

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

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

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012 ~ 2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响

滕文凯, 刘广立, 骆海萍*, 张仁铎, 符诗雨

(中山大学环境科学与工程学院, 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275)

摘要: 单室微生物电解池(microbial electrolysis cells, MEC)产甲烷过程中, 底物 COD 浓度可同时影响阳极和阴极微生物的活性. 为了探究 COD 浓度的影响, 构建生物阴极型单室 MEC, 比较 COD 为 700、1 000、1 350 mg·L⁻¹ 情形下产甲烷速率和 COD 去除量随外加电压的变化规律, 并计算 MEC 的能量效益. 结果表明, 随着 COD 的增加, 产甲烷速率和 COD 去除量均呈增大趋势. 随着外加电压的升高(0.3~0.7 V), 低 COD 条件下 MEC 的产甲烷速率呈增大趋势, 而在中、高 COD 条件下, 产甲烷速率随着外加电压的升高先增大后减小; COD 去除量的变化规律与产甲烷速率一致. 当外加电压为 0.5 V 时, 阴极电势降至最低值(-0.694±0.001)V, 有利于产甲烷菌的富集, 从而获得最高的产甲烷速率和能量回收率(约 42.8%). COD 浓度 1 000 mg·L⁻¹ 和外加电压 0.5 V 时, MEC 可获得最大的能量收益 0.44 kJ±0.09 kJ(约 1 450 kJ·m⁻³). 最终结果表明, MEC 可利用低浓度 COD 废水生产甲烷, 并且可获得正的能量效益, 这为废水中化学能量的回收利用提供了新的研究思路.

关键词: 微生物电解池; 产甲烷; 生物阴极; 化学需氧量; 电压

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1021-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.035

Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell

TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping*, ZHANG Ren-duo, FU Shi-yu

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The chemical oxygen demand (COD) of substrate can affect the microbial activity of both anode and cathode biofilm in the single-chamber methanogenic microbial electrolysis cell (MEC). In order to investigate the effect of COD on the performance of MEC, a single chamber MEC was constructed with biocathode. With the change of initial concentration of COD (700, 1 000 and 1 350 mg·L⁻¹), the methane production rate, COD removal and energy efficiency in the MEC were examined under different applied voltages. The results showed that the methane production rate and COD removal increased with the increasing COD. With the applied voltage changing from 0.3 to 0.7 V, the methane production rate increased at the COD of 700 mg·L⁻¹, while it increased at first and then decreased at the COD of 1 000 mg·L⁻¹ and 1 350 mg·L⁻¹. A similar trend was observed for the COD removal. The cathode potential reached the minimum (-0.694±0.001)V as the applied voltage was 0.5 V, which therefore facilitated the growth of methanogenic bacteria and improved the methane production rate and energy efficiency of the MEC. The maximum energy income was 0.44 kJ±0.09 kJ (1 450 kJ·m⁻³) in the MEC, which was obtained at the initial COD of 1 000 mg·L⁻¹ and the applied voltage of 0.5 V. Methanogenic MECs could be used for the treatment of wastewaters containing low organic concentrations to achieve positive energy production, which might provide a new method to recover energy from low-strength domestic wastewater.

Key words: microbial electrolysis cell; methane production; biocathode; chemical oxygen demand; voltage

生物电化学系统(bioelectrochemical system, BES)可以在微生物的催化作用下降解废水中的有机、无机物产生电能等附加值产品,因而作为一种新型的污水处理方式在国内外受到广泛关注^[1]. 作为 BES 的一种典型构型,微生物电解池(microbial electrolysis cell, MEC)则是通过在外电路施加低值电压实现废水产氢^[2]. 传统的 BES 使用铂等作为阴极催化剂,价格昂贵,且容易受杂质污染,因此催生了生物阴极^[3,4]. 通过构建生物阴极 MEC,微生物从阴极直接或间接接受电子^[5,6],可实现硫酸盐、硝酸盐、二氧化碳等污染物质的还原去除^[7~10]. 由于 MEC 可利用低浓度有机废水产甲烷,有可能填补厌

氧消化技术处理低浓度 COD 废水的空白,因此利用生物阴极 MEC 还原二氧化碳产生甲烷的研究受到了普遍重视.

