

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

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

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究

王琼¹, 罗遥², 杜宝玉², 叶芝祥¹, 段雷^{2*}

(1. 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; 2. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 对位于重庆铁山坪的马尾松林下的山地黄壤进行表层土壤(0~5 cm)的原状采集,并在实验室中进行控制实验,利用通量箱法测量原状土块表面的汞释放通量,以研究环境因子对土壤汞释放量的影响。结果表明,土壤汞释放量与辐射强度呈显著的正相关,在相同的空气温度和土壤含水量等条件下,土壤汞释放量在光下是遮阳条件下的3~9倍。不过,由于林下土壤常处于背阴状态,可能遮阳条件更能代表白天林下土壤汞的排放情况。土壤汞释放量存在明显的季节变化,夏季>春秋>冬季,空气温度与土壤汞释放呈正相关。在低温下土壤汞释放量很低,土壤含水量影响较弱,而在高温时土壤含水量增加能明显促进土壤汞释放。枯落物的移除会显著降低土壤汞释放通量,主要原因可能是枯落物的汞含量较高并易于还原。土壤汞释放量在一天内也存在明显的衰减趋势,表明土壤表层的汞含量可能是森林土壤汞释放的重要限制因素。本研究测得森林土壤汞释放通量(白天)为:夏季(14.3 ± 19.6) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 、春秋季(3.50 ± 5.36) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 、冬季(1.48 ± 3.27) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,以上稳态测试结果可能高估了实际的汞排放量。

关键词: 汞; 自然源; 土壤; 释放通量; 影响因子

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1922-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.05.041

Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing

WANG Qiong¹, LUO Yao², DU Bao-yu², YE Zhi-xiang¹, DUAN Lei²

(1. 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; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To study the effect of environmental influencing factors on soil mercury emissions, intact surface soil samples (0 to 5 cm) were collected from a Masson pine forest in Tieshanping, Chongqing to conduct controlled experiments, and soil mercury emission flux was measured by dynamic flux chambers under different conditions. The results showed that the mercury emission significantly increased with the enhancement of solar radiation, air temperature, and soil water content. The mercury emissions in sunlight were 3 to 9 times higher than those in shade, but the latter condition should be more similar to the actual condition in the field. The mercury emission flux was significantly higher in summer than in spring and autumn, and was the lowest in winter. Higher in air temperature, soil water content had a stronger effect on soil mercury emission. Removal of litterfall significantly decreased soil mercury emission, mainly because the mercury content of litterfall was higher than that in mineral soil layer. In addition, soil mercury emission had an obvious trend of decay during a day, indicating that relatively low mercury content in forest soil might be a limiting factor of mercury emission. The mercury emission flux in the daytime measured in this study was (14.3 ± 19.6) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ in summer, (3.50 ± 5.36) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ in spring and autumn, and (1.48 ± 3.27) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ in winter. The steady-state results above might therefore be overestimation of the actual emission in the field.

Key words: mercury; natural source; soil; emission flux; impact factor

汞是一种具有长程越境传输性质的全球性污染物,被各国政府和国际卫生组织定义为环境中最有害的重金属元素之一,即将签署的国际汞公约(《水俣公约》)将对其使用和排放进行控制^[1~3]。大气汞的排放源分为人为源和自然源,据估计,在全球范围内自然源(包括人为源排放的汞沉降到土壤和水体后的再释放或者二次排放)释放量为 $5\,207\text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,高于人为源的 $2\,320\text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[4]。土壤的汞释放是重要的自然源之一,近年来国际上相关研究较多,发现其受

多种因素的影响,包括土壤性质(pH值、含汞量和有机质含量等)和环境条件(主要有太阳辐照、空气温度和土壤含水量等)^[5~9]。

相对于国外,我国的相关研究还比较缺乏,多数研究集中在汞污染较为严重的矿区和农田,对森林

收稿日期: 2013-09-16; 修订日期: 2013-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(20937002)

作者简介: 王琼(1988~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制, E-mail: qiongwang1222@163.com

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

土壤的研究则很少^[9~14]。与受污染场地相比,森林土壤的汞释放具有分布范围广但通量密度低的特点,影响因素可能更复杂,结果的不确定性更高。本研究通过实验室控制实验,分析辐照强度、土壤含水量和空气温度等环境条件以及枯落物等其他因素对森林土壤汞释放通量的影响,以期估算我国区域汞排放通量提供参考。

