

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
喹啉降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素

孔德勇¹, 梁斌², 云慧², 王爱杰^{1,2}, 任南琪^{1*}

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境生物技术重点实验室, 北京 100085)

摘要: 为了探讨生物阳极能否降解氯霉素以及生物阳极反转为生物阴极后能否替代生物阴极, 通过驯化生物阳极降解氯霉素和生物阳极反转为生物阴极的实验, 表明生物阳极经过长期氯霉素浓度梯度增加 ($5 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的驯化, 具有较好产电能力的同时, 对氯霉素也具有一定的降解能力 ($k = 0.0985$)。生物阳极反转为生物阴极后将电位恒定在 -0.40 V vs. SHE 时, 该生物阴极相对于反转前生物阳极的电位 (-0.20 V vs. SHE) 有了明显的降低, 导致微生物活性受到一定的影响, 但阴极生物膜仍具有较强的催化降解氯霉素的能力, 其还原降解速率常数 k 为 0.2643 , 明显高于非生物阴极对照 ($k = 0.1609$)。生物阳极反转生物阴极的模式不仅实现了氯霉素的硝基还原, 而且发生了芳香胺产物侧链的完全脱氯和羰基还原反应。

关键词: 氯霉素; 降解; 驯化; 反转; 生物阴极

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1352-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.029

Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol

KONG De-yong¹, LIANG Bin², YUN Hui², WANG Ai-jie^{1,2}, REN Nan-qi^{1*}

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biotechnology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to investigate the possibility of the normal bioanode and bioanode switched to biocathode for the bio-electrochemical degradation of the antibiotic chloramphenicol (CAP), both the bioanode acclimated with CAP and the biocathode inversed from bioanode were monitored for CAP degradation in the bio-electrochemical system. The results demonstrated that the normal enriched bioanode could simultaneously generate current and degrade CAP ($k = 0.0985$, $35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of CAP) after a long-term acclimation by gradually increasing the concentration of CAP from $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. After switching bioanode to biocathode, the cathode biofilm was still capable of catalyzing CAP degradation, although it was influenced to some extent due to changed electrode potential from -0.20 V to $-0.40 \text{ V vs. standard hydrogen electrode (SHE)}$. The k of biocathode was 0.2643 , significantly higher than that of abiotic cathode ($k = 0.1609$). This mode of biocathode, which was switched from bioanode, not only had the ability of reducing nitro group in CAP but also catalyzed the complete dechlorination and carbonyl group reduction of the side chain of aromatic amine product.

Key words: chloramphenicol (CAP); degradation; acclimation; inversion; biocathode

氯代硝基芳香类抗生素氯霉素(chloramphenicol, CAP), 其作为有效的广谱抗生素在世界范围内已经广泛用于处理许多种致病菌, 然而由于氯霉素可以引起潜在的致癌性和遗传毒性^[1,2], 美国食品与药品管理局 (USFDA) 已经禁止在食品生产的动物上使用氯霉素。然而在许多国家仍然被广泛使用, 在这些国家的污水处理厂的进水和出水中都可以检测出低浓度的氯霉素残留^[3~6], 例如在香港地区污水处理厂中出水中检测氯霉素为 $3 \sim 1050 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[7], 在北京地区的养猪场废水中为 $1.49 \sim 11.5 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8], 在贵阳的城市污水中甚至可以高达 $5.8 \sim 47.4 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[9]。更令人担忧的是在全世界范围内, 在不同的污水处理厂, 饮用水处理厂

中, 均可以频繁检测到氯霉素抗性基因和其它抗生素抗性基因^[10,11], 这些由于抗生素残留引起的环境污染问题已经引起全球的广泛关注。因此在废水处理过程中, 去除氯霉素的抗菌活性和进一步降低环境生态系统氯霉素抗性细菌和抗性基因显得十分重要。

对于降解氯霉素, 主要的方法包括焚烧法^[12]、光催化降解、微波辐射、Fenton 氧化技术和电化学

收稿日期: 2014-09-26; 修订日期: 2014-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178140); 城市水资源与水环境国家重点实验室基金项目 (2013DX02)

作者简介: 孔德勇 (1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为 BES 系统降解废水中污染物, E-mail: kongdeyong0453@163.com

* 通讯联系人, E-mail: rnq@hit.edu.cn

氧化技术等物理化学方法, 这些方法虽然降解效率较高, 但受限于具有一定的能源浪费以及二次污染等缺点. 生物电化学系统(BES)是一种处理效率高且低成本的高新技术. BES生物阴极还原降解难降解污染物一直是近年来研究的热点, 如生物阴极还原降解硝基芳香烃类污染物(硝基苯及氯霉素)^[13~17]、偶氮类染料(酸性橙, 茜素黄和酸性黑)^[18,19]和氯代芳香烃等^[20]. 生物阴极的形成, 之前的研究主要是以预富集好具有降解特定污染物能力的富集液, 之后在阴极给电子环境作用下对这些特定微生物实现嗜电极微生物的阴极挂膜, 从而保证阴极微生物的催化降解污染物的特性. 生物阳极具有最重要的特性就是微生物燃料电池(MFC)中提到的理论即: 阳极微生物具有氧化有机物产生电子并通过电极表面将电子传导出外的能力, 从而实现了化学能到电能的转换, 也是近年来研究的热点问题之一.

