

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥化中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

重庆缙云山4种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素

杨光¹, 孙涛¹, 安思危¹, 马明^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 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; 3. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 为了揭示不同植被覆盖下土壤/大气界面汞释放通量及其交换特征, 在缙云山国家级自然保护区内选择4种典型植被覆盖类型(常绿阔叶林、楠竹林、灌木林以及草地)为研究对象, 连续同步监测不同植被覆盖下土/气界面汞释放通量, 同时考察各环境因子对土壤释汞的影响。结果表明, 缙云山在4种不同植被覆盖下土壤汞释放通量具有明显的差异, 总体表现为楠竹林[$17.77 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > 草地[$17.58 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > 灌木林[$16.87 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > 常绿阔叶林[$14.32 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; 不同植被覆盖下土壤释汞通量在季节变化上呈现相似的规律性, 但不同植被覆盖类型之间也存在明显差异, 主要体现在暖季汞释放通量高于冷季; 缙云山地区不同林植被覆盖下土壤释汞通量存在明显的日变化; 气象因素光照强度、气温、土温和相对湿度, 对土/气界面汞释放通量影响也不相同, 气温为常绿阔叶林、灌木林与楠竹林的主要影响因子, 光照强度为草地的主要影响因子。

关键词: 植被覆盖; 汞; 缙云山; 释放通量; 环境因子

中图分类号: X131.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4774-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704007

Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing

YANG Guang¹, SUN Tao¹, AN Si-wei¹, MA Ming^{1,2*}

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

Abstract: In order to reveal the characteristics of mercury release flux and exchange across the soil/atmosphere interface under different vegetation cover types, four of these types (evergreen broad-leaved forest, bamboo forest, shrub, and grassland) were chosen as research samples at Jinyun Mountain National Nature Reserve, Chongqing. Continuous monitoring of the different vegetation covers, soil/atmosphere interface, and mercury release flux was conducted, at the same time as the effects of environmental factors were also considered. Results show that the annual average Hg emission flux for the four kinds of forest cover have obvious differences. The overall emission performance of Hg is ranked as: bamboo forest [$17.77 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > grassland [$17.58 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > shrubbery [$16.87 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > evergreen broad-leaved forest [$14.32 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]. There are obviously seasonal differences between Hg emission and the four kinds of forested stands in Jinyun mountain and there are significant differences among the different forests. These differences mainly reflect that emissions in the warm season are higher than in the cold season. There is also an obvious diurnal variation of soil mercury release flux from different forested stands in Jinyun Mountain. Meteorological factors of light intensity, air temperature, soil temperature, and relative humidity also effects the soil/air interface meaning that mercury flux is not the same across land cover types. Temperature is the main factor affecting evergreen broad-leaved forest, shrub forests, and bamboo forests. Light intensity is the main influencing factor for grasslands.

Key words: vegetation cover; mercury; Jinyun mountain; released flux; environmental factors

汞是一种剧毒的重金属^[1], 汞可以通过直接接触被人体吸收, 或者通过食物链, 经过一系列生物富集间接进入人体, 对人类构成危害。气态的元素汞可以在大气中驻留长达一年时间^[2,3], 通过大气循环形成距离迁移, 从而可以造成全球范围内的汞污染^[4,5]。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

收稿日期: 2017-04-01; 修订日期: 2017-06-08

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)

作者简介: 杨光(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 815159836@qq.com

* 通信作者, E-mail: maming8312@163.com

汞又可以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^[6]。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^[7~10],但有关某一气候带控制下不同植被覆盖条件下土壤-大气界面汞交换通量的研究并不多。本文主要分析亚热带 4 种不同植被覆盖下土壤-大气的汞交换通量,从而了解该区域不同植被对大气汞的拦截作用以及释汞通量的大小,以期为准评价总汞和甲基汞的通量变化对环境汞的贡献作用提供依据,也为制定正确的汞排放标准提供参考,并对汞的环境风险预测等有非常重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

为考虑森林生态系统的典型性、代表性,本研究选取缙云山自然保护区,缙云山位于重庆市北碚区(E106°17'43"~106°24'50",N29°41'08"~29°52'03"),具典型的亚热带季风湿润性气候特征,水平地带为典型的中亚热带常绿阔叶林生物气候带。林中植物种类复杂,植被保存良好,森林覆盖率为 96.6%,是长江流域保存较好的典型的中亚热带常绿阔叶林景观和相对稳定的生态系统,可以一定程度上反映出中亚热带森林生态系统的天然本底。采样点年平均温度为 18.1℃,年平均湿度 68.67%,年平均降水量 1 611.8 mm,年平均蒸发量 777.1 mm,月平均蒸发量 64.7 mm。为准确判断该区域土壤/大气界面释汞通量,选择中亚热带最典型 4 种植被,分别为常绿阔叶林、楠竹林、灌木林以及草地,它们处于较为相似的整体环境。

