

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲢鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究

王玉晓^{1,3}, 孔秀琴¹, 冯权^{2,4}, 卢海涛², 王德源³, 唐黎明³, 邢新会^{3*}

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050; 2. 北京思清源生物科技有限公司, 北京 100085; 3. 清华大学化工系教育部工业生物催化重点实验室, 北京 100084; 4. 中国科学院过程工程研究所生化工程国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 载体是生物膜移动床反应器(MBBR)工艺的关键影响因素, 利用亲水化改性聚氨酯载体构建 MBBR, 用于城市污水的中试研究. 反应器日处理能力为 $3 \sim 3.5 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$, 水力停留时间为 $7 \sim 8 \text{ h}$, 在连续进水(进水 $\text{COD } 140 \sim 280 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N } 30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总氮 $45 \sim 65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷 $2.5 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下对改性载体的挂膜速度、有机物和氮的去除效果及不同温度下的污水处理特性进行了研究. 140 d 的试验结果表明在 $24 \sim 28^\circ\text{C}$ 时, 载体上生物膜在 6 d 左右即可完成挂膜, 并达到稳定的处理效果. COD 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 TN 和 TP 的平均去除率分别为 70%、97%、70% 和 39%. 随着水温逐渐降低到 12°C 左右, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率依然能达到 97%, 表明通过添加改性载体可以提高反应器低温条件下的硝化能力.

关键词: MBBR; 城市污水; 改性聚氨酯载体; 脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3489-06

Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers

WANG Yu-xiao^{1,3}, KONG Xiu-qin¹, FENG Quan^{2,4}, LU Hai-tao², WANG De-yuan³, TANG Li-ming³, XING Xin-hui³

(1. College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Beijing Si Tsingyuan (BEST) Biotechnology Co. Ltd., Beijing 100085, China; 3. Key Laboratory of Industrial Biological Catalysis, Ministry of Education, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. State Key Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The carrier is the key influencers in moving bed biofilm reactor(MBBR), in this paper, a pilot scale apparatus was set up for treating municipal wastewater using modified cubic polyurethane carriers. For MBBR, the capacity of $3 \sim 3.5 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$, hydraulic residence time of $7 \sim 8 \text{ h}$, under the condition of continuous feed water ($\text{COD}: 140 \sim 280 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}: 30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TN}: 45 \sim 65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP}: 2.5 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), the speed of biofilm formation and removal effects of COD , nitrogen and phosphorus were studied. After 140 days, the results showed that the formation of biofilm on the carrier was very quickly under $24 \sim 28^\circ\text{C}$, and obtained stable treatment effect about 6 days. The COD , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN , TP average removal rates were 70%, 97%, 70%, 39%, respectively. As the temperature gradually decreased to about 12°C , a high $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal rate (97%) could still be maintained, which indicating that the modified carrier can be achieved a high nitrification rate at low temperature.

Key words: moving bed biofilm reactor(MBBR); municipal sewage; modified polyurethane carriers; nitrification and denitrification

传统的活性污泥法存在 COD 负荷低、硝化及脱氮效率差、处理性能在低温下难以保证等问题, 尤其是对于一些氨氮浓度较高的污水, 去除效果难以达到排放标准要求. 随着水质排放标准要求的逐年严格, 出水难以达到排放标准. 因此, 很多已经建成的污水处理厂面临提高处理能力和出水标准的问题. 通常采用添加或改进载体是一种有效的提高反应器中微生物浓度的方法, 可以提高反应器的容积负荷和处理效率^[1].

