

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝瑞霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

AnMBR-A-MBR 和 A²-MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比

朱佳迪¹, 李菲菲¹, 陈吕军^{1,2*}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 浙江清华长三角研究院, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006)

摘要: 焦化废水含高浓度难降解有机物, 生物处理是应用最为广泛的方法. 为探索并提高焦化废水生物处理的去除效果, 采用实验室构建的厌氧膜生物反应器/缺氧/好氧膜生物反应器 (AnMBR-A-MBR) 与厌氧/缺氧/好氧膜生物反应器 (A²-MBR) 工艺处理实际焦化废水, 对比了两套处理工艺在最佳工况下稳定运行对主要污染物的去除效果和对不同污染负荷的稳定性. 采用固相萃取和组分分离、发光细菌 Q67 测试和三维荧光扫描等手段, 对二者各级出水的急性毒性分布和变化以及毒性物质特征进行了研究. 结果表明, AnMBR 的有机污染物去除率为 15.3%, 显著高于 A²-MBR 系统的厌氧段 (3.4%), AnMBR-A-MBR 系统能够抵抗更高的污染负荷. AnMBR-A-MBR 系统各级出水的急性毒性均明显低于 A²-MBR 系统, 二者毒性当量总去除率分别为 85.2% 和 79.2%. 各级出水中极性组分的急性毒性最强, 极性和弱极性组分贡献了绝大部分毒性当量. 各级出水的急性毒性主要来自 II 区芳香族蛋白类似物, 且 II 区芳香族蛋白类似物可能是极性组分中主要的急性毒性物质.

关键词: 焦化废水; 厌氧膜生物反应器; MBR 工艺; 对比分析; 急性毒性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4293-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703186

Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A²-MBR Processes

ZHU Jia-di¹, LI Fei-fei¹, CHEN Lü-jun^{1,2*}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China)

Abstract: Coking wastewater contains high-strength refractory organic pollutants and is commonly treated by biological treatment processes. To improve the efficiency of biological treatment, two laboratory scale processes, anaerobic membrane bioreactor/anoxic/aerobic membrane bioreactor (AnMBR-A-MBR) and anaerobic/anoxic/aerobic membrane bioreactor (A²-MBR), were developed for coking wastewater treatment. The removal of main pollutants and the stability of different pollutant loadings were compared under the optimum operating conditions. Acute toxicity distribution, variations, and toxic matter characteristics of the two processes were investigated by solid-phase extraction, components separation, the luminous bacteria Q67 test, and three-dimensional fluorescence spectrometry. The results showed that the organic pollutant removal rate of AnMBR was 15.3%, which was significantly higher than the anaerobic stage of the A²-MBR system (3.4%), and the AnMBR-A-MBR system had greater resistance to pollutant loading. Acute toxicity of AnMBR-A-MBR system in each stage effluent was lower than the A²-MBR system and the total toxic unit removal rate of both were 85.2% and 79.2%, respectively. The acute toxicity of the polar component in each stage effluent was the highest, and the polar and mid-polar components contributed to the majority of the toxicity. The toxicity of each stage effluent mainly originated from Region II aromatic protein analogues, which could be the main acute toxicity substances of the polar component.

Key words: coking wastewater; anaerobic membrane bioreactor; MBR process; comparative analysis; acute toxicity

焦化废水中含有大量污染物, 水质成分复杂, 属难降解的高浓度有机废水, 其处理一直是工业废水治理领域的研究热点. 国内焦化废水的处理大多采用生物处理方法, 该方法处理量大、投资费用少且易于管理^[1], 其中 A²/O 工艺应用较为广泛^[2]. 但存在污染物处理效果不佳、出水水质不稳定等问题.

随着膜技术的发展, 膜生物反应器 (MBR) 逐渐被应用到焦化废水好氧处理^[3,4]的研究中, 但出水中有机污染物的去除效果仍不理想. 近年来厌氧膜生物反应器 (anaerobic membrane bioreactor,

AnMBR) 在国内外高浓度有机废水处理的研究^[5~7]和实际规模中的应用^[8~10]越来越广泛. 该技术能够结合膜技术和厌氧生物处理技术的优势, 提高有机负荷^[11,12]、减少产泥、耐冲击负荷的同时, 保持较高的污泥浓度、较短的水力停留时间和较长的污泥龄^[13,14], 从而有效地提高有机污染物的去除效果.

目前, 国内焦化废水的排放标准以控制常规污

收稿日期: 2017-03-21; 修订日期: 2017-04-26

作者简介: 朱佳迪 (1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为工业废水处理, E-mail: a5130751@126.com

* 通信作者, E-mail: chenlj@tsinghua.edu.cn

染指标为主,但不足以反映废水及污染物对生态环境安全造成的影响.近年来,随着发光细菌急性毒性评价技术和方法的成熟,发光细菌急性毒性已被广泛地用于工业废水、生活污水以及环境污染物的急性毒性效应的评价^[15~18].

本文采用实验室构建的两套焦化废水处理工艺,通过对比厌氧膜生物反应器/缺氧/好氧膜生物反应器(AnMBR-A-MBR)工艺与厌氧/缺氧/好氧膜生物反应器(A²-MBR)工艺,对比了两套处理工艺在稳定运行条件下对主要污染物的去除效果和对不同污染负荷的稳定性,并分析比较了二者在不同处理效果下的各级出水急性毒性分布和变化以及毒性物质特征.

1 材料与方法

1.1 试验装置与试验条件

实验室构建的 AnMBR-A-MBR 焦化废水处理系统由厌氧膜生物反应器 AnMBR(4.9 L)、缺氧反应

器 A(4.5 L)和好氧膜生物反应器 MBR(9 L)串联组成,处理系统的试验装置如图 1(a)所示. AnMBR 由厌氧反应器、外置错流式膜池组成,二者通过外置循环泵连接,厌氧反应器外设水浴保温层;A 反应器为亲水软性填料为载体的上流式缺氧反应器;MBR 为内置膜组件的好氧反应器.该系统中的膜组件为带内衬的聚偏氟乙烯(PVDF)复合中空纤维膜,膜过滤孔径 0.02 μm,试验过程中最大膜通量为厌氧 3.24 L·(m²·h)⁻¹[好氧 9.29 L·(m²·h)⁻¹],MBR 底部曝气.

