

不同温度下曝气生物滤池运行效能 与微生物群落结构

窦娜莎 王琳*

(中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100)

摘要 采用 Biostyr 曝气生物滤池(BAF)处理城市污水,研究了温度变化对其处理效果与微生物群落结构的影响。结果表明,温度低于 18 ℃(低温)时,BAF 对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均低于 60%;当水温在 18 ~ 22 ℃(中温)之间变化时,BAF 对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果稳定且明显高于低温时的去除率;当水温高于 22 ℃(高温)后,BAF 对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率与水温正相关,去除率随温度的升高而显著提高。PCR-DGGE 分析表明,温度越高 BAF 内总细菌微生物群落多样性越好;定量 PCR 分析表明,BAF 内总细菌、氨氧化细菌和硝化细菌的菌群密度均随温度升高而增大,与其对污染物的去除率变化趋势一致。BAF 在低温环境下,滤池内的菌群结构变得简单、菌群密度降低,但出水水质仍能满足要求,表明 BAF 工艺具有良好的抗低温冲击能力。

关键词 Biostyr 曝气生物滤池 微生物群落结构 PCR-DGGE qPCR

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)06-2800-07 DOI 10.12030/j.cjee.201501153

Microbial community structure and the performance of biological aerated filter under different temperatures

Dou Nasha Wang Lin

(College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract A Biostyr biological aerated filter (BAF) was applied to treat municipal wastewater. The effects of temperature on BAF nutrient removal efficiency and microbial community structure were investigated. The removal efficiencies of chemical oxygen demand (COD) and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) were below 60% when the temperature was below 18 ℃. When the temperature was between 18 ℃ and 22 ℃, the removal efficiencies of COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were stabilized, and the removal rates were higher than that observed for temperatures below 18 ℃. When the temperature was higher than 22 ℃, the removal efficiencies were positively correlated with temperature; removal efficiency increased significantly as the water temperature increased. Based on a PCR-DGGE analysis, the multiformity of total bacteria in the microbial communities at higher temperatures was better than that observed at a lower temperature. Based on a quantitative PCR analysis, the total bacterial density, ammonia oxidizing bacteria, and nitrifying bacteria in the BAF increased as the temperature increased, which was consistent with the trends observed for the pollutant removal rate. The microbial community structure in the filter became less complex, and the density of bacteria decreased at a low temperature. These results indicated that the BAF had optimal effects at low temperatures.

Key words Biostyr biological aerated filter; microbial community structure; PCR-DGGE; qPCR

曝气生物滤池工艺(biological aerated filter, BAF)是在生物接触氧化工艺的基础上引入饮用水处理中的过滤思想而产生的一种好氧污水生物处理工艺^[1],具有处理效果好、耐冲击负荷、工艺流程简单和菌群结构合理等优点^[2]。Biostyr BAF 是 BAF 的代表工艺之一,采用新型轻质悬浮填料——biostyrene(主要成分为聚苯乙烯)^[3]。

近年来,曝气生物滤池在世界范围内的广泛应

用,使得学术界对 BAF 的讨论研究涉及工艺改良、运行评价以及机理分析等各个方面。研究热点主要

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07010-008-04);山东省科技攻关项目(2009GGB01012)

收稿日期:2015-01-22; **修订日期:**2015-03-18

作者简介:窦娜莎(1983—),女,博士,研究方向:污水处理。

E-mail: 18660293670@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lwangouc@126.com

集中在开发新型填料^[4-5]、优化运行参数^[6-7]和研究生物膜微生物特性^[8-9]等方面。

现阶段,我国运行中曝气生物滤池大部分是照搬国外的经验设计,在实际运行中,受到运行参数(进水水质、温度、水力负荷)和填料特性等多种因素的影响,大多存在运行费用高、出水水质不达标和反冲洗频繁等问题,曝气生物滤池的优势没有完全发挥出来。因此,对已投入使用的曝气生物滤池的生产性研究颇具意义。

污水生物处理的实质是通过反应器中微生物体内的酶促反应来实现对有机污染物的分解代谢^[10]。微生物的数量与活性是污水生物反应器能否发挥处理效能的关键^[11],由于生物蛋白活性受温度影响很大,因而酶本身的蛋白质特性就决定了污水生物处理反应器必须在一定的温度范围内运行才能取得良好的处理效果^[12]。不同的微生物,它的生态位和适

