

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 (1)

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 林海涛,李琦路,张干,李军 (10)

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 (16)

南京地区大气PM_{2.5}潜在污染源硫碳同位素组成特征 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 (22)

青奥会前后南京PM_{2.5}重金属污染水平与健康风险评估 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 (28)

南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 (35)

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 (41)

边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 (51)

电厂燃煤烟尘PM_{2.5}中化学组分特征 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 (60)

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 (66)

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 (74)

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 (82)

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 (88)

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 (94)

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 (102)

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 (112)

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 (123)

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 (132)

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 杨帆,蒋秩锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 (141)

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 (148)

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 (156)

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 黄廷林,刘飞,史建超 (166)

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 (173)

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 (180)

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 (187)

二氧化钛光催化氧化阿散酸 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 (193)

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 (198)

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 (208)

纳米TiO₂吸附HgCl₂水溶液中Hg(II) 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 (220)

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 (228)

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 (240)

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 (247)

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 (253)

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 徐特,曾辉,倪宏刚 (262)

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 (270)

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 (280)

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 周益奇,刘云霞,傅慧敏 (288)

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 (293)

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 (301)

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 (309)

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 (317)

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 (325)

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 (335)

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (342)

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 (350)

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 (359)

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 (366)

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 (377)

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 (384)

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 (391)

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 (397)

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究

邓欢^{1,2,3}, 蔡旅程^{1,2,3}, 姜允斌^{1,2,3}, 钟文辉^{1,2,3*}

(1. 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 3. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 为了研究秸秆还田条件下运行微生物燃料电池 (microbial fuel cells, MFCs) 是否能有效减排稻田甲烷, 本研究将添加质量分数 0.5% 稻秆的土壤装入 MFCs 反应器, 淹水并种植水稻后运行 MFCs。待水稻经历苗期、分蘖期、晒田期、灌浆期和成熟期共 98 d 后, 停止 MFCs 运行。在 MFCs 运行过程中实时连续记录电压, 每周一次采用静态箱法搜集并检测反应器的甲烷排放通量。结果表明, MFCs 电流在分蘖期逐步升高并达到峰值, 并且运行 MFCs 显著降低添加稻秆土壤在苗期和分蘖期的甲烷累积排放通量。原因可能与产电菌和产甲烷菌竞争有机底物有关。MFCs 运行 98 d 后, 水稻株高、地上和地下部分生物量, 以及产量未受显著影响。本研究为稻田 CH₄ 减排提供了一种潜在的绿色可持续的技术。

关键词: 秸秆还田; 产电菌; 产甲烷菌; 电流; 产量; 微生物燃料电池

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0359-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.046

Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy

DENG Huan^{1,2,3}, CAI Lü-cheng^{1,2,3}, JIANG Yun-bin^{1,2,3}, ZHONG Wen-hui^{1,2,3*}

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: We aimed to study whether the methane emission from rice paddy with straw return can be alleviated in microbial fuel cells (MFCs). In our study, the soil mixed with 0.5% (mass fraction) rice straw was packed into MFCs reactors, then flooded with excess of sterilized water and transplanted with rice seedlings followed by the operation of MFCs. The MFCs were operated for 98 days covering five stages of seeding, tillering, mid-season aeration, rice filling, and ripening. The voltage data were recorded continuously and in real time during the MFCs operation and the methane emitted was collected once a week using the static chamber method and the methane emission flux was determined by gas chromatography. The results showed that the MFCs current increased and reached the peak value in the seeding and tillering stages and the operation of MFCs significantly reduced the accumulative methane emission in these two stages. The possible reason could be that the electrogens competed with methanogens for organic substrates. The height, the above and below ground biomass, and the productivity of rice plants were not significantly affected by the 98-day operation of MFCs. Our study provides a potential green and sustainable technology for the reduction of CH₄ emission from rice paddy fields.

Key words: rice straw return; electrogens; methanogens; current; productivity; microbial fuel cells (MFCs)

稻田是甲烷 (CH₄) 的主要排放源之一。据估计, 全球所有人为活动导致的 CH₄ 排放总量中, 从稻田排放的 CH₄ 占 15% ~ 20%^[1]。除此之外, 我国每年产生的农作物秸秆高达 5.8 亿 t, 占全世界秸秆总产量的 20% ~ 30%^[2]。秸秆还田能够有效提高土壤有机质、改善土壤团聚体, 并可取代秸秆焚烧, 避免环境污染, 因此秸秆还田得到大力提倡。秸秆还田包括直接还田或堆腐后再施入土壤, 近年来采用直接还田方式较为普遍^[3]。但是秸秆还田会增加土壤有机质含量, 进而促进土壤 CH₄ 排放^[4], 尤其会增加淹水稻田土壤的 CH₄ 排放。如何降低稻田 CH₄ 排放一直以来都是国内外的研究热点。合理的水分管理措施包括中期排水、间歇性淹水、渗漏控制等

