

固定化曝气生物滤池处理采油废水

赵昕, 汪严明, 叶正芳, 倪晋仁*

(北京大学环境工程系水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 采用一种特殊载体固定复合微生物 B350M 在曝气生物滤池反应系统中处理采油废水. 废水中的盐度 $> 0.5\%$, N、P 营养缺乏, 有机物浓度较低. 在 HRT 为 4h, COD 容积负荷为 $1.07 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 的条件下, 小试反应装置稳定运行 142d, 处理效果好, 石油类、TOC、COD 和 H_2S 的平均降解效率分别达到 90.5%、74.4%、85.6% 和 100%. GC-MS 分析表明, 进水中含有机物 27 种, 其中烷烃类 23 种, 芳烃类 4 种. 此反应系统可以将大分子量烷烃类物质 ($\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ 至 $\text{C}_{28}\text{H}_{58}$), 尤其是其中的支链烷烃切碎形成小分子量物质, 并有效地处理菲等多环芳烃. 反应系统中, 生态多样性丰富, 载体为微生物提供了良好的水、气环境, 抵御盐度、有机污染物的毒害作用, 并可以固定丝状菌, 因而避免出现污泥膨胀, 出水 SS 过高等影响出水水质的情况.

关键词: 固定化; 曝气生物滤池; 采油废水

中图分类号: X741 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)06-1155-07

Biodegradation of Oil Field Wastewater in Biological Aerated Filter (BAF) by Immobilization

ZHAO Xin, WANG Yan-ming, YE Zheng-fang, NI Jin-ren

(The Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Department of Environmental Engineering, Peking University; Beijing 100871, China)

Abstract: A special kind of carrier was used to immobilize effective microorganisms B350M in a biological aerated filter (BAF) react system for treatment of oil field wastewater, which is of salinity $> 0.5\%$, lack of N and P, and contains low organic matter. Through the biodegradation system operated for 142d, the react system can achieve average degradation efficiency 90.5%, 74.4%, 85.6%, 100% for oil, TOC, COD and H_2S , when HRT was 4h and COD volumetric load was $1.07 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. GC-MS results show that the organic substance in wastewater contain 27 different kind substances, a majority (23) of alkane and a minority (4) of aromatic substances. $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ to $\text{C}_{28}\text{H}_{58}$ in influent could be decomposed into small molecular substance efficiently, especially the $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ to $\text{C}_{28}\text{H}_{58}$, and also polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) such as Phenanthrene. The react system had a good diversity, because the carriers provide agreeable air and water condition for microorganisms, to resist high salinity and toxic pollutant. Filamentous microorganisms were observed in a great deal and will not cause foaming and bulking in BAF reactor by immobilization.

Key words: immobilization; biological aerated filter; oil field wastewater

在石油开采过程中产生的废水称为采油废水, 一般是产油量的 10 倍. 其中不仅富含石油类和无机盐类, 还有重金属、放射性物质、多环芳烃、挥发酚类和苯类物质, 以及在油水分离过程中加入的许多化学处理药剂^[1,2]. 利用传统的活性污泥法对采油废水进行处理时, 影响反应装置中微生物作用的限制条件包括: 水质变动大, 含盐量高, N、P 营养物缺乏, 存在有毒有害物质抑制其新陈代谢等, 这些影响可能导致污泥膨胀, 出水 SS 较高, 降解效果不理想^[3~7].

近年来, 固定化微生物法处理废水已受到广泛重视, 尤其是在处理喹啉、苯酚、2,4-二氯苯酚、氰化物等难降解物质方面^[8~11]. 固定化微生物结合曝气生物滤池的方法具有水力负荷高、抗冲击能力强、污泥产量少、无污泥膨胀等优点, 同时也适应于处理低有机物负荷废水^[12]. Sekoulov 等的研究表明, 曝气

生物滤池处理含油炼化废水时, 对 COD 去除率可达 85% 以上, 对苯的去除率可以达 100%^[13].

本研究主要探讨一种上流式固定化曝气生物滤池在高盐度、低有机负荷的条件下处理采油废水的连续实验. 在考察降解效果的基础上, 利用 GC-MS 对进出水中有机污染物的成分进行分析, 并观察载体上的生物相, 以揭示固定化曝气生物滤池处理采油废水的优势所在.