1 材料与方法

1.1 土样采样与分析

实验土样取自重庆铁山坪林场,该点(106°41.24'E,29°37.42'N)位于重庆市东北部,距市中心大约 25 km,海拔约 450 m,年均温度 18℃,年均降水量 1 100 mm,植被为马尾松林(树龄 40 a 左右),土壤为山地黄壤^[15]。对林下未被扰动的表层土壤进行原状取样,包括表层枯落物(不超过 1 cm 厚)和 0~5 cm 深的土壤,置于不锈钢盒子(33 cm×33 cm×5 cm)中,带回实验室避光放置。共采集 20 个土块备用。

在采集每个土块的同时,对土块周边土壤进行垂直分层采样,共分 4 层,分别是森林枯落物 A 层(未分解的新鲜枯落物)、枯落物 B 层(中度分解的枯落物)、土壤 A 层(0~2 cm)和土壤 B 层(2~5 cm)。土壤样品置于阴凉处风干后磨碎,然后用 Lumex® 塞曼效应汞分析仪(RA-915⁺)和配套热解装置(PYRO-915⁺)测定汞含量。

1.2 土壤汞释放通量测定

利用动态通量箱(dynamic flux chamber, DFC)与 RA-915⁺联用方法测定土壤表层同大气间的气态单质汞(Hg^0)的交换通量^[10]。本实验采用国际上最新的通量箱设计^[16]。该通量箱由聚碳酸酯材质制成,对汞吸附能力很弱。与以往的通量箱相比,新通量箱能够在土壤表面产生更加稳定和均匀的气流,提高了数据重现性和测量的准确度^[16]。此通量箱封闭一块 30 cm×30 cm 的土壤表面,以 2.1 L·min⁻¹流量(该流量符合通量箱和汞分析仪的要求)抽取该表面上方通量箱内的气体,在测定通量箱进出口大气汞含量的差异的基础上,根据质量守恒计算地表-大气间的汞交换通量:

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

式中, F 为界面汞交换通量[$\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], c_o 为通量箱出气口总气态汞浓度($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$), c_i 为通量箱进气口总气态汞浓度($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$), A 为通量箱覆盖的土壤表面面积(m^2), Q 为通量箱采样流量($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)。

用 1 台 RA-915⁺交替测定通量箱进气口和出气口的空气汞浓度,5 min 切换一次(每 0.5 min 读数,取平均值,为避免切换后管路中的残余气体对测量结果的影响,每次切换后的首个 1 min 读数舍去)。

1.3 土壤汞释放通量的影响因子研究

针对辐照强度、土壤含水量和空气温度等环境因子以及土壤表层枯落物的作用对土壤汞释放通量的影响分别进行了控制实验。在室外,土块被分为 3 组,分别作光下(辐射强度 $>450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)、遮阳(辐射强度 $<150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)和黑夜(辐射强度为 $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)的不同处理(每组 3 个平行),以了解辐射强度变化对汞释放的影响。由于林下土壤常处于背阴状态(辐射强度 $<100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,根据重庆现场观测结果),可能遮阳条件下的结果更能代表白天林下土壤汞的排放情况。上述实验均在不同的季节重复开展(黑夜测试仅夏季进行),以了解季节的变化对土壤汞释放的影响。每季度的实验重复进行 3 d,白天 10:00 开始,黑夜 21:00 开始,依次测定各土块的汞释放通量(以同时进行的光下和遮阳两个水平的实验为例,如果 6 个土块的通量箱出口浓度分别记为 A1、A2、A3 和 B1、B2、B3,空气浓度记为 R,则按照 R-A1-A2-A3-R-B1-B2-B3 的顺序测定,这样每个土块 40 min 测一次),每个土块测 3 次。

在室内,辐射强度不大且变化很小,土块被分为 3 组(每组 3 个平行),用以模拟不同土壤含水量(每次实验前 12 h 通过控制加水量完成)对土壤汞释放的影响。该实验在 10℃ 和 25℃ 两个室温下重复开展,每次实验重复进行 3 d。同样在室内,取 6 个土块分成 2 组(每组 3 个平行),其中一组去掉表面枯落物,另一组作对照,研究枯落物对土壤汞释放的作用。该实验在 25℃ 下进行,实验重复进行 3 d。

