

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

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

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000 ~ 2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升钼压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

阳极内添加阳离子交换树脂提升辊压“三合一”膜电极 MFC 性能

梅卓, 张哲, 王鑫*

(南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 阳极-隔膜-阴极的“三合一”膜电极结构能够最大程度减小阴阳极间距, 提高微生物燃料电池 (microbial fuel cell, MFC) 的输出功率。为进一步提高 MFC 性能, 本研究使用非贵金属材料构建了辊压“三合一”膜电极系统, 其欧姆内阻降低至 3 ~ 5 Ω 。以乙酸钠为底物, MFC 的最高功率密度达到 446 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。向阳极内添加固体小球 (如聚苯乙烯球和玻璃微球) 可在辊压过程中增加阳极表面和内部的大孔, 强化电解液向阴极的传递从而使 MFC 的功率密度提升 10%。添加阳离子交换树脂能够进一步强化阳极内部的质子传递, 提高阴极电位, 从而将功率密度提升至 543 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。此外, 阳极内添加阳离子交换树脂还可提高电池运行的稳定性和库仑效率。

关键词: 微生物燃料电池; “三合一”膜电极系统; 离子迁移; 阳离子交换树脂; 欧姆内阻

中图分类号: X382 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4311-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.048

Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells

MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin*

(Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The membrane electrode assembly (MEA) with an anode-membrane-cathode structure can reduce the distance between anode and cathode to improve the power of microbial fuel cells (MFCs). Here in order to further promote the performance of MFCs, a novel MEA was constructed by rolling-press method without noble metal material, and the Ohmic resistance decreased to 3-5 Ω . The maximum power density was 446 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ when acetate was used as the substrate. Solid spheres (like polystyrene balls and glass microspheres) were added into anode to enhance the transportation of electrolyte to cathode, resulting in a 10% increase in power density by producing macropores on and in the anode during rolling process. Cation exchange resin was added to accelerate the transportation of proton through the anode so that the power density further increased to 543 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$. Meanwhile, the stability of cell voltage and Coulomb efficiency of MFC were both enhanced after the addition of cation exchange resin.

Key words: microbial fuel cell; membrane electrode assembly; ionic migration; cation exchange resin; Ohmic resistance

微生物燃料电池 (microbial fuel cells, MFC) 是一种利用活体微生物作为催化剂, 将有机物中的化学能直接转化为电能的装置^[1,2]。附着在阳极表面的异养电化学活性细菌通过新陈代谢作用, 在厌氧环境下将污染物降解或转化。降解过程中产生的电子通过外电路传递至阴极, 产生的质子则透过膜到达阴极与电子、氧气 (或者其他氧化剂) 发生反应, 最终生成水 (或其他的氧化产物)^[3]。MFC 可利用的底物来源广泛, 既可以是小分子有机酸、醇等物质^[4], 又可以利用实际污水实现污染物向电能直接转化^[5~9]。

MFC 功率的进一步提升受很多因素限制, 包括阴极面积^[10,11]、溶液导电性^[12]、阳极环境^[13]和电极结构^[14]等几方面。其中过大的阴阳极间距造成了较大的欧姆内阻, 是一个重要的限制因素。Liu

等^[15]发现, 当单室空气阴极 MFC 的两极间距由 4 cm 缩短为 2 cm 时, 功率密度提高了 68%。然而当两极间距由 2 cm 进一步减少至 1 cm 时, 过量的 O_2 扩散反而使功率密度降低了 48%^[16]。因此, 为了解决在空气阴极 MFC 中同时实现最大程度降低电极间距与防止短路和过量氧扩散的问题, 分隔介质是必需的^[17,18]。曹效鑫等^[19]设计的“三合一”电极, 即膜-电极组合 (membrane electrode assembly, MEA), 将阳极、质子交换膜和阴极紧密压在一起, 有效地减小了阴阳极距离, 降低了 MFC 内阻, 进而提高了

收稿日期: 2015-04-27; 修订日期: 2015-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21107053); 天津市应用基础与前沿技术研究项目 (13JCQNJC08000)

作者简介: 梅卓 (1994 ~), 男, 主要研究方向为生物电化学系统在污水处理和植物修复的应用, E-mail: meimei0426@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xinwangl@nankai.edu.cn

功率密度. 迄今为止, 对于 MEA 的研究主要集中在分隔材料上, 研究开发出了如 J-cloth、玻璃纤维膜等低成本高性能的实用材料^[17,18], 关于“三合一”膜电极结构电极方面的研究主要集中在阴极方面. 为了提高“三合一”膜电极性能和降低成本, 以往的研究中提出了使用活性炭制作空气阴极^[20]、使用不同孔隙率的扩散层^[21]和阴极间隔器^[22]等. 然而“三合一”膜电极结构的另一个限制因素是阳极内的离子传递效率, 即微生物氧化有机物产生的质子需要透过阳极传递至分隔介质和阴极. 至今尚未有此方面的研究报道. 本研究拟使用辊压技术制备新型辊压阳极-隔膜-阴极的“三合一”膜电极结构, 通过向阳极内部添加阳离子交换树脂, 目标是改善阳极内部离子迁移的条件, 提高 MFC 性能.