宜温度范围也有所不同。

本研究以青岛市麦岛污水处理厂 Biostyr BAF 为研究载体,采用 PCR-DGGE (polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis) 和 qPCR (real-time quantitative PCR detecting system) 方法分析温度与曝气生物滤池中微生物群落结构以及运行效果之间的关系,以便更合理地设置功能分区、优化设计参数,为 BAF 的应用推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 工程概况

青岛麦岛污水处理厂濒临海边,汇水面积 35 km²,设计规模 14 万 m³/d^[13],考虑到工程周边地区环境和景观的敏感性,本工程采用全地下式的布置方式,工艺流程如图 1 所示。

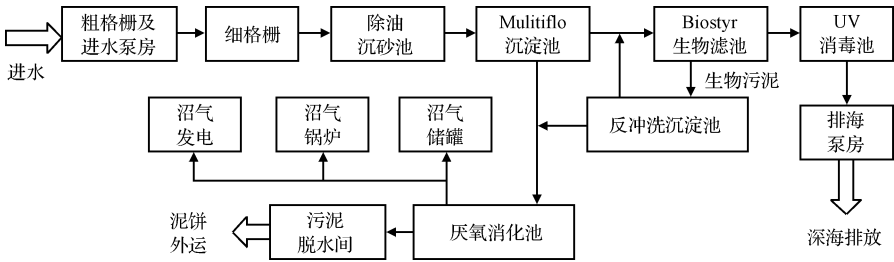


图 1 麦岛污水厂工艺流程
Fig. 1 Main process of Maidao WWTP

污水处理构筑物由粗格栅及进水提升泵站、细格栅及除油沉砂池、Multiflo-300 初沉池、Biostyr 生物滤池、Multiflo-300 反冲洗沉淀池、UV 消毒池、排海泵房组成,其中一级处理部分主要为 Multiflo 沉淀池;二级生物处理部分采用上流式 Biostyr 曝气生物滤池;污水消毒采用 UV 消毒。经处理的污水部分回用,部分深海排放。污泥部分采用污泥消化热电联产和污泥脱水工艺、脱水后污泥卫生填埋的处理与处置方式。

青岛市麦岛污水处理厂 Biostyr BAF 共设有 8 座滤池单元,单池有效尺寸 13.81 m × 16.70 m × 8.12 m,有效面积 231 m²,最大滤速 7.7 m/h;滤池内填充 biostyrene 轻质滤料,平均粒径 6 mm,滤料厚度 3.5 m,滤料体积 7 200 m³。图 2 为过滤模式和反冲洗模式下的 Biostyr BAF,由配水渠、滤料层、出水渠、反冲洗水贮存池和人工曝气系统组成^[14]。

1.2 进水水质

青岛市麦岛污水处理厂的上游水属于城市污水,包括生活污水及少量工业废水,Biostyr BAF 进水为水厂强化预处理沉淀池 Multiflo 出水,水质情况见表 1。

1.3 取样及理化指标测定

滤池共设 5 个取样口,分别位于进水渠、出水渠、距离滤料底部 100、200 和 300 cm 处。在 Biostyr BAF 内水温为 14.5、18.6 和 23.2 ℃ 时,分别选择滤池滤层下部(距池底(100 cm)中部(距池底 200 cm)和上部(距池底 300 cm)生物膜生长较好

表 1 Biostyr BAF 进水水质

Table 1 Quality of Biostyr BAF influent			
指标	最高值	最低值	平均值
COD (mg/L)	130.6	97.3	116.4
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	39.9	19.7	30.1
SS (mg/L)	92	21	43
pH	7.6	6.7	7.2