1 材料与方法

1.1 材料

采油废水取自华北油田某外输原油联合站外排

收稿日期: 2005-04-26; 修订日期: 2005-08-03

基金项目: 北京大学大型仪器开放测试基金项目

作者简介: 赵昕(1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: zhaoxin@iee.pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: nijinren@iee.pku.edu.cn

口, 6h 运回实验室, 4℃下保存. 该站总输油量在 2001 年底已超过 1×10^9 t, 废水外排量可达 6 000 m³/d 以上. 经过油田配套的“隔油-浮选-过滤”工艺处理后的外排水的石油类、盐类和硫化物超出国家标准^[14].

上流式固定化曝气生物滤池如图 1 所示, 有效体积 1. 57L, 内径 100mm, 有效高度 200mm, 曝气头在进水处下端 70mm 处. 反应器内填充 FPUFS 载体^[15], 体积为 8mm × 8mm × 8mm, 内含羟基、环氧基、酰胺基等反应基团, 湿密度为 1. 0 g/cm³, 比表面为 80~ 120 m²/g, 孔径为 0. 3~ 0. 7mm^[16]. 干燥状态下, 载体内部空穴见图 2. 用于固定于载体上的复合微生物为 B350M (BIO-SYSTEMS Co., USA^[17]), 均匀地将 B350M 投放入填充好载体的反应器中, 使其在培养驯化阶段固定在载体上.

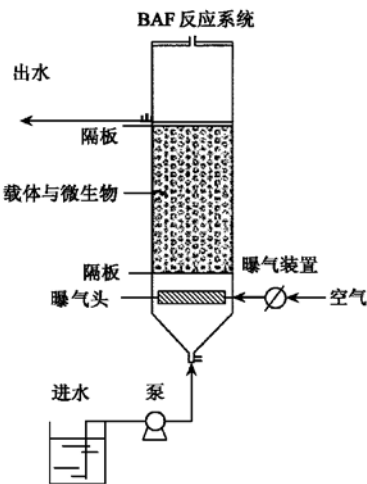


图 1 固定化曝气生物滤池反应系统
Fig. 1 BAF reactor system

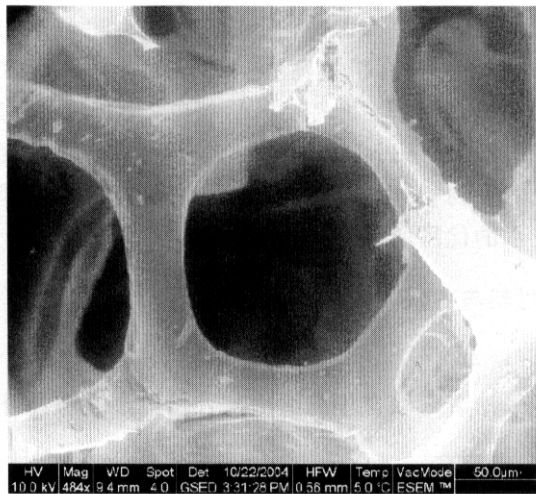


图 2 载体空穴 (× 500 倍)
Fig. 2 Carrier without microorganisms (× 500)

1. 2 实验方法

反应系统运行时间为 2004-07-22~ 2004-12-14, 首先将反应系统用采油废水浸没, 开始 5d 闷曝, 然后将 HRT 调整到 20h, 监测出水石油类, 当去除率达 80% 时, 继续调低 HRT 至 18、16、14、12、10、8、6、4、3、2h. 并在 HRT 为 4h 的条件下, 连续稳定运行 60d 以上.

1. 3 分析方法

按国家标准方法^[18]对废水外排监控的常规水质指标进行测定, 有机指标平行 6 次, 相对误差 < 5%; 无机指标平行 3 次, 相对误差 < 0. 5%, 结果取平均值.

浊度用 HANNA HI93703-11 浊度仪测定. 通过 0. 22μm 过滤去除微生物后, 用 Analytik Jena AG Multi N/C 3000 测定溶解性 TOC. F⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、CO₃²⁻ 用离子色谱 Dionex Ionpac AS11-HC 4 × 250mm 测定, 淋洗液为 NaOH 30 mmol/L, 流量为 1. 5 mL/min, 检测器为抑制电导器 ASRS-ULTRA, 温度为 30℃, 进样量 10μL. Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 用 Dionex Ionpac CS12A 4 × 250mm, 淋洗液为 20mmol/L 甲磺酸, 流速为 1. 0 mL/min, 检测器为抑制电导器 CSRS-ULTRA, 进样量 25μL.