生物阳极对抗生素类污染物进行降解报道较少^[21,22], 尤其是面对氯霉素这类对微生物毒性比较大的抗生素而言, 在阳极进行还原降解难度更大, 而且对产电微生物的产电能力也有极大的影响, 进而导致反应器的运行效能降低. 之前一些学者反转生物阳极进行了生物阴极催化合成氢气和甲烷以及还原硝酸盐研究^[23~25], 然而直接反转生物阳极为生物阴极降解有机污染物未见报道. 本研究分析了在长期氯霉素毒性刺激条件下生物阳极在正常产电的同时还原降解氯霉素的可能性, 以及生物阳极反转为生物阴极后能否加速还原降解氯霉素.

1 材料与方法

1.1 厌氧接种污泥及培养基配方

阳极微生物挂膜所需微生物菌源来自于哈尔滨太平污水处理厂二沉池污泥, 氯霉素(CAP)购买于美国Sigma-Aldrich公司, 其余化学品均为分析纯. 生物阳极液或反转后生物阴极液配方: $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$: 11.55 g; $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: 2.77 g; KCl : 0.13 g; NH_4Cl : 0.31 g; 乙酸钠: 1.68 g; 矿质元素液 1 mL; 微量元素液 1 mL; 1 L 去离子水. 非生物阴极液和恒电位仪控制下对电极溶液均为 50 mmol·L⁻¹ 磷酸盐缓冲液(PBS), 序批式降解实验均添加 35 mg·L⁻¹ 氯霉素.

1.2 反应器结构

双极室 BES 反应器为两个聚碳酸酯反应器模块(7 cm×7 cm×4 cm)组装而成, 每个模块具有中

空呈圆柱形的腔体(直径 5 cm, 长 4 cm). 模块用螺栓连接, 左右各用一块聚碳酸酯平板(7 cm×7 cm×1 cm)密封. 中间用阳离子交换膜(Ultrex CMI-7000, 膜国际, 美国)分隔, 单个极室体积为 85 mL. 阴阳极均为碳刷(直径 4 cm, 长 3 cm, TOHO TENAX Co., Ltd., 日本). 碳刷是用两根钛丝(直径 1 mm, 宝鸡力兴钛业, 中国)旋扭碳纤维而制成. 阳极生物膜的降解氯霉素驯化实验采用无隔膜升流式生物电催化反应器(UBER)完成^[14]. 二者反应器均外接 10 Ω 外电阻及 0.5 V 外加电压(直流电源 IT6921, Itech Co. Ltd., 美国). 饱和甘汞参比电极(0.247 V vs. SHE, 217 型, 上海雷磁, 中国)嵌入阴极室用于测量阴极电位. 阴阳极电位及电流通过数据记录仪计数获得(model-2700, 吉士利, 美国). 本研究中报道的电极电位数据都已换算成对标准氢电极(SHE).

1.3 反应器的运行

首先取 10 mL 二沉池污泥接种于含有阳极液的 BES 阳极室中, 运行 3 个循环, 每次均接种等量污泥, 之后不接种污泥更换阳极液运行 3 个循环, 共 6 个循环. 待阳极电位降至 -0.25 V、反应器电流稳定在 0.2~0.4 mA 时表明反应器阳极启动成功. 其次将生物阳极碳刷在厌氧条件下转移至 UBER 阳极进行生物阳极降解氯霉素驯化实验, 加入反应器内的氯霉素浓度由小至大依次增加(5、10、20、35、60、80 mg·L⁻¹). 5 mg·L⁻¹ 浓度运行 6 个循环, 其余浓度运行 2 个循环. 再次将驯化好的生物阳极安装在双极室反应器中运行生物阳极与非生物阴极同步还原降解氯霉素实验, 运行 3 个循环. 最后将生物阳极反转为生物阴极, 采用恒电位仪(WMPG1000K8, WonATech Co., 韩国)控制阴极电位 -0.40 V 运行 6 个循环. 去除生物阴极的生物膜继续运行 3 个循环作为非生物阴极对照实验.

