

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筼筮湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能

全向春, 全燕苹, 肖竹天

(北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 研究了广泛应用的农药 2,4-二氯苯氧乙酸(2,4-D)存在对微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFCs)产电性能、污染物去除及微生物群落结构的影响,并探讨了阳极预曝气对 2,4-D 的强化去除及产电影响。结果表明,向以乙酸钠为燃料的双室型微生物燃料电池阳极室内加入 2,4-D,会降低系统输出电压,降低功率密度,增加内阻。当 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 2,4-D 与乙酸钠($850 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)共存时,与乙酸钠单基质相比,最大功率密度从 $0.151 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 迅速下降到 $0.057 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,内阻相应从 524Ω 增加到 1230Ω 。为了加快系统中 2,4-D 的去除,减少其对产电菌的抑制效应,采用阳极预曝气 6 h 的运行方式,显著提高了 2,4-D 去除效率,同时获得了 $0.42 \sim 0.47 \text{ V}$ 的最高输出电压。2,4-D 加入后 MFC 阳极微生物群落结构发生了变化,选择出了多种 2,4-D 降解菌及具有 2,4-D 耐受能力的产电菌。研究表明,可以通过阳极预曝气方式强化 2,4-D 去除的同时从 MFCs 系统回收电能。

关键词: 微生物燃料电池; 2,4-二氯苯氧乙酸; 阳极曝气; 生物降解; 难降解有机物

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1067-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201608126

Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells

QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: This study investigated the effects of a widely used herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on power generation, pollutants removal from microbial fuel cells (MFCs) and microbial community changes, and also explored anode pre-aeration for enhanced 2,4-D removal and power generation. The results showed that when 2,4-D was inputted to the anode chamber of MFCs which was previously enriched with acetate sodium as the fuel, the voltage output and power density declined and the internal resistance increased apparently. The maximum power density declined to $0.057 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in the presence of $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 2,4-D comparing to $0.151 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ obtained with acetate alone ($850 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), and the internal resistance increased from 524Ω to 1230Ω correspondingly. To accelerate 2,4-D removal rate and reduce its inhibition to anode exoelectrogens, 6h pre-aeration was applied to the anode chamber. Fast removal of 2,4-D was achieved during aeration period and simultaneous high maximum voltage output ($0.42 \sim 0.47 \text{ V}$) was obtained. Anode microbial community changed after 2,4-D addition and several 2,4-D degrading bacteria and 2,4-D tolerant exoelectrogen were enriched. MFCs could be used for 2,4-D removal and simultaneous power generation through anode pre-aeration.

Key words: microbial fuel cell (MFC); 2,4-dichlorophenoxyacetic acid; anode aeration; biodegradation; recalcitrant organics

微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)是近年来发展起来的一种污水同步处理与电能回收技术^[1,2]。它是一种利用产电微生物作为生物催化剂将有机物降解并产生电能的装置^[3,4]。许多易降解有机物能够在燃料电池中被微生物降解并产电^[5]。MFC 特殊的厌氧环境也为难降解废水的处理提供了可能。虽然有研究报道含纤维素^[6]、垃圾渗滤液^[7]、硝基苯^[8]、喹啉^[9]、甲苯^[10]、偶氮染料^[11]、苯酚^[12]等难降解有机物的废水也可以在 MFC 系统中降解,但难降解有机物的存在往往会抑制系统产电。因此,如何提高难降解有机物的处理效果并同步产电,成为 MFC 系统推广应用的关键。

2,4-二氯苯氧乙酸(2,4-D)是一种广泛应用的

除草剂,它毒性强,对许多生物具有“三致”效应^[13]。2,4-D 的芳环结构和氯代原子的存在使其很难被降解,在环境中具有持久性^[14,15]。生物方法是去除废水中 2,4-D 的主要方法,如利用对 2,4-D 具有高效降解作用的微生物进行生物强化,或采用高效的颗粒污泥技术等。当利用微生物燃料电池污水处理系统处理含 2,4-D 的废水时,2,4-D 存在对系统产电及微生物群落结构有何影响,如何通过 MFC 操作模式的优化强化 2,4-D 的去除同步产电,相关研究尚

收稿日期: 2016-08-19; 修订日期: 2016-10-17

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130003110028)

作者简介: 全向春(1973~),女,教授,博士生导师,主要研究方向为废水生物处理, E-mail: xchquan@bnu.edu.cn

未开展,有待深入研究.