1.2 试验方法及设计

本文应用动力通量箱(图 1)与 RA-915⁺ 汞分析仪联用技术,采样的时间为 2012-04~2013-01。每季度在 4 种不同植被监测点进行一次采样。采样同步监测不同植被覆盖下土/气界面汞释放通量以及大气汞含量,每 5 min 更换一次测定对象,并同时测定一次气象数据,每 15 min 完成一次轮替。每次监测时长为 24 h,连续监测 48 h。通量箱采用厚度为 5 mm 的透明石英玻璃制作,几何尺寸为 $\Phi 20$ cm $\times$ 40 cm,底面积为 $S = \Phi 20$ cm $\times$ 40 cm = 0.08 m²,体积 $V = 0.5 \times 3.14 \times (0.1)^2 \times 0.4 = 0.00628$ m³。安置通

量箱时,选取正常枯落物覆盖下土壤,使凹槽面扣于土壤之上,四周用监测点附近土壤略微密封。开始测定之前,出气口先连接新装干燥管,再用吸附性低的聚四氟乙烯管连接 RA-915⁺ 汞分析仪,另一端 3 个进气口与大气相连。

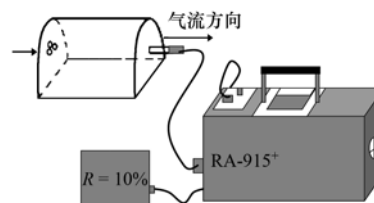


图 1 动力通量箱安置示意

Fig. 1 Schematic of the dynamic flux chamber

采样时空气通过进口端的进气孔被泵抽入通量箱内,然后由出口端进入汞分析仪检测,通量箱工作采样透视图如图 2 所示:采样流量为 20 L·min⁻¹,检测频率 1 Hz,每次连续采样时间为 10~20 min,通量箱内、外每 5 min 交替采一次。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)浓度($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$); c_0 为通量箱内壁释放或吸附的汞浓度($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$),即空白值; Q 为采样流量($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$); A 为通量箱的底面积(m^2); F 为气/土界面间的交换通量[$\text{ng}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]。可为正值,也可负值;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。

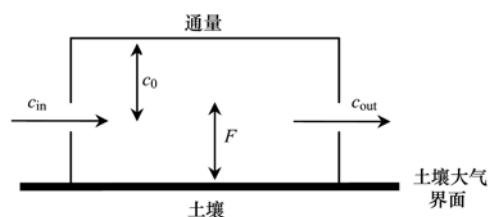


图 2 土/气界面间汞交换示意

Fig. 2 Schematic diagram of the exchange of mercury across the soil/air interface

1.3 空白测定

通量箱在每次使用前,先浸泡于浓度为 0.1 mol·L⁻¹ HNO₃ 中至少 24 h,后用大量自来水冲洗,接着用去离子水冲洗,洗净后用吹风机吹干。空白值在实验室内测定,将箱体带槽的底盖盖上并密封,分别测量通量箱进气口和出气口的汞浓度,各自进行一段时间采样,所得出气口和进气口汞浓度差值为封闭的通量箱的空白值。RA-915⁺ 多功能汞分析

仪的校准由仪器自检程序进行,测量时相对偏差小于 5%.

1.4 大气参数的测定

大气汞浓度用 Lumex® RA-915+ 多功能汞分析仪(俄罗斯 Lumex 公司产品)现场测定;光照强度使用 TES 数位式照度计(台北泰仕公司产品)测定;土壤温度使用 DeltaTRAK® 便携式温度计测定;大气压、空气湿度、风速和气温使用 Kestrel® 4000 微型气象跟踪仪(美国 Nielsen-Kellerman 公司产品)测定.

2 结果与讨论

2.1 植被土/气界面汞交换量

由表 1 及图 3 可知,缙云山 4 种不同植被覆盖下全年土/气界面汞交换量平均值从高到低依次为分别为楠竹林[$17.77 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]、草地[$17.58 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]、灌木林[$16.87 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]、常绿阔叶林[$14.32 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],4 种植被类型在夏季均出现最高汞通量值,冬季达最低释放量.汞释放通量总体表现出夏高冬低.

