

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

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

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 谢元博, 陈娟, 李巍 (1)

长白山 PM_{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)

青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响 柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)

重庆市大气二噁英污染水平及季节变化 张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)

西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放 卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)

西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放 张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)

杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征 蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)

模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究 符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)

川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化 童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)

重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化 余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)

汉江上游金水河流域氮湿沉降 王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)

麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)

兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究 吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)

中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究 马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)

水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO₂ 释放的影响 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)

黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征 吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)

浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价 马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)

POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测 张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)

降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师阳 (123)

锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)

子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征 赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)

水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响 宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)

黄东海表层沉积物中磷的分布特征 宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)

河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究 张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)

沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制 武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)

三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析 敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)

太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)

滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究 王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)

浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术 王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)

光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究 王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)

同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究 刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)

垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究 孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)

油田区土壤石油烃组分残留特性研究 胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)

水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态 谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)

土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响 廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)

水稻土团聚体 Cu²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化 许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)

Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响 刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)

淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌侵染 2 种湿地植物的影响 马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)

太湖水质与水生生物健康的关联性初探 周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)

3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较 姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)

某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究 杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)

异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响 胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)

Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价 王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)

基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究 郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)

微囊藻毒素降解菌 *Paucibacter* sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性 游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)

硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究 杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)

降解纤维素产甲烷的四菌复合系 吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)

中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素 谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)

内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究 史晶晶, 耿元波 (341)

南京河流夏季水-气界面 N₂O 排放通量 韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)

杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响 肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)

生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究 彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)

不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究 卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)

硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用 严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)

县域尺度的京津冀都市圈 CO₂ 排放时空演变特征 汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)

保水剂性能及其农用安全性评价研究进展 李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

《环境科学》征订启事 (65) 《环境科学》征稿简则 (220) 信息 (226, 270, 298, 364)

生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究

彭海利^{1,2}, 张植平^{1,2}, 李小明^{1,2*}, 杨麒^{1,2}, 罗琨^{1,2}, 易欣^{1,2}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学环境生物与控制教育部重点实验室, 长沙 410082)

摘要:以剩余污泥为接种液和基质,探讨了添加生物表面活性剂(鼠李糖脂/TSS, $0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)对单室剩余污泥微生物燃料电池(SSMFC)产电特性及剩余污泥减量化的影响.结果表明,在一个运行周期中,对照组的产电周期为 20 d,最大功率密度为 $236.8 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,库仑效率为 5.7%,TCOD 去除率为 28.6%,TSS 去除率为 28.9%,VSS 去除率为 33.4%,而实验组产电周期达到 35 d,库仑效率为 11.8%,最大输出功率密度为 $516.7 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,较对照组增加了 118.2%,TCOD、TSS、VSS 去除率分别为 58.5%、56.7%和 66.3%,较对照组分别提高了 104.5%、96.2%和 98.5%.随着系统的运行,对照组和实验组系统输出电压均是先稳定一段时间后逐渐降低,污泥中 SCOD、蛋白质和溶解性糖浓度均呈先上升再下降趋势.采用向剩余污泥中投加鼠李糖脂的方法可以增强 SSMFC 的产电效率,同时能显著增强剩余污泥减量化效果.

关键词:剩余污泥;鼠李糖脂;微生物燃料电池;功率密度;减量化

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0365-06

Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant

PENG Hai-li^{1,2}, ZHANG Zhi-ping^{1,2}, LI Xiao-ming^{1,2}, YANG Qi^{1,2}, LUO Kun^{1,2}, YI Xin^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control, Hunan University, Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract:The effect of biosurfactant (rhamnolipid/TSS, $0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) on the characteristics of electricity generation by surplus sludge microbial fuel cell (SSMFC) and the reduction of surplus sludge were discussed. In the control group, the electrogenesis cycle was 20 d, the maximal power density was $236.84 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, the coulomb efficiency was 5.7%, and the TCOD, TSS and VSS removal efficiency was 58.5%, 56.7% and 66.3%, respectively. In the experimental group, the electrogenesis cycle was 35 d, the coulomb efficiency was 11.8%, the maximal power density was $516.67 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ which was increased by 118.15% as compared to the control group, and the TCOD, TSS and VSS removal efficiency was 58.5%, 56.7% and 66.3%, which raised by 104.5%, 96.2% and 98.5% as compared to the control group, respectively. With the operation of the system, the output voltage of control group and experimental group kept stable for a period of time before gradually reduced, the SCOD, protein and soluble sugar concentrations of surplus sludge first increased and then decreased. This study demonstrated that the addition of rhamnolipid enhanced the electricity generation of SSMFC with simultaneous promotion of sludge reduction.

