

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 ..... 刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)

杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 ..... 陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)

气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 ..... 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)

龙凤山本底站大气 CO<sub>2</sub> 数据筛分及浓度特征研究 ..... 栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)

区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 ..... 苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)

天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 ..... 张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)

铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 ..... 梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)

KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 ..... 沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)

污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 ..... 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)

基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 ..... 白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)

1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 ..... 张柏发, 陈丁江 (2911)

南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 ..... 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)

三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 ..... 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)

岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)

亚热带典型岩溶区地表流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 ..... 张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)

藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 ..... 肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)

广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 ..... 刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)

铜陵相思河流域重金属分布特征研究 ..... 陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)

不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 ..... 王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)

酸性条件下Ti(IV)催化 O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解邻苯二甲酸二甲酯 ..... 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)

无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响 ..... 施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)

羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 ..... 方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)

不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀 ..... 鲍国栋, 左剑恶, 王雅娇, 于里 (3002)

微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 ..... 王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)

不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 ..... 张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)

SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 ..... 刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)

SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 ..... 张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)

曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 ..... 陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)

限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 ..... 刘文如, 阴方芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)

UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 ..... 李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)

开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用 ..... 陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)

北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 ..... 段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)

珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 ..... 朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)

温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 ..... 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)

不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 ..... 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)

低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响 ..... 黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)

EDTA 与柠檬酸复配洗修多重金属污染土壤效果研究 ..... 尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)

不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N<sub>2</sub>O 排放的关系 ..... 陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)

黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N<sub>2</sub>O 产生的不同过程及贡献 ..... 孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)

猪粪化肥配施对双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放及其全球增温潜势的影响 ..... 王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)

我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 ..... 袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)

丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应 ..... 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)

丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 ..... 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)

含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 ..... 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)

重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准 ..... 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)

维生素 B<sub>12</sub> 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究 ..... 刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)

己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 ..... 徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)

多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 ..... 王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)

稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 ..... 邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)

藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响 ..... 何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)

多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制 ..... 李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)

生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 ..... 崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)

经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例 ..... 李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)

中国铅流改变原因分析 ..... 马兰, 毛建素 (3219)

放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 ..... 汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)

中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 ..... 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)

《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882, 2927, 3059, 3218)

# SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究

刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶

(河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术重点实验室, 石家庄 050018)

**摘要:** 膜曝气-生物膜反应器(MABR)是一种新型的膜-生物废水处理工艺,在 MABR 中采用基因工程菌生物膜可以强化难降解污染物的生物去除. 本研究在 SPG 膜表面形成基因工程菌生物膜,运行 SPG 膜曝气-生物膜反应器(SPG-MABR)处理阿特拉津废水,考察了气压、挂膜生物量和液体流速对 SPG-MABR 运行性能的影响,以及基因工程菌生物膜的变化. 结果表明,提高气压可以增大透氧系数,从而提高阿特拉津和 COD 的去除速率以及复氧速率. 提高挂膜生物量能够加快阿特拉津和 COD 的生物去除,但生物膜厚度增加使得氧传质阻力增大,复氧速率降低. 层流状态下减小 SPG-MABR 中的液体流速,有利于污染物向生物膜扩散传质,从而提高污染物去除速率. 气压为 300 kPa、生物量为  $25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、液体流速为  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,SPG-MABR 反应器对阿特拉津 5 d 的去除率可以达到 98.6%. 在 SPG-MABR 运行过程中,基因工程菌生物膜呈现微生物多态化趋势. 生物膜表面逐渐被其他微生物细胞覆盖,基因工程菌分布减少,生物膜内部仍以基因工程菌细胞为主.

**关键词:** 膜曝气-生物膜反应器; 基因工程菌; SPG 膜; 阿特拉津; 透氧系数

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3018-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.08.026

## Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor

LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, ZHANG Ming, NIAN Yong-jia, YANG Jing-liang, ZHANG Jing

(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** Membrane-aerated biofilm reactor (MABR) represent a novel membrane-biological wastewater treatment technology. In addition, bioaugmented treatment using genetically engineered microorganism (GEM) biofilm in MABR is proposed to improve refractory pollutant removal. In the present study, a SPG membrane aerated-biofilm reactor (SPG-MABR) with GEM biofilm formed on the SPG membrane surface was applied to treat atrazine wastewater. The influences of air pressure, biofilm biomass and liquid velocity on the performance of the SPG-MABR were investigated. The variation of GEM biofilm during the SPG-MABR operation was observed. The results indicated that the increased air pressure could promote atrazine and COD removal as well as re-oxygenation by increasing oxygen permeability coefficient. A higher biofilm biomass could also enhance atrazine and COD removal, but simultaneously reduce the re-oxygenation rate because biofilm thickness and oxygen transfer resistance increased. When liquid velocity in the SPG-MABR was decreased under laminar flow condition, atrazine and COD removal was improved due to the facilitated contaminant diffusion from wastewater to biofilm. The atrazine removal efficiency reached to 98.6% in the SPG-MABR after 5d treatment at air pressure of 300 kPa, biofilm biomass of  $25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  and liquid velocity of  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . The microbial polymorphism of GEM biofilm was observed during the SPG-MABR operation. The surface of GEM biofilm was gradually covered by other microbial cells and the distribution of GEM cells reduced, but inside the GEM biofilm, the GEM cells were still dominant.

