ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第2期
2014年2月15日

目 次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 …… 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏(401)
北京城区 $PM_{2.5}$ 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 …… 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥(411)
北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 …… 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清(418)
北京市 $PM_{5.0}$ 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 …… 王艳慧,肖瑶(428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 …… 谢小芳,孙在,杨文俊(436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 …… 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋(442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 …… 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娴(451)
忻州市环境空气 PM_{10} 中有机碳和元素碳污染特征分析 …… 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娴,杨花(458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 …… 青宪,苏原,苏青,张素坤,任明忠(464)
燃煤电厂锅炉 $PM_{2.5}$ 排放危害度评价模型建立及案例分析 … 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知溥,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征 …… 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强(475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析 …… 李正泉, 马浩, 毛裕定, 冯涛(481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究 …… 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔(490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 …… 贾龙, 徐永福(495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 …… 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 …… 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邰俊,陈檬(513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究 …… 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山(520)
国Ⅴ柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 …… 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛(526)
翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 …… 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉熹,韩圣慧,万合锋(533)
$CuBr_2$ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 …… 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平(541)
浙闽沿岸海域总溶解态无机锑的分布及影响因素研究 …… 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹(547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 …… 贾海峰,郭羽(555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价 …… 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟(562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 …… 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳(569)
太滆南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 …… 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛(577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 …… 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉(585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 …… 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊(592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 …… 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋(597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 …… 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振(605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 …… 李佳, 林建伟, 詹艳慧, 陈祖梅, 王鹏钧(611)
四环素光催化降解特性与选择性研究 …… 宋晨怡,尹大强(619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 …… 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖(626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 …… 杨赛,周启星,华涛(633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 …… 李彬,王志伟,安莹,吴志超(643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 …… 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德(651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究 …… 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳(657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 …… 赵兴兴,于水利,王哲(663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 …… 胡晓婧,藏婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟(669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 …… 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹(678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 …… 郭鹏然, 雷永乾, 蔡大川, 张涛, 吴锐, 潘佳钏 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 …… 张小敏,张秀英,钟太洋,江洪(692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 …… 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄(704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 …… 章迪,曹善平,孙建林,曾辉(711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 …… 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇锋,徐笠,吕永龙(719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 …… 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒(727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 …… 尹雪,陈家军,吕策(733)
Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 …… 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江(740)
$n(NO_3^-\text{-N})/n(NO_2^-\text{-N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 …… 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌(746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 …… 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云(753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 …… 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 …… 朱艾嘉, 许战洲, 柳圭泽, 邓丽杰, 方宏达, 黄良民(764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 …… 王艳,马泽民,吴石金(770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 …… 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰(780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羰基硫排放动态研究 …… 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青(786)
农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施 …… 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 徐会娟, 贾炎(792)
《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究

李彬[1], 王志伟[1*], 安莹[2], 吴志超[1]

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海电力学院环境与化学工程学院, 上海 200090)

摘要: 研究 MBR 在低有机负荷条件下处理高盐废水的膜面污染物特征. 结果表明, 稳定运行 121 d 后, MBR 对有机物和 NH_4^+-N去除率稳定, 出水效果良好; 污泥性质发生较大变化, 挥发性固体含量(VSS)/固体含量(SS)的下降, 污泥体积指数(SVI)下降, 表明污泥中无机成分含量增加, 絮体更为紧密, 沉降性能变好; 污泥溶解性微生物产物(SMP)和胞外聚合物(EPS)成分发生较大变化, 蛋白质所占比例降低, 腐殖酸所占比例增加; 扫描电子显微镜-X 射线能谱仪(SEM-EDX)结果表明膜面存在无机污染物, 其主要组成元素为 Na、Al、Mg、Ca、K、Fe、Ti、Cr、W、Si 和 Cl; 凝胶过滤色谱(GFC)分析表明, SMP 中的大分子有机物被膜截留并累积是形成膜污染的原因之一; 傅立叶红外(FTIR)光谱和三维荧光光谱(EEM)分析表明, 膜面有机污染物的主要成分为糖类、蛋白质和腐殖酸; 膜污染物组分质量分析说明在处理高盐废水时无机膜污染不可忽略.

关键词: 膜-生物反应器; 平板膜; 膜污染; 高盐废水; 污水处理

中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)02-0643-08

Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment

LI Bin[1], WANG Zhi-wei[1], AN Ying[2], WU Zhi-chao[1]

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Environment and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The properties of membrane foulants in MBR treating high-salinity wastewater were studied. Results showed that the removal efficiency of organics and NH_4^+-N was stable and high-quality effluent was obtained after the operation time of 121 d; the ratio of VSS/SS decreased and SVI declined at the same time, indicating that the inorganic content of sludge increased which might lead to more compact flocs and higher settling ability; SMP and EPS of the sludge were largely changed with a lower proportion of protein and a higher proportion of humic acid. Scanning electron microscope-energy diffusive X-ray analyzer (SEM-EDX) demonstrated that Na, Al, Mg, Ca, K, Fe, Ti, Cr, W, Si and Cl were the major inorganic elements in membrane foulants; Gel filtration chromatography (GFC) illustrated that there were organic matters with high molecular weight trapped by membrane and formed the membrane foulants; Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and Excitation emission matrix (EEM) fluoresce spectroscopy discovered that carbohydrates, protein and humic acid were the main content of organics in membrane foulants.; quantitative analysis of membrane foulants showed that the amount of inorganic membrane foulants were significant when treating high-salinity wastewater.

