

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 ₂ 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溪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 ₃ /H ₂ O ₂ 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, 王雅娟, 千里里 (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, 阴芳芳, 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 与柠檬酸复配洗涤修复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 ₂ 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 ₂ 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 ₄ 和 N ₂ 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)
我国北方两地区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 ₁₂ 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)	

生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响

崔延瑞^{1,2}, 郭焱¹, 吴青¹, 马罗丹¹, 孙剑辉¹, 崔凤灵²

(1. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007;
2. 河南师范大学化学与化工学院, 新乡 453007)

摘要: 试验对比了不同生物活性炭(biological activated carbon, BAC)投加量对垃圾渗滤液去除 COD 效果的影响。每升活性污泥中活性炭投加量为 0、100、300 g 的反应器处理垃圾渗滤液 100 个周期平均 COD 去除率分别为 12.9%、19.6%、27.7%, 表明 BAC 可以去除部分难降解有机物, 并且 COD 去除率与投加量呈正相关关系。曝气 8 h 反应器中二氧化碳(CO₂)产生量依次为 109、193、306 mg, 表明生物分解量也与投加量呈正相关关系。分析认为 COD 去除率与投加量的正相关关系是由于吸附与生物再生的共同作用导致, 生物再生是 BAC 能够生物分解难降解有机物的根本原因。

关键词: 生物活性炭; 垃圾渗滤液; 二氧化碳产生量; 难降解有机物; 生物再生

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3206-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.08.052

Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment

CUI Yan-rui^{1,2}, GUO Yan¹, WU Qing¹, MA Luo-dan¹, SUN Jian-hui¹, CUI Feng-ling²

(1. Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory of Environmental Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: Effects of biological activated carbon (BAC) dosage on COD removal in landfill leachate treatment were compared. The COD removal efficiency of reactors with 0, 100 and 300 g activated carbon dosage per litre activated sludge was 12.9%, 19.6% and 27.7%, respectively. The results indicated that BAC improved the refractory organic matter removal efficiency and there was a positive correlation between COD removal efficiency and BAC dosage. The output of carbon dioxide after 8h of aeration in reactors was 109, 193 and 306 mg corresponding to the activated carbon dosages mentioned above, which indicated the amount of biodegradation and BAC dosage also had a positive correlation. The combination of adsorption and bioregeneration of BAC resulted in the positive correlation between organic matter removal efficiency and BAC dosage, and bioregeneration was the root cause for the microbial decomposition of refractory organics.

Key words: biological activated carbon(BAC); landfill leachate; output of carbon dioxide; refractory organics; bioregeneration

垃圾是现代城市生活和社会生产的产物, 渗滤液是垃圾卫生填埋的副产物。垃圾在堆放和填埋过程中由于发酵、雨水淋刷和地表水、地下水浸泡而渗滤出来的污水被称为垃圾渗滤液。因成分复杂, 含有大量难降解有机物、高浓度的氨氮和重金属^[1-3], 垃圾渗滤液的处理问题至今困扰着世界。

生物活性炭(biological activated carbon, BAC)是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型水处理技术, 它是在活性炭技术的基础上发展而来的。活性炭巨大的表面积和发达的孔隙结构, 是微生物生长繁殖的良好载体^[4, 5], 为微生物提供了一个有利的环境^[6]。BAC 能够获得比传统生物处理技术更高的处理效果, 常与其他技术联用处理难降解废水^[7-9]。但是, BAC 去除废水中有机物机制的解释尚未达成一致^[10-12], 影响 BAC 运行效果的因素尚不清楚, 工程应用受到制约, 阻碍了垃圾渗滤液处理技术的发展。

本研究比较了不同 BAC 投加量对垃圾渗滤液 COD 去除率的影响, 以 CO₂ 产生量量化微生物分解有机物量, 分析 BAC 投加量影响处理效果的原因, 以期认识 BAC 去除有机物机制和 BAC 工艺的应用提供支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料与分析方法