**Key words:** membrane-aerated biofilm reactor; genetically engineered microorganism; SPG membrane; atrazine; oxygen permeability coefficient

膜曝气-生物膜反应器(membrane aerated biofilm reactor, MABR)将膜技术与生物膜技术相结合<sup>[1-3]</sup>,逐渐成为水处理工艺研究的热点之一. MABR 反应器中膜外表面附着生长生物膜,膜内腔为压缩氧气或空气,气相中的氧通过膜孔扩散进入生物膜,在生物膜内完成污染物的去除. MABR 反应器采用无泡曝气<sup>[4,5]</sup>,氧直接以分子状态扩散进入生物膜,传质液膜阻力可以忽略,传质效率高,因而 MABR 反应器可以获得接近 100% 的极高氧利用

效率<sup>[6]</sup>. 同时, MABR 反应器中生物膜异向传质,底物和氧的浓度梯度方向相反,有助于实现处理功能活性层化,从而具有去除有机污染物和同步硝化反硝化脱氮功能<sup>[7,8]</sup>.

目前, MABR 中用于曝气的膜材料主要有 3 类:

收稿日期: 2014-01-06; 修订日期: 2014-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008111); 河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(11966726D)

作者简介: 刘春(1976~),男,博士,副教授,主要研究方向为废水生物处理技术, E-mail: liuchun@hebast.edu.cn

微孔膜、致密膜和复合膜<sup>[2]</sup>,此外还有采用可透气性织物或陶瓷膜进行无泡曝气的报道<sup>[9]</sup>. SPG (shirasu porous glass) 膜是一种具有均匀微小孔径的无机玻璃微孔膜<sup>[10]</sup>,在产生微气泡过程中得到应用<sup>[11~13]</sup>,也可以作为一种可能的膜材料应用于 MABR 反应器,但目前未有相关的研究报道.

基因工程菌应用于生物强化可以有效去除难降解污染物,加速处理启动过程,提高系统抗冲击能力,增强微生物群落结构及功能的稳定性<sup>[14~16]</sup>. 生物膜中细胞接触频率高,降解基因在生物膜中的迁移频率远远高于液相环境<sup>[17,18]</sup>. 运行膜曝气-基因工程菌生物膜反应器有利于降解基因在生物膜内的水平迁移,从而改善生物强化效果及其稳定性.

阿特拉津是世界上用量最大的除草剂,环境残留严重,生态风险较高,且废水排放不当会污染水源并危害农业生产<sup>[19,20]</sup>. 传统生物处理过程对阿特拉津的处理效果较差<sup>[21,22]</sup>,而采用基因工程菌生物强化可以有效提高阿特拉津生物去除效率<sup>[23,24]</sup>. 本研究在 SPG 膜表面形成基因工程菌生物膜,运行 SPG 膜曝气-生物膜(基因工程菌)反应器(SPG-MABR)处理阿特拉津废水,考察了不同运行条件下 SPG-MABR 中基因工程菌生物膜对阿特拉津的生物强化去除效果,并探讨了 SPG-MABR 的氧传质能力以及生物膜传质阻力和生物活性对氧传质能力的影响,以期为难降解废水提供一种新的生物强化处理技术.

## 1 材料与方法

### 1.1 菌株和菌悬液的制备

本研究使用的基因工程菌受体细胞为 *E. coli* DH5 $\alpha$ ,质粒载体为 pUC18,携带阿特拉津脱氯水解酶基因(*atzA*)、绿色荧光蛋白基因(*gfp*)及氨苄青霉素抗性基因<sup>[25]</sup>.

挑取单菌落于 LB 培养基中(含 60  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  氨苄青霉素),在 37 $^{\circ}\text{C}$ ,120~140  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  摇床转速下培养过夜,离心,磷酸缓冲液(pH=7.0)洗涤,收获细胞,一定量蒸馏水重悬,制成菌悬液备用.