Key words: membrane bioreactor (MBR); flat-membrane; membrane foulants; high-salinity wastewater; wastewater treatment

膜-生物反应器(MBR)是膜分离与生物反应相结合的污水处理新工艺, 具有占地面积小、出水水质好、污泥产量低等优点, 近年来已引起广泛的关注, 并逐步应用于城市污水和工业废水的处理[1,2]. 随着 MBR 研究的不断深入和应用范围的不断拓展, MBR 开始应用于高含盐废水的处理. Sun 等[3]用 MBR 处理产业区的高盐废水, 研究发现长期运行中的 MBR 污泥的挥发性固体含量(VSS)/固体含量(SS)为 0.4 左右, 化学需氧量(COD)去除率为 80%~95%, 氨氮(NH_4^+-N)的去除率为 95%; Pendashteh 等[4]利用序批式 MBR 处理高盐含油废水, 选取多种有机负荷、水力停留时间(HRT)和溶解性总固体(TDS)进行试验, 在 COD 负荷为 1.1 kg·(m^3·d)$^{-1}$, HRT 为 48 h, TDS 为 35 g·L^{-1}时, COD 的去除率可以达到 97.5%; Jang 等[5]在用 MBR 处理含盐废水时观察到当盐度由5 g·L^{-1}提升到 20 g·L^{-1}时, NH_4^+-N的去除效率由 87% 下降到 46%, 溶解性有机碳(DOC)的去除效率并未受到影响; Artigaa 等[6]采用悬浮填料 MBR 处理生产吞拿鱼罐头时产生的高盐废水, 在运行73 d, 活性污泥适应 84 g·L^{-1}的盐度之后, COD 去除率可达 92%. 张

收稿日期: 2013-05-10; **修订日期**: 2013-08-24

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAJ21B05); 上海市科学技术委员会科研计划项目(11231200400)

作者简介: 李彬(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: elf86883@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: zwwang@tongji.edu.cn

雨山等[7]采用 MBR 工艺处理冲厕海水,微生物经过驯化后,当污水中海水比例不超过 48% 时,COD 和NH_4^+-N的去除率分别达到 86% 和 93% ,但污泥的沉降性能变差.

膜污染一直是制约 MBR 工艺应用的技术障碍[8,9]. 普遍认为溶解性微生物产物(SMP)和胞外聚合物(EPS)是膜面污染物主要有机成分,其组成包括糖类、蛋白质和腐殖酸等. 同时,膜面的无机污染也受到了广泛的关注,Wang 等[10]发现由 Mg、Al、Fe、Ca、Si 等元素组成的无机物质沉积在膜表面和有机物结合形成的凝胶层是造成膜污染的重要原因. Meng 等[11]发现无机化合物和生物聚合物之间的架桥作用会使膜污染层更加紧密从而加剧膜污染. 黄霞等[12]使用场发射扫描电子显微镜观察在污染后的 PAC-MBR 膜表面,发现许多有规则、有棱角的方形污染物,并对其进行了分析,表明是无机垢体,其主要成分为 $CaCO_3$. 傅威等[13]在研究长期运行下的 MBR 反应器膜表面污染物时发现,膜表面存在 Na、Mg、Al、Si、Cl、Ca、Fe、Mn 等元素并认为酸清洗可以去除大部分无机膜污染.

目前,关于膜面污染物特性的研究大多采用生活污水或配水作为 MBR 进水,其有机组分含量高,无机组分含量远低于有机组分,对于 MBR 在处理高盐废水条件下的膜面污染物特性研究还较少见. 本试验采用配水(模拟高盐废水)作为 MBR 进水,在低有机负荷的条件下稳定运行 121 d 以上,关注了 MBR 对进水有机物和NH_4^+-N的去除效果以及污泥性质的变化,通过扫描电子显微镜-X 射线能谱仪、凝胶过滤色谱、傅立叶红外光谱和三维荧光光谱等分析和测试手段研究了 MBR 在处理高盐废水条件下的膜面污染物特性,以期为进一步探讨膜污染控制措施提供有益的资料.

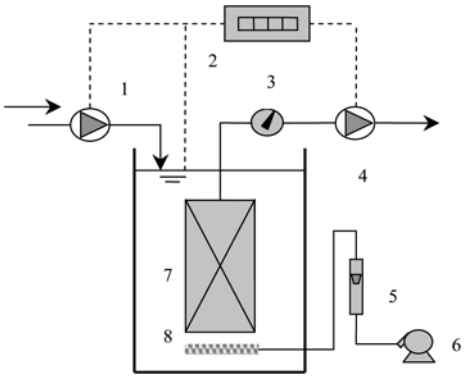
1 材料与方法

1.1 试验装置及运行参数

试验所用 MBR 反应器(如图 1)总容积为 27 L,MBR 放有 1 片平板膜,膜下方安装环形曝气管,曝气量用气体流量计控制,以膜区投影面积计算曝气强度为 0.8 $m^3\cdot(m^2\cdot min)^{-1}$,反应器中放置温控装置,污泥温度维持 25℃左右.

试验采用的平板膜为聚偏氟乙烯(PVDF)制成的微滤膜,膜有效面积为 0.24 m^2、平均孔径 0.2 μm、孔隙率 50% 、基材为聚酯无纺布.

试验采用蠕动泵抽吸恒流进水、出水,出水抽



1. 进水泵; 2. 液面控制装置; 3. 压力计; 4. 出水泵; 5. 气体流量计; 6. 鼓风机; 7. 平板膜; 8. 曝气管

图 1 膜-生物反应器示意

Fig. 1 Flow diagram of the MBR setup

停比为 10 min∶2 min,跨膜压差(TMP)通过水银压力计测定,当 TMP 达到 30 kPa 左右时,对膜进行物理化学清洗. MBR 实际运行参数见表 1.