能够有效地减少 CH₄ 排放^[5]。但是这些管理措施需要大量投入劳动力和水资源, 而且在稻田淹水时期对减排不起作用。

微生物燃料电池 (microbial fuel cells, MFCs) 是一种用产电微生物将有机物的化学能直接转化成电能的装置^[6]。有机底物在厌氧条件下被产电微生物分解并释放出电子, 电子直接被阳极捕获或经过电子中介体、纳米导线等物质间接到达阳极, 并经由

收稿日期: 2015-07-18; 修订日期: 2015-08-23

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (2013BAD11B01); 国家自然科学基金项目 (41301260); 江苏省高校自然科学基金项目 (13KJB610009); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (164320H116)

作者简介: 邓欢 (1982 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境微生物技术, E-mail: hdeng@njnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhongwenhui@njnu.edu.cn

外电路传递到阴极与电子受体(通常为 O_2)结合,从而形成电流^[7]. 土壤中含有丰富的产电微生物,可以采用 MFCs 装置进行产电^[8]. 近几年的研究发现,采用稻田土壤运行 MFCs 能够有效减少 CH_4 排放(图 1),例如 da Rosa^[9]将阳极埋设在种植水稻的淹水稻田土壤中,阴极浸没在淹水层,并采用导线连接阳极和阴极,从而构建 MFCs. 该 MFCs 以土壤有机质和根系分泌物为电子供体,以水中溶解氧为电子受体进行产电. 结果显示运行 MFCs 之后,稻田土壤的 CH_4 排放量比对照组减少了 50%. Rismani-Yazdi 等^[10]将纤维素作为碳源底物置于 MFCs 中进行产电,发现随着 MFCs 产电电流的增加, CH_4 累计排放量降低. 可能的原因是产电菌和产甲烷菌竞争有机底物,从而减少了 CH_4 的形成^[11]. 运行 MFCs 减排土壤 CH_4 的优势在于不使用化学药剂也不消耗能源,相反还能产生少量电能. 是一项值得深入探索的绿色可持续的减排技术. 但已有的相关研究对于水稻生长期不同阶段的减排规律缺乏深入探索. 水稻在苗期、分蘖期、晒田期、灌浆期和成熟期运行 MFCs 是否都有减排效果? 在哪个生长期运行 MFCs 减排最有效? 另外,土壤添加稻秆是否会影响 MFCs 的减排效果? 对于上述问题目前尚缺乏研究.

本研究设置向土壤添加稻秆和不添加稻秆两类处理. 种植水稻后,分别比较运行和不运行 MFCs 对水稻各个生长期土壤 CH_4 排放的影响,同时也观察土壤添加稻秆是否会影响 MFCs 的减排效果. 水稻进入成熟期后结束 MFCs 运行,分析 MFCs 运行对土壤理化性质以及对水稻生长情况的影响,从而

为 MFCs 应用于稻田 CH_4 减排提供可行性依据. 由于运行 MFCs 不使用化学药剂也不消耗能源,因此本研究为稻田 CH_4 减排提供了一种潜在的绿色可持续的技术方法.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤于 2013 年 10 月采集自江西省鹰潭市余江县(116.89°E,28.30°N)的一块完成收割并落干的水稻田. 采样地气候条件为亚热带季风气候,年平均降雨量 1 785 mm,年平均气温 17.8℃. 采样深度 0~20 cm. 土壤鲜样采集后经研磨过 2 mm 筛并充分混匀用于构建 MFCs,少量过筛土壤继续风干进行理化分析. 土壤 pH 按 $m_{\pm}(g):V_{\text{水}}(mL) = 1:2.5$ 采用 pH 计(FE20, Mettler Toledo)测定;土壤有机碳(SOC)采用硫酸-重铬酸钾氧化法测定;土壤全氮(TN)测定采用半微量凯氏定氮法测定. 电导率(EC)按 $m_{\pm}(g):V_{\text{水}}(mL) = 1:5$ 通过电导率仪(DDSJ-308F, 上海雷磁)测定. 土样的理化性质如下:土壤 pH, 5.54; SOC, 12.58 $mg \cdot g^{-1}$; TN, 0.93 $mg \cdot g^{-1}$; EC, 46.6 $\mu S \cdot cm^{-1}$.

