

核桃壳-陶粒填料曝气生物滤池去除氨氮的研究^{*}丁绍兰 杨倩[#] 谢林花 齐泽宁

(陕西科技大学资源与环境学院,陕西 西安 710021)

摘要 对核桃壳-陶粒填料曝气生物滤池(BAF)的挂膜启动和处理效果进行了研究,同时考察不同的水力负荷、气水比、填料层高度对污染物去除效果的影响。结果表明:微生物在核桃壳-陶粒填料上成功挂膜仅需21 d,运行稳定后核桃壳-陶粒填料BAF的COD、氨氮去除率分别稳定在92.0%、88.3%左右;在水力负荷为0.06~0.08 m³/(m²·h)、气水比为9:1(体积比)的条件下,核桃壳-陶粒填料BAF处理效果较好且较稳定,氨氮和COD去除率可达70%以上;填料层0~15 cm段为核桃壳-陶粒填料BAF去除COD的高效段,15~30 cm段为去除氨氮的高效段。

关键词 核桃壳-陶粒填料 曝气生物滤池 氨氮 生物膜

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.01.001

Study on removal of ammonia nitrogen in wastewater by biological aerated filter with walnut shell and ceramic packing DING Shaolan, YANG Qian, XIE Linhua, QI Zening. (College of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710021)

Abstract: The start-up and nitrogen removal performance of the self-made biological aerated filter (BAF) with walnut shell and ceramic packing were studied. The effects of hydraulic load, gas water ratio and packing height on the pollutants removal efficiencies were investigated. The results showed that it took just 21 days for the biofilm formation of the BAF with walnut shell and ceramic packing, and the removal efficiencies of ammonia nitrogen and COD could reach stable and stayed around 92.0% and 88.3%, respectively. The optimal hydraulic load of the BAF with walnut shell and ceramic packing was 0.06-0.08 m³/(m²·h), the optimal gas water ratio was 9:1, and the corresponding removal efficiencies of COD and ammonia nitrogen were both above 70%. COD and ammonia nitrogen were mainly removed at the packing height of 0-15, 15-30 cm, respectively.

Keywords: walnut shell and ceramic packing; biological aerated filter; ammonia nitrogen; biofilm

曝气生物滤池(BAF)是一种高效的、灵活的生物反应器,具有滤层的截留过滤作用和生物膜的强氧化降解能力^[1-2],占地面积小,管理系统简单,能高负荷运行^[3]。由于BAF设计简单易建造,它能在好氧条件下同时去除悬浮固体和可溶性污染物^[4]。BAF填料在废水处理过程中起非常重要的作用。填料的类型和表面性能不仅关系到BAF的运行设计、费用和操作模式,还影响微生物挂膜性能和污染物降解能力^[5-7]。核桃壳为生物质碳源,作为BAF填料能发挥其固体碳源和坚硬多孔、骨架构建作用,且还具有好的生物和化学稳定性、良好的截污能力、可生物降解等优点^{[8]10-11}。但是,核桃壳运行过程中由于自身的降解容易塌陷,因此可加入陶粒起支撑作用。陶粒具有生物附着性强、挂膜性能良好、水流流态佳、大孔隙结构发达、表面粗糙等优点,微生物不仅在陶粒表面生长,还在大孔隙内附着生

长^[9],为自养和异养菌提供良好的环境条件。

本课题组前期利用核桃壳BAF去除制革废水中的氨氮取得了较好的效果。针对制革废水氨氮、有机负荷高的特点,本研究采用核桃壳-陶粒作为BAF填料,以模拟氨氮废水为进水,将其注入上流式BAF,测试出水COD、氨氮、亚硝态氮、硝态氮等,并观察沿程变化规律,研究BAF启动、挂膜性能及水力负荷、气水比等条件对脱氮性能的影响,为混合填料BAF处理氨氮废水的实践应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