实验室已有的 A²-MBR 焦化废水处理系统由厌氧反应器 A₁(4.9 L)、缺氧反应器 A₂(4.5 L)和好氧膜生物反应器 MBR(9 L)串联组成,处理系统的试验装置如图 1(b)所示. A₁ 反应器为上流式厌氧反应器, A₂、MBR 反应器的构造与 AnMBR-A-MBR 系统的 A、MBR 反应器构造相同.该系统中的好氧膜组件参数与 AnMBR-A-MBR 系统的好氧膜组件相同.

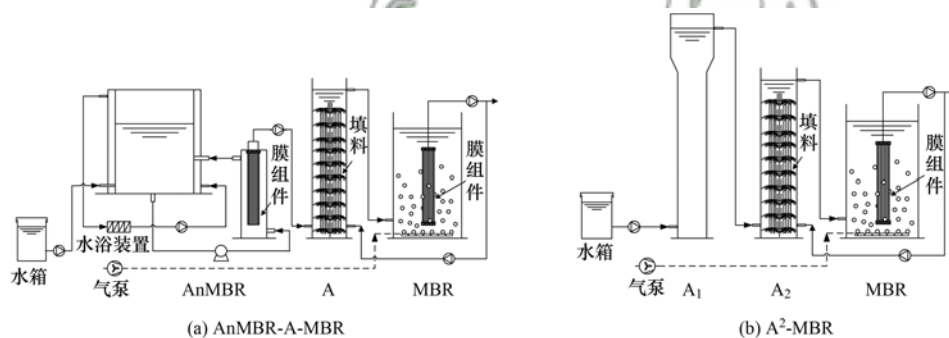


图 1 两套处理系统的试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagrams of two processing systems

根据已有的研究,通过比较不同运行参数下的污染物去除效果和运行经济性,两套系统分别在其最优工况下连续运行. AnMBR-A-MBR 系统的总 HRT 为 61.3 h,进水总磷(TP)质量浓度为(2.3 ± 0.3) mg·L⁻¹,控制 MBR 的 pH 为 7.5 ± 0.2,回流比为 2:1. A²-MBR 系统的总 HRT 为 73.6 h,进水 TP 质量浓度、控制 MBR 的 pH 和回流比与前者相同.除 AnMBR(温度恒定 37℃ 左右)外两套处理系统的其余反应器均在室温(25~33℃)下运行.两套处理系统厌氧、缺氧和好氧段中的溶解氧(DO)质量浓度均分别控制在 0.01~0.2、0.1~0.5 和 4.0~6.0 mg·L⁻¹.二者 MBR 的 pH 由 Na₂CO₃ 溶液调节控制.

1.2 水质分析

稳定运行期间,取两套处理系统的进水和各级

出水进行常规水质指标的测定:COD 采用微回流比色法测定^[19](Hach DR890, USA);氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂光度法测定^[20];总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[20];总有机碳(TOC)采用岛津 TOC 分析仪(Shimadzu TOC-VCPH, Japan)测定.另外,对水样的各极性组分进行三维荧光光谱扫描,采用 Hitachi F-7000 型荧光光谱分析仪.

1.3 固相萃取与组分分离

取进水和两套处理系统各级出水各 200 mL,共 7 个样品.样品固相萃取和组分分离的方法参考以前的研究^[21],根据实际试验做一定的修改.取样后,立即用 0.45 μm 微孔滤膜过滤水样,处理前贮存在 4℃ 冰箱中并尽快进行固相萃取和组分分离,其步骤如图 2 所示.

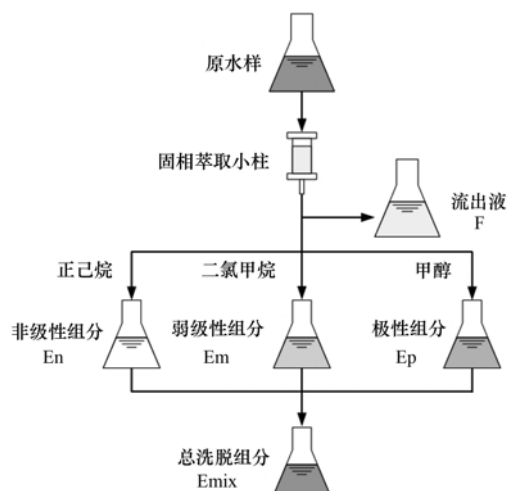


图2 固相萃取和组分分离步骤

Fig. 2 Steps of solid-phase extraction and component separation

固相萃取采用 HLB 固相萃取柱 (Water Oasis, USA), 依次用二氯甲烷、甲醇、超纯水活化固相萃取柱. 将 7 个样品分别过柱, 收集流出液 (Filtrate) 为组分 F. 萃取结束后, 如不能立即分析, 放于 -20°C 冰箱保存. 依次用色谱纯正己烷、二氯甲烷、甲醇洗脱固相萃取柱, 分别收集洗脱液 (Eluate) 为非极性组分 (En)、弱极性组分 (Em) 和强极性组分 (Ep). 取等量的 3 种不同极性组分混合得到总洗脱组分 (Emix).

1.4 发光细菌急性毒性测试

对各极性组分样品进行急性毒性测试^[22], 测

试菌种采用青海弧菌 Q67. 试验前用模拟湖水二倍稀释样品为 10 个浓度梯度, 将调整好的菌悬液与样品混合, 振荡 15 min 后用酶标仪 (Tecan infinite M200 PRO, Switzerland) 测定各样品和空白对照的发光强度 (RLU). 根据试验结果计算样品对发光菌发光的相对抑制率:

$$\text{相对抑制率} = \left[1 - \frac{\text{样品的 RLU}}{\text{空白对照的 RLU}} \right] \times 100\%$$

用各样品的相对抑制率和相应的稀释倍数作图, 利用 Logistic 模型进行拟合得到 EC_{50} 值, 样品的急性毒性大小用毒性单元 (toxic unit, TU)^[23] 表示, $\text{TU} = 1/\text{EC}_{50}$, 无量纲.

