

活化沸石曝气生物滤池预处理微污染源水的研究

孙同喜¹, 蒋铁锋^{1*}, 郑萌璐¹, 陈建孟¹, 陈浚¹, 胡成聪², 李军¹ (1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 浙江 杭州 310032; 2. 温州水务集团有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 采用上流式活化沸石滤料曝气生物滤池(AZBAF)对杭州市某微污染地表源水进行生物预处理. 结果表明, 活化沸石的高效吸附作用可使 AZBAF 通过自然挂膜实现快速启动. 在水力负荷 1.2m/h, 气水比为(3~1):1 条件下, AZBAF 对 TOC 和 COD_{Mn} 的去除率分别为 40%~60% 和 10%~27%, 尤其对小分子量(MW<1kDa)有机物具有良好的降解作用. 同时系统对 NH₃-N 的去除率保持在 90%以上. 污染物的去除主要发生在滤池 30cm 以下部分, 这与其中微生物的数量和活性分布规律一致. 暂时停运(5~10d 和 35d)对生物过滤影响较小, 系统重启后可在 6~8h 和 24h 内基本恢复至原有处理水平.

关键词: 微污染源水; 活化沸石; 曝气生物滤池; 氨氮; 有机物; 分子量分布

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2011)03-0377-07

Pretreatment on micro-polluted source water by activated zeolite biological aerated filter. SUN Tong-xi¹, JIANG Yi-feng^{1*}, ZHENG Meng-lu¹, CHEN Jian-meng¹, CHEN Jun¹, HU Cheng-cong², Li Jun¹ (1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Wenzhou water service group limited company, Wenzhou 325000, China). *China Environmental Science*, 2011, 31(3): 377~383

Abstract: An up-flow activated zeolite media biological aerated filter (AZBAF) was developed and employed for the treatment of micro-polluted water in Hangzhou. The AZBAF could start up quickly by an efficient adsorption of the media during the natural pre-coating period. Under the conditions of hydraulic loading 1.2m/h and gas/water ratio 3~1:1, around 40%~60% and 10%~27% of organics could be removed in terms of TOC and COD_{Mn}, respectively, in which most of the low molecular weight organics (MW<1kDa) was efficiently biodegraded. Meanwhile, the removal efficiency of NH₃-N was stably kept over 90% during the AZBAF operation. Additionally, most pollutants were removed in the lower part of the filter column (0~30cm), and this removal characteristics was somehow consistent with the distribution profiles of biomass (phospholipid-P) and their activities (oxygen uptake rate). In the case of shutdown of the AZBAF in both short-term (5~10d) and long-term (35d), the biofilter could be recovered to its original performance in 6~8h and 24h, respectively.

Key words: micro-polluted source water; activated zeolite; biological aerated filter; ammonia; organics; distribution of molecular weight

随着我国部分源水质量下降及饮用水水质指标提高, 常规的水处理工艺已难以保障饮用水的供水安全. 研究表明^[1-4], 曝气生物滤池(BAF)等微污染源水的生物预处理技术是一种效果良好且毒理学安全的方法. 填料是 BAF 的核心部件, 其中新型廉价沸石滤料对氨氮有较强的吸附和离子交换作用^[5], 且对极性分子和细菌有富集作用, 可作为一种理想的生物载体^[6-9]. 源水中有毒污染物及其消毒副产物与水中溶解性有机物种类和数量密切相关^[10-12], 而水处理工艺对有机物的去除

效果往往是不同分子量区间有机物各自去除情况的综合反映. 因此, 针对水源水中有有机物分子量分布特征, 研究其在水处理过程中的变化规律, 可以有针对性地强化工艺措施, 提高其去除效率.