表 1 运行参数[1)]

Table 1 Operation conditions of MBR runs

膜通量 /L·(m^2·h)$^{-1}$	温度 /℃	水力停留时间 /h	溶解氧 /mg·L^{-1}
8	23 ~ 26	13.5	4 ~ 6

1)试验除测试分析取样外,系统不排泥,泥龄非真正意义上的无限长

1.2 进水水质

采用上海某生活污水厂二级生物处理出水混合 NaCl、少量 NH_4Cl 和 $NaHCO_3$ 模拟低有机负荷(按总有机碳即 TOC 计算有机负荷)高盐废水,进水水质见表 2. 选取该厂曝气池的常规活性污泥作为接种污泥,接种时污泥浓度为 2.7 g·L^{-1}.

表 2 进水水质

Table 2 Characteristics of influent

水质指标	TOC /mg·L^{-1}	NH_4^+-N /mg·L^{-1}	TDS /g·L^{-1}	pH
范围[1)]	29.5 ±5.7	46.8 ±3.9	9.5 ±0.1	7.6 ±0.3

1)标准偏差和平均值由 16 次测定数据求得

1.3 膜面污染物的收集和预处理

MBR 第 3 个运行周期结束后,将平板膜从 MBR 中取出,用刮刀将膜表面的污染物小心刮下并收集. 膜污染物置于 250 mL 的蒸馏水中,充分搅拌,待混合均匀后用 0.45 μm 滤纸过滤.

1.4 SMP 及 EPS 的提取方法

取 60 mL 的 MBR 污泥,在6 000 r·min^{-1}下离心 30 min 后,取上清液过滤后即为 SMP. 向离心管中加入与上清液等体积的 0.9% NaCl 溶液,搅拌均匀后 60℃水浴 1 h,离心后取上清液过滤即为 EPS.

1.5　分析项目和方法

NH_4^+-N：纳氏试剂分光光度法；NO_2^--N：*N*-(1-萘基)-乙二胺光度法；NO_3^--N：紫外分光光度法；糖类：蒽酮试剂法；蛋白质：双缩脲试剂法；腐殖酸：修正后的 Lowry 法[14]；混合液悬浮固体浓度(MLSS)和混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)：重量法.

总溶解性固体(TDS)采用中国雷磁 DDSJ-308A 电导率仪测定；总有机碳(TOC)、凝胶过滤色谱(GFC)、傅立叶红外光谱(FTIR)和三维荧光光谱(EEM)分别采用日本岛津总有机碳分析仪、日本岛津 Lc-10ADVP 凝胶色谱仪、美国 Nicolet 5700 智能傅立叶红外光谱仪和美国 HORIBA MAX 荧光分光光度计测定；扫描电子显微镜(SEM)和能量散射 X 射线能谱仪(EDX)采用荷兰 Philips 公司 SEM515 扫描电子显微镜分析.

2　结果与讨论

2.1　MBR 的运行特性

图 2 反映了 MBR 启动 121 d 内的跨膜压差变化. 在此期间,平板膜一共运行 3 个周期,其中前两个运行周期较短,分别为9 d 和13 d,第3 个运行周期为 99 d. 这可能因为在 MBR 启动初期,一方面活性污泥受到大量盐度的刺激,污泥 SMP 和 EPS 中糖类、蛋白质等含量急剧增长,部分微生物死亡或自溶[15],造成膜面有机污染物含量升高,另一方面 MBR 进水有机物较少且含有大量盐度,活性污泥中的异养菌受到抑制[16],微生物对膜面有机污染物的降解能力不足,因此,大量的未降解污染物需要通过膜的过滤截留作用去除,从而加重膜污染,缩短膜的运行周期. 当 MBR 的活性污泥适应高盐环境时,污泥性质稳定,由于进水中有机物含量少,活性污泥中自养菌占据主导地位[17],污泥中 SMP 和 EPS 中糖类、蛋白质等物质减少,膜污染减轻,运行周期延长. 在第 3 个运行周期内,膜污染发展规律符合“二阶段污染特征[18, 19]”,在前 95 d 内膜污染缓慢,TMP 仅以平均 0.20 kPa·d^{-1}的速率增长,后 4 d 内膜污染快速发展,TMP 的增长速度为 2.83 kPa·d^{-1}.

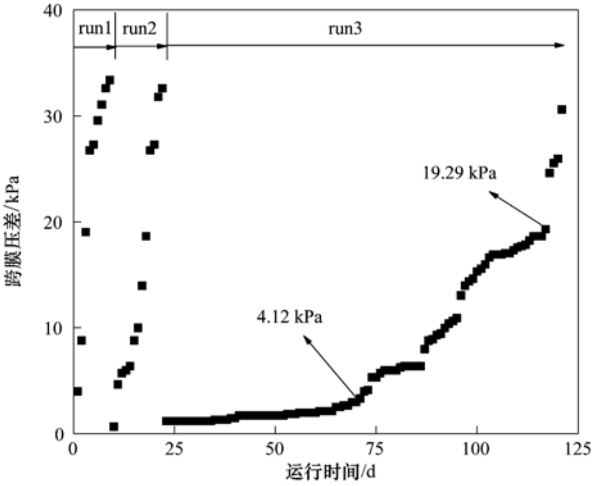


图 2　跨膜压差(TMP)随时间变化

Fig. 2　Variations of membrane TMP

图 3(a)显示了 MBR 系统对高盐废水中有机物的去除效果,其中进水 TOC 为 21.1 ~ 38.1 mg·L^{-1}. 启动时系统对有机物的去除率仅为 22%,出水 TOC 高达 18.2 mg·L^{-1},运行 75 d 之后系统出水 TOC 稳定在 9.0 mg·L^{-1}以下,对有机物的平均去除率达 70%. 分析原因可能是 MBR 启动时进水中盐度对系统微生物活性有抑制作用,微生物对有机物的去除效率降低,导致出水 TOC 较高,当活性污泥经过较长时间驯化后,系统微生物开始适应高盐环境,对有机物的去除效率逐步上升,出水 TOC 最终下降至