2 结果与讨论

2.1 稳定运行期效果对比分析

本试验通过研究 COD、TOC、 NH_4^+-N 、TN 的去除效率, 综合评价稳定运行过程中两套处理系统对主要污染物的去除效果, 以及在不同污染负荷下二者的运行稳定性.

2.1.1 主要污染物去除效果

两套处理系统在上述试验条件下保持长期稳定运行各 90 d 和 145 d, 期间各级反应器出水 COD、TOC、 NH_4^+-N 、TN 的去除效果如图 3 所示, 平均水质情况如表 1 所示. 从图 3 中可以看出, 二者的进水水质均有一定程度的波动, 但通过各级反应器

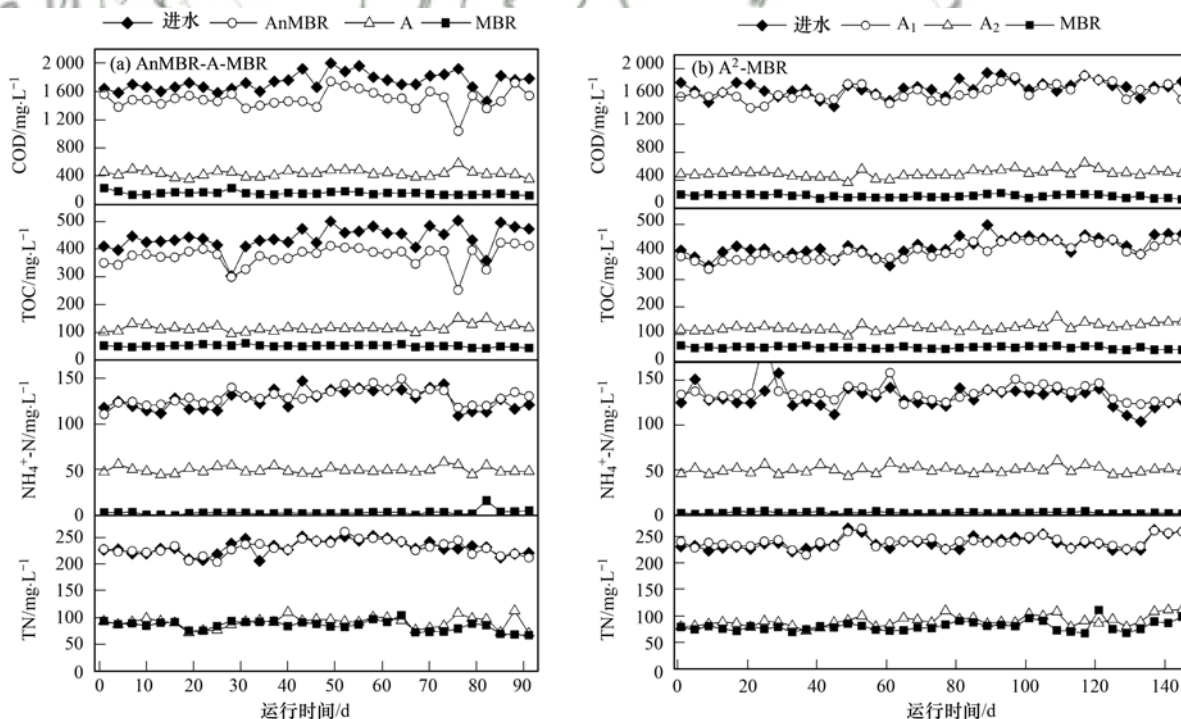


图3 两套处理系统稳定运行期间主要污染物的去除效果

Fig. 3 Main pollutants removal during stable operating period

的处理,系统出水中各污染物质量浓度均较为稳定.从表1中可以看出,AnMBR-A-MBR系统出水的COD和TOC略低于A²-MBR系统,NH₄⁺-N基本相等,但前者的TN略高于后者.同时,比较各级反应器出水的COD和TOC质量浓度,AnMBR出

水明显低于A²-MBR系统的厌氧段出水,但随着处理过程的进行,缺氧段和好氧段出水的浓度差异逐渐缩小.各级反应器出水的NH₄⁺-N和TN质量浓度基本相等,这与两套处理系统的回流比相同有关.

表1 稳定运行过程中各级反应器出水的平均水质/mg·L⁻¹

Table 1 Influent and effluent quality of each reactor during stable operating period/mg·L⁻¹

项目	AnMBR-A-MBR				A ² -MBR			
	COD	TOC	NH ₄ ⁺ -N	TN	COD	TOC	NH ₄ ⁺ -N	TN
进水	1 768 ± 127	445 ± 47	130 ± 11	234 ± 13	1 755 ± 105	437 ± 33	129 ± 10	240 ± 12
厌氧段	1 493 ± 152	375 ± 42	133 ± 8	234 ± 12	1 694 ± 118	420 ± 25	135 ± 10	242 ± 10
缺氧段	441 ± 47	116 ± 14	50 ± 4	93 ± 11	516 ± 51	131 ± 13	51 ± 4	95 ± 10
好氧段	157 ± 23	50 ± 4	3 ± 1	84 ± 10	173 ± 23	52 ± 5	3 ± 1	82 ± 11

两套处理系统稳定运行过程中各污染物的去除率如图4所示.对比COD和TOC的去除率可以看出,AnMBR的有机污染物去除率显著高于A²-MBR系统的厌氧段,前者为15.3%左右,而后者仅为3.4%.与传统的厌氧处理相比,AnMBR对焦化废水中有机物的去除率有较为显著的提高.随着处理的进行,由于AnMBR-A-MBR系统缺氧段的单级去除率低于A²-MBR系统(二者缺氧段的单级去除率分别为59.7%和67.0%),使得缺氧段的累积去除率差异减小,分别为75.0%和70.6%.在随后的好氧段中,前者的单级去除率依然低于后者,分别为16.1%和19.6%.当处理结束时,两套处理系统的总去除率差距已很小,分别为91.1%和90.2%.

