

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试

杜宝玉¹, 王琼², 罗遥¹, 段雷^{1*}

(1. 清华大学环境学院, 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084; 2. 成都信息工程学院资源环境学院, 大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室, 成都 610225)

摘要: 为了研究大气汞浓度较高地区的森林土壤的汞排放特征, 选取重庆铁山坪马尾松林为研究对象, 应用动态通量箱与汞分析仪联用的方法, 于 2012 年 9 月~2013 年 7 月间对土壤-大气汞交换通量进行了 4 个季度的现场观测, 并考察了辐射强度、空气温度、空气湿度、土壤温度和土壤湿度等环境因子与大气汞浓度对汞交换通量的影响。结果表明, 土壤-大气汞交换通量存在明显的季节差异, 夏季汞排放量为 $35.3 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 而其他季节很小, 甚至在冬春两季土壤转为大气的汞汇。汞交换通量除了受辐射强度和大气/土壤温度的影响较大之外, 还与大气汞浓度呈线性负相关, 白天的平衡点为 $5.61 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。重庆铁山坪马尾松林土壤的汞排放量为 $2.65 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 较高的大气汞浓度是该值远低于较清洁地区同类森林的重要原因。

关键词: 汞; 土壤排放; 自然源; 土壤-大气交换通量; 马尾松林

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3830-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.10.027

Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China

DU Bao-yu¹, WANG Qiong², LUO Yao¹, DUAN Lei¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Air Environmental Modeling and Pollution Controlling Key Laboratory of Sichuan Education Institutes, College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: To investigate soil mercury emission characteristics in areas with high atmospheric mercury concentration, the soil-air exchanging flux of gaseous elemental mercury (Hg^0) was measured for four seasons from September 2012 to July 2013 in a Masson pine forest of Tieshanping, Chongqing in Southwestern China using a dynamic flux chamber and a LUMEX RA-915⁺ mercury analyzer. The effects of ambient air mercury concentration and environmental factors, such as radiation intensity, air temperature, air humidity, soil temperature, and soil water content, on exchanging flux were also studied. Results showed that there was obvious seasonal variation of the Hg^0 exchanging flux, with the highest value of $35.3 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ in the summer and very low values in other seasons, even negative in spring and winter. In addition to radiation intensity and air/soil temperature, ambient air mercury concentration was an important impacting factor, which was negatively correlated with the Hg^0 exchanging flux, with the equilibrium concentration at $5.61 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. The total soil emission of Hg^0 was estimated to be $2.65 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, which was much lower than that in similar forests in cleaner areas. High ambient air Hg^0 concentration in Tieshanping was the main reason for the difference.

Key words: mercury; soil emission; natural source; soil-air exchange flux; Masson pine forest

汞作为一种全球性污染物^[1], 其全球减排行动已经开始(2013 年 10 月签署“水俣公约”)。相比于人为源, 自然源(包括二次排放, 即自然和人为活动向大气排放的汞在沉降到地表后的再次释放, 目前还无法将之与自然源区分^[2])的大气汞排放量较大^[3]。这也是近年来人为源显著改变, 而全球背景站大气汞浓度的长期观测结果却并没有显现出明显响应的重要原因^[4]。大气汞的自然源包括土壤、水体、火山地热活动、植物和森林火灾等^[5], 其中土壤汞排放较为重要^[3]。自然源排放量的估算目前存在很大的不确定性^[6]。

相对于国外^[7~11], 我国在土壤汞排放方面的研究十分缺乏, 特别是针对森林土壤的研究较

少^[12~14]。本研究选择位于重庆铁山坪的马尾松林为研究对象, 现场测试土壤-大气界面的汞交换特征。马尾松(*Pinus massoniana*)林是我国亚热带地区分布最广且资源最大的森林群落^[15], 而重庆是我国西南地区最大的城市之一, 人为汞排放量较高^[16], 大气和土壤中的汞含量均较高^[17]。本研究的开展, 将有助于认识大气汞污染较严重地区的土壤汞排放特征, 对评价森林生态系统在全球汞循环中的作用提供参考。

收稿日期: 2014-03-27; 修订日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(20937002, 21377064)