1 材料与方法

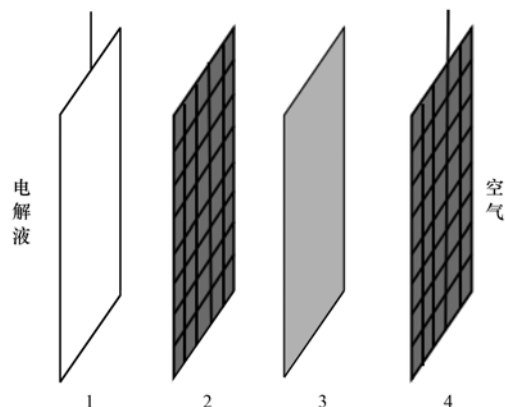
1.1 “三合一”膜电极系统及 MFC 反应器的构建

本研究采用单室有机玻璃立方体 MFC, 其有效空间是直径为 3 cm 的圆柱体内室, 有效容积为 28 mL. 反应器顶部开有两个小孔, 用于更换培养液和电化学测试, 培养时用橡胶塞密封. 圆柱体两端水平间距为 4 cm, 一端密封, 另一端为工作面积 7 cm² 的辊压膜电极. 辊压膜电极 (图 1) 的阴极一侧直接暴露在空气中, 另一侧浸泡在电解液中. 为避免接触电阻对阳极性能的影响, 使用钛丝环作为电子收集器; 阴极则直接将电极中的不锈钢网与外电路连接构成回路. 依靠反应器两端的螺杆和盖板将阳极、隔膜和阴极紧紧压合在一起, 组成膜电极系统.

1.2 膜电极的制备

本研究中的辊压膜电极结构参照上文提及的“三合一”电极^[19], 以辊压混合离子交换树脂隔膜替代质子交换膜, 辊压阳极、辊压阴极替代碳纸组成辊压膜电极 (图 1).

用活性炭替代昂贵的 Pt/C 作为阴极催化剂. 由于膜电极中阳极和隔膜均具有一定承受水压的能力, 因此空气阴极仅制备催化层. 称取 6 g 活性炭并向其中加入 45 mL 乙醇, 超声搅拌 10 min 后加入 667 μ L 聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE) 乳液 (60%, 上海河森电气有限公司), 保证活性炭与 PTFE 质量比为 6:1, 超声搅拌 10 min. 将其转入 80℃ 水浴并继续搅拌直至形成膏状体后通过辊压机 (PX-GY-150 型) 辊压成膜, 与不锈钢网共同辊压至 0.6 mm, 制成辊压空气阴极^[23,24] (图 2).



1. 钛丝环; 2. 辊压阳极及钢网;
3. 辊压混合离子交换树脂隔膜; 4. 辊压阴极及钢网

图1 “三合一”辊压膜电极微生物燃料电池结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the rolled membrane electrode assembly prepared by rolling press method in microbial fuel cells

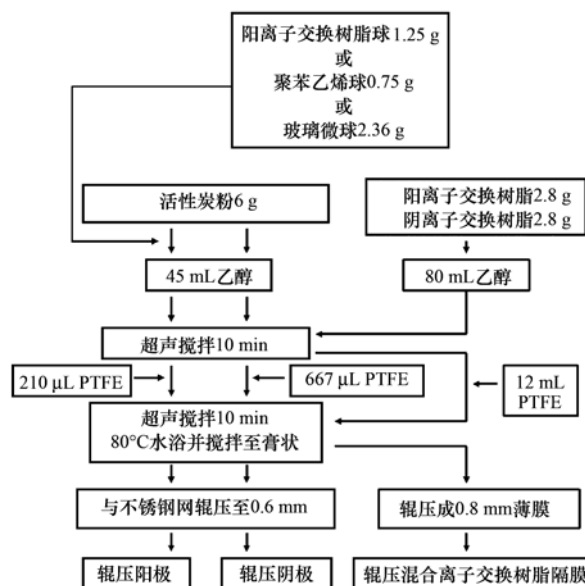


图2 辊压膜电极制作材料及过程

Fig. 2 Materials and process of preparing rolled membrane electrode

空白组辊压阳极制备过程与空气阴极基本相同, 其中活性炭 (SPC-02S, 福建鑫森炭业股份有限公司) 与 PTFE 的质量比为 19:1. 在另三组阳极的活性炭粉 (6 g) 中分别添加等体积、粒径相同 (100 μ m) 的阳离子交换树脂球 (1.25 g, 005 $\times$ 7、205 $\times$ 7, 南开大学化工厂)、聚苯乙烯球 (0.75 g, 长沙晶康新材料科技有限公司)、玻璃微球 (2.36 g, 天津博瑞健和色谱技术有限公司) 以改变阳极结构.