等.由此推测,在本试验条件下焦化废水中能够被生物处理方式去除的有机污染物,即使在厌氧段或者缺氧段中不能被去除,也能在后续的缺氧段以及好氧段中被去除,但是总有一部分有机污染物不能被生物处理方式去除.

比较NH₄⁺-N和TN的去除效率,AnMBR-A-MBR系统厌氧段产生的NH₄⁺-N比A²-MBR系统少,但A²-MBR系统缺氧段的硝化效率比前者高,使得两套处理系统的NH₄⁺-N总去除效率基本相等,均可达97%以上.类似地,AnMBR-A-MBR系统厌氧段产生的TN比A²-MBR系统少,而后者缺氧段和好氧段的反硝化效率也相对较高,使得二者的TN总去除效率基本相等,均在64%以上.综合对比两套处理系统的脱氮效率,可认为基本相等.

2.1.2 不同污染负荷稳定性

在稳定运行过程中,两次分别提高AnMBR-A-MBR和A²-MBR系统的进水污染负荷,并在每一进水负荷下保持稳定运行20 d,期间各级反应器出水COD、TOC、NH₄⁺-N、TN的质量浓度变化如图5所示.

随着进水污染负荷的升高,除系统出水NH₄⁺-N质量浓度保持小于5 mg·L⁻¹外,COD和TOC平均质量浓度均小幅升高,TN平均质量浓度有明显的升高.同时,在每个污染负荷提升期间,两套处理系统各级出水的污染物质量浓度均较为稳定,没有出现某一指标的大幅升高,说明在本试验条件下二者对污染负荷都具有较好的抗冲击稳定性.

AnMBR-A-MBR和A²-MBR系统在不同污染负荷下各污染物的平均进水负荷如表2所示.前者COD、TOC、NH₄⁺-N、TN平均进水负荷的升高幅度分别为12.1%和26.4%、23.1%和34.5%、19.2%和30.6%、17.5%和36.7%,后者的升高幅度分别

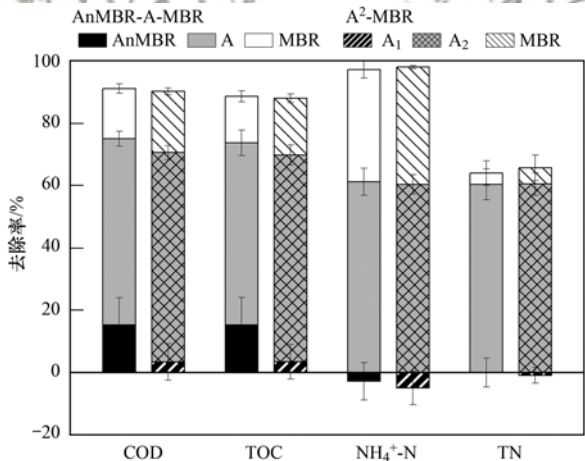


图4 稳定运行过程中两套处理系统的去除效率对比

Fig. 4 Removal rate comparison of two processing systems during stable operating period

通过上述分析发现,虽然AnMBR比A²-MBR系统厌氧段去除了更多的有机污染物,但是后者的缺氧段和好氧段去除了较前者更多的有机污染物,使得两套处理系统有机污染物的总去除率基本相

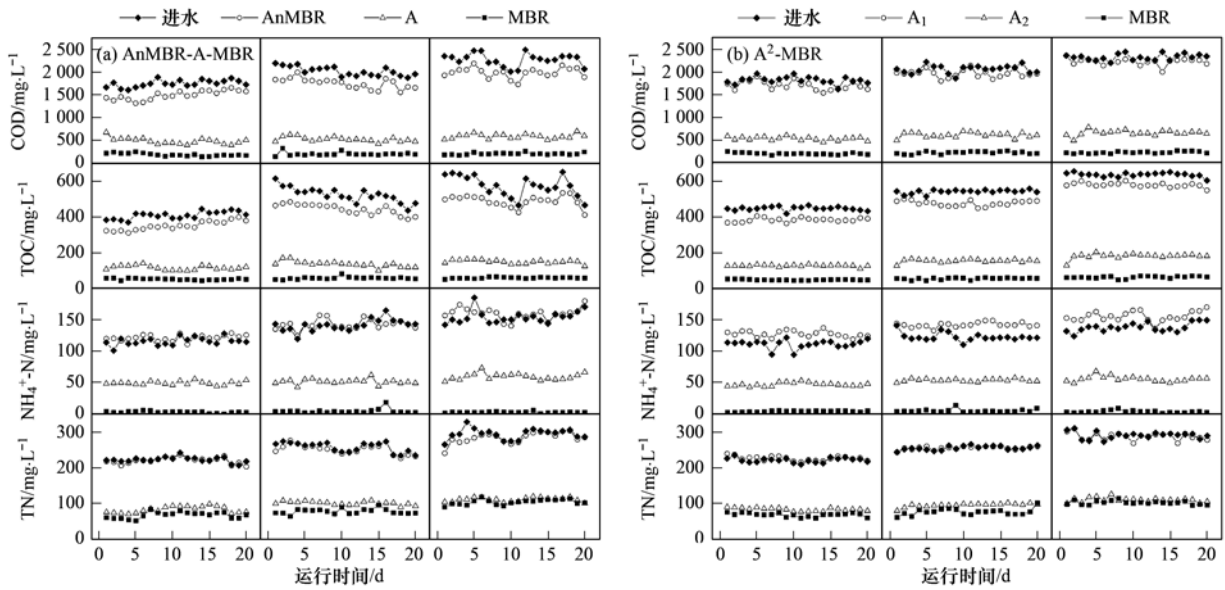


图5 污染负荷对两套处理系统主要污染物去除效果的影响
Fig. 5 Effect of pollutant loading on main pollutants removal