本研究以 MFC 系统强化 2,4-D 去除为目标,探讨了不同浓度 2,4-D 加入阳极室对 MFC 系统产电影响,以及阳极预曝气对 2,4-D 强化去除效应及微生物群落结构影响. 本研究对于推动微生物燃料电池技术在难降解废水中的应用具有理论价值与实践意义.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验使用一种方形双室 MFC, 阳极室和阴极室体积均为 100 mL, 阳极采用碳布 (2 cm × 8 cm, HCP330, 河森, 上海), 阴极采用涂覆铂催化剂 (0.40 mg·cm⁻²) 的碳纸 (3 cm × 4 cm), 两极间用质子交换膜分隔 (PEM). PEM 在使用前进行预处理, 以去除表面的有机物和金属离子杂质: 将膜放入 80℃ 的 3% 过氧化氢中 1h, 用 80℃ 的去离子水冲洗膜 1 h, 再将膜在 80℃ 的 1 mol·L⁻¹ 硫酸溶液中浸泡 1 h, 用 80℃ 的去离子水冲洗膜 1 h. 经过清洁的 Nafion 膜被存放在去离子水中, 使用前在空气中风干. 用铜导线连接阳极, 外接负载和阴极. 所有连接处暴露的金属均用非导电性的环氧树脂密封. MFC 的运行温度设定为 (30℃ ± 1℃), 系统在间歇条件下运行.

1.2 微生物接种与运行

采用取自污水处理厂的厌氧污泥和好氧颗粒污泥进行接种. 挂膜时, 阳极室和阴极室需要使用磷酸盐缓冲溶液 (phosphate buffered solution, PBS) 来增加溶液的导电和缓冲能力. 以含 2 000 mg·L⁻¹ 乙酸钠的 PBS 溶液 (50 mmol·L⁻¹, pH = 7.0) 作为阳极液, 以单纯的 PBS 溶液 (50 mmol·L⁻¹, pH = 7.0) 作为阴极液并从阴极室底部曝气. 当阳极表面形成可见生物膜时, 去除阳极液中的悬浮和沉淀污泥.

在实验中, 用于 MFC 的基质有乙酸钠、2,4-D、乙酸钠和 2,4-D 的混合液. MFC 先使用乙酸钠作为基质, 启动成功后转换为混合基质. 向 MFC 中加入有 2,4-D 降解能力的好氧颗粒污泥和厌氧污泥混合物, 以便快速构建具有 2,4-D 降解能力的 MFC 体系. 成功启动后的 MFC 首先在阳极厌氧模式下运行, 伴随着不同浓度的 2,4-D 加入, 每种浓度条件至少运行两个周期且电压降至 50 mV 以下时更换基质. 每次更换基质后, 阳极室吹氮 10 min 以保证厌氧状态. 之后采用间歇曝气的方式运行, 在每个周期开始前对阳极曝气 6 h, 用于强化 2,4-D 的去除.

1.3 分析检测方法

水质指标: 化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 按照标准分析法测定, 溶解氧采用便捷式溶解氧测定仪 (雷磁 JPBJ-608) 进行测定, 2,4-D 的浓度采用高效液相色谱仪 (HPLC) (Waters 1525, USA) 进行检测, 进样前用 0.22 μm 的膜过滤. 流动相为: 甲醇: 水 = 3: 1, 检测波长为紫外 280 nm, 液体流动速度为 1 mL·min⁻¹.

电化学测定与计算: 数据采集由连接在电脑上的数据采集卡 (RBH8253, 瑞博华科技, 中国) 来实现; 电流密度 (I_A) 由欧姆定律计算; 极化曲线可以采用稳态放电法测定, 通过测定 MFC 在不同外电阻条件下稳定放电时的外电阻电压, 通过 $I = U/R$ 得到电流, 进而得到极化曲线, 将极化曲线的欧姆极化区数据线性拟合所得到的斜率为表观内阻. 其它电化学测定使用电化学工作站 (CHI600D, 上海辰华) 实现.

微生物群落分析使用变性梯度凝胶电泳 (denaturing gradient gel electrophoresis, DGGE) 技术. 采用 DNA 提取试剂盒从生物膜样品中提取细菌基因组 DNA, 采用通用引物 341F (5'-CCT ACG GGA GGC AGC AG-3') 和 907R (5'-CCG TCA ATT CCT TTG AGT TT-3') 扩增 V3 区. 扩增步骤为: 首先在 95℃ 下变性 10 min, 接着循环 30 周期, 该周期包括 94℃ 下变性 30 s, 57℃ 下退火 1 min, 72℃ 下延伸 2 min, 循环结束. 最后 72℃ 下延伸 7 min. 扩增后的样品在 DGGE (Bio-Rad, USA) 系统进行分析, 采用 6% (质量浓度) 的聚丙烯酰胺凝胶, 变性梯度为 30% ~ 55%. 分析结果采用 SYBR Green I (Invitrogen, USA) 染色后在成像仪 (VILBER INFINITY 3000, France) 上进行成像分析. 条带割胶测序扩增后送至美吉生物技术公司进行测序分析. 基因序列通过 BLAST 进行比对分析.

