ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第8期
2014年8月15日

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,周凌晞,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,许楉洋,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,于奭,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,于奭,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_2O_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, 詹艳慧, 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,干里里(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砷、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,麦碧娴(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_2O 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_2O 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_2O 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_{12} 对脱氯功能蓝藻降解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)
稀有鮈鲫HMGR基因全长克隆及雄鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 …… 邓川,毛思予,熊力,张晓峥,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)

不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀

鲍国栋[1,2],左剑恶[1*],王雅娇[1],干里里[1]

(1. 清华大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084; 2. 清华大学深圳研究生院,深圳 518055)

摘要: 研究了作为污水管道局部修复材料的不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀行为. 采用动电位法研究了第 7、14、21、56 d 这 3 种材料在全部浸没在污水或以 2 d 为周期交替浸没在污水两种条件下的腐蚀电位和腐蚀速率,采用电化学阻抗谱(EIS)研究了第 56 d 这 3 种材料的电极过程,利用扫描电镜(SEM)和能谱(EDS)分析了第 56 d 腐蚀点的形貌和成分. 结果表明,在两种条件下 304 和 316L 的耐腐蚀性均好于 201,腐蚀速率均小于 201; 3 种不锈钢在交替浸没条件下的耐腐蚀性均优于全浸条件,在交替浸没条件下的腐蚀速率小于全浸条件; 在 304 和 316L 的表面形成了局部点腐蚀,在 201 的表面形成了区域性腐蚀.

关键词:不锈钢; 修复材料; 污水; 动电位; 电化学阻抗谱

中图分类号: X703.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)08-3002-05 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.08.023

Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor

BAO Guo-dong[1,2], ZUO Jian-e[1], WANG Ya-jiao[1], GAN Li-li[1]

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control (SKLESPC), School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The corrosion behavior of stainless steel 201, 304 and 316L which would be used as sewer in-situ rehabilitation materials was studied in the simulated sewage pipes reactor. The corrosion potential and corrosion rate of these three materials were studied by potentiodynamic method on the 7th, 14th, 21st, 56th day under two different conditions which were full immersion condition or batch immersion condition with a 2-day cycle. The electrode process was studied by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) on the 56th day. The microstructure and composition of the corrosion pitting were analyzed by Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive Spectrometer (EDS) on the 56th day. The results showed that 304 and 316L had much better corrosion resistance than 201 under both conditions. 304 and 316L had much smaller corrosion rate than 201 under both conditions. The corrosion resistance of all three kinds of stainless steel under the batch immersion condition was much better than those under the full immersion condition. The corrosion rate of all three kinds of stainless steel under the batch immersion condition was much smaller than those under the full immersion condition. Point pitting corrosion was formed on the surfaces of 304 and 316L. In comparison, a large area of corrosion was formed in the surface of 201.

Key words: stainless steel; restorative materials; wastewater; potentiodynamic; electrochemical impedance spectroscopy

随着城市的发展,旧城区的改建扩建,城市排水管网问题逐渐暴露出来. 截止到 2011 年底,我国城市排水管道总长度已达 41.4 万 km(中华人民共和国国家统计局,2011). 由于缺少规范的维护管理,许多管道出现了结构性或功能性的缺陷. 缺陷类型有渗漏、变形、断裂、表面腐蚀、支管错接、树根植入、管底沉淀物等. 管道修复是解决管道缺陷问题最直接的方法,可分为开挖修复和非开挖修复. 随着城市交通压力不断加大和开挖修复成本的增加,非开挖修复逐渐成为管道修复的一个新手段. 许多管道没有完全损坏,通过针对管道局部缺陷进行原位修复,便可恢复管道的功能. 国内外学者对不同缺陷的管道进行评价[1~4],结果表明大多数破损管道只存在局部缺陷,因此,局部修复是一种经济有效的污水管道修复方法.