为 13.2% 和 27.7%、21.0% 和 42.3%、10.5% 和 24.5%、15.9% 和 31.9%。本试验以 COD 为基准

提高进水负荷,在此基准下除 A²-MBR 系统的 NH₄⁺-N 外,各污染物负荷的升高幅度均大于 COD。

表2 不同污染负荷下各污染物的平均进水负荷/(g·(L·d)⁻¹)

项目	AnMBR-A-MBR				A ² -MBR			
	COD	TOC	NH ₄ ⁺ -N	TN	COD	TOC	NH ₄ ⁺ -N	TN
负荷1	2.66	0.63	0.17	0.32	2.68	0.66	0.16	0.32
负荷2	2.98	0.77	0.21	0.38	3.03	0.79	0.18	0.38
负荷3	3.36	0.84	0.23	0.44	3.42	0.93	0.20	0.43

根据试验结果,两套处理系统在不同污染负荷下各污染物的去除率如图6所示。随着污染负荷的提高,厌氧段的有机污染物去除率均有所下降,COD去除率分别从14.2%下降至12.5%以及从6.2%下降至4.3%,说明AnMBR比A²-MBR系统的厌氧段有更强的抵抗污染负荷的能力。同时,随着污染负荷的提高,缺氧段和好氧段的有机污染物去除率逐渐提高,最终二者在各污染负荷下的COD和TOC总去除率基本相等,保持在88%~90%之间。随着污染负荷的提高,两套处理系统的NH₄⁺-N总去除率始终保持大于95%。二者的TN总去除率逐渐降低,分别从68.8%下降至64.6%以及从69.1%下降至64.8%。

根据结果和分析发现,AnMBR-A-MBR系统在进水负荷提升幅度相对较高的条件下,能够达到和A²-MBR系统基本相等的去除率。同时,由于AnMBR的有机污染物去除率相对较高,随着进水负荷的提升,AnMBR-A-MBR系统的厌氧段能够抵抗相对更高的污染负荷,从而使得整个处理系统能

够抵抗更高的污染负荷冲击。因此,综合比较两套处理系统的进水负荷提升幅度和出水中各污染物的去除率,可认为在本试验条件下AnMBR-A-MBR系统抗冲击负荷的稳定性更好。

综上所述,AnMBR-A-MBR系统厌氧段对焦化废水的有机污染物有较高的去除率,相比A²-MBR系统具有更好的处理效果和抗冲击负荷稳定性。因此,AnMBR-A-MBR系统更适合作为提高焦化废水生物处理效果的工艺。

2.2 急性毒性分布与毒性物质特征对比分析

本试验在最佳工况和最初进水负荷条件下稳定运行的过程中,通过对进水和两套处理系统各级出水中的有机污染物按不同极性进行分离,分析并比较进水和各级出水各组分中急性毒性的分布和变化以及毒性物质的特征。

2.2.1 急性毒性分布与变化特征对比分析

进水、各级出水的原水样以及总洗脱组分(Emix)、极性组分(Ep)、弱极性组分(Em)、非极性组分(En)和流出液(F)共42个样品的急性毒性

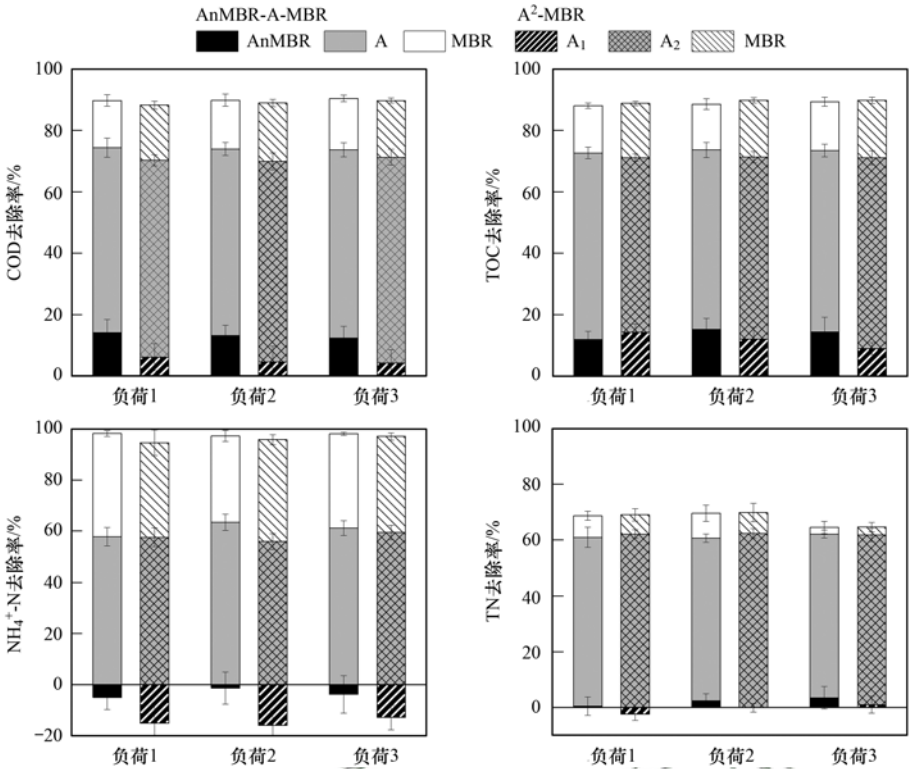


图 6 不同污染负荷下两套处理系统对主要污染物的去除率对比

Fig. 6 Removal rate comparison of two processing systems under different pollutant loadings

以及各极性组分急性毒性的线性加和结果如图 7 所示. 其中, E_{mix} 和原水样的急性毒性较为吻合, 说明各极性物质分离前后的急性毒性变化不大, 且固相萃取对各极性物质的富集程度满足试验要求, 可认为分离后各极性组分的急性毒性能较为全面地反映原水样中各极性物质的急性毒性. 同时, 各极性组分急性毒性的线性加和与原水样的急性毒性较为吻合, 说明各极性组分和原水样的急性毒性结果具有可比性.