Key words:surplus sludge; rhamnolipid; microbial fuel cell; power density; reduction

微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)是利用微生物作为催化剂氧化有机物和无机物从而产生电能的一种装置^[1-3]. 剩余污泥中含有大量的有机质,如蛋白质、碳水化合物和脂肪等,可以作为 MFC 潜在的替代燃料^[4]. 近年来,国内外研究者^[5-7]分别研究了以剩余污泥为燃料的单室和双室 MFC 的产电特性,但获得的电压和功率密度均较低. 由于污泥的大部分有机物质是以固相存在,污泥中有机物的水解速率缓慢,限制了 MFC 的产电效率. 如何有效实现污泥中有机物质的水解,提高溶解性有机质浓度,是强化剩余污泥为燃料的 MFC 产电特性的关键.

从国内外研究可知,提高污泥水解速率的方法

有物理法(热处理法、超声波法)、化学法(碱处理、臭氧氧化法)及生物法等^[8-12]. 表面活性剂具有“两亲性”和“增溶作用”,可以强化污泥水解,提高污泥降解速率,缩短污泥消化时间,同时还能大幅度提高水解产物在微生物作用下的产酸量,因此越来越受到人们的关注. Luo 等^[13]通过添加化学表面活性剂,显著提高了剩余污泥水解速率. 易欣等^[14]研究了单独投加生物表面活性剂对污泥水解影响,

收稿日期:2013-04-10; 修订日期:2013-06-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51278175, 51078128); 国际科技合作项目(2011DFA90740); 湖南省科技计划重点项目(2010WK2012)

作者简介:彭海利(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为微生物燃料电池, E-mail: penghaili12@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: xml@hnu.edu.cn

取得了良好的效果. 相对于化学表面活性剂, 生物表面活性剂毒性较低, 生物降解性更高, 在极端温度和 pH 下有更好的选择性. 而有关利用生物表面活性剂来强化剩余污泥 MFC 性能的研究国内外鲜有报道.

本实验以鼠李糖脂为例, 考察了生物表面活性剂对剩余污泥微生物燃料电池 (surplus sludge microbial fuel cell, SSMFC) 产电性能的影响. 并分析了系统运行过程中, 剩余污泥性质变化以及污泥减量化的效果, 以期进一步提高 SSMFC 产

电性能, 为以污泥为燃料的 MFC 的运用提供依据.

1 材料与方法

1.1 污泥和生物表面活性剂

污泥采用长沙市第二污水处理厂的剩余污泥, 经孔径 0.66 mm 筛网过滤去除杂质, 经过 24 h 的沉淀后, 弃除上清液取浓缩污泥, 通入 N_2 10 min 后于 4℃ 冰箱中保存备用. 实验开始前将污泥恢复到室温. 剩余污泥特性如表 1 所示.

表 1 剩余污泥特性

Table 1 Characteristics of surplus sludge

指标	pH 值	TCOD/ $mg \cdot L^{-1}$	SCOD/ $mg \cdot L^{-1}$	TSS/ $g \cdot L^{-1}$	VSS/ $g \cdot L^{-1}$	蛋白质/ $mg \cdot L^{-1}$	还原糖/ $mg \cdot L^{-1}$
数值	6.72 ~ 7.04	9 913 ~ 12 882	83 ~ 310	9.25 ~ 17.37	6.25 ~ 10.41	79 ~ 108	9 ~ 17

实验中的生物表面活性剂选用湖州紫金生物科技有限公司提供的质量分数为 50% 的鼠李糖脂, 本药品为褐色膏状物.