不锈钢套管法是近年来在加拿大、日本、德国等出现的一种新颖非开挖管道内衬修复技术. 不锈钢套管的主体是由不锈钢管和密封橡胶组成. 修复过程是由专用修补器将不锈钢管导入管道缺陷处, 对修补器充气,待不锈钢套管紧贴管壁之后对修补器放气,由于不锈钢管带有单向锁扣,张开后无法弹回,便可内衬于缺陷处. 加拿大 Link-Pipe 公司使用的不锈钢发泡筒技术[5]采用不

收稿日期: 2013-12-24; **修订日期**: 2014-02-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07301-002)

作者简介: 鲍国栋(1989~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市污水管网运行管理与维护,E-mail:bgdth11@gmail.com

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

锈钢 316L，耐腐蚀性强，但价格昂贵. 这类局部修复方法由于成本较高，施工技术较为复杂，目前在国内还较难推广. 因此，寻找耐腐蚀性强且价格相对便宜的不锈钢对于此类修复方法在国内的推广具有重要意义. 国内外对污水管道内的腐蚀研究主要集中在对管道本身的腐蚀，如学者进行混凝土管的腐蚀研究等[6]. 而对不锈钢的研究则主要集中在某些因素的变化对不锈钢耐腐蚀性的影响，如氯离子的浓度变化对不锈钢的耐腐蚀性的影响[7]等. 也有一些学者报道关于不锈钢在海水中的腐蚀[8~10]. 只有少量文献报道关于不锈钢在实际污水中的腐蚀[11, 12]. 本研究自制了一个模拟实际污水管道状况的反应器，选用市场上常用的 3 种不锈钢作为对象，分析不锈钢在模拟污水管道环境下的腐蚀情况.

1　材料与方法

1.1　材料

选取不锈钢 201（1Cr17Mn6Ni5N）、不锈钢 304（0Cr18Ni9）、不锈钢 316L（00Cr17Ni14Mo2）这 3 种不锈钢. 将试样加工成直径 10 mm，厚 5 mm 的圆片，一面焊接铜导线，用环氧树脂封装并露出另外一面，面积为 0.78 cm^2[13]. 试验前试样先用1 500 号砂纸沿同一方向打磨，再用2 000 号砂纸垂直方向打磨，随后用去离子水清洗、风干、丙酮擦拭除油，最后再用去离子水清洗 3 次.

1.2　试验方法

如图 1 为模拟管道环境反应器示意. 反应器为长方体，尺寸为：长 800 mm × 宽 400 mm × 高 500 mm. 反应器的进水为北京市肖家河污水处理厂的进水，出水由一个可调节高度的溢流堰排出，每隔 2 d 调节溢流堰高度. 反应器中水温为 22.5 ~ 25.4℃，pH 为 7.7 ~ 8.1. 污水中主要污染物浓度：COD、Cl^-、SO_4^{2-} 分别为 250 ~ 350、71.6 ~ 164、75.2 ~ 131 $mg\cdot L^{-1}$. 反应器内上部气室中 H_2S 含量约为 69×10^{-3} $mg\cdot L^{-1}$. 3 种不锈钢每种 8 个共计 24 个试样，由两种长短不同的挂绳悬挂在污水中. 当溢流堰处于高位时，所有试样会全部浸没在污水中；当溢流堰处于低位时，挂绳较短的试样则会暴露在污水上方的气室中. 由此试验分为两种条件：每种不锈钢 4 个试样整个周期全部浸没在污水中（后简称全浸条件）；每种不锈钢 4 个试样是以 2 d 为周期交替浸没在污水或暴露在上部气室中（后简称交替浸没条件）. 分别于第 7、14、21、56 d 进行动电位测试，第 56 d 进行 EIS 测试和电子显微镜扫描.

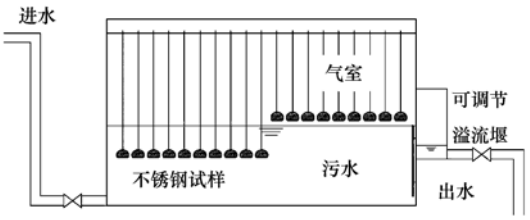

图 1　模拟管道反应器示意

Fig. 1　Diagram of simulated sewage pipe reactor

电化学测试选用 Potentiostat/Galvanostat Model27A 恒电位仪，采用三电极系统，辅助电极选用石墨惰性电极，参比电极选用选用饱和甘汞电极，工作电极为不锈钢试样. 动电位扫描速率为 1 $mV\cdot s^{-1}$，自开路电位下 250 mV 向上扫描.