污泥取自西安市某污水处理厂终沉池,去上清液,采用间歇式曝气培养驯化,通过镜检观察污泥的活性,絮体致密和微生物种类多即污泥活性良好。

核桃壳产自新疆,洗去杂质瓢留壳,破碎后过

第一作者:丁绍兰,女,1963年生,博士,教授,博士生导师,主要从事污染防治、清洁生产、分析检测技术研究。^{*}通讯作者。

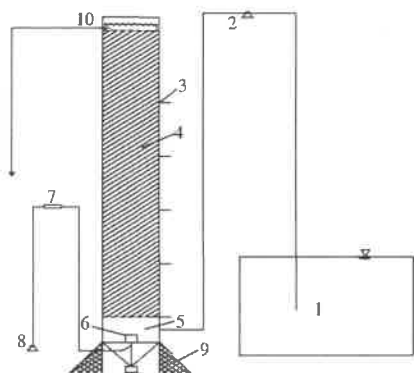
^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.21347004)。

4、6 mm 筛。陶粒购自某公司,洗去杂质。将核桃壳和陶粒均用去离子水浸泡 24 h,反复冲洗除去浮于水中的残余瓢和皮,确保核桃壳和陶粒尺寸、密度均一。之后在 105 ℃烘箱内烘干后备用。

模拟氨氮废水:投加适量的葡萄糖、磷酸二氢钾、氯化铵溶于自来水中,使得 COD、氨氮分别为 192~555、18~57 mg/L, pH 为 7.5~8.5,温度为 17~26 ℃。

1.2 试验装置

如图 1 所示,BAF 为有机玻璃制成的柱状结构,总容积 6 L,有效容积 5 L,高 100 cm,外径 100 mm,内径 90 mm。BAF 从下到上依次设置 1#~5# 共 5 个取样口和 1 个出水口,间距 15 cm。废水经进水箱从下部进入,通过蠕动恒流泵调节进水量。气体流量计调节曝气量,空气由压缩泵通过砂芯曝气头进行曝气。核桃壳和陶粒按 3:1(体积比)混合均匀填装(混合填料容积为 2.1 L),高度 60 cm,并又在上方填充 4 cm 厚的陶粒。



1—进水箱;2—蠕动式恒流泵;3—取样口;4—填料层;5—承托层;
6—砂芯曝气头;7—气体流量计;8—压缩机;9—支座;10—出水口

图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test device

1.3 试验方法

采用复合式接种挂膜法。第 1 阶段为静态挂膜。将培养驯化好的活性污泥加入 BAF 闷曝 3 d,浸没填料并灌满 BAF 有效容积。以小水量进水并通入空气。采用间歇式曝气,曝气 3 h 静置 1 h,使附着在填料上的微生物快速生长繁殖,黏附并固定生长,每 24 h 将填料上部的水吸出并补充模拟氨氮废水。第 2 阶段为连续培养,放空 BAF 并连续进水和进气。水力停留时间为 12 h, DO 为 2~5 mg/L,曝气量为 9 L/h。每天向进水箱中投加一定量的模拟氨氮废水。测定进出水水质,观察微生物的生长情况并对脱落的生物膜进行镜检。当脱落的生物膜较多时进行反冲洗。采用气水联合反冲洗,控制曝

气和冲洗强度,每次持续 10 min 左右。COD、氨氮去除率分别稳定在 92.0%、88.3% 左右,挂膜启动成功。

通过设计单因素试验研究了不同水力负荷(0.06、0.08、0.12 m³/(m²·h))、气水比(体积比 3:1、6:1、9:1、12:1)、填料层高度(0~75 cm)对其生物脱氮性能的影响,以期得到最佳工艺运行条件。

2 结果与讨论

2.1 核桃壳-陶粒填料 BAF 的挂膜与启动

2.1.1 挂膜期间微生物生长状况

挂膜前期,核桃壳-陶粒填料具有良好截留 SS 的能力。核桃壳、陶粒比表面积分别为 14.77、5.70 m²/g,孔隙率分别为 43.94%、63.77%^{[8][20][10-11]}。由于具有较大的比表面积和孔隙率,混合填料挂膜性能良好。废水与微生物接触充分,微生物分布在填料表面而未开始生长。随后,生长区域逐渐扩大,形成较薄、透明的生物膜,填料表面附着有白色绒状物质。