使用辊压混合离子交换树脂隔膜替代价格昂贵的离子交换膜. 称取 2.8 g 阳离子交换树脂与 2.8 g 阴离子交换树脂并加入 80 mL 乙醇, 超声搅拌 10

min 后加入 12 mL PTFE 乳液(60%), 超声搅拌 10 min, 转入 80℃ 水浴并搅拌至膏状体后辊压成 0.8 mm 薄膜。

1.3 底物成分和反应器运行

用稳定运行两年以上的 MFC 出水与培养液的混合液接种反应器^[25,26]。培养液包括 50 mmol·L⁻¹ 磷酸缓冲液(phosphate buffered solution, PBS)、5 mL·L⁻¹ 维他命溶液和 12.5 mL·L⁻¹ 微量金属溶液^[25], 并添加 1 g·L⁻¹ 的乙酸钠作为阳极底物^[27]。空白组、阳离子树脂组、玻璃微球组和聚苯乙烯球组每组分别同时运行 3 个反应器, 以做平行实验。

微生物燃料电池组装和接种完成后, 置于 30℃ 恒温培养箱内启动, 外电路连接 1 000 Ω 电阻, 输出电压采用在线数据采集系统进行实时显示和记录。在运行过程中, 整个反应器保持密闭以维持阳极的厌氧状态。当输出电压低于 50 mV 时, 重新更换培养液, 记为一个周期。

1.4 分析及测试方法

通过电化学交流阻抗法测量 4 组 MFC 的内阻。其中电化学工作站(Autolab PGSTAT 302N, 瑞士)的工作电极连接阳极, 参比电极和辅助电极连接阴极, 扫描频率范围为 100 kHz ~ 10 mHz。为比较膜电极在无菌溶液中的性能, 本研究对 4 种不同的阳极分别进行线性扫描伏安法测试, 扫描范围为 0.3 ~ -0.2 V, 扫描速度 0.1 mV·s⁻¹。测试采用三电极体系, 其中待测阳极作为工作电极, 铂片电极(1 cm²) 作为对电极, Ag/AgCl(3.5 mol·L⁻¹ KCl) 作为参比电极。每个样品重复扫描 3 次, 如果第 2 次和第 3 次数据相同, 取第 3 次数据。极化曲线和功率密度曲线通过变电阻法获得。使用可调电阻箱控制外电阻 R_e , 根据公式:

$$J = V/(R_e A) \text{ 和 } P = JV$$

计算得到电流密度(J)和功率密度(P), 绘制极化曲线、电极电位曲线和功率密度曲线, 式中, V 为电池电压, R_e 为外电路电阻, A 为电极面积。使用扫描电子显微镜(Shimadzu SS-550, 日本岛津)在不同放大倍数下观察 4 种阳极的表观形貌。辊压阳极的离子交换容量采用化学滴定方法测定: 准确称取少量阳极薄膜样品(小于 2 g)于烧杯中, 加入 80 mL 1 mol·L⁻¹ HCl 溶液浸泡充分(24 h), 然后将薄膜取出, 用蒸馏水冲洗至甲基橙不变色。接着将阳极薄膜转移至 1 mol·L⁻¹ 的 NaCl 溶液(80 mL)中充分浸泡(24 h), 最后用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液滴定, 直到酚酞变色滴定结束。