2 结果与讨论

2.1 MFCs 系统对 2,4-D 的去除及产电性能

不同浓度 2,4-D 存在时 MFC 的电压输出如图 1 所示. 可以发现最高输出电压随 2,4-D 的浓度增加而降低. 在对照系统 (无 2,4-D), 最高电压可达到 0.53 V, 当 2,4-D 浓度分别为 30、80、180 和 300 mg·L⁻¹ 时, 最高电压分别降为 0.51、0.47、0.33 和 0.31 V. 输出电压的下降可能是由于 2,4-D 的生物毒性抑制了产电微生物活性, 另一方面 2,4-D 还原过程消耗了一部分电子. Sun 等^[11] 也报道了持久性

难降解污染物对能量输出的抑制,发现 $1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的活性艳红 X-3B (ABRX3) 可使最高输出电压降低 25%.

系统稳定后,在 MFC 运行的一个周期内研究了 2,4-D 和 COD 的去除,如图 2 和图 3 所示. 可以发现,2,4-D 的去除速率随其浓度的增加而增加,而 COD 去除率随 2,4-D 浓度升高而降低,当 2,4-D 的浓度分别为 30、80、180 和 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其平均去除速率为 0.23 、 0.51 、 1.44 和 $2.02 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,对应 COD 的去除率为 96%、95%、78% 和 68%. 当运行时间足够长,2,4-D 可以被完全去除,其氯离子释放率达到 96% ~ 100%.

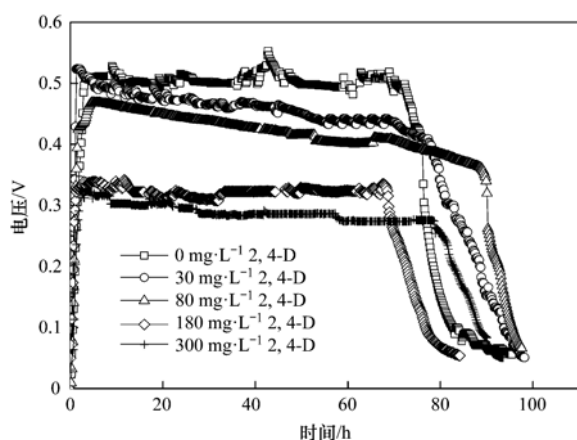


图 1 不同浓度 2,4-D 存在时 MFC 的输出电压

Fig. 1 Voltage output from MFCs in the presence of different concentrations of 2,4-D

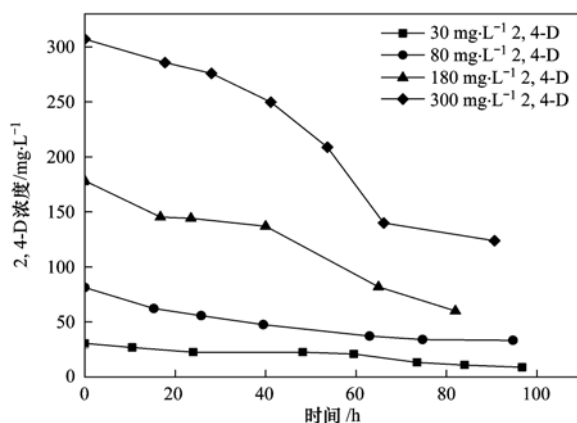


图 2 不同浓度 2,4-D 存在下 2,4-D 的去除曲线

Fig. 2 Removal of 2,4-D at different concentrations

图 4 比较了 2,4-D-乙酸钠混合以及 2,4-D 单独作为基质底物时的产电变化. 当混合基质含有 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 2,4-D 时,产生最大电压为 0.31 V ,但是 2,4-D 单独存在的情况下没有电压产生,这表明 2,4-D 不能被胞外产电菌利用而产电. 另一方面,混合基质中乙酸钠促进了 2,4-D 的降解,使其平均去