1.4 分析方法

高效液相色谱法(model e2695, 沃特斯, 美国)分析氯霉素浓度和还原降解产物形成, 紫外检测器的检测波长为 275 nm 检测氯霉素和氯霉素乙酰化产物(Acetyl); 310 nm 检测亚硝基(NO); 250 nm 检测芳香胺产物(AMCl₂、AMCl 和 AM). 色谱柱是 C18 反向色谱柱(5 μm; 5 mm×250 mm, 沃特斯, 美国), 柱温设定为 30℃, 流动相比比为 55% 甲醇/45% 水, 流速为 0.8 mL·min⁻¹. 高效液相色谱-质谱联用仪(LC-MS)由液相色谱(model-1200, 安捷伦, 美国)搭配高精度飞行时间四极杆质谱(model-

6520, 安捷伦, 美国) 组成, 色谱柱采用安捷伦 C18 柱 (1.8 μm ; 2.1 mm $\times$ 100 mm), 设定负离子模式运行, 流动相配比为 55% 甲醇/45% 水, 流速为 0.10 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 紫外检测器设定波长为 250 nm 和 275 nm. 电化学工作站 (CHI-660E, 辰华, 上海) 用于生物阳极反转前后循环伏安 (CV) 曲线的扫描和交流阻抗 (EIS) 分析. 本研究提到的氯霉素还原降解效率 (E_r , %) 通过如下公式获得:

$$E_r = \frac{c - c_0}{c} \times 100\% \quad (1)$$

式中, c 为氯霉素实时浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c_0 为氯霉素初始浓度 (35 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 还原速率常数 k 值运用 SigmaPlot V. 12.0 软件拟合准一级动力学降解曲线获得.

2 结果与讨论

2.1 生物阳极的启动及其降解氯霉素的驯化

取二沉池污泥接种于含有阳极液的 BES 反应器阳极, 外加 0.5 V 电压, 对电极 (非生物阴极) 添加 35 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯霉素. 实验结果如图 1(a) 所示, 在

整个 420 h 的启动阶段, 阳极和阴极的电位分别降到 -0.15 V 和 -0.65 V 所需的时间约为 96 h, 在之后 5 个循环阴阳极电位保持不变, 电流则逐渐增加至稳定阶段, 表明生物阳极启动成功. 此时的生物阳极表面已经附着大量的产电微生物, 产生的电子通过阳极传导到阴极表面进行非生物阴极还原氯霉素. 取出具有产电能力的生物阳极置于无隔膜 UBER 反应器进行降解氯霉素的驯化, 与双极室反应器的不同之处在于 UBER 反应器无隔膜且阴阳极同处一室, 因此氯霉素的降解除了非生物阴极降解之外还包括了生物阳极潜在的生物降解. 氯霉素的初始驯化浓度为 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 共运行 6 个循环. 如图 1(b) 所示, 当反应器运行至 100 h 时, 阴阳极电位分别维持在 0.10 V 和 0.60 V 左右, 电位较之前大幅升高说明具有产电能力的阳极产电微生物受到氯霉素的毒性影响. 反应器运行至 200 h 后, 阴阳极电位依次稳定在 -0.20 V 和 -0.70 V 左右, 而电流值也逐步稳定在 0.5 ~ 1 mA 之间, 表明阳极表面产电微生物已经能够在氯霉素存在的条件下进行正常的代谢和产电.

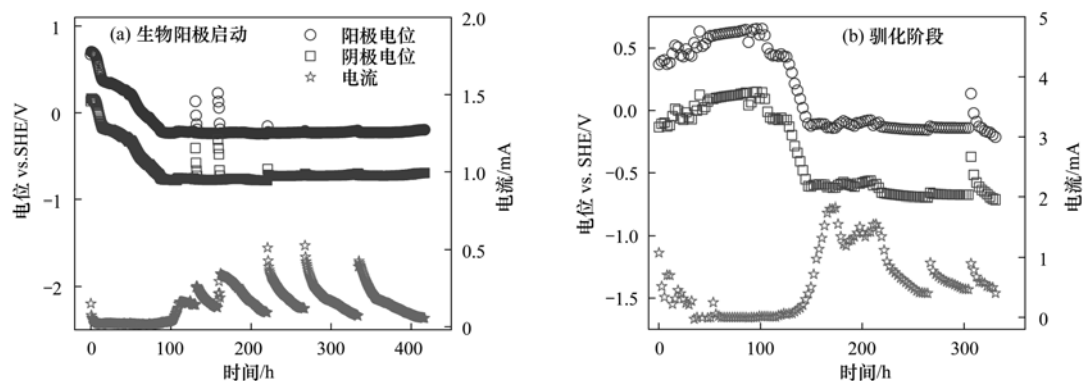


图 1 生物阳极启动及其驯化阶段的电位与电流变化

Fig. 1 Changes of potential and current in the process of starting up and acclimation of bioanode