2 结果与讨论

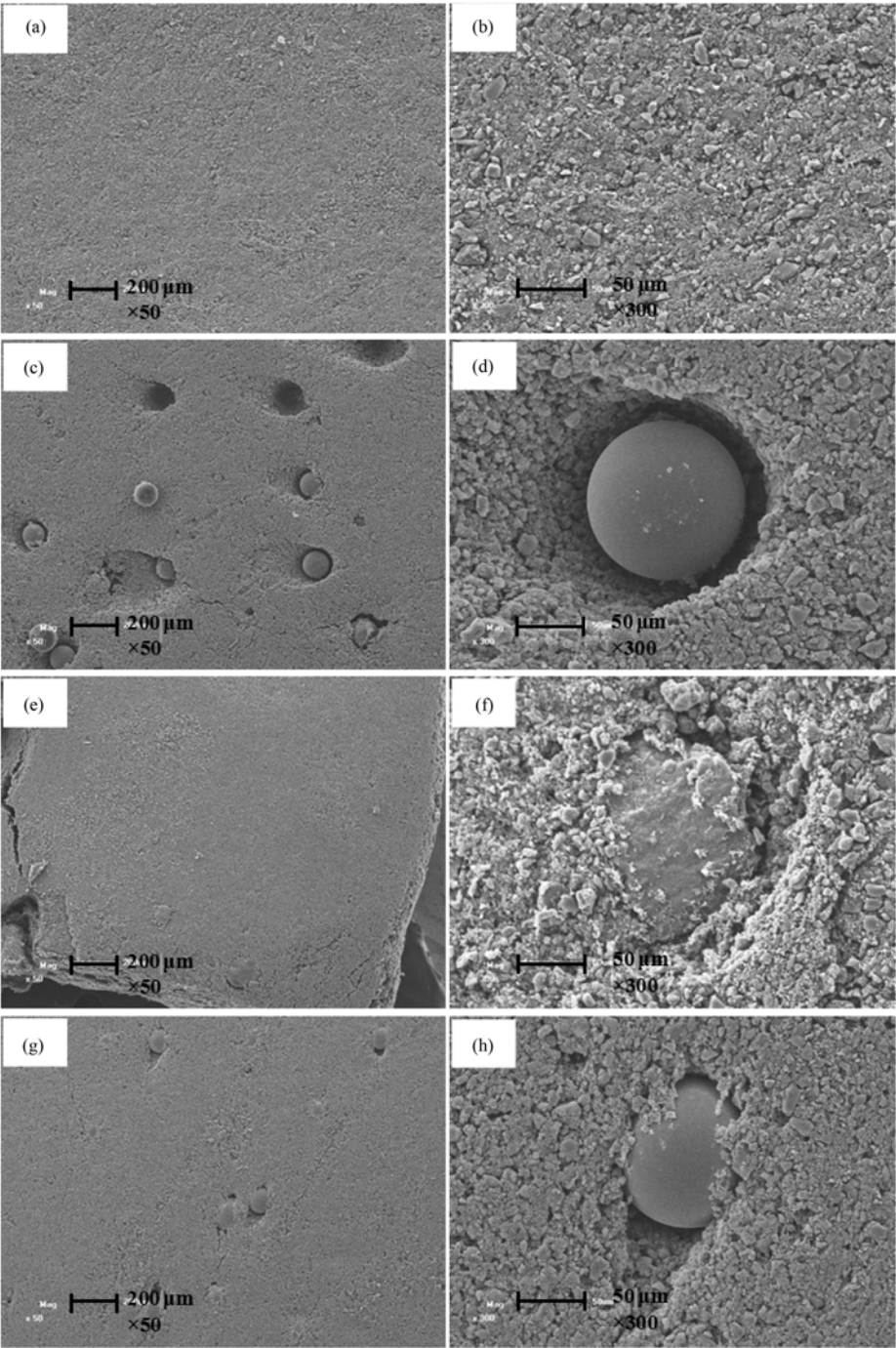
2.1 “三合一”膜电极阳极内部孔结构及其离子交换特性

加入了阳离子交换树脂的辊压阳极照片[图 3(c)、3(d)]与空白组阳极[图 3(a)、3(b)]对比, 可显著观察到阳离子交换树脂球直径约为 100 μm, 镶嵌在形状不规则的小颗粒活性炭中。由于二者粒径相差悬殊, 加之辊压过程中机器施加的压力, 使得碳颗粒与树脂球嵌合部位形成了较大的间隙, 为阳极内部和表面创造了更丰富的大孔。相同粒径的聚苯乙烯球[图 3(e)、3(f)]与玻璃微球[图 3(g)、3(h)]的造孔效果在孔深和孔分布密度上均不如阳离子交换树脂。由于聚苯乙烯球的硬度较小, 即在辊压过程中的抗压能力较差, 使得聚苯乙烯球在阳极内不能呈现规则球形, 影响造孔效果。颗粒的“造孔”作用可能会使阳极表面产生的质子更容易穿过阳极到达隔膜, 提高阳极的传质速率。

将离子交换容量测定的滴定结果代入公式计算得出, 添加阳离子交换树脂阳极的离子交换容量(Q_c)为 0.221 mmol·g⁻¹, 约为空白阳极的 28 倍(0.008 mmol·g⁻¹), 表明在阳极内添加阳离子交换树脂提高了阳极的质子交换能力。加入聚苯乙烯球与玻璃微球的阳极的 Q_c 值分别为 0.004 mmol·g⁻¹ 与 0.003 mmol·g⁻¹, 与空白阳极相比分别降低了 50% 和 62.5%, 表明聚苯乙烯球和玻璃微球两种添加物不仅不具备阳离子交换特性, 而且会导致阳极离子交换容量下降。离子交换容量下降可能是由于部分聚苯乙烯球和玻璃微球替代了多孔的活性炭颗粒, 导致单位质量电极中由活性炭微孔吸附提供的离子交换容量减小。