石油类的测定采用紫外分光光度法, 用该采油联合站的原油脱水作为标准油, 溶于 60~ 90℃脱水石油醚中, 配置浓度 0、10、40、60、100 mg/L, Analytik jena AG Specord 200 测定在 225nm 下的吸光度.

将 50mL 废水分别用 5mL CH₂Cl₂ 在 pH 为 2、12. 7 的条件下萃取 3 次, 合并萃取物, N₂ 吹定容至 1mL. 用 GC-MS 分析样品, 具体操作条件如表 1 所示, 并用 NIST98 数据库分析其中的物质成分.

表 1 GC-MS 分析条件

Table 1 GC-MS analysis details	
项目	条件
仪器	Hewlett-Packard GC 6890-MSD 5973N
柱子	HP5 (60m × 0. 32m × 0. 17μm)
柱内径/ m	250 × 10 ⁻⁶
载气	氦气
柱头压/ kPa	37. 1
模式	1μL 进样量, 无分流
进样温度/℃	280
程序升温	初始 50℃ 保持 2min; 50℃ → 150℃, 15℃/min; 150℃ → 300℃, 5℃/min; 最后 300℃ 保持 15min
电子源	EI
电子倍增器电压(EMV)/V	1 400
全扫描方式	扫描范围 35~ 500u, 扫描速度 1. 63 次/s

用环境扫描电镜 ESEM (environmental scan electronic microscope, FEI QUANTA 200F) 对载体及载体上微生物群落进行观察.

2 结果与分析

2.1 采油废水水质指标监测结果

华北油田某采油联合站采油废水水质监测各项结果见表 2. 其中, BOD₁, BOD₂, BOD₃, BOD₄, BOD₅ 测量值分别为, 37.5 mg/L、40 mg/L、50 mg/L、57.5 mg/L、62.5 mg/L, 其中空白水样 BOD₅ 为 10 mg/L. BOD₅ 为 62.5 mg/L, 相对于 COD 值, B/C 为 0.5, 可生化性好.

2.2 曝气生物滤池系统运行结果

固定化曝气生物滤池运行时间为 2004-07-22~2004-12-14, 经历启动阶段 (2004-07-22~ 2004-09-14) 和稳定运行阶段 (2004-09-14~ 2004-12-14). 如

图 3、4 所示, 启动阶段, 出水石油类浓度为 0.17~7.59 mg/L, TOC 为 2.9~22.47 mg/L, 随着 HRT 的降低, 容积负荷的提高, 反应器受到冲击时, 出水的石油类、TOC 的浓度升高, 但稳定运行 1~2 d 后, 出水的石油类、TOC 的浓度分别降低到 3 mg/L

表 2 采油废水水质表征 / mg·L⁻¹

Table 2 Water quality analysis results of produced wastewater / mg·L⁻¹

项目	浓度	项目	浓度
pH	8.0	悬浮物 SS	130.0
温度 / ℃	60	氯化物	2 783.1
电导率 / μS·cm ⁻¹	8 692	硫化物	19.7
浊度 / NTU	269.7	NH ₄ ⁺	3.2
矿化度	5 240	总 P	0.055
F ⁻	18.9	SO ₄ ²⁻	25.9
BOD	62.5	K ⁺	109.3
COD	124.1	Na ⁺	1 905.2
石油类	19.7	CO ₃ ²⁻	1 032.7
TOC	37.7	Ca ²⁺	81.8