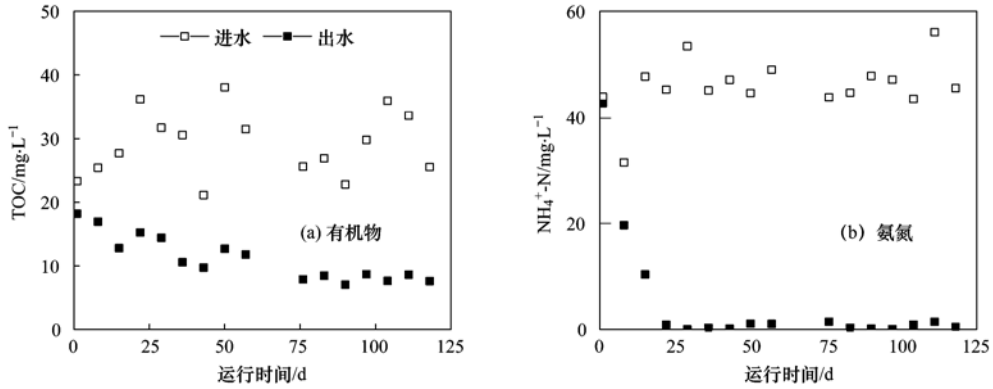


图 3　MBR 对有机物和氨氮的去除效果

Fig. 3　Variations of organics and NH_4^+-N

9.0 mg·L^{-1}以下；另外系统进水取自污水处理厂二级生物处理出水，进水 TOC 中难生物降解有机物成分的比例相对较高，导致有机物的去除效率不能进一步提高，维持在70%左右.

图3(b)直观表明了 MBR 系统对高盐废水中NH_4^+-N的去除效果，其中进水NH_4^+-N为 41.5～56.0 mg·L^{-1}. 启动时，系统对NH_4^+-N几乎没有去除，出水氨氮高达 42.6 mg·L^{-1}，之后系统对氨氮的去除率逐步提升，运行 25 d 后，MBR 对NH_4^+-N的去除率稳定在99%以上，出水氨氮均小于 1.5 mg·L^{-1}. 分析原因可能是因为 MBR 微生物系统的氨氧化细菌对环境变化较为敏感，当进水中盐度高时，氨氧化细菌活性易被抑制，导致NH_4^+-N的去除效率降低，活性污泥经过驯化后，氨氧化细菌的被抑制程度逐渐降低[20]，由于进水有机物含量较低，活性污泥系统中自养菌所占比例逐渐增加，因此NH_4^+-N去除率逐步提高，出水NH_4^+-N效果良好且稳定.

2.2 MBR 污泥性质分析

图4直观表明了在 MBR 运行 121 d 内系统污泥浓度(SS)、挥发性固体浓度(VSS)和污泥体积指数(SVI)的变化. 由图4(a)可知，SS 在 MBR 运行初期明显下降，由启动时的 2.7 g·L^{-1}降至 0.8 g·L^{-1}，运行 40 d 后，SS 缓慢上升，到 121 d 时已经回升至 1.6 g·L^{-1}，VSS 化趋势与 SS 变化趋势基本相同，分析其原因可能是由于 MBR 进水含有较高盐度，活性污泥中部分微生物无法适应高盐环境而死亡，导致 SS 和 VSS 的下降，随着活性污泥的驯化，其中的微生物适应高盐环境后开始增长，污泥浓度缓慢上升. 如图4(b)所示，VSS/SS 和 SVI 在系统运行的 121 d 内，均呈下降趋势，分别从 0.7 mL·g^{-1}和 140 mL·g^{-1}下降至 0.5 mL·g^{-1}和 56 mL·g^{-1}，说明了在高盐环境下，系统活性污泥系统中不可挥发固体(NVSS)含量更高，污泥絮体更为紧密，沉降性能更好.