2.2 “三合一”膜电极的无菌电化学性能分析

在以往的研究中^[28], 以相同的方法制作的活性炭空气阴极的传质内阻低至 1.5 Ω, 对阴极的性能影响较小; 加之本研究关注离子传递造成的物理内阻, 故只对 4 组膜电极 MFC 的欧姆内阻进行测试。本研究中 4 种阳极组装的膜电极 MFC 欧姆内阻差别不大, 平均值为 (3.73 ± 0.72) Ω(表 1)。空白组为 (3.81 ± 0.01) Ω, 这与以往研究中以石墨毡为阳极、碳布为阴极、质子交换膜为分隔介质的膜电极 MFC 的欧姆内阻(3.1 Ω)相比差别不大^[29], 而相较于阴阳极间距为 4 cm 的单室碳布 MFC 的欧姆内阻(31 Ω)减小了 88%^[18]。表明此“三合一”膜电极结构中较小的阴阳极间距可有效减小欧姆内阻, 使用



图中(a)、(b)为空白对照组；阳离子交换树脂组为(c)、(d)；(e)、(f)为聚苯乙烯球组；玻璃微球组为(g)、(h)；(a)、(c)、(e)、(g)放大倍数为50，(b)、(d)、(f)、(h)放大倍数为300

图3 不同材料表面扫描电镜照片

Fig. 3 Scanning electron microscopy images of surface in different materials

表1 不同膜电极 MFC 的欧姆内阻

Table 1 Ohmic resistance of MFCs with different MEAs

“三合一”型 MFC	空白组	阳离子交换树脂组	聚苯乙烯球组	玻璃微球组
欧姆内阻/ Ω	3.81 ± 0.01	4.45 ± 0.06	3.37 ± 0.12	3.28 ± 0.28

混合阴阳离子交换树脂和聚四氟乙烯的辊压薄膜作为分隔介质是可行的。阳极内添加聚苯乙烯球及玻

璃微球分别使欧姆内阻降低了 12% 和 14%。然而添加阳离子交换树脂后欧姆内阻却升高了 17%，考

虑到 4 组膜电极的欧姆内阻差别不大, 相差数值与 MFC 电荷转移内阻(以 Pt 为阴极的 MFC 通常为 $49 \Omega^{[30]}$) 相比可忽略。可见, 向阳极内添加离子交换树脂、聚苯乙烯球和玻璃微球虽然能影响阳极表面和内部的孔结构, 但其对欧姆内阻的影响可忽略。

线性伏安扫描(linear sweep voltammetry, LSV) 曲线(图 4) 中, 4 组阳极开路电位(open circuit potential, OCP) 均集中在 $(0.189 \pm 0.011) \text{ V}$ 。随着施加在阳极上的过电位逐渐增大, 电流密度随之上升。其中, 在阳极添加了阳离子交换树脂、聚苯乙烯球和玻璃微球的电池电流增长速率均大于空白阳极组, 并且阳离子交换树脂组的增长最为显著。相同电位下, 添加了聚苯乙烯球和玻璃微球的膜电极电流密度和变化趋势都较为接近。当电位达到 -0.2 V 时, 阳离子交换树脂组达到了最高电流密度($3.33 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$), 与相同电位下空白组最高电流密度($2.01 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$) 相比升高了 66%, 聚苯乙烯球组和玻璃微球组与相同电位下空白组相比分别升高了 32% 和 29%。可见, 在阳极内部添加阳离子交换树脂、聚苯乙烯球和玻璃微球均能提升膜电极性能。玻璃微球和聚苯乙烯球组的电流密度较为相近, 可能是因为两种材料均可在阳极表面和内部造孔。而阳离子交换树脂球具有额外的离子交换特性, 加速了阳极内部的质子传递, 因此获得了更大的电流密度。

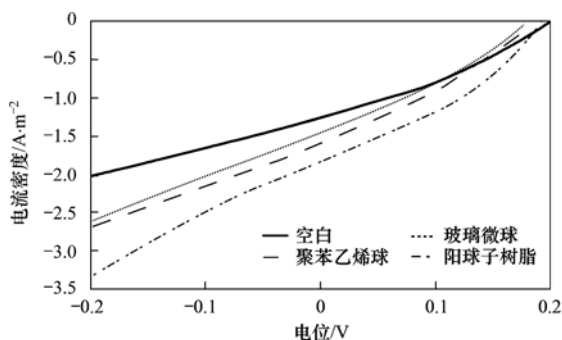


图 4 4 种膜电极在 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PBS}$ 中的 LSV 曲线

Fig. 4 Linear sweep voltammetry curves of four different MEAs in $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PBS}$