收稿日期: 2010-07-06

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX07421-002-06, 2008ZX07106-2-2, 2008ZX07101-006-07); “十一·五”国家科技支撑计划项目(2007BAE58B07); 浙江省重大科技专项项目(2007C13081); 杭州市重大科技攻关项目(20062912A06); 浙江省自然科学基金(Y5080142)

* 责任作者, 副教授, jyf@zjut.edu.cn

本研究针对杭州市某微污染源水中有机物、氨氮等含量偏高的现状,采用浙江缙云某沸石厂经过煅烧和酸洗活化过的沸石为滤料,探讨活化沸石曝气生物滤池(AZBAF)处理该类微污染源水的启动运行性能及其对 N 素和不同分子量有机物的去除机理。

1 材料与方法

1.1 试验原水

试验用水取自杭州某微污染地表源水,其主要水质指标如下所示:pH7.17~8.38;COD_{Mn} 为 3.47~5.27mg/L;NH₃-N 为 0.40~1.52mg/L;TN 为 0.65~1.54mg/L;TP 为 0.04~0.10mg/L.其中有有机物和氮素的含量偏高,对传统净水厂处理工艺的出水水质构成威胁。

1.2 试验装置及其运行

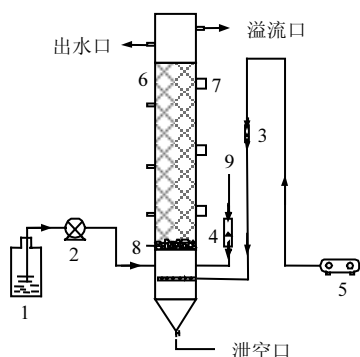


图1 试验装置与流程

Fig.1 Flow diagram of the AZBAF

1.试验用水箱;2.进水计量泵;3.空气流量计;4.水流量计;5.空压机;
6.取水口;7.取填料口;8.承托层 9.反冲洗进水

试验装置如图1所示,AZBAF由有机玻璃制成,高为1600mm,内径为50mm;采用上流式配水,底部缓冲区成倒三角状,内设曝气管兼作反冲洗布气管,每7~10d气水联合反冲洗一次.采用经过煅烧与酸洗过程的活化沸石为滤料,工作层高800mm,底部承托板50mm(砾石)以上填充有粒径2~4mm的沸石.水样和生物取样口(直径20mm,利于取滤料样品)沿高程分布,间距约300mm,以跟踪监测水质和滤料上微生物指标变化.反应器采用自然挂膜法启动,试验水温

14~20℃,控制滤速和气水比分别为0.8m/h和(3~1):1;挂膜7d后,滤速增至1.2m/h而维持气水比不变,稳定运行。

1.3 分析方法

1.3.1 水质指标测定 TOC和TN采用TOC-VCDH型TOC-TN分析仪(日本岛津公司)测定;NO₂⁻-N和NO₃⁻-N采用美国戴安ICS-2000离子色谱分析仪测定;有机物分子量采用超滤膜法^[13]测定,主要装置材料为美国millipore公司的Amicon8200超滤器以及已知截留分子量(0.45μm、100kDa、10kDa、3kDa、1kDa、500Da)的超滤膜;其余各项水质指标均按国家标准分析方法^[14]测定。

1.3.2 微生物指标的测定 反应器停运放空后用小铲从生物取样口处取出适量滤料(至少可布满反应器的一个横截面)进行生物量和生物活性测定,分别以磷脂中的磷含量(磷脂-P)和好氧速率(OUR)表示.磷脂-P(nmol/g)通过比色法来测定^[15],生物活性的测定采用Urfer的BDP法^[16]。