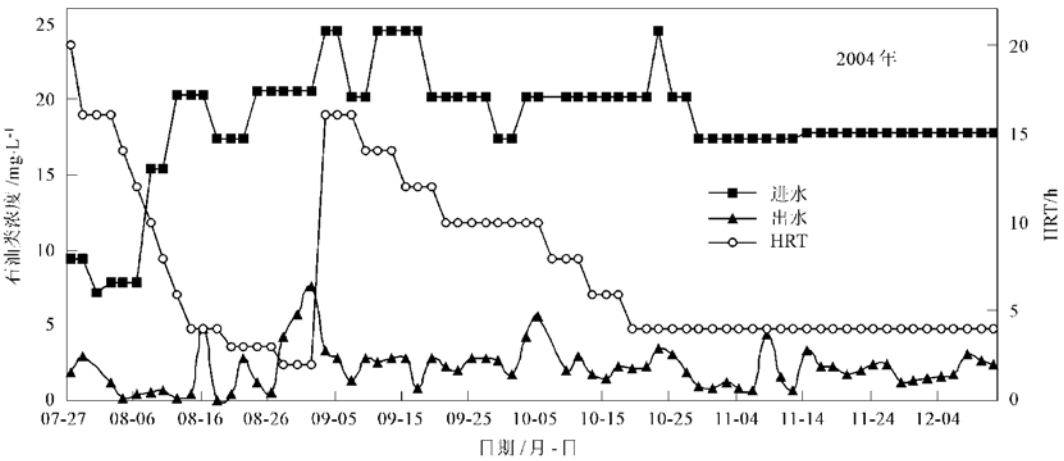


图 3 固定化曝气生物滤池对石油类的降解效果
Fig. 3 Oil degradation efficiency by BAF reactor

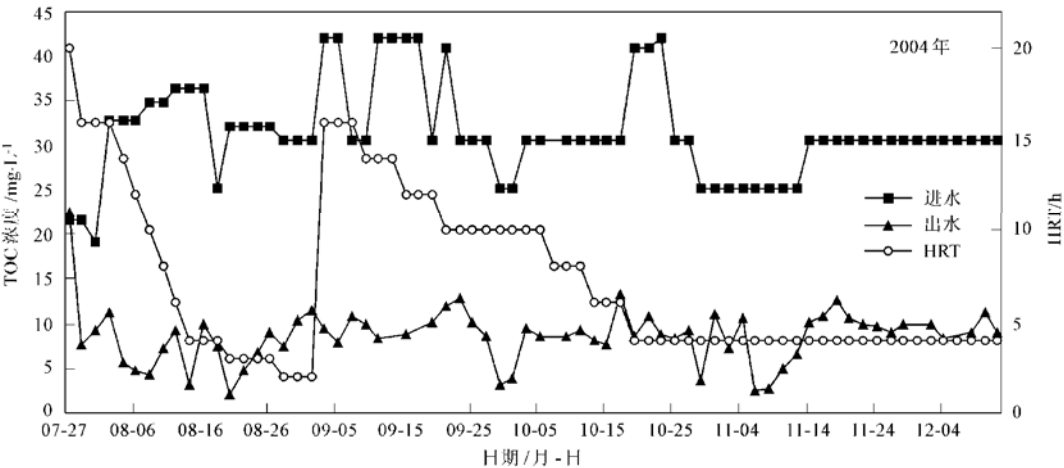


图 4 曝气生物滤池对 TOC 的降解效果
Fig. 4 TOC degradation efficiency by BAF reactor

和 5 mg/L 以下. 稳定运行阶段出水中石油类浓度为 0.82 ~ 3.00 mg/L, TOC 浓度为 5.00 ~ 13.21 mg/L, 石油类和 TOC 平均降解效率为 90.5% 和 74.4%.

2.3 废水中有机污染物种类及降解效果

进水中含有的有机物组分如图 5(a) 所示, 相对分子质量 500 以下的有机物有 27 种, 其中烷烃类 23 种, 芳烃类 4 种, 23 种烷烃类中包括 15 种直链烷烃和 8 种支链烷烃, 直链烷烃从正十四烷($C_{14}H_{30}$) 到正二十八烷($C_{28}H_{58}$). 响应值最高峰出现在 21.7min 时, 物质为 2, 6, 10, 14-四甲基十六烷. 出水中有机物的响应值如图 5(b) 所示, 仅为原进水的有机物响应值的 1/10, 说明出水的有机物浓度比进水降低. 出水共有 24 种物质, 20 种烷烃和 4 种芳香烃, 烷烃包括 13 种直链烷烃和 7 种支链烷烃, 直链烷烃从正十四烷($C_{14}H_{30}$) 到正二十六烷($C_{26}H_{54}$). 对于 PAHs, 如菲为图 5(a) 与(b) 中的 5 号物质, 出水中含量大幅度降低, 也可在反应系统中被有效降解.