1.2 构建和运行 MFCs

称取 90 kg(干土重)过筛后的土样并分成均等的两份,每份 45 kg. 向一份土壤中加入 225 g 稻秆粉末,并充分混匀,得到 0.5% 的稻秆添加量. 另一份土壤不添加任何物质. 再分别将每份土壤均分为 6 份,每份 7.5 kg,装入 12 个 PVC 材质的圆柱形 MFCs 反应器($\phi 30 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$)中(图 1). 当装入一半土量时,将一块圆形碳毡($\phi 30 \text{ cm}$)作为阳极

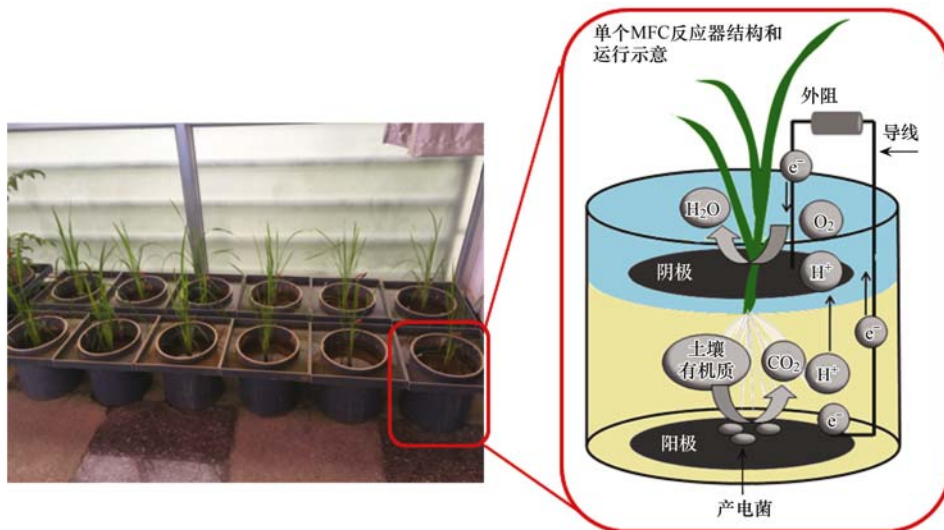


图 1 本研究运行的 MFCs 反应器

Fig. 1 MFCs reactors in the present study

铺在土壤上,再把剩余的一半土壤覆盖在阳极上。向反应器中加入自来水至土壤处于淹水状态,水层厚度 3 cm。再将一块环形碳毡(外径 30 cm,内径 12 cm)作为阴极没入水中轻轻放置于淹水土壤表面。向每个 MFC 反应器移栽培育好的水稻秧苗 4 株。分别从添加稻秆和不添加稻秆的 6 个 MFCs 反应器中随机挑选 3 个,用钛丝作为导线连接阳极和阴极,并串联 1 000 Ω 外电阻,形成闭路从而运行 MFCs。其余 MFCs 反应器不连接导线,作为开路对照。此时 12 个 MFCs 反应器共被分为 4 个处理,包括 0.5% 稻秆 + 闭路(CC-0.5%),0.5% 稻秆 + 开路(OC-0.5%),无稻秆 + 闭路(CC-0)和无稻秆 + 开路(OC-0),每个处理 3 个重复。所有 MFCs 反应器放置在温室中运行,采用空调 28 $^{\circ}$ C 控温。采用数据采集卡(7660B,北京中泰研创)每隔 10 min 记录一次闭路 MFCs 反应器产生的电压数值,至电压稳定后改接 10 Ω 外阻。换小电阻目的是提高电流,促进产电反应的进行^[10]。MFCs 开始运行的时间记为第 0 d,第 39~56 d 水稻生长处于晒田期,由于土壤干燥,MFCs 暂停运行。第 56~88 d 为灌浆期,土壤再次淹水,MFCs 恢复运行并记录电压。第 88~98 d 为水稻成熟期,水分再次蒸发落干,MFCs 停止运行。需要注意的是,在实验前阳极和阴极碳毡都采用打孔器打穿 40 个直径 1 cm 的圆孔,以利于土壤产生的气体通过。

1.3 甲烷的采集与测定

本研究中温室气体的采集使用静态箱采集技术^[12]。从 MFCs 开始运行后 24 h(第 1 d)开始采集气体,每周采样一次,采样时间为下午 14:00~16:00。采样时,用 50 mL 气密性注射器从采气箱(ϕ 32 cm \times 110 cm)中抽取 5 次气体,间隔 10 min,每次抽取 25 mL。同时记录采气箱内温度。采集的气体注射入采气瓶内,并尽快完成气体浓度测定。使用配备了 FID 检测器的气相色谱仪(GC7890B, Agilent Technologies, USA)测定 CH₄ 的浓度。气相色谱仪基本参数如下:选用 2 m 的 MS 13x(60/80 mesh)作为分离柱;炉温为 80 $^{\circ}$ C,进样口温度为 200 $^{\circ}$ C,检测器温度为 200 $^{\circ}$ C;载气为 N₂,流速为 30 mL \cdot min⁻¹;燃气为 H₂ 和空气,流速分别为 40 mL \cdot min⁻¹ 和 400 mL \cdot min⁻¹;选用 10.1 \times 10⁻⁶ mol \cdot mol⁻¹ 的 CH₄ 气体作为标准样品。