此外,考虑到汞释放可能具有动态变化的特征,各开展了 1 次洒水实验(室内模拟降水之后的短时间汞释放量变化)和日变化观测(在室外考察 1 d 之内土壤汞的释放是否稳定)。洒水实验中对土壤汞释放量的测量分 3 个阶段,洒水前、洒水后即刻和洒水后 0.5 h。每个土块的洒水量为 330 mL,均匀喷洒在土壤表面,相当于降水量为 5 mm。汞释放量的日变化观测选在夏季的晴天,6 个土块被分为 2 组(每组 3 个平行),分别作光下和遮阳处理,观测从 10:00 开始连续进行 7 h。

在进行汞通量测量的同时,用便携式小型气象站(Onset Computer Corporation, HOBO Weather Station)记录辐照强度、空气温度和土壤含水量等

参数.

以上各组实验的条件如表 1 所示,在实验中除

了对考察的因素设置不同水平之外,其他条件均保持一致. 实验共用到原状土块 18 个(分成 6 组).

表 1 控制实验条件汇总

Table 1 Summary of control experimental conditions

实验分组	考察因素	因素水平	其他条件	使用土块数	测试地点	重复实验次数
1 光照实验	辐照强度 + 空气温度	3(光下、遮阳和黑夜 ¹⁾) ×3(夏季、春秋季节和冬季)	土壤含水量 10%	9(3 个平行)	室外	9
2 土壤含水量实验	土壤含水量 + 空气温度	3(5%、10% 和 20% 左右) × 2 (10℃ 和 25℃ 左右)	辐射强度 0.6 W·m ⁻²	9(3 个平行)	室内	6
3 枯落物实验	土壤枯落物	2(保留和去掉枯落物)	辐射强度 0.6 W·m ⁻² , 土壤含水量 10%	6 ²⁾ (3 个平行)	室内	3
4 洒水实验	土壤含水量 + 时间	2(5% 和 10%) × 3(洒水前、 洒水后即刻和洒水后 0.5 h)	辐射强度 0.6 W·m ⁻² , 空气温度 25℃	6 ²⁾ (3 个平行)	室内	3
5 日变化	辐照强度 + 时间	2(光下和遮阳)	土壤含水量 10%	6 ³⁾ (3 个平行)	室外	3

1) 黑夜测试仅在夏季; 2) 可重复使用土块; 3) 可重复使用 1 种土块

1.4 数据分析方法

相同处理下的汞释放通量取平均值. 用单因子方差分析(One-way ANOVA)判断各组实验土壤汞释放量在不同辐射强度、土壤含水量或枯落物条件下差异的显著性,用配对 *T* 检验(Paired-Samples *T*-test)判断土壤汞释放量在加水前后差异的显著性.

2 结果与讨论

2.1 土壤汞含量

各层土壤的汞含量如表 2 所示. 6 组土块的汞含量相互之间无显著性差异($P > 0.05$). 由于土壤汞含量同样是决定土壤汞释放通量的重要因素之一^[8,17],因此控制实验中必须消除土壤汞含量差异的影响. 此外,尽管存在土壤汞释放,但释放量与土壤含汞量相比微不足道[仅做简单计算:按表层土壤厚 2 cm、容重 $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以及汞含量 $150 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 计算,表层土壤汞含量为 $m_1 = 150 \times 1.0 \times 2 \text{ ng} \cdot \text{cm}^{-2} = 300 \text{ ng} \cdot \text{cm}^{-2}$;假设土壤汞释放通量取测试的最大值,即 $50 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,6 个月后土样的汞损失为 $m_2 = 50 \times 24 \times 180/10\,000 \text{ ng} \cdot \text{cm}^{-2} = 21.6 \text{ ng}$;可见 $m_1 \gg m_2$],因此可以认为土壤汞含量在实验期中基本保持不变,不必每次控制实验前后测土样汞含量.