1.2 燃料电池装置

SSMFC 反应器所采用的无膜单室微生物燃料电池为一圆柱形玻璃容器, 容积 300 mL. 阳极为片状石墨电极 (20 mm × 20 mm × 5 mm, 面积为 12 cm²); 阴极为普通杆状石墨电极 (直径 80 mm, 未做包括镀 Pt 等任何处理), 使其一侧与污泥接触, 一侧暴露于空气呈悬浮状态. 两极之间用铜导线连接 (表面涂有绝缘材料), 外电路接 500 Ω 电阻作为负载. 为了降低阴阳极之间的传质阻力, 整个实验过程通过磁力搅拌器搅拌. 采用 USB-1208LS 型电压数字采集卡 (美国 Measurement Computing 公司) 采集输出电压并输入电脑, 频率为每 1 min 记录一次.

1.3 接种与运行

以剩余污泥为 SSMFC 基质和接种体, 加入 200 mmol·L⁻¹ NaCl (作为离子添加剂) 增强溶液的导电性, 装置连接好后将反应器置于恒温磁力搅拌器上反应, 温度控制在 25℃ ± 1℃, 定期刷洗阴极, 维持 O₂ 的传递速率. 反复更换装置内的污泥, 连续运行至 SSMFC 启动. 当输出电压降至 50 mV 时, 一个周期结束, 重新更换装置内的污泥, 维持 SSMFC 的运行. 在系统运行第 3 周期时进行本实验. 周期开始时, 向装有 250 mL 剩余污泥的装置内加入 200 mmol·L⁻¹ NaCl, 再加入含量 (鼠李糖脂/TSS) 为 0.3 g·g⁻¹ 的鼠李糖脂 (实验组), 同时设置对照组 (即不添加鼠李糖脂), 其他条件与实验组相同.

1.4 检测指标与分析方法

TSS、VSS 采用称重法测定; TCOD、SCOD 采用标准重铬酸钾法测定, 其中 SCOD 为污泥经离心机 (转速为 10 000 r·min⁻¹) 离心 10 min 后上清液的化学需氧量; 上清液中的蛋白质采用 Folin-酚法测定, 以结晶牛血清为标准物; 溶解性糖采用苯酚硫酸法进行测定, 以葡萄糖为标准物^[15].

功率密度 P ($mW \cdot m^{-2}$) (以阳极表面积计算):

$$P = \frac{U^2}{RA} \times 10^3 \quad (1)$$

电流 I (mA):

$$I = \frac{U}{R} \quad (2)$$

式中, U (mV) 为电压, R (Ω) 为电池的外阻, A (cm²) 为阳极有效表面积.

库仑效率 (CE):

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^n U_i t_i}{RF_i b_i \Delta S V} M \times 100\% \quad (3)$$

式中, U_i 为 t_i 时刻 MFC 的外电路电压; R 为外电阻; F_i 为法拉第常数 (96 485 C·mol⁻¹); b_i 为 1 mol COD 所产生的电子的摩尔数 (4e⁻ mol·mol⁻¹); ΔS 为实验结束时 COD 去除浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); V 为使用基质体积 (L); M 为氧气的摩尔质量 (32 g·mol⁻¹).

断开电路, 连接变阻箱 (0 ~ 99 999 Ω), 测定 SSMFC 在不同外电阻 (5 000 ~ 20 Ω) 下稳态放电时的输出电压, 求得功率密度, 绘制极化曲线.

2 结果与讨论

2.1 鼠李糖脂对 SSMFC 输出电压和功率密度的影响

根据本课题组采用生物表面活性剂强化剩余污

泥水解的研究^[14]可知,鼠李糖脂添加量(鼠李糖脂/TSS)为 $0.3 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 时对污泥水解效果较好.因而本实验中采用向污泥中添加 $0.3 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 鼠李糖脂来研究生物表面活性剂对SSMFC产电特性的影响.