作者简介: 杜宝玉(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: jzmkdby@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lduan@tsinghua.edu.cn

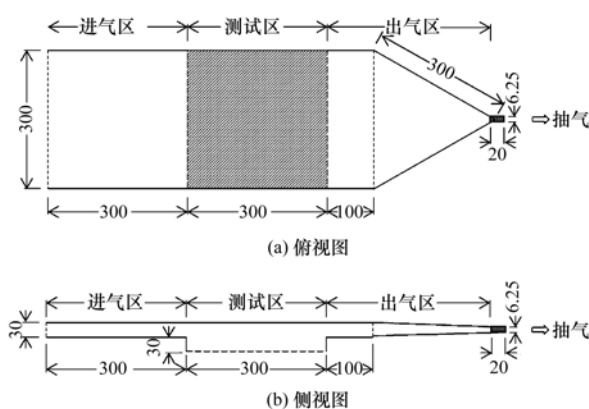
1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区所在的重庆市铁山坪森林公园(106°39.38'E, 29°36.51'N)位于重庆市东北部,距市中心约20 km,海拔450 m,年平均气温18℃,年平均降水量1 100 mm,土壤为山地黄壤(A层 pH 值3.7,有机质含量7.56%)^[18,19],O层汞含量为294 ng·g⁻¹,A层汞含量为187 ng·g⁻¹^[12].林内没有明显的人为活动干扰.

1.2 实验方法

本研究采用动态通量箱(dynamic flux chamber, DFC)与汞分析仪(LUMEX RA-915⁺)联用的方法^[8],测试土壤表层与大气间的气态单质汞(Hg⁰)交换通量.所用通量箱为国际上的最新设计(图1)^[20]:由聚碳酸酯制成,对汞的吸附较弱^[21];箱体划分为进气区、测试区和出气区,扁平化的设计使测试气流在箱体内更稳定;同时在进气区前端和出气区尾端增加孔板,降低由于气路截面尺寸改变导致的气流分布不均匀性.该通量箱能够在土壤表层上方产生更加稳定和均匀的气流,从而提高了测试过程中数据的稳定性和准确性^[20].



图中长度单位为 mm
图1 通量箱设计示意

Fig. 1 Schematics of the dynamic flux chamber

每次现场测试前,将通量箱置于0.1 mol·L⁻¹的HNO₃溶液中浸泡24 h,然后依次用清水和去离子水冲洗后风干.测试时,将通量箱覆盖于土壤表面,在测试口上方封闭一块30 cm×30 cm×6 cm的空间.通过Teflon管将通量箱与RA-915⁺汞分析仪连接起来,以2.1 L·min⁻¹的实际流量(实验中为了降低人为活动对测试结果的影响,汞分析仪置于通量箱10 m以外,为此增加了超过10 m的管路.由于管路和通量箱存在较大的阻力损失,汞分析仪的实际抽气流量远低于仪器的标称流量20 L·min⁻¹.不

过,该流量改变并不影响测试结果,同时该流量符合通量箱的设计要求^[20,21])抽取通量箱内的气体,通过测定通量箱进口和出口气体中的汞浓度,可依据质量平衡关系计算出土-气界面的汞交换通量^[9]:

$$F = (c_o - c_i) A^{-1} Q$$

式中, F 为土-气界面汞交换通量[ng·(m²·h)⁻¹],正值代表排放, c_i 为通量箱进气口Hg⁰浓度(ng·m⁻³), c_o 为通量箱出气口Hg⁰浓度(ng·m⁻³), A 为通量箱实际覆盖的土壤面积(m²), Q 为采样流量(m³·h⁻¹).

操作LUMEX RA-915⁺汞分析仪交替测试通量箱进气口和出气口中气体的汞浓度值,每5 min切换一次,10 min完成一组测试.为了提高汞分析仪测试结果的可靠性,在每次切换管路后都进行手动调零,将仪器调零到背景值在±0.5 ng·m⁻³以内才开始正式测试.仪器每10 s自动记录一个浓度值,为避免切换管路后其中的残余气体对测试结果产生影响,每次切换后的首个1 min内读数舍去,其余4 min读数取平均值.