表 1 4 种植被汞通量状况

Table 1 Statistical summary of the surface flux for the four vegetation types

植被	季节	林地汞通量/ $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$					<i>n</i>
		平均值	中位数	最大值	最小值	标准差	
常绿阔叶林	全年	14.32	11.51	49.05	-3.29	10.89	1 156
灌木林	全年	16.87	13.54	67.52	-4.34	13.22	1 156
草地	全年	17.58	22.28	79.69	-3.65	20.3	1 156
楠竹林	全年	17.77	14.81	58.34	-3.88	14.19	1 156

表 2 列举了国内外相关林地汞释放通量情况,相较于其他地区土/气界面的释汞量,总体而言,本研究的 4 种不同植被覆盖下土壤汞释放量均高于未受污染的原始森林等地区.例如长白山温带森林土壤^[11]、亚马逊流域原始森林^[12]、朗多尼亚森林土壤^[13]、美国阿迪朗达克温带森林土壤^[14]等,这可能是因为:第一,重庆地处西南汞矿区,水泥生产、金属冶炼与加工、燃煤等人为影响所排放大量汞后再沉降造成该地区土壤环境中的汞含量较高;第二,则是由于重庆特殊的地理“山区”地势环境和“雾

都”气候特征,使大气中的汞难以迁移扩散,并因高山阻拦,通过一系列干湿沉降再次汇集森林土壤,该部分汞也更易释放;第三则研究区地处中亚热带气候,温度常年处于较高水平而引起较强土壤表层 Hg^{2+} 光致还原,除此之外较高的土壤环境中的汞浓度也加剧了汞的再释放^[15-17].但相较于城市和汞污染区,如贵阳汞矿区^[18]、贵阳市草地^[19]等,则汞释放量低一些,可能是由于城市中人为生产生活活动,如汽车尾气的污染排放,汞矿区的汞污染等造成.同时本研究结果通过与马明等对缙云山亚热带

表 2 土壤/大气界面汞交换通量的比较

Table 2 Mercury emission fluxes from the soil/air interface reported in the literature

采样点	土壤类型	汞通量/ $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	文献
全球	自然汞排放	0.7 ~ 1.1	[12]
瑞典	森林土壤	-1.30 ~ 1.40	[2]
美国阿迪朗达克	温带森林土壤	-2.5 ~ 27.2	[14]
亚马逊流域	原始森林土壤	0.5 ~ 2	[12]
意大利	森林土壤	-0.5 ~ 6	[22]
朗多尼亚	森林土壤	0.8 ± 0.2	[13]
易北河	洪泛区	30.97 ± 30.77	[23]
贵阳	汞矿区	33 ~ 3 638	[18]
缙云山	亚热带森林土壤	14.23 ± 6.46	[20]
重庆四面山	林地(夏季)	7.7 ± 3.9	[17]
长春市朝阳公园	有草土壤	12.4	[24]
贵阳市	草地	(718 ± 1 517) ~ (4 115 ± 1 512)	[19]
长白山	温带森林土壤	4.4 ± 28.74	[11]
缙云山	针阔混交林	14.32 ± 10.89	本研究
缙云山	灌木林	16.87 ± 13.22	本研究
缙云山	草地	17.58 ± 20.30	本研究
缙云山	楠竹林	17.77 ± 14.19	本研究

森林土壤的汞释放通量的比较^[20],表明重庆缙云山常绿阔叶林与之研究结论相似,而其他 3 种植被均高于常绿阔叶林土/气界面汞平均释放通量,但也明显低于污染区和城市土/气界面汞释放量^[21].

