

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

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

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 谢元博, 陈娟, 李巍 (1)

长白山 PM_{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)

青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响 柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)

重庆市大气二噁英污染水平及季节变化 张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)

西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放 卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)

西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放 张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)

杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征 蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)

模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究 符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)

川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化 童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)

重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化 余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)

汉江上游金水河流域氮湿沉降 王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)

麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)

兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究 吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)

中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究 马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)

水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO₂ 释放的影响 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)

黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征 吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)

浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价 马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)

POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测 张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)

降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师阳 (123)

锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)

子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征 赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)

水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响 宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)

黄东海表层沉积物中磷的分布特征 宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)

河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究 张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)

沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制 武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)

三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析 敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)

太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)

滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究 王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)

浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术 王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)

光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究 王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)

同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究 刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)

垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究 孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)

油田区土壤石油烃组分残留特性研究 胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)

水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态 谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)

土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响 廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)

水稻土团聚体 Cu²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化 许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)

Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响 刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)

淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌侵染 2 种湿地植物的影响 马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)

太湖水质与水生生物健康的关联性初探 周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)

3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较 姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)

某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究 杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)

异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响 胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)

Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价 王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)

基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究 郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)

微囊藻毒素降解菌 *Paucibacter* sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性 游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)

硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究 杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)

降解纤维素产甲烷的四菌复合系 吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)

中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素 谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)

内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究 史晶晶, 耿元波 (341)

南京河流夏季水-气界面 N₂O 排放通量 韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)

杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响 肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)

生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究 彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)

不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究 卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)

硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用 严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)

县域尺度的京津冀都市圈 CO₂ 排放时空演变特征 汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)

保水剂性能及其农用安全性评价研究进展 李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

《环境科学》征订启事 (65) 《环境科学》征稿简则 (220) 信息 (226, 270, 298, 364)

中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究

马明¹, 王定勇^{1,2*}, 申源源¹, 孙荣国¹, 黄礼昕¹

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 为了揭示不同气候条件下森林与大气间汞交换的规律, 应用动力学通量箱与 Lumex RA 915⁺ 测汞仪联用技术, 选择重庆缙云山国家级自然保护区为研究地点, 于 2011 年 4 月~2012 年 3 月对针阔混交林土/气界面释汞通量进行了为期 1 a 的连续监测, 并考察了各环境因子对土壤释汞通量的影响. 结果表明, 缙云山针阔混交林林地土壤年平均释汞通量值为 $(16.82 \pm 6.70) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 明显高于欧美国家自然背景区; 受光照、温度、相对湿度等气象因素以及亚热带地区森林植被生长变化规律影响, 缙云山地区林地土壤释汞通量存在显著的季节性差异, 暖季林地土壤释汞通量 $[(22.23 \pm 13.19) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ 明显高于冷季 $[(6.01 \pm 4.05) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$; 通径分析结果表明林地土壤释汞通量的日变化特征和 1 d 中光照强度变化有密切关系, 土温、气温和相对湿度与土壤释汞通量之间的显著相关关系可能是光照强度与土壤释汞通量相关关系的表象.

关键词: 释汞通量; 中亚热带; 森林; 针阔混交林; 环境因子

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0085-08

Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone

MA Ming¹, WANG Ding-yong^{1,2}, SHEN Yuan-yuan¹, SUN Rong-guo¹, HUANG Li-xin¹

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Ministry of Education, College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment of Chongqing, College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Total gaseous mercury fluxes of forested field soils in the subtropical forest zones, Chongqing, Southwestern China were continually monitored from April 2011 to March 2012 to provide insights into the characteristics of gaseous mercury flux with conifer-broadleaf forest covers. Samples were collected from surfaces of forest fields as the most representative terrestrial surfaces in Jinyun Mountain. Simultaneously, meteorological parameters at the soil level relating to GEM fluxes, such as soil temperature, air humidity, and solar radiation were analyzed, and variations of atmospheric GEM concentration were examined. The results showed that annual averaged fluxes from soils in the forest and open-air site were $(16.82 \pm 6.70) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, which was significantly higher than that in the natural background area. Moreover, there was a clear seasonal variation on the forest field. In growing season, the average mercury flux was $(22.23 \pm 13.19) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, while in dormant season the value was $(6.01 \pm 4.05) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. Diurnal variation characteristics of mercury fluxes were closely related to solar radiation on the forest field. Mercury fluxes of the soils were significantly correlated with soil temperature, air temperature and relative humidity, which may be caused by the relationship between solar radiation intensity and mercury emission fluxes from soils.