试验所用垃圾渗滤液取自某城市垃圾填埋场渗滤液调节池, 原水 COD 浓度 2 605 mg·L⁻¹, BOD₅ 浓度 292 mg·L⁻¹, pH 值 8.3 ~ 8.5。垃圾渗滤液稀释

收稿日期: 2014-02-10; 修订日期: 2014-04-12

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划项目(122300410282, 102300410098); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(12B610005); 河南师范大学青年科学基金项目(01036400071)

作者简介: 崔延瑞(1972~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制和环境污染物质分析, E-mail: yanruicui@hotmail.com

使用,每升稀释后的试验用水加入适量 KH_2PO_4 补充磷源,使用稀硫酸调整 pH 为 7.0~7.5.

试验所用活性污泥取自城市生活污水处理厂,在 SBR(sequencing batch reactor)反应器中驯化,每天运行两个周期,每个周期 12 h,进水期、反应期、沉降期、排水期和闲置期的时间分别为 0.5、8、1、0.5、2 h. MLSS 为 $3\,243\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SV_{30} 为 25%,泥水比 1:1.

试验使用柱状活性炭,直径 4 mm,堆积密度 $300\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 使用前用蒸馏水清洗以去除活性炭表面的杂质.

COD 采用快速消解法测定, BOD_5 采用五日培养法测定, pH 值采用 PHS-2S 型精密 pH 酸度计测定.

1.2 甲烷测定

甲烷浓度采用 Agilent6890 气相色谱测定,柱子型号 HP-5,检测器 FID,检测器温度 250°C ,进样口温度 100°C ,柱子温度 40°C ,进样量 $3\text{ }\mu\text{L}$,分流比 4:1. 甲烷色谱图如图 1,采用外标法进行定量分析,标准曲线如图 2,检出限 18 ng.

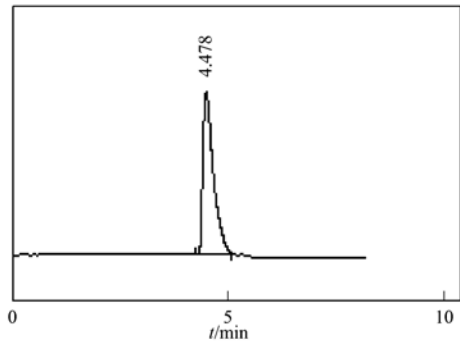


图1 甲烷色谱图

Fig. 1 Chromatogram of methane

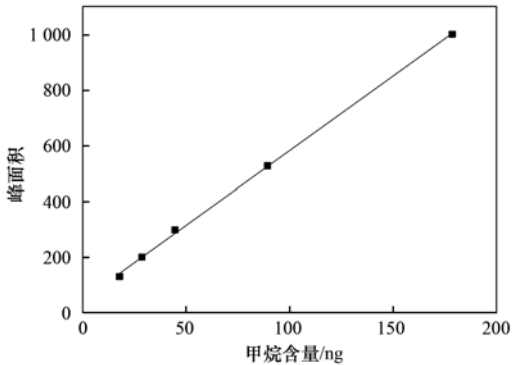


图2 甲烷工作曲线

Fig. 2 Curve of methane

1.3 SBR 反应器和 BAC 反应器

取 3 个体积为 5 L 的烧杯作为反应器,分别加

入驯化好的活性污泥和不同重量的活性炭,投加量如表 1 所示. 其中,A 为 SBR 反应器,B、C 为 BAC 反应器. 3 个反应器按照相同的方式运行,时间分配与活性污泥驯化期间保持一致,每周测定不同反应器的进、出水 COD 浓度.

表 1 反应器中活性污泥与活性炭投加量

Table 1 Activated sludge dosage and activated carbon dosage in reactors

项目	A	B	C
活性污泥体积/L	1	1	1
活性炭投加量/g	0	100	300

1.4 CO₂ 产生量的测定

1.4.1 反应器内 CO₂ 浓度的测定

CO₂ 浓度测定装置如图 3 所示,由反应器,干燥瓶和 CO₂ 浓度测定仪三部分组成,反应器工作体积 5 L. 排放气体经干燥后排出,一部分进入 CO₂ 浓度测定仪,多余部分排入空气.