### 1.2 SPG-MABR 反应器

SPG-MABR 反应器装置如图 1 所示. SPG 膜为管式亲水膜,膜管径为 1.0 cm,膜管长为 50 cm,膜孔径为 0.6  $\mu\text{m}$ ,膜面积为  $1.57 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ . 在 SPG 膜外侧形成基因工程菌生物膜,置于不锈钢柱形反应器中,反应器有效容积为 0.12 L,密封进水槽有效容积为 5L(即为处理水量). 采用液体循环泵实现

废水在反应器内的循环处理,通过调节循环流量控制反应器内液体流速. 具有一定压力的空气(低于泡点压力)从 SPG 膜内侧进行无泡曝气. 单纯 SPG 膜泡点压力 > 100 kPa,形成生物膜后泡点压力显著升高(>300 kPa).

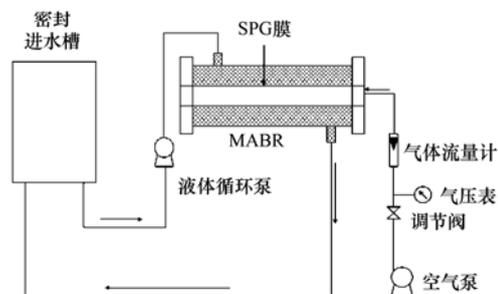


图 1 SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器示意  
Fig. 1 Schematic diagram of SPG membrane-aerated GEM biofilm reactor

### 1.3 SPG-MABR 反应器运行

挂膜:采用抽滤方法强化挂膜过程,以 SPG 膜为过滤介质,对 SPG 膜外侧一定量的基因工程菌悬液进行抽滤,将基因工程菌细胞截留至 SPG 膜外侧,在 SPG 膜外侧形成均匀致密的基因工程菌生物膜.

运行:挂膜完成后,在不同的运行条件(气压、挂膜生物量、液体流速)下进行间歇运行实验,运行周期为 7 d,处理阿特拉津浓度为 15~20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的人工配水<sup>[26]</sup>,处理水量为 5 L. 测定反应器内溶解氧(DO)浓度和污染物浓度(COD 和阿特拉津)随时间的变化,考察反应器的运行性能及运行条件的影响,并在此过程中对基因工程菌生物膜变化进行观察.

### 1.4 SPG-MABR 反应器透氧系数测定

无生物膜时,测定 SPG 膜在清水中的透氧系数. 加入  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{CoCl}_2$  去除清水中原有 DO,控制一定的气压和流速,进行无泡曝气,测定 DO 浓度随时间变化曲线. 通过式(1)线性回归得到斜率,即为单纯 SPG 膜无泡曝气透氧系数.

$$c \times V = f \times S \times t \times p \quad (1)$$

式中, $f$ 为透氧系数; $c$ 为 $t$ 时刻的 DO 浓度; $V$ 为处理水量; $S$ 为 SPG 膜表面积; $p$ 为气压.

存在生物膜时,在 SPG-MABR 反应器处理废水运行过程中,测定反应器内 DO 浓度和 COD 浓度随时间的变化曲线. 在 COD 去除阶段(12~36 h),通过式(2)线性回归得到斜率,估算透氧系数. 在随后的复氧阶段(72 h 后)通过式(1)估算透氧系数.

$$\Delta c \times V = f \times S \times \Delta t \times p \quad (2)$$

式中,  $f$  为透氧系数;  $\Delta c$  为  $\Delta t$  时间内 COD 的去除量;  $V$  为处理水量;  $S$  为 SPG 膜表面积;  $p$  为气压。

### 1.5 基因工程菌生物膜观察

在 SPG-MABR 反应器运行初期和末期, 从 SPG 膜上获取生物膜样品进行观察分析。通过扫描电子显微镜 (SEM) (HITACHI, S-4800-I, 日本) 观察生物膜微生物相的变化。采用荧光显微镜 (Motic, BA200, 中国) 对生物膜基因工程菌细胞的绿色荧光性进行观察<sup>[27]</sup>。采用荧光原位杂交 (FISH) 技术检测生物膜样品中 *atzA* 基因分布。所用 *atzA* 特异性荧光探针序列为: 5'-ACG GGC GTC AAT TCT ATG AC, 5' 荧光物质为 FITC。杂交后的生物膜样品置于荧光显微镜下进行观察<sup>[28]</sup>。

### 1.6 分析方法

DO 浓度采用溶解氧测定仪 (WTW cellOx 325, 德国) 测定。COD 采用国标法测定。

阿特拉津浓度: 含有阿特拉津的水样用 0.45  $\mu\text{m}$  的滤膜过滤后, 采用 HP1050 型 HPLC 检测, 色谱柱为 Aichrom C18 反相柱, 检测器为二极管阵列检测器, 检测条件: 流动相配比为甲醇: 水 = 70: 30, 检测波长为 223 nm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 气压对 SPG-MABR 反应器运行性能的影响