2.4 微生物形态观察

2004-10-22 用 ESEM 拍摄干燥载体和运行 3 个月附着微生物的载体, 如图 2 与图 6 所示. 载体空穴约为 100 μ m, 为微生物的生长、繁殖提供了良好的气、液环境, 经过反应器运行 90d 后, 载体空穴的材料表面固定了大量的微生物, 并形成生物群带, 见图 6(a). 放大 3 000 倍后, 可见载体上附着的微生物可大致分为球形和支状 2 种形态, 见图 6(b). 在

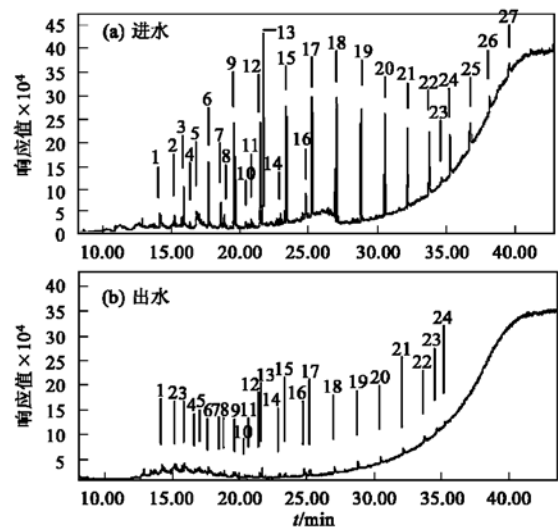
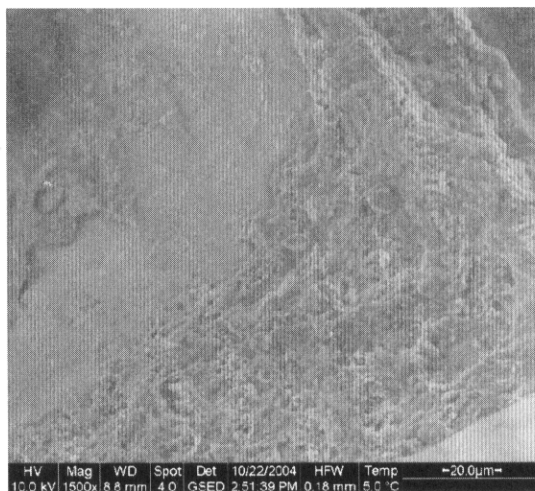


图 5 进、出水中的有机物 GC-MS 分析结果

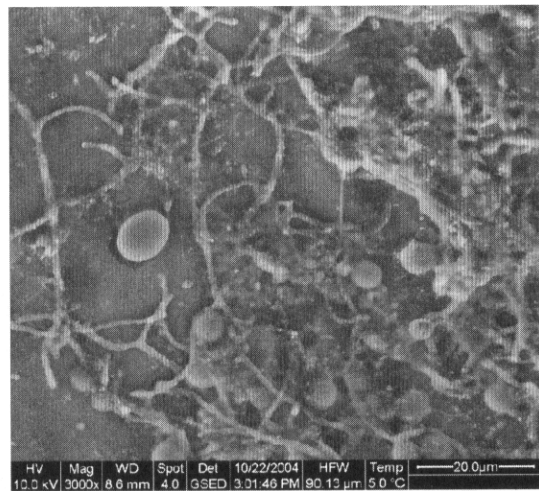
Fig. 5 Organic substances in influent and effluent by GC-MS

1. 正十四烷 2. 2-甲基十四烷 3. 十五烷 4. 丁基羟基甲苯
5. 菲 6. 正十六烷 7. 3-甲基十六烷 8. 正十七烷 9. 2, 6, 10, 14-四甲基十五烷 10. 2-甲基-8-丙基十二烷 11. 2-甲基十七烷 12. 十八烷 13. 2, 6, 10, 14-四甲基十六烷 14. 3-乙基-5-[2-乙基丁基]-十八烷 15. 正十九烷 16. 二丁基邻苯二甲酸 17. 正二十烷 18. 正二十一烷 19. 正廿二烷 20. 正二十三烷 21. 正二十四烷 22. 正二十五烷 23. 二[2-乙基己基]邻苯二甲酸酯 24. 正二十六烷 25. 正二十七烷 26. 正二十八烷 27. 9-辛基二十烷

反应器运行 26d 后, 出水堰出现了线虫类原生动物, 并在稳定运行阶段一直维持 2~3 只的数量.



(a) 反应器中的载体与微生物($\times 1500$ 倍)



(b) 反应器中的载体与微生物($\times 3000$ 倍)

图 6 ESEM 观察反应器中的载体与微生物

Fig. 6 Carrier and microorganisms in reactor observed by ESEM

3 讨论

3.1 废水水质特征

选择的采油废水含盐量高,矿化度高达 5 240 mg/L,氯离子含量为 2 783.1 mg/L.此外, CO_3^{2-} 为 1 032.7 mg/L,这对废水的酸、碱度变化有一定的缓冲作用.高含盐量与华北油田所处的地理位置有关,因为此产油带属雾迷山组,开采地层为碳酸盐层,采油废水经过该地区地层,在高温、高压的开采条件下,对岩石层中的无机盐类冲击、溶解带出,构成采油废水中无机盐类物质.