1.4.2 反应器内 CO₂ 产生量的测定

反应开始前,反应器内不投加任何物质,通入高纯氮气(99.99%)或纯氧气(以下简称为氮气和氧气),以排除反应器内的残余 CO₂,控制气体流量为 $60\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,待反应器内 CO₂ 浓度稳定后,快速加入待测混合液,连续测定系统内 CO₂ 浓度的变化,每 12 s 记录一个浓度数值.

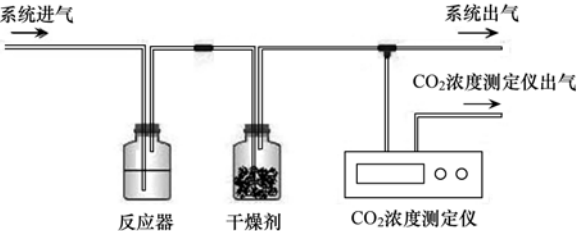


图3 CO₂ 浓度测定装置示意

Fig. 3 Diagram of carbon dioxide concentration measurement system

反应过程中 CO₂ 产生量计算如公式(1).

$$Q = \sum_{i=1}^n (c_i q \Delta t) - n c_0 q \Delta t \tag{1}$$

式中, Q : CO₂ 产生量, mg; c_0 : 反应开始前系统稳定状态的 CO₂ 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_i : 反应过程中, 仪器记录的第 i 个 CO₂ 浓度数值, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; n : 仪器记录 CO₂ 浓度数值的个数; Δt : CO₂ 浓度记录时间间隔, s; q : 曝气气体流量, $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$.

1.4.3 生物降解有机物 CO₂ 产生量的计算

氮气作为系统进气时,好氧微生物分解有机物产生 CO₂ 的反应不能顺利进行,在此条件下测得的

CO₂ 量为非生物作用的释放量,记做 Q_N ,可通过公式(1)计算得到.

氧气作为系统进气时,测得的 CO₂ 产生量,记做 Q_0 ,可通过公式(1)计算得到. Q_0 包括两部分,一部分为生物降解有机物释放的 CO₂ 量,另一部分为非生物作用释放的 CO₂ 量.

Q_0 与 Q_N 的差值为生物降解有机物 CO₂ 产生量,记做 Q_B ,可通过公式(2)计算得到.

$$Q_B = Q_0 - Q_N \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 BAC 投加量对垃圾渗滤液 COD 去除率的影响

2.1.1 SBR 反应器与 BAC 反应器的比较

试验连续运行 100 个周期,进出水 COD 平均值和去除率平均值如表 2 所示. A 反应器 COD 平均去除率为 12.9%,与文献中报道填埋年限较长的垃圾渗滤液中易降解有机物大约 10% 左右的试验结果相近^[13]. 垃圾渗滤液的生化性差,且含有大量抑制微生物生长的有毒物质,这是 SBR 法处理效果不高的主要原因^[14, 15].

B 反应器和 C 反应器的 COD 去除效果均优于 A 反应器. 表明 BAC 可以去除部分难降解有机物,这与 Imai 等^[16]的研究结果一致. 分析原因,BAC 反应器在运行过程中,活性炭可吸附水体中的多种有机物与有毒有害物质,同时为微生物的生长繁殖提供有利条件^[6, 17],延长有机物和微生物的停留时间,使得 BAC 反应器处理效果优于 SBR 反应器.