Key words: mercury fluxes; central subtropical; forest; conifer-broadleaf forested field; environmental factors

汞是一种强毒性的重金属元素^[1], 在环境中容易通过食物链富集而对人类健康造成极大危害. 汞在大气中主要以 Hg^0 形态存在, 其含量可占大气总汞 90% 以上^[2,3]. 气态元素汞能在大气中驻留长达 1 a 时间^[4,5], 通过大气循环形成长距离迁移, 进而造成全球范围内的汞污染^[6]. 因此, 对于大气汞的来源研究是掌握汞全球生物地球化学循环的关键. 陆地生态系统是汞生物地球化学循环的重要场所, 而森林生态系统是其中最大的生态系统, 且常被认为是汞的活性库. 森林土壤是森林生态系统贮存汞的主要场所, 可以通过扩散作用向大气排放大量的汞, 排放到大气中的汞又经大气干湿沉降过程而回

到土壤中. 因此, 汞在森林生态系统中的环境行为是汞全球循环的重要组成部分^[7,8].

西南地区是我国森林覆盖率第二大区域, 其中亚热带森林面积占到四分之三, 是西南地区最具代表性的森林生态系统. 针对不同生态系统可能发生的汞污染问题, 前人已做了大量的研究工作^[9~13], 但有关亚热带森林生态系统土壤-大气界面汞交换

收稿日期: 2013-04-01; 修订日期: 2013-05-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430000); 国家自然科学基金项目(41103040); 重庆市自然科学基金项目(cstc2011jjA20007)

作者简介: 马明(1980~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: maming8312@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

通量的研究还很匮乏。

本文选取具有典型中亚热带森林生态系统的缙云山国家级自然保护区为研究区域,以中亚热带分布最为广泛的针阔混交林为研究对象,采取野外实地监测的方式,分析典型森林生态系统土壤-大气界面汞交换通量特征,探讨森林土壤-大气界面汞交换机制及影响因素。其成果丰富了林地生态系统中汞交换通量的数据,对于揭示我国森林/大气界面汞交换规律,探讨林地汞在全球汞的生物地球化学循环中的作用具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

缙云山国家级自然保护区地处重庆市北碚区 (E 106° 17' 43" ~ 106° 24' 50", N 29° 41' 08" ~ 29° 52' 03"),其森林覆盖率高达 96.6%,是长江流域保存较好的典型亚热带常绿阔叶林景观和相对稳定的生态系统,从一定程度上反映出了亚热带森林生态系统的天然本底。保护区植物资源十分丰富,国家级保护珍稀植物珙桐、银杉、红豆杉、桫欏等 51 种,缙云四照花、缙云槭、北碚榕等模式植物 38 种,是长江中上游地区典型的亚热带常绿阔叶林区和植物种基因库,具有较高的保护价值和科学研究价值。

缙云山具有亚热带季风湿润性气候特征,年平均气温 13.6℃、相对湿度 87%、降水量 1611.8 mm。本研究暖季与冷季的划分以月平均气温为基准,月平均气温 > 10℃,林木生长迅速的月份为暖季。月平均气温 < 10℃,落叶阔叶树种叶片凋落、林木生长非常缓慢的月份为冷季。暖季与冷季的转换时间,在中亚热带山区大约为 2~3 月和 11~12 月。研究所在的针阔混交林是亚热带常绿阔叶林次生演替序列之一,在中亚热带森林群落中分布范围最为广泛。该林分上层以针叶树马尾松 (*Pinus massoniana*) 为主,次亚层及中下层乔木以常绿阔叶树种四川大头茶 (*Gordonia acuminata*)、四川山矾 (*Symplocos setchuanensis*)、白毛新木姜子 (*Neolitsea aurata* var. *glauca*) 和小叶栲 (*Castanopsis lescurii* var. *spinulosa*) 为主,灌木层以山黄皮 (*Randia cochinchinensis*)、绒毛红果树 (*Stranvaesia tomentosa*) 和杜茎山 (*Maesajap onica*) 等为主,草本层多为红盖鳞毛蕨 (*Dryopteris erythraea*) 和铁芒萁 (*Dicranopteris pedata*)^[14]。

1.2 释汞通量测定

应用动力学通量箱与 RA-915⁺ 汞分析仪联用技术^[15],同步定点监测森林土壤释汞量、裸地土壤释汞量和大气汞含量,每 5 min 更换一次测定对象,并同步测定一次气象数据,每 10 min 完成一次轮替。每次监测时长为 24 h,连续监测 48 h。通量箱是一个长 60 cm,宽和高分别为 20 cm 的半圆柱体,由石英玻璃制成。测定时,将通量箱置于土壤表面,并用周围土壤对通量箱边缘进行密封。用吸附性低的聚四氟乙烯管将通量箱一端与 RA-915⁺ 汞分析仪连接,另一端由 3 个进气孔直通大气。采样时空气通过进气孔被泵抽入通量箱,然后由出口端进入汞分析仪检测(图 1)。