在液体流速为  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、生物量为  $25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  的条件下, 比较了气压为 200 kPa 和 300 kPa 时, SPG-MABR 反应器的运行性能。废水处理过程中阿特拉津浓度变化如图 2 所示。可以看到, 基因工程菌生物膜对阿特拉津具有良好的去除效果, 提高气压可以明显加快阿特拉津去除速率。气压为 300 kPa 时, 基因工程菌对阿特拉津 5 d 的去除率可以达到 98.6%。

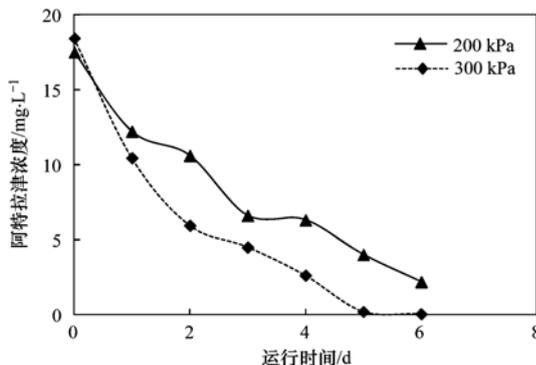


图 2 同气压下 SPG-MABR 中阿特拉津去除

Fig. 2 Atrazine removal in the SPG-MABR at different air pressures

运行过程中, DO 浓度以及 COD 浓度变化如图 3 和图 4 所示。可以看到, 在初始处理阶段 (0 ~ 2 d), DO 浓度迅速降低并维持在极低水平 ( $< 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 随后在复氧过程中, DO 浓度逐渐升高并趋于稳定。同时, 废水中的 COD 也是在初始处理阶段 (0 ~ 3 d) 去除最快, 去除率接近 80%; 随后 COD 几乎不再去除。这个过程反映了废水中的有机物在好氧代谢过程中对 DO 的利用消耗过程。同时, 气压较大时可以获得更快的 COD 去除速率和复氧速率。

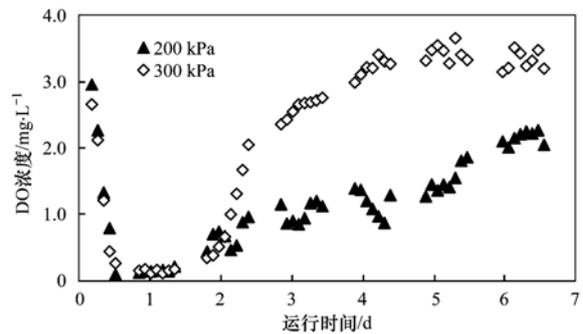


图 3 不同气压下 SPG-MABR 运行中 DO 浓度变化

Fig. 3 DO concentrations during SPG-MABR operation at different air pressures

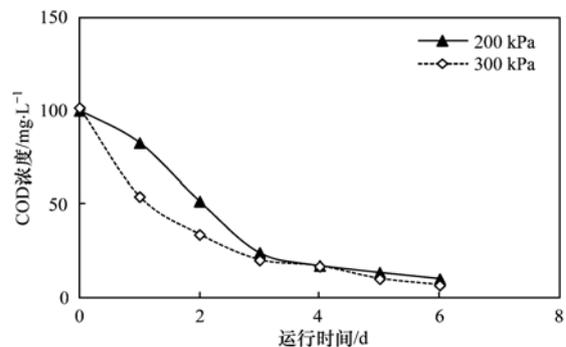


图 4 不同气压下 SPG-MABR 运行时 COD 浓度变化

Fig. 4 COD concentrations during SPG-MABR operation at different air pressures

通常认为, 氧扩散传质是 MABR 反应器运行的限制过程<sup>[2, 29]</sup>, 而气压是影响氧扩散传质的重要因素, 因而气压对 MABR 运行性能具有显著影响。初始处理 (COD 去除) 阶段, 由于 COD 的快速好氧降解, DO 在生物膜内基本被消耗, 因此液相主体中的 DO 浓度极低, 可基于此阶段 COD 的去除速率估算透氧系数。此时, 在 200 kPa 和 300 kPa 气压条件下, 基于 COD 去除估算的透氧系数分别为  $2.51 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar})^{-1}$  和  $2.82 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar})^{-1}$ 。COD 去除完成后为复氧阶段, DO 开始从生物膜内扩散到

液相主体,因此液相主体的 DO 浓度逐渐升高,在 200 kPa 和 300 kPa 气压条件下,通过 72 h 后的复氧曲线计算的透氧系数分别为  $0.15 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar})^{-1}$  和  $0.29 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar})^{-1}$ . 可见,300 kPa 气压下的透氧系数较高,因而 SPG-MABR 反应器运行性能较好,但反应器运行能耗也会随之增加.

