

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛翌, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晚冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价

解惠婷^{1,2}, 张承中¹, 徐峰², 李海凤², 田振宇², 唐琛², 刘文彬^{2*}

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 生活垃圾焚烧汞污染排放问题一直受到广泛的关注, 特别是汞在其周边环境土壤中沉积, 可能影响环境和人体健康. 以华北某生活垃圾焚烧厂为研究对象, 对其周边土壤中汞的含量及分布特征进行了分析, 并对土壤中汞的污染状况及对周边人群的健康风险进行了评价. 土壤中汞的浓度范围为 $0.015 \sim 0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $(0.088 \pm 0.064) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤中汞的浓度明显受到了风向影响, 在焚烧厂西北方向(下风向)上汞的浓度高于东南方向(上风向)上汞的浓度. 通过克里格插值绘制的汞等浓度值线图进一步给出了汞在周边土壤中的空间分布特征, 图中显示在焚烧厂的周边存在 3 个浓度相对较高的区域, 分别位于焚烧厂的西北偏北、东北偏北、西南偏西方向. 单项污染指数及地累积指数评价结果表明焚烧厂部分周边土壤样品受到了一定影响, 但健康风险评价表明土壤汞未对当地人群造成健康危害.

关键词: 风向; 克里格插值; 单项污染指数; 地累积指数; 健康风险评价

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1523-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.047

Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator

XIE Hui-ting^{1,2}, ZHANG Cheng-zhong¹, XU Feng², LI Hai-feng², TIAN Zhen-yu², TANG Chen², LIU Wen-bin²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The emission of mercury (Hg) from the municipal solid waste incineration has inspired widespread attention, especially regarding to the deposition of Hg in the surrounding soil, which is issued to be the potential negative factor of ambient environment and human health. This study mainly focused on the distributions of Hg in the ambient soil of a municipal solid waste incinerator located in North China. The pollution of the mercury and its risks to the local environment and human health were assessed. Results showed that Hg levels were in the range of $0.015\text{--}0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, with an average $(0.088 \pm 0.064) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The concentrations of Hg in the soil were obviously influenced by wind direction and they were relatively higher in the northwest (downwind) comparing with that in the southeast (upwind). The Kriging interpolation method was adopted to create a contour map, which intuitively displayed a spatial mercury distribution in the soil. The regions with a higher Hg concentration are mainly distributed in the north northwest, the north northeast and the west southwest of the municipal solid waste incinerator. According to the evaluation results of single factor pollution index and geoaccumulation Index, some ambient soil samples were polluted by the mercury emission from the municipal solid waste incinerator; however, the results of the health risk assessment showed that the mercury in the soil had not pose a health hazard to the local population.

Key words: wind direction; Kriging interpolation; single factor pollution index; geoaccumulation index; health risk assessment

随着我国城市规模的不断扩大和人民生活水平的迅速提高,我国城市生活垃圾的数量不断增加.2010年城市生活垃圾清运量已经达到了 $1.58 \times 10^8 \text{ t}$,人口普查数据显示,2010年我国城镇人口为66557万人,据此估算,我国城市人均生活垃圾清运量达到了 $0.65 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$.由于经济发展水平等原因的限制,目前国内生活垃圾处理设施还不能满足日益增长的垃圾处理的需求.我国的垃圾处理主要有填埋、焚烧、堆肥这3种方式,而焚烧技术作为一种垃圾处理方法,具有垃圾减量化、稳定化、无害化以及资源化的特点,已经在很多地区得到了广泛的应用^[1].2010年我国共有大大小小的生活垃圾焚烧厂170座,年处理生活垃圾 $2.3 \times 10^7 \text{ t}$,生活垃圾焚烧

处理量占清运量的14.6%.预计到2015年,将有200座生活垃圾焚烧设施建成,总日处理量可达到 $1.0 \times 10^5 \text{ t}^{[2]}$,生活垃圾焚烧年处理量将超过 $3.3 \times 10^7 \text{ t}$.