表 2 不同反应器 100 个周期进、出水 COD 平均值和 COD 去除率平均值

反应器	COD 平均值/mg·L ⁻¹		COD 去除率/%		
	进水	出水	最小值	最大值	平均值
A	656.8	570.5	3.0	21.4	12.9
B	656.8	526.8	11.1	25.5	19.6
C	656.8	474.1	17.8	38.0	27.7

2.1.2 BAC 投加量对 COD 去除率的影响

A、B、C 反应器连续运行 100 个周期的进水和出水 COD 如图 4 所示,投加量最大的 C 反应器 COD 去除率最高,无活性炭投加的 A 反应器 COD 去除率最低,B 反应器处理效果位于 A、C 反应器之间,结合表 2 数据可以得到 COD 的去除率与活性炭投加量呈正相关关系.

观察图 4 中 3 个反应器 COD 去除率随运行周期数的变化,可以发现,在运行初期的 1~40 周期,

COD 去除率差别较大,投加量最大的 C 反应器 COD 去除率能够保持在 30% 左右,A 反应器的 COD 去除率最低,B 反应器处理效果位于 A、C 反应器之间. 由此可见,在运行初期,活性炭投加量对 BAC 的处理效果具有较大影响. 结合试验条件,运行初期,活性污泥量相同,可以认为生物分解能力基本一致. 活性炭吸附容量与投加量呈正相关关系,因此吸附作用是导致 COD 去除率与活性炭投加量呈正相关关系的主要原因,分析认为运行初期 BAC 反应器内活性炭吸附作用占主导地位.

随着运行周期数的增加,在 41~80 周期中,B、C 反应器 COD 去除率波动较大. 图 4 可见,进水 COD 曲线平稳,可以排除进水浓度波动的影响,暗示出水 COD 波动是系统内部原因所致,处于重新建立平衡阶段. A 反应器 COD 去除率略有上升,可能与污泥中微生物进一步适应环境有关. C 反应器的 COD 去除率在 41 周期以后逐渐下降,与其他两个反应器比较,优势缩小,与活性炭吸附容量逐渐下降趋势一致. B 反应器 COD 去除率基本保持稳定,由于活性炭投加量小,受吸附作用下降的影响较小. 由此可见,随运行周期数增加活性炭的吸附作用对 BAC 处理效果的影响逐渐减弱. 但是,COD 去除率仍然与 BAC 投加量呈正相关关系,试验结果如图 4.

在 81~100 周期中,各反应器的 COD 去除率稳定,表明活性炭的吸附容量已经趋于饱和,系统的处理能力也达到新的平衡,可以认为 BAC 反应器运行进入稳定阶段. 比较 3 个反应器的处理效果,仍能清楚地观察到 C 反应器 COD 去除率最高,A 反应器 COD 去除率最低,B 反应器 COD 去除率处于二者之间. 表明在稳定阶段,活性炭投加量依然影响 BAC 反应器的处理效果,暗示不仅仅活性炭吸附作用影响处理效果,必定还存在其他方面的因素.

2.2 BAC 投加量对生物降解作用的影响

2.2.1 生物降解有机物 CO₂ 产生量测定

稳定运行阶段,A、B、C 反应器氮气和氧气曝气 CO₂ 浓度变化如图 5 所示,曲线具有相同的特征. 0 s 处 CO₂ 浓度处于 1~1.8 mg·L⁻¹ 之间,由于此时反应器内尚未投加混合液,CO₂ 浓度值是由空反应器中气体引起,随后快速下降并稳定在 0.8 mg·L⁻¹ 左右,说明反应器中残余 CO₂ 已经排空. 加入混合液后,CO₂ 浓度有一个明显的峰出现,然后,随曝气时间的延长,逐渐下降并趋于稳定.