在测试汞交换通量的同时,用便携式小型气象站(HOBO Portable Weather Station, Onset Computer Corporation)同步记录各环境因子数据,包括辐射强度、空气温度、空气湿度、土壤温度和土壤湿度(表层0~5 cm).

选择一年当中不同季节(2012年9月、2013年1月、2013年4月和2013年7月)分别进行现场测试,每次测试周期为1周,每天连续监测白天(09:00~17:00)土壤-大气汞交换通量及其相应的环境因子.由于夜晚汞交换量与白天相比往往可以忽略^[22~24],因此本研究仅在2013年7月测试了2个晚上以验证以上结论.

1.3 数据分析方法

对每天连续的测试结果进行累积(忽略夜晚,由于汞分析仪需更换电池导致中午时段有数据缺失)得到全天的汞交换通量,每个季度各天的平均值作为该季度的汞交换通量,4个季度的取平均则为全年的汞交换通量.应用SPSS软件,对测得的汞交换通量与相应的环境因子进行皮尔森相关分析(Pearson Correlation).

2 结果与分析

2.1 汞交换通量的日变化特征

重庆地处长江与嘉陵江两江交汇的多山地带,年日照率仅为25%~35%,一年四季中较有代表性的天气为多云.各季节此典型天气条件下的土壤汞交换通量日变化如图2所示.