挂膜中期,生物膜厚度逐渐增加,底部有大量白色絮状体,水中悬浮大量脱落的生物膜。对生物膜进行镜检,可以观察到线虫、丝状菌。此时,出水水质差,需对 BAF 进行反冲洗。第 12 天反冲洗后,填料分布较均匀且生物膜逐渐恢复生长,出水 COD、氨氮均降低。

运行 20 d 进入稳定期,出水水质稳定,由扫描电子显微镜(SEM)照片可知,填料表面有较多小孔且孔径和比表面积变大,表明微生物生存范围变广,能利用营养物质生长繁殖。镜检观察到大量的钟虫等原生动物,生物膜结构较好。COD、氨氮去除率分别稳定在 92.0% 和 88.3% 左右,标志微生物挂膜成功。观察微生物的生长情况,底部生物膜较厚而上部较薄。由于进水处营养物质充足,微生物多且繁殖速率快,所以底部微生物的生长速率较上部快。采用核桃壳-陶粒填料挂膜仅需 21 d,而核桃壳、陶粒则分别需 27、30 d^{[8][24][12]},挂膜启动时间缩短,这主要是由于混合填料硝化作用强,达到稳定时间短。

2.1.2 COD 去除效果

由图 2 可知,BAF 运行前 3 天,微生物的生长状态处于适应阶段,出水 COD 较进水高,表现出核桃壳的释碳作用。第 4 天,COD 去除率逐渐恢复至 39.2%,这表明核桃壳-陶粒填料通过有机物的吸附作用及异养菌不断生长繁殖来降解有机物。之后,COD 去除率呈上升趋势,第 9 天,COD 去除率达

到较大值 82.1%，之后呈下降趋势，第 12 天 COD 去除率为 73.1%。由于微生物繁殖速率较快，生物膜较厚，致使 BAF 底部的填料发生堵塞，不能向生物膜内部扩散 DO 和营养物质。不稳定、老化的生物膜开始脱落且部分生物膜停留在 BAF 内，因而进一步加剧了核桃壳-陶粒填料的堵塞^[13]。BAF 上部附着生长的微生物，不能获得充足的营养物质和 DO 等，使其降解有机物的效率变差。因此，进行反冲洗，第 21 天 COD 去除率增至 91.7%，之后 COD 去除率稳定在 92.0% 左右。总体看，COD 去除率平均为 80.0%，能有效去除有机污染物。填料表面的生物膜通过氧化降解和滤层吸附、截留来降解废水中的有机物^[14-15]。而且，由于混合填料的表面较粗糙及有许多孔隙，比表面积较大，吸附能力很强，使微生物能较均匀地附着在填料表面，有利于向生物膜内传递 DO 和营养物质^[16]。

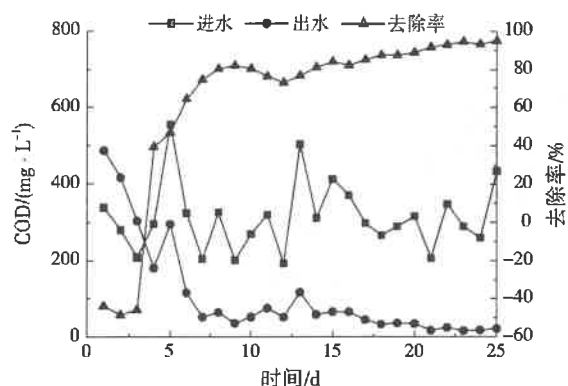


图 2 启动期间 BAF 中 COD 去除效果
Fig.2 Removal efficiency of COD in the BAF during start-up