移动床生物膜反应器 (moving bed biofilm reactor, MBBR) 通过在反应器中添加生物载体, 使

微生物附着在载体上, 载体在反应器内随着混合液的流动作用而自由流化, 从而达到处理污水的目的. 反应器中悬浮载体能与污水频繁多次接触, 因此被称为“移动的生物膜”^[2]. MBBR 不仅克服了传统活性污泥法占地面积大、污泥膨胀及污泥流失等缺点, 还解决了固定床生物膜法需定期反冲洗、清洗滤料等复杂操作问题, 同时在保证传质效率的基础

收稿日期: 2012-02-11; 修订日期: 2012-04-09

基金项目: 国家高新技术研究发展计划(863)项目(2009AA062903)

作者简介: 王玉晓(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理, E-mail: xiaofenling28@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xhxing@tsinghua.edu.cn

上,克服了传统流化床反应器使载体流化动力消耗过大的缺点^[3],因此该技术在国内外得到了广泛的应用.而在我国近年 MBBR 虽然已开始出现工业应用案例,但生物膜载体及处理工艺以模仿国外技术为主,缺乏自主研发,相关基础研究,特别是生物载体开发和生物膜的机制研究比较滞后,已有的研究也主要停留在小试和中试研究阶段^[4],无法满足应用的需求.

对于 MBBR 工艺,生物膜载体是核心.目前,市场上存在很多不同形状、材料和比表面积的载体^[5].聚氨酯泡沫(polyurethane foam, PUF)被认为是理想的固定生物膜的多孔载体^[6],具有载体孔径可控,比表面积大,而且由于微生物容易在多孔载体里聚集成膜,避免剪切力的影响,从而可以通过 PUF 载体大小控制生物膜的结构.同时,在载体内外由于溶解氧传递的限制能形成好氧和厌氧环境,可以同时去除废水中的有机物和含氮化合物^[7],也可以通过形成结构可控的生物膜实现污泥减量化^[8].但是,通常的聚氨酯载体表面都是疏水性,载体流化时间长,载体挂膜速度慢,一般需要 20 d 以上,导致反应器启动耗时,影响了其在 MBBR 中的应用.由于微生物成膜及生物膜的稳定性与载体的亲水性及表面带负电性质密切相关,因此 PUF 多孔载体的亲水化改性是解决其流化和成膜慢的关键.本课题组前期对 PUF 亲水化改性途径做了一系列探索,利用直接发泡方法,成功建立了 PUF 多孔载体亲水化改性的方法,使其 PUF 材料和水的接触角大幅度减小,提高了载体表面的亲水性,从而显著提高挂膜速度,大幅度缩短载体流化时间,而且生物膜挂模量比未改性的高^[9,10].

本研究采用本课题组开发的表面亲水化改性的 PUF 多孔载体,构建 MBBR 反应器,通过实际污水的中试试验,分析亲水 PUF 载体的挂膜效果及其有机物、氮和磷的去除效果,尤其是低温下去除氮的效果,以期为进一步的机制研究和应用积累工程数据.

表 1 中试反应器的运行参数

Table 1 Operating conditions for the pilot-scale reactor

项目	水力停留时间/h	水量/ $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$	载体填充率/%	回流量/ $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$	回流比/%	水温/ $^{\circ}\text{C}$
参数	7~8	3~3.5	25	110	100	12~28

1.4 分析项目和方法

水质指标测定: COD 为重铬酸钾法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为苯酚-次氯酸盐光度法; TN 为紫外分光光度法; TP 为钼锑抗分光光度法^[11].

1 材料与方法

1.1 废水

中试地点在北京市高碑店污水处理厂,反应器的进水为初沉池的出水,试验期间其平均水质 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 分别为 208、40.63、53.60、3.24 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.2 MBBR 及改性载体

中试 MBBR 反应器结构为 $1.3 \text{ m} \times 0.9 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$,有效体积为 1 m^3 ,用计量泵控制进水量,在反应器的底部有穿孔曝气管,提供反应所需的溶氧并使载体流化.反应器平均分为 2 格,在出水口设置挡板和溢流堰,以减少载体流失及污泥损失,并将沉淀池内的污泥回流到第 1 个格内,试验装置如图 1 所示.

聚氨酯亲水化改性方法采用直接发泡^[9,10].载体的密度为 $28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,形状: $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$,孔径 $1.5 \sim 2 \text{ mm}$,对水滴的接触角为 35° (未改性的为 90° 左右).