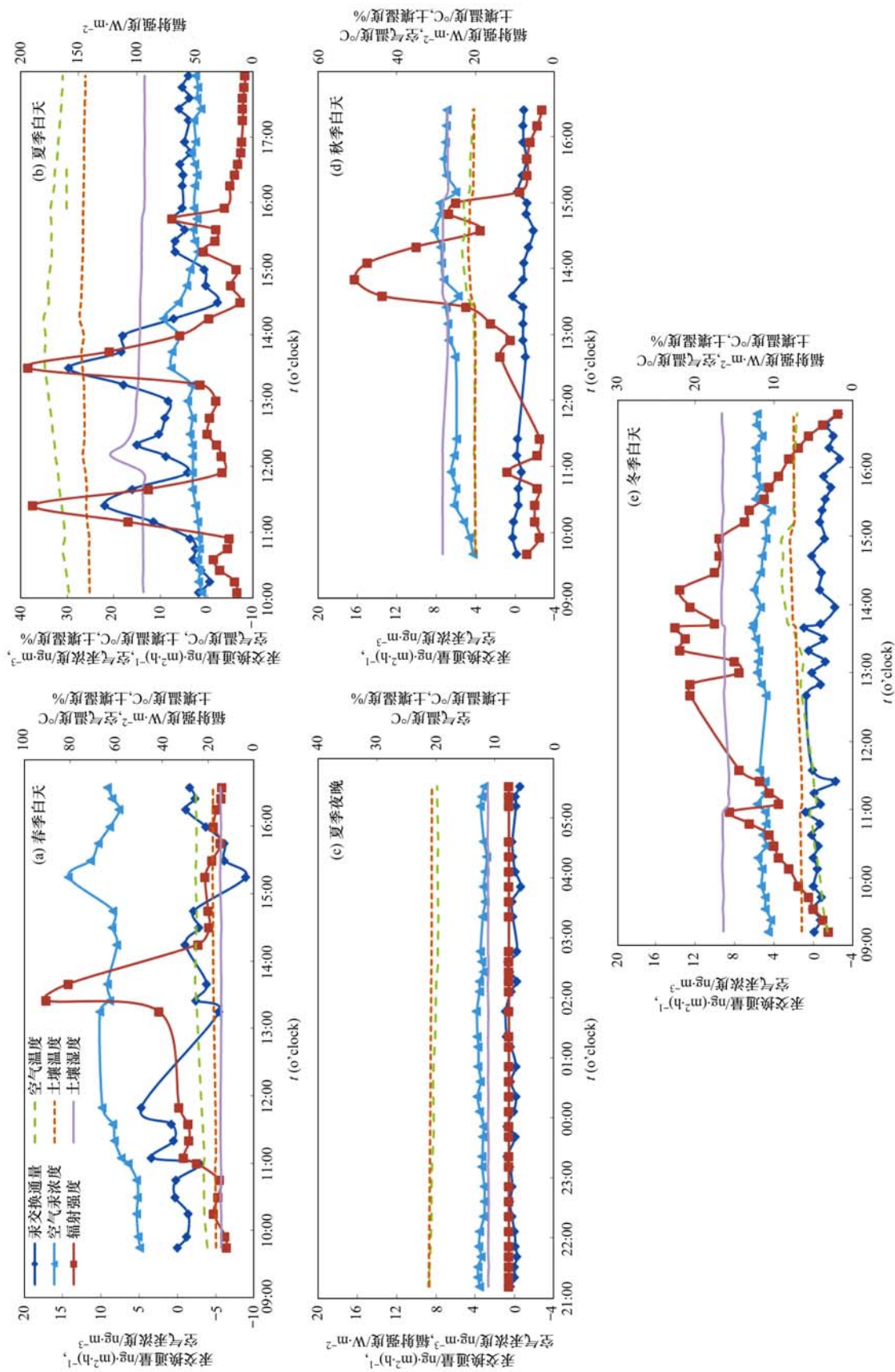


图 2 不同季节典型汞交换通量的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of Hg emission fluxes in different seasons

土壤-大气汞交换通量在夏季表现出明显的日变化,其峰值的出现与辐射强度相吻合[图 2(b)]. 在夏季中午前后辐射强度最高(接近 $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)时,土壤汞排放量可达到 $30 \text{ ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$;而在其他时段辐射强度较低(低于 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)时,土壤汞排放量低于 $5 \text{ ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,下午的值高于上午. 在此期间,空气温度先缓慢升高,在午后达到最高,之后逐渐降低,表层土壤温度下午稍高于上午. 土壤湿度全天基本保持稳定,仅在午后由于阵雨而短时出现一个峰值. 与之相对应,土壤的汞排放量也出现一个小的峰值[$15 \text{ ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]. 林内大气汞浓度在上午缓慢上升,午后逐渐下降,最后稳定在 $2 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,略高于上午.

夏季夜晚各环境因子均保持稳定,林内大气汞浓度也相对稳定($3.38 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3} \pm 0.27 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$),汞交换通量在 0 附近波动(平均值 $0.18 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$),与白天相比可忽略[图 2(c)].

与夏季不同,土壤-大气汞交换通量在其他季节的日变化特征不明显[图 2(a)、2(d)和 2(e)]. 尽管午后辐射强度达到一天中的最高值,但汞交换通量没有出现明显的峰值. 空气温度和土壤湿度均基本保持稳定,而汞交换通量则出现明显的波动. 这与林内空气汞浓度的变化有一定的同步性,特别是在春秋两季,土壤-大气汞交换通量在 0 附近波动,当大气汞浓度升高时,汞交换通量为负值,反之亦然.

2.2 汞交换通量与环境因子的相关性

土壤-大气汞交换通量与各环境因子数值的相关性如表 1 所示,汞交换通量与辐射强度、空气温度和土壤温度呈显著正相关,而与空气湿度、土壤湿度和大气汞浓度呈显著负相关.

表 1 汞交换通量与各环境因子的相关性

Table 1 Correlation between Hg emission flux and environmental factors		
环境因子	Pearson 相关系数	显著性水平
辐射强度	0.501	<0.001
空气温度	0.408	<0.001
空气湿度	-0.220	0.003
土壤温度	0.427	<0.001
土壤湿度	-0.185	0.012
大气汞浓度	-0.362	<0.001

2.3 汞交换通量的季节变化

图 3 给出了不同季节的平均汞交换通量. 从中可以看出,夏秋两季土壤为大气汞排放源,其中夏季汞交换通量很高,达到 $35.3 \text{ ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,秋季为 $3.58 \text{ ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$;而冬春两季土壤为大气的汞

汇,汞交换量分别为 $-6.18 \text{ ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $-3.27 \text{ ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 据此估测本地区全年的汞交换通量为 $2.65 \text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ [相当于 $7.26 \text{ ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$],这也意味着这个地区森林土壤是大气汞的排放源.