2.1.3 氨氮去除效果

由图 3 可知，BAF 启动初期，氨氮去除率呈上升趋势。第 4 天，氨氮去除率达 100.0%，表明核桃壳-陶粒填料表面附着了部分硝化菌。第 5 天后氨氮去除率呈下降趋势，第 9 天降至 54.2%。这可能是由于氨氮负荷增加，大于硝化菌的处理能力，若要重新达到平衡，则需更多的硝化菌^[17]。随后，氨氮去除率略微增加后又下降至 50.9%，水头损失达到一定水平。因此，进行反冲洗，之后氨氮去除率缓慢增加。第 16 天，氨氮去除率快速增加，这是因为异养菌受限制而增殖缓慢，硝化菌大量繁殖。第 20 天，氨氮去除率稳定在 88.3% 左右，挂膜成功。总体看，氨氮去除率平均为 71.0%，硝化菌活跃，硝化作用良好。然而，由于前期配水补充碱度不够，pH 较低，使得硝化菌活性受抑制，生物膜的氧化分解能力受限，不能高效发挥硝化作用。理论上，硝化作用对

pH 较敏感，低于 6.8 去除效率显著下降。最佳 pH 为 7.5~8.0^[18-19]。

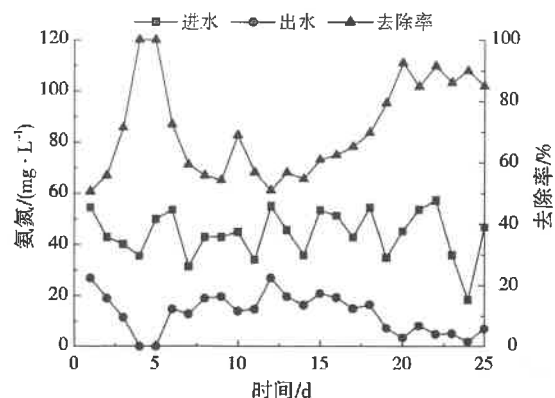


图 3 启动期间 BAF 中氨氮去除效果
Fig.3 Removal efficiency of ammonia nitrogen in the BAF during start-up

2.1.4 硝态氮和亚硝态氮的变化

由图 4 可知，出水亚硝态氮和硝态氮在挂膜初期总体呈上升趋势，随后亚硝态氮呈下降趋势。8~11 d，亚硝化菌占优势较硝化菌繁殖得快，氨氮大部分转化为亚硝态氮，亚硝态氮积累率高，第 9、11 天达 100%。随着硝化反应进一步深化，亚硝态氮被硝化菌分解转化，亚硝态氮减少，最终氨氮大部分转化为硝态氮，硝态氮平均稳定在 2.5 mg/L。系统中硝化菌活跃，硝化作用良好。

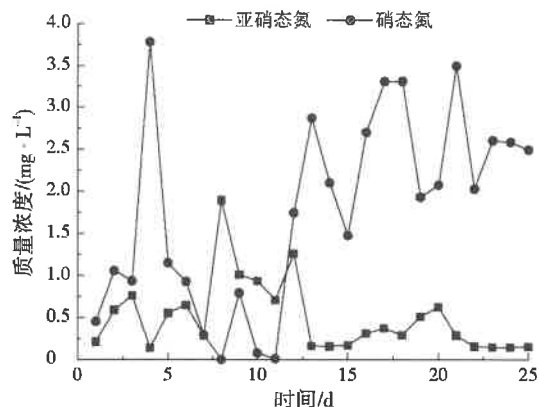


图 4 启动期间 BAF 中亚硝态氮和硝态氮去除效果
Fig.4 Removal efficiency of nitrite nitrogen and nitrate nitrogen in the BAF during the start-up

2.2 核桃壳-陶粒填料 BAF 运行参数影响

2.2.1 水力负荷

在曝气充足 ($DO > 2 \text{ mg/L}$)、气水比为 9:1 的情况下，研究水力负荷的影响，结果见图 5。水力负荷从 $0.06 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 上升到 $0.12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，氨氮去除率降低，而 COD 去除率增加至 86.1%。这表明，在适宜的水力负荷下，BAF 有一定的抗水力负荷冲击能力。水力负荷为 $0.06 \sim 0.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时，COD、氨氮去除效果较好。水力负荷大于 0.06