在 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下稳定运行后, 增加氯霉素浓度进行生物阳极的高浓度驯化实验. 氯霉素浓度从低到高 (5 ~ 80 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 共 6 种浓度梯度的降解, 分别用准一级动力学方程拟合出降解速率常数 k . 如图 2 所示, 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 $E_{r_{1h}}$ 为 63.81% $\pm$ 3.96%, k 值为 1.023 $\pm$ 0.189, 随着氯霉素浓度的增加, $E_{r_{1h}}$ 和 k 值稳步增加, 至 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 $E_{r_{1h}}$ 和 k 值达到最大分别为 92.69% $\pm$ 1.81% 和 2.071 $\pm$ 0.222. 表明氯霉素浓度从 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 微生物在此浓度范围内没有受到明显的影响. 当氯霉素浓度增加至 35 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $E_{r_{1h}}$ 和 k 值分别降低至 59.45% $\pm$ 3.94% 和 1.037 $\pm$ 0.051, 表明生物阳极

嗜电极微生物在此浓度下受到较大的影响, 其产电能力和降解能力降低. 继续增加氯霉素浓度至 60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $E_{r_{1h}}$ 和 k 值又有所回升, 继续升高浓度至 80 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $E_{r_{1h}}$ 和 k 值再次降低. 这种氯霉素降解效率和速率呈阶梯式增加的现象, 表明嗜电极微生物与氯霉素浓度存在着抑制与克服的矛盾关系. 该生物阳极对氯霉素的耐受浓度从 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提升至 80 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明降解氯霉素的生物阳极驯化成功.

2.2 生物阳极和非生物阴极同步降解氯霉素

生物阳极驯化成功后, 将其从 UBER 反应器中取出装入双极室 BES 反应器, 对电极为非生物阴

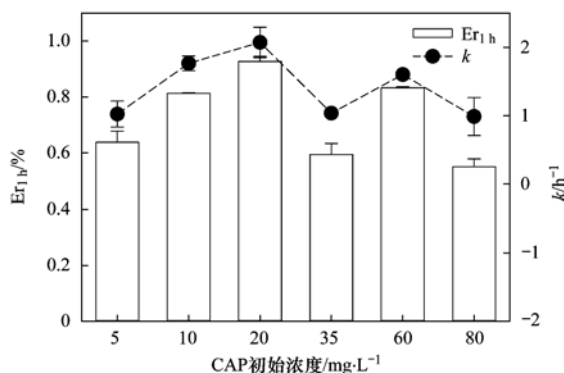


图2 生物阳极驯化阶段的氯霉素降解效率和速率

Fig. 2 Er_h % and k of CAP degradation in the acclimation stage of bioanode

极. 首先生物阳极中不加氯霉素, 其对电极非生物阴极单独降解氯霉素为对照实验, 研究生物阳极及其对电极非生物阴极中均加入氯霉素条件下阴阳极同步降解氯霉素的特性. 如图3所示, 分别含有35 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯霉素的生物阳极和非生物阴极的电位分别为 -0.19 V 和 -0.72 V , 略高于对照实验的 (-0.24 V) 和非生物阴极 (-0.78 V), 而且相对于对照实验电流值较小. 表明含氯霉素的生物阳极在一定程度上受到了氯霉素的影响. 可能由于氯霉素的毒性致使阳极产电微生物产电能力下降或者生物阳极中氯霉素的存在, 作为潜在的电子受体竞争了一部分产电微生物产生的电子, 导致传导到阴极的电子相对变少, 电流变小.

生物阳极和非生物阴极同步降解氯霉素过程中, 二者还原降解速率常数 k 分别为0.098 5和0.513 5, 而对照实验的 k 则为0.644 4 (图4). 结果表明生物阳极具有一定的还原降解氯霉素的能力, 而此时生物阳极的电位为 -0.20 V , 此电位下氯霉

素很难被电化学还原降解, 因此生物阳极氯霉素的降解主要是单纯微生物的降解或者在微生物的作用下降低了还原反应的过电位^[14,15], 使得氯霉素在相对较高的电位下也有可能发生还原反应. 此外非生物阴极的降解速率常数小于对照实验 ($0.513 5 < 0.644 4$) 的原因是由于添加氯霉素的生物阳极也在一定程度上受到氯霉素毒性的影响, 导致生物阳极电位升高, 非生物阴极电位也升高, 电流变小 (图3), 因此氯霉素的还原降解速率变慢. 产物形成方面如图4所示, 添加氯霉素的生物阳极主要有3种还原产物分别为氯霉素的乙酰化产物 (Acetyl)、芳香胺产物 (AMCl2) 和脱1个Cl的芳香胺产物 (AMCl)^[14]. 而非生物阴极的产物除了 AMCl2 和 AMCl (主要产物) 外还有非生物阴极典型中间产物亚硝基产物 (NO)^[15], 而没有 Acetyl. 对照组实验除了以上3种产物之外, 还少量生成了脱2个Cl的芳香胺产物 (AM), 其原因是对照组实验的阴极电位更低, 致使 AMCl 的第二个Cl在较低电位下被还原脱除.