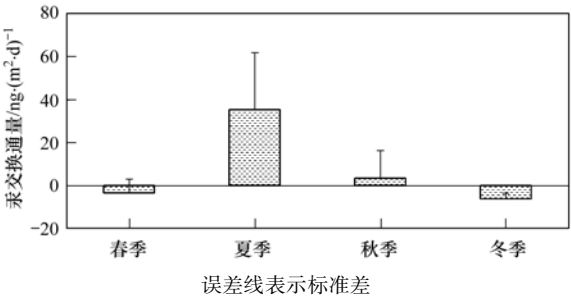


图 3 不同季节的汞交换通量

Fig. 3 Hg emission fluxes in different seasons

3 讨论

3.1 环境因子对汞交换通量的影响

在夏季,辐照强度是影响汞释放的主要因素,两者呈正相关,这与许多研究的结果相一致,即太阳辐射能促进土壤汞的排放,表现为晴天的土壤汞排放量一般高于阴天^[7,10,25],植被覆盖土壤的汞排放量显著低于无植被覆盖地区^[9]. 其原理是,土壤表面的氧化态汞(Hg^{2+})在太阳辐射(特别是紫外线)的作用下发生光致还原作用,生成 Hg^0 进而排放到大气^[10,25]. 不过,由于本研究的测试对象为林下土壤,受到树冠的影响,林下的辐射强度远低于太阳直射,因此汞交换通量也远低于取相同林地的土壤在北京进行汞排放量测试的结果[最高值超过 $100 \text{ ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]^[12]. 而在其他 3 个季节,辐射强度对土壤-大气汞交换通量几乎没有影响,大气温度(或者土壤温度)成为影响汞交换通量的最重要因素,两者呈正相关. 这同样与许多研究结果相一致^[9,26,27]. 较低的温度可能大大降低土壤表层中汞的光致还原反应速率^[9],使得汞交换量维持在较低水平甚至为负值.

与大气/土壤温度和辐射强度相比,土壤湿度和空气湿度对土壤-大气汞交换通量的影响较小. 本研究发现汞交换通量与土壤湿度呈负相关性,这与一些研究的结论并不一致. 多数学者认为土壤湿度增加可以促进土壤汞释放,因为土壤湿度增加会导致更多的极性水分子挤占土壤颗粒上原本是 Hg 的结合位点,促使更多的 Hg 进入到壤中气和土壤溶液中^[11],而且水分的增加会挤压土壤间隙的空气,将富含 Hg^0 的壤中气推挤到土气界面参与通量交

换^[28]. 本研究中同样发现降水之后汞的交换通量有一个短暂的升高[图 2(b)]. 不过,以上这些结论都是在土壤湿度较低的前提下得到的,而重庆的当地条件是土壤湿度全年保持在 20% 左右. 有研究认为,在较高的土壤湿度条件下,过量的水分会导致土壤通透性下降,而且土温下降,不利于土壤释放汞^[29]. 本研究发现汞交换通量与空气湿度呈负相关,可能在空气湿度较低时,土壤水分的蒸发会带更多的汞到土壤表面. 但是,也有研究认为,汞交换通量与空气湿度呈负相关具有较强的偶然性,因为空气湿度往往与辐射强度和空气温度呈负相关^[26].

3.2 汞交换通量比较

本研究测得重庆铁山坪马尾松林的土壤-大气汞交换通量为 $7.26 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 远低于在重庆缙云山针阔混交林的测试结果[全年 $16.8 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 相当于 $404 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]^[13]. 比较日变化结果可以看出,在夏季辐射强度最高的时段,两个研究测得的汞交换通量(最大值)相当,但在其他时段,铁山坪的结果大约低一个量级;在春、秋和冬三季,铁山坪的结果同样很低,甚至长期维持在负值(这表明土壤在一年当中部分时间为大气汞的汇),而缙云山基本保持在 $5 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 以上^[13].

