

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

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

1960~2013年我国霾污染的时空变化 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe⁰-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO₂ 纳米颗粒对 Cd²⁺ 的吸附 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH₄、CO₂ 排放的短期影响 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO₂ 通量变化及其影响因素 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量

王永敏¹, 赵铮², 孙涛¹, 王娅¹, 薛金平¹, 张成^{1,3,4}, 王定勇^{1,3,4*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 贵州省环境监测中心站, 贵阳 550081; 3. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716; 4. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 以三峡库区周边典型农田系统为研究对象, 对不同土壤利用类型下的界面汞释放通量及影响因素进行系统研究, 并同时区域内大气汞(TGM)浓度进行监测. 结果表明, 研究区 TGM 浓度范围为 2.67 ~ 75.5 ng·m⁻³, 春冬两季显著高于夏秋季, 其均值为(6.26 ± 8.11) ng·m⁻³, 明显高于全球 TGM 浓度背景值. 不同地表类型下土壤释汞通量表现为旱地 > 稻田 > 林地; 季节变化表现为夏季最高, 冬季最低; 日变化中最大的释放量出现在正午. 不同地表中释汞通量的主要影响因素均为气温、湿度、光照、紫外线强度、土温等, 其中气温和紫外强度是影响不同地表土/气界面汞交换的主要因子; 在环境因子与农业活动的外界影响下, 土壤本底汞含量对不同界面的土壤释汞通量的作用不明显.

关键词: 大气汞; 汞释放; 农田系统; 三峡库区

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3300-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.09.007

Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir

WANG Yong-min¹, ZHAO Zheng², SUN Tao¹, WANG Ya¹, XUE Jin-ping¹, ZHANG Cheng^{1,3,4}, WANG Ding-yong^{1,3,4*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Guizhou Environmental Monitoring Center, Guiyang 550081, China; 3. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-Point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China; 4. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: In situ measurement of total gaseous mercury (TGM) and mercury exchange fluxes between soil with different utilization patterns and atmosphere was conducted at one typical agricultural region in Three Gorges Reservoir. The TGM concentration ranged from 2.67 to 75.5 ng·m⁻³ with the average of (6.26 ± 8.11) ng·m⁻³, higher than the global background value. An obvious seasonal variation of TGM was observed, and the TGM values in spring and winter were significantly higher than those in summer and autumn. It was found that the mercury fluxes varied from different landscapes with the emission fluxes at three land use types following the trend: rainfed cropland > paddy field > forest land. Seasonal variations of mercury emission were obvious with highest fluxes in summer and lowest in winter, while the highest daily mercury emission fluxes appeared at midday. Mercury emission fluxes in our study region were mainly controlled by air and soil temperature, humidity, light and ultraviolet, and the air temperature and ultraviolet were regarded as the main factors. The influence of Hg level in soil on Hg emission was not obvious in the presence of environmental factors and agricultural activity.

Key words: total gaseous mercury; mercury emission; agricultural environment; Three Gorges Reservoir

大气中汞源的研究对深入理解环境中汞生物地球化学循环至关重要. 汞(主要是零价汞)一旦进入大气, 可进行长距离迁移, 最终沉降至偏远的水环境中, 并可进一步地转化成毒性更强的甲基汞, 对人类以及野生生物健康造成不良影响. 自然界面汞的释放以及再释放是大气汞重要来源. 据近年来发展的模型估算, 自然界面每年释放至大气中的汞大于 1 500 t^[1~3], 约占全球汞总释放量的 20%. 在过去的数十年中, 全球多个区域均开展了大量的自然界面汞释放研究, 这些研究表明, 汞的交换通量随研究

地点以及土地类型的不同而发生较大变化, 主要受土壤汞含量、土壤湿度、土壤有机质、气象因素(比如光照和温度)、植被覆盖、大气汞浓度等一系列的因素影响. 但是对人类活动频繁地区的释汞通量

收稿日期: 2016-02-25; 修订日期: 2016-04-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430004); 国家自然科学基金项目(41373113, 41173116); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2016C085); 重庆市博士后特别项目(Xm2015025)

作者简介: 王永敏(1985~), 女, 博士后, 主要研究方向为环境化学, E-mail: wangym.540@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

研究却很少。农田系统是人类活动频繁典型的区域,其表层土壤特性以及土壤的物理化学性质受人为活动影响发生了较大的变化,而这些变化对地表释汞通量的影响还有待研究。三峡水库是举世瞩目的特大调节型水库,全库区由一系列小流域构成,且多为人为干预强度大的农业生态系统^[4]。因此,本研究选择三峡库区一典型农田系统——重庆涪陵区王家沟小流域为对象,在了解农田生态系统中大气汞(TGM)以及不同地表类型释汞通量的基础上,探讨其变化特征和影响因素,以期评价库区汞污染现状提供数据支撑,也为明确三峡库区汞的生物地球化学循环演化规律提供理论和数据基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市涪陵区、三峡库区中段的王家沟农田小流域(东经 107°29'43"~107°30'43",北纬 29°53'27"~29°54'37")。该区域地势从北到南逐渐降低并延伸至长江,多为丘陵地貌,海拔为 153~307 m(图 1)。研究流域总面积为 72.3 hm²,其中农田面积为 65.6 hm²,流域顶部多为旱地(占整个流域面积的 66.3%),并伴有少量次生林或未利用荒地,中部主要为土坎或石坎梯田,底部地势平坦,以水田为主(占整个流域面积的 24.5%)。流域内分