2.2 4 种植被土/气界面汞交换的时间变化特征

2.2.1 植被土/气界面汞交换的季节变化特征

4 种植被汞通量季节变化趋势与光照和气温的

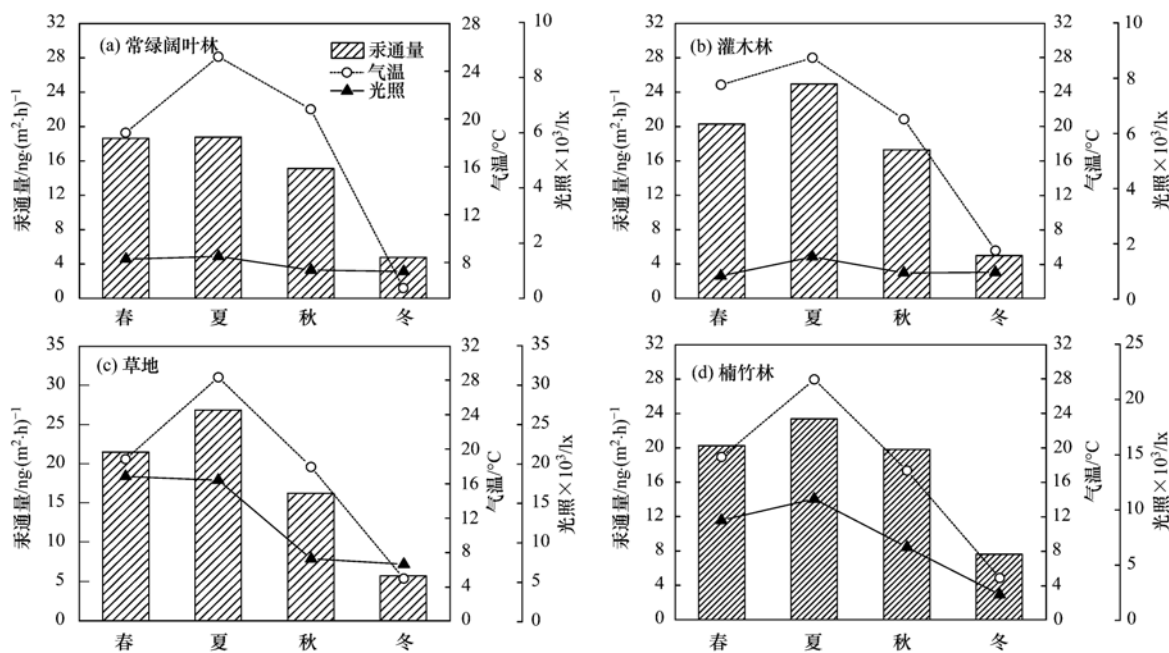


图 3 四季光照强度和气温对 4 种植被汞通量的影响

Fig. 3 Effect of air temperature and solar radiation on Hg emission flux during four seasons for four kinds of vegetation types

可能的原因有:第一,夏季较高温度(平均气温 24.3℃,平均土温 23.96℃),强烈光照(平均光照强度 $8.00 \times 10^3 \text{ lx}$)可引起较强光致还原反应,土壤所蓄积的汞释放增高,加之土壤本身汞的释放,从而表现出较高释汞通量^[25,26];12 月至次年 2 月冬季缙云山达最低温度(平均气温 5.34℃,平均土温 5.70℃),光照强度处在全年最弱(平均光照强度 $2.89 \times 10^3 \text{ lx}$), Hg^{2+} 还原作用减弱并伴随较强汞沉降,土/气界面汞交换通量此时最小,且冬季林地土壤中对大气汞的蓄积现象明显高于其它三季;第二,高温以及高光照强度致使土温上升,土壤微生物活性增强,汞还原能力加强, Hg^{2+} 更多地通过光致还原作用转化为 Hg^0 后释放进入大气;第三,3 月天气开始回暖,初春季节林冠层较低的郁闭度和较强的光致还原反应,是造成春季土壤汞的平均释放量 $[20.16 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ 均高于秋冬两季的平均释放量 $[11.45 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ 的主要原因。

经过单因素显著性分析发现,在春季,4 种植被覆盖下汞交换通量无显著性差异($P > 0.10$),夏季,

变化关系如图 3 所示.通过观察其季节变化趋势特征均发现:①夏季土壤达到最高释汞水平;②冬季达到最低释汞水平;③4 种植被均呈现出相同的变化规律;④四季植被土壤总体表现为向大气释汞,在温度较低的个别时间段发生汞沉降高于释放的负值现象;⑤汞释放通量与气温、光照强度在季节上呈现相似变化规律,表现出良好的一致性。

针阔混交林与草地覆盖下汞交换通量有明显差异($P < 0.05$),其它植被覆盖下无显著差异($P > 0.10$),秋季,4 种植被覆盖下土壤汞交换通量无显著差异($P > 0.10$),冬季,针阔混交林与楠竹林,楠竹林与灌木林覆盖下的土壤汞通量均存在明显差异($P < 0.05$).除此之外,4 种汞通量在冷暖两季间均表现出了显著差异($P < 0.01$),从而进一步说明 4 种林分土壤汞释放通量在季节变化上存在明显的差异性分布。

在 4 种植被汞通量的对比中,夏季草地表现出最高汞释放通量 $[26.85 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$,主要是因为草地土壤植被覆盖程度较低,土壤更为直接暴露于光照下, Hg^{2+} 易于还原成可挥发性的 Hg^0 并被土壤间隙空气膨胀释放.其他植被由于土壤受植被遮盖,丰富的林冠层减弱了阳光直接透射于土壤所导致的光致还原、生物还原等作用,使 Hg^0 形成与释放速率减缓.冬季常绿阔叶林下土壤表层覆盖有一定厚度的枯枝落叶,当土壤释汞,很可能被枯枝落叶直接吸收或与枯枝落叶腐烂后形成的腐殖质形成络

合物而固定,从而阻止汞的释放,使冬季常绿阔叶林土/气界面达到最低汞释放通量. 冬季楠竹林的土壤释汞量为最高,这与该植被枯落物分解和楠竹对土壤呼吸的促进作用密切相关.