分别记录对照组和实验组运行一周期内电压变化.如图1所示,未投加鼠李糖脂的对照组,SSMFC经1.5 d运行后电压迅速上升到250 mV后基本稳定,持续运行9 d后再缓慢下降至周期结束,整个周期持续20 d.而实验组,SSMFC经0.8 d运行后电压迅速上升到335 mV,而后稳定运行20 d,再缓慢下降到100 mV以下,整个周期持续运行35 d.系统稳定运行时,实验组较对照组SSMFC输出电压要高85 mV左右,持续运行周期要长15 d左右.因此,采用鼠李糖脂强化污泥水解可以提高SSMFC的输出电压,延长系统运行周期.

在运行周期内相对稳定时期进行极化曲线研究和输出功率密度的分析.由图2可知在SSMFC中投加鼠李糖脂后,SSMFC的最大输出功率密度为 $516.7 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$,较对照组最大输出功率密度 $236.8 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加了118.2%.从极化曲线看,原污泥SSMFC内阻约为 263Ω ,而实验组SSMFC内阻约为 135Ω .说明投加鼠李糖脂提高了SSMFC的输出功率密度,降低了系统内阻.

剩余污泥是由许多不同的微生物包埋在聚合物组成的网络中形成的,这些聚合物就是胞外多聚物(EPS)^[16],其主要组成物是蛋白质和碳水化合物^[17].产电微生物难以直接利用剩余污泥中的固相有机物,在无预处理的条件下,SSMFC中液相底物的浓度较低. Oh等^[18]研究表明,底物浓度低会限制微生物对底物的降解速率,导致最大输出功率密度较低.表面活性剂具有“两亲性”和“增溶作用”,可促使EPS溶出并分散到液相中,增大其与水解菌的接触面积,从而提高其生物可降解性.表面活性剂加入后,污泥网状絮体结构受到破坏,有利于包埋或隐藏于胞外聚合物中的胞外酶脱离污泥表面^[19],均匀分布在污泥中,使酶与底物接触机会增加,从而加快污泥水解速率.易欣等^[14]研究了生物表面活性剂对污泥水解的影响,表明随着生物表面活性剂的加入,污泥中SCOD、蛋白质和可溶性糖类浓度迅速增加,有效地促进了污泥水解.投加鼠李糖脂促使SSMFC污泥中固相大分子有机物迅速溶出,并分散到液相中,使其与水解酶的接触机会增大,进而转化为能被微生物利用的小分子有机物,使SSMFC中液相底物浓度增加,氧化有机物电

子传递速率提高,从而使SSMFC输出电压和功率密度较对照组高.

实验中,投加鼠李糖脂后SSMFC内阻 135Ω 较对照组低的原因:一方面可能是,鼠李糖脂的加入使液相底物浓度增大,氧化有机物电子传递速率提高,从而降低了SSMFC内阻.另一方面可能是,由于鼠李糖脂改变了污泥细胞磷脂层的渗透性,提高了细胞膜的通透性,使氧化还原物质和氧化还原酶的扩散性增大,从而提高了直接电子转移速率^[20],导致内阻降低.