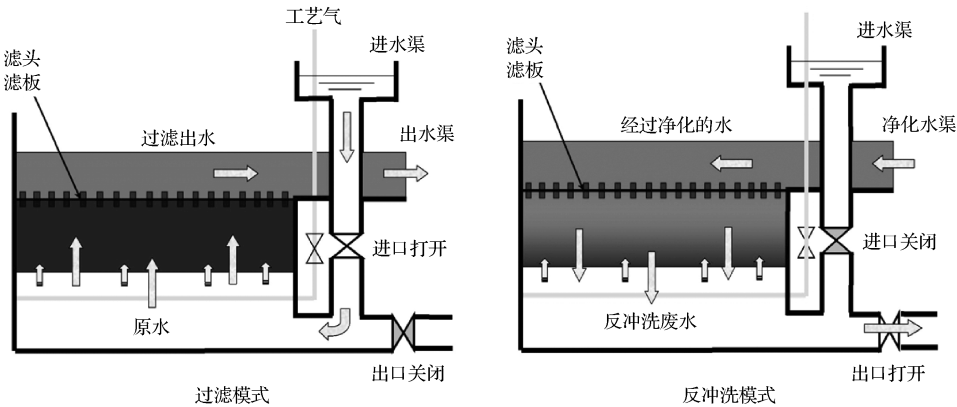


图 2 Biostyr BAF 工艺示意图
Fig. 2 Schematic of Biostyr BAF

的滤料,取出,用蒸馏水轻轻清洗后,用试剂勺刮取滤料表面的生物膜,每一温度条件下取样 3 次,混合后溶于无菌水中待用。

水质分析方法采用《水和废水监测分析方法》(第 4 版)^[15],其中 COD(chemical oxygen demand)采用重铬酸钾比色法;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法;SS(suspended solid)采用过滤称重法。pH 和水温采用仪器直读法。

1.4 微生物群落结构分析

1.4.1 DNA 提取

采用细菌基因组提取试剂盒(北京天根,DP302),按说明书所述步骤操作,提取 DNA,−20 ℃ 保存备用。

1.4.2 PCR-DGGE

PCR 扩增引物为 GC338F(5′-CGC CCG GGC CGC GCC CCG GGG CGG GGC GGG GGC GCG GGG GGC CTA CGG GAG GCA GCA G-3′)和 518R(5′-ATT ACC GCG GCT GCT GG -3′)。PCR 反应采用 50 μL 反应体系,其组分为:10 × buffer,5 μL;Taq DNA 聚合酶,0.4 μL;2.5 mmol dNTP,3.2 μL;引物,各 2 μL;模版 DNA,2 μL;ddH₂O,35.4 μL。PCR 反应参数为 94 ℃ 预变性 5 min;然后 94 ℃ 变性 30 s,55 ℃ 退火 30 s,72 ℃ 延伸 30 s,30 个循环;最后 72 ℃,延伸 10 min,冷却至 4 ℃。

将 PCR 样品 5 μL 与 10 × buffer 混合,采用 Bio-rad 突变检测系统,用 8% 的聚丙烯酰胺凝胶,变性剂浓度为 30%~60%,150 V 60 ℃ 下电泳 4 h。DGGE 完毕后采用银染法染色,获得 DGGE 指纹图谱。

1.4.3 qPCR 分析

采用 qPCR 分析技术对 Bacteria、AOB (ammol-

lia oxidizing bacteria,氨氧化细菌)、NOB(nitrite-oxidizing bacteria,亚硝酸盐氧化菌)中的 *Nitrobacter* (硝化杆菌属)和 *Nitrospira* (硝化螺旋菌属)的菌群密度特征进行测定,引物信息如表 2^[16-19] 所示。定量 PCR 反应条件为:95 ℃ 下 5 min,然后 95 ℃ 变性 30 s,退火温度 15 s(退火温度:总细菌 57 ℃,AOB 55 ℃, *nitrobacter* 50 ℃, *nitrospira* 65 ℃),72 ℃ 延伸 20 s,进行 40 个循环。采用 25 μL 扩增体系:2 × TransStartTM qPCR SuperMix,12 μL;5 μM 引物各 1 μL;DNA 模板 2 μL;ddH₂O,9 μL。

表 2 PCR 实验引物
Table 2 Primers used in PCR studies

实验组	引物	序列
Bacterial 16S rDNA	121f	5′-AGGAAGGTGGGGATGAC-3′
	238r	5′-CGGCTTTCTGGGATTGG-3′
	CTO189fA/B	5′-GGAGRAAAGCAGGGGATCG-3′
AOB	CTO189fC	5′-GGAGGAAACTAGGGGATCG-3′
	RT1r	5′-CGTCTCTCAGACCARCTACTG-3′
<i>Nitrobacter</i>	FGPS872-f	5′-CTAAAACTCAAAGGAATTGA-3′
	FGPS1269-r	5′-TTTTTTGAGATTTGCTAG-3′
<i>Nitrospira</i>	NSR1113f	5′-CCTGCTTTCAGTTGCTACCG-3′
	NSR1264r	5′-GTTTCGACGCGTTTGTACCG-3′