Clauwaert 等^[11]最早研究了单室 MEC 中产甲烷

收稿日期: 2014-08-22; 修订日期: 2014-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308557, 51179212, 51278500); 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室开放基金项目(2013K0002); 广东省水与大气污染防治重点实验室开放基金项目(GD2012A01); 教育部博士点新教师基金项目(20130171120022); 教育部留学回国人员科研启动基金项目(教外司留[2014]1685号); 中央高校基本科研业务费青年教师培育项目(2014800031610561)

作者简介: 滕文凯(1991~),男,硕士研究生,主要研究方向为水土环境污染修复, E-mail: tengwenkai@live.com

* 通讯联系人, E-mail: luohp5@mail.sysu.edu.cn

作用,产甲烷细菌利用阴极产生的氢气或直接利用乙酸产生甲烷. Cheng 等^[12]构建了由生物阴极和非生物阳极组成的双室 MEC 反应器,得出当阴极电势低于 -0.5 V (vs SHE,下同)时,微生物可直接从阴极获得电子将二氧化碳还原为甲烷;同时构建了单室 MEC,使用乙酸作为底物,得到能量回收率可达 80%. 研究表明当阴极电极电势低于 -0.65 V 时,直接电子传递和以氢气作为媒介的产甲烷过程同时存在,两种机制的贡献随阴极电极电势而异^[13]. Sasaki 等^[14~17]针对垃圾或污泥的产甲烷生物电化学系统进行研究,表明外加电压能够促进 COD 降解,增加甲烷产量,并提出 COD 越高时电压的促进作用越弱^[15],但该研究所用基质的 COD 浓度很高,且大多使用双室反应器. 由于城市污水 COD 较低^[18],研究低 COD 浓度条件下产甲烷速率的变化规律对这类废水的资源化利用有着十分重要的意义. 因此,低 COD 条件下底物浓度对单室 MEC 产甲烷作用的综合影响值得探究.

为了探究 COD 浓度对 MEC 产甲烷的影响,本研究构建了生物阴极型单室 MEC,比较 COD 为 700、1 000、1 350 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 情形下产甲烷速率和 COD 去除量随外加电压的变化规律,并计算 MEC 的能量回收率和净能量效益.

1 材料与方法

1.1 MEC 启动与运行

采用玻璃瓶制成的产甲烷单室 MEC 反应器,反应器有效容积 300 mL,阴阳级均使用碳刷(直径 3.5 cm,长 3.5 cm),两电极间使用 Power Supply (ITECH IT6720,美国)控制外加电压,用钛丝相连,并串联 10 Ω 电阻. 生物阳极取自实验室正常运行的双室 MEC,阴极使用珠江啤酒厂厌氧处理系统中的厌氧颗粒污泥浸出液接种. 反应器采用 1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸钠基质^[11]启动,以 72 h 为一周期在生化培养箱内 30℃ 条件下进行培养. 另构建一个相同反应器不加外电压作为空白对照以模拟普通厌氧发酵情况.

在外电阻两端使用数据采集器 (Keithley2700,美国)进行电压数据连续采集,并换算成电流,同时使用气袋收集装置所产生物气. 待装置产气及电流密度曲线稳定后,分别以 COD 浓度约为 700 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (低)、1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (中)、1 350 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (高)的基质进行实验.

1.2 数据检测与分析

进水和出水的化学需氧量 (COD) 使用重铬

酸钾法进行测量,使用 COD 消解仪 (HACH DRB200,美国)进行消解;阴极所产生气体的总量采用针筒抽取测定,气体成分使用气相色谱仪 (岛津 GC-2014,日本)进行分析;电极电势使用数据采集器利用甘汞参比电极 (雷磁 232 型,中国)进行测量;电极线性扫描伏安法 (LSV) 测试使用电化学工作站 (辰华 CHI660C,中国);电极微生物使用热场发射扫描电镜 (FEI Quanta 400F,美国)进行观测.

根据采集到的连续电压数据,通过 MEC 的电流可由 $I = U/R$ 计算获得,体积电流密度 (I_v , $\text{A}\cdot\text{m}^{-3}$) 计算公式为:

$$I_v = I/V \quad (1)$$

周期耗电量 (W_e , kJ) 计算公式为:

$$W_e = \frac{\int_0^t (UI - I^2 R) dt}{1\,000} \quad (2)$$

式中, U 为电压 (V), I 为电流 (A), t 为周期时间 (s), R 为外电阻 (Ω), V 为 MEC 中的有效体积 (m^3).