此外,100 kPa 气压下单纯 SPG 膜透氧系数为  $3.31 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar})^{-1}$ ,与聚丙烯致密膜的透氧系数基本相当<sup>[30]</sup>. 和单纯 SPG 膜透氧系数相比,300 kPa 气压下(气压提高 3 倍),SPG-MABR 复氧阶段的透氧系数大幅下降,可见生物膜传质阻力显著降低了氧扩散传质的能力;同时,在 COD 去除阶段,SPG-MABR 的透氧系数大大高于复氧阶段,接近单纯 SPG 膜透氧系数,表明生物膜内好氧降解过程对 DO 的消耗可以强化氧扩散传质<sup>[29]</sup>.

## 2.2 挂膜生物量对 SPG-MABR 反应器运行性能的影响

在液体流速为  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、气压为 200 kPa 的条件下,比较了挂膜生物量为  $25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  时,SPG-MABR 反应器的运行性能. 废水处理过程中阿特拉津浓度变化、DO 浓度变化和 COD 浓度变化如图 5~7 所示. 可以看到,挂膜生物量较大时,污染物(阿特拉津和 COD)的去除速率有所提高,但 COD 去除后的复氧速率有所降低.

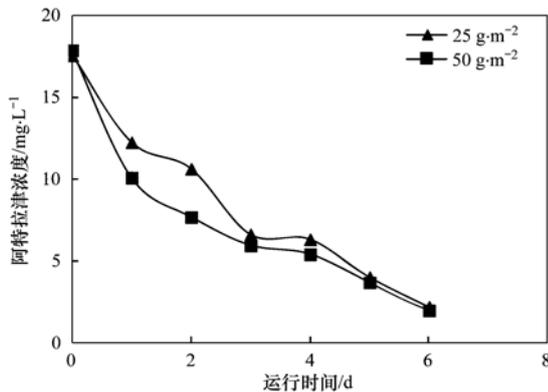


图 5 不同挂膜生物量下 SPG-MABR 中阿特拉津去除  
Fig. 5 Atrazine removal in the SPG-MABR  
at different biofilm biomasses

当挂膜生物量从  $25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  提高至  $50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  时,由于 COD 去除能力提高,COD 去除阶段的透氧系数从  $2.51 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar})^{-1}$  提高至  $3.50 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar})^{-1}$ ;同时由于生物膜厚度增加,增大了生物膜传质阻力,因此复氧阶段的透氧系数从  $0.15 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar})^{-1}$  降低至  $0.068 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar})^{-1}$ . 此结果进一步表明,生物膜本身

具有很强的氧传质阻力,但生物膜的代谢活性可以通过对 DO 的消耗促进氧扩散传质.

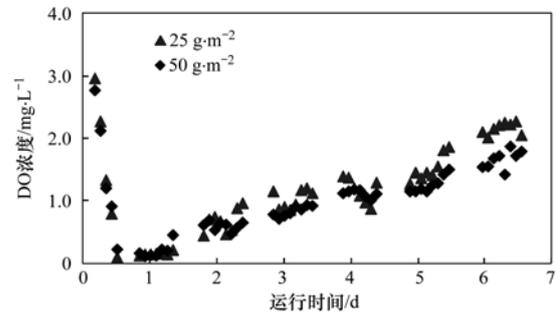


图 6 不同挂膜生物量下 SPG-MABR 运行中 DO 浓度变化  
Fig. 6 DO concentrations during SPG-MABR  
operation at different biofilm biomasses

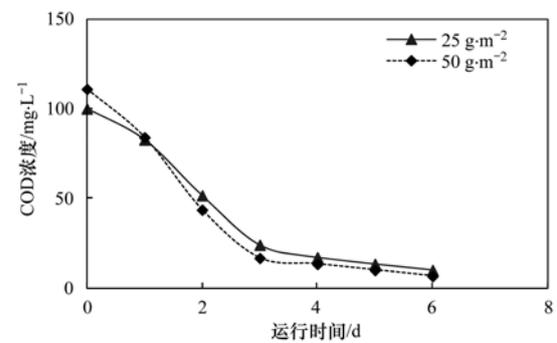


图 7 不同挂膜生物量下 SPG-MABR 运行时 COD 浓度变化  
Fig. 7 COD concentrations during SPG-MABR  
operation at different biofilm biomasses

## 2.3 液体流速对 SPG-MABR 反应器运行性能的影响

液体中的污染物向生物膜的扩散传质是影响 SPG-MABR 运行性能的另一主要因素,而液体流速对污染物的扩散传质具有重要影响. 反应器中液体流速  $< 0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时为层流状态,此时,污染物主要以分子扩散的方式从废水进入生物膜.