2　结果与讨论

2.1　腐蚀电位

本研究选择 Tafel 直线外推法[14,15]测定几种不锈钢的腐蚀电位（E_{corr}）和腐蚀电流（i_{corr}）. 对动电位数据进行分析，得出两种条件下不锈钢的腐蚀电位和腐蚀速率. 图 2 为 3 种不锈钢在全浸条件和交替浸没条件下的腐蚀电位.

由图 2 可看出，随着时间的延长，E_{corr} 逐渐增大. 由于随着时间增加，表面发生腐蚀，形成腐蚀膜，阻碍了腐蚀. 3 种不锈钢的 E_{corr} 增长有一定波动，这是因为不锈钢的腐蚀电位需要较长的时间才能达到稳定[9, 10]. 在全浸条件下，304 和 316L 的 E_{corr} 相近，都明显大于 201. 说明 304 和 316L 的耐腐蚀性相近，都明显优于 201；交替浸没条件下的不锈钢试样也可得到相同的规律.

分析两图可看出，第 56 d 交替浸没条件下的不锈钢的腐蚀电位均大于全浸条件下的腐蚀电位. 分析可能是由于在交替浸没条件下比在全浸条件下，表面更容易产生生物膜. 一些学者报道生物膜的存在能够减缓水样对金属的腐蚀[16~19]. 说明在实际管道中，交替接触污水管道气体和污水能提高不锈钢的耐腐蚀性.

2.2　腐蚀速率

腐蚀电位是从热力学的角度分析腐蚀的可能性，即金属的耐腐蚀程度. 而腐蚀电流则能直接反映金属的腐蚀速率. 如图 3 分别为不锈钢在两种条件下的腐蚀速率.