2 结果与讨论

2.1 AZBAF启动

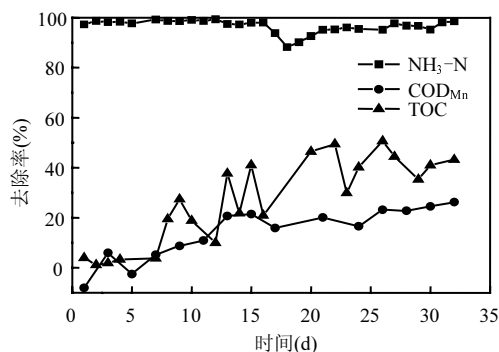


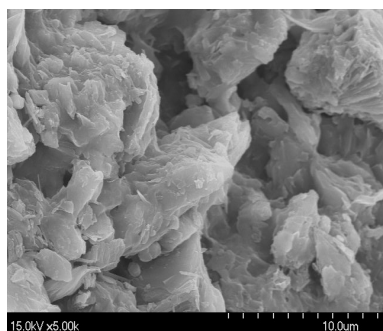
图2 反应器启动过程中NH₃-N、COD_{Mn}、TOC的去除率

Fig.2 Removal of NH₃-N, COD_{Mn} and TOC during the period of AZBAF start-up

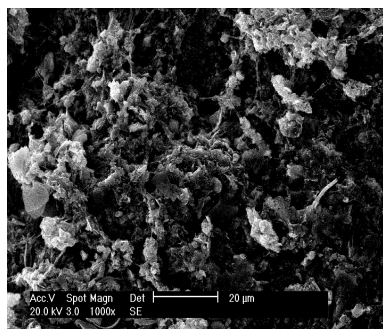
图2为启动期间进、出水中NH₃-N、TOC和COD_{Mn}去除率的变化情况.由图2可知,在前7d,COD_{Mn}和TOC的去除效果较差,而NH₃-N的去除率则接近100%,推测此时沸石表面尚未形

成生物膜, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除主要依靠沸石吸附和离子交换作用.10d 后 COD_{Mn} 和 TOC 去除率缓慢增加,而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率略有下降,表明沸石表面的异养菌生物膜逐渐成熟,而沸石吸附容量趋于下降.20d 后随着硝化菌生物膜的成熟, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率逐渐恢复至 95%左右;而生物膜对有机物的去除主要依赖于其可生化性, COD_{Mn} 和 TOC 去除率分别保持在 10%~27%和 40%~60%.

图 3 为沸石挂膜前后的电镜扫描照片,表明反应器启动成功后滤料表面已有大量微生物生长.



(a) 挂膜前



(b) 挂膜后

图 3 挂膜前后沸石 SEM 照片

Fig.3 SEM images of zeolite before and after the start up

为进一步考察启动过程中硝化性能的变化,对进、出水中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量进行跟踪检测.如图 4 所示,挂膜初期 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量变化幅度较小,表明此时硝化菌生物膜数量较少,硝化作用微弱;15d 后, $\text{NO}_3\text{-N}$ 生成量增加并出现 $\text{NO}_2\text{-N}$ 积累,推测这与亚硝化菌和硝化菌之间不同的生长速率相关;随着硝化菌生物膜的成熟,作为硝化中间产物的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 最终完全被

转化为 $\text{NO}_3\text{-N}$,该结果与 Metcalf^[17]的研究一致.

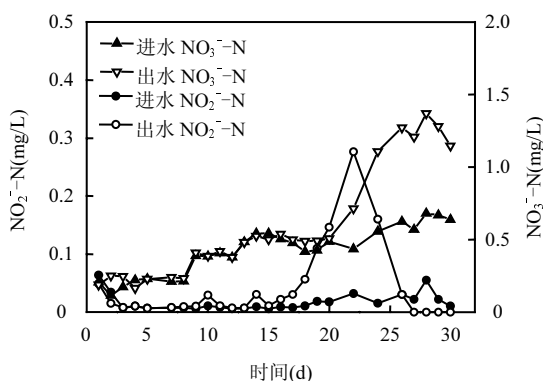


图 4 反应器启动过程中进出水的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的变化

Fig.4 Variations of $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ in the outlet and inlet during the period of start-up

2.2 污染物去除规律

AZBAF 在水力负荷为 1.2m/h 和汽水比为 (3~1):1 工况下稳定运行 1 个月.从反应器不同高度取水样分析 N 素及有机物的降解情况,进一步研究该 AZBAF 的工作性能.

2.2.1 N 素转化 图 5(a)为启动期间(12d)时 N 素在反应器中的沿程变化情况.由图 5(a)可知,随着源水纵向流经反应器, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 逐渐降低而 $\text{NO}_x\text{-N}$ 略有升高,表明 TN 的去除主要来自沸石对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸附和离子交换作用,并且主要集中于 60cm 以下滤料段;系统的硝化作用较弱,其在对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的竞争利用能力上远低于沸石的吸附作用,仅在滤料上段 $\text{NO}_3\text{-N}$ 略有增加.