COD 去除量 (ΔCOD , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 为进水 COD 浓度减去出水 COD 浓度;COD 去除率则用 COD 去除量与进水 COD 比值表示. COD 主要以乙酸形式存在,所消耗的有机物能量 (W_{COD} , kJ) 为:

$$W_{\text{COD}} = \frac{\Delta\text{COD} \times V}{64\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}} \Delta H_s \quad (3)$$

式中, ΔH_s 为底物燃烧热, $\Delta H_{\text{CH}_3\text{COOH}} = 870.28\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

产甲烷量由实验数据根据理想气体状态方程计算获得,产甲烷速率为单位时间、单位体积所产甲烷物质的量,甲烷所含能量 (W_{me} , kJ) 计算公式为:

$$W_{\text{me}} = \frac{pV}{RT} \Delta H_{\text{CH}_4} \quad (4)$$

式中, ΔH_{CH_4} 为甲烷燃烧热 $\Delta H_{\text{CH}_4} = 890.31\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, V 为气体体积 (cm^3), p 为气压 (MPa), T 为温度 (K), R 为常数 $8.314\,472\text{ cm}^3\cdot\text{MPa}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$. T 使用温度计测量, p 取中央气象台网公布的数值.

则根据式 (2)、(3)、(4),能量回收率的计算公式为:

$$\eta = \frac{W_{\text{me}}}{W_{\text{COD}} + W_e} \times 100\% \quad (5)$$

能量增益的计算公式为:

$$\rho = W_{\text{me}} - W_e - W_{\text{CK}} \quad (6)$$

式中, W_{CK} 为对照反应器所产甲烷能量 (kJ).

2 结果与讨论

2.1 不同 COD 条件下产甲烷规律分析

反应器运行两周后, 电流密度曲线趋于稳定; 但直至反应器启动第 50 d 前后, 产甲烷速率才逐渐稳定. 经周期反复运行, 各 MEC 反应器产甲烷速率的平均值如图 1 所示. 相同运行条件下, 空白反应器和 MEC 中产甲烷速率均随着基质 COD 浓度的增加而增大. 空白反应器中, 低、中、高 COD 浓度下的产甲烷速率分别为 $0.09 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1} \pm 0.03 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $0.58 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1} \pm 0.14 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $1.96 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1} \pm 0.74 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; 以 0.5 V 外加电压为例, 低、中、高 COD 浓度下 MEC 的产甲烷速率分别为 $0.19 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1} \pm 0.01 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $1.35 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1} \pm 0.12 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $2.32 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1} \pm 0.74 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 可见, 基质

COD 对 MEC 运行效果的影响显著, 而且随着 COD 浓度升高, MEC 对产甲烷速率的促进作用减小. 在低、中 COD 浓度下, 外加电压 0.5 V 的 MEC 的产甲烷速率比空白反应器分别提高了 120%、132%, 相比之下, COD 高达 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时外加电压 0.8 V 仅仅使产甲烷速率最大提高了约 80%^[15].

中、低 COD 浓度下, MEC 的产甲烷速率比空白反应器均有所提升. 低 COD 浓度下, 产甲烷速率随着外加电压的升高而增大, 外加电压为 0.7 V 时产甲烷速率最大为 $0.28 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1} \pm 0.03 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 中 COD 浓度下, 产甲烷速率随着外加电压的升高先增大后减小, 当外加电压为 0.5 V 时产甲烷速率最大为 $1.35 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1} \pm 0.12 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 而在高浓度 COD 条件下, MEC 与空白产甲烷速率差距减小, 反应器稳定性减弱, 但产甲烷速率最高值仍出现在 0.5 V, 为 $2.32 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1} \pm 0.74 \text{ mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