2.2.2 植被土/气界面汞交换的日变化特征

4 种不同植被在四季中汞释放通量日变化如图 4 所示. 从中可以看出:①4 种不同植被汞交换通量均在日出后开始急剧增加,中午(12:00~14:00)出现最大值,深夜至日出前(22:00~03:00)出现最小值;②4 种植被白天的汞交换通量均高于夜间;

③四季不同植被在一天中均主要表现为土壤释汞,仅冬季的个别时间发生了汞沉降而出现负值;④春夏秋三季午后草地释汞释放通量达 4 种植被中最高值,春秋季节凌晨最低释放量为草地,夏季凌晨楠竹林为最低;⑤冬季上午 06:00~12:00 楠竹林达到 4 种植被中最高释放通量值 [$28.70 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],凌晨 24:00 左右 4 种植被释放通量均为最低,并且释放量相近. 由此发现,四季一天中土/气界面汞释放通量均与光照强度、温度等气象因素密切相关,并且与植被种类有直接关系.

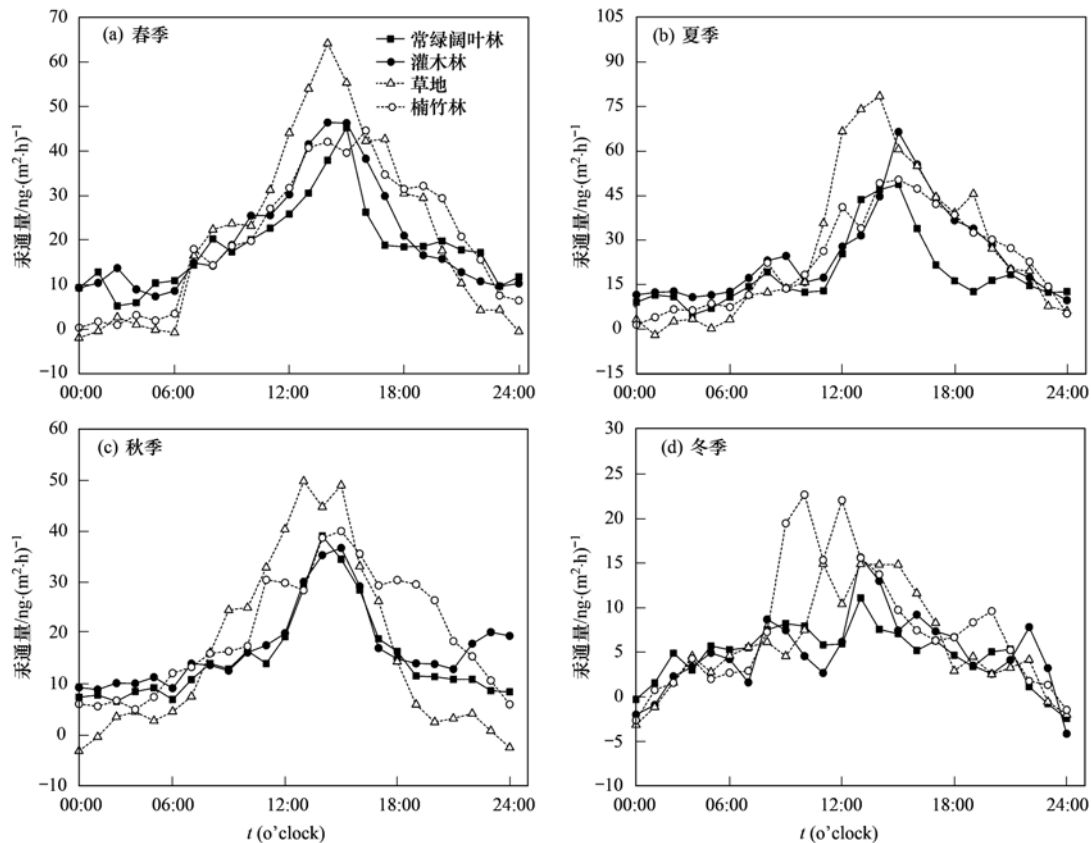


图 4 四季中 4 种植被汞通量日变化对比

Fig. 4 Comparison of daily variation of Hg emission flux during four seasons in four kind of vegetation types

通过比较发现,在春夏两季中均为草地最先出现释放量的急剧增加,并且在 12:00~13:00 时出现最高汞释放通量,其他 3 种植被释放量随后达最高且通量接近,并且呈现出相同的增加趋势;下午则同样为草地出现较快释放量减弱现象直到凌晨时段;春季楠竹林和草地以及夏季草地出现释放量负值. 这主要是因为光照的滞后性,当光照出现一段时间后,周围温度才逐渐上升,光致还原和土壤中微生物活性的增强,汞释放量开始增高,而覆盖物同时影响着气象因子的增加,草地覆盖物少所以光照滞后性不明显;冬季楠竹林枯落物大量分解,并且由于其枯落物降解速度快,使竹叶中汞释放进入大气,