图 7 结果可以看出, 除进水 F 外, 各水样的 E_{n} 和 F 均没有检测到急性毒性. 各原水样中进水的急性毒性最强, 不同极性组分中 E_{p} 的急性毒性最强, 且极性和弱极性组分贡献了绝大部分的毒性当量. 经过两套处理系统的处理, 各级出水原水样的急性毒性逐渐减小, 系统出水原水样的急性毒性总去除率分别为 85.2% 和 79.2%. AnMBR-A-MBR 系统各级出水的急性毒性均明显低于 A²-MBR 系统, 前者对于急性毒性的去除效果更好.

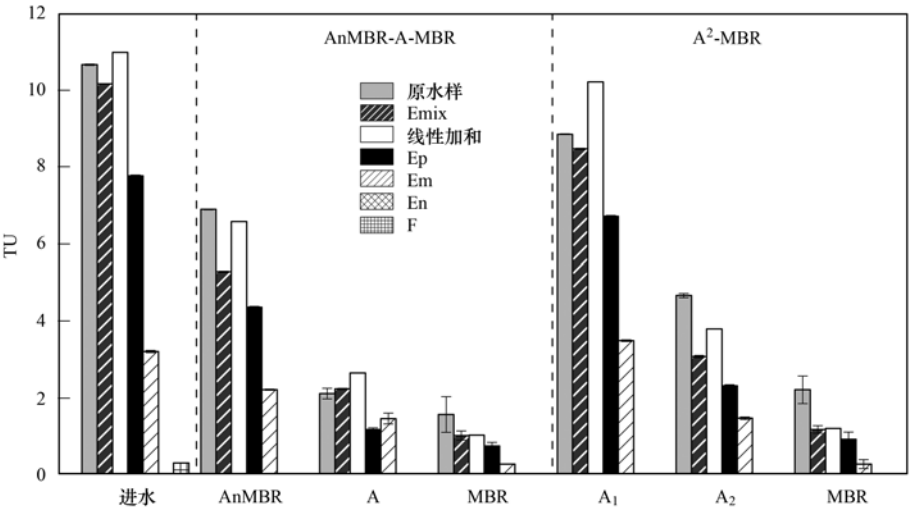


图 7 进水和两套处理系统各级出水不同组分的急性毒性

Fig. 7 Acute toxicity of the influent and different components

比较各原水样的急性毒性去除率, AnMBR-A-MBR 系统的急性毒性主要在厌氧段和缺氧段中被去除, AnMBR、A 和 MBR 的单级去除率分别为 35.3%、44.8% 和 5.1%。而 A²-MBR 系统的急性毒性在各级反应器中均有一定比例被去除, A₁、A₂ 和 MBR 单级去除率分别为 17.0%、39.2% 和 23.0%, 其中缺氧段去除比例相对较大。

对比各水样不同极性组分的急性毒性去除率, 两套处理系统 Ep 的总去除率分别为 90.3% 和 88.1%, Em 的总去除率分别为 91.1% 和 91.2%。对于 AnMBR-A-MBR 系统, Ep 的急性毒性主要在厌氧段和缺氧段被去除, AnMBR、A 和 MBR 的 Ep 单级去除率分别为 43.8%、40.9% 和 5.5%。该系统 Em 的急性毒性在各级反应器中的去除比例较均匀, 各级反应器的单级去除率分别为 30.9%、23.4% 和 36.8%。而对于 A²-MBR 系统, Ep 的急性毒性主要在缺氧段被去除(56.6%), 厌氧段和好氧段有一定比例的去(分别为 13.5% 和 17.9%)。该系统 Em 的急性毒性主要在缺氧段中被去除

(62.7%), 好氧段中有一定比例的去(37.2%), 但在厌氧段有 8.7% 的毒性增加。

2.2.2 溶解性有机污染物对比分析

Chen 等^[24]依据已有报道将三维荧光光谱图划分为 5 个区: I ~ V 区分别代表第一类芳香族蛋白类似物、第二类芳香族蛋白类似物、类腐殖酸、溶解性微生物副产物类似物和类富里酸。通过积分各区的荧光强度, 计算得到各样品 5 个区有机物的相对含量, 乘以各样品 TOC 质量浓度得到其“绝对含量”即各区有机物的质量浓度, 如图 8 所示。两套处理系统各级出水的两类芳香族蛋白质类似物相对总含量基本不变, 保持 73% 左右。缺氧段和好氧段的 I 区芳香族蛋白质类似物相对含量均下降, 但 AnMBR-A-MBR 系统较 A²-MBR 系统低。而 II 区芳香族蛋白质类似物相对含量均升高, 但 AnMBR-A-MBR 系统较 A²-MBR 系统高。对于“绝对含量”, 两套处理系统的厌氧段有明显的差异, AnMBR 出水的总质量浓度和 I 区芳香族蛋白质类似物的质量浓度均低于 A²-MBR 系统。