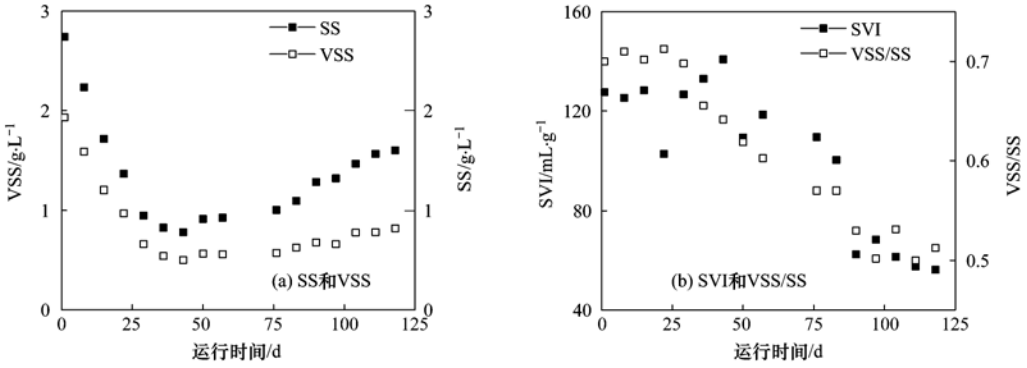


图4 MBR 中活性污泥性质的变化

Fig. 4 Variations of activated sludge properties

在 MBR 系统运行 125 d 后，提取其污泥的 SMP 和 EPS，分析其成分组成，并与接种时比较，结果见图5. 如图5(a)所示，按组分含量分析，与接种时比，MBR 系统活性污泥 SMP 腐殖酸的含量较高，蛋白质的含量较低，糖类则相当，EPS 中糖类、蛋白质和腐殖酸的含量均较低. 按组成比例分析，MBR 活性系统 SMP 和 EPS 中蛋白质所占比例分别为 3.6%和17.3%，远小于接种时，与此相反，腐殖酸所占比例为 86%和74%，均高于接种时. 分析原因可能是一方面由于 MBR 系统处于高盐环境，活性污泥部分微生物细胞死亡或胞内物质溶出，导致 SMP 含量较高；另一方面由于进水有机物含量较少，MBR 在低有机负荷下运行，系统活性污泥中自养菌比例增加，自养菌生长速度慢且分泌 EPS 量少[21]，导致 MBR 活性污泥中 EPS 含量较少. 分析 SMP 和 EPS 中的 TDS 含量如图5(b)所示，与接种时相比，MBR 污泥 SMP 和 EPS 的 TDS 含量均较高，从中可知，在处理高盐废水时，无机盐主要分布在 SMP 中，另有少部分无机盐分布在 EPS 中，推测无机盐可能与 EPS 中多聚物以某种形式结合造成 EPS 中 TDS 上升的现象.

2.3 膜污染物分析

2.3.1 SEM-EDX 分析膜面污染物特征及其元素组成

利用 SEM 观察新膜和运行到达终点膜的表面，对比污染前后的膜孔阻塞情况(见图6). 结果表明，到达运行终点时，膜孔已被污染阻塞，且污染层上方附着有方形、有棱角、类似晶体的污染物，推测可能有无机盐类结晶在膜表面.

采用 EDX 对上述特征污染物进行化学成分和含量的定性和半定量分析，结果见表3，C、O、P 和

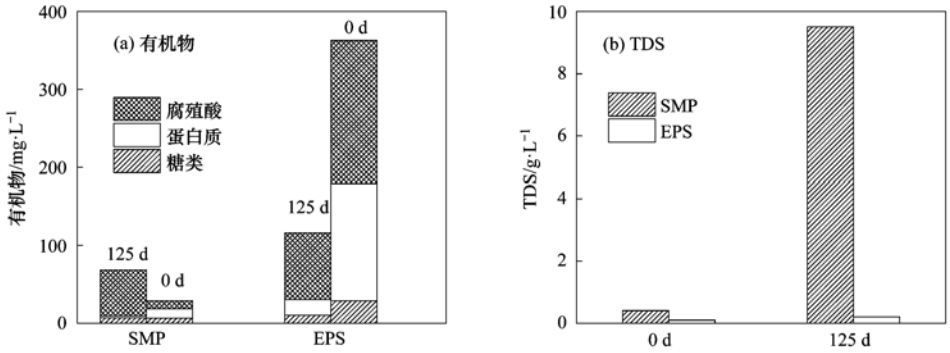


图 5　SMP 和 EPS 性质的变化

Fig. 5　Changes of SMP and EPS properties

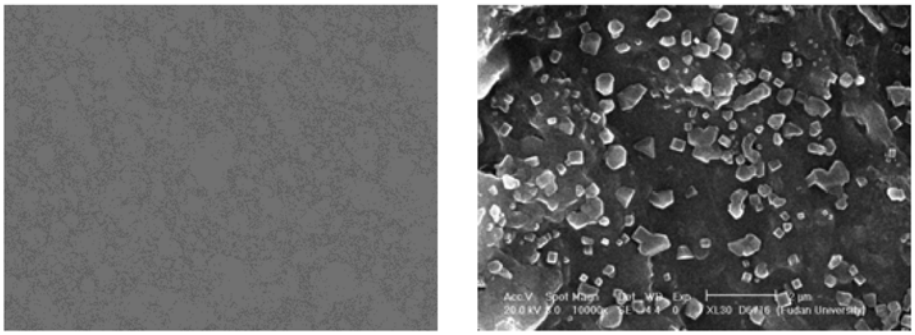


图 6　膜表面的 SEM 图像

Fig. 6　SEM image showing the surfaces of the new membrane and the fouling membrane

S 可能为膜表面有机污染物所含元素，故表 3 中 Na、Al、Mg、Ca、K、Fe、Ti、Cr、W、Si、Cl 可认为是膜表面无机污染物中所含元素，其质量分数之和约为 39%，其中 Si 元素的含量最高. 以往的文献研究表明，SiO_2 和硅酸盐胶体是造成膜污染的重要无机物质[22]，因此推测膜表面的部分结晶物有可能是 SiO_2. 在膜面污染物的 EDX 分析中，Na 的原子数要小于 Cl 的原子数，由此推测 MBR 在处理高盐废水（主要盐度为 NaCl）时，除 Na^+ 外，其膜面存在的 Cl^- 可能会与其他一些金属阳离子在膜表面结晶并沉积，形成无机污染. 目前，关于膜无机污染物质化学成分和含量的研究还停留在元素分析水平，其污染机理和污染物具体成分的确定尚待进一步研究.

表 3　EDX 元素质量分数分析

Table 3　Proportions of elements by EDX analysis

元素	C	O	Na	Cl	Al	Si	P	S	Mg	Ca	K	Fe	Ti	Cr	W
质量分数/%	29.5	30.3	3.4	7.0	3.3	13.3	0.7	0.3	0.4	2.1	1.5	5.0	0.3	0.4	2.8
原子数	44.3	34.2	2.7	3.5	2.2	8.6	0.4	0.2	0.3	0.9	0.7	1.6	0.1	0.1	0.3

2.3.2　GFC 分析 SMP 和膜污染物中有机物的分子量分布

普遍认为在凝胶色谱柱上，有机物分子量的对数与保留时间呈反比例，保留时间可以表征有机物分子量，分子量大的物质保留时间较长，而分子量小的物质保留时间较短，因此从分子量大小的角度出发，通过 SMP 和膜污染物中的分子量分布的分析，可以一定程度上表明平板膜对污染物的截留和筛分的原理.