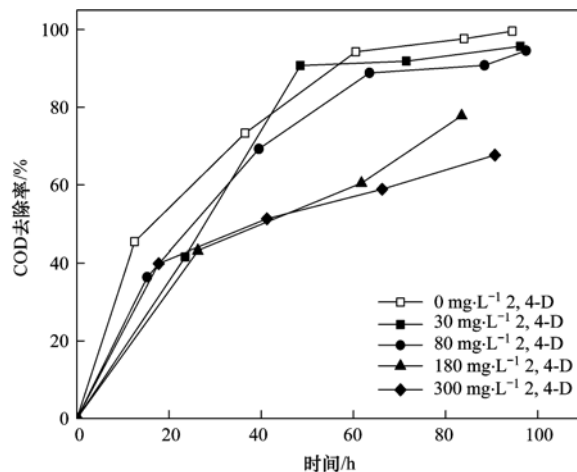


图 3 不同浓度 2,4-D 存在下 COD 的去除曲线

Fig. 3 Removal of COD in the presence of different concentration of 2,4-D

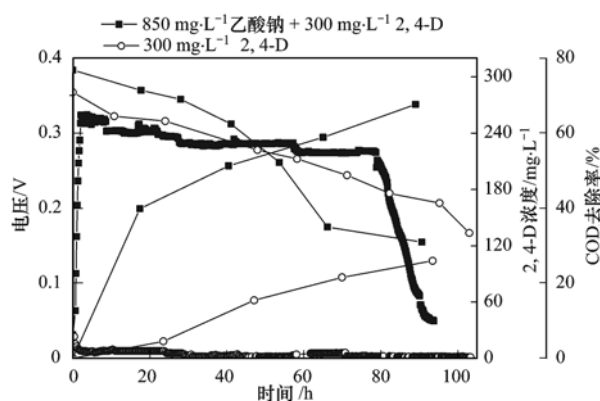


图 4 2,4-D 单基质及与乙酸钠共基质条件下 MFCs 系统污染物去除和电压输出情况

Fig. 4 Electricity generation and voltage output from MFCs fed with 2,4-D alone as the fuel or the mixed substrates of 2,4-D and acetate sodium

除速率从 $1.46 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ (仅 2,4-D) 增加到 $2.02 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ (混合基质). 可见,MFC 系统中易降解基质乙酸钠的存在可以促进难降解有机物 2,4-D 的去除. Luo 等^[12]研究也发现,MFC 系统中易降解有机物葡萄糖存在能提高苯酚和吡啶的去除效率.

当输出电压稳定后,改变外电阻测得以乙酸钠和 2,4-D 混合溶液作为基质的极化曲线和功率输出变化曲线,如图 5 所示,并根据内阻和外电阻相等时输出功率最大的原理计算了内阻大小,见表 1.

发现当 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 2,4-D 存在时,与乙酸钠 ($850 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 单基质相比,最大功率密度从 $0.151 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 迅速下降到 $0.057 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,如表 1 所示,内阻相应地从 524Ω 增加到 1230Ω . 2,4-D 的存在使得功率密度急剧下降,内阻急剧增加,这可能是由于 2,4-D 的毒害作用影响阳极微生物活性以及吸收部

表 1 不同基质各周期的内阻变化

Table 1 Internal resistance in different cycles with increasing concentration of 2,4-D

基质类型	内阻/ Ω
乙酸钠 + 0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 2,4-D	524
乙酸钠 + 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 2,4-D	550
乙酸钠 + 80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 2,4-D	712
乙酸钠 + 180 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 2,4-D	1 150
乙酸钠 + 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 2,4-D	1 230

分电子用于 2,4-D 的自身还原. 有研究采用相似的 MFC 系统探究难降解有机物吡啶和吡啶对产电影响,发现 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 吡啶作碳源可得最大功率密度为 1.7 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[16],吡啶作碳源能获得最大功率密度为 1.7 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[17].

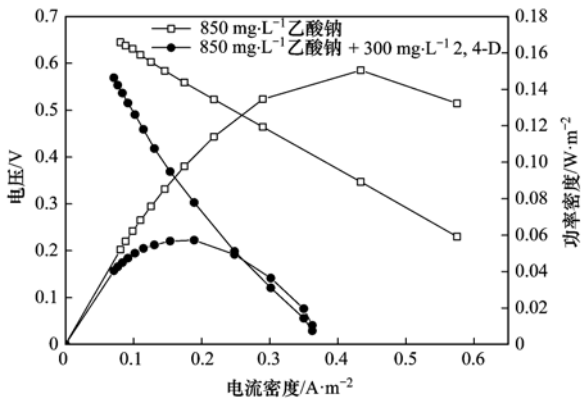


图 5 乙酸钠单基质及与 2,4-D 共基质条件下 MFCs 系统极化曲线密度比较

Fig. 5 Comparison of polarization curves produced by MFCs fed with 850 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ acetate alone and its mixture with 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 2,4-D