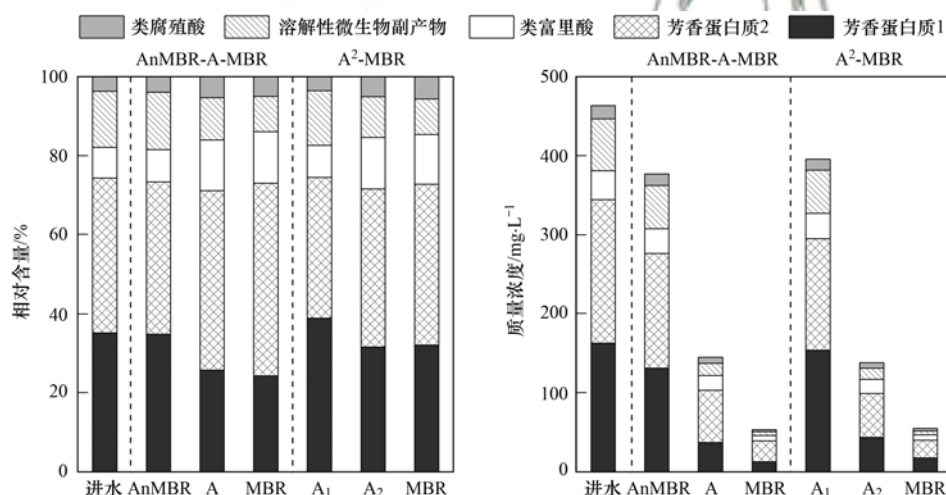


图 8 进水和两套处理系统各级出水中五区有机物的相对含量和质量浓度

Fig. 8 Relative content and mass concentration of dissolved organic matter in the influent and stage effluent of each system

结合急性毒性结果, 从相对含量来看, 两套处理系统各级出水的急性毒性主要来自 II 区芳香族蛋白类似物, I 区芳香族蛋白类似物也含有部分急性毒性物质。从“绝对含量”来看, 两套处理系统各级出水的急性毒性差异主要来自于 I 区芳香族蛋白类似物。

两套处理系统各级出水的不同极性组分中 5 个区溶解性有机物的相对含量如图 9 所示。对于极性组分, 各水样中 II 区芳香族蛋白质类似物的比例最高(约占 50% ~ 60%), 且随着处理的进行, I 区芳

香族蛋白质类似物相对含量逐渐升高, 但 II 区芳香族蛋白质类似物的相对比例逐渐下降, 且急性毒性逐渐降低。由此推测极性组分中的急性毒性物质主要为 II 区芳香族蛋白质类似物, 且极性组分中去除的急性毒性物质主要为 II 区芳香族蛋白质类似物。

与极性组分相比, 弱极性组分中 II 区芳香族蛋白质类似物相对含量降低, I 区芳香族蛋白质类似物相对含量升高, 两类蛋白质类似物分别约占 30% ~ 40%, 而弱极性组分的急性毒性较极性组分降低。由此推测弱极性组分中的急性毒性物质主要为

两类芳香族蛋白质类似物,且较极性组分减少的急性毒性主要为Ⅱ区芳香族蛋白质类似物。

非极性组分中Ⅰ区芳香族蛋白质类似物比例约为40%~45%,Ⅱ区芳香族蛋白质类似物约占

40%。该组分的荧光峰强度较弱且没有检出急性毒性,与已有研究^[22,25]的结果相似。有研究在焦化废水的非极性组分中检出了抗雄激素活性^[26],对于该组分的物质及其特征的研究还需进一步深入。

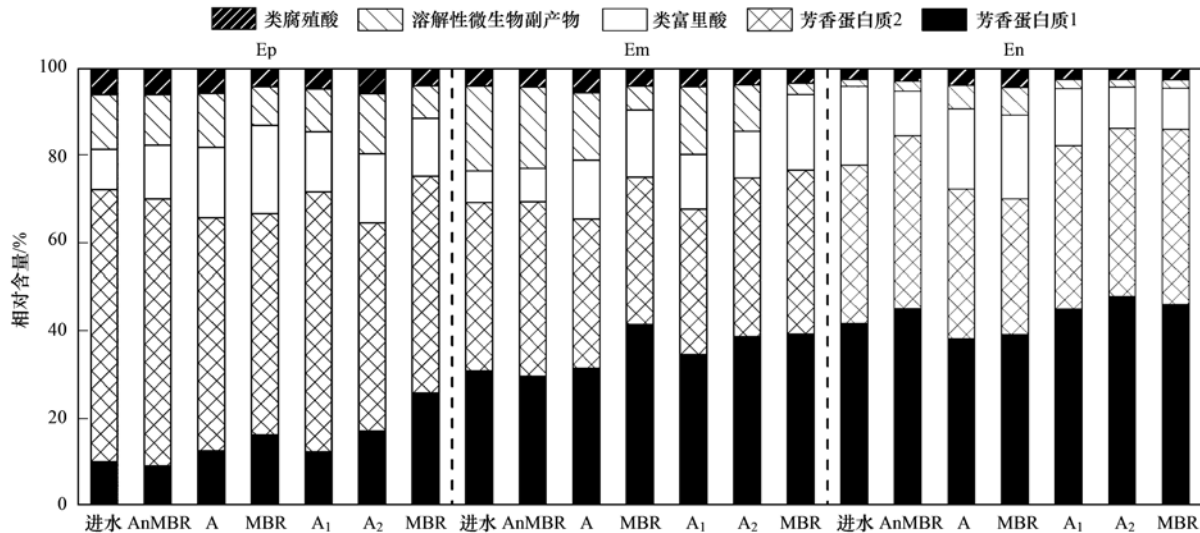


图9 进水和两套处理系统各级出水不同组分中五区有机物的相对含量

Fig. 9 Relative content of dissolved organic matter in different components

3 结论

(1)综合比较两套处理系统稳定运行的效果,缺氧段和好氧段出水的有机污染物去除率和质量浓度差异逐渐缩小,但AnMBR的去除率为15.3%,显著高于A²-MBR系统的厌氧段(3.4%)。AnMBR-A-MBR系统能够抵抗相对更高的污染负荷,达到和A²-MBR系统基本相等的去除率。

(2)两套处理系统的急性毒性当量总去除率分别为85.2%和79.2%,AnMBR-A-MBR系统各级出水的急性毒性均明显低于A²-MBR系统。不同组分中极性组分的急性毒性最强,且极性和弱极性组分贡献了绝大部分的毒性当量。极性组分中主要的急性毒性物质可能是Ⅱ区芳香族蛋白质类似物,而弱极性组分中的毒性物质可能主要为两类芳香族蛋白质类似物。两套处理系统各级出水的毒性物质主要为Ⅱ区芳香族蛋白类似物,但二者的毒性差异主要来自于Ⅰ区芳香族蛋白类似物。

参考文献:

- [1] Li J F, Wu J, Sun H F, *et al.* Advanced treatment of biologically treated coking wastewater by membrane distillation coupled with pre-coagulation[J]. *Desalination*, 2016, **380**: 43-51.
- [2] Ou H S, Wei C H, Mo C H, *et al.* Novel insights into anoxic/aerobic¹/aerobic² biological fluidized-bed system for coke wastewater treatment by fluorescence excitation—emission matrix

spectra coupled with parallel factor analysis[J]. *Chemosphere*, 2014, **113**: 158-164.