1.4 MFCs 运行对水稻生长和土壤理化性质影响的测定

每周于气体采集完毕后测定水稻地上部分株

高。第 98 d 气体采样结束后,停止 MFCs 运行。小心地从 MFCs 反应器中移出水稻植株,仔细地洗净水稻根上的泥土,在 70 $^{\circ}$ C 的条件下烘干称重,测定水稻植株生物量。再将籽粒从植株上分离,称重测定产量。将 MFCs 反应器放在阴凉处自然风干,风干土壤研磨过 2 mm 筛并充分混匀后用于测定土壤 pH 和土壤有机碳(SOC)含量。

1.5 数据分析

本研究数据分析均采用 SPSS 19.0 软件。采用 *T*-test 分析开路和闭路处理之间的差异显著性,采用最小显著差异法(LSD)分析不同处理间 CH₄ 排放总量、土壤理化性质(土壤 pH、土壤有机碳含量)和水稻生长状况(株高、籽粒产量,以及地上和地下部分生物量)的显著性差异,每个 MFC 反应器中的水稻生长状况取 4 株水稻的平均值;采用两因素方差分析(Two-way ANOVA)评价添加稻秆和运行 MFCs 对上述指标影响的显著性。所有统计分析的显著性水平均为 $P < 0.05$ 。

MFCs 运行过程中的产电电量(Q)采用以下公式计算:

$$Q = I \times t \quad (1)$$

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

式中, Q 、 I 、 t 、 U 和 R 分别代表电量(C)、电流(A)、时间(s)、电压(V)和外接电阻阻值(Ω)。

CH₄ 排放通量采用以下公式计算:

$$F = \rho \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times h \times \frac{273.15}{273.15 + T} \quad (3)$$

式中, F 代表 CH₄ 排放通量[mg \cdot (m² \cdot h)⁻¹]; $\Delta c/\Delta t$ 表示单位时间内气体浓度变化; ρ 、 h 和 T 分别代表气体密度(kg \cdot m⁻³),采样箱高度(m)和采样温度($^{\circ}$ C)。CH₄ 累积排放通量的计算是依据各时间点 CH₄ 排放通量数值之间连线与时间轴围成的面积(g \cdot m⁻²)^[13]。

2 结果与分析

2.1 MFCs 运行的产电特征

种植水稻后 MFCs 运行电流变化见图 2。MFCs 开始运行时(第 0 d)外接电阻为 1 000 Ω ,第 7 d 产电电压稳定后,外阻更换为 10 Ω 。之后,CC-0.5% 处理的电流不断上升,在水稻分蘖期达到约 12 mA 的峰值后缓慢下降;CC-0 处理的电流缓慢升高,至分蘖期结束时达到约 5 mA 的峰值。晒田期内由于土壤干燥,电子传递停止,

MFCs 暂时停止运行. 第 56 d 晒田结束并重新淹水后, 电流一直维持在约 2 mA 以下直至灌浆期结束, 成熟期由于再次落干水分, MFCs 停止运行.

MFCs 全部运行过程中 CC-0.5% 处理的产电量为 10.26 C, 显著高于 ($P < 0.05$) CC-0 处理的产电量 (5.36 C).

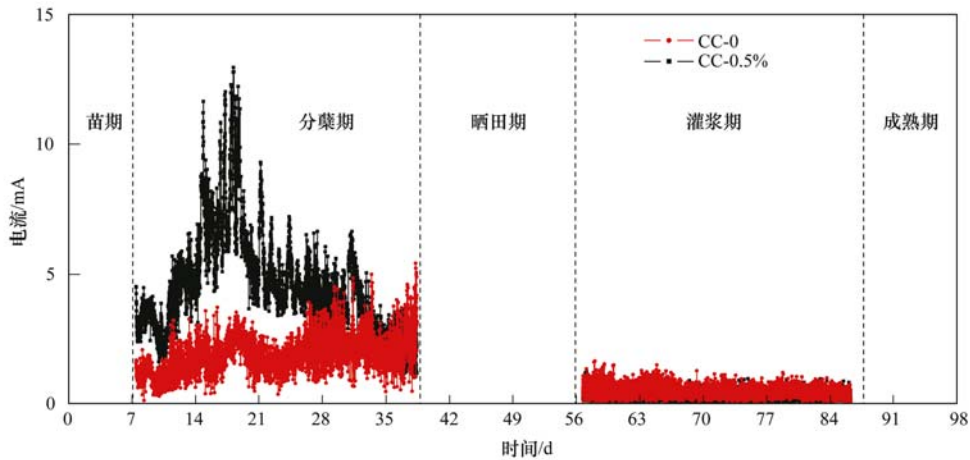


图 2 水稻生长 98 d 过程中 MFCs 平均电流曲线 ($n = 3$)

Fig. 2 Curve of the average current generated by MFCs during 98 days of rice growth ($n = 3$)