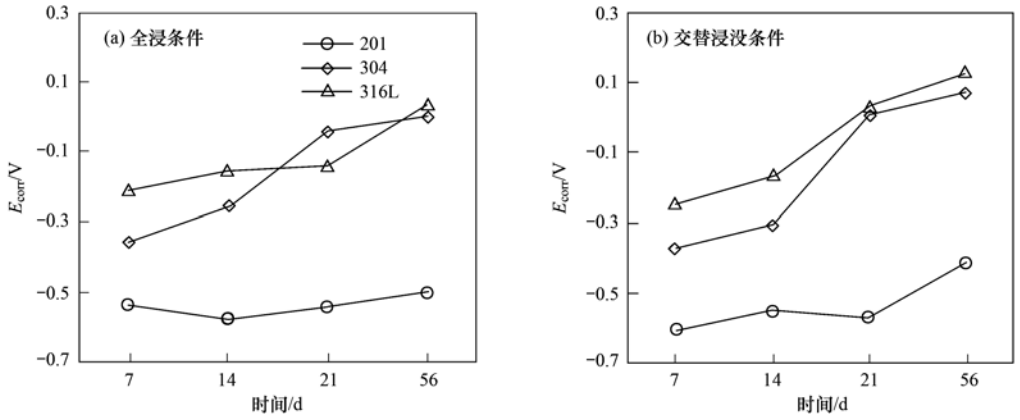

图 2 两种条件下不锈钢腐蚀电位

Fig. 2 The E_{corr} of stainless steel under two different conditions

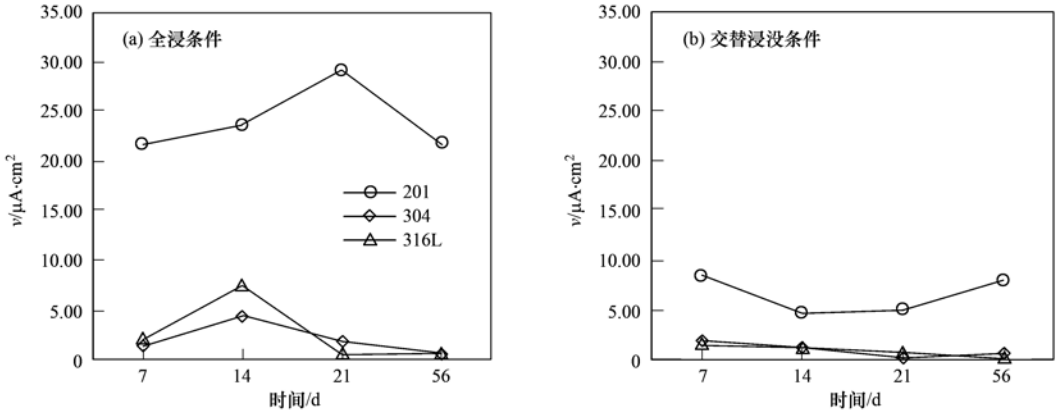

图 3 两种条件下的不锈钢腐蚀速率

Fig. 3 Corrosion rate of stainless steel under two different conditions

由图 3 可看出在全浸条件下,201 的腐蚀速率远大于 304 和 316L 的腐蚀速率; 在交替浸没条件下 201 的腐蚀速率远大于 304 和 316L 的腐蚀速率. 比较图 3 可看出,全浸条件下不锈钢的腐蚀速率大于交替浸没条件下不锈钢的腐蚀速率,分析可能是由于交替浸没条件产生的生物膜阻碍了污水对不锈钢表面的腐蚀. 这说明在实际管道中,交替暴露在管道气体和污水中减缓了不锈钢的腐蚀.

2.3 电化学阻抗谱

图 4 为 3 种不锈钢在两种条件经过 56 d 后测得的 Nyquist 曲线(其中 Z_{im}和 Z_{re}分别代表虚部和实部的阻抗). 文献[20]报道不锈钢的钝化膜具有双层结构,因此,可模拟成双层结构的电路,如图 5 所示. 其中 R_s 为溶液电阻,Q_1 为双电层电容; R_1 为

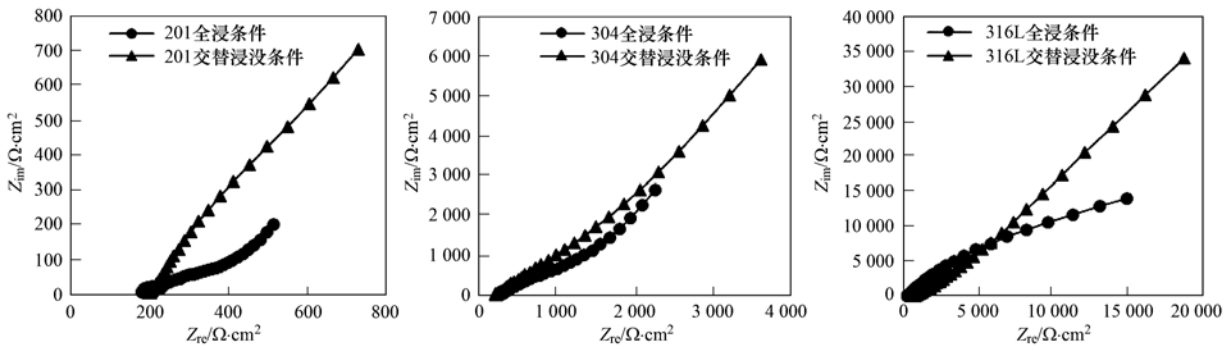

图 4 第 56 d 不锈钢的 Nyquist 曲线

Fig. 4 Nyquist plots of stainless steel at the 56th day

传递电阻；Q_2 为腐蚀膜电容；R_2 为腐蚀膜电阻. 其　　拟合结果如表 1.

表 1　不锈钢阻抗谱拟合结果

Table 1　Fitted results of the impedance spectra of stainless steel showed in Fig. 5

项目	$R_s/\Omega\cdot cm^2$	$Q_1/F\cdot cm^{-2}$	n_1	$R_1/\Omega\cdot cm^2$	$Q_2/F\cdot cm^{-2}$	n_2	$R_2/\Omega\cdot cm^2$
201 全浸条件	145.3	0.002	0.673 9	1 223	0.028 2	0.696 3	199.3
201 交替浸没条件	153.6	0.001	0.248 1	1 382	0.017 1	0.998 5	1 928
304 全浸条件	274.6	6.2×10^{-4}	0.898 2	3.89×10^{4}	2.3×10^{-4}	0.597 6	1 815
304 交替浸没条件	211.8	2.9×10^{-4}	0.896 7	5.02×10^{4}	2.4×10^{-4}	0.564 1	3 911
316L 全浸条件	259.7	4.7×10^{-5}	0.752 1	4.02×10^{4}	2.0×10^{-5}	0.776 8	3 590
316L 交替浸没条件	146.3	3.6×10^{-5}	0.489 2	1.37×10^{4}	1.8×10^{-5}	0.899 3	6.0×10^{4}