- [3] 朱小彪,刘聪,王东滨,等. 厌氧/缺氧/沸石-膜生物反应器处理焦化废水的运行特性研究[J]. *环境工程技术学报*, 2013, **3**(4): 279-285.
- [4] Zhao W T, Huang X, Lee D J, *et al.* Use of submerged anaerobic-anoxic-oxic membrane bioreactor to treat highly toxic coke wastewater with complete sludge retention[J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, **330**(1-2): 57-64.
- [5] Gao W J J, Lin H J, Leung K T, *et al.* Influence of elevated pH shocks on the performance of a submerged anaerobic membrane bioreactor[J]. *Process Biochemistry*, 2010, **45**(8): 1279-1287.
- [6] Stamatelatou K, Kopsahelis A, Blika P S, *et al.* Anaerobic digestion of olive mill wastewater in a periodic anaerobic baffled reactor (PABR) followed by further effluent purification via membrane separation technologies[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2009, **84**(6): 909-917.
- [7] Lin H J, Xie K, Mahendran B, *et al.* Factors affecting sludge cake formation in a submerged anaerobic membrane bioreactor[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, **361**(1-2): 126-134.
- [8] Kanai M, Ferre V, Wakahara S, *et al.* A novel combination of methane fermentation and MBR—Kubota Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor process[J]. *Desalination*, 2010, **250**(3): 964-967.
- [9] Diez V, Ramos C, Cabezas J L. Treating wastewater with high oil and grease content using an Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR). Filtration and cleaning assays[J]. *Water Science & Technology*, 2012, **65**(10): 1847-1853.
- [10] 陆晓峰,周保昌,沈飞,等. 厌氧膜生物反应器在食品废水处理中的应用研究[J]. *膜科学与技术*, 2011, **31**(3): 234-

- 238.
- [11] Abdurahman N H, Rosli Y M, Azhari N H. Development of a membrane anaerobic system (MAS) for palm oil mill effluent (POME) treatment[J]. *Desalination*, 2011, **266**(1-3): 208-212.
- [12] Fakhru'l-Razi A, Noor M J M M. Treatment of palm oil mill effluent (POME) with the membrane anaerobic system (MAS) [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(10-11): 159-163.
- [13] Lin H J, Peng W, Zhang M J, *et al.* A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives[J]. *Desalination*, 2013, **314**: 169-188.
- [14] Fuchs W, Binder H, Mavrias G, *et al.* Anaerobic treatment of wastewater with high organic content using a stirred tank reactor coupled with a membrane filtration unit[J]. *Water Research*, 2003, **37**(4): 902-908.
- [15] 杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 等. 某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 286-291.
Du L N, Yang F, Mu Y F, *et al.* Evaluation of the acute toxicity of pharmaceutical wastewater to luminescent bacteria [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 286-291.
- [16] 黄利, 陈文艳, 万玉山, 等. 制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2604-2609.
Huang L, Chen W Y, Wan Y S, *et al.* Comprehensive toxicity evaluation and toxicity identification used in tannery and textile wastewaters[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2604-2609.
- [17] 马晓妍, 闫志刚, 刘永军, 等. 污水的青海弧菌 Q67 生物毒性检测及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1632-1637.
Ma X Y, Yan Z G, Liu Y J, *et al.* Detection of wastewater ecotoxicity using *Vibrio qinghaiensis* sp.-Q67 and its impact factors analysis [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(6): 1632-1637.
- [18] 李晓, 李娜, 饶凯锋, 等. 苯并噻唑类污染物对青海弧菌 Q67 毒性效应[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(2): 167-172.
Li X, Li N, Rao K F, *et al.* Toxicities of benzothiazole and benzothiazole derivatives (BTs) to *Vibrio qinghaiensis* sp.-Q67 [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(2): 167-172.
- [19] 唐红梅. 微回流比色法测定 COD_{Cr} 的试剂配方及测定方法[J]. *化工技术与开发*, 2005, **34**(5): 30-31.
Tang H M. Determination of COD_{Cr} by micro-reflux colormetry with self-made agent [J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2005, **34**(5): 30-31.
- [20] 国家环境保护总局. 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, 2002.
- [21] 刘聪, 陈吕军, 朱小彪, 等. 焦化废水 A²/O 处理过程中的组成和毒性变化规律[J]. *生态毒理学报*, 2014, **9**(2): 291-298.
Liu C, Chen L J, Zhu X B, *et al.* Compositional and toxic variations of coking wastewater in an A²/O treatment process [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, **9**(2): 291-298.
- [22] 刘聪. 焦化废水生物及深度处理工艺的排水生物毒性研究[D]. 北京: 清华大学, 2014. 42-52.
Liu C. Research on the bio-toxicity of coking wastewater treated by biological and advanced processes [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. 42-52.
- [23] U. S. Environment Protection Agency. Technical support document for water quality-based toxics control[R]. EPA/505/2-90-001, Washington, DC; U. S. Environmental Protection Agency, 1991.
- [24] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [25] Dehua M, Cong L, Zhu X B, *et al.* Acute toxicity and chemical evaluation of coking wastewater under biological and advanced physicochemical treatment processes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(18): 18343-18352.
- [26] Ma D H, Chen L J, Liu C, *et al.* Biological removal of antiandrogenic activity in gray wastewater and coking wastewater by membrane reactor process [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **33**: 195-202.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparision of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)