2.2 MFCs 运行过程中的 CH_4 排放

不同稻秆添加量以及开路、闭路处理条件下, 种植水稻 98 d 过程中土壤 CH_4 排放通量的变化见图 3. 在 98 d 的种植期内, 水稻经历了苗期、分蘖期、晒田期、灌浆期和成熟期. 不添加稻秆的条件下, CH_4 排放通量在晒田期出现峰值, 并且分蘖期和晒田期 CH_4 累积排放量远远高于其他生长期, 开路和闭路处理间无显著差异 (图 4). 添加 0.5% 稻秆的条件下, CH_4 排放通量的峰值提前至分蘖期, 出现了苗期、分蘖期和晒田期的 CH_4 累积排放量较高,

而灌浆期和成熟期 CH_4 累积排放量较低的特征. 与 OC-0.5% 相比, CC-0.5% 的 CH_4 累积排放量在苗期和分蘖期均显著减少 ($P < 0.05$), 并且 CC-0.5% 在 98 d 的水稻生长期内显著减少了 24.45% 的 CH_4 累积排放量 (表 1). 两因素方差分析显示添加稻秆以及运行 MFCs 都对 98 d 的 CH_4 累积排放量产生显著影响, 而且两个因素存在显著的交互作用 (表 2). 添加稻秆显著增加 CH_4 累积排放量, 而运行 MFCs 只显著降低添加 0.5% 稻秆处理的 CH_4 累积排放量.

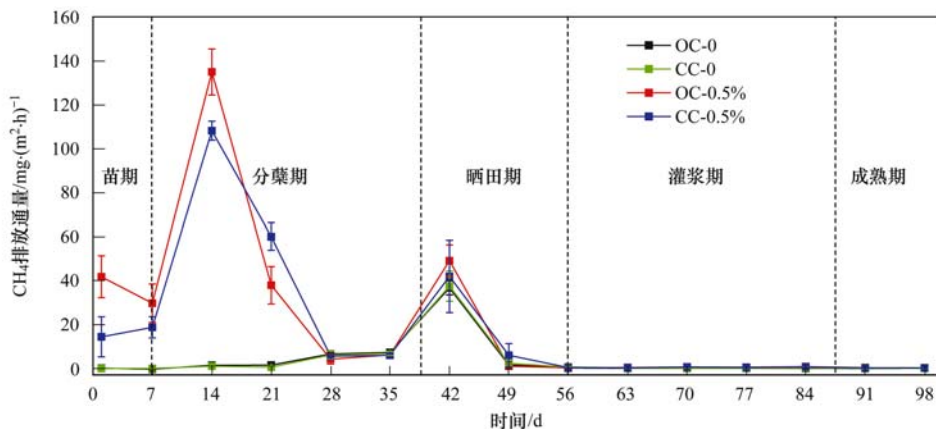


图 3 水稻生长 98 d 过程中的 CH_4 排放通量

Fig. 3 CH_4 emission flux during 98 days of rice growth

2.3 运行 MFCs 对土壤理化性质和水稻生长状况的影响

MFCs 运行 98 d 后, 开路和闭路处理之间土壤有机碳含量无显著差异 ($P > 0.05$), 但闭路处理土

壤 pH 显著低于 ($P < 0.05$) 开路处理. 与 OC-0 相比, CC-0 显著降低了 0.31 单位 pH ($P < 0.05$); 与 OC-0.5% 相比, CC-0.5% 显著降低了 0.45 单位 pH ($P < 0.05$). 在 98 d 的水稻生长期内, 所有处理的

表 1 水稻生长 98 d 过程中 CH₄ 累积排放量, 以及第 98 d 土壤理化性质和水稻生长状况Table 1 Accumulative CH₄ emission during the 98 d growing period of rice along with the soil physicochemical properties and the rice growth status on day 98

处理	CH ₄ 累积排放量 /g·m ⁻²	土壤 pH	土壤有机质 /mg·g ⁻¹	水稻株高 /cm	地上部分生物量 /g	地下部分生物量 /g	籽粒产量 /g
OC-0 ¹⁾	9.32 ± 0.95 ²⁾	6.01 ± 0.18	12.87 ± 0.45	107.33 ± 8.08	49.13 ± 8.00	9.84 ± 1.71	22.82 ± 3.33
CC-0	9.40 ± 0.95	5.70 ± 0.14	13.27 ± 0.39	108.33 ± 4.51	48.53 ± 6.51	9.05 ± 1.66	17.54 ± 3.09
OC-0.5%	52.74 ± 1.51	6.27 ± 0.16	13.63 ± 0.25	115.00 ± 4.58	58.81 ± 5.35	12.45 ± 3.05	26.57 ± 2.93
CC-0.5%	39.85 ± 1.12	5.82 ± 0.02	13.38 ± 0.32	115.67 ± 4.93	61.06 ± 5.59	11.63 ± 3.21	27.54 ± 2.82
LSD _{0.05}	2.18	0.27	0.06	11.18	12.14	4.73	5.74