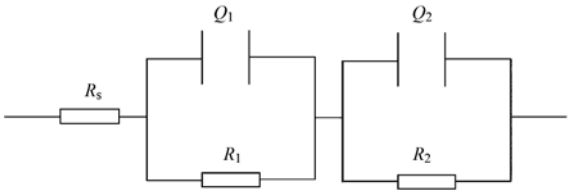

图 5　电化学阻抗谱等效电路

Fig. 5　Equivalent electron circuit of EIS

由表 1 可见，304 和 316L 的传递电阻和腐蚀膜电阻均远大于 201，而双电层电容和腐蚀膜电容远小于 201. 说明 304 和 316L 的腐蚀速率远小于 201. 将角频率 $\omega=0$ 代入此等效电路图，可得腐蚀过程的极化电阻 R_p. 经计算分别为：201 全浸条件 1 422.3 $\Omega\cdot cm^2$；201 交替浸没条件 3 310 $\Omega\cdot cm^2$；304 全浸条件 $4.07\times10^4\,\Omega\cdot cm^2$；304 交替浸没条件 $5.41\times10^4\,\Omega\cdot cm^2$；316L 全浸条件 $4.38\times10^4\,\Omega\cdot cm^2$；316L 交替浸没条件 $7.37\times10^4\,\Omega\cdot cm^2$. 可见 3 种不锈钢在交替浸没条件下的极化电阻分别大于在全浸条件下的极化电阻，说明不锈钢在交替浸没条件比在全浸条件下的腐蚀速率小，与动电位分析结果一致.

2.4　腐蚀形貌

通过 SEM 扫描观察了第 56 d 两种条件下 3 种不锈钢的腐蚀面貌，如图 6 所示.

由图 6 可知，不锈钢 201 在全浸条件和交替浸没条件下，点腐蚀坑较多且密集，已经形成了区域性的腐蚀；304 和 316 腐蚀点较少且分散. 201 在全浸条件下的腐蚀最为严重，可清晰看到一层腐蚀膜. 不锈钢的腐蚀主要以点蚀为主，普遍认为是由于 Cl^- 的存在[21~24]，夺走了不锈钢中的 Cr，导致不锈钢的耐腐蚀性降低，发生点蚀. 对第 56 d 不锈钢 201 的腐蚀点进行 EDS 分析，结果如表 2.

参照国标[25]中不锈钢 201 各元素的含量，由表 2 可看出 S 元素和 O 元素的含量较高，可能是腐蚀产物 Fe 的氧化物和硫化物.