$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,COD去除率相对稳定,而氨氮去除率先迅速下降后略有上升。因水流对滤料的水力剪切作用过强,造成微生物与污染物的接触时间减少,生物膜更新速率加快,不利于污染物的去除。硝化菌难以富集,也会由于生长速率慢和繁殖条件限制而处于不利地位^[20]。同时,增加反冲洗频率,使硝化菌冲洗出去,硝化作用下降。李汝琪等^[21]表明,水力负荷对去除氨氮的影响较大。水力负荷较小时,COD去除效果无明显提升,而水力负荷为 $0.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时达到最高。这是由于微生物无充足的营养物质,异养菌繁殖受限^[22],不能充分发挥BAF的处理能力。

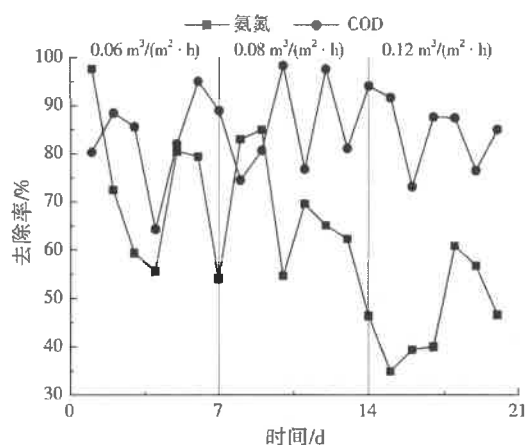


图5 不同水力负荷条件下COD和氨氮去除效果
Fig.5 Removal efficiency of COD and ammonia nitrogen under different hydraulic loading conditions

2.2.2 气水比

保持水力负荷为 $0.06 \sim 0.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,研究气水比的影响。结果见图6。随着气水比逐渐增大,COD和氨氮去除率均总体逐渐增大。气水比由3:1提高到6:1时,COD去除率由70.7%增加到83.6%,而氨氮去除率略有减小;气水比由6:1提高到9:1时,氨氮去除率由43.7%迅速增加到73.9%,而COD去除率下降了5.6个百分点,但仍在70%以上;气水比继续提高到12:1时,COD去除率增加不明显,氨氮去除率降低至70.0%。这表明,BAF具有较好的氧利用和转化率。气水比为9:1时充氧效果较好,好氧微生物代谢正常,BAF处理效果较好且较稳定。气水比直接影响DO浓度,而DO浓度直接影响好氧微生物的活性。MANN等^[23]报道,在适当范围内,气水比越大,生物膜内DO浓度越高,氧转化能力越好。因此,生物膜上的好氧菌和硝化菌的活性越高,污染物的去除率随曝气量增加而提高。但气水比过大,湍流过强导致生

物膜过早脱落,活性微生物较少而降低污染物的去除率,且动力消耗较大。气水比过小,不能为微生物提供足够的DO而不利污染物的去除。因此,保证适宜的气水比对BAF的处理效果至关重要。

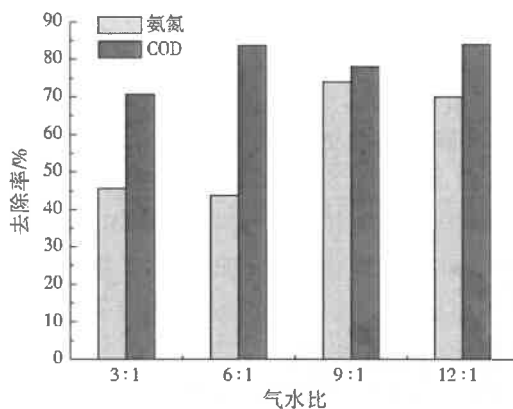


图6 不同气水比条件下COD和氨氮去除效果
Fig.6 Removal efficiency of COD and ammonia nitrogen under different gas/water ratio