2.3 生物阳极反转生物阴极降解氯霉素

实验结果如图5所示, 恒定阴极电位为 -0.40 V 时, 生物阴极还原降解氯霉素的速率常数 k 值为0.263 4, 明显高于非生物阴极对照 ($k = 0.160 9$), 比非生物阴极对照快38%. 表明反转后的生物阴极具有较强的生物催化还原降解氯霉素的能力. 而生物阴极开路实验的降解速率常数 $k = 0.043 5$, 表明单独的阴极生物膜的生物作用仍然对氯霉素的降解具有一定的作用, 但还原降解速率比反转前生物阳极的慢 ($k = 0.098 5$), 其原因可能是由于阴极电位由原来生物阳极的 -0.20 V 变为 -0.40 V , 电位的降低导致微生物活性受到一定影响, 降解氯霉素能

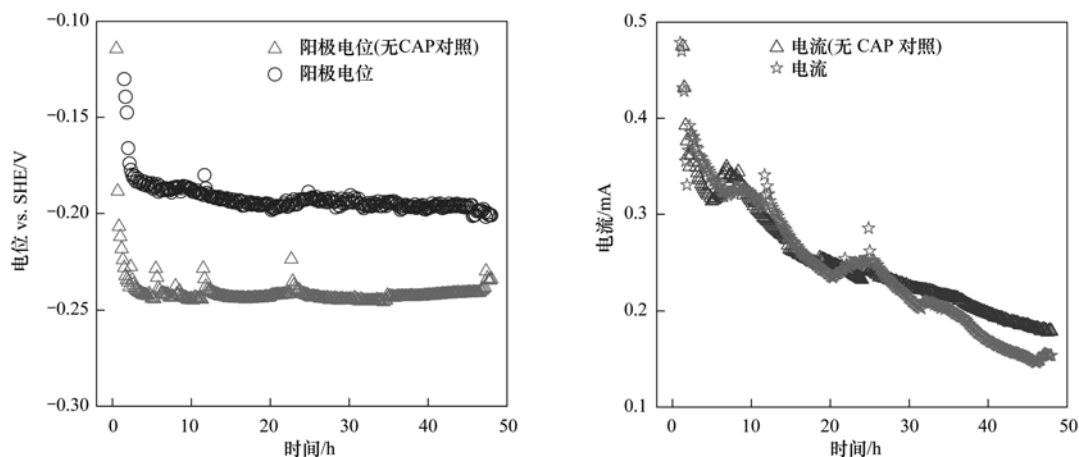
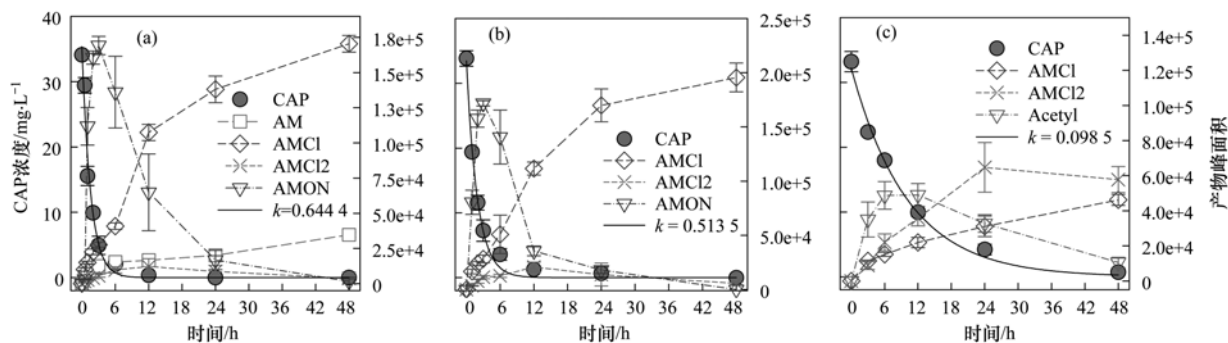


图3 生物阳极与非生物阴极同步降解氯霉素电位电流变化

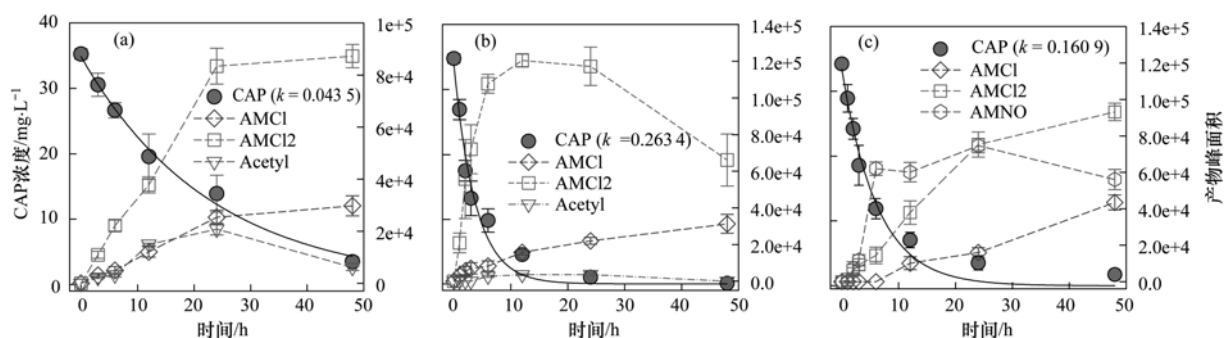
Fig. 3 Potential and current changes in the simultaneous CAP degradation of the bioanode and abiotic cathode