2.2 阳极预曝气对 2,4-D 强化去除效应

本研究结果表明即使经过长时间的适应培养(4 个月左右),2,4-D 仍不能被用于 MFC 产电,而且其存在还会对产电微生物产生抑制作用. 因此,当其存在于阳极室时需要建立一种快速去除 2,4-D 的方法. 考虑到有机污染物一般可以通过有氧呼吸被快速生物降解,因此在每个周期的前 6 h 给阳极室曝气,然后再转换为普通的厌氧运行方式. 阳极曝气对于 2,4-D 的去除和产电的影响如图 6 和图 7 所示. 可以发现即使在曝气阶段,电压也快速升高至 0.42 ~ 0.47 V. 然而,产电周期相比非曝气系统缩短并且也随着运行周期数的增加而降低. 可能有以下几方面原因:曝气加速了有机污染物在运行初期的降解,从而导致运行周期缩短;随着运行周期数增加,更多的好氧细菌成为阳极的优势菌群. 除

了实验开始的周期,从其它几个周期看,6 h 的预曝气会加速 2,4-D 的降解,特别是第 3 周期的 6 h 去除率接近 50%,预曝气的效果直接促进了后续运行过程中 MFC 系统对 2,4-D 的降解,使得 MFC 在大部分 2,4-D 被去除之前都能保持较高的输出电压. 从阳极传统厌氧运行转为预曝气的第一周期,2,4-D 降解速率并未得到显著提升,可能是因为阳极厌氧细菌在厌氧状态运行长时间后,曝气会抑制其活性. 本研究中发现阳极微生物对于氧气存在一定的抵抗力,在已有研究中也有相似结果. 有研究表明如果基质足够,在 MFC 运行期间微量提升溶解氧含量至 0.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 并不会影响能量输出^[18]. 一些特殊菌群例如 *Shewanella oneidensis* DSP 10 甚至能够在高溶解氧环境($\geq 8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下产电^[19]. 这些数据表明以连续曝气和厌氧模式运行 MFC 可以强化一些难降解有机物的去除. 在 MFC 中同时存在难降解有机污染物和易降解污染物的情况下,难降解污染物可能会对产电微生物群体产生毒害作用并阻碍电能输出,此时可以通过阳极预曝气方式加快难降解有机物去除,然后再转入厌氧运行产电模式. 虽然阳极曝气过程,由于氧气与电子结合会消耗部分电子流,从而降低库仑效率,但阳极室输入的燃料为难降解有机物与易降解有机物混合基质时,快速降低难降解有机物对产电菌的抑制毒性效应,对于后续产电过程更为重要. 因此,有必要在此情形下采取阳极预曝气-厌氧运行模式.

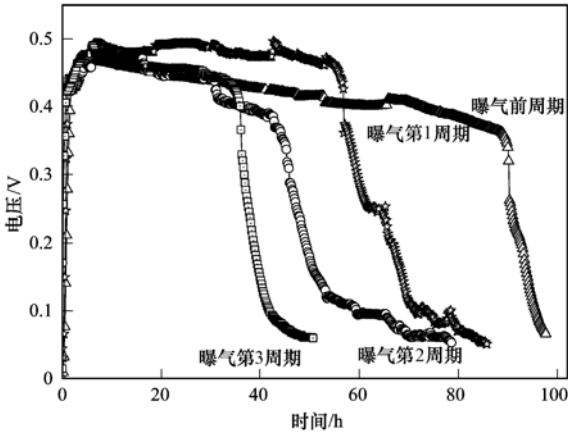


图 6 阳极曝气时的输出电压(多个周期)

Fig. 6 Voltage curves of MFC with sequential aeration in anode chamber(multiple cycles)