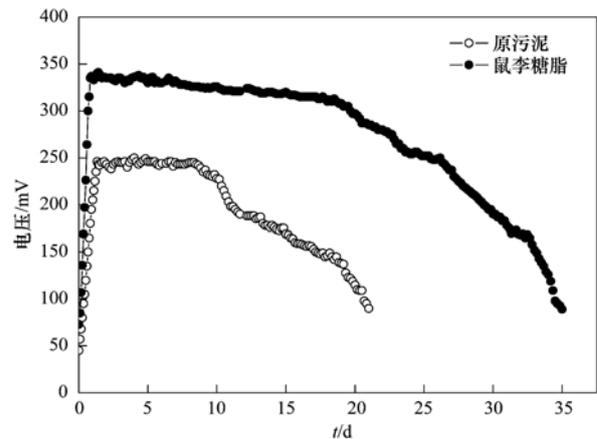


图1 SSMFC电压输出

Fig. 1 Voltage output of SSMFC

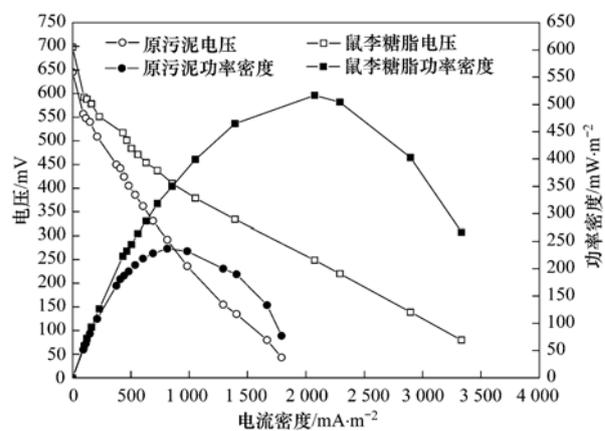


图2 SSMFC功率密度曲线与极化曲线

Fig. 2 Power density and polarization curve of the SSMFC

2.2 SSMFC库仑效率与污泥TCOD去除效率

实验对SSMFC稳定运行周期内污泥的TCOD,库仑效率随SSMFC运行时间的变化进行分析.如图3、图4所示,随着SSMFC的运行,实验组和对照组的TCOD去除效率均逐渐升高.运行周期结束时,对照组TCOD去除效率为28.6%,实验组达到58.5%.对照组和实验组CE均随着电池运行逐渐升高,周期结束时对照组CE为5.7%,实验组为

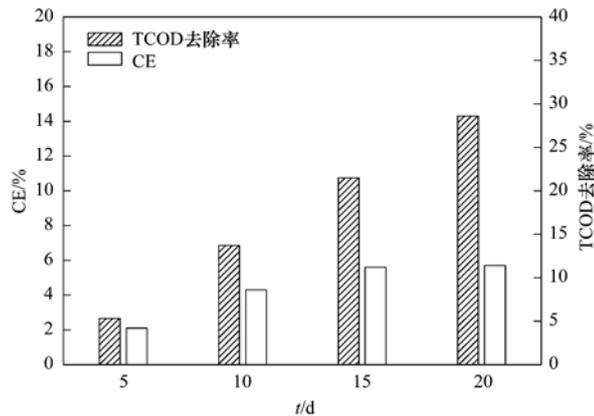


图3 原污泥 SSMFC TCOD 去除率,CE 随运行时间变化

Fig. 3 Changes of TCOD removal rate and coulomb efficiency with the reaction time in SSMFC fed with original sludge

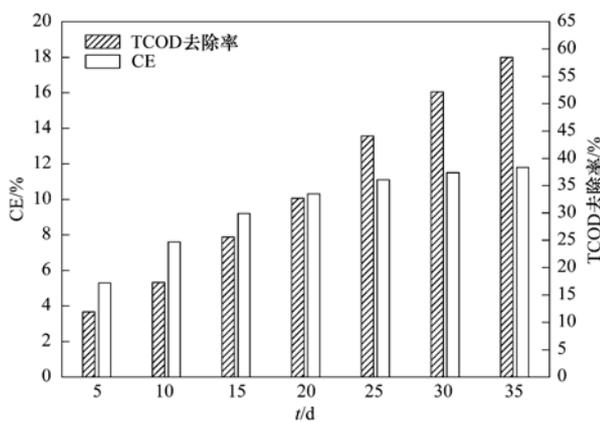


图4 鼠李糖脂强化 SSMFC TCOD 去除率,CE 随运行时间变化

Fig. 4 TCOD removal rate and coulomb efficiency with the reaction time in SSMFC enhanced by rhamnolipid

11.8%.