(a) 非生物阴极对照; (b) 生物阳极加氯霉素的非生物阴极; (c) 生物阳极

图 4 生物阳极与非生物阴极同步降解氯霉素降解速率及产物形成规律

Fig. 4 Degradation rate and products formation rules in the simultaneous CAP degradation of the bioanode and abiotic cathode



(a) 生物阴极开路对照; (b) 反转后生物阴极; (c) 非生物阴极对照

图 5 生物阳极反转生物阴极降解氯霉素速率及产物形成规律

Fig. 5 Degradation rate and product formation rules in CAP degradation by biocathode switched from bioanode

力有所下降。从产物形成方面看,生物阴极相对于非生物阴极对照没有积累毒性较大的 NO 产物,而是少量积累 Acetyl 后直接生成 AMCl2 (主要产物) 和 AMCl,与之前研究结果相似^[14,15],并且 AMCl2 的形成在 48 h 内仍然具有下降趋势,表明可能继续被还原为其他物质。而开路实验的产物则大量积累 AMCl2 和 Acetyl 的同时,也有 AMCl 产物,表明单独阴极生物膜对氯霉素也具有脱氯能力。

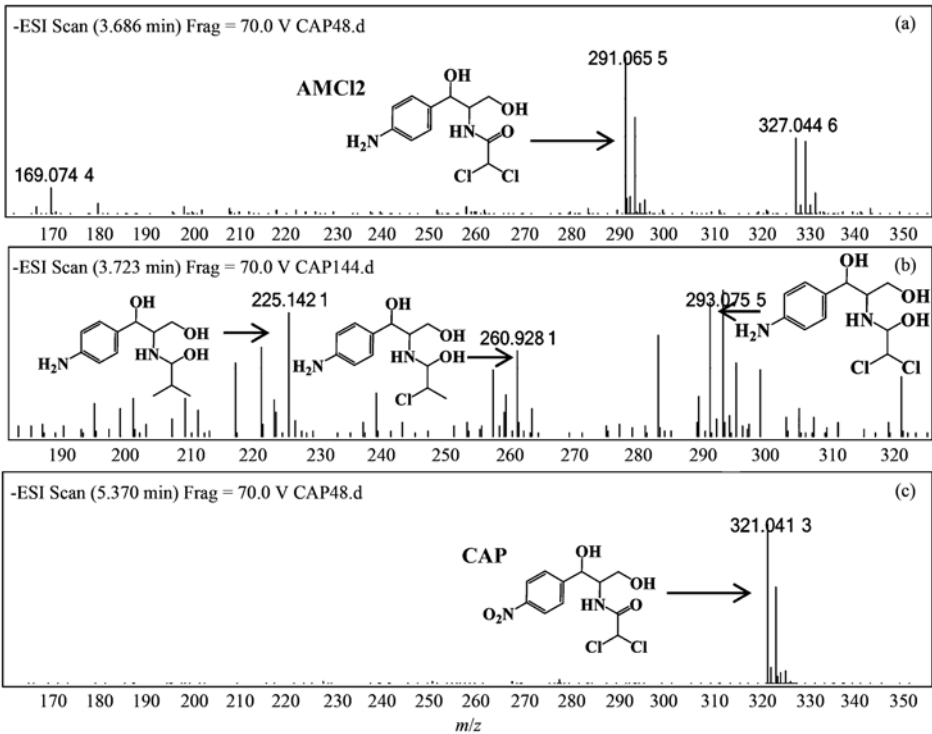
2.4 生物阴极还原降解氯霉素产物的鉴定

对生物阴极反应体系运行至 48 h 和 144 h 时分别取样进行 LC-MS 分析,结果如图 6(a) 所示,48 h 时在质谱图中具有明显的负离子核质比 291.07 的峰被鉴定为 AMCl2 (具有典型氯同位素簇,291、293 和 295)。与图 5(b) 中 AMCl 为主要产物的结果吻合。如图 6(b),对 144 h 的样品进行分析发现在质谱图主要出现 3 个明显的特征峰,负离子模式下核质比分别为 293.075 5 (具有典型氯同位素簇 293、295 和 297)、260.928 1 和 225.142 1,依次被鉴定为羰基化的 AMCl2,羰基还原并脱掉一个 Cl 的 AMCl 以及羰基还原并脱掉 2 个 Cl 的 AM。表明长时间生