2.2 辐照强度和空气温度对土壤汞释放通量的影响

图 1 给出了不同辐射强度下(光下、遮阳和黑夜)土壤汞释放通量的季节变化. 不同季节气温差异较大,夏季 $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ (白天)和 $26^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ (黑夜),春秋季节 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ (白天),冬季 $10^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ (白天). 结果表明,在所有的季节,光下的土壤汞释放通量均显著高于遮阳条件下($P < 0.01$);夏季遮阳下又显著高

于黑夜($P < 0.01$). 很显然,辐照强度是影响汞释放的主要因素,这与许多室内和野外研究的结果相一致,即太阳辐射能促进土壤汞的释放,晴天的土壤汞释放通量一般高于阴天^[9,10,18~20]. 土壤表面的氧化态汞(Hg^{2+})存在光致还原作用,即太阳辐射提供能量将 Hg^{2+} 还原成 Hg^0 ,强烈的太阳辐射能促使更多 Hg^{2+} 还原,因而会提高土壤汞的排放通量^[18~21]. 本实验中,相同土样在光下的汞释放通量是遮阳下的 3~9 倍,与以往研究获得的植被覆盖土壤的汞释放通量显著低于无植被覆盖地区的结果相吻合^[11].

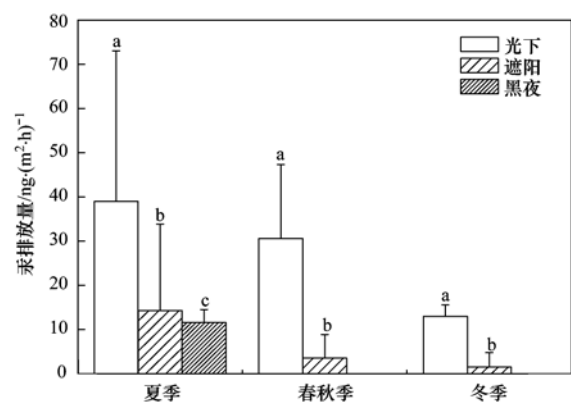
从图 1 中还可以看出,汞释放通量有明显的季

表 2 土样(包括枯落物)的汞含量¹⁾/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 2 Hg content of soil (including litterfall)/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$

枯落物 A	枯落物 B	土壤 0~2 cm	土壤 2~5 cm
150 (15)	294 (31)	187 (56)	63 (15)

1) 括号内为标准差



误差线表示标准差; 不同字母表示差异显著($n = 9$),下同

图 1 土壤汞释放通量在不同季节随辐射强度的变化

Fig. 1 Seasonal variation of soil mercury emission flux with different radiation intensity

节差异性,夏季汞释放通量最大,春秋季节次之,冬季最小. 实验过程中不同季节的辐射强度差异不大(夏季:遮阳 $101.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \pm 19.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,光照下 $541.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \pm 161.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;春秋季节:遮阳 $80.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \pm 43.86 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,光照下 $523.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \pm 74.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;冬季:遮阳 $96.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \pm 39.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,光照下 $443.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \pm 15.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$),表明土壤的汞释放同空气温度正相关. 这与许多研究结果相一致^[12,13]. 除辐射外,微生物与有机质也可将 Hg^{2+} 还原为 Hg^0 ^[22,23],温度的增加会促进还原反应并增强微生物的活性,从而可能导致更多的 Hg^0 生成^[24]. 此外,温度的升高也会促使 Hg^0 从颗粒物表面脱附下来,增加土壤汞的释放. 也有野外研究发现土壤四季的汞释放通量大小顺序为:春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季^[15]. 由于该研究中汞释放最高的春季其实是在落叶树叶片长出之前,此时太阳辐射能够直接到达森林地面,增加土壤汞的释放,因此与本研究没有矛盾. 对于本研究所在的重庆地区常绿针叶林来说,土壤四季均处于遮阳条件下,春季土壤的汞释放低于夏季(温度为关键因素).

本研究得到土壤汞释放通量(白天),夏季为 $(14.3 \pm 19.6) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (遮阳)和 $(39.0 \pm 34.0) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (光下),春秋季节为 $(3.50 \pm 5.36) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (遮阳)和 $(30.6 \pm 16.7) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (光下),冬季为 $(1.48 \pm 3.27) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (遮阳)和 $(13.0 \pm 2.60) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (光下). 光下结果同重庆市紫色土的结果[实验室条件下,春秋季节 $32.9 \sim 49.6 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,冬季 $7.2 \sim 10.5 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]接近^[12];遮阳下的结果与长春的森林土壤结果[野外观测,夏季 $3.3 \sim 7.6 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]也很相近^[14]. 由于森林土壤多处于遮阳的状态,汞排放通量较暴露于太阳直射下的土壤低,推测本研究获得的遮阳状态下的结果更能代表森林土壤的实际排放状况.