废水含有机物量较低,缺少 N、P 营养物质.此废水的 COD 仅为 124.1 mg/L,石油类为 19.7 mg/L,低于普通活性污泥法适合处理的生活污水的 COD 含量 300~400 mg/L 的范围.废水中 C:N:P=100:2.58:0.044,也不适合活性污泥中微生物一般的营养比例需要 C:N:P=100:5:1.

从 GC-MS 分析结果图 5(a) 可见,废水中含有 PAHs(如菲)等难降解物质,此类物质的存在将增加反应系统处理难度.大部分的有机物为烷烃类,这是由于采油废水在高温高压的条件下溶入了石油类,其中烷烃类以直链烷烃为主,这与华北油田产油品质有关.

高盐度、低有机物浓度、N、P 的缺乏使得此废水不适合用活性污泥法处理,需要一种新的反应系统,不仅可以抵抗高浓度的盐类对微生物的影响,而且可以使得微生物保持活性,维持对石油类的降解效率.

3.2 反应系统降解能力

本研究采用的固定化曝气生物滤池,通过特殊的 FPUFS 载体将复合微生物 B350M 固定在载体的空穴中,运行结果见图 3、图 4.在 HRT 由 20h 降低到 4h 的过程中,出水的石油类浓度在 HRT 降低的第 1d 较高,但稳定运行 2~3d 后,出水中石油类浓度恢复到 1 mg/L 以下,TOC 也恢复到 10 mg/L 以下.然而当 HRT 降低为 3h、2h 时,出水中石油类浓度、TOC 浓度在第 3d 升高到 7.59 mg/L 和 11.48 mg/L,无法恢复到稳定出水状态.因此,满足该系统出水水质良好的 HRT 的最低取值为 4h.不同 HRT 下去除效果见图 7,在 HRT 为 4~16h 时,石油类、TOC、COD 的去除率为 87.8%~91.1%,67.4%~74.4%,80.3%~88.2%,而当 HRT 降低为 2h 时,石油类、TOC、COD 的去除率分别下降为 71.4%,64.6%,73.0%,故选择 4h 为稳定运行的 HRT.

在 HRT 为 4h 下反应系统稳定运行 60d,进水、出水的石油类、TOC 见图 8,各污染物降解效率见图 9.在 HRT 为 4h 的条件下,COD 容积负荷为 $1.07 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,出水中的石油类、TOC 浓度稳定在 3 mg/L 和 10 mg/L 以下,平均去除率石油类为 90.5%,COD 为 85.6%,TOC 为 74.4%, H_2S 为 100.0%.可见固定化曝气生物滤池系统可以在盐度高于 0.5%、COD 容积负荷为 $1.07 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,缺乏 N、P 的条件下,有效地降解以石油类为主的有机污染物.