采样流量为 20 L·min⁻¹,检测频率 1 Hz,每次连续采样时间为 5 min,然后更换测定对象,每 10 min 完成一次轮替。平均通量由式(1)获得:

$$F = (c_{\text{out}} - c_{\text{in}} - c_0) Q/A \quad (1)$$

式中, c_{in} 和 c_{out} 分别为通量箱进出口的总气态汞 (TGM) 质量浓度 (ng·m⁻³); c_0 为通量箱内壁释放或吸附的汞 (ng·m⁻³),即空白值; Q 为采样流量 (L·min⁻¹); A 为通量箱的底面积 (m²); F 为气/土界面间的交换通量 [ng·(m²·h)⁻¹],可为正值,也可为负值;正值表明汞从地表向大气释放的量大于沉降量,表现为净释放。相反,负值则表现为净沉降。

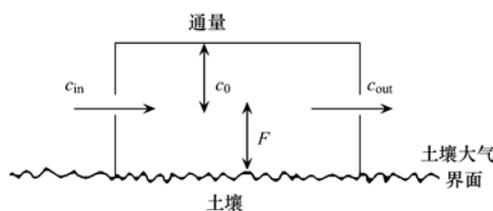


图 1 土/气界面间汞交换

Fig. 1 Schematic diagram of the exchange of mercury on soil/air interface

1.3 土壤汞含量的测定

采集通量箱安放点表层土壤样品,冷冻干燥后研磨过 100 目筛,取 1 g 样品在 HNO₃-H₂SO₄ 混合溶液水浴中保持 90℃ 消化 4 h,取出后加入过量 KMnO₄ 过夜,然后利用盐酸羟胺还原过量 KMnO₄,定容摇匀后静置澄清,取上清液 10 mL 用 F732-G 数字显示测汞仪测定。

1.4 其他参数的测定

大气汞浓度用 Lumex® RA-915⁺ 多功能汞分析仪(俄罗斯 Lumex 公司)现场测定;土壤温度用 DeltaTRAK® 便携式温度计测定;光照强度用 TES 数位式照度计(台北泰仕公司)测定;大气压、空气

湿度、风速和气温用 Kestrel® 4000 微型气象跟踪仪(美国 Nielsen-Kellerman 公司)测定。

2 结果与分析

2.1 林地土/气界面汞交换的水平

缙云山林地土壤与大气间的汞交换结果见表 1。可见,缙云山林地土壤与大气间的汞交换通量表现为双向性,且总体表现以土壤汞释放为主。林地全年平均汞交换通量值为 $(16.82 \pm 6.70) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,其中 3 月汞通量值最高,为 $(34.13 \pm 14.88) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 1 月汞通量值最低,为 $(5.36 \pm 3.73) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。11 月至次年 2 月时间段平均汞通量值都较低,且明显低于全年其它月份(表

2)。这可能是由于冷季时(12~1 月)温度较低(平均气温 6.9°C ,平均土温 8.5°C),光照强度较弱(平均光照强度 0.37 klx),林地土壤汞释放减弱,并伴随汞沉降现象的产生。春初平均温度开始升高(平均气温 12.4°C ,平均土温 10.0°C),光照强度增强(平均光照强度 1.34 klx),林地土壤中的汞开始释放,这与文献[16~18]研究结果一致,即汞交换通量主要受温度和光照强度的影响;另一方面,初春季节,尤其是 3 月,温度的升高和光照强度的增强,使得林地冷季沉降的汞再次排放,最终造成在 3 月林地光照强度和温度均低于夏季的情况下,林地汞交换通量却明显高于其他月份,这与冯新斌等的研究结果相似^[19]。

表 1 林地土壤/大气界面汞交换通量统计结果

Table 1 Statistical summary of mercury exchange fluxes between forest soil and air

时间(年-月)	林地汞通量/ $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$					<i>n</i>
	平均	中位数	标准差	最大值	最小值	
2011-04	21.61	17.15	12.15	57.20	4.96	288
2011-05	18.50	15.57	11.70	54.20	4.95	288
2011-06	18.88	16.40	10.16	52.19	6.05	292
2011-07	20.70	17.89	10.89	58.33	6.86	288
2011-08	26.08	22.60	15.31	67.65	6.55	288
2011-09	19.96	16.39	11.87	56.05	2.46	288
2011-10	17.94	16.35	10.09	47.32	0.22	288
2011-11	6.09	6.34	5.01	18.23	-3.54	292
2011-12	6.08	5.36	4.10	14.82	-3.29	288
2012-01	5.36	4.37	3.73	16.51	-1.06	288
2012-02	6.51	6.70	3.21	14.48	0.61	296
2012-03	34.13	32.56	14.88	72.52	8.25	288
全年	16.82	15.05	6.70	36.07	8.98	3 472

