015,50(1):33-37 (in Chinese).
- [9] Francisco O, Ernesto H. Wastewater treatment with a double-layer submerged biological aerated filter, using waste materials as biofilm support [J]. J Environ Manage,2002,65(1):79-84.
- [10] 苏俊峰,马放,王弘宇,等. 利用PCR-DGGE 技术分析生物陶粒硝化反应器中微生物群落动态[J]. 环境科学学报,2007,27(3):386-390.
- Su Junfeng, Ma Fang, Wang Hongyu, *et al.* Analysis of microbial community dynamics in bioceramic nitrification reactor by PCR-DGGE [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2007,27(3):386-390 (in Chinese).
- [11] 邢德峰,任南琪,宋佳秀,等. 不同16S rDNA 靶序列对 DGGE 分析活性污泥群落的影响[J]. 环境科学,2006,27(7):1424-1428.
- Xing Defeng, Ren Nanqi, Song Jiaxiu, *et al.* Community of activated sludge based on different targeted sequence of 16S rDNA by denaturing gradient gel electrophoresis [J]. Environmental Science,2006,27(7):1424-1428 (in Chinese).
- [12] 王荣昌,程霞,曾旭. 污水处理中菌藻共生系统去除污染物机理及其应用进展[J]. 环境科学学报,2018,38(1):13-22.
- Wang Rongchang, Cheng Xia, Zeng Xu. Mechanisms and applications of bacterial-algal symbiotic systems for pollutant removal from wastewater [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2018,38(1):13-22 (in Chinese).



作者简介:李川(1974-),男,河北邯郸人,本科,正高级工程师,研究方向为水处理技术。

E-mail:rl3172239@163.com

收稿日期:2018-06-28