物阴极作用下,不仅可以发生硝基还原反应而且可以进行还原脱氯反应,甚至是氯霉素的羰基还原反应,与前面提到的 AMCl2 在 48 h 内仍然有下降趋势,可能被还原为其他产物结果相吻合。

2.5 生物阳极反转生物阴极前后电化学特征

生物阳极反转生物阴极前后电极生物膜的活性变化通过循环伏安法(CV)和交流阻抗(EIS)分析,结果如图 7 所示,生物阳极和反转后的生物阴极起峰电位高于非生物阴极对照,而且峰电流也大于对照,表明二者嗜电极生物膜均具有较强的微生物催化能力。而 3 种模式下极化内阻依次为 $18.87 \Omega < 31.29 \Omega < 42.86 \Omega$,可见生物阳极的极化内阻最低,其次为生物阴极,均明显低于非生物阴极对照 42.86Ω 。电极微生物可以加速阴极电子传递过程具有催化还原降解氯霉素的能力^[14],功能电极微生物越多,催化活性越强,催化电流越大,极化内阻值越小。由此可见生物阳极可能具有最多的嗜电极功能微生物,而反转生物阴极后的电极生物膜由于阴极电位的改变,生物膜的数量和结构可能发生一定的改变,但与非生物阴极相比依然具有较强的生物



(a) 48 h 生物阴极出水；(b) 144 h 生物阴极出水；(c) 0 h 生物阴极出水对照

图 6 生物阴极降解氯霉素产物的分析与鉴定

Fig. 6 LC-MS analysis and identification of CAP degradation products catalyzed by biocathode

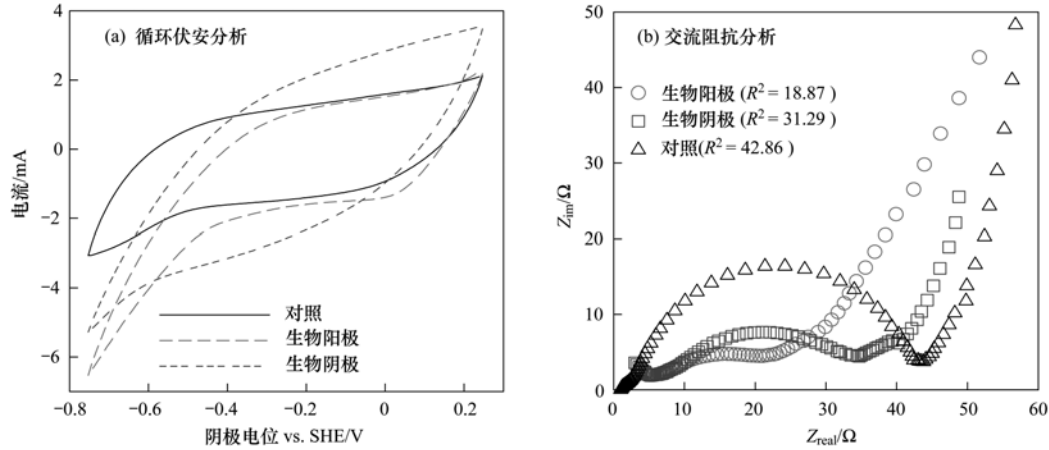


图 7 生物阳极反转生物阴极前后循环伏安及交流阻抗分析

Fig. 7 CV and EIS analysis before and after inversion of bionade to biocathode

催化能力.

3 结论

- (1) 利用无隔膜微生物电催化反应器, 采用氯霉素浓度梯度增加的方式成功驯化了能够降解氯霉素的生物阳极, 当氯霉素浓度高达 80 mg·L⁻¹ 时仍然具有较高的降解速率常数 ($k = 0.9878$).
- (2) 驯化后的生物阳极可以在有隔膜双极室 BES 反应器中实现生物阳极和非生物阴极同步降解

氯霉素, 在两个隔室内的还原降解速率常数 k 依次为 0.098 5 和 0.513 5, 该生物阳极不仅具有耐受氯霉素毒性, 而且对氯霉素具有一定的降解能力.

(3) 利用恒电位仪将生物阳极反转后 (此时为生物阴极) 恒定在 -0.40 V , 表现出较好的生物阴极催化还原降解氯霉素的能力, 其还原降解速率常数 k 为 0.263 4, 远大于非生物阴极对照的速率常数 k (0.160 9). 长时间生物阴极的强还原环境使 CAP 实现了硝基还原、羰基还原和完全脱 Cl.