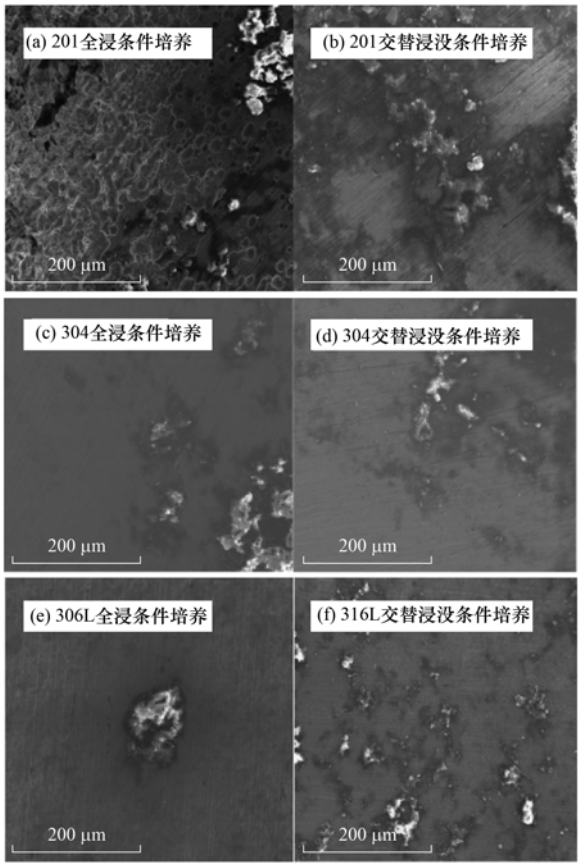

图 6　第 56 d 不锈钢的腐蚀微观形貌（×50）

Fig. 6　Corrosion microstructure of stainless steel on the 56th day（×50）

表 2　第 56 d 不锈钢 201 EDS 元素

Table 2　EDS elements table of stainless steel 201 on the 56th day

元素	全浸条件/%	交替浸没条件/%
O	13.69	23.18
Mg	0.67	0.54
Al	1.68	0.53
P	0.60	0.63
S	2.81	6.44
Ca	1.04	1.45
Cr	13.02	11.53
Fe	62.91	51.90
Ni	3.58	3.80
Totals	100.00	100.00

3 结论

(1)不锈钢 304 和 316L 在模拟管道反应器两种条件下的腐蚀电位相近,且明显高于不锈钢 201,说明在污水管道环境中不锈钢 304 和 316L 的耐腐蚀性相近,且明显优于不锈钢 201.

(2)不锈钢 304 和 316L 在模拟管道反应器两种条件下的腐蚀速率相近,且明显小于不锈钢 201.

(3)不锈钢 201、304 和 316L 在交替浸没条件下比在全浸条件下有更高的腐蚀电位和更小的腐蚀速率,说明在污水管道环境中交替接触管道气体和污水能够增强不锈钢耐腐蚀性,减缓腐蚀速率.

致谢:感谢桑德集团肖家河污水处理厂在试验过程中提供的帮助,感谢清华大学摩擦学国家重点实验室在试验过程中提供的技术支持.

参考文献:

[1] Terrero R. Pipeline infrastructure renewal at miami-dade water and sewer department[A]. In: Proceedings of the Piplelines 2012 Conference[C]. Miami, 2012.

[2] 赵巨尧, 周律, 安关峰, 等. 广州市排水管道的非开挖修复适用技术分析[J]. 水工业市场, 2012, (1): 55-58.

[3] 罗同顺, 左剑恶, 干里里, 等. 基于模糊综合评判模型的污水管道缺陷定量化评价方法[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(10): 2204-2209.

[4] Rutsch M, Rieckermann J, Cullmann J, *et al*. Towards a better understanding of sewer exfiltration[J]. Water Research, 2008, **42**(10-11): 2385-2394.

[5] Link-Pipe Inc. Grouting Sleeve[P]. US: NO. 5351720, 1994.

[6] 刘林湘. 城市污水管网的腐蚀与检测修复研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.

[7] Tsutsumi T, Nishikata A, Tsuru T. Pitting corrosion mechanism of Type 304 stainless steel under a droplet of chloride solutions [J]. Corrosion Science, 2007, **49**(3): 1394-1407.

[8] Kawakita J, Fukushima T, Kuroda S, *et al*. Corrosion behaviour of HVOF sprayed SUS316L stainless steel in seawater[J]. Corrosion Science, 2002, **44**(1): 2561-2581.

[9] 黄桂桥, 金威贤, 侯文泰. 不锈钢在海水中的耐蚀性与腐蚀电位的关系[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, **20**(1): 35-40.

[10] 黄桂桥. 金属在海水中的腐蚀电位研究[J]. 腐蚀与防护, 2000, **21**(1): 8-11.

[11] Englert G E, Muller I L. The corrosion behaviour of mild steel and type 304 stainless steel in media from an anaerobic biodigestor [J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 1996, **37**(4): 173-180.

[12] 祝安, 蒋秀娅, 肇启明, 等. 贵阳城市生活污水对不锈钢腐蚀, 结垢研究[J]. 环境科学与管理, 2010, **35**(7): 50-53.

[13] 李金波, 干里里, 左剑恶. 好氧细菌降低油田采出水对管钢腐蚀的研究[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(3): 284-289.