2 结果与讨论

本实验在 pH 值为 7.11~7.37,气水比为 5:1 条件下,分别考察温度对曝气生物滤池 COD 和 NH₄⁺-N 去除率以及微生物群落结构的影响。取样均在反冲洗结束 3 h 后,即滤池稳定运行阶段进行。

2.1 温度对处理效果的影响

不同温度条件下 COD 和 NH₄⁺-N 去除情况如

图 3 所示。

当水温低于 18 ℃ 时,COD 去除率较低,平均去除率为 57.9%,COD 出水平均浓度为 51.5 mg/L;随着温度的升高有机物去除能力增强,去除率上升,当温度高于 22 ℃ 时,COD 去除率趋于稳定,出水 COD 浓度基本降至 50 mg/L 以下,达到 GB 18918-2002 城镇污水排放标准中的一级 A 标准,平均去除率为 64.9%。分析认为,18 ℃ 以下,酶活性降低,细菌生长繁殖受到限制,对有机物的氧化能力变弱^[20]。

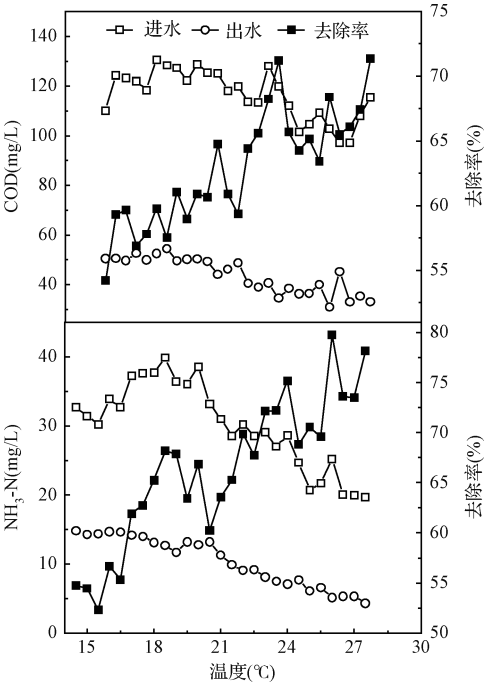


图 3 不同温度下 COD 和 NH₄⁺-N 的去除效果

Fig. 3 COD and NH₄⁺-N removal efficiency at different temperatures

实验数据表明,温度对氨氮去除率的影响更为显著:当水温在 14 ~ 18 ℃ 之间变化时,NH₄⁺-N 去除率不足 60%,出水 NH₄⁺-N 平均浓度为 14.5 mg/L,出水水质差;当水温在 19 ~ 21.5 ℃ 之间变化时,NH₄⁺-N 去除率较为稳定,出水 NH₄⁺-N 平均浓度为 11.9 mg/L;当温度在 21.5 ~ 27.5 ℃ 之间变化时,NH₄⁺-N 去除率随温度升高而提高,从 65.3% (21.5 ℃ 条件下)逐渐波动升至 79.8% (26 ℃ 条件下)。低温环境下 BAF 的硝化能力下降非常明显,这是因为多数硝化功能菌为中温微生物^[21],最适温度为 20 ~ 35 ℃,低温下生物活性大大降低,即表现为氨氮去除率的快速下降。

由此可见,当水温低于 18 ℃ 时,BAF 对 COD 和 NH₄⁺-N 去除率均较低;当水温在 18 ~ 22 ℃ 之间变化时,BAF 对 COD 和 NH₄⁺-N 的去除较为稳定;当水温高于 22 ℃ 后,BAF 对 COD 和 NH₄⁺-N 去除率明显提高。同时,也可以看出,温度对 NH₄⁺-N 去除率的影响比对 COD 去除率的影响更大,因此,在氨氮污染严重的水质环境下,温度对处理效果的影响更为显著。

2.2 温度对群落结构的影响

用细菌基因组提取试剂盒 (DP302 Tiangen) 提取生物膜样品细菌总 DNA,以 GC-338F 和 518R 为引物进行 PCR 扩增。DGGE 图谱 (图 4) 反映了温度分别为 14.5、18.6 和 23.2 ℃ 时,BAF 中微生物群落的演替情况,从图谱中可以看出,随着温度的下降,滤池内的群落多样性降低,23.2、18.6 和 14.5 ℃ 时的条带数分别为 10 条、9 条和 5 条。