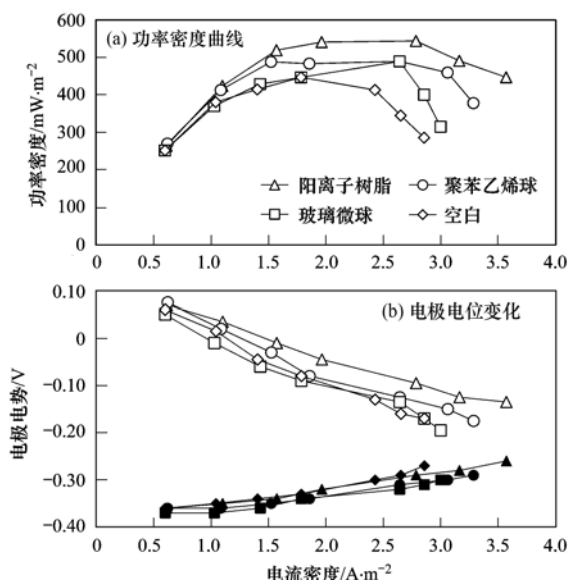
2.3 “三合一”膜电极 MFC 的产电性能分析

4 组 MFC 的产电性能可通过功率密度曲线[图 5(a)] 进行比较。阳离子交换树脂组最大功率密度为 $543 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ($2.8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$) 比空白组 ($446 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, $2.5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$) 高 22%, 较玻璃微球组和聚苯乙烯球组(均为 $489 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, $2.7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$) 高 11%, 与已有报道的“三合一”型微生物燃料电池最大功率密度 ($300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$) 相比提高了 81%^[19]。

电极电位曲线[图 5(b)] 表明, 功率密度的差异主要来自阴极电位。随着电流密度的升高, 4 组 MFC 的阳极电位均从 $(-0.36 \pm 0.01) \text{ V}$ 上升至 $(-0.28 \pm 0.02) \text{ V}$, 不同组间差别较小, 表明向阳极内添加阳离子交换树脂、聚苯乙烯球和玻璃微球对阳极性能的影响可以忽略不计。这主要是由于阳极上的生物膜生长于膜电极靠近溶液一侧, 微生物的生长受阳极内部结构影响较小。

和阳极不同的是, 4 组 MFC 的阴极电位存在明显差异[图 5(b)]。4 组电池的阴极电位都随着电流密度逐渐增大而降低。阳离子交换树脂组的阴极电位在相同电流密度下明显高于其他 3 组, 聚苯乙烯球组的阴极电位则略高于玻璃微球组及空白组。空白组的阴极电位在低电流密度下(小于 $1.0 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$) 和聚苯乙烯球组接近, 但在高电流密度(大于 $1.8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$) 下则是最低的。添加不同材料的 MFC 阴极性能与功率密度的差别结果基本一致, 表明 MFC 功率密度的不同主要是由阴极性能的差异造成的。

近期的研究工作证实, 阴极材料增加阳离子交换容量会降低局部 pH^[31]。结合阳离子交换容量的测定结果, 推测阳极内部离子迁移性能的差异可能是造成阴极性能不同的主要原因。“三合一”结构膜电极内部的离子迁移过程如图 6 所示。附着在阳极表面的异养电化学活性菌产生的质子穿过辊压阳极



空心图标为阴极, 实心图标为阳极

图 5 4 种不同膜电极 MFC 在 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PBS}$ 溶液中的功率密度曲线和电极电位变化

Fig. 5 Power density curves and changes in electrode potentials of MFCs using different MEAs in $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PBS}$

和辊压混合离子交换树脂隔膜到达阴极与氧气结合生成水。一旦质子迁移受到限制,阴极局部则会发生 $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ 反应。 OH^- 积累将导致阴极局部 pH 升高,阴极过电位升高。pH 每升高一个单位,阴极电位就会降低 59.35mV ^[32],而阳离子树脂的存在可以减缓阴极的局部 pH 升高^[31]。向阳极内部辊压阳离子交换树脂,可能一方面使阳极表面和内部增加了传导电解液的大孔。如辊压聚苯乙烯球组和玻璃微球组的极化曲线和电极电位曲线所示,玻璃微球组和聚苯乙烯球组功率密度(均为 $489\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$, $2.7\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$)较空白组($446\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$, $2.5\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$)提高 10%,MFC 的阴极性能也略有提升。另一方面,阳离子交换树脂的阳离子交换特性为质子的传递提供了额外的便利。笔者推测较“造孔”功能而言,离子交换特性对于提升阴极性能以及整体 MFC 的功率密度可能具有更加显著的效果(图 5)。上述推测需要在未来的研究中进一步证实。