[14] 覃奇贤, 刘淑兰. 电极的极化和极化曲线(Ⅱ)——极化曲线[J]. 电镀与精饰, 2008, **30**(7): 29-34.

[15] 刘永辉. 电化学测试技术[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.

[16] 滕飞, 管运涛, 李莎莎, 等. 生物膜对给水铸铁管腐蚀结垢的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 396-401.

[17] 李雨, 王立达, 刘贵昌, 等. 微生物膜对 304 不锈钢腐蚀性能的影响[J]. 海洋环境科学, 2013, **32**(5): 721-724.

[18] 张大全, 刘卫国, 海涛, 等. 316L 不锈钢在回用污水培养微生物介质中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2005, **26**(7): 277-279, 283.

[19] 李相波, 王佳, 郭为民, 等. 微生物附着对不锈钢钝化性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, **26**(5): 295-298, 302.

[20] Darowicki K, Krakowiak S, Slepski P. Evaluation of pitting corrosion by means of dynamic eletrochemical impedance spectroscopy[J]. Electrochimica Acta, 2004, **49**(17-18): 2909-2918.

[21] 曲秀华, 许淳淳, 吕国诚, 等. 低硬度循环冷却水中 Cl^-, SO_4^{2-} 及水处理剂对 304 不锈钢腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, **29**(3): 187-190.

[22] 程学群, 李晓刚, 杜翠薇. 316L 不锈钢在含 Cl^- 高温醋酸溶液中的电化学行为[J]. 金属学报, 2006, **42**(3): 299-304.

[23] Zhu L K, Yan Y, Qiao L J, *et al*. Stainless steel pitting and early-stage stress corrosion cracking under ultra-low elastic load [J]. Corrosion Science, 2013, **77**: 360-368.

[24] Klapper H S, Goellner J, Burkert A, *et al*. Environmental factors affecting pitting corrosion of type 304 stainless steel investigated by electrochemical noise measurements under potentiostatic control[J]. Corrosion Science, 2013, **75**: 239-247.

[25] GB 1220-92, 不锈钢棒[S].

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 8

Aug. 15, 2014

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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2871)

Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin ····· ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, *et al.* (2878)

Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter ····· LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, *et al.* (2883)

Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency ····· SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, *et al.* (2890)

Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process ····· CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, *et al.* (2897)

Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management ····· BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, *et al.* (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, *et al.* (2920)

Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain ····· LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, *et al.* (2928)

Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin ····· LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2959)

Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China ····· CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, *et al.* (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, *et al.* (2974)

Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(Ⅳ)-catalyzed O_3/H_2O_2 Under Acidic Conditions ····· GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, *et al.* (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, *et al.* (2985)

Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution ····· FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (2992)

Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor ····· BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, *et al.* (3002)

Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration ····· WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, *et al.* (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, *et al.* (3012)

Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor ····· LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, *et al.* (3018)

Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane ····· ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, *et al.* (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, *et al.* (3031)

Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular ····· LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, *et al.* (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, *et al.* (3052)

Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing ····· DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, *et al.* (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, *et al.* (3066)

Reponses 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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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_2O Emission ····· CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)

Contribution of Different Processes in Wetland Soil N_2O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China ····· SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, *et al.* (3110)

Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH_4 and N_2O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping ····· WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, *et al.* (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, *et al.* (3128)

Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize ····· WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, *et al.* (3135)

Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of *Zenia insignis* Chun Seedlings ····· LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, *et al.* (3142)

Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice ····· LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, *et al.* (3149)

Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(Ⅵ) ····· WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, *et al.* (3155)

Promotion Effects of Vitamin B_{12} on the Degradation of 2,4,4′-Trichlorobiphenyl by *Nostoc* PD-2 ····· LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, *et al.* (3162)

Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain *Serratia* sp. ····· XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, *et al.* (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, *et al.* (3175)

Cloning of Full-length cDNA of HMGR from *Gobiocypris rarus* and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol ····· DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, *et al.* (3183)

Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2 ····· HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, *et al.* (3192)

Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(Ⅱ) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon ····· LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, *et al.* (3198)

Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment ····· CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, *et al.* (3206)

Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD ····· LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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