表 3 列举了国内外学者研究的释汞通量,从总体来看,缙云山针阔混交林林地汞交换通量值明显高于自然背景区通量值。与国外如巴西亚马逊^[20]、瑞典^[2,21]、意大利^[22]和美国阿迪朗达克山脉^[23]等比较,本研究林地释汞通量值较高;与国内如长春南湖和净月潭^[24]等相比也偏高。这可能是由于:一方面,研究区地处中亚热带气候区,暖季时间长,年平均气温较温带和寒温带高,土壤温度的升高能加快土壤表层中 Hg^{2+} 光致还原反应进程,从而促进了土壤中的汞向大气释放;另一方面重庆地区工业发达,每年燃烧消耗大量化石原料导致大量气态汞排放进入大气,而该地区独特的“山地环绕”型地势和“雾都”型气候特征也使污染物难以扩散稀释,最终通过沉降等方式汇聚到森林,该部分汞更容易再次释放。通过比较张成等^[25]2005 年对重庆四面山夏季林地汞通量和 Wang 等^[15]2006 年对重庆地区森林土壤汞交换通量的研究也可以发现,重庆地区

森林释汞通量有了一定增加,这可能是先前包括燃煤、垃圾焚烧、氯碱生产、水泥生产、金属冶炼与加工等人为活动造成汞沉降后再排放过程所致^[19],但污染程度远小于汞污染区^[26]。

2.2 森林土/气界面汞交换的时间变化特征

2.2.1 林地土/气界面汞交换的季节变化特征

图 2 表明了林地暖季和冷季释汞通量与光照强度和环温的日变化趋势。从中可知,林地暖季受光照强度和环温影响较明显,而冷季所受影响不明显。在暖季,汞通量变化趋势与光照强度和环温变化趋势相似,最高汞通量的出现与光照强度和环温的增加非常一致[图 2(a)和 2(b)]。汞通量在上午(08:00~12:00)呈现急剧上升,正午时分当光照强度(5.43 klx)和环温(26.65°C)达最大值时,汞通量出现最大值 [$72.52 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]。在午后随光照强度和环温的降低而减小,午夜时分出现最小值 [$0.22 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]。在冷季,汞通量受光照强度

表 2 采样期间的林地环境状况

Table 2 Statistical summaries of forested field environmental data during the sampling period

林地环境参数	时间	平均	最小值	最大值	时间	平均	最小值	最大值
气温/°C		18.80	13.80	24.40		14.92	7.20	21.95
湿度/%		66.84	46.30	81.60		66.44	37.80	89.20
气压/kPa	2011-04	91.43	91.15	91.89	2011-10	92.82	92.68	93.04
土温/°C		18.40	16.80	20.00		16.24	15.55	17.65
光照/klx		1.42	0.00	5.90		0.86	0.00	4.13
气温/°C		25.06	18.00	33.55		13.39	10.20	24.05
湿度/%		66.44	45.90	81.20		78.09	47.55	89.90
气压/kPa	2011-05	91.29	90.94	91.68	2011-11	92.61	92.36	93.04
土温/°C		19.51	17.90	21.10		13.08	12.10	13.95
光照/klx		1.19	0.00	5.80		0.68	0.00	8.31
气温/°C		24.73	21.15	31.90		9.47	6.55	18.90
湿度/%		71.10	48.55	83.80		80.68	50.15	92.50
气压/kPa	2011-06	91.36	91.26	91.49	2011-12	92.61	92.36	93.04
土温/°C		20.65	20.20	21.25		13.09	12.10	13.95
光照/klx		1.49	0.00	5.15		0.82	0.00	7.85
气温/°C		24.97	21.75	31.55		4.74	3.45	7.70
湿度/%		71.10	48.55	83.80		78.06	66.30	87.00
气压/kPa	2011-07	91.36	91.26	91.49	2011-01	93.26	93.09	93.52
土温/°C		21.36	20.20	22.70		6.42	5.40	6.80
光照/klx		1.93	0.00	5.80		0.16	0.00	0.94
气温/°C		27.96	23.10	33.20		6.39	5.00	10.40
湿度/%		49.61	37.90	64.90		71.62	58.60	78.00
气压/kPa	2011-08	91.69	91.47	92.31	2011-02	92.14	91.89	92.31
土温/°C		22.47	21.70	23.40		6.09	5.45	6.30
光照/klx		1.53	0.00	4.80		0.13	0.00	0.64
气温/°C		26.96	21.85	29.75		12.43	8.60	17.70
湿度/%		51.54	37.90	64.90		56.40	41.00	69.45
气压/kPa	2011-09	91.68	91.47	91.84	2011-03	92.91	92.59	93.24
土温/°C		22.14	21.30	23.05		9.99	8.50	10.50
光照/klx		0.93	0.00	4.30		1.34	0.00	9.90

表 3 土壤/大气界面汞交换通量比较

Table 3 Mercury emission fluxes from soil/air interface reported in the literature