然而,城市生活垃圾焚烧过程也存在二次污染问题,会排放大量的有毒物质,如二噁英、汞等重金属^[3,4],汞对人体和生物具有高毒性,它可以在厌氧微生物的作用下转化为剧毒的甲基汞,并通过食物

收稿日期: 2013-08-12; 修订日期: 2013-10-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB201500); 环境保护公益性行业科研专项(201209019)

作者简介: 解惠婷(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境规划与管理, E-mail: xiehuit@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liuw@rcees.ac.cn

链常使人体产生中枢神经系统中毒症状^[5].我国城市生活垃圾的收集采用混合收集方式,大量含汞的废物如荧光灯、废旧电池、温度计等均混入到生活垃圾中,致使其焚烧产生的烟气中汞的排放浓度较高^[6].有研究证明,在垃圾焚烧过程中有 72% 的汞随烟气排放进入大气^[7],进入大气的汞一方面参与区域及全球汞的生物化学循环,另一方面通过干湿沉降进入土壤^[8],沉降于土壤表层中的汞则通过植物-土壤体系或直接、间接地与人体接触从而危害人类健康^[9].

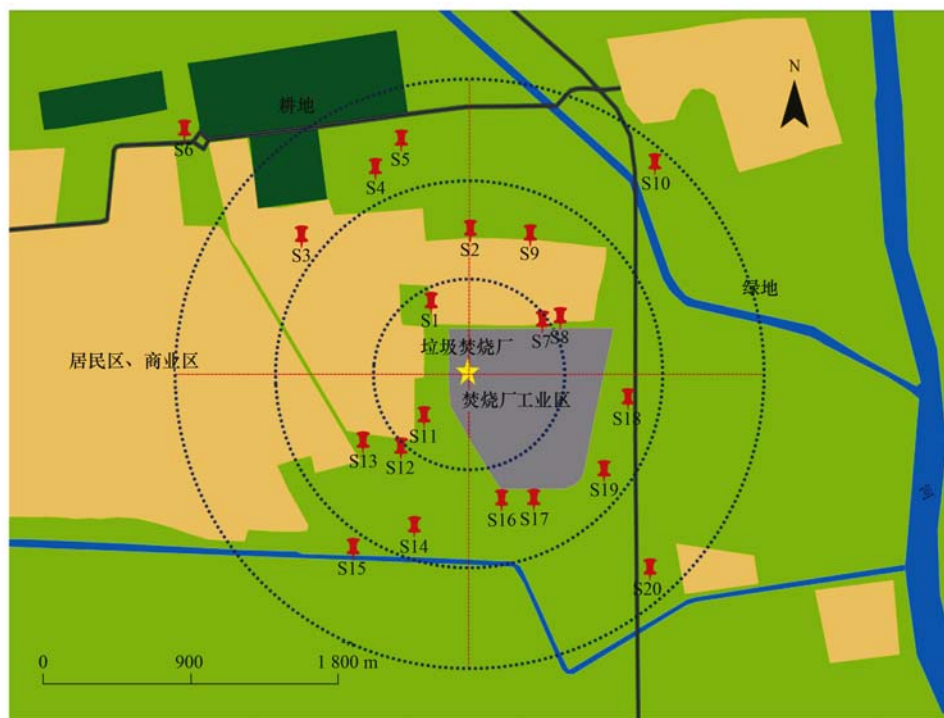
研究发现大气中汞的含量与土壤中汞的含量呈正相关^[10,11],这也表明对土壤中汞的监测可以反映垃圾焚烧所释放出的汞的含量.同时,土壤中汞可以反映相对较长时间的大气与土壤中汞的沉降挥发过程.当前,国内外已有一些学者对垃圾焚烧厂周边环境中的汞污染进行了相关报道.如 Rimmer 等^[12]及王俊坚等^[13]发现焚烧厂未明显造成土壤中汞等重金属的污染.而汤庆合等^[8]及 Meneses 等^[14]发现垃圾焚烧厂周边土壤中汞相比之前有了明显的增加.本研究选择了华北某先进的生活垃圾焚烧厂,对其