重均分子量（M_w）和数均分子量（M_n）是评价分子量分布的最常用指标，常用 M_w/M_n 表征分子量的分布范围大小，M_w/M_n 越大，表明分子量分布越宽. 表 4 为 SMP 和膜污染的分子量分布情况. 从图 7 和表 4 中可以观察到，与膜污染物相比，SMP 中有机物 GFC 出峰时间较晚，有机物的分子量分布范围较小且以小分子量的有机物居多.

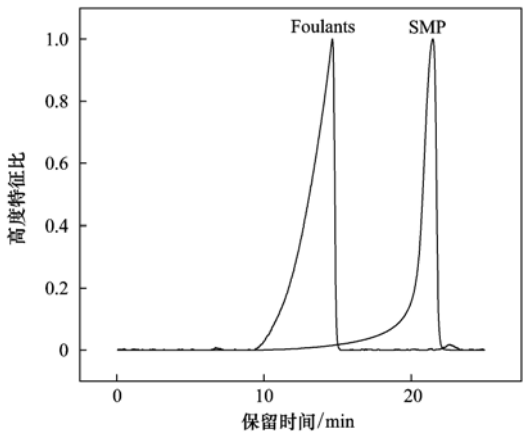


图 7 污泥 SMP 和膜污染物 GFC 色谱图

Fig. 7 GFC chromatogram of SMP and membrane foulants

表 4 SMP 和膜污染物中有机物分子量分布

Table 4 MW distributions of SMP and membrane foulants

样品	污泥 SMP	膜面污染物
M_w	37 980	2 160 584
M_n	617	16 683
M_w/M_n	61.54	129.50

表 5 给出了 MBR 运行稳定时 SMP 和膜出水中的糖类、蛋白质和腐殖酸含量,从中可以看出,膜出水中糖类、蛋白质和腐殖酸的含量分别为 SMP 中相应组分的 63%、92% 和 7%,表明 SMP 中只有部分有机物被膜截留形成膜污染,结合 GFC 的测定结果中 SMP 和膜污染物分子量分布的差异,从一定程度上可以说明 SMP 中有相当部分小分子量的有机物可以通过平板膜进入出水中,而 SMP 中大分子量的有机物被膜表面截留或其中小分子量的有机物在膜面通过聚合、吸附架桥的物理化学作用转化为分子量较大的有机物而被膜表面截留可能是形成膜污染的重要原因.

表 5 SMP 和膜出水中糖类、蛋白质和腐殖酸的含量[1)]/mg·L^{-1}

Table 5 Carbohydrates, protein and humic acid contents in SMP and effluent/mg·L^{-1}

样品	SMP	膜出水
糖类	7.1 ± 1.6	4.5 ± 1.1
蛋白质	2.5 ± 1.2	2.3 ± 0.8
腐殖酸	59.0 ± 6.7	4.1 ± 0.4

1) $n=4$,即标准偏差和平均值由 4 次数据求得

2.3.3 FTIR 和 EEM 分析膜面污染物的有机成分

对膜面污染物进行 FTIR 分析,结果如图 8 所示. 膜面污染物在3 416.8 cm^{-1}有强烈吸收峰,显示存在羟基官能团中的 O—H 键; 在2 924.1 cm^{-1}存在吸收峰为 C—H 键伸缩振动产生[23]; 图谱中在1 638.3 cm^{-1}和1 544.4 cm^{-1}处存在两个典型的蛋白质二级结构的特征吸收峰,分别为酰胺Ⅰ带和酰胺Ⅱ带[24]; 在1 077.2 cm^{-1}处的强烈吸收峰表明膜污染物中可能存在多糖或类多糖物质[25]; 此外,图谱 609.7 cm^{-1}处存在吸收峰,表明膜污染物中可能有类似腐殖酸等的芳香族物质存在[26].

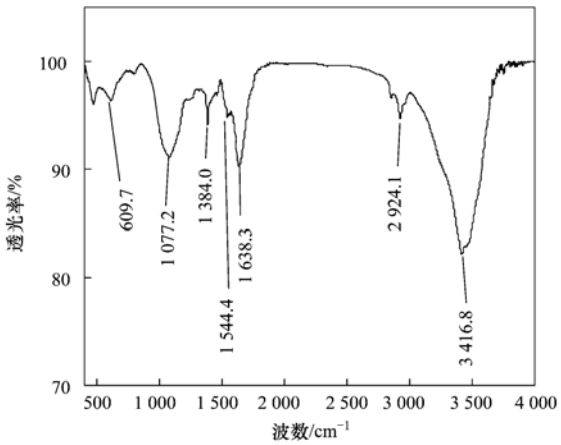


图 8 膜面污染物 FTIR 图

Fig. 8 FTIR spectra of the powder of membrane fouling

对膜面污染物进行 EEM 分析,结果如图 9 所示. 膜面污染物的 EEM 图谱中主要有 3 个荧光峰 A、B 和 C,分别位于 220/340 nm、270/330 nm 和 350/450 nm,其中 A、B 峰与类蛋白质物质有关,分别为酪氨酸荧光和色氨酸荧光,C 峰则为类腐殖酸物质,其荧光强度相对较弱[27]. EEM 的分析结果表明,蛋白质、腐殖酸是膜污染物的重要成分,并验证了 FTIR 的分析结果.