2.2.3 填料层高度

在水力负荷为 $0.06 \sim 0.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、气水比为9:1的条件下,研究污染物沿程变化。由图7可知,COD去除速率沿填料层高度呈现先快后慢的规律。0~15 cm段,COD去除率较高,为78.6%。由于底部有机物浓度高,碳化异养菌所需的营养物质充分,使其活性较高且处于对数生长期,所以能高效去除COD;15~30、45~75 cm段几乎没有去除COD;30~45 cm段,COD去除率增长11.3个百分点。因大部分污染物已在填料层底部被降解,中上部有机物浓度较低,营养物质不足,所以COD去除速率降低。因此,COD去除高效段为0~15 cm。

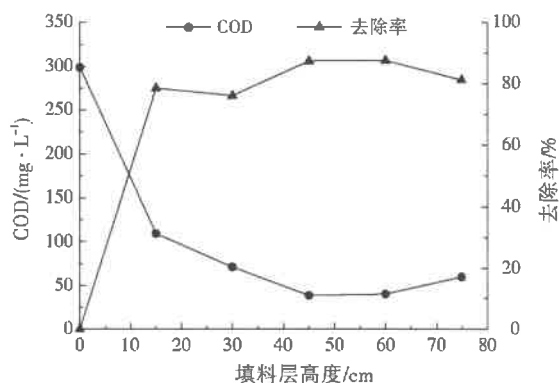


图7 不同填料层高度下的COD去除效果
Fig.7 The removal efficiency of COD at the different packing height

由图8可知,随着填料层高度增加,氨氮去除率呈先快后慢的规律。0~15 cm段,氨氮去除率较高,为17.6%;15~30 cm段,氨氮去除率最大,去除率增长89.1个百分点;之后,氨氮去除率趋于平缓,

而 75 cm 处仍较大。这表明,15~30 cm 段为氨氮去除高效段。0~30 cm 段,有机负荷高,异养菌与硝化菌竞争 DO 和生存空间,成为优势菌,而硝化菌增殖速率慢,世代周期长,成为弱势菌,使硝化菌的活跃区比异养菌靠后。30~75 cm 段,由于有机负荷和异养菌减少,而硝化菌不断繁殖,代谢活跃,故氨氮去除率高。随后硝化作用深化,由于营养物质和硝化菌活性减少,氨氮去除率趋于平稳,亚硝态氮和硝态氮浓度也趋于平缓。

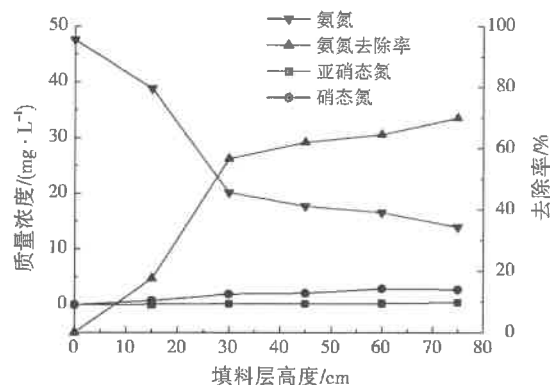


图8 不同填料层高度下的氨氮、亚硝态氮和硝态氮
Fig.8 Ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen at the different packing height

氨氮的硝化作用是亚硝化菌和硝化菌共同参与的产酸过程^[24]。测定不同填料层高度的 pH 可考察 BAF 的硝化能力。由图 9 可知, pH 沿填料层高度的增加先呈下降趋势,后在 60~75 cm 段略有上升。15~60 cm 硝化能力强,下部和上部硝化能力相对弱。