氮气曝气条件下,为检验是否发生厌氧微生物

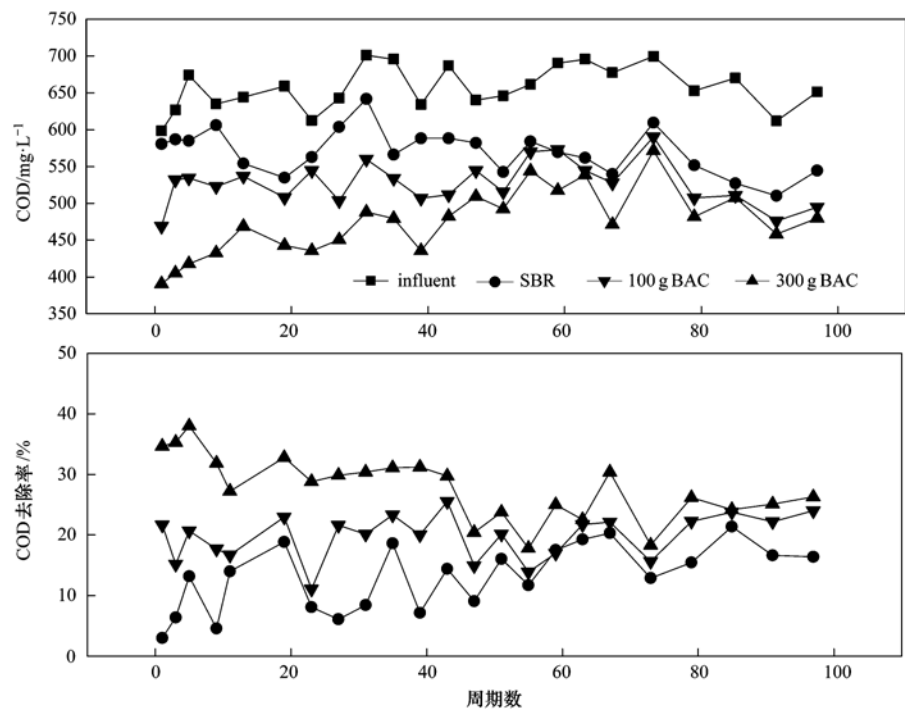


图4 A、B、C 反应器进出水 COD 值和 COD 去除率
Fig. 4 Influent and effluent COD and COD removal efficiency of reactors A,B,C

利用碳源产生甲烷和 CO₂ 的反应,在 8 h 曝气过程中,每间隔 1 h 取样测定,A、B、C 反应器均未检出

甲烷,表明在长期好氧工况下运行,一个周期(8 h)的氮气曝气并没有使厌氧菌驯化增殖,未发生厌氧分解. 氮气曝气条件下,好氧微生物无法获得氧气,好氧呼吸受到抑制,并且,氮气曝气消除了曝气气体中 CO₂ 的影响. Campos 等^[18] 报道垃圾渗滤液中碳酸氢铵可以释放出 CO₂,因此,加入混合液后 CO₂ 浓度突然增大,可以认为是混合液中溶存 CO₂ 被吹脱出来. 随曝气时间的延长,CO₂ 浓度降低,直至降低到接近加入混合液前的水平,完成吹脱过程.

氧气曝气条件下,消除了曝气气体中 CO₂ 的影响,氧气曝气曲线可以认为包含生物分解 CO₂ 部分和混合液中溶存 CO₂ 部分. 加入混合液后,溶存 CO₂ 开始被吹脱出来,同时废水中有机物开始被微生物分解放出 CO₂,二者叠加,出现较高的峰值,随后 CO₂ 浓度快速下降. 参考氮气曝气曲线,可以认为由于溶存部分的 CO₂ 贡献量减少引起峰值下降, A、B、C 反应器 CO₂ 浓度曲线,都表现出氧气曝气高于氮气曝气的结果,说明峰值下降以后,生物分解是 CO₂ 浓度居于高位的主要原因.

利用公式(1)和(2)计算 3 个反应器曝气 8 h 的 CO₂ 产生量,结果如表 3,可以得到生物降解有机物 CO₂ 产生量与 BAC 投加量呈正相关关系.