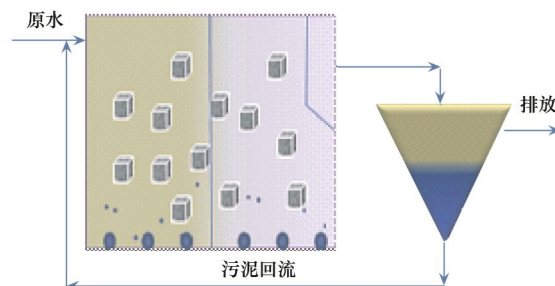


图 1 中试反应器装置示意

Fig. 1 Experimental apparatus of the pilot-scale reactor

1.3 试验方法

MBBR 中试反应器加入亲水改性后的载体,启动时接种一定量的来自污水处理厂曝气池的污泥,反应器连续运行超过 140 d,从 2011 年 5~11 月.反应器运行到 40 d 时将沉淀池的污泥回流,具体的操作条件如表 1 所示.

载体固定生物量的变化:将载体从反应器中取出,在烘箱 105°C 烘干,称重;之后将载体放入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液中,在 80°C 水浴 1 h,用去离子水洗净后再烘干,称重.根据前后载体的质量

差可以得到载体生物量的增量^[12].

试验结束后,取出反应器中的载体进行扫描电镜分析(SEM, Quanta 200, FEI, HongKong),观察载体中生物膜的形态.

2 结果与讨论

2.1 改性 PUF 载体成膜过程变化

2.1.1 改性载体挂膜量的变化

在中试反应器投加改性载体,连续进水后,其生物膜的变化如图 2 所示,可以明显看到,载体投加 10 d 后孔隙中已充满了污泥.

单位改性载体体积生物膜重量的变化如图 3 所示. 改性载体投加到反应器后基本浮在水面,但运行 3 d 后,观察到载体完全流化,从图 3 可以看出,

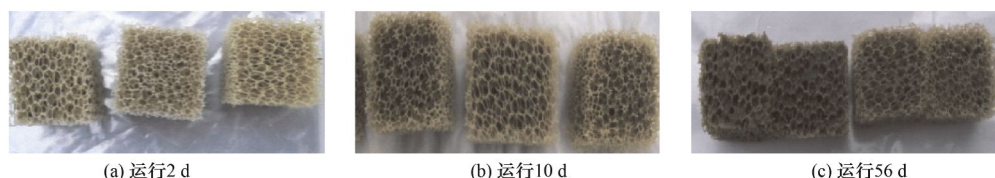


图2 连续运行过程中载体上生物膜的变化

Fig. 2 Changes of biofilm attached in reactor

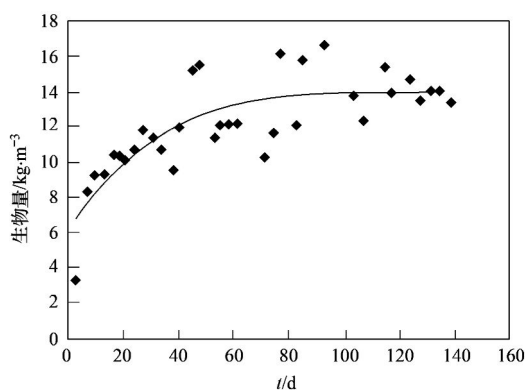


图3 改性 PUF 载体内的生物量变化

Fig. 3 Change in biomass concentration attached in carriers

本研究组前期的研究发现,亲水化改性载体促进了微生物成膜,这可能与载体的改性方法有关^[10];由于改性 PUF 载体是通过添加阳离子化学物质实现的,所以载体表面带正电荷而且具有亲水性. 根据改性载体的特性可以推测,由于通常的中性 pH 条件下大多数微生物都是带负电荷的,因此微生物更容易被改性载体吸附,而且载体与水的接触性好,在反应器中更容易流化,并与营养物充分接触,促进了微生物的生长和微生物膜的形成,从而实现反应器的快速启动.