布有自然村落,无工矿企业,农业以种植业为主,耕地面积复种指数高,农业生产以粮食作物种植为主,主要农作物是榨菜、玉米、水稻等,其中榨菜生长周期为每年 11 月到次年 3 月,玉米生长周期为每年 3 月(种植期)至 7 月(收割期)。从耕作制度来看,水田以二熟制为主,旱地则以三熟制为主。其中每年从 7 月玉米收割开始至 11 月榨菜种植时止为土地闲置期^[5,6]。该区域属于亚热带季风气候区,年平均气温为 22.1℃,年均降雨量为 1 072 mm。

1.2 TGM 浓度和不同地表汞交换通量的测定

采用石英动力通量箱(长×宽×高:60 cm×20 cm×20 cm)与超痕量汞分析仪(TEKRAN 2537X,加拿大)联用^[7,8],对研究区 TGM 浓度以及不同地表类型的汞交换通量(监测点见图 1)进行 24 h 连续测定,并于每季度(间隔 3 个月)进行一次(监测时间分别为:春季 2014-05-20~2014-05-21;夏季 2014-08-20~2014-08-21;秋季 2014-11-14~2014-11-15;冬季 2015-01-15~2015-01-16)。所选取的不同地表类型包括上节所提到的旱地和水田,还包括分散分布在流域内部的林地,该地表类型面积大约为 2.5 hm²,占整个流域的 3.5%。测定土气界面汞交换通量时,将通量箱置于地面并用周围土壤使其密封(避免因漏气而造成测定误差),用聚四氟乙烯管将通量箱出口一端与 TEKRAN 2537X 大气自

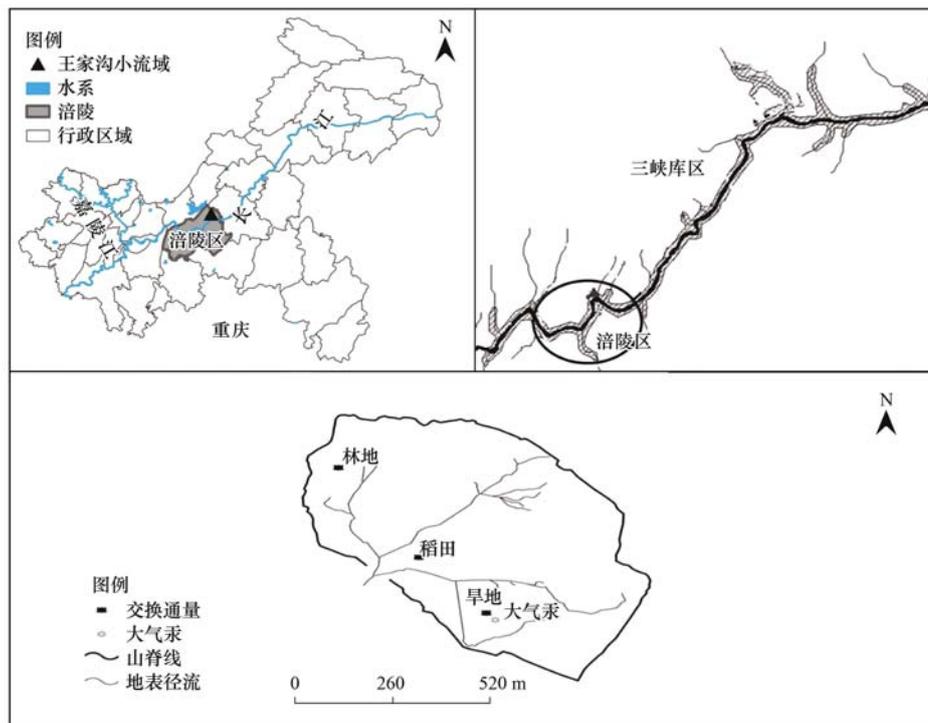


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

汞分析仪连接. 该测汞仪采用双金管设计, 两根金管可交替使用, 一根金管采集样品时另一根金管热解, 时间分辨率为 5 min, 采样时通过使用配套的 TEKRAN1110 控制测汞仪 (进口端带有 4 个接口转换器) 交替采集并测定流出通量箱的气体 and 进入通量箱的汞浓度, 其中监测点 TGM 浓度可认为是进入通量箱的汞浓度 (如图 2).

采用同样的原理对水气界面汞交换通量进行测定, 除了将通量箱置于一个底面积与通量箱相同的中空长方形聚氨酯泡沫板上 (以便让通量箱浮于水面), 测量时将通量箱置于距离田埂 2 m 的水面上. 采样气流流速均为 $1.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 每 5 min 更换一次测定对象. 不同地表类型 (林地、旱地和稻田) 汞交换通量可以根据下式进行计算:

$$F_g = \frac{(c_{\text{out}} - c_{\text{in}} - c_0) \times Q}{A}$$

式中, F_g 为气态汞的通量 [$\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 主要由 Hg^0 组成; c_{out} 和 c_{in} 分别为通量箱出气口和进气口的总气态汞浓度 ($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$); c_0 为空白值, 即通量箱内壁释放或吸附的汞 ($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$); Q 为单位时间内通过通量箱的流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); A 为通量箱的底面积 (m^2). F_g 可为正值, 也可为负值, 正值表明汞从地表向大气净释放, 负值则表明大气汞向地表净沉降.