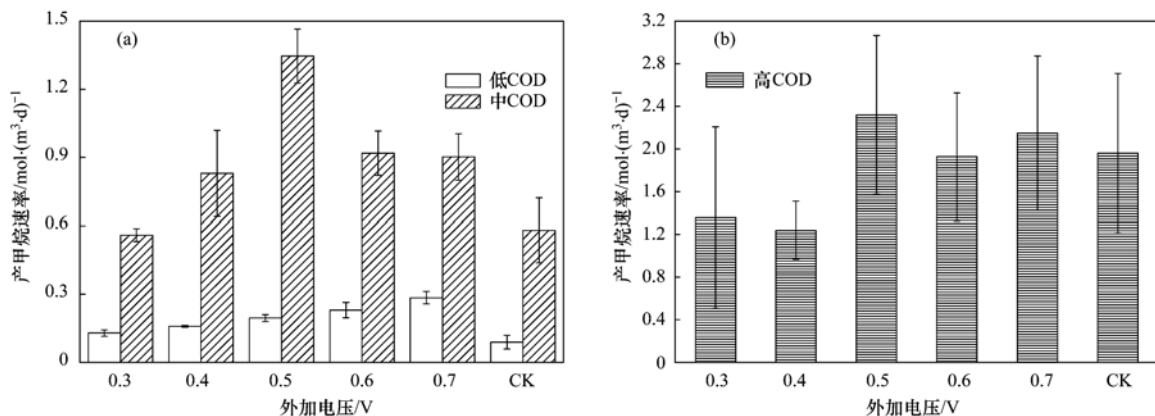


图1 不同外加电压条件下产甲烷速率

Fig. 1 Methane production rate of MEC under different voltage

COD 去除量的结果如图 2 所示. 相同运行条件下, 空白反应器和 MEC 中 COD 去除量均随着基质 COD 浓度的增加而增大. 空白反应器中, 低、中、高 COD 浓度下的 COD 去除量分别为 $277 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $536 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $949 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 229 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 去除率分别为 $42.8\% \pm 8.9\%$ 、 $55.0\% \pm 2.3\%$ 、 $71.1\% \pm 15.1\%$; 以 0.5 V 外加电压为例, 低、中、高 COD 浓度下 MEC 的 COD 去除量分别为 $306 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $722 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $982 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 去除率分别为 $47.5\% \pm 6.2\%$ 、 $75.3\% \pm 7.1\%$ 、 $72.5\% \pm 10.3\%$. 而不同条件下 COD 去除量随外加电压的变化规律与产甲烷速率的变化规律相似. 低、中

COD 去除量均高于空白反应器, COD 去除量的最高值分别出现在 0.7 V 和 0.5 V, COD 去除率最高可

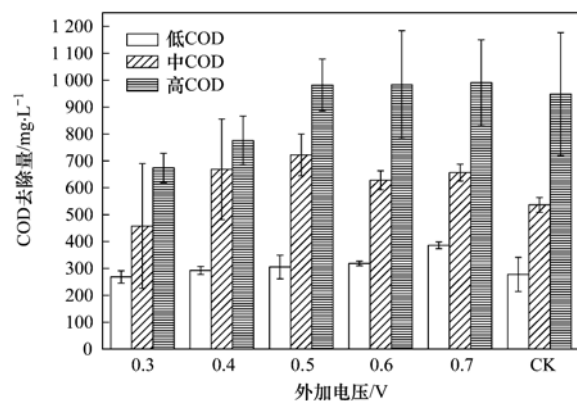


图2 不同外加电压条件下 COD 去除量

Fig. 2 COD removal of MEC under different voltage

达约 76%。其中,中浓度 COD 条件下 COD 最大去除量约为低浓度条件下的 2 倍,同样表明低 COD 条件下进水 COD 对 MEC 运行效果影响显著。

以上数据表明,不同浓度 COD 条件下产甲烷速率和 COD 去除量随外加电压的变化规律不同,这可能是因为:①MEC 的阴、阳极电势随着外加电压的变化而改变,而一定范围内阴极电势越低越有利于产甲烷菌的生长附着^[12],从而促进产甲烷作用,这点将在下一小节讨论;②阳极产电菌和阴极产甲烷菌之间的竞争及协同关系随着外部条件的改变而改变。根据产甲烷菌生态学研究^[19],在乙酸作为底物的单室 MEC 中,产电菌与乙酸营养型产甲烷菌之间存在底物竞争关系;而 Jiang 等^[20]对产甲烷微生物系统的研究表明,产甲烷菌能够和产电菌建立电互营(electric syntrophy)^[21]关系,共同代谢乙酸促进甲烷产生。