由于铁山坪和缙云山自然条件相近,辐射强度、大气温度、大气湿度和土壤湿度等环境因子的差异不大,特别是表层土壤汞含量也相当(铁山坪土壤 O 层汞含量 $294 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 缙云山为 $327 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[30], 推测大气汞浓度的不同是造成汞交换通量有如此大差异的重要原因. 铁山坪全年平均大气汞浓度为 $5.25 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 高于缙云山 ($4.23 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[30]. 两地大气汞浓度的差异,一方面是因为距离城市(人为源)远近的不同(铁山坪 20 km, 而缙云山 40 km), 另一方面的原因则是主导风向. 铁山坪位于城市的东北方向,而缙云山位于城市的西北方向. 在春、秋和冬主导风向为西北^[30]时,铁山坪的大气汞浓度易受城市排放的影响,从而相对较高 ($6.13 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$); 而在夏季主导风向为东北^[30]时,铁山坪处于城市上风向,大气汞浓度为全年最低 ($2.63 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), 缙云山则受城市影响,达到全年最高 ($4.99 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[30]. 总体上看,一年中的大多数时间铁山坪地区的大气汞浓度值都要高于缙云山地区的大气汞浓度值.

3.3 土壤-大气汞交换的平衡点

大气汞浓度对土壤-大气汞交换通量的影响可以用平衡点来描述^[31,32]. 基于铁山坪白天汞交换通量值同大气汞浓度之间明显的线性关系(去掉夏季

辐射强度较高时段,图 4)可以得到平衡点:拟合直线同 x 轴的交点为 5.61,表明大气汞浓度为 $5.61 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,汞交换通量为 0,如果忽略环境因子的变化,此时土-气界面汞交换达到平衡(表观平衡). 由于铁山坪受到城市人为汞排放的影响较大,大气汞浓度长期保持在平衡点以上,此时土壤是大气汞的汇;而缙云山由于主导风向的关系,受到城市排放的影响较小,大气汞浓度基本不超过平衡点,土壤一直是大气汞的源,而且排放量较大.

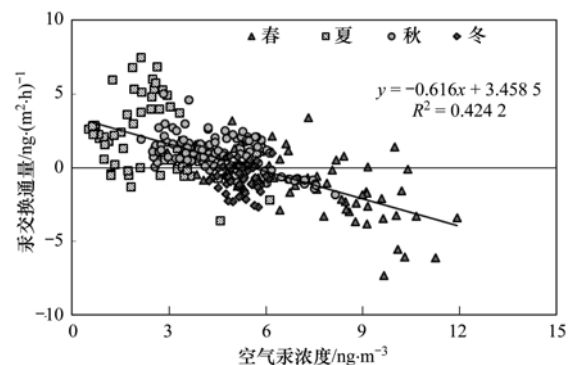


图 4 汞交换通量与大气汞浓度关系

Fig. 4 Correlation between Hg emission flux and atmospheric mercury concentration

4 结论

(1) 重庆铁山坪马尾松林土壤-大气汞交换通量存在明显的季节差异,夏季汞排放量为 $35.3 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 而其他季节很小,甚至在冬春两季土壤转为大气的汞汇.

(2) 土壤-大气汞交换通量受多种环境因子的影响,其中辐射强度和大气/土壤温度较重要,与汞交换通量显著正相关,而土壤湿度和空气湿度则与汞交换通量负相关.

(3) 重庆铁山坪马尾松林土壤-大气汞交换通量与大气汞浓度呈线性负相关,白天的平衡点为 $5.61 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$.

(4) 重庆铁山坪马尾松林土壤的汞排放量为 $2.65 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 较高的大气汞浓度是该值远低于较清洁地区同类森林的重要原因.

参考文献:

- [1] Lindqvist O, Johansson K, Bringmark L, *et al.* Mercury in the Swedish environment-recent research on causes, consequences and corrective methods[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1991, 55(1-2): xi-261.
- [2] Lindberg S E, Bullock R, Ebinghaus R, *et al.* A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition [J]. AMBIO, 2007, 36(1): 19-33.