周边土壤中汞的浓度、分布特征进行分析,利用多种评价方法分析焚烧厂对周围环境所造成的影响,以期对长期生活在垃圾焚烧厂周边的敏感人群的健康风险评价提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集

该生活垃圾焚烧厂坐落于华北地区某市,于 2003 年 10 月建成点火,占地面积 $4.6 \times 10^4 \text{ m}^2$.焚烧厂采用先进的炉排炉技术,装备了 2 套单台日处理量 800 t 的焚烧系统,总日处理量 1 600 t,并配备了半干法吸收塔、布袋除尘器、活性炭喷射等尾气污染控制设施,烟囱主体高度为 80 m.焚烧厂周边环境较为复杂,2 000 m 范围内即有相对敏感的居民区和商业区.焚烧厂附近气象数据由当地气象站获得,该市属于典型的温带季风气候,具有夏季高温多雨,冬季寒冷干燥的特征.四季分明,冬夏季风方向变化显著,冬季盛行西北风,夏季盛行东南风.2012 年 8 月,根据当地夏季(6~8 月)风向及其地形状况,选取了 20 个采样点(如图 1).



其中 3 个圆分别代表距离该焚烧厂烟囱 500、1 000 和 1 500 m

图 1 土壤样品分布示意

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites

采样点以垃圾焚烧厂为中心,在其西北、东北、西南、东南这 4 个方向上分别设置 6、4、5、5 个采样点.每个样品点均采用梅花布点法进行采集,在 5

$\text{m} \times 5 \text{ m}$ 范围内采集 5 个等体积小样,均匀混合成 1 个样品.样品采集自表层土壤(0~10 cm),去除其中的植物和沙砾,封存于聚乙烯袋内,每个样品重约

1 kg. 样品采集后保存在 -20℃ 冰箱内直到分析完成.

1.2 样品处理与分析

采集回来的样品经风干后研磨,并过 100 目尼龙筛.准确称取 0.1 g 样品,将土壤倒入 20 mL 安瓿瓶中,加入 1 mL 超纯水及 2 mL 的硝酸,将样品放置通风橱中过夜.使用安瓿熔封机将安瓿瓶封口,而后将样品在沸水浴中加热 2 h,待样品冷却至室温,将消解后的液体定容至 10 mL,使用原子荧光光谱仪 (AF-610B,北京瑞利分析仪器有限公司)进行测定^[15].

每批样品的分析过程均加入国家标准土壤样品 (GBW07406) 和汞标准溶液 (GSB04-1729-2004, 国家有色金属及电子材料分析测试中心) 进行质量控制,同时设置空白及平行实验,其回收率为 96.3%. 采用总有机碳分析仪 (O. I 公司,美国) 对土壤中 TOC 的含量进行了分析,土壤中 TOC 含量为 1.26% ~8.81%,平均值为 (2.75 ± 1.70) %; 土壤 pH 在 7.9 ~8.6 之间,平均值为 8.1.

2 结果与讨论

2.1 土壤中汞浓度水平

土壤样品中汞浓度及夏季风玫瑰图见图 2.