采样地点	类型	汞通量 /ng·(m ² ·h) ⁻¹	方法 ¹⁾	文献
全球	自然汞排放	0.70 ~ 1.10	MM	[20]
亚马逊(巴西)	森林土壤	4.60 ± 1.60	DFC	[20]
瑞典	寒温带森林土壤	-5.40 ~ 4.20	MM	[2]
瑞典	森林土壤	-1.30 ~ 1.40	DFC	[21]
阿迪朗达克山脉(美国)	温带森林土壤	-2.50 ~ 27.20	DFC	[23]
意大利	森林土壤	-0.50 ~ 6.00	DFC	[22]
贵阳市	汞污染区	33.00 ~ 3 638.00	DFC	[27]
长春市南湖	森林土壤	7.60	DFC	[24]
长春市净月潭	森林土壤	3.30	DFC	[24]
重庆市	森林土壤	3.50 ± 1.10	DFC	[25]
重庆四面山	林地(夏季)	7.70 ± 3.90	DFC	[25]
缙云山	森林	16.82 ± 6.70	DFC	本研究

1) MM: 微气象学法; DFC: 动力学通量箱法

和气温变化的影响较小,在上午并未伴随光照强度和气温的增加而呈明显上升趋势,但仍在正午时分

当光照强度(3.96 klx)和气温(13.29°C)达到最大值时出现最大值[18.23 ng·(m²·h)⁻¹],在午夜时

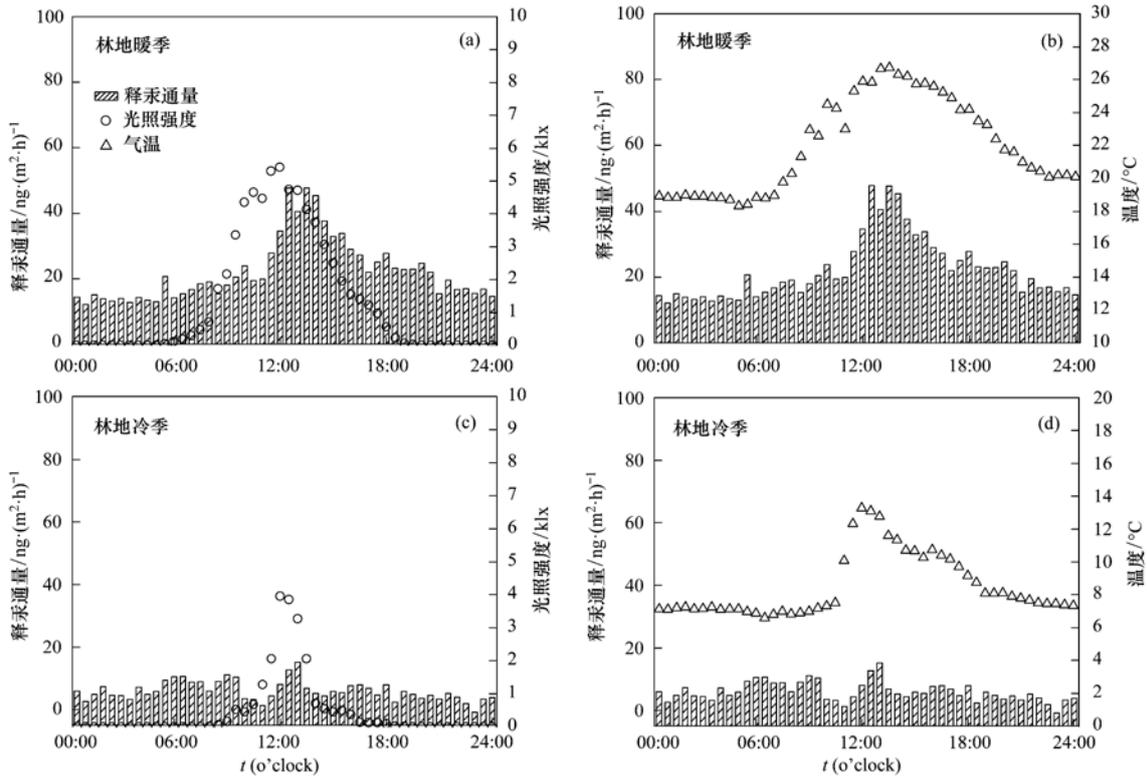


图 2 冷暖季气温和光照强度对林地汞通量的影响

Fig. 2 Effects of air temperature and solar radiation on Hg emission fluxes during two seasons in forest field

分出现最小值 $[-3.54 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$. 这可能是由于暖季平均气温较高,光照强度较强,土壤微生物活动增强,汞的物理和化学活性亦较强,有利于其进行物理扩散和化学反应^[22]. 随着一天中光照强度增强和气温的升高,汞的反应活性增强,当光照强度和气温达最高时,汞的反应活性亦达最强;且土壤具有良好的还原环境,从而促使土壤中汞不断还原并向大气释放. 而在冷季,气温低,光照强度弱,汞在土壤中

的活性降低,释汞现象减弱,使得白天净通量值降低,在夜间甚至发生沉降大于释放的情况而出现负通量值.