从 DGGE 识别图谱 (图 5) 可以看出:①条带 1, 4, 7, 8, 9 在 3 个泳道中均存在,其中条带 7, 8, 9 信号逐渐减弱,条带 4 信号逐渐增强,说明温度对这些菌群有一定影响,同时也表明,这些菌种的生态位范围较宽,因此,可以在不同的温度环境中生存;②条带 2, 3, 6, 10 所代表的菌群出现在前 2 条泳道,随后消失,表明随着温度的降低,该条带所代表的微生物菌群在竞争中处于劣势,最终在温度低于 15 ℃ 时被其他菌群替代;③条带 5 所代表的菌群仅出现在第 1 条泳道,随后消失,说明其对温度要求苛刻,温度较低时,种群失去优势而被淘汰。可见低温对种群结构具有很大地影响,同时也影响到了 BAF 对污染物的去除效能,这与曝气生物滤池对 COD 和 NH₄⁺-N 去除效果的分析结论一致。

根据戴斯系数计算出各泳道简单的相似性结果见表 3, DGGE 图谱经 UPGAMA 聚类分析,结果如图 6 所示。

从表 3 和图 6 可以看出,泳道 23.2 ℃ 和泳道 18.6 ℃ 之间的相似度为 86.6%,而泳道 23.2 ℃ 和泳道 14.5 ℃ 的相似度仅为 56.7%。说明当水温低于 15 ℃ 时滤池内生物丰度骤降,这与前人的研究^[22]结论相一致。然而低温下 BAF 内优势菌群却很明显,说明经过低温环境的冲击后,使得滤池内的优势菌群结构变得简单,但运行数据表明,正是这种较为简单的菌落结构维持了 BAF 的稳定运行。

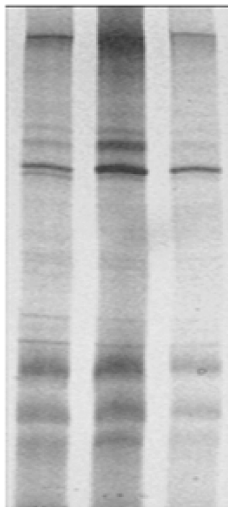


图 4 生物膜 DGGE 图谱

Fig. 4 DGGE profiles of biofilm

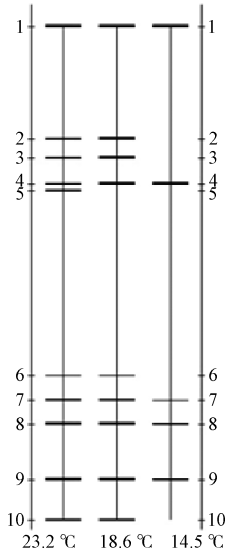


图 5 DGGE 凝胶电泳各条带识别图

Fig. 5 DGGE bands identification chart

表 3 不同条带的相似性矩阵

Table 3 Similar matrix of different belts

温度 (℃)	相似度 (%)		
	23. 2	18. 6℃	14. 5℃
23. 2	100	86. 6	56. 7
18. 6	86. 6	100	63. 8
14. 5	56. 7	63. 8	100

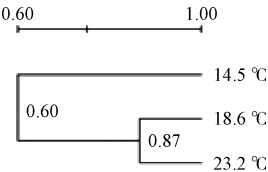


图 6 DGGE 图谱聚类分析

Fig. 6 Clustering tree of DGGE profiles

2.3 温度对细菌菌群密度的影响

利用特异性引物(引物信息见表 2),对 14.5、18.6 和 23.2℃条件下 BAF 中总细菌、氨氧化细菌(AOB)、硝化杆菌(*Nitrobacter*)和硝化螺菌(*Nitrospira*)进行 Real-time PCR 分析,结果如表 4 所示。

表 4 曝气生物滤池中总细菌、AOB、*Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 浓度

Table 4 Cell numbers of bacteria, AOB, *Nitrobacter* and *Nitrospira* in BAF (copy/(500 μL))

细菌类别	细菌浓度		
	14. 5℃	18. 6℃	23. 2℃
总细菌	5.60×10^7	1.79×10^8	2.34×10^8
AOB	1.38×10^6	4.05×10^6	4.97×10^6
<i>Nitrobacter</i>	7.16×10^5	6.94×10^6	3.21×10^6
<i>Nitrospira</i>	2.40×10^6	5.30×10^6	5.06×10^7