在气压为 200 kPa、生物量为  $25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  的条件下,比较了液体流速为  $0.025$ 、 $0.05$  和  $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,SPG-MABR 反应器的运行性能. 废水处理过程中阿特拉津浓度变化如图 8 所示. 可以看到,在较小的液体流速下,阿特拉津的去除速率较快. 同时,COD 的去除速率在较小的液体流速下也有所提高(数据未给出). 可见,在层流状态下,降低液体流速可以增加废水与生物膜的接触时间,有利于污染物向生物膜扩散传质,从而提高污染物去除速率.

需要指出的是,SPG-MABR 在不同条件下运行过程中,阿特拉津去除负荷范围为  $90 \sim 260 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ ,显著高于基因工程菌生物强化 MBR 反应器对阿特拉津的去除负荷 [70

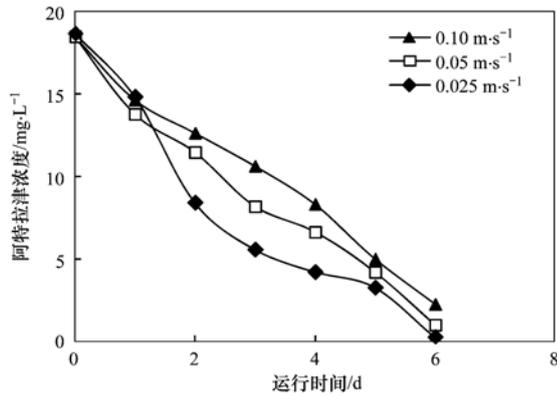
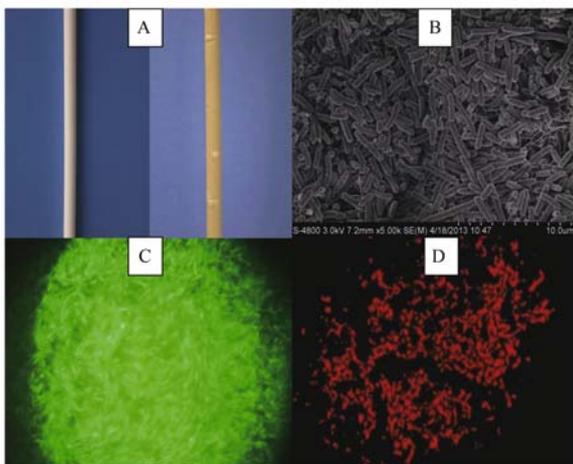


图8 不同液体流速下 SPG-MABR 中阿特拉津去除  
Fig. 8 Atrazine removal in the SPG-MABR  
at different liquid velocities

$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ]<sup>[23]</sup>,表现出 SPG-MABR 的工艺优势.

## 2.4 基因工程菌生物膜变化

对挂膜后运行初期的 SPG 膜表面基因工程菌生物膜进行观察,结果如图 9 所示. 由图 9A 可以看到,采用抽滤方法强化挂膜,可以快速形成均匀致密的生物膜. 采用 SEM 对生物膜进行观察,可以看到生物膜细胞形态均为杆状基因工程菌细胞[图 9B]. 基因工程菌细胞具有 *gfp* 基因标记,因此采用荧光显微镜直接观察生物膜,可以看到生物膜中基因工程菌具有明显绿色荧光现象[图 9C]. 采用 FISH 技术对生物膜中基因工程菌进行 *atzA* 基因检测,可以观察到均匀、丰富的 *atzA* 基因分布[图 9D]. 以上观察结果表明,SPG 膜表面形成了具有生物活性的基因工程菌生物膜.

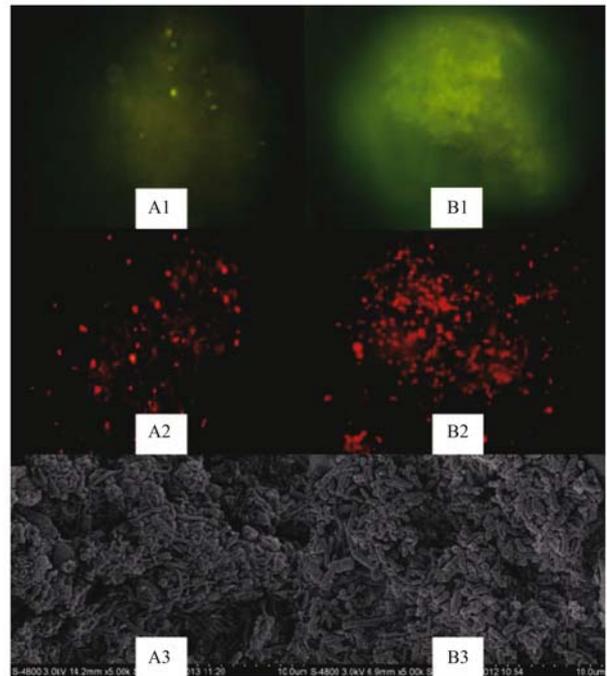


A. SPG 膜表面生物膜; B. 生物膜细胞形态; C. 生物膜基因工程菌绿色荧光观察; D. 生物膜 *atzA* 基因 FISH 检测

图9 运行初期 SPG 膜表面基因工程菌生物膜观察

Fig. 9 Observation of genetically engineered microorganism biofilm on the SPG membrane surface at the initial operation phase