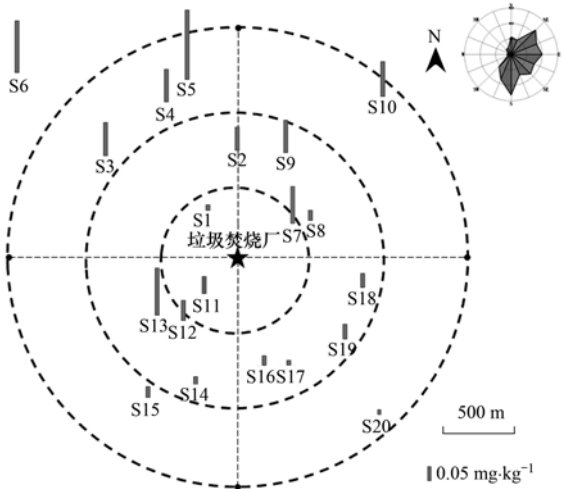


图2 土壤样品中汞浓度分布示意
Fig. 2 Distribution of mercury in the soils

土壤样品中汞的平均值是 (0.088 ± 0.064) mg·kg⁻¹, 浓度范围为 0.015 ~ 0.25 mg·kg⁻¹, 在距离焚烧厂烟囱较远处 (S5、S6) 的土壤样品中检测到了较高的汞浓度,这可能来自于汞的随风扩散,其中浓度最高点为 S5 (0.25 mg·kg⁻¹), 距离焚烧厂烟囱 1 264 m. 土壤中汞的浓度、其他研究者的比较结果及该市的土壤背景值见表 1.

表1 土壤中汞浓度与其他研究者比较

Table 1 Comparison of mercury concentrations of this study with other studies worldwide						
样品	浓度范围 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	中位值 /mg·kg ⁻¹	研究区域 /km	日处理量 /t	焚烧厂尾气处理方法
本研究	0.015 ~ 0.25	0.088 ± 0.064	0.07	<2	800	半干式吸收塔、布袋除尘器、活性炭喷射
意大利某焚烧厂周边土壤 ^[16]	0.040 ~ 0.27	0.11 ± 0.058	0.10	—	278	干式吸收塔、布袋除尘器、电除尘器
纽卡斯尔焚烧厂周边土壤 ^[12]	0.030 ~ 4.99	0.50	0.32	<2.25	80	干式吸收塔、布袋除尘器
深圳清水河焚烧厂周边土壤 ^[17]	0.012 ~ 0.14	0.058	0.058	<2	600	电除尘器、布袋除尘器、湿式吸收塔
该市土壤背景 ^[18]	0.020 ~ 1.48	0.069	0.050	全市		

从表 1 中可以看出,本研究中的焚烧厂的日处理量大于其它焚烧厂,其周边土壤样品中的汞从浓度范围、均值及中位数上与意大利某垃圾焚烧厂和深圳清水河生活垃圾焚烧厂周边土壤相近,但明显低于英国纽卡斯尔市生活垃圾焚烧厂周边土壤.造成这种区别的原因可能是 3 家焚烧厂都达到了一定的规模,其焚烧工况稳定性和污染物排放水平可能明显好于小规模纽卡斯尔市生活垃圾焚烧厂.此外,半干式吸收塔、活性炭喷射及布袋除尘器的联合配置对汞有较好的去除效果,从而降低了焚烧厂排放汞对于周边环境的影响^[19,20].

同时,汞的浓度与该市土壤背景值相比,在均值及中位数上均略有增加.与国家土壤质量标准^[21] (GB 15618-1995) 中汞的自然背景值进行比较,发

现部分采样点中汞的浓度高于自然背景值 (0.15 mg·kg⁻¹),但是显著低于二级土壤标准值 (pH > 7.5 时,值为 1.0 mg·kg⁻¹).

2.2 土壤中汞的分布特征

2.2.1 土壤中汞的浓度与风向

为研究风向对于土壤汞浓度的影响,采用箱式图及方差分析对焚烧厂的西北、东北、西南、东南这 4 个方向进行分析 (如图 3).