分解的竹叶又可促进土壤呼吸,再者,楠竹林林冠层郁闭度小(冬季 68%),白天太阳辐射透过林冠层多,使得林内温度和土壤温度增加较快,使之在 08:00~12:00 出现最大释放通量. 当日落后,温度成为汞释放量大小的决定因素,覆盖少的土壤由于缺少植被对汞沉降的拦截和枯落物的保温而出现释放量负值. 秋季草地植被凋谢,覆盖物趋近于零,直接致使中午出现最高释放量而夜间出现最低负值.

2.3 植被土/气界面汞交换的影响因素

2.3.1 影响因子概述

光照对土气界面汞交换的较强影响^[27,28],而光致还原作用是土壤挥发性 Hg^0 形成的最主要途径.

这主要是因为光照起到一定催化剂作用,降低了土壤中离子态汞转化为气态 Hg^0 的活化能,加快了反应进程. 同时,光照增加导致气温和土温随之升高,微生物活性从而间接受光照影响而提高,使土壤中的 Hg^{2+} 更易于还原成 Hg^0 从而释放.

温度是驱动沉积物中的 Hg^0 向大气释放的重要环境因素,温度与汞释放通量的正相关关系反映出光照强度与汞释放通量的正相关关系. 当大气温度上升时,致使土壤表层、枯落物等周围温度升高,而较高的温度有利于土壤中 Hg^0 的释放以及土壤中微生物活性.

由光照所引起的土壤升温对产生 Hg^0 的挥发也有很大的影响. 土壤的温度升高会加速土壤中产生气态单质汞 (Hg^0) 的反应速率,膨胀土壤孔隙中气体对汞的吸附能力也在逐渐减弱,最终促使土壤中汞向大气释放;再者土壤温度的变化直接影响着土壤中光致还原菌的活性,较高的土壤温度以及光照强度下,土壤中 Hg^{2+} 通过微生物的作用向 Hg^0 转化,进而从土壤中释放. 除此之外,对于土壤汞浓度

这一影响因子,本文没有提到,因为研究区非高汞区,汞含量对释放通量影响较小^[29],且本研究主要针对的 4 种植被在同一地区,土壤汞含量差异较小.

2.3.2 主成分分析

为了解影响 4 种不同植被土气界面汞释放通量影响因素,对所有数据进行主成分分析,并依照公因子方差值确定主成分.

根据表 3 结果显示,常绿阔叶林具有两种主要成分,第一主成分是以气温、土温、相对湿度、光照强度为主,方差贡献率为 67.260%,其中气温贡献率最高. 第二主成分方差贡献率较小,且以光照强度为主;灌木林同样具有两种主成分,第一主成分是以土温、相对湿度、气温、光照强度为主,方差贡献率为 57.374%,其中以土温贡献率最高. 第二主成分方差贡献率较小,且以光照强度为主;草地和楠竹林均只有一种主成分,分别以气温、相对湿度、土温、光照强度和气温、土温、光照强度、相对湿度为主,方差贡献率分别为 72.846% 和 68.878%. 结果表明,常绿阔叶林和灌木林这两种覆盖度

表 3 影响因子的主成分分析结果

Table 3 Principal factor analysis for the influencing factors of mercury emission fluxes from the air/soil interface

植被类型	主成分	特征根	方差贡献率 /%	累积贡献率 /%	气温	土温	光照强度	相对湿度
常绿阔叶林	1	3.363	67.260	67.260	0.913	0.831	0.611	-0.860
常绿阔叶林	2	1.011	20.212	87.472	0.352	0.519	-0.741	0.235
灌木林	1	2.869	57.374	57.374	0.837	0.935	0.706	-0.850
灌木林	2	1.618	32.358	89.732	0.443	0.220	-0.657	0.415
草地	1	3.642	72.846	72.846	0.907	0.878	0.720	-0.899
楠竹林	1	3.444	68.878	68.878	0.886	0.878	0.778	-0.743

表 4 影响土/气界面汞交换诸影响因子通径分析结果

Table 4 Pathway analysis outcomes for the influencing factors of mercury emission fluxes from the air/soil interface