2.1.2 改性载体内生物膜的电镜分析

改性载体生物膜量随运行时间迅速增加,但从 6 d 左右之后生物膜增加缓慢,说明挂膜基本完成. 载体上生物膜增重(以干重计)最大为 15 ~ 16 kg·m⁻³. 运行后期载体上生物量基本稳定,平均生物膜浓度在 14 kg·m⁻³左右. 和文献中的报道相比,Jun 等^[13,14]采用不改性的聚氨酯载体对实验室人工污水的处理需要 2 周可以完成挂膜,20 d 反应器才能达到稳定;Chu 等^[5]用聚氨酯载体的 MBBR 反应器需要 30 d 才能完成启动;Xing 等^[15]的研究表明采用聚氨酯载体的 MBBR 启动后前 10 d 变化大,但是需要 60 d 反应器才能达到稳定状态. 说明 PUF 亲水化改性后由于其亲水性,流化比未改性的载体快,微生物可以快速在其载体多孔结构内成膜,实现了反应器快速启动.

中试运行结束前,将长满生物膜的载体切片进行电镜观察,如图 4 所示. 载体上固定了大量的微生物,主要有球状、杆状和丝状的菌,还有原生动物. 并且载体上有大量的胞外丝状高分子物质,暗示改性载体内形成了稳定的微生物群落. 由于胞外多糖是生物膜形成的骨架^[16],这也解释了改性载体可以提高固定生物膜量和稳定地去除有机物及氨氮的效果.

2.2 COD 及氮的去除效果

2.2.1 COD 的去除

MBBR 反应器在整个运行过程中进出水 COD 的变化如图 5 所示,虽然进水有机物的浓度有一定的波动,但由于载体挂膜快,反应器出水很快达到稳定的处理效果,出水 COD 在 50 ~ 75 mg·L⁻¹之间,平均 COD 去除率达到 70% 左右,最大达到 91.32%. 由于添加改性 PUF 载体,反应器中污泥浓度高,抗有机物负荷变化的冲击能力强,出水水质相对稳定. 在连续运行到 11 月后,温度逐渐降低,但出水 COD 仍然基本保持稳定,说明温度变化对 MBBR 去除有机物的影响不明显.