林地汞通量在暖季和冷季存在着一定差异性,为了判断其差异性的大小,本研究利用林地全年的汞通量数据,对暖季和冷季汞通量值进行了频率分布统计. 从林地暖季和冷季的汞通量频率分布直方图(图 3)可看出,两季汞通量值的频率

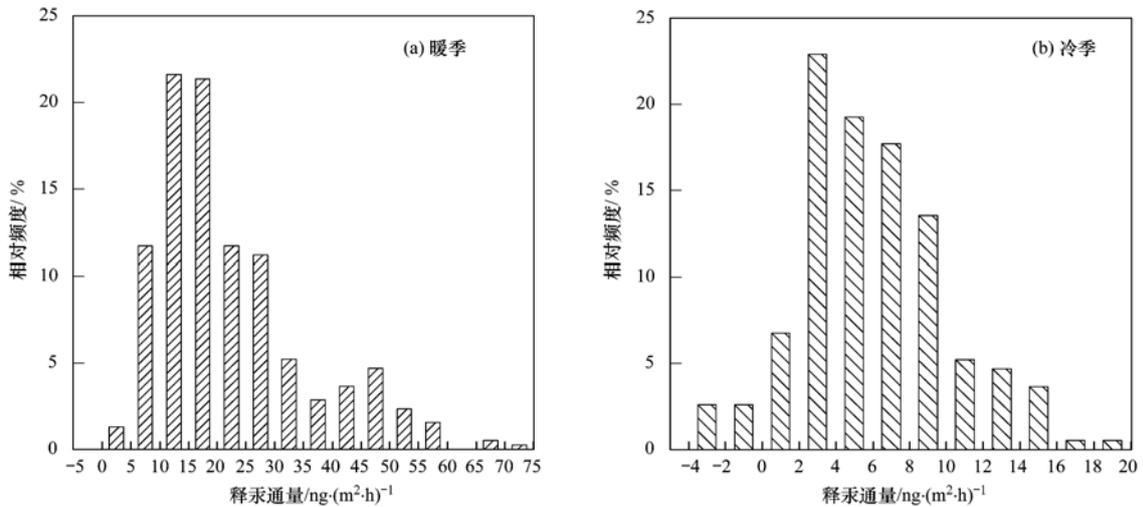


图 3 林地土壤释汞通量频率分布

Fig. 3 Frequency histogram of Hg emission fluxes in forest field

分布情况不同. 在暖季, 大多数(42.97%)汞通量值出现在 $10 \sim 20 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 的范围. 而在冷季, 大多数(59.90%)汞通量值出现在 $2 \sim 8 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 的范围, 且在较低通量值 $3 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 左右出现频率最高(22.92%). 相比较之下, 暖季出现冷季低汞通量值的情况较少. 单因素方差分析发现, 汞通量值在两季间也表现出了明显的差异性 ($F = 276.99, P < 0.001$). 这些数据说明缙云山林地汞通量存在明显的季节性差异, 并且这种差异性是由植被和气象因素共同作用所引起.

2.2.2 林地土/气界面汞交换的日变化特征

林地汞通量日变化趋势见图4. 通过观察林地暖

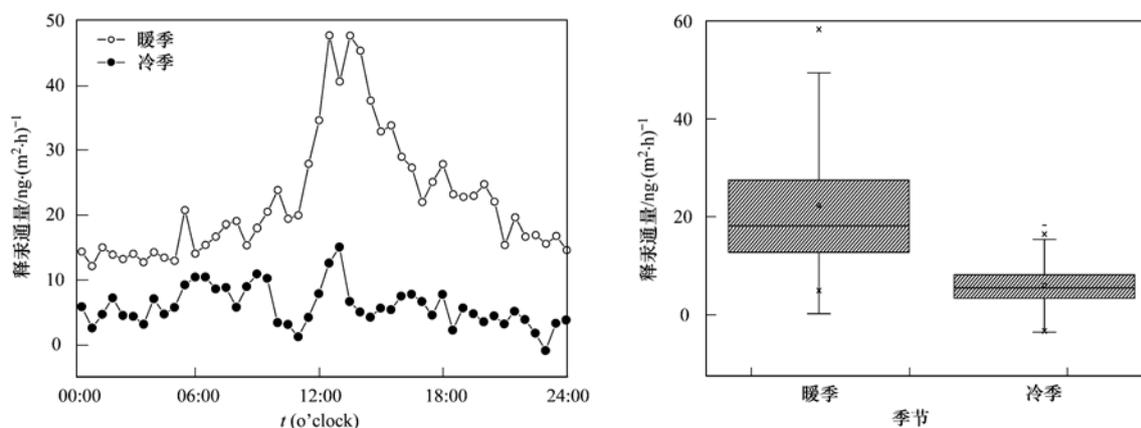


图4 两季中林地汞通量日变化与分布情况

Fig. 4 Daily variation and distribution of Hg emission fluxes during two seasons in forest field