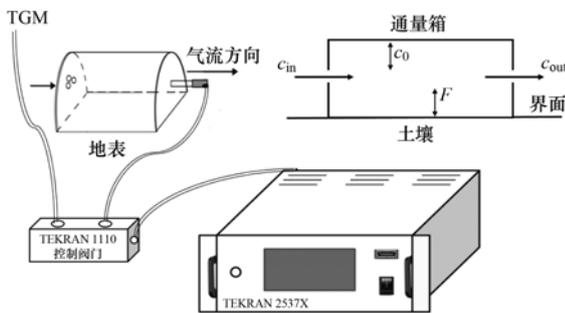


图 2 土-气界面汞交换通量测定示意

Fig. 2 Schematic diagram of the exchange flux measurement of mercury on soil/air interface

1.3 其他参数的测定

光照强度用 TES 数位式照度计 (台北泰仕公司) 测定, 紫外强度采用紫外线强度计 (TN-2254, 台湾泰纳公司) 测定, 土壤温度用 DeltaTRAK® 便携式温度计测定, 大气压、空气湿度、风速和气温用 Kestrel® 微型气象跟踪仪 (美国 Nielsen-Kellerman 公司) 测定.

1.4 质量控制

TEKRAN 2537X 测汞仪是利用金汞齐原理捕集气

态汞后, 进一步对金汞齐管热解吸, 然后用冷原子荧光 (CVAFS) 对气态总汞浓度进行测定. 气体捕集器内设有滤膜, 对收集的气体进行过滤, 防止大气颗粒物污染捕集器. 该测汞仪采用双金管设计, 两根金管可交替使用, 时间分辨率为 5 min, 检出限为 $0.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 仪器采用内部标准汞源进行自动校正, 校正周期为 25 h. 通量箱 (长 60 cm, 宽和高各 20 cm 的圆柱体) 是采用汞本底值低且不易吸附汞的石英玻璃材质制作而成, 于使用前先在 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硝酸溶液中浸泡 24 h 以上, 然后用去离子水冲洗干净. 分别在实验室和现场将通量箱置于清洗干净的带槽的底盖上并密封^[9], 测量通量箱进气口和出气口的汞浓度, 各自采样时间平均为 5 min, 出气口和进气口汞浓度差值为封闭的通量箱的空白值, 测定结果表明空白值可低至 $0.1 \sim 0.2 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

2 结果与分析

2.1 大气汞浓度的变化特征

该研究区大气汞 (TGM) 的浓度变化范围为 $2.67 \sim 75.5 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 均值为 $(6.26 \pm 8.11) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 明显高于全球背景值 ($1.5 \sim 2.0 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$). 研究区 TGM 浓度稍略低于重庆市和邻近的贵阳市城区, 而高于受人为活动影响较弱的山区以及偏远地区, 也高于周边的韩国和日本 (表 1), 表明研究区大气汞受到了一定程度的人为污染. 此外, 研究区 TGM 变化范围较大, 表明研究区可能主要受周边人为汞排放源的影响.

TGM 浓度在采样期间呈现了明显的季节变化 (图 3), 春夏秋冬四季 TGM 浓度分别为 (9.12 ± 12.2) 、 (3.72 ± 1.01) 、 (3.38 ± 0.73) 和 $(8.87 \pm 9.29) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 春冬季节明显高于夏秋季节 ($P < 0.05$), 而春冬两季以及夏秋两季之间均无明显差

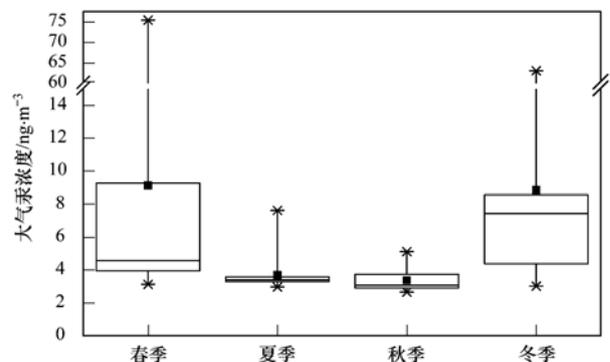


图 3 研究区大气汞的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of total gaseous mercury in the study region

异. 这主要由于研究区域为农田系统, 农业活动频繁、受到的人为干扰较多, 如冬季, 当地居民生活和取暖主要以薪柴直接燃烧为主, 其占王家沟小流域生活总能源结构的 71.2%^[5], 而生物质燃料燃烧过程已经被证实能够排放大量的汞到大气中^[22], 因

此, 可推测当地居民生活以及采暖活动是导致研究区冬季大气中 TGM 浓度升高的主要原因; 此外, 由于冬季降雨较少(研究期间冬季降雨量为 28.2 mm, 仅占年降雨量的 3.7%), 大气汞的雨水冲刷减弱, 使得该季节 TGM 浓度高.