2.2.2 氮的去除

MBBR 反应器进出水氨氮及总氮的变化如图 6

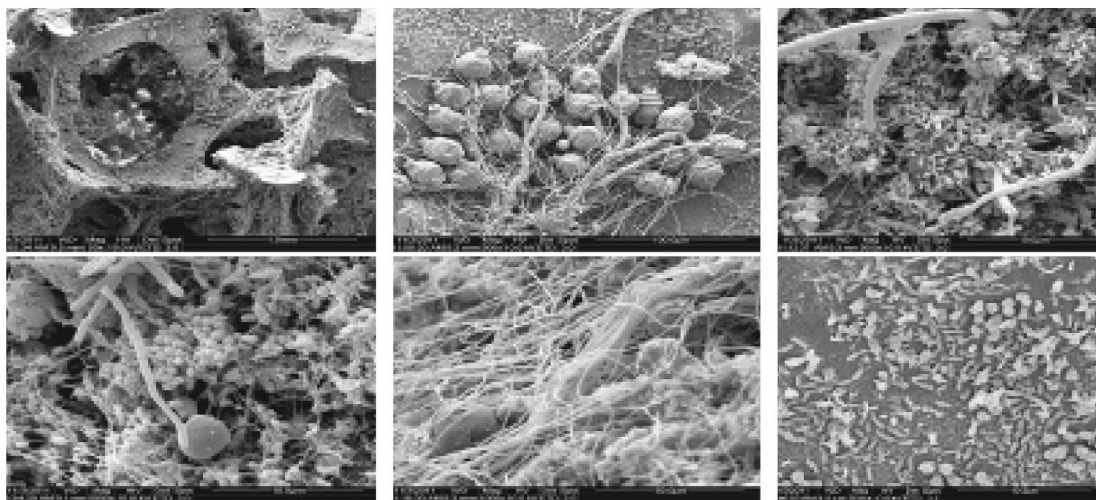


图 4 中试反应器载体内生物膜的电镜观察

Fig. 4 SEM image for biofilm in carriers

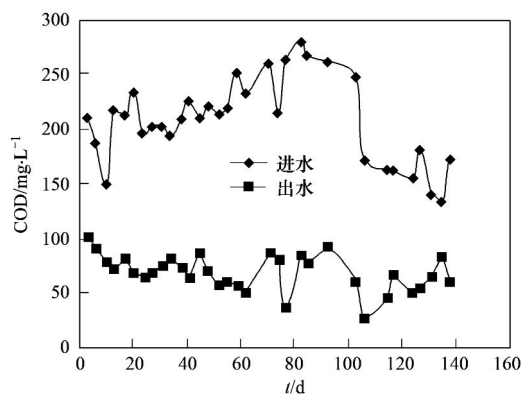


图 5 中试 MBBR 反应器进水和出水 COD 的变化

Fig. 5 Changes in COD of influent and effluent

所示,反应器进水氨氮浓度 $30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在改性载体挂膜 6 d 后,氨氮的去除率就能达到 95% ~ 97%,并且在运行后期温度低于 15°C 的情况下,氨氮的去除率依然保持 97% 左右,表现出高的低温耐受性. 对于活性污泥等生物处理,通常认为温度低于 15°C 后,硝化反应效率会降低^[17]. 张婷婷等^[18]的研究也表明温度对氨氮和总氮的去除有明显影响,随着温度的降低氮的去除效果降低. 但在添加亲水化改性 PUF 载体后,反应器在低温下保持高的氨氮去除效率的可能原因分析如下:《伯杰细菌鉴定手册》显示,亚硝酸单胞菌属 (*Nitrosomonas*) 的温度范围为 $5 \sim 30^\circ\text{C}$ 、亚硝酸球菌属 (*Nitrosococcus*) 的温度范围为 $2 \sim 30^\circ\text{C}$. 可以看出,硝化细菌在低温下是能够具有活性的,但由于生长慢,在连续处理反应装置里容易被冲出. 但如果硝化菌能够被改性多孔载体固定、避免流出体系外的话,低温条件下硝化反应能够产生. 根据本试验结果可以推测改性载体

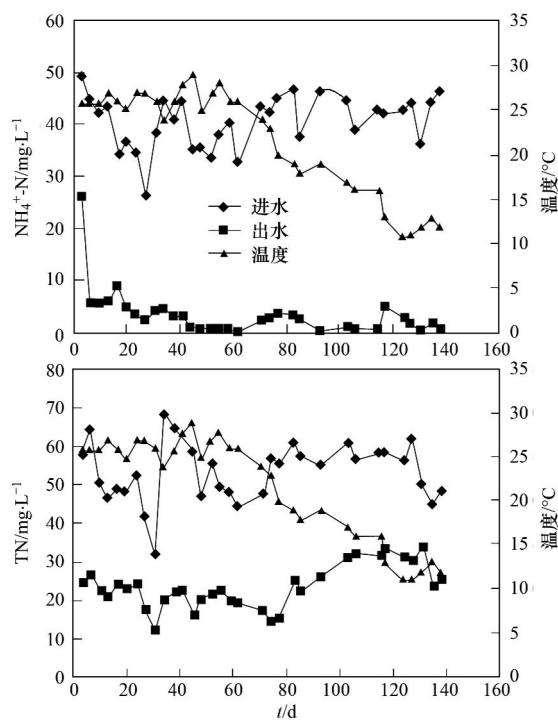


图 6 中试反应器进出水氨氮和总氮的变化

Fig. 6 Changes in ammonium nitrogen and total nitrogen of influent and effluent

可能富集了更多的在低温有活性的硝化细菌,从而保证了低温条件下的氨氮去除效果. 但具体的原因和机制目前结合快速宏基因组测序的方法,对低温条件下改性载体内的硝化菌的分布正在进行分析.