2.3 林地土/气界面释汞通量环境影响因素分析

2.3.1 主成分分析

为找出影响缙云山地区林地土/气界面汞交换的主要影响因素, 所有数据经 KMO & Bartlett's

Test(KMO = 0.596 > 0.5) 检验后进行主成分分析. 根据方差累计贡献率 $\geq 80\%$ 原则确定了2个主成分, 并算出了各主成分的因子载荷(见表4). 季和冷季汞通量的日变化趋势特征发现: ①白天高于夜间; ②最大值出现在正午时分, 最小值出现在午夜时分; ③在1d中的相同时间点, 暖季大于冷季; ④两季在1d中均表现为土壤向大气释汞, 仅在冷季的个别时间发生了汞沉降而出现负值. 据两季汞通量统计结果可知, 林地暖季土/气界面释汞通量值较高, 平均通量达到 $(22.23 \pm 13.19) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 汞通量在一天中变化幅度较大, 趋势较明显, 最大值达 $72.52 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 最小值仅 $0.22 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 而林地冷季土/气界面汞通量值较低, 平均通量仅为 $(6.01 \pm 4.05) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 汞通量在一天中的变化幅度较小, 趋势较弱, 最大值为 $18.23 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 最小值为 $-3.54 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

表4 影响因子的主成分分析结果

Table 4 Analysis of the principle component on the influencing factors of mercury emission fluxes from air/soil interface

采样点	主成分	总方差解释			光照强度	主成分矩阵				
		特征根	方差贡献率/%	累积贡献率/%		土温	气温	相对湿度	大气压	土壤总汞
林地	1	3.96	65.96	65.96	0.87	0.91	0.96	-0.62	-0.87	0.57
	2	0.89	14.75	80.71	0.04	-0.37	-0.24	0.08	-0.13	0.82

结果显示, 林地中, 第一主成分为光照强度、土温、气温、相对湿度及大气压构成的气象因子, 其特征根(Eig)为3.96, 方差贡献率(Var)为65.96%, 累计贡献率(C. P)为65.96%; 第二主成分为土壤总汞所构成的土壤性质因子, 其特征根(Eig)为0.89, 方差贡献率(Var)为14.75%, 累计贡献率(C. P)为80.71%. 这一分析结果说明, 相比土壤

总汞含量, 气象因子对土/气界面汞交换的影响更加重要. 该分析结果与林陶等^[28]研究结果相似, 不同之处在于大气压对土/气界面汞交换的影响在本研究中更加明显.

4).

总汞含量, 气象因子对土/气界面汞交换的影响更加重要. 该分析结果与林陶等^[28]研究结果相似, 不同之处在于大气压对土/气界面汞交换的影响在本研究中更加明显.

2.3.2 通径分析

土/气界面汞交换诸影响因子通径分析结果见表5. 从中可以看出, 在林地采样点, 光照强度、相

表 5 影响土/气界面汞交换诸影响因子通径分析结果¹⁾

Table 5 Path analysis for influencing factors of mercury emission fluxes from air/soil interface

采样点	通径系数因子	直接作用	通过其他指标的间接作用					
			X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
林地	X_1	0.540 8		0.162 7	-0.080 0	0.222 6	-0.321 0	0.227 9
	X_2	0.208 3	0.422 3		-0.099 2	0.263 9	-0.391 4	0.095 6
	X_3	-0.103 0	0.419 9	0.200 6		0.324 4	-0.413 4	0.158 5
	X_4	-0.536 6	-0.224 3	-0.102 5	0.062 3		0.155 3	-0.150 9
	X_5	0.505 6	-0.343 4	-0.161 3	0.084 2	-0.164 8		-0.252 5
	X_6	0.446 9	0.275 8	0.044 6	-0.036 5	0.181 2	-0.285 7	

1) X_1 为光照强度; X_2 为土温; X_3 为气温; X_4 为相对湿度; X_5 为大气压; X_6 为土壤总汞

对湿度、大气压和土壤总汞对土/气界面汞交换的直接作用系数相近,各自单独影响作用也很强,其中以光照强度的影响作用最大. 土温和气温对土/气界面汞交换的影响主要是由光照强度引发的(分别为 42.23% 和 41.99%). 而土壤总汞对土/气界面汞交换的影响有 27.58% 是通过光照强度施加的,即土壤总汞含量升高引起可用于光致还原的汞含量增加,进而导致土壤释汞通量的增大.

3 结论

(1) 缙云山自然保护区林地土壤年平均释汞通量值为 $(16.82 \pm 6.70) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 明显高于自然背景区通量值.

(2) 林地土壤-大气界面汞交换通量存在明显的季节性差异,暖季林地土壤汞交换通量均明显高于冷季.

(3) 缙云山地区林地土壤释汞通量的日变化特征和光照强度变化有密切关系. 释汞通量随光照强度的增大而逐渐增加,至正午时分达一天中的最大值,而后随光照强度的减小而逐渐减小,至午夜时分达一天中的最小值.