2.2 不同 COD、外加电压对电极性能的影响

各 MEC 反应器运行稳定时最大电流密度的比较如图 3 所示。同一电压条件下,随着 COD 浓度的升高,电流密度逐渐升高;随着外加电压的升高,电流密度逐渐增大。这可能是两方面原因造成的。一方面,COD 浓度升高,基质中乙酸钠的含量增加,基质的电导率也略微升高,因此反应器内阻减小,电流密度增大;另一方面,COD 浓度增大,底物浓度升高,阳极产电菌代谢增强,导致电流密度增大。

为了分析生物电极的电学性质,对高浓度 COD 反应器的生物阳极和生物阴极进行线性扫描伏安法测试。如图 4 所示,当阳极电势高于 -0.2 V (vs

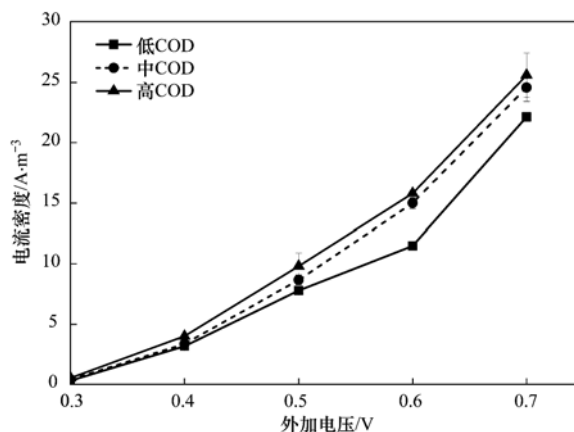


图 3 不同外加电压条件下电流密度

Fig. 3 Current density of MEC under different voltage

SHE)、阴极电势低于 -0.6 V 时,生物电极的电流密度远远大于非生物电极。这说明在 MEC 运行条件下,具有电化学活性的细菌可附着在阳极和阴极表面,从而降低电极的活化内阻。此外,图 4 还显示生物电极的电势受电流影响很大,也即电极极化现象。MEC 系统中,所加外电压越大,则电流密度越大;电流越大则阳极电势越高,而阴极电势等于阳极电势减去外电压,故阴极电势随着外加电压的升高并不一定是逐渐降低的。这与图 5 中展示的电极电势的监测结果相吻合。随着外加电压增大,阳极电势升高,而阴极电势则先降低,后略微升高。当外加电压为 0.5 V 时,阴极电势达到最低,约为 -0.694 V ± 0.001 V。而研究表明电极电势越低越有利于甲烷产生^[13]。这也进一步解释了产甲烷速率和 COD 去除量在此处达到峰值的结果。