2.3 微生物群落分析

分别以乙酸钠或 2,4-D 单独作为基质,乙酸钠与 2,4-D 混合作为基质,考察了 MFC 系统微生物菌群结构的变化,采用 DGGE 对其进行了分析,结果如

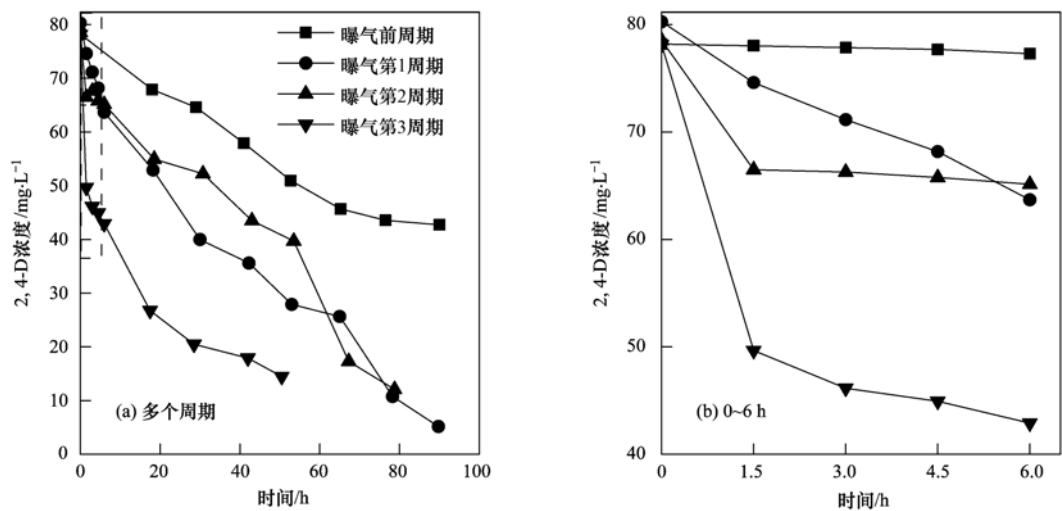


图 7 阳极曝气时 2,4-D 的去除曲线

Fig. 7 Removal curves of 2,4-D with sequential aeration in anode chamber

图 8 所示. 表 2 列出了图 8 谱带基因测序后 BLAST 结果.

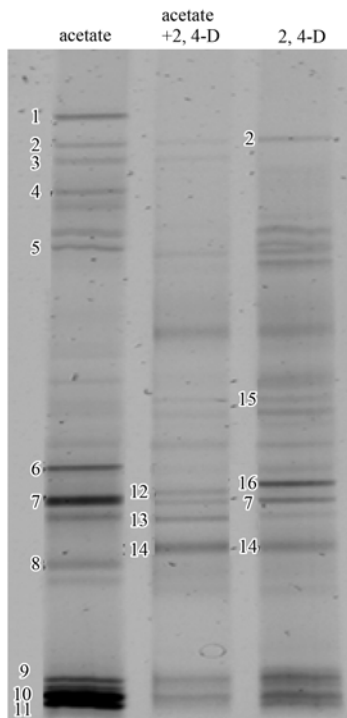


图 8 不同基质条件下阳极附着生物膜的 DGGE 条带

Fig. 8 DGGE bands for biofilms attached on anode electrode with different substrates

从图 8 中可以看出, 乙酸钠单独作为基质获得的条代数较多, 这些条带对应的细菌主要属于 *Bacteroides* sp. (条带 2 和 3)、*Clostridium* sp. (条带 5)、*Delftia* sp. (条带 6)、*Comamonas* sp. (条带 7)、*Diaphorobacter* sp. (条带 8)、*Rhodospirillaceae* sp. (条带 9)、*Sphaerochaeta* sp. (条带 10) 和 *Azospirillum* sp. (条带 11). 当 MFC 中加入 2,4-D

之后, 一些条带就弱化或者消失了, 例如条带 1、4、6 和 8, 这表明这些条带所代表的菌株遭受了 2,4-D 的毒害作用. 而一些新的条带如 12、13 和 14 出现, 它们分别属于 *Acidobacteria bacterium* sp.、 *β -Proteobacterium* sp. 和 *Sphingobium* sp.. 单独以 2,4-D 为基质运行的 MFC, 获得的比较明显的条带是 2、7、9、10、14 和 16, 它们分别属于 *Bacteroides* sp.、*Comamonas* sp.、*Azospirillum* sp.、*Sphaerochaeta* sp.、*Sphingobium* sp. 和 *Variovorax* sp.. 在这些菌种中, *Sphingobium* sp.^[20]、*Variovorax* sp.^[21]、*Azospirillum* sp.^[22]、*Comamonas* sp.^[23] 均被报道能够降解 2,4-D. 例如, *Sphingobium* sp. 被报道含有降解 2,4-D 的 *cadA* 基因^[20]. 一些 *Variovorax* sp. 菌属例如 *Variovorax paradoxus* 能够在含有 2,4-D 的环境中生长并且能以 2,4-D 作为唯一碳源^[21], *Comamonas* sp. 也能够在 Fe(III) 还原环境中生物降解 2,4-D^[23].