2.3 土壤含水量对土壤汞释放通量的影响

图2给出了不同土壤含水量下汞释放通量的变化. 在此实验过程中室内辐照水平(约为 $80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)保持恒定,与阴天常绿针叶林下的通常情况相当(参照重庆铁山坪的现场观测结果). 室内低温 $10^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,室内高温 $24^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. 从图2中可以看出,土壤含水量的升高通常会增加土壤的汞释放量(仅室内高温, $P < 0.01$),这与以往的研究是一致的^[16,17,25,26],表明土壤水的增加有利于汞的迁移和转化^[14]. 对比高温和低温下实验结果的差别可以

看出,高温下土壤含水量对汞释放通量的影响更为明显. 可能原因是,高温下土壤水分蒸发较快,能将更多下层土壤中的 Hg^{2+} 带到土壤表面进而被还原.

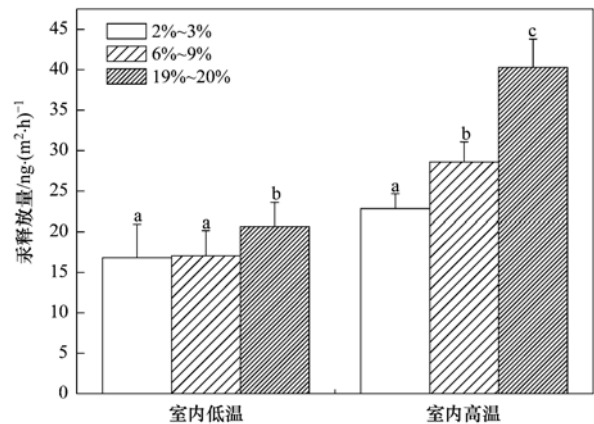


图2 土壤汞释放通量随土壤含水量的变化

Fig. 2 Change of soil Hg emission flux with soil water content

图3给出了模拟降雨前后土壤汞释放通量的变化. 可以看出,干土块(土壤湿度约5%)加水后的汞释放通量在短时间内(比如0.5 h以内)明显增加($P < 0.01$),而湿土块(土壤湿度约10%)增加并不显著;0.5 h后两者的汞释放通量均有显著下降($P < 0.01$). 降水后干土块汞通量升高的可能原因为:①在降水初期,土壤空隙中的部分 Hg^0 被雨水“挤”出来^[7,21];②降水后,土壤含水量增大,土壤中与腐殖质结合的络合态汞较易活化进入土壤水溶液中,进而被还原成 Hg^0 挥发至空气中^[14]. 降水一段时间后,土壤孔隙中的汞大部分已释放,同时土壤表面生成水膜,可能会阻碍 Hg^0 的释放,从而导致释放量减少. 湿土块的短期变化弱于干土块,原因是其孔隙中本来就含有大量水,容纳的 Hg^0 很少,因而加水

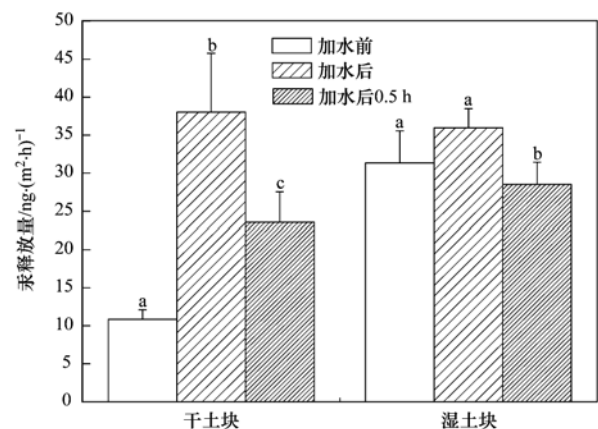


图3 模拟降雨前后土壤汞释放通量的短期变化

Fig. 3 Short-term change of soil mercury emission flux by simulated rain

也不会显著提高土壤汞释放. 需要注意的是, 在实际情况下, 降水可能导致更高的土壤汞释放, 因为湿沉降中含有较多的汞, 这些汞相较于已经存在土壤中的汞更容易被还原重新释放出来^[27].