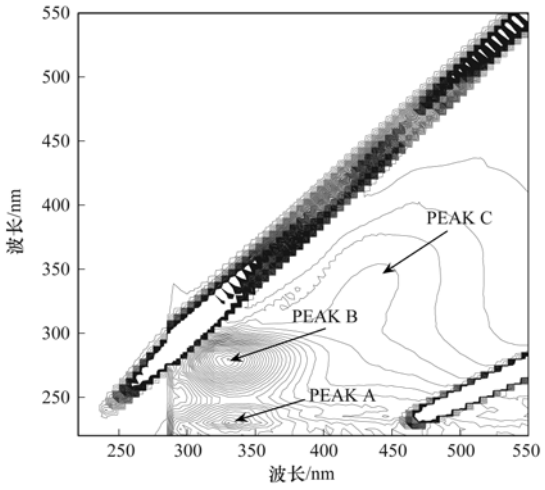


图 9 膜面污染物 FTIR 图

Fig. 9 EEM spectra of the powder of membrane fouling

2.3.4 膜污染物组分质量分析

按照表 6 中分类方法,将膜污染物分为溶解性

膜污染物和颗粒、胶体等难溶膜污染物. 普遍认为,糖类、蛋白质和腐殖酸是溶解性膜污染物的主要组成部分,但溶解性污染物中的无机成分未得到关注,测定溶解性膜污染物中的糖类、蛋白质、腐殖酸和 TDS 的含量见表 6,可以发现 MBR 在处理高盐废水时,TDS 是溶解性膜污染物的主要组成部分;测定将颗粒、胶体等难溶膜污染物的 VSS 和 NVSS 的含量见表 6,其中 NVSS 的质量是难溶膜污染物 SS 质量的 35%. 上述分析表明,在处理高盐废水时,无机膜污染是不可忽略的部分.

表 6　膜污染物组分质量分析[1)]

Table 6　Quantitative analysis of membrane foulants

溶解性膜污染物				颗粒、胶体等难溶膜污染物	
糖类/mg·m^{-2}	蛋白质/mg·m^{-2}	腐殖酸/mg·m^{-2}	TDS/mg·m^{-2}	VSS/g·m^{-2}	NVSS/g·m^{-2}
56.9	41.5	11.4	966.7	2.1	1.1

1)膜面污染物置于 250 mL 水中,充分混匀后,在 4℃恒温箱内过滤

3　结论

(1)在处理进水 TDS 为 9 g·L^{-1}左右的高盐废水时, MBR 在平均有机负荷仅为 0.05 kg·(m^3·d)$^{-1}$的条件下,稳定运行 121 d,膜运行周期最长为 99 d,对有机物和NH_4^+-N的去除率分别为 70% 和 99%.

(2)MBR 系统活性污泥在高盐度环境下驯化 121 d,污泥性质发生较大变化,SS 由 2.7 g·L^{-1}下降至 1.6 g·L^{-1},VSS/SS 由 0.7 下降至 0.5,SVI 由 140 mL·g^{-1}下降至 56 mL·g^{-1}; 系统活性污泥 SMP 含量较接种污泥略有上升,EPS 含量大幅下降,SMP 和 EPS 中的蛋白质所占比例分别为 3.6% 和 17.3%,较接种时均大幅下降,与此相反,腐殖酸比例均有所增加. 此外,研究表明进水盐度主要存在于 SMP 中,EPS 中也有少量分布.

(3)MBR 在低有机负荷条件下处理高盐废水时,SEM-EDX 分析表明膜面无机污染物主要是 Na、Al、Mg、Ca、K、Fe、Ti、Cr、W、Si 等阳离子形成的无机盐类结晶; GFC 分析表明 SMP 中大分子被截留并在膜表面累积是造成膜污染的重要原因之一; FTIR 和 EEM 分析表明膜面有机污染物主要成分为糖类、蛋白质、腐殖酸等; 膜污染物组分质量分析表明膜面无机污染物不可忽略,其含量约占全部膜污染物的 35% 以上.

参考文献:

[1] Chang I S, Lee C H. Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system—the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling [J]. Desalination, 1998, **120**(3): 221-233.

[2] Wang Z W, Wu Z C, Mai S H, *et al*. Research and applications of membrane bioreactors in China: Progress and prospect [J]. Separation and Purification Technology, 2008, **62**(2): 249-263.

[3] Sun J M, Wang X H, Li R X, *et al*. Hyperhaline municipal wastewater treatment of a processing zone through pilot-scale A/O MBR [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, **8**: 773-788.

[4] Pendashteh A R, Abdullah L C, Fakhru'l-Razi A, *et al*. Evaluation of membrane bioreactor for hypersaline oily wastewater treatment [J]. Process Safety and Environment Protection, 2012, **90**(1): 45-55.

[5] Jang D, Hwang Y, Shin H, *et al*. Effects of salinity on the characteristics of biomass and membrane fouling in membrane bioreactors [J]. Bioresource Technology, 2013, **141**: 50-56.

[6] Artigaa P, García-Torielloa G, Méndezb R, *et al*. Use of a hybrid membrane bioreactor for the treatment of saline wastewater from a fish canning factory [J]. Desalination, 2008, **211**(1-3): 518-525.

[7] 张雨山, 张秀芝, 王静, 等. 膜生物反应器处理冲厕海水的试验研究[J]. 膜科学与技术, 2010, **30**(1): 73-77.

[8] Cho J, Song K G, Yun H, *et al*. Quantitative analysis of biological effect on membrane fouling in submerged membrane bioreactor [J]. Water Science and Technology, 2005, **51**(6-7): 9-18.

[9] Wang Z W, Wu Z C, Tang S J. Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor [J]. Water Research, 2009, **43**(9): 2504-2512.

[10] Wang Z W, Wu Z C, Tian L M. Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (MBR) under sub-critical flux operation: Membrane foulant and gel layer characterization [J]. Journal of Membrane Science, 2008, **325**(1): 238-244.