Comamonas sp. 也是微生物染料电池系统普遍存在的具有产电功能的微生物类群^[24]. *Comamonas* sp. 属于 *Comamonadaceae* 科, 其是兼性厌氧的微生物且广泛存在于缺氧环境. 例如, 在低溶解氧浓度下 ($DO = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) *Comamonadaceae* sp. 占食品加工废水处理细菌总数的 52.3%, 它们由大量的脱氮细菌组成^[25]. 此外, *Bacteroides* sp. 也曾被报道为具有产电特性的铁还原菌^[26], *Sphaerochaeta* sp. 是具有钒(V)还原能力的产电菌^[27]. 由此可见, 当阳极室加入 2,4-D 后, 阳极生物膜会进一步选择出具有 2,4-D 降解特性的微生物与产电微生物共存.

表 2 以不同类型基质为碳源时阳极生物膜的微生物组成信息

Table 2 Microbial composition for the anode biofilm enriched with different substrates

条带编号	最似物种	相似度/%	系统分类	相似物种登录号
1	Uncultured bacterium clone NK-M30	99	Uncultured bacterium	JN685491.1
2	<i>Bacteroides</i> sp. 22C	99	<i>Bacteroidetes</i>	AY554420.1
3	<i>Bacteroidetes bacterium</i> 4F6B	100	<i>Bacteroidetes</i>	AB623230.1
4	Bacterium enrichment culture clone DPF25	99	Uncultured bacterium	GQ377128.1
5	<i>Clostridium</i> sp. C5S7	99	<i>Firmicutes</i>	AB539900.1
6	<i>Delftiaacidovorans</i> strain WR42	96	β -Proteobacterium	JF700415.1
7	<i>Comamonas</i> sp. CG001	100	β -Proteobacterium	JN995542.1
8	<i>Diaphorobacter</i> sp. bk_62	99	β -Proteobacterium	HQ538669.1
9	<i>Azospirillum</i> sp. CRRI-31	91	α -Proteobacterium	JN592448.1
10	<i>Sphaerochaeta</i> sp. GLS2	96	<i>Sphaerochaeta</i>	JN944166.1
11	<i>Azospirillum</i> sp. UNPF1	100	α -Proteobacterium	AB696837.1
12	<i>Acidobacteria bacterium</i> Ac-F6	96	Uncultured bacterium	GQ902908.1
13	β -Proteobacterium sp. oral strain A08KA	98	β -Proteobacterium	AY005031.1
14	<i>Sphingobium</i> sp. 662	100	α -Proteobacterium	JF297621.1
15	<i>Comamonas</i> sp. BF1	96	β -Proteobacterium	EU869280.1
16	<i>Variovorax</i> sp. DC2a-29	100	β -Proteobacterium	AB552857.1

3 结论

(1)向以乙酸钠为基质启动的 MFC 系统阳极室内加入 2,4-D 后,由于 2,4-D 对阳极微生物的抑制毒害作用,系统的产电电压及最大功率密度降低,内阻显著增加。

(2)MFC 系统不能够以 2,4-D 为唯一碳源产电,乙酸钠与 2,4-D 共存条件下能够达到同步产电及 2,4-D 去除的目的,但 2,4-D 去除速率较低。

(3)通过在阳极室内预曝气方式可以强化 2,4-D 的去除,此后转入阳极厌氧运行,仍然可以达到较高的电能回收。

(4)2,4-D 加入后 MFC 阳极微生物群落结构发生了变化,选择出了多种 2,4-D 降解菌及具有 2,4-D 耐受能力的产电菌。

参考文献:

[1] 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.

[2] Qiao Y, Bao S J, Li C M, *et al.* Nanostructured polyaniline/titanium dioxide composite anode for microbial fuel cells [J]. *ACS Nano*, 2007, **2**(1): 113-119.

[3] Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation [J]. *Trends in Biotechnology*, 2005, **23**(6): 291-298.

[4] He Z, Minteer S D, Angenent L T. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(14): 5262-5267.

[5] 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.

[6] Rismani-Yazdi H, Christy A D, Dehority B A, *et al.* Electricity generation from cellulose by rumen microorganisms in microbial fuel cells [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, **97**(6): 1398-1407.

[7] Zhang J N, Zhao Q L, You S J, *et al.* Continuous electricity production from leachate in a novel upflow air-cathode membrane-free microbial fuel cell [J]. *Water Science and Technology*, 2008, **57**(7): 1017-1021.