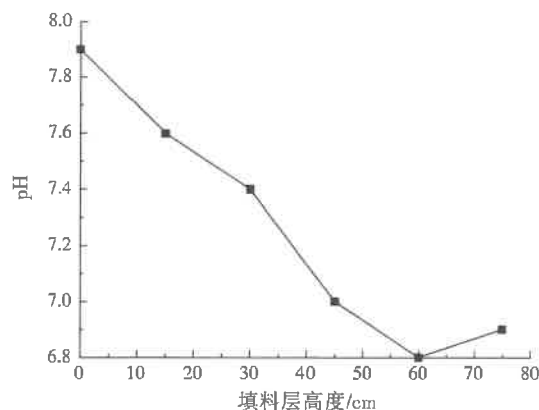


图9 pH 随填料层高度的变化情况
Fig.9 The change of pH at the different packing height

3 结论

(1) 微生物在核桃壳-陶粒填料上成功挂膜仅需 21 d,运行稳定后核桃壳-陶粒填料 BAF 的 COD、氨氮去除率分别稳定在 92.0%、88.3%左右。

(2) 在水力负荷为 $0.06 \sim 0.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、气水比为 9:1 的条件下,核桃壳-陶粒填料 BAF 处理效果较好且较稳定,氨氮和 COD 去除率可达 70% 以上。

(3) 填料层 0~15 cm 段为核桃壳-陶粒填料 BAF 去除 COD 的高效段,15~30 cm 段为去除氨氮的高效段,15~60 cm 段硝化能力强。这表明,BAF 底部异养菌活跃,中上部硝化菌活跃。

参考文献:

- [1] 张小玲,李强,王靖楠,等.曝气生物滤池技术研究进展及其工艺改良[J].化工进展,2015,34(7):2023-2030.
- [2] FENG Y, YU Y, QIU L, et al. The characteristics and application of grain-slag media in a biological aerated filter (BAF)[J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 2012, 18(3): 1051-1057.
- [3] ZHAO X L, ZHU L, BAI S J, et al. Performance of a double-layer BAF using zeolite and ceramic as media under ammonium shock load condition[J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(1): 81-89.
- [4] SU D L, WANG J. Kinetic performance of oil-field produced water treatment by biological aerated filter[J]. 中国化学工程学报(英文版), 2007, 15(4): 591-594.
- [5] ZHANG J, CAO X S, MENG X Z. Progress in the study of aerated biofilter[J]. China Water and Wastewater, 2012, 18(8): 26-29.
- [6] HAN S, YUE Q, MIN Y, 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(3): 1149-1155.
- [7] QIU L, ZHANG S, WANG G, et al. Performances and nitrification properties of biological aerated filters with zeolite, ceramic particle and carbonate media[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(19): 7245-7251.
- [8] 贾丽娟.核桃壳填料曝气生物滤池去除废水中氨氮的研究[D].西安:陕西科技大学,2012.
- [9] 朱乐辉,朱袁榜.水处理滤料——球形轻质陶粒的研制[J].环境保护,2000(1):35-36.
- [10] 宋奔奔.四种填料的生物滤器对模拟海水养殖废水处理效率比较研究[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2009.
- [11] 齐泽宁.核桃壳-陶粒填料曝气生物滤池处理氨氮废水的研究[D].西安:陕西科技大学,2016.
- [12] 高连敬.曝气生物滤池沸石和陶粒滤料性能对比研究[J].水处理技术,2009,35(12):53-57.
- [13] CHEN Y, LI B, YE L, et al. The combined effects of COD/N ratio and nitrate recycling ratio on nitrogen and phosphorus removal in anaerobic/anoxic/aerobic (A^2/O)-biological aerated filter (BAF) systems[J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 93(10): 235-242.
- [14] 王立立,胡勇有.曝气生物滤池去除有机物及硝化氨氮的影响因素研究[J].环境污染与防治,2006,28(4):257-260.
- [15] 唐文锋,杨云龙,张丽珍.曝气生物滤池在污水处理中的应用[J].图书情报导刊,2007,17(33):141-142.
- [16] 边朝辉.不同填料曝气生物滤池处理城市污水效能比较[D].武汉:华中科技大学,2008.