表 1 三峡库区农田系统与国内外其他区域 TGM 浓度的比较

Table 1 TGM concentrations in different regions in China and abroad

研究区	样点类型	时间	浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	文献
三峡库区	农村	2014 ~ 2015	6.26 ± 8.11	本研究
重庆	城区	2006 ~ 2007	6.7	[10]
贵阳	城区	2000 ~ 2001	7.39	[11]
青岛	城郊	2013	5.75 ± 4.25	[12]
广州	山区	2009-10 ~ 2010-04	5.07 ± 2.89	[13]
长白山	偏远	2005-08 ~ 2006-07	3.58 ± 1.78	[14]
贡嘎山	偏远	2005-05 ~ 2007-07	3.98 ± 1.62	[15]
瓦里关山	偏远	2007-09 ~ 2008-08	1.98 ± 0.98	[16]
Wisconsin, USA	农村	2002 ~ 2004	1.4 ± 0.2	[17]
Detroit, USA	城区	2003	2.2 ± 1.3	[18]
Seoul, Korea	城区	1999-01 ~ 2000-08	5.26 ± 3.27	[19]
Tokyo, Japan	城区	2000-04 ~ 2001-03	2.88	[20]
全球背景值			$1.5 \sim 2.0$	[21]

而通过对研究区 TGM 的日变化研究发现(图 4), 采样期间春、夏、冬三季 TGM 均在 17:30 ~ 19:00 之间出现最高峰值, 而秋季的 TGM 却分别在 09:00 和 13:30 出现高值点, 表现出明显的双峰特

征, 明显区别于其他地区的研究结果. 如珠江三角洲地区 TGM 的浓度最高值出现在早晨 07:00 ~ 08:00, 下午 14:00 ~ 16:00 出现最低值^[13], 北京和广州则在 14:00 达到最大值, 夜间(02:00 和 20:00)

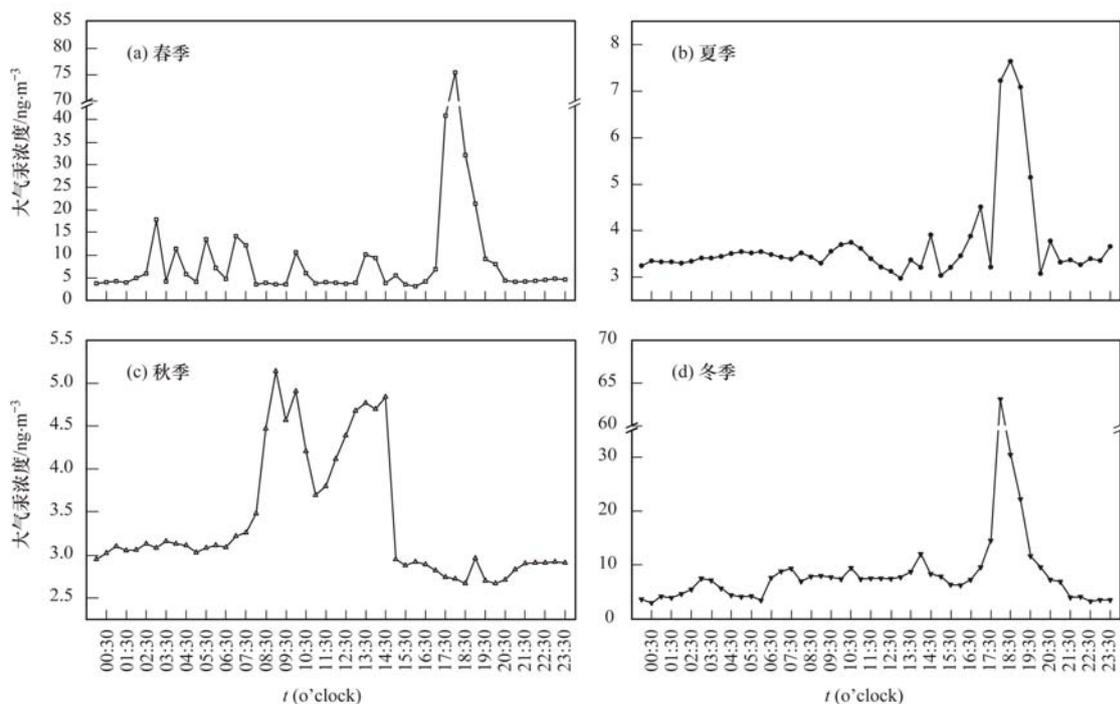


图 4 研究区 TGM 的日变化

Fig. 4 Daily variation of TGM in the study region

出现最低值^[23],而上海地区 TGM 浓度变化属于夜晚控制型,最高峰出现在夜间(04:00 左右),最低值出现在白天(16:00 左右)^[24]. 由于影响 TGM 日变化的因素较多(如人为活动、光照、温度、混合层高度以及土壤性质等),导致不同地区 TGM 的日变化特征差异较大. 据推测,本研究 TGM 日变化的特殊性可能与人为活动相关. 经现场调查,18:00 左右该区域移动交通及居民生活较其他时间活跃,使得春、夏、冬季节该时间段(17:30 ~ 19:00)汞排放出现峰值. 而秋季是梅雨季节,采样期间不时有小强度降雨发生,不利于 TGM 的迁移扩散,因此在该时段并未发现汞浓度的显著升高. 不过总体而言,4 个季节 TGM 的日间浓度均高于夜间,属于白天控制型.