2.2.2 BAC 投加量对生物降解作用的影响

进一步分析表 3 数据,A、B 反应器中非生物作

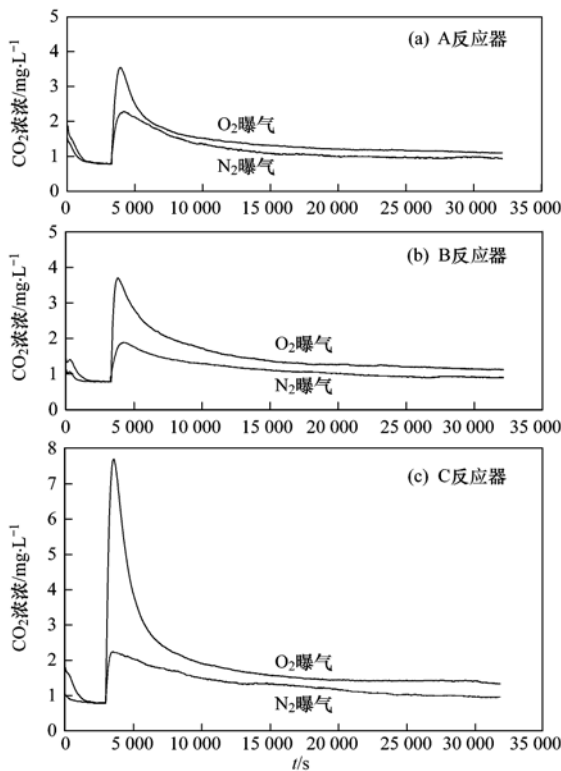


图5 A、B、C 反应器氮气和氧气曝气 CO₂ 浓度变化
Fig. 5 Concentration of carbon dioxide in reactor A,B,C versus time aeration with nitrogen or oxygen

用释放的 CO_2 量 Q_N 比较接近,与 B 反应器中 BAC 投加量较少有关. C 反应器中 Q_N 达到 636 mg,表明 BAC 投加量直接影响 Q_N 值. 但是,随着 BAC 投加量的增加, Q_O 值上升量更大,因此,两者相减得到的 Q_B 也呈上升趋势. 可以得到,生物降解产生的 CO_2 量随 BAC 投加量的增加而增加的结果,即微生物降解有机物的量与 BAC 投加量呈正相关关系.

表 3 A、B、C 反应器生物降解有机物 CO_2 产生量/mg

Table 3 Amount of carbon dioxide from biodegradable

organic in reactor A, B, C/mg

项目	A 反应器	B 反应器	C 反应器
Q_N	579	545	636
Q_O	688	738	942
Q_B	109	193	306

B、C 反应器 Q_B 值大于 A 反应器 Q_B 值的试验结果显示 BAC 反应器生物降解了更多有机物,表明 BAC 反应器 COD 去除效果优于 SBR 反应器的原因中存在生物降解能力提高的因素. 简言之,BAC 可以生物分解部分 SBR 难降解有机物. 进一步比较,BAC 投加量大的反应器比投加量小的反应器每周期降解有机物量更多,BAC 投加量是影响有机物去除效果一个重要因素. 增加 BAC 投加量对 COD 去除效果的提升不仅仅来自于吸附容量的提升,微生物降解有机物的量也得到提高.

2.3 BAC 投加量影响垃圾渗滤液处理效果原因分析

从吸附容量的角度可以较好地解释反应器运行初期有机物去除率与投加量呈正相关关系的原因^[19],但稳定运行阶段,有机物去除率与投加量也呈正相关关系,这个试验现象需要从 BAC 去除有机物机制的角度进行解释.

2.3.1 生物再生

在 BAC 系统中,微生物不仅可以降解水体中的有机物,还可以降解部分吸附在活性炭上的有机物,使活性炭的吸附能力得到恢复,这种现象被称作生物再生^[20]. 虽然生物再生的确切机制尚无定论^[21],但微生物可以使活性炭发生生物再生的事实已被广泛接受^[22~24].