稳定期(32d)N 素在反应器中的沿程变化情况如图 5(b)所示.由图 5b 可以看出,稳定期内的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量在 30cm 以下滤料段就明显下降,在整个滤料段,未出现 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的积累,而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在滤料层高 20cm 处迅速增加,可见稳定期硝化作用明显加强.滤料上生长的硝化细菌将吸附的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 首先转化为 $\text{NO}_2\text{-N}$,由于实验中曝气量大,供氧充足, $\text{NO}_2\text{-N}$ 没有积累,最终被转化为 $\text{NO}_3\text{-N}$. $\text{NO}_3\text{-N}$ 的增加是主要依靠 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的转化,只有异养菌消耗掉了少量的 N,因此整个滤料段中的 TN 含量变化较小.沸石滤料生长的硝化

细菌能将吸附其上的氨氮转化为硝态氮,实现了动态生物再生^[18],因而沸石滤料能够始终保持较高的氨氮去除率,并能适应一定的冲击负荷^[19].

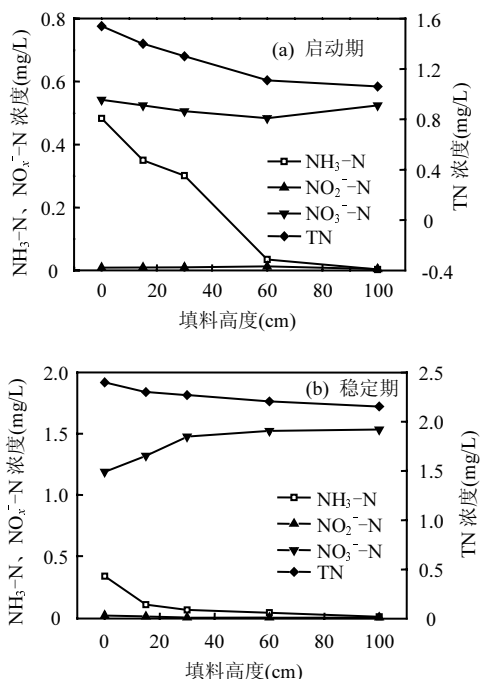


图 5 N 素在反应器中的沿程变化

Fig.5 Variation of N concentrations along the flow direction in the AZBAF

2.2.2 有机物去除 由图 6 可知,启动期内 COD_{Mn} 随滤料高度变化不大,且总去除率仅在 10%左右,这是因为生物膜尚未成熟,有机物的去除主要依靠沸石滤料的过滤、截留和吸附作用^[9].稳定期 COD_{Mn} 的去除率可达 23.7%,由于 AZBAF 下部有机负荷高,微生物繁殖快、数量多,而滤料层上部有机物浓度较低,营养相对匮乏,微生物数量少,如图 8 分析.因此 COD_{Mn} 的去除主要是发生在 30cm 以下填料段(占总去除率的 76%),填料层继续上升, COD_{Mn} 去除率的增加程度变缓.提高水力负荷可使单位时间内进入生物滤池的有机物量增加,停留时间缩短后水中更多的营养物质就能到达上层,从而更有利于上层微生物的生长,进一步提高了有机物的利用率,由此推测该 AZBAF 具有一定的抗有机负荷能力,与刘金香等人的研究一致^[20].

进而考察生物预处理系统对不同分子量有机物的去除作用.如图 7 所示,启动期内滤池对大分子量有机物有较好的去除作用,而 MW 为 10~100kDa 的有机物经处理后含量却增加,其原因可能是挂膜期间生物膜不稳固,部分生物膜随水冲出所致. MW 为 0.5~1kDa 的有机物含量不减反增主要是因为截留过滤只能去除大分子量有机物,而小分子量有机物因亲水性较高,不易形成较大絮体,难以被滤料截留,此外在水力剪切或竞争吸附作用下,小分子量有机物从滤料表面的脱附也是其增加的原因^[12].