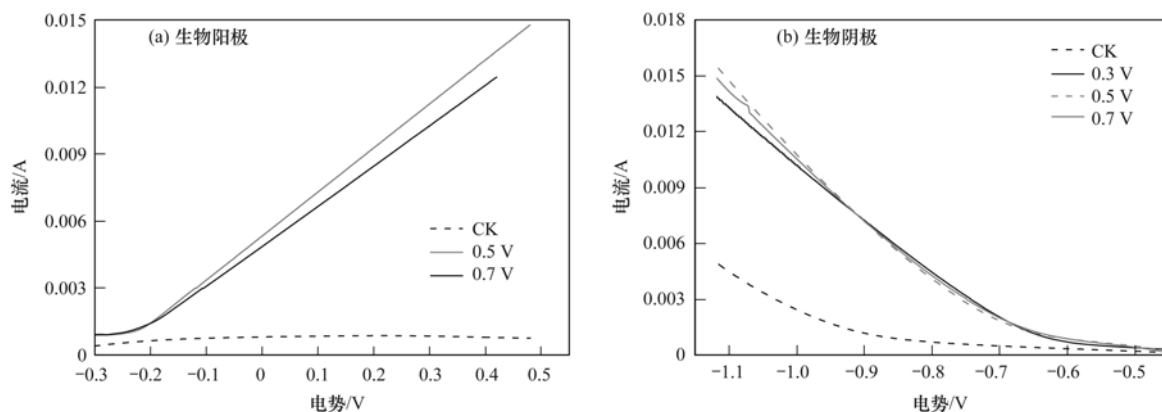


图 4 生物/非生物电极线性扫描伏安法图像

Fig. 4 Linear sweep voltammograms of bioelectrodes/non-bioelectrodes

2.3 MEC 能量效益分析

将所产生物的能量与输入的电能和底物能量相比,得到能量回收率。其结果如图 6 所示。相同运行条件下,空白反应器和 MEC 中能量回收率均随着

基质 COD 浓度的增加而增大。空白反应器中,低、中、高 COD 浓度下的能量回收率分别为 $6.2\% \pm 0.7\%$ 、 $21.4\% \pm 6.3\%$ 和 $40.4\% \pm 13.3\%$; 以 0.5 V 外加电压为例,低、中、高 COD 浓度下 MEC 的能量

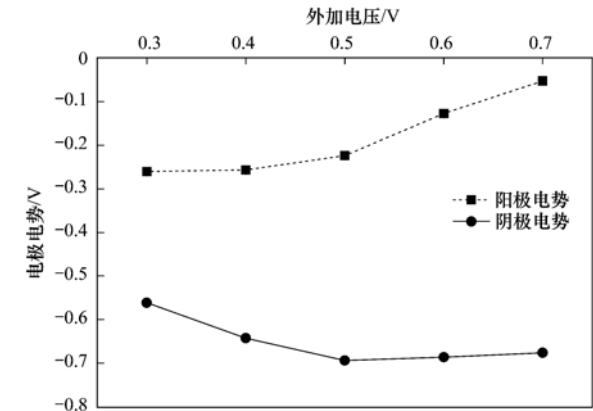


图 5 不同电压条件下电极电势 (vs SHE)
Fig. 5 Electrode potential of MEC under different voltage

回收率分别为 $10.9\% \pm 0.7$ 、 $34.8\% \pm 6.6\%$ 和 $42.8\% \pm 11.0\%$ 。本实验能量回收率低于 Cheng 等的研究^[12]，说明可直接利用阴极还原二氧化碳的产甲烷菌不占主导。低、中、高 COD 条件下，能量回收率均在外加电压 0.5 V 时达到最大值。值得一提的是，中、低 COD 条件下各反应器能量回收率均高于对照反应器，而高 COD 下大部分反应器略低于对照，说明在本实验装置参数下，当 COD 高于 $1\,300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，外加电压对产甲烷作用的促进不明显甚至抑制产甲烷作用，这与 Sasaki 等^[15]报道的结果一致。

能量增益可体现由普通厌氧反应器构建 MEC 反应器所获得的净效益，这对 MEC 实际应用价值的评估至关重要。但近几年类似研究中关于电能输入与甲烷增量（相对于空白反应器）的关系却鲜有报道。本研究中 MEC 产甲烷能量效益如图 7 所示。在中 COD 浓度条件下，外加电压 0.4 V 和 0.5 V 的 MEC 反应器可获得正的能量效益，其中最大值为 $0.44\text{ kJ} \pm 0.09\text{ kJ}$ （约 $1\,450\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ）。多数反应器能量收益均等于或小于空白反应器。换言之，尽管