2.2 不同界面汞的交换通量

研究区域不同的地表类型的释汞通量也存在一定的差异性. 其通量变化范围分别为: $-1.50 \sim 46.93 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (林地)、 $-2.62 \sim 66.48 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (旱地)、 $-1.35 \sim 53.29 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (稻田),均值大小分别表现为旱地 [$(16.94 \pm 14.71) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > 稻田 [$(15.49 \pm 12.01) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > 林地 [$(13.17 \pm 10.42) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$](图 5). 且旱地与林地间存在极显著差异($P < 0.01$),而稻田与林地、旱地间的差异却不明显. 一方面可能因为旱地既无树冠层的遮蔽,也无水体的遮盖,而林地由于常年处于树冠层遮蔽之下,郁闭度较高,会阻止阳光透射,使得环境因子(如光照强度等)对林地汞释放的影响减小,并且通过对主要环境因子与不同界面的释汞通量相关性分析发现,旱地土壤汞释放与光照强度回归方程的斜率最高,说明由光照引起旱地的释汞通量变化较大. 另一方面也可归因于农业活动,由于农业活动能够增加土壤的孔隙度以及表面粗糙度,不仅增大了土壤与大气接触面积,也增加了土壤中汞的扩散. 本研究区域针对3种不同地表类型而言,旱地农业

活动最多(常用于种植玉米和榨菜),所以旱地释汞通量最大. 张成^[25]曾发现在土壤汞含量无明显差异的同一功能区中,裸地释汞通量是草地释汞通量的 5 倍. 而其他研究中所提到的土壤本底汞这一主要影响因素,对本研究中汞的释放量影响却不明显,因为所选取的 3 种不同地表类型的土壤汞含量^[26] [旱地 (26.84 ± 11.86) $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 稻田 (32.57 ± 14.80) $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 林地 (46.36 ± 17.75) $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$] 与其释汞通量变化并不一致,可能是外界环境因子与农业活动影响较大. 但是在其他外界条件一致的情况下,土壤汞含量成为影响地表释汞通量的主要因素,如秋冬季节,旱地和稻田均种植榨菜,这两季的释汞通量稻田高于旱地.

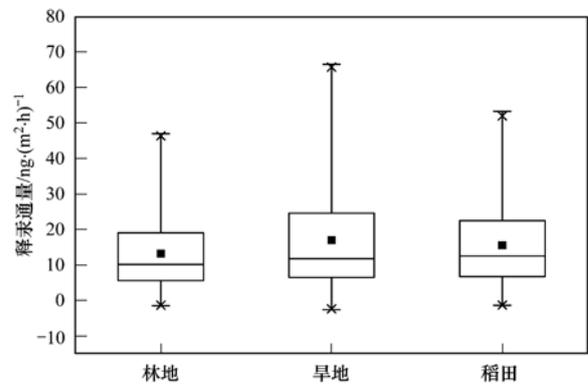


图 5 不同地表类型(林地、旱地、稻田)释汞通量

Fig. 5 Comparison of Hg fluxes on different surface (forest field, rainfed cropland, and paddy field) in the study region

研究区不同地表类型土(水)/界面释汞通量表现出明显的季节变化,均为夏季最高,冬季最低,春秋两季无显著差异(如图 6). 这主要由于光照和紫外强度是影响土壤汞释放的主要因素,均与释汞通量呈现极显著正相关($P < 0.01$). 根据现场监测结果(表 2)得知夏季光照强度和紫外强度最高,冬季最低,因此导致夏季向大气释汞量最高,冬季最低,甚至出现负通量值. 另外,在夏季气温和土壤温度相对于其他季节较高,土壤温度的升高会加速土壤

表 2 采样期间环境状况

Table 2 Statistical summaries of environmental condition during the sampling period

项目	春季	夏季	秋季	冬季
气温/ $^{\circ}\text{C}$	19.8(12.1 ~ 34.7)	27.9(23.3 ~ 36.7)	14.1(11.7 ~ 16.5)	9.92(7.40 ~ 13.2)
湿度/%	75.7(25.5 ~ 100.0)	68.9(32.3 ~ 100.0)	91.2(64.0 ~ 100.0)	89.6(53.3 ~ 100.0)
光照强度 $\times 10^3/\text{lx}$	26.3(0.0 ~ 93.3)	36.2(0.0 ~ 127.0)	5.2(0.0 ~ 21.6)	2.4(0.0 ~ 10.4)
紫外强度/ $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-1}$	887(0.0 ~ 4670)	1262(0.0 ~ 6871)	172.8(0.0 ~ 986.5)	85.3(0.0 ~ 520.2)
林地	18.5(15.6 ~ 24.9)	22.9(20.4 ~ 25.9)	11.8(9.78 ~ 15.1)	8.4(5.8 ~ 11.7)
旱地	20.2(17.0 ~ 27.2)	24.5(21.9 ~ 27.5)	12.0(9.6 ~ 16.6)	6.2(3.5 ~ 10.8)
稻田	21.9(20.6 ~ 24.6)	23.6(21.2 ~ 26.3)	12.0(9.6 ~ 16.6)	6.2(3.5 ~ 10.8)