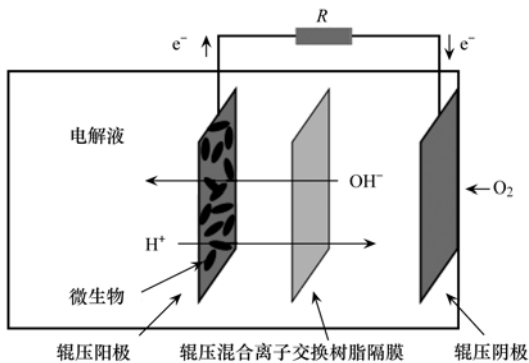


图6 “三合一”膜电极微生物燃料电池内部传质过程示意

Fig. 6 Schematic diagram of the mass transfer process in the MEA of MFCs

2.4 “三合一”膜电极 MFC 的运行性能分析

典型周期的电能输出曲线(图 7)表明,MFC 在刚更换培养液时降解有机物的速率高,3 h 内电压迅速上升至最大值,4 组 MFC 输出电压大致相同

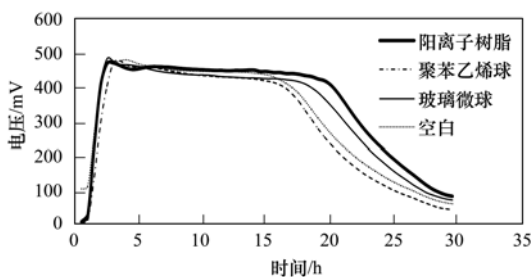


图7 4组MFC在单个周期中的电压输出

Fig. 7 Voltage outputs of four MFCs in one cycle

(453 ± 7) mV。达到最大值后阳离子交换树脂组 MFC 的稳定输出电压时间为 17 h,较聚苯乙烯球组、玻璃微球组和空白组增加了 55%、21% 和 70%,较长的高电压稳定输出时间表明阳极内添加阳离子交换树脂可增加 MFC 的库仑效率。基于本周电压和 COD 降解结果,库仑效率由大到小依次为阳离子树脂组(11.17%)>玻璃微球组(9.42%)>聚苯乙烯球组(8.35%)>空白组(6.72%)。

10 个周期内,MFC 每周期最大电压的变化情况如图 8 所示。随着运行时间加长,空白组 MFC 单周期最大输出电压($1000\ \Omega$)衰减较剧烈,由 430 V (第 1 周期)下降至 230 V (第 10 周期),而剩余 3 组的运行情况相对平稳。这表明在阳极内添加阳离子交换树脂、聚苯乙烯球和玻璃微球的“三合一”膜电极能够提升 MFC 的运行稳定性。

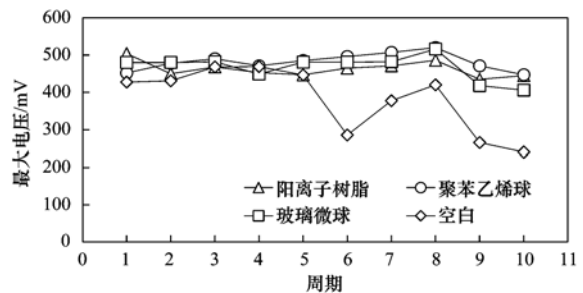


图8 4组MFC在10个周期内最大电压变化曲线

Fig. 8 Variation curves of maximum voltages of four MFCs in 10 cycles

3 结论

本研究中以辊压法制备了无贵金属“三合一”膜电极系统,以不锈钢网为电子收集体,阳极和阴极材料均为活性炭和聚四氟乙烯,分隔介质为混合阴阳离子交换树脂和聚四氟乙烯的辊压薄膜,最大输出功率密度达到 $446\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。辊压“三合一”膜电极微生物燃料电池与已有研究相比欧姆内阻显著下降,约为 $3\sim5\ \Omega$ 。在阳极添加阳离子交换树脂可将 MFC 功率密度提升至 $543\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$,原因可能是其在阳极表面和内部造孔和阳离子交换特性使得离子迁移加速,防止了阴极局部 pH 升高,提高了阴极电位、库仑效率以及 MFC 的运行稳定性。上述结果表明,增加阳极内大孔和提升阳极材料的阳离子交换性能是提高“三合一”膜电极 MFC 性能的新途径。

参考文献:

- [1] Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation [J]. Trends in

- Biotechnology, 2005, **23**(6): 291-298.
- [2] Bennetto H P, Box J, Delaney G M, *et al.* Redox-mediated electrochemistry of whole microorganisms; from fuel cells to biosensors [A]. In: Turner A F T, Karube I, Wilson G S (eds.). Biosensors: Fundamentals and Applications [M]. Oxford: Oxford University Press, 1987. 291-314.
- [3] 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 & Technology, 2004, **38**(14): 4040-4046.
- [4] 冯玉杰, 王鑫, 李贺, 等. 基于微生物燃料电池技术的多元生物质生物产电研究进展 [J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2525-2531.
- [5] Min B, Logan B E. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(21): 5809-5814.
- [6] Liu H, Ramnarayanan R, Logan B E. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(7): 2281-2285.
- [7] Min B, Kim J, Oh S, *et al.* Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells [J]. Water Research, 2005, **39**(20): 4961-4968.
- [8] Oh S, 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.
- [9] 尤世界, 赵庆良, 姜珺秋. 废水同步生物处理与生物燃料电池发电研究 [J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1786-1790.
- [10] Cheng S A, Logan B E. Increasing power generation for scaling up single-chamber air cathode microbial fuel cells [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(6): 4468-4473.
- [11] 刘百仓, 姚雪, 周先敏, 等. 阴极电极面积和膜面积对 H 型 MFCs 产电能力的影响 [J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1837-1842.
- [12] Hoskins D L, Zhang X Y, Hickner M A, *et al.* Spray-on polyvinyl alcohol separators and impact on power production in air-cathode microbial fuel cells with different solution conductivities [J]. Bioresource Technology, 2014, **172**: 156-161.
- [13] Ullery M L, Logan B E. Anode acclimation methods and their impact on microbial electrolysis cells treating fermentation effluent [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, **40**(21): 6782-6791.
- [14] Kim K Y, Yang W L, Logan B E. Impact of electrode configurations on retention time and domestic wastewater treatment efficiency using microbial fuel cells [J]. Water Research, 2015, **80**: 41-46.
- [15] Liu H, Cheng S A, Logan B E. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(14): 5488-5493.
- [16] Cheng S A, Liu H, Logan B E. Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(7): 2426-2432.
- [17] Zhang X Y, Cheng S A, Wang X, *et al.* Separator characteristics for increasing performance of microbial fuel cells [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(21): 8456-8461.
- [18] Fan Y Z, Hu H Q, Liu H. Enhanced Coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration [J]. Journal of Power Sources, 2007, **171**(2): 348-354.
- [19] 曹效鑫, 梁鹏, 黄霞. “三合一”微生物燃料电池的产电特性研究 [J]. 环境科学学报, 2006, **26**(8): 1252-1257.
- [20] Zhang X Y, He W H, Ren L J, *et al.* COD removal characteristics in air-cathode microbial fuel cells [J]. Bioresource Technology, 2015, **176**: 23-31.
- [21] Zhang F, Pant D, Logan B E. Long-term performance of activated carbon air cathodes with different diffusion layer porosities in microbial fuel cells [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2011, **30**(1): 49-55.
- [22] Yang Q, Feng Y J, Logan B E. Using cathode spacers to minimize reactor size in air cathode microbial fuel cells [J]. Bioresource Technology, 2012, **110**: 273-277.
- [23] Dong H, Yu H B, Wang X, *et al.* A novel structure of scalable air-cathode without Nafion and Pt by rolling activated carbon and PTFE as catalyst layer in microbial fuel cells [J]. Water Research, 2012, **46**(17): 5777-5787.
- [24] 董恒. 基于活性炭的低成本、高性能微生物燃料电池空气阴极研究 [D]. 天津: 南开大学, 2013.
- [25] Wang X, Cheng S A, Feng Y J, *et al.* Use of carbon mesh anodes and the effect of different pretreatment methods on power production in microbial fuel cells [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(17): 6870-6874.
- [26] Rabaey K, Boon N, Siciliano S D, *et al.* Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, **70**(9): 5373-5382.
- [27] 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 & Technology, 2005, **39**(2): 658-662.
- [28] Zhang Y Y, Wang X, Li X J, *et al.* A novel and high performance activated carbon air-cathode with decreased volume density and catalyst layer invasion for microbial fuel cells [J]. RSC Advances, 2014, **4**(80): 42577-42580.
- [29] Moon J M, Kondaveeti S, Min B. Evaluation of low-cost separators for increased power generation in single chamber microbial fuel cells with membrane electrode assembly [J]. Fuel Cells, 2015, **15**(1): 230-238.
- [30] Zhang X Y, Pant D, Zhang F, *et al.* Long-term performance of

- chemically and physically modified activated carbons in air cathodes of microbial fuel cells [J]. *ChemElectroChem*, 2014, **1** (11): 1859-1866.
- [31] Wang X, Feng C J, Ding N, *et al.* Accelerated OH⁻ transport in activated carbon air cathode by modification of quaternary ammonium for microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(7): 4191-4198.
- [32] Freguia S, Rabaey K, Yuan Z G, *et al.* Non-catalyzed cathodic oxygen reduction at graphite granules in microbial fuel cells [J]. *Electrochimica Acta*, 2007, **53**(2): 598-603.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 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