对 SPG-MABR 反应器运行结束后的基因工程菌生物膜进行观察,结果如图 10 所示. 可以看到,生物膜表面的绿色荧光现象明显减弱(图 10A1),而且生物膜表面的 *atzA* 基因丰度也显著降低(图 10A2),而生物膜表面 SEM 观察表明杆状基因工程菌细胞减少,其它形态的微生物细胞大量出现(图 10A3). 可见,在 SPG-MABR 运行过程中,基因工程菌生物膜呈现微生物多态化趋势,特别是生物膜表面逐渐被其他微生物细胞覆盖,基因工程菌的分布减少. 然而,在生物膜内部绿色荧光现象仍较为显著(图 10B1),*atzA* 基因丰度也明显高于生物膜表面(图 10B2),且细胞形态仍然以杆状基因工程菌细胞为主(图 10B3),可见生物膜内部基因工程菌保持较好,因而 MABR 反应器在运行过程中,对阿特拉津的去除性能未受到明显影响.



A1. 生物膜表面绿色荧光观察; A2. 生物膜表面 *atzA* 基因 FISH 检测; A3. 生物膜表面细胞形态; B1. 生物膜内部绿色荧光观察; B2. 生物膜内部 *atzA* 基因 FISH 检测; B3. 生物膜内部细胞形态

图10 运行末期 SPG 膜表面基因工程菌生物膜观察

Fig. 10 Observation of genetically engineered microorganism biofilm on the SPG membrane surface at the final operation phase

## 3 结论

(1) 在 SPG-MABR 反应器运行中,提高气压可以增大透氧系数,从而提高阿特拉津和 COD 的去除速率以及复氧速率. 增加挂膜生物量能够提高阿特拉津和 COD 的去除速率;但随着生物膜厚度增加,

氧传质阻力增大,复氧速率降低. 层流状态下减小反应器中的液体流速,有利于污染物向生物膜扩散传质,从而提高污染物去除速率.

(2) 气压为 300 kPa、生物量为  $25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、液体流速为  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,SPG-MABR 反应器中基因工程菌生物膜对阿特拉津 5 d 的去除率可以达到 98.6%.