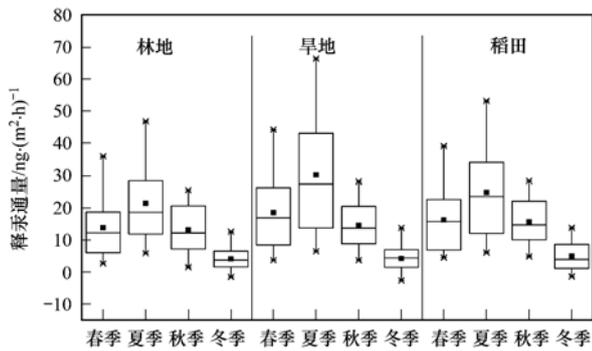


图 6 不同地表类型(林地、旱地、水田)释汞通量的季节变化特征

Fig. 6 Seasonal variation of Hg fluxes on different surface (forest field, rainfed cropland, and paddy field) in the study region

单质汞的气化,促使土壤汞向大气的扩散,从而导致土壤释汞通量的增加,并且在本研究中,土温和气温与土壤释汞通量也具有极显著相关($P < 0.01$). 值得注意的是,本研究中稻田土壤在春夏季时处于淹水状态,秋冬季处于出落状态,通过回归分析发现稻田土壤春夏季淹水期间释汞通量随水温升高上升程度较低,在秋冬季随土壤温度升高而显著升高. 同样,不同地表类型界面汞释放也呈现出了明显的日变化(图 7),并且各个季节汞通量日变化趋势均较为一致,均表现为上午(08:00~12:00)急剧上升,在正午时分出现最大值. 在午后逐渐降低,在午夜出现最小值.

2.3 环境因子对释汞通量的影响强弱分析

2.3.1 主成分分析

为识别影响研究区不同土/气界面汞交换的主要影响因素,对所得数据进行主成分分析,根据特征根 > 1 的原则确定了 2 个主成分,并求出了各主成分的因子载荷(表 3). 结果显示,影响不同地表释汞通量的主要因素组成较为一致:第一主成分均为气温、湿度、光照、紫外、土温等,其特征根分别为 4.04、4.01 和 3.90,方差贡献率分别为 57.7%、57.2% 和 55.7%;第二主成分为风速、大气压等,其特征根分别为 1.31、1.33 和 1.35,方差贡献率分别为 18.7%、19.0% 和 19.2%,累积贡献率分别为 76.4%、76.2% 和 74.9%. 分析表明相较于间接环境因子(风速和大气压),直接环境因子(紫外、光照、气温、土温等)对地表释汞通量的影响更为重要.

2.3.2 通径分析

通过对研究区不同地表类型释汞通量影响因素进行通径分析发现(表 4),气温和紫外强度对地表

释汞通量影响直接效应较大,均表现为正效应. 紫外强度对 3 种不同地表(林地、旱地和稻田)的直接作用系数分别为 0.56、0.45 和 0.48,气温对不同地表类型释汞通量所起的重要程度并不一致,在林地其单独作用系数为 0.57,而在旱地和稻田中单独作