产能是运行 MFC 的一个主要目标,即尽量多地提取底物存储的电子,从系统中回收能量.库仑效率,即回收电子与有机物质能提供的电子之比^[21].实验组库仑效率为 11.8%,对照组为 5.7%,投加鼠李糖脂后,污泥中 EPS 溶解分散到液相的同时,有机物质不断水解,蛋白质水解生成肽、肽或氨基酸等小分子有机物,碳水化合物水解为小分子的多糖甚至单糖,污泥中能被产电微生物利用的小分子有机物的浓度较对照组的高. Liu 等^[22]研究的单室无膜空气阴极 MFC 所得的库仑效率为 20%,高于本研究中的库仑效率,可能是由于本实验采用空气阴极 MFC,在 MFC 运行过程会有部分空气进入阳极表面导致电子利用效率降低,此外污泥成分复杂,含有大量的非活性产电微生物,其不能有效地将污泥中的有机物质转化为电能,从

而造成 CE 值偏低^[23].因此,后续工作应该注意加强对 MFC 结构的改进,从而使系统能达到更高的库仑效率,更大的产能效率.

2.3 SSMFC 输出电压与污泥有机质变化

SSMFC 的输出电压受污泥性质的影响,污泥性质变化不仅表现在固相有机物的变化,而且表现在液相有机物的变化,如 SCOD、蛋白质、溶解性糖等(实验中实验组 SCOD 测定均包括由于鼠李糖脂投加而引起的 SCOD 增加量,经测定添加 $0.3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 鼠李糖脂所引起的 SCOD 增量为 $578 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).图 5 分别表示了原污泥和实验组 SSMFC 周期运行时污泥有机质的变化情况.由图 5 可知,原污泥作为 SSMFC 底物时,系统运行前半周期(0~8 d),污泥 SCOD 逐渐升高并在第 9 d 达到 $961 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而后逐渐下降.蛋白质和溶解性糖浓度分别在第 8 d 和第 4 d 达到峰值($258 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $110 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)然后再逐渐降低.而实验组,污泥中各有机物质浓度在 SSMFC 运行第 1 d 就迅速达到峰值,之后随着电池运行呈波浪式下降.实验组污泥的 SCOD、蛋白质和溶解性糖浓度峰值(分别为 3411 、 725 和 $243 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)较对照组分别增加了 254.9%、180% 和 120.9%.综上所述,随着 SSMFC 的运行,对照组和实验组污泥中 SCOD、蛋白质和溶解性糖浓度均呈先上升后下降的趋势,但实验组溶出的有机物质浓度更高,所需时间更短.

鼠李糖脂的增溶作用使吸附在污泥表面的大分子有机物质溶解并转移到液相^[24],释放出更多的蛋白质和糖类,包埋在污泥内部的胞外酶也逐渐释放出来,促进了污泥的水解.系统运行初期,添加鼠李糖脂强化后,实验组污泥液相有机物质浓度迅速升高,溶解性有机物质的释放速率大于消耗速率,污泥中溶解性有机物质得到积累,浓度较高.而对照组污泥主要靠自身的厌氧消化过程中释放的胞外酶进行水解,污泥中包埋的固相有机物质不能快速释放出来,导致其液相有机物质浓度较低.而液相有机物质浓度的高低会影响电压的高低^[25],因此系统运行过程中实验组 SSMFC 输出电压较对照组高(如图 1).运行前期,实验组有机物质浓度较高,能为产电微生物提供充足的有机燃料,系统输出电压稳定,但是随着微生物对溶解性有机物的消耗,其 SCOD、蛋白质和溶解性糖浓度逐渐降低,而对照组运行初期污泥溶解性有机物质浓度低,产生电压较低.但随着污泥自身的水解,污泥胞外聚合物内的有机物质和胞外酶逐渐溶出,并释放到液相