2.4 枯落物对土壤汞释放通量的影响

图4给出了有无枯落物覆盖土壤汞释放通量的差异. 林地土壤有别于开阔地或者其他生态系统的土壤, 除了缺乏阳光直射之外, 就是存在一层较厚的枯落物和腐殖质. 结果表明, 移除枯落物的土壤汞释放量显著下降 ($P < 0.01$). 可能原因是, 土壤枯落物和腐殖质易于络合汞, 更易于吸附和富集大气干湿沉降中的汞, 因此枯落物层富集了比矿质土层更高浓度的汞 (如表2). 枯落物层透光性好, 并且其中微生物和有机质对 Hg^{2+} 的还原作用较强, 从而通过生物过程与非生物过程造成的 Hg^0 通量较高^[14].

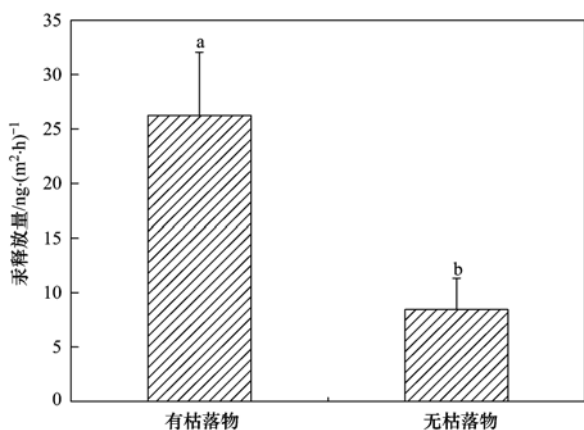


图4 有无枯落物情况下土壤汞释放通量的差异

Fig. 4 Soil Hg emission flux with/without litterfall

2.5 土壤汞释放通量的日变化

图5给出了夏季某日汞释放通量随时间的变化. 可以看出, 汞释放通量的变化趋势同环境因子的变化趋势明显不相符. 在测试的前2 h内, 空气温度和土壤含水量等其他因素没有明显变化, 而辐射强度快速上升, 但是光下的土壤汞释放量却明显降低. 同样, 尽管辐射强度、空气温度和土壤含水量的条件与午前并无明显变化, 遮光处理下的土壤汞释放量也在午后显著降低. 正是这个原因, 为了结果的可比性, 在稳态实验中均取2 h内的结果. 这也说明, 土壤汞释放量可能受到表面汞含量的制约. 实验开始前土样静置了一夜, 夜间土壤水蒸发, 将土壤中的 Hg^{2+} 带至表层, 再加之夜间大气汞向土壤沉降^[10], 这样土壤表层 Hg^{2+} 得到补充. 第二天实验期间土壤中的光致还原和生物还原作用, 使得大

量积累在土壤表面的 Hg^{2+} 被还原成 Hg^0 进而释放, 因而在起始阶段通量很高. 之后, 土壤表面的 Hg^{2+} 不断消耗, 且土壤溶液的蒸发并不能及时补充消耗的 Hg^{2+} , 导致汞释放通量逐渐下降. 相对而言, 光下土壤汞释放量较高, 因而衰减得比遮阳下更迅速. 一般来说, 污染土壤的表层汞含量较高^[11], 而森林较低^[14]. 本研究土壤汞含量仅 $200 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右, 而贵州省的万山地区 (汞矿所在地) 的土壤汞含量超过 $700 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 本研究土壤汞释放通量远低于万山地区 [暖季 $2207 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 冷季 $1066 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]^[11]. 因此, 土壤表层的汞含量也可能是森林土壤汞释放的重要限制因素, 需要进一步的研究.

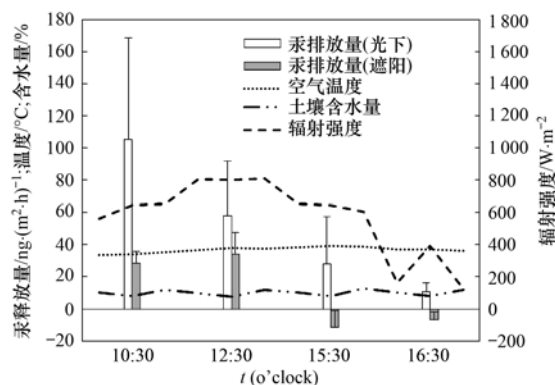


图5 土壤汞释放通量的日变化

Fig. 5 Diurnal variation of soil Hg emission flux

3 结论

(1) 土壤汞释放量与辐射强度呈显著的正相关, 在空气温度和土壤含水量相似条件下, 光下是遮阳的3~9倍. 不过, 由于林下土壤常处于背阴状态, 可能遮阳条件下的结果更能代表白天林下土壤汞的排放情况.