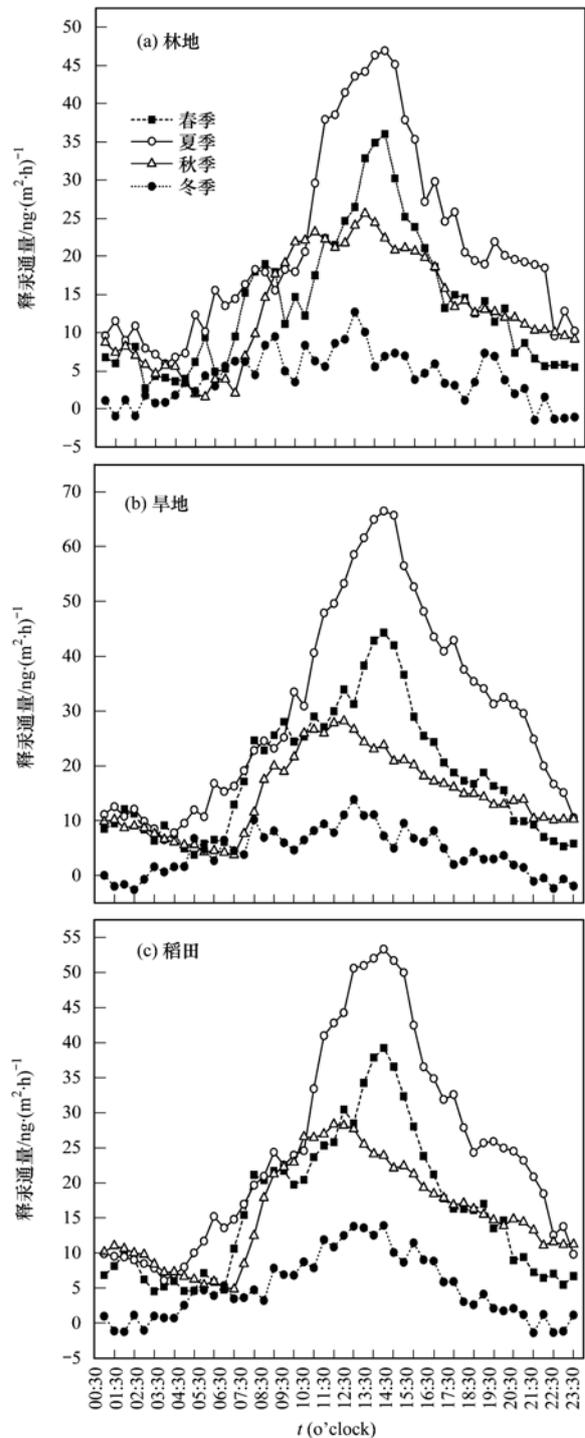


图 7 不同地表类型(林地、旱地、水田)释汞通量的日变化特征

Fig. 7 Daily distribution of Hg fluxes on different surface (forest field, rainfed cropland, and paddy field) in the study region

表 3 不同地表类型(林地、旱地、稻田)释汞通量影响因子的主成分分析

Table 3 Principle factor analysis on the influencing factors of mercury emission fluxes from different air/soil interface (forest field, rainfed cropland, and paddy field) in the study region

林地			旱地			稻田		
变量	组分 1	组分 2	变量	组分 1	组分 2	变量	组分 1	组分 2
特征根	4.04	1.31	特征根	4.01	1.33	特征根	3.90	1.35
方差贡献率/%	57.7	18.7	方差贡献率/%	57.2	19.0	方差贡献率/%	55.7	19.2
累积贡献率/%	57.7	76.4	累积贡献率/%	57.2	76.2	累积贡献率/%	55.7	74.9
风速	0.33	0.77	风速	0.33	0.77	风速	0.33	0.75
气温	0.91	-0.17	气温	0.91	-0.17	气温	0.91	-0.18
湿度	-0.88	-0.16	湿度	-0.88	-0.17	湿度	-0.88	-0.18
大气压	0.47	0.71	大气压	0.46	0.72	大气压	0.45	0.74
光照	0.85	-0.26	光照	0.85	-0.23	光照	0.86	-0.21
紫外	0.84	-0.24	紫外	0.84	-0.22	紫外	0.84	-0.20
土温	0.82	-0.18	土温	0.80	-0.23	土温	0.74	-0.30

表 4 不同地表类型(林地、旱地、稻田)释汞通量影响因子的通径分析

Table 4 Path analysis on the influencing factors of mercury emission fluxes from different air/soil interface (forest field, rainfed cropland, and paddy field) in the study region

类型	通径系数因子	直接作用	通过其他指标的间接作用							
			$\rightarrow X_1$	$\rightarrow X_2$	$\rightarrow X_3$	$\rightarrow X_4$	$\rightarrow X_5$	$\rightarrow X_6$	$\rightarrow X_7$	
林地	X_1	风速	0.11		0.10	0.02	0.01	-0.02	0.08	-0.02
	X_2	气温	0.57	0.02		0.05	0.01	-0.09	0.37	-0.13
	X_3	湿度	-0.06	-0.04	-0.43		-0.01	0.09	-0.35	0.09
	X_4	大气压	0.03	0.05	0.16	0.03		-0.03	0.13	-0.03
	X_5	光照	-0.13	0.02	0.39	0.04	0.01		0.52	-0.08
	X_6	紫外	0.56	0.02	0.38	0.04	0.01	-0.12		-0.07
	X_7	土温	-0.14	0.02	0.54	0.04	0.01	-0.07	0.29	
旱地	X_1	风速	0.09		0.07	0.05	0.02	-0.01	0.06	0.01
	X_2	气温	0.39	0.02		0.12	0.01	-0.04	0.30	0.06
	X_3	湿度	-0.15	-0.03	-0.30		-0.02	0.04	-0.29	-0.04
	X_4	大气压	0.04	0.04	0.11	0.08		-0.01	0.11	0.01
	X_5	光照	-0.06	0.01	0.27	0.10	0.01		0.42	0.04
	X_6	紫外	0.45	0.01	0.26	0.10	0.01	-0.05		0.03
	X_7	土温	0.07	0.01	0.36	0.10	0.01	-0.03	0.23	
稻田	X_1	风速	0.10		0.05	0.06	0.02	-0.01	0.07	0.01
	X_2	气温	0.26	0.02		0.14	0.02	-0.03	0.32	0.10
	X_3	湿度	-0.19	-0.03	-0.20		-0.03	0.03	-0.30	-0.06
	X_4	大气压	0.06	0.04	0.07	0.10		-0.01	0.11	0.01
	X_5	光照	-0.04	0.01	0.18	0.12	0.01		0.44	0.05
	X_6	紫外	0.48	0.01	0.17	0.12	0.01	-0.04		0.05
	X_7	土温	0.11	0.01	0.22	0.11	0.00	-0.02	0.22	

用系数则分别仅为 0.39 和 0.26。但是在该分析中回归方程的决定系数为 0.81 ~ 0.92, 剩余因子值较高, 说明除了所讨论因子外还存在其他对释汞通量影响较大的因素。

3 结论

三峡库区农田系统 TGM 浓度范围为 2.67 ~ 75.5 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 均值为 $(6.26 \pm 8.11) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 显著高于全球 TGM 浓度背景值, 并且冬春季远高于夏秋