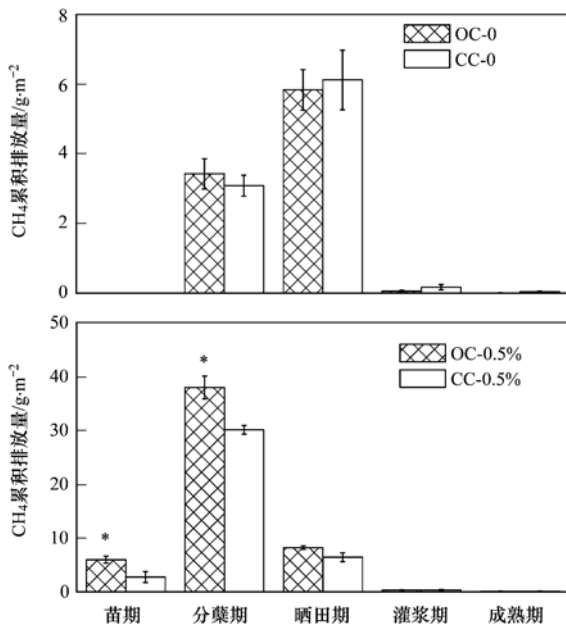
1) OC-0: 无稻秆 + 开路; CC-0: 无稻秆 + 闭路; OC-0.5% : 0.5% 稻秆 + 开路; CC-0.5% : 0.5% 稻秆 + 闭路; 2) 平均值 ± 标准偏差 ($n=3$), 同一列中平均值之间差异大于 LSD_{0.05} 代表差异显著 ($P < 0.05$).

表 2 添加稻秆和运行 MFCs 效应的两因素方差分析¹⁾

Table 2 Two-way ANOVA of the effects of straw addition and MFCs operation

因素	DF	F 值						
		CH ₄ 累积排放量	土壤 pH	土壤有机质	水稻株高	地上部分生物量	地下部分生物量	籽粒产量
添加稻秆 (S)	1	3.065 ^{***1)}	21.88 ^{**}	4.42	4.79	8.89 [*]	3.21	15.04 ^{**}
运行 MFCs (M)	1	92.18 ^{***}	5.62 [*]	0.13	0.59	0.05	0.31	1.56
S × M	1	94.68 ^{***}	0.71	2.48	0.00	0.15	0.00	3.07

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$

图 4 水稻各生长阶段 CH₄ 累积排放量Fig. 4 Accumulative CH₄ emission in different growing stages of rice

水稻株高增加幅度较为一致 (图 5). 从第 42 d 起, 添加 0.5% 稻秆处理 (OC-0.5%、CC-0.5%) 的水稻平均株高超过未添加稻秆处理 (OC-0、CC-0). 水稻培养 98 d 收获后, 开路处理 (OC-0、CC-0.5%) 的平均株高、地上和地下部分生物量以及籽粒产量与相同稻秆添加量的闭路处理 (CC-0、CC-0.5%) 之

间的差异均未达显著水平 ($P > 0.05$) (表 1). 两因素方差分析显示, 添加稻秆能显著提高 ($P < 0.05$) 地上部分生物量以及籽粒产量, 而运行 MFCs 仅对土壤 pH 有显著影响 ($P < 0.05$) (表 2).

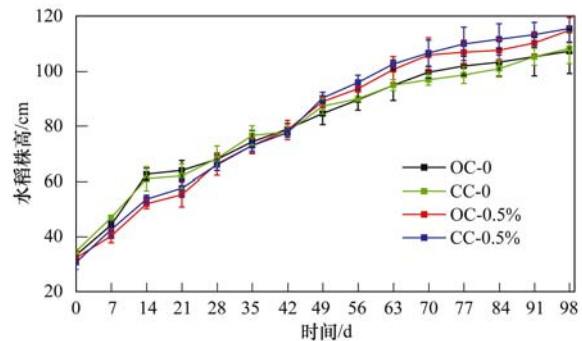


图 5 水稻生长 98 d 过程中株高变化

Fig. 5 Dynamic variation of the plant height during the 98 d growing period of rice

3 讨论

本研究发现, 在混入 0.5% 稻秆并且种植水稻的土壤运行 MFCs 能够显著减少 CH₄ 排放. 以往研究也发现在湖泊底泥^[14] 和 水稻土^[9,15] 中运行 MFCs 也能够减少 CH₄ 排放. 但本研究的创新之处在于清楚地展示了不同水稻生长期包括苗期、分蘖期、晒田期、灌浆期和成熟期的 CH₄ 排放通量和累积排放量, 有利于揭示运行 MFCs 减少 CH₄ 排放的机制.