中试反应器运行稳定后,在没有外加碳源的情况下对总氮的平均去除率可以达到 55%,温度较高时总氮去除率达到 60.74%,与不改性载体相比脱氮效果有很大的改善. Chu 等^[5]报道 COD/TN 比在

3.7~4.2、HRT 为 14 h 时,实验室人工污水的氨氮去除率能达到 65%,但 TN 只能达到 20%,而增加 C/N 为 8.1 时 TN 的去除效果也只能达到 30%~55%。Xing 等^[15]采用不改性载体(填充率 25%)和 8 h 水力停留时间下,反应器稳定后对氨氮及总氮的去除率分别达到 60% 和 50% 左右;Guo 等^[7]用聚氨酯载体在 20% 填充率、HRT 为 8 h、COD/TN 为 20 的条件下,TN 的去除率也只能达到 30% 左右。而本研究处理的是实际污水,其 COD/TN 为 3.85~4.29,HRT 为 7~8 h,氨氮去除率就达到 95%~97%,平均总氮去除率达到 55%。从这些结果的比较可以推测表面亲水改性后的载体既可以实现 MBBR 的快速启动和稳定,并且能达到很好硝化和总氮去除效果。有文献报道,在利用卡尼滋填料的 MBBR 中硝化作用主要是由于悬浮微生物的作用,载体中有硝化活性的生物膜非常薄^[19~21]。因此,反应器运行 40 d 时将沉淀池的污泥回流一部分到曝气池,增加悬浮物的浓度,同时也提高硝酸根的反硝化作用。污泥回流后总氮的去除率增加到 70%,但是在运行的最后 64 d 由于随着温度降低及进水中有机物浓度降低,反硝化需要的碳源减少,总氮的去除率降到 40% 左右。

2.2.3 磷的去除

通常污水在经过厌氧-好氧处理后,通过定期排泥达到除磷的目的。在本研究的中试过程中,MBBR 反应器内没有设置单独的厌氧区,因此对磷的去除主要是通过微生物的合成代谢及悬浮微生物的流出而实现。磷的去除如图 7 所示,总磷的前期去除率达到 50% 左右,运行后期的除磷效果为 30%。中试过程中,悬浮微生物浓度平均为 $113 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,经过沉淀池沉淀后的 SS 平均为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最终流出的悬浮微生物浓度很低,沉积的污泥没有及时排除,导致厌氧条件下释放磷;也可能是由于前期生物膜在

载体上生长时消耗了一定的磷,随着载体上生物量的稳定,对磷的需求减少。

3 结论

(1)采用 25% 填充率的表面亲水改性聚氨酯载体构建的 MBBR 工艺,中试研究表明,亲水改性后载体 3 d 完全流化,需要的时间短,6 d 左右完成挂膜,挂膜速度快,试验中载体内微生物浓度稳定在 $14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,生物膜稳定,为稳定去除污水中有机物和氨提供了保障。

(2)中试过程中平均 COD 去除率达到 70% 左右,最大达到 91.32%,氨氮的去除率达到 95%~97%,将沉淀池污泥回流后总氮的去除率达到 70% 左右,对总磷平均去除率为 39%。

(3)当水温降低到 12°C 左右时,氨氮的去除依然保持了 97% 的去除率,说明添加改性聚氨酯载体的 MBBR 可以提高低温条件下的硝化效果。

致谢:感谢北京排水集团公司研发中心甘一萍总经理、常江总工、杨岸明工程师在中试中给予的大力支持和帮助!