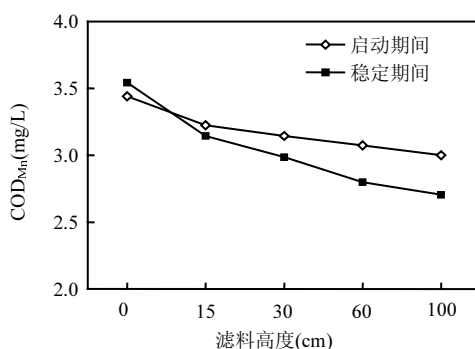


图 6 COD_{Mn} 在反应器中的沿程变化

Fig.6 Variation of COD_{Mn} concentrations along the flow direction in the AZBAF

稳定期内滤池对大、小分子量有机物均有较好的去除作用,其中对 $\text{MW} < 0.5\text{kDa}$ 有机物的去除作用尤为明显,去除率可达 53.4%,这主要是因为沸石表面的微生物对小分子量有机物具有更好的降解作用.由于沸石表面的微生物的代谢产物或部分生物体脱附到水中, MW 为 10~100kDa 的有机物有所增加.有研究表明,消毒副产物(DBPS)中的 CHCl_3 和 CHCl_2 主要是由 MW 为 10~<0.5kDa 的有机物产生,毒性更大的 CHClBr_2 和 CHBr_3 则是由 MW 小于 500Da 的有机物产生^[21],而常规处理工艺对溶解性有机物尤其是小分子量有机物去除率较低,影响水质安全^[22].鉴于该试验中生物滤池对小分子量有机物也具有较好的去除效果,可以考虑用于上述水质的改善.

2.2.3 滤池内生物数量和活性分布 BAF 主要利用生长在滤料表面的微生物对水中的污染物

进行吸附和氧化分解,因此通过考察滤料表面生物膜中微生物的数量和活性,可以进一步了解滤池去除污染物的特性和性能.保持反应器在滤速 1.2m/h 工况下稳定运行 1 个月,对该 AZBAF 内滤料生物情况进行考察,取样点选在模型反应器中滤料高度 15, 45, 75cm 处.由图 8 可知,反应器内的生物量变化呈现沿水流方向逐步减少的趋势;生物膜活性变化呈明显的倒“V”型特点;而单位生物量的生物活性分布与生物量的分布相反,离进水端越远,单位生物量的生物活性越大.

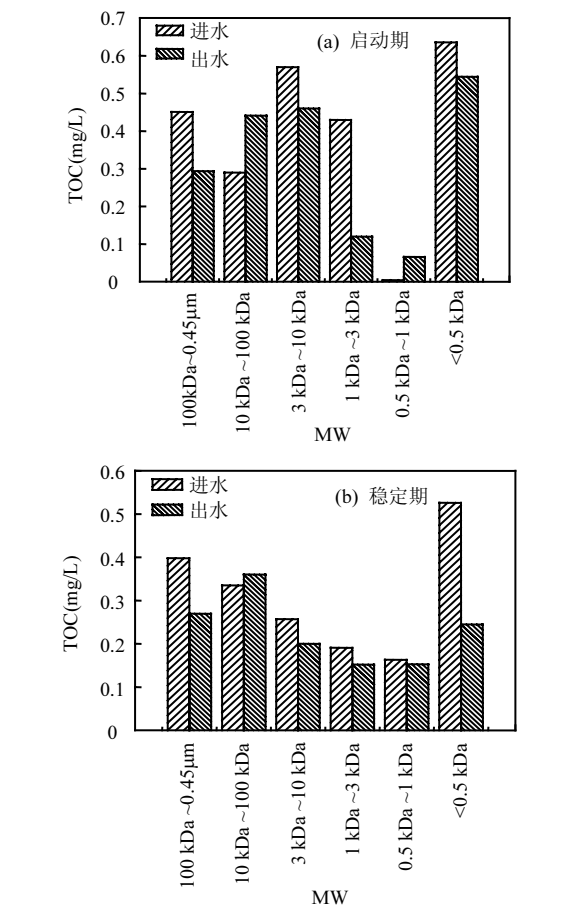


图 7 不同区间分子量有机物 TOC 去除的分布变化
Fig.7 Variation of TOC removal in viepion of different MW