实验数据表明:①18.6℃时 BAF 内的总细菌、AOB、NOB(*Nitrobacter* 和 *Nitrospira*) 数量分别为 14.5℃时的 3.2 倍、2.9 倍和 3.9 倍。对比相同条件下水质数据可以看出,温度在 14.5~18.6℃之间变化时,COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均随温度增长而迅速提高,并且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率受温度影响更为明显,COD 平均去除率为 58.3%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率从 14.5℃时的 54.7% 增长到 18.5℃时的 68.2%,平均去除率为 60.3%;②23.2℃时 BAF 内的总细菌数量、AOB、NOB(包括 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira*) 分别为 18.6℃时的 1.3 倍、1.2 倍和 4.4 倍,对比 18.6~23.2℃条件下水质数据可以看出,在此温度区间 BAF 对有机污染物的去除能力随温度的升高而提高,平均去除率为 64.2%,滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率逐渐提高,平均去除率 66.9%,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度为 9.8 mg/L,出水水质良好;③AOB 和 NOB 的菌群密度均随温度升高而增大,在 23.2℃条件下菌群密度最大,分别为 4.97×10^6 copy/(500 μL)和 5.38×10^7 copy/(500 μL),说明多数硝化细菌是嗜温菌,当温度高于 18℃时菌群比生长速率提高,细菌活性增强,表现为滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 良好的去除效果;④当水温低于 18℃时,BAF 内菌群密度和多样性均下降,COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率降低,种群数量的变化趋势与滤池对污染物的去除规律相一致。

3 结 论

青岛市麦岛污水处理厂采用 Biostyr BAF 处理

城市污水,本研究考察了不同温度下,BAF对COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理效果以及滤池内微生物群落结构及菌群密度的变化情况。

当水温低于18℃时,COD去除率较低,平均去除率为57.9%,随着温度的升高有机物去除能力增强,去除率上升,当温度高于22℃时,COD去除率趋于稳定,出水COD浓度降至50 mg/L以下,达到GB 18918-2002城镇污水排放标准中的一级A标准,平均去除率为64.9%;温度对氨氮去除率的影响更为显著,水温低于18℃时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率不足60%,当温度在21.5~26℃之间变化时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率从65.3%逐渐升至79.8%,增长率最大。

随着水温的变化,BAF内的微生物群落组成随之变化:在低温环境下,很多种群失去生态位优势而被淘汰,滤池内的菌群结构变得简单,菌群密度降低,但出水水质稳定,表明BAF工艺具有良好的抗低温冲击能力;当水温高于18℃,BAF内微生物的菌群密度和多样性比低温环境下更加丰富,滤池总细菌、氨氧化细菌和硝化细菌菌群密度随温度升高而增大,工艺出水水质良好。实验数据说明,BAF内微生物群落结构的变化与污染物的去除率变化趋势相一致。

温度对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率的影响比对COD去除率的影响更大,在氨氮污染严重的水质环境下,温度对处理效果的影响更为显著。因此,在工程应用中1年内环境温度低于15℃的天数较多,并且原水氨氮污染严重时,应充分考虑工艺保温措施,以保障出水水质。