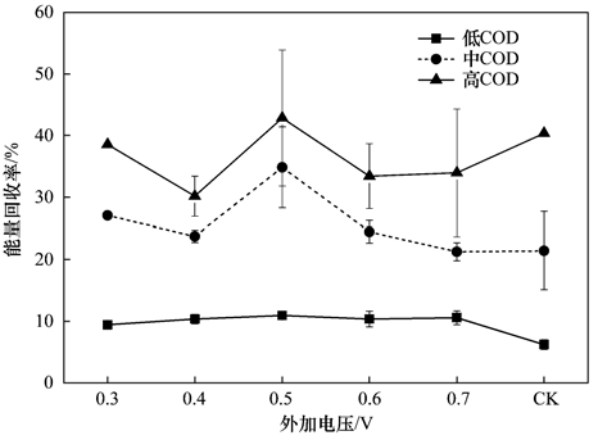


图 6 不同电压条件下能量回收率
Fig. 6 Energy efficiency of MEC under different voltage

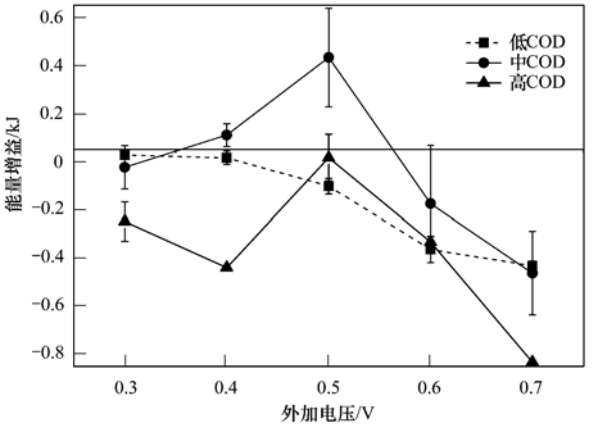


图 7 不同电压条件下能量增益
Fig. 7 Energy profit of MEC under different voltage

一些条件下生物电化学系统能够促进甲烷的产生，但所生成的甲烷增量大都难以弥补输入的电能。因此，选择合适的电学参数对于 MEC 产甲烷的实际应用具有至关重要的意义。

2.4 电极生物膜 SEM 表征

如图 8 所示，为了表征生物电极微生物与电极

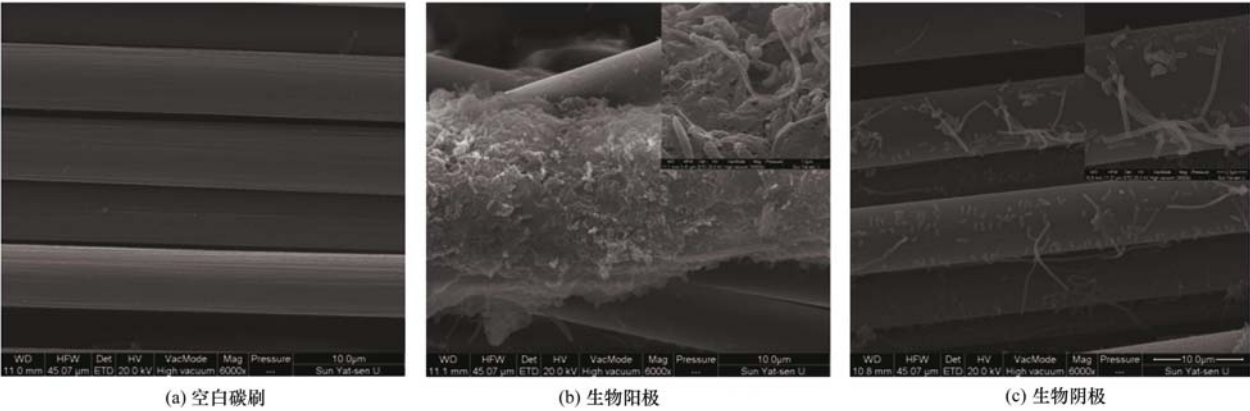


图 8 空白碳刷、生物阳极及生物阴极表面微生物的扫描电镜图像
Fig. 8 SEM images of microorganisms on the surface of non-bioelectrode, bioanode and biocathode

的联系,取运行稳定时 0.5 V 反应器阳极和阴极碳刷进行 SEM 扫描,并以非生物碳刷进行对照. 通过与没有微生物附着的空白对照的对比(均放大 6 000 倍),可看出阳极和阴极碳纤维表面均附着有大量微生物. 阳极碳刷的碳纤维表面包覆了一层很厚的生物膜(厚度约为碳纤维半径),生物膜内细菌种类丰富. 而阴极碳纤维表面相对微生物较少,种类也较少,主要约有两种形态的微生物存在,可能为甲烷短杆菌、甲烷杆菌.

3 结论

(1)在 700、1 000、1 350 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 这 3 种 COD 浓度条件下,MEC 反应器的产甲烷速率和 COD 去除量均随着 COD 浓度的增加而增大.

(2)外加电压为 0.3 ~ 0.7 V 时,700 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ COD 条件下,产甲烷速率随外加电压的升高而升高;1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1 350 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ COD 条件下,产甲烷速率随外加电压的升高先增加后减小,当外加电压为 0.5 V 时产甲烷速率最高. COD 降解的规律与产甲烷速率相似.

(3)LSV 扫描结果显示,当阳极电势高于 -0.2 V(vs SHE)、阴极电势低于 -0.6 V 时,生物电极的电流密度远远大于非生物电极. 这说明在 MEC 运行条件下,具有电化学活性的细菌可附着在阳极和阴极表面,从而降低电极的活化内阻.