由图 8 可知,反应器底部进水端的生物量(以 P/滤料计)和生物活性(以 O_2 /滤料计)分别为 127.65nmol/g 和 0.23mg/g,而顶部出水端的生物

量和生物活性分别为 15.26nmol/g 和 0.11mg/g.这是由于进水端的有机物浓度高,大量的异养菌能够迅速繁殖,使这一区域滤料上的生物量较高.但这部分生物量包括一些截留的固体颗粒以及一些代谢活性较低的惰性生物膜,所以尽管该区域生物量较多,生物活性较低的原因.滤料高度 45cm 处可能由于这一区域异养菌与自养菌均有较高的代谢活性,使得总体生物活性较强^[23].在出水端由于水中营养物质很低,微生物的生长受到限制,生物量较少,故单位滤料的生物活性较低.根据有关研究表明^[18,24],进水端底物浓度大,随着生物膜细胞密度的增加,生物膜内非活性物质积累增加,从而抑制了生物膜活性.上层出水端生物膜厚度变小,传质距离较短,水中可利用有机物减少,刺激了生物体的活性,所以单位生物的活性是沿滤层高度逐渐升高的.

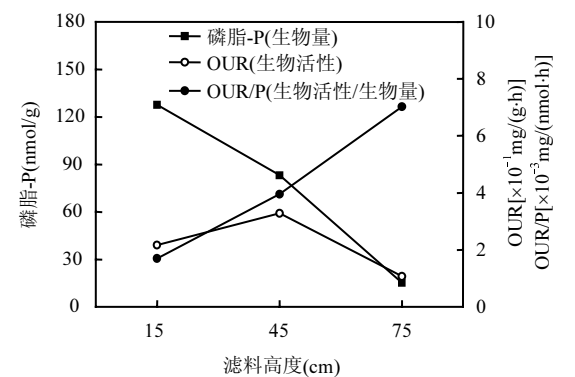


图 8 生物量和生物活性的沿程变化
Fig.8 Variations of biomass and biological activity along the flow direction in the AZBAF

2.3 滤池停运对其重新启动的影响

在生产实践中有时为了对滤池进行检修或者在进水流量较小时常常需要关闭某个滤池,因此生物滤池重新启动后的恢复状况研究也十分必要.滤池停运前,已连续运行 70d.每次停运前将滤池内的水放空,重新启动时先反冲洗滤池再进水,运行开始后分别在不同时间段内取样分析,以考察滤池恢复情况.

由图 9(a)、图 9(b)可知,反应器停运 5d 和 10d 后,重启的滤池经 6~8h 运行对 NH_3-N 的去

除率即达 95%以上,TOC 和 COD_{Mn} 的去除率也相应恢复.短期关闭的滤池可快速恢复的原因主要是贫养微生物具有很低的内源呼吸速率,短期关闭对其代谢和吸附影响较小.关闭期间一些微生物会消耗部分被沸石吸附的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及有机物,从而使沸石得到再生,重新具有离子交换功能,因此重启后的滤池对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率出现了短暂的上升.