参考文献

- [1] 陆洪宇,马文成,张梁,等. 曝气生物滤池深度处理混合印染废水. 环境工程学报, **2013**, 7(7): 2409-2413
Lu Hongyu, Ma Wencheng, Zhang Liang, et al. Advanced treatment of mixing dyeing wastewater using biological aerated filter process. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2013**, 7(7): 2409-2413 (in Chinese)
- [2] Feng Yan, Yu Yanzhen, Qiu Liping, et al. Performance of water quenched slag particles (WQSP) for municipal wastewater treatment in a biological aerated filter (BAF). Biomass and Bioenergy, **2012**, 45: 280-287
- [3] Farabegoli G., Chiavola A., Rolle E. The biological aerated filter (BAF) as alternative treatment for domestic sewage: Optimization of plant performance. Journal of Hazardous Materials, **2009**, 171(1-3): 1126-1132
- [4] Bao Ying, Zhan Liang, Wang Chunxiao, et al. Carbon foams used as packing media in a biological aerated filter system. Materials Letters, **2011**, 65(19-20): 3154-3156
- [5] Liu Yaoxing, Yang Tongou, Yuan Dongxing, et al. Study of municipal wastewater treatment with oyster shell as biological aerated filter medium. Desalination, **2010**, 254(1-3): 149-153
- [6] Yang Jinshui, Liu Weijie, Li Baozhen. Application of a novel backwashing process in upflow biological aerated filter. Journal of Environmental Sciences, **2010**, 22(3): 362-366
- [7] Shen Jinyou, He Rui, Wang Lianjun, et al. Kinetics of COD removal in a biological aerated filter in the presence of 2,4,6-trinitrophenol (picric acid). Chinese Journal of Chemical Engineering, **2009**, 17(6): 1021-1026
- [8] Fu Songzhe, Fan Hongxia, Liu Shuangjiang, et al. A bioaugmentation failure caused by phage infection and weak biofilm formation ability. Journal of Environmental Sciences, **2009**, 21(8): 1153-1161
- [9] 窦娜莎,王琳. 16S rDNA 克隆文库法分析 Biostyr 曝气生物滤池处理城市污水的细菌多样性研究. 环境科学学报, **2011**, 31(10): 2117-2124
Dou Nasha, Wang Lin. Bacteria diversity in a Biostyr biological aerated filter of municipal wastewater by 16S rDNA. Acta Scientiae Circumstantiae, **2011**, 31(10): 2117-2124 (in Chinese)
- [10] 操家顺,侯梁浩,方芳,等. 温度及外加碳源对生物脱氮除磷过程的影响. 环境工程学报, **2013**, 7(6): 2013-2018
Cao Jiashun, Hou Lianghao, Fang Fang, et al. Effect of temperature and external carbon source on simultaneous nitrogen and phosphorus removal. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2013**, 7(6): 2013-2018 (in Chinese)
- [11] Xiao Pengying, Lu Peili, Zhang Daijun, et al. Effect of trace hydrazine addition on the functional bacterial community of a sequencing batch reactor performing completely autotrophic nitrogen removal over nitrite. Biore-source Technology, **2015**, 175: 216-223
- [12] Bai Junyue, Xu Haolong, Zhang Yidan, et al. Combined industrial and domestic wastewater treatment by

- periodic allocating water hybrid hydrolysis acidification reactor followed by SBR. *Biochemical Engineering Journal*, **2013**, 70: 115-119
- [13] 黄绪达, 王琳, 王洪辉. 麦岛污水处理厂 BIOSTYR 高效生物滤池设计. *中国给水排水*, **2008**, 24(4): 51-54
- Huang Xuda, Wang Lin, Wang Honghui. Design of BIOSTYR BAF in Maidaow WWTP. *China Water & Wastewater*, **2008**, 24(4): 51-54 (in Chinese)
- [14] 王琳, 窦娜莎. Biostyr 曝气生物滤池处理城市污水的沿程生化特性. *环境工程学报*, **2013**, 7(8): 2942-2946
- Wang Lin, Dou Nasha. Biochemical characteristic along Biostyr biological aerated filter for municipal wastewater treatment. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2013**, 7(8): 2942-2946 (in Chinese)
- [15] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**: 210-284
- [16] Kaushik R., Balasubramanian R. Assessment of bacterial pathogens in fresh rainwater and airborne particulate matter using real-time PCR. *Atmospheric Environment*, **2012**, 46: 131-139
- [17] Kim J., Lim J., Lee C. Quantitative real-time PCR approaches for microbial community studies in wastewater treatment systems: Applications and considerations. *Bio-technology Advances*, **2013**, 31(8): 1358-1373
- [18] Liang Yuhai, Li Dong, Zhang Xiaojing, et al. Stability and nitrite-oxidizing bacteria community structure in different high-rate CANON reactors. *Bioresource Technology*, **2015**, 175: 189-194
- [19] 孟睿. 固定化菌-藻体系净化水产养殖废水的研究. 北京: 北京化工大学硕士学位论文, **2009**
- Meng Rui. Study on purifying the aquacultural wastewater with immobilized bacteria-alga system. Beijing: Master Dissertation of Beijing University of Chemical Technology, **2009** (in Chinese)
- [20] Gómez-Silvón C., Vélchez-Vargas R., Arévalo J., et al. Quantitative response of nitrifying and denitrifying communities to environmental variables in a full-scale membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, **2014**, 169: 126-133
- [21] Ye Lin, Zhang Tong. Bacterial communities in different sections of a municipal wastewater treatment plant revealed by 16S rDNA 454 pyrosequencing. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **2013**, 97(6): 2681-2690
- [22] Zhang Shuangfu, Wang Yayi, He Weitao, et al. Impacts of temperature and nitrifying community on nitrification kinetics in a moving-bed biofilm reactor treating polluted raw water. *Chemical Engineering Journal*, **2014**, 236: 242-250