项目	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
常绿阔叶林	X_1	0.842 1		-0.305 7	0.075 9	0.088 1
	X_2	-0.324 2	0.794 1		0.036 8	0.077 9
	X_3	0.225 9	0.283 0	-0.052 8		0.083 6
	X_4	-0.132 4	-0.560 6	0.190 6	-0.142 7	
灌木林	X_1	0.636 2		-0.107 4	0.074 5	0.148 4
	X_2	-0.111 4	0.613 1		0.043 2	0.141 1
	X_3	0.264 8	0.179 0	-0.018 2		0.096 2
	X_4	-0.178 3	-0.529 5	0.088 2	-0.142 9	
草地	X_1	-0.357 23		0.584 144	0.255 734	0.101 844
	X_2	0.593 7	-0.351 5		0.209 7	0.097 8
	X_3	0.675 5	-0.135 2	0.184 3		0.072 0
	X_4	-0.126 1	0.288 5	-0.460 3	-0.385 5	
楠竹林	X_1	0.596 5		-0.246 3	0.208 2	0.050 7
	X_2	-0.250 9	0.585 5		0.201 8	0.053 4
	X_3	0.455 9	0.272 4	-0.111 1		0.065 6
	X_4	-0.104 7	-0.289 0	0.127 9	-0.285 6	

1) X_1 表示气温; X_2 表示土温; X_3 表示光照强度; X_4 表示相对湿度

高的植被,以温度影响为主,原因可能是因为郁闭度高,遮挡阳光.综上所述,以温度为主导的影响度高于光照强度所带来的直接影响,说明植被覆盖对释放量存在较为明显的影响.

2.3.3 通径分析

从表4中可以看出,对于常绿阔叶林而言,气温其直接作用系数最高(84.21%),其次为土温,并且土壤温度主要是受气温影响的,可以说明在常绿阔叶林这种郁闭度高的植被,光照被有效拦截,而气温成为主导因素;灌木林同样也是气温其直接作用系数最高(63.62%),略低于常绿阔叶林,其次为光照强度,因为灌木林对阳光遮挡程度小于常绿阔叶林,因此光照强度的直接作用有所上升;楠竹林的气温对汞释放通量直接作用系数最高(59.65%),其后为光照强度,楠竹林植被覆盖程度更小于常绿阔叶林,因此导致气温影响作用下降而光照强度影响上升,并且因为覆盖枯落物等因素,气温对土壤温度仍起较大作用;针对草地,覆盖小,枯落物少致使光照强度为最高直接影响汞释放通量因素(67.55%),之后为土壤温度.综上所述,不同植被覆盖下,对周围环境因素产生不同影响,从而决定土壤释汞通量的高低.相对湿度对土壤汞释放通量的影响主要是由它与光照强度、气温、土温等的显著相关性所引起,因此相对湿度对汞交换通量的影响无实际意义.

3 结论

(1)缙云山不同植被覆盖下年平均土/气界面汞释放通量分别为常绿阔叶林 $[(14.32 \pm 10.89) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$,灌木林 $[(16.87 \pm 13.22) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$,草地 $[(17.58 \pm 20.30) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$,楠竹林 $[(17.77 \pm 14.19) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$,均明显高于自然背景区汞通量值,并且不同林地土壤与大气间的汞交换通量均呈现出双向性,但总体表现以土壤汞释放为主.缙云山地区不同植被覆盖下土壤释汞通量存在明显的季节性差异,主要体现出暖季汞释放通量高于冷季.

(2)缙云山地区不同植被覆盖下土壤释汞通量存在明显的日变化,主要体现在日出后,光照强度增加,周围环境温度随之上升,汞释放通量同时随之快速升高,到达午后(12:00~15:00)最高释放量后,伴随光照强度的减弱,释放量缓慢降低至凌晨时段的最低释放量.4种植被覆盖下释汞量日变化的变异系数平均为草地(115.4%)>楠竹林(79.8%)>灌木林(78.4%)>常绿阔叶林(76.1%).

(3)不同气象因素对土/气界面汞释放通量影响也不相同,本文所涉及的气象因素有光照强度、气温、土温和相对湿度,结果表明光照强度、气温和土温与汞释放通量呈正相关关系,相对湿度与汞释放通量呈负相关关系,气温为常绿阔叶林、灌木林与楠竹林的主要影响因子,光照强度为草地的主要影响因子.