[8] 李婕, 刘广立, 张仁铎, 等. 葡萄糖和硝基苯为混合燃料时 MFC 的产电特性研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2811-2817.

Li J, Liu G L, Zhang R D, *et al.* Power generation from glucose and nitrobenzene degradation using the microbial fuel cell [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(11): 2811-2817.

[9] 陈姗姗, 张翠萍, 刘广立, 等. 纯菌株与混合菌株在 MFC 中降解喹啉及产电性能的研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2148-2154.

Chen S S, Zhang C P, Liu G L, *et al.* Electricity generation and quinoline degradation of pure strains and mixed strains in the microbial fuel cell [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(9): 2148-2154.

[10] Bond D R, Lovley D R. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(3): 1548-1555.

[11] Sun J, Hu Y Y, Bi Z, *et al.* Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(13): 3185-3192.

[12] Luo H P, Liu G L, Zhang R D, *et al.* Phenol degradation in microbial fuel cells [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, **147**(2-3): 259-264.

[13] Pochettino A A, Bongiovanni B, Duffard R O, *et al.* Oxidative stress in ventral prostate, ovary, and breast by 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid in pre-and postnatal exposed rats [J]. *Environmental Toxicology*, 2013, **28**(1): 1-10.

- [14] 方国东, 司友斌. 纳米四氧化三铁对 2,4-D 的脱氯降解[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1499-1505.
Fang G D, Si Y B. Dechlorination degradation of 2,4-D by nanoscale Fe_3O_4 [J]. Environmental Science, 2010, **31**(6): 1499-1505.
- [15] 周红艺, 梁思, 曾思思, 等. Fe_3O_4 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4311-4318.
Zhou H Y, Liang S, Zeng S S, *et al.* Catalytic dechlorination of 2,4-D in aqueous solution by Fe_3O_4 -stabilized nanoscale Pd/Fe [J]. Environmental Science, 2013, **34**(11): 4311-4318.
- [16] Luo Y, Zhang R D, Liu G L, *et al.* Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176**(1-3): 759-764.
- [17] Zhang C P, Li M C, Liu G L, *et al.* Pyridine degradation in the microbial fuel cells[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **172**(1): 465-471.
- [18] Oh S E, Kim J R, Joo J H, *et al.* Effects of applied voltages and dissolved oxygen on sustained power generation by microbial fuel cells[J]. Water Science and Technology, 2009, **60**(5): 1311-1317.
- [19] Ringeisen B R, Ray R, Little B. A miniature microbial fuel cell operating with an aerobic anode chamber[J]. Journal of Power Sources, 2007, **165**(2): 591-597.
- [20] Shimojo M, Kawakami M, Amada K. Analysis of genes encoding the 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid-degrading enzyme from *Sphingomonas agrestis* 58-1 [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2009, **108**(1): 56-59.
- [21] Vallaeys T, Albino L, Soulas G, *et al.* Isolation and characterization of a stable 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid degrading bacterium, *Variovorax paradoxus*, using chemostat culture [J]. Biotechnology Letters, 1998, **20**(11): 1073-1076.
- [22] Arias R N, de Peretti A F. Effects of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid on *Rhizobium* sp. growth and characterization of its transport [J]. Toxicology Letters, 1993, **68**(3): 267-273.
- [23] Sugaya K, Nakayama O, Hinata N, *et al.* Biodegradation of quinoline in crude oil[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2001, **76**(6): 603-611.
- [24] Cheng H Y, Liang B, Mu Y, *et al.* Stimulation of oxygen to bioanode for energy recovery from recalcitrant organic matter aniline in microbial fuel cells (MFCs) [J]. Water Research, 2015, **81**: 72-83.
- [25] Sadaie T, Sadaie A, Takada M, *et al.* Reducing sludge production and the domination of *Comamonadaceae* by reducing the oxygen supply in the wastewater treatment procedure of a food-processing factory [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2007, **71**(3): 791-799.
- [26] Wang A J, Liu L H, Sun D, *et al.* Isolation of $\text{Fe}(\text{III})$ -reducing fermentative bacterium *Bacteroides* sp. W7 in the anode suspension of a microbial electrolysis cell (MEC) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, **35**(7): 3178-3182.
- [27] Zhang B G, Tian C X, Liu Y, *et al.* Simultaneous microbial and electrochemical reductions of vanadium (V) with bioelectricity generation in microbial fuel cells[J]. Bioresource Technology, 2015, **179**: 91-97.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)