(4) 光照强度、相对湿度、大气压和土壤总汞对土/气界面汞交换的直接作用系数相近,各自单独影响作用也很强,其中以光照强度的影响作用最大. 土温和气温对土/气界面汞交换的影响主要是由光照强度引发的,光照强度是土/气界面汞交换通量的最主要影响因素. 其次是土温、气温和相对湿度,它们与土壤释汞通量之间显著的相关关系可能是光照强度与土壤释汞通量相关关系的表象.

参考文献:

[1] Zagury G J, Neculita C M, Bastien C, *et al.* Mercury fractionation, bioavailability, and ecotoxicity in highly contaminated soils from chlor-alkali plants [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, **25**(4): 1138-1147.

[2] Lindberg S E, Stratton W J. Atmospheric mercury speciation;

concentrations and behavior of reactive gaseous mercury in ambient air [J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, **32**(1): 49-57.

- [3] Cobbett F D, Van Heyst B J. Measurements of GEM fluxes and atmospheric mercury concentrations (GEM, RGM and Hg^{p}) from an agricultural field amended with biosolids in Southern Ont., Canada (October 2004-November 2004) [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(11): 2270-2282.
- [4] Poissant L, Pilote M, Beauvais C, *et al.* A year of continuous measurements of three atmospheric mercury species (GEM, RGM and Hg^{p}) in southern Québec, Canada [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(7): 1275-1287.
- [5] Valente R J, Shea C, Humes K L, *et al.* Atmospheric mercury in the Great Smoky Mountains compared to regional and global levels [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(9): 1861-1873.
- [6] Bergan T, Gallardo L, Rodhe H. Mercury in the global troposphere: A three-dimensional model study [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(10): 1575-1585.
- [7] Smith W H. Air pollution and forests: Interactions between air contaminants and forest ecosystems [M]. New York: Springer-Verlag, 1981. 128-134.
- [8] Fleck J A, Grigal D F, Nater E A. Mercury uptake by trees: An observational experiment [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, **115**(1-4): 513-525.
- [9] 刘荣相, 张朝辉. 贵州东南部喀斯特汞矿带苔藓植物及其重金属富集特征[J]. *中国岩溶*, 2010, **29**(1): 41-47.
- [10] 窦红颖, 王书肖, 王龙, 等. 长三角背景地区秋冬季大气气态总汞含量特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 1-7.
- [11] Fu X W, Feng X, Dong Z Q, *et al.* Atmospheric gaseous elemental mercury (GEM) concentrations and mercury depositions at a high-altitude mountain peak in south China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(5): 2425-2437.
- [12] 丁振华, 吴浩, 刘洋, 等. 中国主要红树林湿地中甲基汞的分布特征及影响因素初探[J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1702-1707.
- [13] 万奇, 冯新斌, 郑伟, 等. 长白山地区大气气态总汞含量的季节性特征研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 296-299.
- [14] 刘玉成, 钟章成, 缪世利, 等. 缙云山森林植被类型初步调查[J]. *西南师范学院学报(自然科学版)*, 1984, **9**(5): 117-128.

- [15] Wang D Y, He L, Shi X Y, *et al.* Release flux of mercury from different environmental surfaces in Chongqing, China [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(11): 1845-1854.
- [16] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 等. 夏季红枫湖地区农田土壤-大气界面汞交换通量的初步研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, **23**(1): 19-23.
- [17] 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.
- [18] Lindberg S E, Southworth G, Prestbo E M, *et al.* Gaseous methyl-and inorganic mercury in landfill gas from landfills in Florida, Minnesota, Delaware, and California [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(2): 249-258.
- [19] 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.
- [20] Schroeder W H, Munthe J. Atmospheric mercury-an overview [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(5): 809-822.
- [21] Xiao Z F, Munthe J, Schroeder W H, *et al.* Vertical fluxes of volatile mercury over forest soil and lake surfaces in Sweden [J]. *Tellus B*, 1991, **43**(3): 267-279.
- [22] Ferrara R, Maserti B E, Andersson M, *et al.* Mercury degassing rate from mineralized areas in the Mediterranean Basin [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, **93**(1-4): 59-66.
- [23] Choi H D, Holsen T M. Gaseous mercury fluxes from the forest floor of the Adirondacks [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(2): 592-600.
- [24] 方凤满, 王起超, 尹金虎. 城市地表汞含量及释放通量影响因素分析[J]. *生态环境*, 2003, **12**(3): 260-262.
- [25] 张成, 何磊, 王定勇, 等. 重庆几种地表类型土/气界面汞交换通量[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(8): 1085-1090.
- [26] Wang S F, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Characteristics of mercury exchange flux between soil and air in the heavily air-polluted area, eastern Guizhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(27): 5584-5594.
- [27] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州红枫湖地区冷暖两季土壤/大气界面间汞交换通量的对比[J]. *环境科学*, 2004, **25**(1): 123-127.
- [28] 林陶, 张成, 石孝均, 等. 不同类型紫色土土/气界面汞释放通量及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 1955-1960.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jun-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《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1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 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