[11] Meng F G, Zhang H M, Yang F L, *et al*. Characterization of cake layer in submerged membrane bioreactor [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(11): 4065-4070.

[12] 黄霞, 莫罹. MBR 在净水工艺中的膜污染特征及清洗[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(5): 9-12.

[13] 傅威, 王志伟, 尹星, 等. 膜生物反应器长期运行条件下膜的清洗方法及机理研究[J]. 给水排水, 2009, **35**(2): 177-183.

[14] Frølund B, Griebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the

activated-sludge floc matrix [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1995, **43**(4): 755-761.

[15] Dincer A R, Kargi F. Performance of rotating biological disc system treating saline wastewater [J]. Process Biochemistry, 2001, **36**(8-9): 901-906.

[16] 周鹏. 盐度冲击对活性污泥系统性能影响的研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(5): 65-68.

[17] 张文燕, 马金星, 王志伟, 等. 有机负荷对膜-生物反应器硝化性能的影响[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(2): 39-44.

[18] Field R W, Wu D, Howell J A, *et al*. Critical flux concept for microfiltration fouling [J]. Journal of Membrane Science, 1995, **100**(3): 259-272.

[19] 俞开昌, 文湘华, 卜庆杰, 等. 次临界操作下的膜污染机理研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, **5**(1): 23-27.

[20] 李玲玲, 郑西来, 李梅. 盐度对活性污泥硝化功能的影响[J]. 环境污染与防治, 2008, **30**(1): 48-51.

[21] 李志华, 张婷, 吴杰, 等. 异养菌与自养菌对好氧颗粒污泥稳定性的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, **32**(5): 76-81.

[22] 莫罹, 黄霞, 吴金玲, 等. 混凝-微滤膜净水工艺的膜污染特征及其清洗[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(3): 258-262.

[23] Kumar M, Adham S S, Pearce W R. Investigation of seawater reverse osmosis fouling and its relationship to pretreatment type [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(6): 2037-2044.

[24] Maruyama T, Katoh S, Nakajima M, *et al*. FT-IR analysis of BSA fouled on ultrafiltration and microfiltration membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2001, **192**(1-2): 201-207.

[25] Croué J P, Benedetti M F, Violleau D, *et al*. Characterization and copper binding of humic and nonhumic organic matter isolated from the South Platte river: evidence for the presence of nitrogenous binding site [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(2): 328-336.

[26] Tran T, Bolto B, Gray S, *et al*. An autopsy study of a fouled reverse osmosis membrane element used in a brackish water treatment plant [J]. Water Research, 2007, **41**(17): 3915-3923.

[27] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al*. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Water Science Technology, 2003, **37**(4): 5701-5710.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 2

Feb. 15, 2014

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China ····· WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, *et al.* (401)

Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in $PM_{2.5}$ and Source Analysis in Beijing ····· TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, *et al.* (411)

Temporal and Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing ····· ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, *et al.* (418)

Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on $PM_{5.0}$ Inhalable Particulate in Beijing ····· WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)

Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring ····· XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)

Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing ····· WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, *et al.* (442)

Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles ····· WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, *et al.* (451)

Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM_{10} in Xinzhou City ····· SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, *et al.* (458)

Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou ····· QING Xian, SU Yuan, SU Qing, *et al.* (464)

Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis ····· SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, *et al.* (470)

Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea ····· XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, *et al.* (475)

Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data ····· LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, *et al.* (481)

Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area ····· HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, *et al.* (490)

Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation ····· JIA Long, XU Yong-fu (495)

Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China ····· DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, *et al.* (504)

Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area ····· QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, *et al.* (513)

Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter ····· HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, *et al.* (520)

Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends ····· LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, *et al.* (526)

Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting ····· ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, *et al.* (533)

Oxidation of Mercury by $CuBr_2$ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition ····· HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, *et al.* (541)

Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian ····· ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, *et al.* (547)

Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study ····· JIA Hai-feng, GUO Yu (555)

Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain ····· GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, *et al.* (562)

Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary ····· ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, *et al.* (569)

Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary ····· MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, *et al.* (577)

Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area ····· CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, *et al.* (585)

Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands ····· BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, *et al.* (592)

Impacts of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of *Microcystis aeruginosa* ····· ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, *et al.* (597)

Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water ····· TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, *et al.* (605)

Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite ····· LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (611)

Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride ····· SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)

Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System ····· FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, *et al.* (626)

Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety ····· YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)

Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment ····· LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, *et al.* (643)

Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter ····· LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, *et al.* (651)

Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process ····· CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, Det *al.* (657)

Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes ····· ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)

Biosorption Characteristics of Cu^{2+} by Spent Substrate of Pleurotus Oyster ····· HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, *et al.* (669)

Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition ····· WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, *et al.* (678)

Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou ····· GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, *et al.* (684)

Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China ····· ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, *et al.* (692)

Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site ····· ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, *et al.* (704)

Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China ····· ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, *et al.* (711)

Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River ····· TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, *et al.* (719)

Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants ····· ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, *et al.* (727)

Impact of Compounded Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites ····· YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)

Characterization of Manganese Oxidation by *Pseudomonas* sp. QJX-1 ····· ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, *et al.* (740)

Effects of the Ratio of NO_3^--N to NO_2^--N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture ····· CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, *et al.* (746)

Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou ····· GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, *et al.* (753)

Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles ····· ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, *et al.* (759)

Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea ····· ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, *et al.* (764)

Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on *Eisenia foetida* ····· WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)

Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System ····· LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, *et al.* (780)

Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from *Suaeda salsa* Marsh in the Yellow River Estuary ····· LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, *et al.* (786)

Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies ····· ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, *et al.* (792)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2014 年 2 月 15 日　35 卷　第 2 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 2　Feb. 15, 2014

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订　购　处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国 内 定 价：90.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行