BAC 投加量不同的反应器吸附容量不同. 投加量越大,吸附容量越大,吸附在活性炭表面的有机物量越多,可为微生物提供更多的基质,供其降解. CO_2 产生量的数据证实了这一点,如表 3,C 反应器内有机物降解总量最大,产生的 CO_2 量最多. 相应地,BAC 投加量大的反应器,其生物再生量较大,恢复的吸附容量大于投加量小的反应器. 再生后的活

性炭又可以继续吸附水中有机物,吸附作用与生物降解作用相互促进,BAC 投加量大的 C 反应器对垃圾渗滤液中 COD 的去除效果最好,试验结果如图 4 和表 2. 所以,生物再生是 BAC 能够生物分解 SBR 难降解有机物的根本原因.

2.3.2 难降解有机物的去除

垃圾渗滤液成分复杂,SBR 反应器在一个周期内的 COD 去除率仅为 12.9%,表明垃圾渗滤液中存在大量难降解有机物. BAC 可吸附水体中的一部分难降解有机物,延长有机物与微生物的接触时间. 对于大多数有机物,延长接触时间可增加降解量^[20, 25]. 因此 BAC 反应器可降解部分由于运行时间短 SBR 反应器降解量较少的难降解有机物,提高了有机物降解总量.

反应器吸附容量增大可以延长有机物停留时间,进而可以使更多的有机物得到降解,BAC 投加量大的反应器吸附和生物分解去除的难降解有机物量更多. 因此在稳定运行阶段,BAC 投加量大的反应器垃圾渗滤液的处理效果优于投加量小的反应器. 由于生物再生是通过吸附间接发生作用,所以,稳定运行阶段,3 个反应器的去除率差别缩小,试验结果如图 4. 但是,垃圾渗滤液的处理效果与 BAC 投加量的正相关关系明显存在. 综合以上分析,难降解有机物的去除导致稳定运行阶段 BAC 投加量与有机物去除率呈正相关关系.

2.3.3 微生物活性的提高

活性炭可以吸附水体中抑制微生物生长的有毒有害物质,提高微生物的活性,使其降解部分难降解有机物^[6, 26]. BAC 投加量大的反应器可以吸收更多的具有抑制作用的物质,为微生物提供更好的生长环境,使其在垃圾渗滤液的处理过程中具有较好的活性.

由以上分析可知,活性炭的投加量越多,吸附的有机物越多,处理效果越好,同时,吸附的有机物越多,导致生物再生量越多,生物分解的难降解有机物越多,这些因素都导致有机物去除量与 BAC 投加量呈正相关关系. 简言之,生物再生是 BAC 能够生物分解难降解有机物的根本原因,难降解有机物的去除导致稳定运行阶段 BAC 投加量与有机物去除率呈正相关关系.

3 结论

(1) SBR 反应器中投加活性炭构建的 BAC 反应器对垃圾渗滤液中 COD 的去除效果优于传统

SBR 反应器,生物再生是 BAC 能够生物分解难降解有机物的根本原因。

(2) CO₂ 产生量表明 BAC 反应器比 SBR 反应器生物分解有机物量更多,并且 BAC 投加量越大,生物降解的有机物总量越大。

(3) BAC 投加量与 COD 去除效果呈正相关关系,是影响垃圾渗滤液处理效果的重要因素。

参考文献:

- [1] Di Iaconi C, Ramadori R, Lopez A. Combined biological and chemical degradation for treating a mature municipal landfill leachate [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, **31**(2): 118-124.
- [2] Renou S, Givaudan J G, Poulain S, *et al.* Landfill leachate treatment: review and opportunity [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **150**(3): 468-493.
- [3] 董军, 赵勇胜, 张伟红, 等. 垃圾渗滤液中重金属在不同氧化还原带中的衰减[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(6): 743-747.
- [4] Buchanan W, Roddick F, Porter N. Removal of VUV pre-treated natural organic matter by biologically activated carbon columns [J]. *Water Research*, 2008, **42**(13): 3335-3342.
- [5] 王广智, 李伟光, 何文杰, 等. 活性炭性质对固定化生物活性炭净水效果的影响研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 2040-2044.
- [6] Lim P E, Lim S P, Seng C E, *et al.* Treatment of landfill leachate in sequencing batch reactor supplemented with activated rice husk as adsorbent [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **159**(1-3): 123-128.
- [7] Lee L Y, Ng H Y, Ong S L, *et al.* Ozone-biological activated carbon as a pretreatment process for reverse osmosis brine treatment and recovery [J]. *Water Research*, 2009, **43**(16): 3948-3955.
- [8] 林涛, 陈卫, 王磊磊. 臭氧-生物活性炭对南方河网典型污染物的去除特性[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1397-1401.
- [9] Chu W H, Gao N Y, Yin D Q, *et al.* Ozone-biological activated carbon integrated treatment for removal of precursors of halogenated nitrogenous disinfection by-products [J]. *Chemosphere*, 2012, **86**(11): 1087-1091.
- [10] Sirotkin A S, Koshkina L Y, Ippolitov K G. The BAC-process for treatment of waste water containing non-ionogenic synthetic surfactants [J]. *Water Research*, 2001, **35**(13): 3265-3271.
- [11] Oh W D, Lim P E, Seng C E, *et al.* Effect of initial biomass concentration on bioregeneration of 4-chlorophenol-loaded granular activated carbon: kinetic and efficiency studies [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2013, **88**(6): 1157-1163.
- [12] 刘红, 李安婕, 全向春, 等. 生物活性炭降解 2,4-二氯酚的特性[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 80-84.
- [13] Aziz S Q, Aziz H A, Yusoff M S, *et al.* Landfill leachate treatment using powdered activated carbon augmented sequencing batch reactor (SBR) process: Optimization by response surface methodology [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **189**(1-2): 404-413.
- [14] Halim A A, Aziz H A, Johari M A M, *et al.* Comparison study of ammonia and COD adsorption on zeolite, activated carbon and composite materials in landfill leachate treatment [J]. *Desalination*, 2010, **262**(1-3): 31-35.
- [15] 夏鹏飞, 魏晓云, 刘锐平, 等. 强化混凝-光电氧化组合技术深度处理垃圾渗滤液[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(1): 13-19.
- [16] Imai A, Onuma K, Inamori Y, *et al.* Biodegradation and adsorption in refractory leachate treatment by the biological activated carbon fluidized bed process [J]. *Water Research*, 1995, **29**(2): 687-694.
- [17] 赖波, 周岳溪, 杨平. 生物活性炭法处理 ABS 树脂生产废水[J]. *中国环境科学*, 2012, **31**(2): 254-259.
- [18] Campos J C, Moura D, Costa A P, *et al.* Evaluation of pH, alkalinity and temperature during air stripping process for ammonia removal from landfill leachate [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2013, **48**(9): 1105-1113.
- [19] Foo K Y, Lee L K, Hameed B H. Batch adsorption of semi-aerobic landfill leachate by granular activated carbon prepared by microwave heating [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **222**: 259-264.
- [20] Aktaş Ö, Çeçen F. Bioregeneration of activated carbon: a review [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, **59**(4): 257-272.
- [21] Nath K, Bhakhar M S. Microbial regeneration of spent activated carbon dispersed with organic contaminants: mechanism, efficiency, and kinetic models [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(4): 534-546.
- [22] Kim D J, Miyahara T, Noike T. Effect of C/N ratio on the bioregeneration of biological activated carbon [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(12): 239-249.
- [23] Walker G M, Weatherley L R. Bacterial regeneration in biological activated carbon systems [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 1998, **76**(2): 177-182.
- [24] 王晨, 马放, 山丹, 等. 固定化生物活性炭处理含硝基苯微污染水的可行性研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1490-1495.
- [25] 孔令宇, 张晓健, 王占生. 生物活性炭内吸附与生物降解协同去除有机污染物[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 777-780.
- [26] Miserez K, Philips S, Verstraete W. New biology for advanced wastewater treatment [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(4-5): 137-144.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) 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 ₂ 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 Yang, <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 ₃ /H ₂ O ₂ 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/Zeolite 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 SPC 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 ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yang (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ 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 ₄ and N ₂ 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 ₁₂ 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-rui, 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 ₄ 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