添加 0.5% 稻秆的土壤产电电流上升较快, 且

电流峰值较高;而不添加稻秆土壤的产电电流则上升缓慢,且维持在较低的电流水平.这是因为添加稻秆的土壤含有更多有机质,因而更有利于产电菌生长和产电能力的提升^[16].在MFCs运行过程中,产电菌在阳极表面逐渐富集和驯化,产电电流逐步提高,经过一段时间后达到峰值,之后,产电电流有所降低.这与非连续流MFCs产电特征相似,即产电出现峰值后下降^[17,18].主要原因包括可利用有机碳浓度降低,以及MFCs阳极表面的产电菌在产电过程中厌氧分解有机质产生 H^+ ,导致土壤pH降低,从而抑制产电菌的活性^[19].晒田期土壤干燥,MFCs暂停运行.原因在于阳极附近有机质分解产生的 H^+ 需要在水溶液中才能向阴极迁移,土壤干燥条件下, H^+ 无法迁移^[20],根据电荷平衡的原理,电子也就不能从阳极流向阴极.另外,产电菌属于厌氧菌,生长和富集通常需要在淹水的厌氧环境中,而且MFCs闭路运行有利于产电菌在阳极表面的富集和驯化^[21].晒田期MFCs停止运行,并且干燥、好氧的土壤环境不利于产电菌生长,从而产电菌活性会受到抑制^[22].进入灌浆期虽然土壤再次淹水,但产电电流仅维持在很低水平,很可能与晒田期产电菌受到胁迫有关.

添加0.5%稻秆的土壤 CH_4 排放通量较大,且峰值出现在分蘖期,而不添加稻秆处理的峰值则推迟至晒田期的前期.已有的研究也表明,添加外源有机物质能够加速和提高 CH_4 排放^[23].同时,添加0.5%稻秆的土壤的产电电流从第15d开始大幅提升,至第29d回落,与 CH_4 排放通量峰值时间一致.已有的研究表明,产电菌通过分解有机底物进行产电,从而会与产甲烷菌争夺土壤有机质,产电菌*Geobacter sulfurreducens*对有机底物乙酸的亲和系数 K_s 只有 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,远低于产甲烷菌*Methanosaetaceae* ($160 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和*Methanosarcinaceae* ($3 \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)^[11,24,25].本研究添加稻秆同步促进了产电菌活性和产甲烷菌活性,造成产电菌与产甲烷菌的活跃时间重合,从而活跃的产电菌能够有效地抑制 CH_4 产生.而对于不添加稻秆的处理,运行MFCs没有显著减少 CH_4 排放,可能的原因有3点:①由于缺乏有机底物,产电菌活性较低,产电较为微弱,因此与产甲烷菌争夺有机底物的能力稍显不足;②有机底物较少造成 CH_4 排放和产电的峰值推迟出现,MFCs产电电流在分蘖期处于上升阶段,而 CH_4 排放的峰值出现在MFCs运行暂停的晒田期,表明MFCs可能错过了抑制 CH_4 排放

的最佳时机;③MFCs运行98d之后,土壤pH相较于开路处理显著降低.但不添加稻秆处理的土壤pH下降幅度较小,而添加0.5%稻秆的处理产电较多,pH下降幅度较大.以往的研究表明,pH降低会抑制产甲烷菌活性^[26],因而不添加稻秆处理的抑制效果较差.

本研究还从水稻株高、地上和地下部分生物量,以及籽粒产量这3个方面显示运行MFCs过程对水稻生长无显著影响.另外,运行MFCs减少稻田 CH_4 排放的优势还在于该方法不需要使用任何化学药剂,也不需要直接的能源投入,相反MFCs还能产生少量电能.因此MFCs可以作为一种潜在的绿色可持续的减排方法.本研究采用的是成本较低的单室无膜构型的MFCs,该构型利用阳极上方覆盖的土壤来阻隔水中溶解氧向阳极的扩散^[27],作者前期的研究表明,阴极附近水中溶解氧约为 $7 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而当阳极上方的土壤厚度达到5cm时,阳极表面的溶解氧浓度能降低到 $0.06 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下^[19].对比采用双室构型MFCs的研究^[10],本研究采用的MFCs构型省去了成本较高的阳离子交换膜,同时能够实现良好的产电和减排效果.鉴于目前采用MFCs进行温室气体减排的研究较少,尚需要更多的研究验证减排效果,以及探索进一步提高减排效果和降低MFCs构建和运行成本^[28].

4 结论

添加稻秆会促进土壤的 CH_4 排放,而运行MFCs能够显著降低 CH_4 排放.在水稻生长过程中,MFCs产电电流和土壤 CH_4 排放通量都在分蘖期逐步达到峰值,并且运行MFCs显著降低了苗期和分蘖期 CH_4 累积排放通量,原因可能与活跃的产电菌和产甲烷菌竞争土壤有机底物有关.MFCs运行98d后,水稻株高、地上和地下部分生物量,以及籽粒产量未受显著影响.加之运行MFCs不使用化学药剂也不消耗能源,因此本研究为稻田 CH_4 减排提供了一种潜在的绿色可持续的技术方法.

参考文献:

- [1] Li D M, Liu M Q, Cheng Y H, et al. Methane emissions from double-rice cropping system under conventional and no tillage in southeast China[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 113(2): 77-81.
- [2] 史央,戴传超,吴耀春,等.植物内生真菌强化还田秸秆降解的研究[J].环境科学学报,2004,24(1):144-149.
- [3] 杨滨娟,钱海燕,黄国勤,等.秸秆还田及其研究进展[J].农学学报,2012,2(5):1-4.