参考文献:

- [1] Rice K M, Walker Jr E M, Wu M Z, *et al.* Environmental mercury and its toxic effects[J]. *Journal of Preventive Medicine & Public Health*, 2014, **47**(2): 74-83.
- [2] 冯新斌,陈玖斌,付学吾,等.汞的环境地球化学研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, **32**(5): 503-530.
Feng X B, Cheng J B, Fu X W, *et al.* Progresses on environmental geochemistry of mercury [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, **32**(5): 503-530.
- [3] Cobbett F D, Van Heyst B J. Measurements of GEM fluxes and atmospheric mercury concentrations (GEM, RGM and Hg^0) 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^0) in southern Québec, Canada [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(7): 1275-1287.
- [5] Fu X W, Feng X B, Zhu W Z, *et al.* Elevated atmospheric deposition and dynamics of mercury in a remote upland forest of southwestern China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(6): 2324-2333.
- [6] 冯新斌,王训,林哲仁,等.亚热带与温带森林小流域生态系统汞的生物地球化学循环及其同位素分馏[J]. *环境化学*, 2015, **34**(2): 203-211.
Feng X B, Wang X, Lin Z R, *et al.* Biogeochemical cycling and isotopic fractionation of mercury in subtropical and temperate forest ecosystem [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(2): 203-211.
- [7] 窦红颖,王书肖,王龙,等.长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 1-7.
Dou H Y, Wang S X, Wang L, *et al.* Characteristics of total gaseous mercury concentrations at a rural site of Yangtze Delta, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 1-7.
- [8] 雷育涛,刘明,陈来国,等.海南五指山大气气态总汞含量变化特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 817-823.
Lei Y T, Liu M, Chen G L, *et al.* Variation characteristics of total gaseous mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) background station in Hainan [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 817-823.
- [9] Ferrari C P, Gauchard P A, Aspö K, *et al.* Snow-to-air exchanges of mercury in an arctic seasonal snow pack in Ny-Ålesund, Svalbard [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(39): 7633-7645.
- [10] 邓晗,张翔,张成,等.三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 987-992.
Deng H, Zhang X, Zhang C, *et al.* Release characteristics of

- mercury from submersed typical herbaceous plants in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 987-992.
- [11] 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.
Wan Q, Feng X B, Zheng W, *et al.* Seasonal variation of total gaseous mercury in Changbai Mountain area[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(2): 296-299.
- [12] Artaxo P, De Campos R C, Fernandes E T, *et al.* Large scale mercury and trace element measurements in the Amazon basin [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(24): 4085-4096.
- [13] Almeida M D, Marins R V, Paraquetti H H M, *et al.* Mercury degassing from forested and open field soils in Rondônia, Western Amazon, Brazil[J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(1): 60-66.
- [14] Choi H D, Holsen T M. Gaseous mercury fluxes from the forest floor of the adirondacks[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(2): 592-600.
- [15] 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.
- [16] Zhu W, Lin C J, Wang X, *et al.* Global observations and modeling of atmosphere-surface exchange of elemental mercury: a critical review[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(7): 4451-4480.
- [17] 刘伟明, 马明, 王定勇, 等. 中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1639-1645.
Liu W M, Ma M, Wang D Y, *et al.* Variation characteristics of total gaseous mercury at Simian Mountain background station in mid-subtropical region [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1639-1645.
- [18] Wang S F, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Mercury concentrations and air/soil fluxes in Wuchuan mercury mining district, Guizhou province, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(28): 5984-5993.
- [19] 付学吾, 冯新斌, 王少锋, 等. 贵阳市 2 种不同类型草地的汞释放通量[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(6): 33-37.
Fu X W, Feng X B, Wang S F, *et al.* Mercury flux rate of two types of grasslands in Guiyang[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(6): 33-37.
- [20] 马明, 王定勇, 申源源, 等. 中亚热带针阔混交林土壤-大气界面汞通量研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 85-92.
- Ma M, Wang D Y, Shen Y Y, *et al.* Mercury fluxes from conifer-broadleaf forested field in central subtropical forest zone [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 85-92.
- [21] 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.
- [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] Rinklebe J, During A, Overesch M, *et al.* Dynamics of mercury fluxes and their controlling factors in large Hg-polluted floodplain areas [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(1): 308-318.
- [24] 方凤满, 王起超. 城市地表汞释放通量时空特征分析[J]. *环境化学*, 2004, **23**(1): 109-110.
- [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] 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.
Zhang C, He L, Wang D Y, *et al.* Soil/air interface mercury exchange fluxes of several ground surface in Chongqing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(8): 1085-1090.
- [27] Gustin M S, Lindberg S E, Austin K, *et al.* Assessing the contribution of natural sources to regional atmospheric mercury budgets[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **259**(1-3): 61-71.
- [28] 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.
Wang S F, Feng X B, Chou G L, *et al.* Comparison of air/soil mercury exchange between warm and cold season in Hongfeng Reservoir Region [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(1): 123-127.
- [29] 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.
Lin T, Zhang C, Shi X J, *et al.* Mercury fluxes released at soil/air interfaces in different Purple-Udic Cambosols and the effects of environmental factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(10): 1955-1960.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)