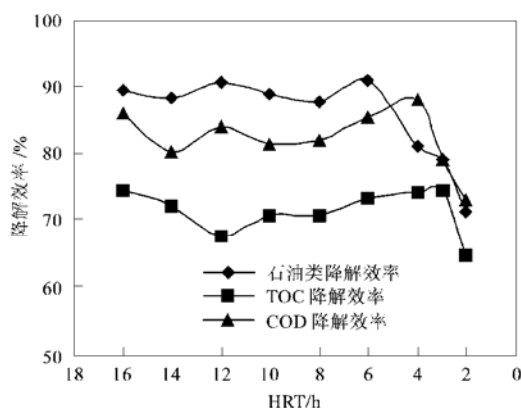


图 7 不同 HRT 下有机物去除效果

Fig. 7 Organic matter degradation efficiency with different HRT

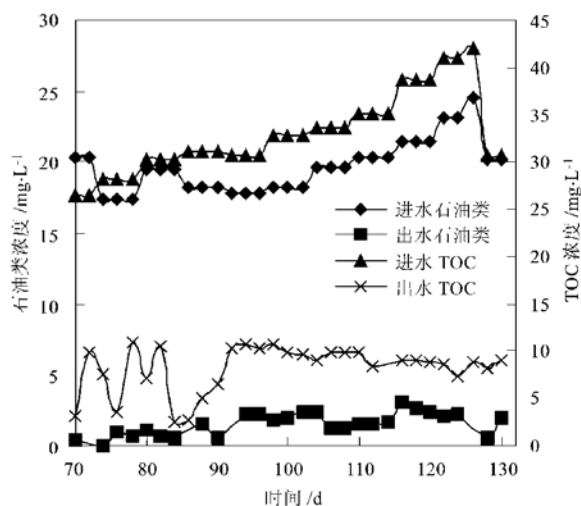


图 8 HRT=4h 下连续运行结果

Fig. 8 Degradation results with HRT=4h

3.3 废水中石油类的降解

对比 GC-MS 分析的进、出水有机物成分,出水在 13.0~18.0min 的总离子流的响应值不但没有降低还升高了,然而在 20.0~28.0min 的出水的总离子流的响应值大大降低,尤其是支链烷烃和芳香族

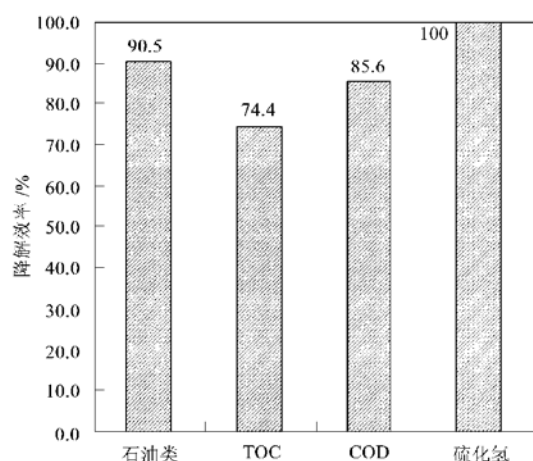


图9 HRT= 4h下各污染物降解效率

Fig. 9 Each pollutant degradation efficiency with HRT = 4h

物质,并且对于进水 35.0min 后的出峰物质(正二十六烷、正二十七烷、正二十八烷、9-辛基二十烷),在出水中检测不出。这可能是由于该生物反应系统可以有效地将相对分子质量 > 240 ,即 $C_{17}H_{36}$ 到 $C_{28}H_{58}$ 物质的长链打碎,成为一些短链物质如 $C_{14}H_{30}$, $C_{15}H_{32}$, $C_{16}H_{34}$ 等,对于支链烷烃由于反应活化能较低,这种分解反应更容易进行,而对于 $C_{14}H_{30}$, $C_{15}H_{32}$, $C_{16}H_{34}$ 等短链物质的反应活化能较高,不易被破碎,所以它们还有一部分残留在出水中。

3.4 微生物适应性分析

如图 6 所示,运行 90d 后反应器内部的载体上的微生物量丰富,除了球状菌外,还有大量的支状菌、丝状菌。说明微生物可以有效地固定在 FPUFS 载体上,并形成良好的生态群落。在缺少 N、P 的废水运行系统中,丝状菌比其他微生物更容易生长,成为优势菌^[5, 7],在活性污泥系统中会造成颗粒污泥解体,出水 SS 增加,污泥膨胀的现象^[6, 19, 20]。然而,固定化曝气生物滤池反应器中的载体提供了将丝状菌和其他微生物固定的基础,即使在反应器中出现大量丝状菌,也由于固定在载体上而不易流失,因而避免了污泥膨胀等使出水水质变差的情况。

结合反应器在高盐度的环境下去除有机物的效果分析,载体的空穴结构不但为微生物提供了水、气条件和固定化的基础,还形成一个保护层,抵抗高盐度条件对微生物生理机制的影响,抵御有机物浓度变化对微生物造成的冲击负荷。出水堰出现了线虫类原生动动物,并保持 2~3 只的数量,是出水水质良好的特征表现,这与反应器对石油类和 COD 分别为 90.5% 和 85.6% 的处理效果,稳定运行阶段 COD

容积负荷可以达到 $1.07 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 的良好运行结果相符。

4 结论

(1) 采用 FPUFS 载体固定 B350M 微生物的固定化曝气生物滤池反应系统可以在盐度大于 0.5%, C: N: P = 100: 2.58: 0.044, 有机物浓度较低条件下,有效地处理含石油类为主要有机污染物的采油废水。在 HRT 为 4h, COD 容积负荷为 $1.07 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 的稳定运行期,出水石油类的含量低于 3 mg/L , TOC 的含量低于 10 mg/L , 石油类、TOC、COD 和 H_2S 的平均降解效率为 90.5%、74.4%、85.6%、100%。