(4)在 700、1 000 和 1 350 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 这 3 种 COD 浓度条件下,MEC 反应器的能量回收率随着 COD 浓度的增加而增大. COD 浓度 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和外加电压 0.5 V 时,MEC 可获得最大的能量收益 $0.44 \text{ kJ} \pm 0.09 \text{ kJ}$ (约 $1\,450 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$).

参考文献:

- [1] Rabaey K. Bioelectrochemical systems: from extracellular electron transfer to biotechnological application [M]. London: International Water Associations Publishing of Alliance House, 2010. 1-3.
- [2] Logan B E. Microbial fuel cells[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2008. 125-145.
- [3] 张玲,梁鹏,黄霞,等. 生物阴极型微生物燃料电池研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(11): 110-114.
- [4] Jeremiasse A W, Hamelers H V M, Buisman C J N. Microbial electrolysis cell with a microbial biocathode [J]. Bioelectrochemistry, 2010, **78**(1): 39-43.
- [5] Huang L P, Regan J M, Quan X. Electron transfer mechanisms, new applications, and performance of biocathode microbial fuel cells[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(1): 316-323.
- [6] Lovley D R. Powering microbes with electricity: direct electron transfer from electrodes to microbes [J]. Environmental Microbiology Reports, 2011, **3**(1): 27-35.
- [7] He Z, Angenent L T. Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells[J]. Electroanalysis, 2006, **18**(19-20): 2009-2015.
- [8] Xia X, Tokash J C, Zhang F, et al. Oxygen-reducing biocathodes operating with passive oxygen transfer in microbial fuel cells[J]. Environmental Science and Technology, 2013, **47**(4): 2085-2091.
- [9] Park H I, Kim J S, Kim D K, et al. Nitrate-reducing bacterial community in a biofilm-electrode reactor [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, **39**(3): 453-458.
- [10] Coma M, Puig S, Pous N, et al. Biocatalysed sulphate removal in a BES cathode[J]. Bioresource Technology, 2013, **130**: 218-223.
- [11] Clauwaert P, Verstraete W. Methanogenesis in membraneless microbial electrolysis cells [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, **82**(5): 829-836.
- [12] Cheng S A, Xing D F, Call D F, et al. Direct biological conversion of electrical current into methane by electromethanogenesis [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(10): 3953-3958.
- [13] Villano M, Aulenta F, Ciucci C, et al. Bioelectrochemical reduction of CO_2 to CH_4 via direct and indirect extracellular electron transfer by a hydrogenophilic methanogenic culture[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(9): 3085-3090.
- [14] Sasaki K, Morita M, Sasaki D, et al. A bioelectrochemical reactor containing carbon fiber textiles enables efficient methane fermentation from garbage slurry[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(13): 6837-6842.
- [15] Sasaki K, Sasaki D, Morita M, et al. Bioelectrochemical system stabilizes methane fermentation from garbage slurry [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(10): 3415-3422.
- [16] Sasaki D, Sasaki K, Watanabe A, et al. Operation of a cylindrical bioelectrochemical reactor containing carbon fiber fabric for efficient methane fermentation from thickened sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2013, **129**: 366-373.
- [17] Sasaki D, Sasaki K, Watanabe A, et al. Efficient production of methane from artificial garbage waste by a cylindrical bioelectrochemical reactor containing carbon fiber textiles [J]. AMB Express, 2013, **3**: 17.
- [18] 李亮,黄丽,刘燕. 城市生活污水厌氧生物处理发展现状[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, **5**(12): 1-6.
- [19] Ahring B K. Biomethanation I[M]. Berlin: Springer, 2003. 1-30.
- [20] Jiang S H, Park S, Yoon Y, et al. Methanogenesis facilitated by geobiochemical iron cycle in a novel syntrophic methanogenic microbial community [J]. Environmental Science and Technology, 2013, **47**(17): 10078-10084.
- [21] Kato S, Hashimoto K, Watanabe K. Methanogenesis facilitated by electric syntrophy via (semi) conductive iron - oxide minerals[J]. Environmental Microbiology, 2012, **14**(7): 1646-1654.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedum in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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