参考文献:

- [1] 吴晓丰, 杨鹭花. 氯霉素残留的危害及其检测方法[J]. 动物医学进展, 2004, **25**(3): 41-43.
- [2] Martelli A, Mattioli F, Pastorino G, *et al.* Genotoxicity testing of chloramphenicol in rodent and human-cells [J]. Mutation Research, 1991, **260**(1): 65-72.
- [3] Lin A Y C, Yu T H, Lin C F. Pharmaceutical contamination in residential, industrial and agricultural waste streams: Risk to aqueous environments in Taiwan[J]. Chemosphere, 2008, **74**(1): 131-141.
- [4] Kasprzyk-Hordern B, Dinsdale R M, Guwy A J. The occurrence of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs in surface water in South Wales, UK[J]. Water Research, 2008, **42**(13): 3498-3518.
- [5] Peng X Z, Wang Z D, Kuang W X, *et al.* A preliminary study on the occurrence and behavior of sulfonamides, ofloxacin and chloramphenicol antimicrobials in wastewaters of two sewage treatment plants in Guangzhou, China[J]. Science of the Total Environment, 2006, **371**(1-3): 314-322.
- [6] Xu W H, Zhang G, Li X D, *et al.* Occurrence and elimination of antibiotics at four sewage treatment plants in the Pearl River Delta (PRD), South China[J]. Water Research, 2007, **41**(19): 4526-4534.
- [7] Leung H W, Minh T B, Murphy M B, *et al.* Distribution, fate and risk assessment of antibiotics in sewage treatment plants in Hong Kong, South China[J]. Environment International, 2012, **42**: 1-9.
- [8] Li J, Shao B, Shen J Z, *et al.* Occurrence of chloramphenicol-resistance genes as environmental pollutants from swine feedlots [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(6): 2892-2897.
- [9] 刘虹, 张国平, 刘丛强, 等. 贵阳城市污水及南明河中氯霉素和四环素类抗生素的特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 687-692.
- [10] Xi C W, Zhang Y L, Marrs C F, *et al.* Prevalence of antibiotic resistance in drinking water treatment and distribution systems [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, **75**(17): 5714-5718.
- [11] Parsley L C, Consuegra E J, Kakirde K S, *et al.* Identification of diverse antimicrobial resistance determinants carried on bacterial, plasmid, or viral metagenomes from an activated sludge microbial assemblage [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, **76**(11): 3753-3757.
- [12] 徐扣珍, 陆文雄, 宋平, 等. 焚烧法处理氯霉素生产废水[J]. 环境科学, 1998, **19**(4): 69-71.
- [13] Mu Y, Rozendal R A, Rabaey K, *et al.* Nitrobenzene removal in bioelectrochemical systems [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(22): 8690-8695.
- [14] Liang B, Cheng H Y, Kong D Y, *et al.* Accelerated reduction of chlorinated nitroaromatic antibiotic chloramphenicol by biocathode [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(10): 5353-5361.
- [15] Wang A J, Cheng H Y, Liang B, *et al.* Efficient reduction of nitrobenzene to aniline with a biocatalyzed cathode [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(23): 10186-10193.
- [16] Liang B, Cheng H Y, van Nostrand J D, *et al.* Microbial community structure and function of Nitrobenzene reduction biocathode in response to carbon source switchover[J]. Water Research, 2014, **54**: 137-148.
- [17] 孙飞, 王爱杰, 严群, 等. 生物电化学系统还原降解氯霉素[J]. 生物工程学报, 2013, **29**(2): 161-168.
- [18] Cui D, Guo Y Q, Cheng H Y, *et al.* Azo dye removal in a membrane-free up-flow biocatalyzed electrolysis reactor coupled with an aerobic bio-contact oxidation reactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **239-240**: 257-264.
- [19] Wang Y Z, Wang A J, Zhou A J, *et al.* Electrode as sole electrons donor for enhancing decolorization of azo dye by an isolated *Pseudomonas* sp. WYZ-2[J]. Bioresource Technology, 2014, **152**: 530-533.
- [20] Strycharz S M, Gannon S M, Boles A R, *et al.* Reductive dechlorination of 2-chlorophenol by *Anaeromyxobacter dehalogenans* with an electrode serving as the electron donor[J]. Environmental Microbiology Reports, 2010, **2**(2): 289-294.
- [21] Wen Q, Kong F Y, Zheng H T, *et al.* Simultaneous processes of electricity generation and ceftriaxone sodium degradation in an air-cathode single chamber microbial fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2011, **196**(5): 2567-2572.
- [22] Harnisch F, Gmunkiewicz C, Bogunovic B, *et al.* On the removal of sulfonamides using microbial bioelectrochemical systems[J]. Electrochemistry Communications, 2013, **26**: 77-80.
- [23] Rozendal R A, Jeremiasse A W, Hamelers H V, *et al.* Hydrogen production with a microbial biocathode [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(2): 629-634.
- [24] Cheng K Y, Ho G, Cord-Ruwisch R. Novel methanogenic rotatable bioelectrochemical system operated with polarity inversion[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(2): 796-802.
- [25] Cheng K Y, Ginige M P, Kaksonen A H. Ano-cathophilic biofilm catalyzes both anodic carbon oxidation and cathodic denitrification[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(18): 10372-10378.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行