(2) 通过 GC-MS 分析,进水中含有机物 27 种,其中烷烃类 23 种,芳烃类有 4 种,23 种烷烃类中包括 15 种直链烷烃($C_{14}H_{30}$ 到 $C_{28}H_{58}$) 和 8 种支链烷烃。出水中各有机物的浓度大幅度降低,此反应系统可以将大分子量烷烃类物质($C_{18}H_{38}$ 至 $C_{28}H_{58}$) 的分子切碎形成小分子物质,尤其是其中的支链烷烃,并能够有效处理菲等 PAHs 物质。

(3) 反应系统中生态多样性丰富,可观察到球状菌、丝状菌和线虫类原生动动物。FPUFS 载体为微生物的生长和繁殖提供了良好的水、气条件,尤其是对于丝状菌的固定化作用,避免了污泥膨胀、解体等现象的发生,使出水水质保持良好的水平。

参考文献:

- [1] 朱艳虹,高迎新,杨敏,等. 混凝-Fenton 法处理采油污水的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(4): 18~21.
- [2] 国家环境保护局编. 石油石化工业废水治理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 24.
- [3] Tellez G T, Nirmalakhandan N, Garder-Torresdey J L. Performance evaluation of an activated sludge system for removing petroleum hydrocarbons from oilfield produced water [J]. Advances in Environmental Research, 2002, 6: 455~470.
- [4] Tellez G T, Nirmalakhandan N. Evaluation of biokinetic coefficients in degradation of oil field produced water under varying salt concentrations [J]. Water Research, 1995, 29(7): 1711~1718.
- [5] 丁峰,彭永臻,徐学清,等. 石油化工废水缺少氮、磷营养物质对污泥膨胀的影响[J]. 工业水处理, 2000, 20(12): 11~14.
- [6] Fikret K, Ali R D. Effect of salt concentration on biological treatment of saline wastewater by fed-batch operation [J]. Enzyme and Microbial Technology, 1996, 19: 529~537.
- [7] Stringfellow W T, Alvarez-Cohen L. Evaluating the relationship between the sorption of PAHs to bacterial biomass and biodegradation [J]. Water Research, 2002, 33(11): 2535~2544.

- [8] Wang J L, Quan X C, Han L P, *et al.* Microbial degradation of quinoline by immobilized cells of *Burkholderia pickettii* [J]. Water Research, 2002, **36**: 2288~ 2296.
- [9] Quan X C, Shi H C, Zhang Y M, *et al.* Biodegradation of in an air-lift honeycombrlike ceramic reactor [J]. Process Biochemistry, 2003, **38**: 1545~ 1551.
- [10] Erhan E, Yer E, Akay G, *et al.* Phenol degradation in a fixed-bed bioreactor using micro-cellular polymer-immobilized *Pseudomonas syringae* [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2004, **79**(2): 195~ 206.
- [11] Kowalska M, Bodzek M, Bohdziewicz J. Biodegradation of phenols and cyanides using membranes with immobilized microorganisms [J]. Process Biochemistry, 1998, **33**(2): 189 ~ 197.
- [12] Jou C G, Huang G C. A pilot study for oil refinery wastewater treatment using a fixed-film bioreactor [J]. Advances in Environmental Research, 2003, **7**: 463~ 469.
- [13] Sekoulov I, Brinke S S. Application of biofiltration in the crude oil processing industry [J]. Water Science Technology, 1999, **39**(80): 71~ 76.
- [14] GB8978-1996, 污水综合排放标准[S].
- [15] 叶正芳, 倪晋仁. 一种制备聚氨基脂基生物固定化载体的工艺 [P]. 中国专利: CN 004100625771, 2004-06.
- [16] 叶正芳, 倪晋仁. 污水处理的固定化微生物与游离微生物性能的比较[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, **10**(4): 325 ~ 331.
- [17] <http://www.biobugs.com/05/products/display.php?pid=49>
- [18] 国家环境保护总局编. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 88~ 114.
- [19] Oren A, Gurevich P, Malkit A, *et al.* Microbial degradation of pollutants at high salt concentrations [J]. Biodegradation, 1992, **3**: 387~ 398.
- [20] Thong C P, Chadarut A. Impact of high chloride wastewater on an anaerobic/anoxic/aerobic process with and without inoculation of chloride acclimated seeds [J]. Water Research, 1999, **33**(5): 1165~ 1172.