- [3] 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**: 5951-5964.
- [4] Steffen A, Schroeder W, Macdonald R, *et al.* Mercury in the Arctic atmosphere: An analysis of eight years of measurements of GEM at Alert (Canada) and a comparison with observations at Amderma (Russia) and Kuujuarapik (Canada) [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **342**(1-3): 185-198.
- [5] Schroeder W H, Munthe J. Atmospheric mercury-An overview [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(5): 809-822.
- [6] 冯新斌, 付学吾, Sommar J, 等. 地表自然过程排汞研究进展及展望[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 845-856.
- [7] Kuiken T, Zhang H, Gustin M S, *et al.* Mercury emission from terrestrial background surfaces in the eastern USA. Part I: Air/surface exchange of mercury within a southeastern deciduous forest (Tennessee) over one year [J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(3): 345-355.
- [8] Ericksen J A, Gustin M S, Xin M, *et al.* Air-soil exchange of mercury from background soils in the United States [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(2-3): 851-863.
- [9] Choi H D, Holsen T M. Gaseous mercury fluxes from the forest floor of the Adirondacks [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(2): 592-600.
- [10] Moore C, Carpi A. Mechanisms of the emission of mercury from soil: Role of UV radiation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**(D24): D24302, doi: 10.1029/2004JD005567.
- [11] Gustin M S, Stamenkovic J. Effect of watering and soil moisture on mercury emissions from soils [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **76**(2): 215-232.
- [12] 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 等. 重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1922-1927.
- [13] 马明, 王定勇, 申源源, 等. 中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 85-92.
- [14] Wang Z W, Zhang X S, Xiao J S, *et al.* Mercury fluxes and pools in three subtropical forested catchments, southwest China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(3): 801-808.
- [15] 吴征镒主编. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1980. 823-888.
- [16] 张成, 杨永奎, 王定勇. 重庆大气汞人为排放及其预测 [J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(8): 904-908.
- [17] Wang D Y, He L, Shi X J, *et al.* Release flux of mercury from different environmental surfaces in Chongqing, China [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(11): 1845-1854.
- [18] 罗遥. 脱硫石膏对酸化森林土壤的修复研究 [D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [19] 杨永森, 段雷, 靳腾, 等. 石灰石和菱镁矿对酸化森林土壤修复作用的研究 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1878-1883.
- [20] Lin C J, Zhu W, Li X C, *et al.* Novel dynamic flux chamber for measuring air-surface exchange of Hg^0 from soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(16): 8910-8920.
- [21] Eckley C S, Gustin M, Lin C J, *et al.* The influence of dynamic chamber design and operating parameters on calculated surface-to-air mercury fluxes [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(2): 194-203.
- [22] 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.
- [23] Gabriel M C, Williamson D G, Zhang H, *et al.* Diurnal and seasonal trends in total gaseous mercury flux from three urban ground surfaces [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(23): 4269-4284.
- [24] Maxwell Mazur. Factors affecting gaseous mercury (Hg) emissions from soils: Insights from forest harvesting disturbance and Hg source depth manipulation [D]. Toronto, Canada: University of Toronto, 2013.
- [25] Gustin M S, Biester H, Kim C S. Investigation of the light-enhanced emission of mercury from naturally enriched substrates [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(20): 3241-3254.
- [26] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州滥木厂汞矿区土壤与大气间气态汞交换通量及影响因素研究 [J]. *地球化学*, 2004, **33**(4): 405-413.
- [27] Lindberg S E, Hanson P J, Meyers T P, *et al.* Air/surface exchange of mercury vapor over forests-the need for a reassessment of continental biogenic emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(5): 895-908.
- [28] Wallischläger D, Turner R R, London J. Factors affecting the measurement of mercury emissions from soils with flux chambers [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(D17): 21859-21871.
- [29] 刘潇, 张成, 朱金山, 等. 土壤湿度和浇水对紫色土土/气界面汞释放通量的影响 [J]. *环境化学*, 2011, **30**(8): 1509-1513.
- [30] 马明. 西南典型亚热带森林生态系统汞的输入、输出与来源特征 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [31] Wang S F, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Mercury emission to atmosphere from Lanmuchang Hg-Tl mining area, Southwestern Guizhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(39): 7459-7473.
- [32] Xin M, Gustin M S. Gaseous elemental mercury exchange with low mercury containing soils: Investigation of controlling factors [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, **22**(7): 1451-1466.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行