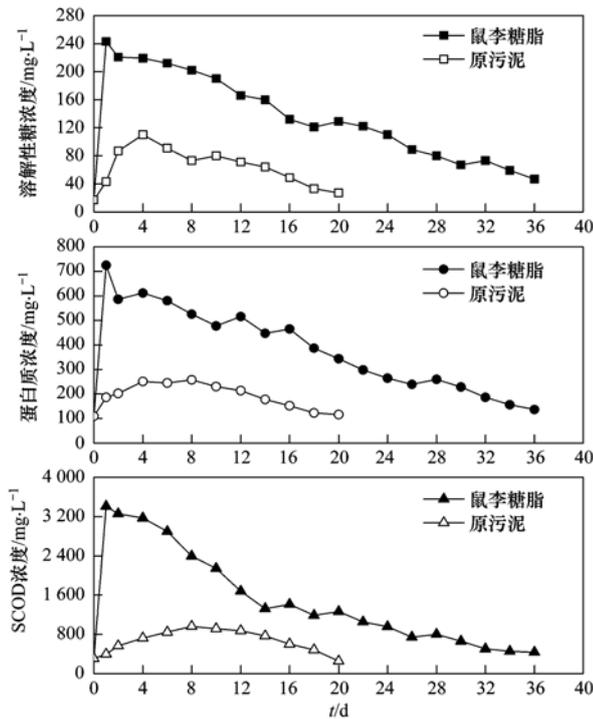


图5 SSMFC中污泥SCOD,蛋白质,溶解性糖随运行时间变化

Fig. 5 Variations of SCOD, protein and soluble sugar with the reaction time in SSMFC

表2 污泥减量化效果比较

Table 2 Comparison of sludge reduction

系统类型	鼠李糖脂添加量(鼠李糖脂/TSS) /g·g ⁻¹	TCOD/%	TSS/%	VSS/%
原污泥 SSMFC	0	28.6	28.9	33.4
鼠李糖脂强化 SSMFC	0.3	58.5	56.7	66.3

3 结论

(1) 鼠李糖脂能有效强化 SSMFC 产电特性,在投加鼠李糖脂的情况下,SSMFC 稳定时期的电压达到 335 mV,产电周期持续 35 d,最大功率密度为 516.7 mW·m⁻²,CE 为 11.8%。而原污泥分别为 250 mV、20 d、236.8 mW·m⁻²和 5.7%。

(2) 系统运行过程中,鼠李糖脂强化污泥的 SCOD、蛋白质和溶解性糖浓度较原污泥分别增加了 254.9%、180.9%和 120.9%,污泥 SCOD、蛋白质和溶解性糖随运行时间变化趋势均是先升高再逐渐下降至运行周期结束,输出电压变化趋势均是先稳定运行一段时间后再逐渐降低。

(3) 采用鼠李糖脂强化剩余污泥有利于促进污泥减量化。鼠李糖脂强化 SSMFC 污泥减量化效果较原污泥 SSMFC 要好,TCOD、TSS、VSS 去除率分别为 58.5%、56.7%和 66.3%较原污泥分别增加 104.5%、96.2%和 98.5%。

中,产电微生物对有机物质的消耗速率小于产出速率,污泥中有机物质浓度逐渐增大。因此前期运行过程中实验组 SCOD、蛋白质和溶解性糖浓度呈下降趋势而对照组中呈上升趋势。运行后期由于系统产电微生物对溶解性有机物质的持续消耗以及微生物对蛋白质和可溶性糖的降解使其浓度逐渐降低,SSMFC 的内阻增大,输出电压下降。

2.4 污泥减量化比较

实验考察了系统周期运行前后 SSMFC 污泥的 TCOD、TSS、VSS 变化,以期分析污泥减量化效果。从表 2 可知,原污泥 SSMFC 中 TCOD、TSS、VSS 的去除效率分别为 28.6%、28.9%和 33.4%,实验组污泥 TCOD、TSS、VSS 的去除效率分别为 58.5%、56.7%和 66.3%,较对照组分别高出 104.5%、96.2%、98.5%,也高于 Xiao 等^[26]研究以剩余污泥为燃料的双室 MFC 系统中 VSS 最大去除率(38.7%)。添加鼠李糖脂后,促使污泥中溶解性有机物质浓度增大,蛋白质和糖类物质被微生物利用,SSMFC 在产电的同时提高了污泥的降解速率。因而,污泥减量化效果更强。

参考文献:

- [1] He Z, Kan J J, Wang Y B, *et al.* Electricity production coupled to ammonium in a microbial fuel cell [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(9): 3391-3397.
- [2] Liu H, Cheng S A, Logan B E. Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(2): 658-662.
- [3] Sun M, Mu Z X, Chen Y P, *et al.* Microbe-assisted sulfide oxidation in the anode of a microbial fuel cell [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(9): 3372-3377.
- [4] Dentel S K, Stroger B, Chiu P. Direct generation of electricity from sludges and other liquid wastes [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **50**(9): 161-168.
- [5] Liu Z H, Li X M, Jia B, *et al.* Production of electricity from surplus sludge using a single chamber floating-cathode microbial fuel cell [J]. *Water Science and Technology*, 2009, **60**(9): 2399-2404.
- [6] Jiang J Q, Zhao Q L, Zhang J N, *et al.* Electricity generation from bio-treatment of sewage sludge with microbial fuel cell [J].