(2) 土壤汞释放量存在明显的季节变化, 夏季 > 春秋 > 冬季, 空气温度与土壤汞释放呈正相关. 在低温下土壤汞释放量很低, 土壤含水量影响较弱, 而在高温时土壤含水量增加能明显促进土壤汞释放.

(3) 枯落物的移除会显著降低土壤汞释放通量, 主要原因可能是枯落物的汞含量较高. 土壤汞释放量在一天内也存在明显的衰减趋势, 表明土壤表层的汞含量是森林土壤汞释放的重要的限制因素.

(4) 本研究测得森林土壤汞释放通量 (白天) 为 $(14.3 \pm 19.6) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (夏季)、 $(3.50 \pm 5.36) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (春秋) 和 (1.48 ± 3.27)

$\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (冬季)。由于森林土壤表面汞含量较低,而土壤汞释放量的衰减较快,因此以上稳态测试结果可能高估实际的汞排放量。

参考文献:

- [1] Slemr F, Langer E. Increase in global atmospheric concentrations of mercury inferred from measurements over the Atlantic Ocean [J]. *Nature*, 1992, **355**(6359): 434-437.
- [2] Selin N E. Global biogeochemical cycling of mercury: a review [J]. *The Annual Review of Environment and Resources*, 2009, **34**(1): 43-63.
- [3] 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.
- [4] Pirrone N, Cinnirella S, Feng X, *et al.* Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(13): 5951-5964.
- [5] Schroeder W H, Munthe J. Atmospheric mercury: An overview [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(5): 809-822.
- [6] Gillis A A, Miller D R. Some local environmental effects on mercury emission and absorption at a soil surface [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **260**(1-3): 191-200.
- [7] Maclair C, Layshock J, Carpi A. Quantifying the effect of humic matter on the emission of mercury from artificial soil surfaces [J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(3): 594-601.
- [8] Choi H D, Holsen T M. Gaseous mercury fluxes from the forest floor of the Adirondacks [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(2): 592-600.
- [9] 刘潇, 张成, 王定勇, 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.
- [10] 冯新斌, 陈业材, 朱卫国. 土壤挥发性汞释放通量的研究[J]. *环境科学*, 1996, **17**(2): 20-22, 25.
- [11] 王少峰, 冯新斌, 仇广乐, 等. 万山汞矿区地表与大气界面间汞交换通量研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(8): 1487-1494.
- [12] 林陶, 张成, 王定勇, 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.
- [13] 王少峰, 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Lin C J, Zhu W, Feng X B, *et al.* Novel dynamic flux chamber for measuring air-surface exchange of Hg^0 from soils [J]. *Environment Science and Technology*, 2012, **46**(16): 8910-8920.
- [17] Kocman D, Horvat M. A laboratory based experimental study of mercury emission from contaminated soils in the River Idrijca catchment [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(3): 1417-1426.
- [18] 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.
- [19] Moore C W, Castro M S. Investigation of factors affecting gaseous mercury concentrations in soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **419**: 136-143.
- [20] Gustin M S, Rasmussen P, Edwards G, *et al.* Application of a laboratory gas exchange chamber for assessment of in situ mercury emissions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D17): 21873-21878.
- [21] Bahimann E, Ebinghaus R. Process studies on mercury fluxes over different soils with a Laboratory flux measurement system (LFMS) [J]. *Journal de Physique IV France*, 2003, **107**: 99-102.
- [22] Mason R P, Morel F M M, Hemond H F. The role of microorganisms in elemental mercury formation in natural waters [A]. In: Porcella D B, Huckabee J W, Wheatley B (Eds.). *Mercury as a Global Pollution* [M]. Springer, 1995. 775-787.
- [23] Alberts J J, Schindler J E, Miller R W, *et al.* Elemental mercury evolution mediated by humic acid [J]. *Science*, 1974, **184**(4139): 895-897.
- [24] Zhu J S, Wang D Y, Liu X, *et al.* Mercury fluxes from air/surface interfaces in paddy field and dry land [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(2): 249-255.
- [25] 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.
- [26] Hintelmann H, Harris R, Heyes A, *et al.* Reactivity and mobility of new and old mercury deposition in a boreal forest ecosystem during the first year of the METAALICUS study [J]. *Environment Science and Technology*, 2002, **36**(23): 5034-5040.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 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