参考文献:

- [1] Ødegaard, H. Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process[J]. Water Science & Technology, 2006, **53** (9): 17-33.
- [2] 张雪辉,周律,朱天乐. 移动床生物膜反应器载体亲水改性的试验研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 368-370.
- [3] 赵江冰,胡龙兴. 移动床生物膜反应器技术研究现状与进展[J]. 环境科学与技术, 2004, **27**(2): 103-106.
- [4] 邵曙海,崔崇威,张爱,等. 低温下两段式 MBBR 处理城市污水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2008, **24**(9): 93-96.
- [5] Chu L B, Wang J L. Comparison of polyurethane foam and biodegradable polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low C/N ratio[J]. Chemosphere, 2011, **83**(1): 63-68.
- [6] Ngo H H, Guo W S, Xing W. Evaluation of a novel sponge-submerged membrane bioreactor (SSMBR) for sustainable water reclamation[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(7): 2429-2435.
- [7] Guo W S, Ngo H H, Dharmawan F, et al. Roles of polyurethane foam in aerobic moving and fixed bed bioreactors [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(5): 1435-1439.
- [8] Yu A F, Feng Q, Liu Z H, et al. Biological wastewater treatment by a bioreactor with repeated coupling of aerobes and anaerobes aiming at on-site reduction of excess sludge[J]. Water Science and Technology, 2006, **53**(9): 71-77.
- [9] 唐黎明,王德源. 一种直接发泡制备亲水阳离子型聚氨酯泡沫塑料的方法[P]. 中国专利: CN102115546A, 2011-07-06.
- [10] 王德源,冯权,王玉晓,等. 阳离子型聚氨酯泡沫载体的制

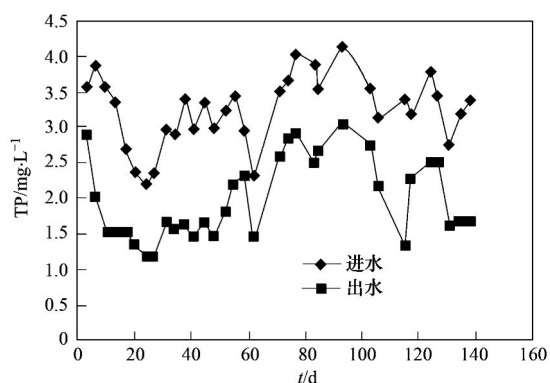


图7 中试反应器进出水 TP 的变化

Fig. 7 Phosphorus influent and effluent concentration

- 备及对活性污泥的吸附性能[J]. 高分子学报, 2012, (6): 679-684.
- [11] 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. 243-284.
- [12] Lazarova V, Pierzo V, Fontville D, *et al.* Integrated approach for biofilm characterization and biomass activity control[J]. Water Science and Technology, 1994, **29**(7): 345-354.
- [13] Jun B H, Tanji Y, Unno H. Stimulating accumulation of nitrifying bacteria in porous carrier by addition of inorganic carbon in a continuous-flow fluidized bed wastewater treatment reactor[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2000, **89**(4): 334-339.
- [14] Jun B H, Miyanaga K, Tanji Y, *et al.* Removal of nitrogenous and carbonaceous substances by a porous carrier-membrane hybrid process for wastewater treatment [J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, **14**(1): 37-44.
- [15] Xing X H, Shiragami N, Unno H. Simultaneous removal of carbonaceous and nitrogenous substances in wastewater by a continuous-flow fluidized-bed bioreactor[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1995, **28**(5): 525-530.
- [16] Ribeiro R, Varesche M B A, Foresti E, *et al.* Influence of extracellular polymeric substances on anaerobic biofilms supported by polyurethane foam matrices [J]. Environmental Engineering and Science, 2003, **20**(3): 249-255.
- [17] 张自杰. 废水处理理论与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [18] 张婷婷, 张建, 杨芳, 等. 温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1283-1287.
- [19] Lim J W, Seng C E, Lim P E, *et al.* Nitrogen removal in moving bed sequencing batch reactor using polyurethane foam cubes of various sizes as carrier materials[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(21): 9876-9883.
- [20] Walters E, Hille A, He M, *et al.* Simultaneous nitrification/denitrification in a biofilm airlift suspension (BAS) reactor with biodegradable carrier material[J]. Water Research, 2009, **43**(18): 4461-4468.
- [21] Liu Y, Capdeville B. Kinetic behaviors of nitrifying biofilm growth in wastewater nitrification process [J]. Environmental Technology, 1994, **15**(11): 1001-1013.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行