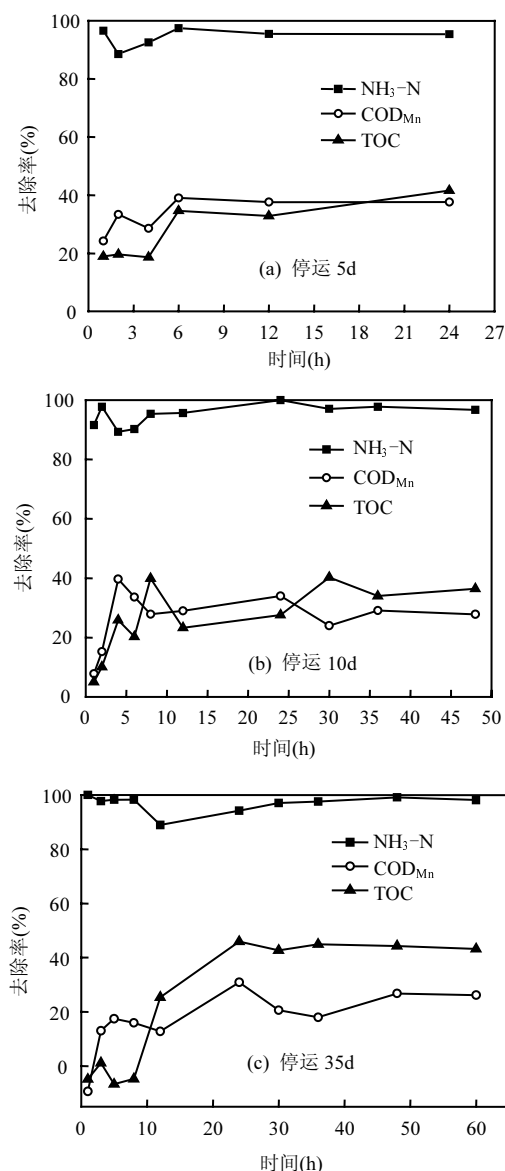


图9 停运时间对滤池重新启动的影响

Fig.9 Effect of shutdown time on re-stratup of the AZBAF

图 9(c)为停运 35d 后的滤池重新启动情况.由图 9(c)可看出,启动后的 10h 内 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率均接近原有水平,随后去除率下降至 88%,24h 后逐渐升高并恢复至 95%以上.较长时间的关闭使沸石吸附的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及有机物被微生物缓慢降解,沸石再生更为完全,因此重启初期 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率可保持较高. TOC 和 COD_{Mn} 的去除率在重启初期出现了负值,这可能是由于长时间的关闭使部分生物膜脱落,即使启动前对滤池进行了反冲洗,仍有部分生物膜吸附不稳定,随水流出.24h 后滤池可基本恢复到稳定期状态.余健等^[25]研究指出活性炭因具有发达的稳孔结构和较大的比表面积,能够吸附大量的有机物且具有较高的表面生物活性较高,因此长期关闭对活性炭-石英砂双层滤料生物过滤的影响较小.郑南^[26]研究表明沸石再生过程中异养菌和硝化菌协同再生,其中硝化菌起主导作用.本试验所用的沸石填料具有与上述类似的优点,故长期(35d)停运对该沸石滤料的生物滤池影响也不大,24h 内基本恢复其处理效果.

3 结论

3.1 AZBAF 在自然挂膜 20d 后, $\text{NH}_3\text{-N}$,TOC 和 COD_{Mn} 去除率分别稳定在 95%、40%和 20%左右,电镜扫描显示,沸石填料表面附着一层生物膜,表示生物滤池挂膜成功.

3.2 N 素与 COD_{Mn} 随滤池沿程的变化表明, $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD_{Mn} 的降解集中在滤池下半段,在启动初期主要依靠沸石滤料的离子交换、吸附和截留作用,稳定期生物作用较为明显.通过 N 素与 COD_{Mn} 沿程变化分析表明,该 AZBAF 具有一定的氨氮冲击负荷和有机冲击负荷.

3.3 检测进水与出水中各分子量区间的有机物表明,AZBAF 依靠滤料的截留、过滤、吸附作用对水中大分子量有机物有一定的去除效果;在生物膜作用下,小分子量有机物去除作用明显,其去除率达 53.4%,表明该生物滤池对消毒副产物将具有良好的控制作用.

3.4 AZBAF 的生物量沿水流方向逐步递减,其中反应器后半段生物量下降幅度较大;生物膜活

性(OUR)变化呈现明显的倒“V”型特点,而单位生物量的生物活性沿程分布是逐渐增大的。

3.5 短期(5~10d)关闭滤池,重新启动反应器6~8h 后就能恢复其去除效果.长期(35d)的滤池关闭对该 AZBAF 的影响也较小,24h 内可恢复。

参考文献:

- [1] 王建华,陈永志,彭永臻.低碳氮比实际生活污水 A₂O-BAF 工艺低温脱氮除磷 [J]. 中国环境科学, 2010,30(9):1195-1120.
- [2] 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]. Water Science and Technology, 2000,41(5):1-4.
- [3] 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.
- [4] 张 长,曾光明,余 健,等.GAC-石英砂生物过滤处理微污染源水的特性 [J]. 中国环境科学, 2004,24(2):209-213.
- [5] 李 冬,李 云.沸石在水处理中的应用 [J]. 给水排水, 1998, 24(7):60-63.
- [6] 蒋铁锋,刘大华,孙同喜,等.沸石滤料曝气生物滤池处理水产养殖废水的工艺特性 [J]. 环境科学, 2010,31(3):703-707.
- [7] Chang Won-seok, Hong Seok-Won. Effect of zeolite media for the treatment of textile wastewater in a biological aerated filter [J]. Process Biochemistry, 2002,37:693-698.
- [8] 陈月芳,宋存义,汪翠萍.沸石复合填料生物流化床在污水处理中的试验 [J]. 中国环境科学, 2006,26(4):432-435.
- [9] 赫俊国,姜 涛.聚丙烯与沸石填料曝气生物滤池处理生活污水的研究 [J]. 给水排水, 2009,35(5):158-161.
- [10] Imai A, Fukushima T, Matsushige K, et al. Fractionation and characterization of dissolved organic matter in a shallow eutrophic lake, its inflowing rivers, and other organic matter sources [J]. Water Research, 2001,35(17):4019-4028.
- [11] 龙小庆,王占生.活性炭-纳滤膜工艺去除饮用水中总有机碳和 Ames 致突变物 [J]. 环境科学, 2001,22(1):75-77.
- [12] 陈 卫,李 敏,林 涛.饮用水处理中有机物分子量分布规律 [J]. 解放军理工大学学报, 2009,10(2):160-164.
- [13] 乔春光,魏群山,王东升,等.典型南方水源溶解性有机物分子量分布变化及去除特性 [J]. 环境科学学报, 2007,27(2):195-200.
- [14] 国家环境保护局《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.
- [15] 于 鑫,张晓健,王占生.饮用水生物处理中生物量的脂磷法测定 [J]. 给水排水, 2002,28(5):1-5.
- [16] Urfer Daniel, Huck Peter M. Measurement of biomass activity in drinking water biofilters using a respirometric method [J]. Water Research, 2001,35(6):1469-1477.
- [17] Metcalf E. Wastewater Engineering-Treatment, Disposal and Re-use [M]. Thirded. New York: McGraw-Hill Publishing, 1995.
- [18] Oldenburg M, Sekoulov I. Multipurpose filters with ion exchanger for the equalization of ammonia peaks [J]. Water Science and Technology, 1995,32(7):199-206.
- [19] Lahav O, Green M. Ammonium removal using ion exchange and biological regeneration [J]. Water Research, 1998,32(7):2019-2028.
- [20] 刘金香,娄金生,陈春宁.沸石曝气生物滤池预处理微污染源水 [J]. 中国给水排水, 2005,21(6):38-40.
- [21] Chang C N, Chao A, Lee F S, et al. Influence of molecular weight distribution of organic substances on the removal efficiency of DBPs in a conventional water treatment plant [J]. Water Science and Technology, 2000,41(10):43-49.
- [22] 王占生,刘文君,李德生,等.微污染源饮用水处理 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999.
- [23] 邱立平,马 军.曝气生物滤池的生物膜及其微生物种群特征 [J]. 中国环境科学, 2005,25(2):214-217.
- [24] 白 宇,张 杰,陈淑芳,等.生物滤池反冲洗过程中生物量和生物活性的分析 [J]. 化工学报, 2004,55(10):1690-1695.
- [25] 余 健,曾光明.滤池关闭对生物过滤的影响 [J]. 给水排水, 2003,29(4):19-22.
- [26] 郑 南,闻 越,李剑波,等.天然沸石生物再生途径机理研究 [J]. 中国环境科学, 2009,29(5):506-511.

作者简介: 孙同喜(1985-),男,山东聊城人,浙江工业大学硕士研究生,主要从事废水生物处理研究.发表论文 5 篇。