季, 表明研究区 TGM 明显受到了周边的人为汞排放源影响。本研究区环境因子影响了土/水界面的释汞通量, 其中气温和紫外强度是主要因子, 导致界面汞交换量呈现明显的季节变化和日变化, 即不同地表类型的土壤汞释放量均呈现夏季最高, 冬季最低, 并于光照强度最大时释汞通量达到最大值。除此之外, 汞交换通量还受农业活动的影响, 如经常被翻耕的旱地 $[(16.94 \pm 14.71) \text{ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$ 汞释放量明显高于农耕活动较少的林地 $[(13.17 \pm 10.42)$

$\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]. 研究说明三峡库区周边农田系统 TGM 以及土/水界面汞释放通量均受到了人为活动的影响.

参考文献:

- [1] Selin N E, Jacob D J, Park R J, *et al.* Chemical cycling and deposition of atmospheric mercury: global constraints from observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**: D02308, doi: 10.1029/2006JD007450.
- [2] Pirrone N, Cinnirella S, Feng X, *et al.* Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** (13): 5951-5964.
- [3] Smith-Downey N V, Sunderland E M, Jacob D J. Anthropogenic impacts on global storage and emissions of mercury from terrestrial soils: insights from a new global model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**: G03008, doi: 10.1029/2009JG001124.
- [4] 倪九派, 傅涛, 何丙辉, 等. 三峡库区小流域土地资源优化利用模式的研究 [J]. *农业工程学报*, 2002, **18** (6): 182-185.
- [5] 丁恩俊. 三峡库区农业面源污染控制的土地利用优化途径研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [6] 何仁江. 三峡库区典型农业小流域氮磷排放负荷与收支研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [7] Feng X B, Wang S F, Qiu G A, *et al.* Total gaseous mercury emissions from soil in Guiyang, Guizhou, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, **110** (D14): D14306, doi: 10.1029/2004JD005643.
- [8] Fu X W, Feng X B, Wang S F. Exchange fluxes of Hg between surfaces and atmosphere in the eastern flank of Mount Gongga, Sichuan province, southwestern China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113** (D20): D20306, doi: 10.1029/2008JD009814.
- [9] Kim K H, Lindberg S E, Meyers T P. Micrometeorological measurements of mercury-vapor fluxes over background forest soils in eastern Tennessee [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29** (2): 267-282.
- [10] 杨永奎. 重庆主城区大气汞时空分布特征及人为排放研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [11] Feng X B, Tang S L, Shang L H, *et al.* Total gaseous mercury in the atmosphere of Guiyang, PR China [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **304**(1-3): 61-72.
- [12] 张玉卿. 青岛大气汞的分布特征及来源研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [13] Chen L G, Liu M, Xu Z C, *et al.* Variation trends and influencing factors of total gaseous mercury in the Pearl River Delta-A highly industrialised region in South China influenced by seasonal monsoons [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 757-766.
- [14] Wan Q, Feng X B, Lu J L, *et al.* Atmospheric mercury in Changbai Mountain area, northeastern China I. The seasonal distribution pattern of total gaseous mercury and its potential sources [J]. *Environmental Research*, 2009, **109** (3): 201-206.
- [15] Fu X W, Feng X B, Zhu W Z, *et al.* Total gaseous mercury concentrations in ambient air in the eastern slope of Mt. Gongga, South-Eastern fringe of the Tibetan plateau, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(5): 970-979.
- [16] Fu X W, Feng X B, Wang S F, *et al.* Temporal and spatial distributions of total gaseous mercury concentrations in ambient air in a mountainous area in southwestern China: implications for industrial and domestic mercury emissions in remote areas in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(7): 2306-2314.
- [17] Watras C J, Morrison K A, Rubsam J L, *et al.* Atmospheric mercury cycles in northern Wisconsin [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(26): 4070-4077.
- [18] Liu B, Keeler G J, Dvonch J T, *et al.* Temporal variability of mercury speciation in urban air [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(9): 1911-1923.
- [19] Kim K H, Kim M Y. The temporal distribution characteristics of total gaseous mercury at an urban monitoring site in Seoul during 1999-2000 [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35** (25): 4253-4263.
- [20] Sakata M, Marumoto K, Narukawa M, *et al.* Mass balance and sources of mercury in Tokyo Bay [J]. *Journal of Oceanography*, 2006, **62**(6): 767-775.
- [21] Mason R P, Fitzgerald W F, Morel F M M. The biogeochemical cycling of elemental mercury: anthropogenic influences [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, **58**(15): 3191-3198.
- [22] 魏文. 中国农村地区生物质燃料燃烧的汞排放研究 [D]. 北京: 北京大学, 2012.
- [23] Wang Z W, Chen Z S, Duan N, *et al.* Gaseous elemental mercury concentration in atmosphere at urban and remote sites in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(2): 176-180.
- [24] Friedli H R, Arellano A F Jr, Geng F, *et al.* Measurements of atmospheric mercury in Shanghai during September 2009 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (8): 3781-3788.
- [25] 张成. 紫色土土/气界面汞交换特征及其影响因素研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [26] 王娅, 赵铮, 木志坚, 等. 三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 130-135.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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