(3) 采用抽滤方式可以在 SPG 膜表面快速形成均匀致密的基因工程菌生物膜. 在 SPG-MABR 运行过程中,生物膜呈现微生物多态化趋势. 生物膜表面逐渐被其他微生物细胞覆盖,基因工程菌分布减少,生物膜内部仍然以基因工程菌细胞为主.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张杨,李庭刚,强志民,等. 膜曝气生物膜反应器研究进展 [J]. 环境科学学报, 2011, **31**(6): 1133-1143.
- [ 2 ] Casey E, Glennon B, Hamer G. Review of membrane aerated biofilm reactors [J]. Resources Conservation and Recycling, 1999, **27**(1-2): 203-215.
- [ 3 ] Syron E, Casey E. Membrane-aerated biofilms for high rate biotreatment: performance appraisal, engineering principles, scale-up, and development requirements [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(6): 1833-1844.
- [ 4 ] Vladislavljević G T. Use of polysulfone hollow fibers for bubbleless membrane oxygenation/deoxygenation of water [J]. Separation and Purification Technology, 1999, **17**(1): 1-10.
- [ 5 ] 汪舒怡,汪诚文,黄霞. 用于废水处理的膜曝气生物反应器 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, **7**(6): 131-137.
- [ 6 ] Gong Z, Yang F L, Liu S T, *et al.* Feasibility of a membrane-aerated biofilm reactor to achieve single-stage autotrophic nitrogen removal based on Anammox [J]. Chemosphere, 2007, **69**(5): 776-784.
- [ 7 ] Shanahan J W, Semmens M J. Multipopulation model of membrane-aerated biofilms [J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(11): 3176-3183.
- [ 8 ] Shanahan J W, Semmens M J. Influence of a nitrifying biofilm on local oxygen fluxes across a micro-porous flat sheet membrane [J]. Journal of Membrane Science, 2006, **277**(1-2): 65-74.
- [ 9 ] Yamagiwa K, Yoshida M, Ito A, *et al.* A new oxygen supply method for simultaneous organic carbon removal and nitrification by a one-stage biofilm process [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(4/5): 117-124.
- [ 10 ] Kukizaki M, Nakashima T. Acid leaching process in the preparation of porous glass membranes from phase-separated glass in the  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  system [J]. Membrane, 2004, **29**(5): 301-308.
- [ 11 ] 张磊,刘平,马锦,等. 基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2277-2282.
- [ 12 ] Kukizaki M, Wada T. Effect of the membrane wettability on the size and size distribution of microbubbles formed from Shirasuporous-glass (SPG) membranes [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, **317**(1): 146-154.
- [ 13 ] Kukizaki M. Microbubble formation using asymmetric Shirasuporous glass (SPG) membranes and porous ceramic membrane-A comparative study [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009, **340**(1): 20-32.
- [ 14 ] Eichner C A, Erb R W, Timmis K N, *et al.* Thermal gradient gel electrophoresis analysis of bioprotection from pollutant shocks in the activated sludge microbial community [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(1): 102-109.
- [ 15 ] Bathe S, Schwarzenbeck N, Hausner M. Plasmid-mediated bioaugmentation of activated sludge bacteria in a sequencing batch moving bed reactor using pNB2 [J]. Letters in Applied Microbiology, 2005, **41**(3): 242-247.
- [ 16 ] 刘春,郭亚楠,杨景亮,等. 基因工程菌生物强化处理系统微生物群落分析[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(12): 34-38.
- [ 17 ] Hausner M, Wuerzt S. High rates of conjugation in bacterial biofilms as determined by quantitative in situ analysis [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(8): 3710-3713.
- [ 18 ] 刘春,黄霞,杨景亮. 基因强化在难降解污染物生物处理和修复中的应用[J]. 微生物学通报, 2008, **35**(2): 286-290.
- [ 19 ] 任晋,蒋可,周怀东. 官厅水库中阿特拉津残留的分析和污染来源[J]. 环境科学, 2002, **23**(1): 126-128.
- [ 20 ] 叶常明,雷志芳,弓爱君,等. 阿特拉津生产废水排放对水稻危害的风险分析[J]. 环境科学, 1999, **20**(3): 82-84.
- [ 21 ] Ghosh P K, Philip L. Atrazine degradation in anaerobic environment by a mixed microbial consortium [J]. Water Research, 2004, **38**(9): 2277-2284.
- [ 22 ] Kontchou C Y, Gschwind N. Biodegradation of s-triazine compounds by a stable mixed bacterial community [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1999, **43**(1): 47-56.
- [ 23 ] 刘春,黄霞,孙炜,等. 基因工程菌生物强化 MBR 工艺处理阿特拉津试验研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 418-421.
- [ 24 ] 刘春,黄霞,王慧. 基因工程菌生物强化膜-生物反应器工艺启动期影响因素研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 1102-1106.
- [ 25 ] 刘春,李曼,杨景亮,等. 降解-示踪质粒的构建及性能评价研究[J]. 环境科学与管理, 2013, **38**(6): 53-58.
- [ 26 ] Huang X, Liu R, Qian Y. Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor [J]. Process Biochemistry, 2000, **36**(5): 401-406.
- [ 27 ] 刘春,黄霞,王慧. 绿色荧光蛋白标记阿特拉津降解基因工程菌的特性[J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1139-1143.
- [ 28 ] 郭渊明,刘春,郭亚楠,等. 不同生物反应器中基因工程菌生物强化处理阿特拉津研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 554-559.
- [ 29 ] Carles P N, Carlos D F, Susanne L, *et al.* Microbial activity catalyzes oxygen transfer in membrane-aerated nitrating biofilm reactors [J]. Journal of Membrane Science, 2013, **446**(1): 465-471.
- [ 30 ] Wei X, Li B A, Zhao S, *et al.* COD and nitrogen removal in facilitated transfer membrane-aerated biofilm reactor (FT-MABR) [J]. Journal of Membrane Science, 2012, **389**(1): 257-264.

## CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM <sub>10</sub> ) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China .....	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou .....	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou .....	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO <sub>2</sub> Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China .....	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China .....	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin .....	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter .....	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency .....	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process .....	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management .....	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period .....	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing .....	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain .....	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin .....	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI JIAN, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet .....	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China .....	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China .....	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures .....	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Under Acidic Conditions .....	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron .....	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zelite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution .....	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor .....	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration .....	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies .....	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor .....	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane .....	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling .....	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular .....	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB .....	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application .....	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing .....	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks .....	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China .....	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil .....	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil .....	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil .....	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N <sub>2</sub> O Emission .....	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N <sub>2</sub> O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China .....	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping .....	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China .....	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize .....	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings .....	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice .....	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI) .....	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B <sub>12</sub> on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2 .....	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp. ....	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake .....	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol .....	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2 .....	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon .....	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment .....	CUI Yan-ni, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD .....	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China .....	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH <sub>4</sub> Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak .....	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China .....	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

# 《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8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 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