- [4] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(1): 99-108.
- [5] Sanchis E, Ferrer M, Torres A G, *et al.* Effect of water and straw management practices on methane emissions from rice fields: A review through a meta-analysis [J]. Environmental Engineering Science, 2012, **29**(12): 1053-1062.
- [6] 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.
- [7] Logan B E. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells[J]. Nature Reviews Microbiology, 2009, **7**(5): 375-381.
- [8] Ringelberg D B, Foley K L, Reynolds C M. Electrogenic capacity and community composition of anodic biofilms in soil-based bioelectrochemical systems[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, **90**(5): 1805-1815.
- [9] da Rosa A C. Diversity and function of the microbial community on anodes of sediment microbial fuel cells fueled by root exudates [D]. Marburg: Philipps-Universität Marburg, 2010.
- [10] Rismani-Yazdi H, Carver S M, Christy A D, *et al.* Suppression of methanogenesis in cellulose-fed microbial fuel cells in relation to performance, metabolite formation, and microbial population [J]. Bioresource Technology, 2013, **129**: 281-288.
- [11] Arends J B A, Speeckaert J, Blondeel E, *et al.* Greenhouse gas emissions from rice microcosms amended with a plant microbial fuel cell[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, **98**(7): 3205-3217.
- [12] Ding W X, Cai Z C, Tsuruta H, *et al.* Key factors affecting spatial variation of methane emissions from freshwater marshes [J]. Chemosphere, 2003, **51**(3): 167-173.
- [13] Xie B H, Zheng X H, Zhou Z X, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on CH₄ emission from rice fields: multi-site field observations[J]. Plant and Soil, 2010, **326**(1-2): 393-401.
- [14] Jeon H J, Choi Y K, Kumaran R S, *et al.* Electrochemical control of methane emission from lake sediment using microbial fuel cells[J]. Bulletin of the Korean Chemical Society, 2012, **33**(7): 2401-2404.
- [15] Rizzo A, Boano F, Revelli R, *et al.* Can microbial fuel cells be an effective mitigation strategy for methane emissions from paddy fields? [J]. Ecological Engineering, 2013, **60**: 167-171.
- [16] Di L M, Curtis T P, Head I M, *et al.* A single-chamber microbial fuel cell as a biosensor for wastewaters [J]. Water Research, 2009, **43**(13): 3145-3154.
- [17] Deng H, Jiang Y B, Zhou Y W, *et al.* Using electrical signals of microbial fuel cells to detect copper stress on soil microorganisms [J]. European Journal of Soil Science, 2015, **66**(2): 369-377.
- [18] Liu H, Cheng S A, Logan B E. Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell[J]. Environment Science & Technology, 2005, **39**(2): 658-662.
- [19] Deng H, Wu Y C, Zhang F, *et al.* Factors affecting the performance of single-chamber soil microbial fuel cells for power generation[J]. Pedosphere, 2014, **24**(3): 330-338.
- [20] Wang X, Cai Z, Zhou Q X, *et al.* Bioelectrochemical stimulation of petroleum hydrocarbon degradation in saline soil using U-tube microbial fuel cells [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2012, **109**(2): 426-433.
- [21] de Cárcer D A, Ha P T, Jang J K, *et al.* Microbial community differences between propionate-fed microbial fuel cell systems under open and closed circuit conditions [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, **89**(3): 605-612.
- [22] Huang L P, Logan B. Electricity generation and treatment of paper recycling wastewater using a microbial fuel cell [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, **80**(2): 349-355.
- [23] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响[J]. 生态学报, 2002, **22**(10): 1672-1679.
- [24] Esteve-Núñez A, Rothermich M, Sharma M, *et al.* Growth of *Geobacter sulfurreducens* under nutrient-limiting conditions in continuous culture [J]. Environmental Microbiology, 2005, **7**(5): 641-648.
- [25] Qu X, Vavilin V A, Mazéas L, *et al.* Anaerobic biodegradation of cellulosic material: batch experiments and modelling based on isotopic data and focusing on aceticlastic and non-aceticlastic methanogenesis[J]. Waste Management, 2009, **29**(6): 1828-1837.
- [26] Ye R Z, Jin Q S, Bohannon B, *et al.* pH controls over anaerobic carbon mineralization, the efficiency of methane production, and methanogenic pathways in peatlands across an ombrotrophic-minerotrophic gradient[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, **54**: 36-47.
- [27] 邓欢, 薛洪婧, 姜允斌 等. 土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3926-3934.
- [28] Deng H, Chen Z, Zhao F. Energy from plants and microorganisms: progress in plant-microbial fuel cells [J]. ChemSusChem, 2012, **5**(6): 1006-1011.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

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