- Bioresource Technology, 2009, **100**(23): 5808-5812.
- [7] Liu X W, Wang Y P, Huang Y X, *et al.* Integration of a microbial fuel cell with activated sludge process for energy-saving wastewater treatment: taking a sequencing batch reactor as an example [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2011, **108**(6): 1260-1267.
- [8] Camacho P, Deleris S, Geaugey V, *et al.* A comparative study between mechanical, thermal and oxidative disintegration techniques of waste activated sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(10): 79-87.
- [9] Yan Y Y, Feng L Y, Zhang C J, *et al.* Ultrasonic enhancement of waste activated sludge hydrolysis and volatile fatty acids accumulation at pH 10.0 [J]. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3329-3336.
- [10] Lin J G, Chang C N, Chang S C. Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization [J]. *Bioresource Technology*, 1997, **62**(3): 85-90.
- [11] Ahn K H, Yeom I T, Park K Y, *et al.* Reduction of sludge by ozone treatment and production of carbon source for denitrification [J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(10): 121-125.
- [12] 史彦伟, 李小明, 赵维纳, 等. 微曝气条件下 S-TE 剩余污泥溶解性研究 [J]. *环境科学*, 2008, **9**(1): 139-144.
- [13] Luo K, Yang Q, Yu J, *et al.* Combined effect of sodium dodecyl sulfate and enzyme on waste activated sludge hydrolysis and acidification [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(14): 7103-7110.
- [14] 易欣, 罗琨, 杨麒, 等. 生物表面活性剂强化污泥水解的研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3202-3207.
- [15] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. *Analysis Chemistry*, 1956, **28**(3): 3502-3561.
- [16] Snaidr J, Amann R, Huber I, *et al.* Phylogenetic analysis and in situ identification of bacteria in activated sludge [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(7): 2884-2896.
- [17] Blackall L L, Burrell P C, Gwilliam H. The use of 16S rDNA clone libraries to describe the microbial diversity of activated sludge communities [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4): 451-454.
- [18] Oh S E, Logan B E. Hydrogen and electricity production from a food processing Wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies [J]. *Water Research*, 2005, **39**(19): 4673-4682.
- [19] 于静, 罗琨, 杨麒, 等. 表面活性剂促进剩余污泥酶水解的研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 142-147.
- [20] Wen Q, Kong F Q, Ren Y M, *et al.* Improved performance of microbial fuel cell through addition of rhamnolipid [J]. *Electrochemistry Communications*, 2012, **12**(12): 1710-1713.
- [21] Bruce E L 著. 冯玉杰, 王鑫译. 微生物燃料电池 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. 46-59.
- [22] Liu H, Logan B E. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(14): 4040-4046.
- [23] 刘志华, 李小明, 杨慧, 等. 不同处理方式污泥为燃料的微生物燃料电池特性研究 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(3): 523-528.
- [24] Mayer A S, Zhong L R, Pope G A. Measurement of mass-transfer rates for surfactant-enhanced solubilization of nonaqueous phase liquids [J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33**(17): 2965-2972.
- [25] Cheng S A, Liu H, Logan B E, *et al.* Increased performance of single chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure [J]. *Electrochemistry Communications*, 2006, **8**(3): 489-494.
- [26] Xiao B Y, Yang F, Liu J X. Enhancing simultaneous electricity production and reduction of sewage sludge in two-chamber MFC by aerobic sludge digestion and sludge pretreatments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **189**(1-2): 444-449.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jun-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《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1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 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