如图 3 所示,土壤中汞的浓度在方向上存在明显的差异.西北方向汞的浓度最高,其浓度范围为 0.024 ~ 0.25 mg·kg⁻¹,平均值为 (0.13 ± 0.079) mg·kg⁻¹,而东南方向浓度范围为 0.016 ~ 0.054 mg·kg⁻¹,平均值为 (0.03 ± 0.018) mg·kg⁻¹,西北方向显著高于东南方向汞的浓度 (P = 0.012 < 0.05);

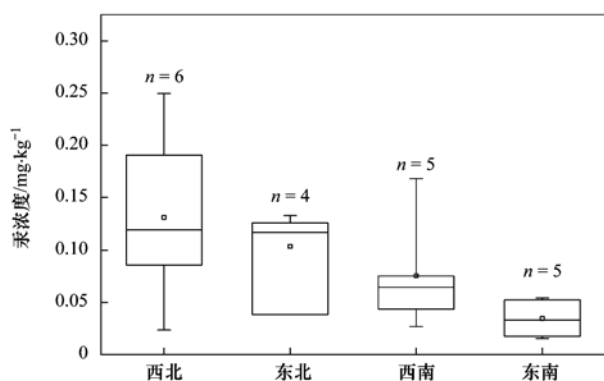


图3 风向与土壤中汞浓度的关系

Fig. 3 Relationship between the wind direction and the mercury concentrations

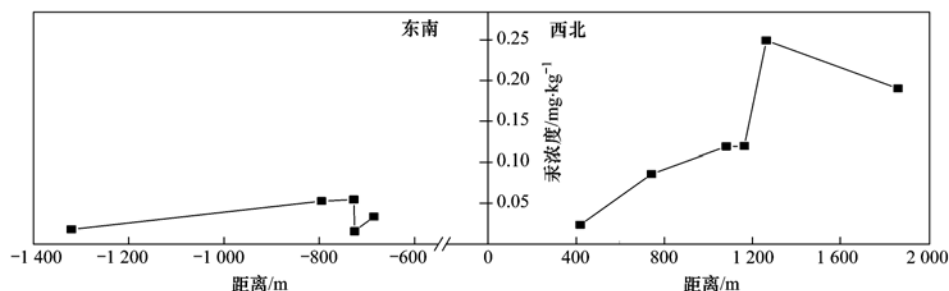
东北方向与西南方向汞的浓度无显著差异 ($P = 0.47 > 0.05$), 浓度范围分别为 $0.038 \sim 0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.027 \sim 0.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 $(0.10 \pm 0.044) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(0.08 \pm 0.055) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

从焚烧炉排出的烟气受到风向的影响,在下风向上扩散,同时受降雨的影响,通过干湿沉降等方式进入周边土壤.采样时间是8月,处在夏季的末端,

而夏季盛行东南风,从而使其下风向(西北)上的土壤中累计了相对较多的汞.采样点冬季盛行西北风,寒冷干燥,降雪量很少,烟气中的汞通过干沉降的方式进入周边土壤,从而使冬季土壤中沉降的汞量少于夏季沉降的汞量^[17].此外,虽然冬季焚烧厂东南是下风向,但经过漫长的春夏季后,在雨水的淋溶作用下,土壤表层积累的水溶性的 Hg^{2+} 也可能存在随地表径流流失或渗入土壤深层,这也是造成下风向表层土壤汞浓度明显高于上风向的原因.此外,焚烧厂周边土壤中汞含量的水平分布差异受到很多因素的影响,除了气象条件(主导风向)的影响外,还可能受到土壤的理化性质、周边环境的地势起伏、焚烧厂烟囱的高度、人类活动等因素的影响^[22].

2.2.2 土壤中汞的浓度与距离

生活垃圾焚烧炉排放出的汞随烟气扩散,在下风向上有较多的分布,为了进一步研究土壤中汞浓度的受影响范围,在前面对于风向影响研究的基础上,选取主导风向(东南-西北)上土壤中汞的浓度作为研究对象,对此风向上土壤中汞的浓度与焚烧厂距离之间的关系(见图4)进行了探讨.



坐标原点代表焚烧厂烟囱

图4 土壤中汞的浓度与采样点距离焚烧厂之间距离的关系

Fig. 4 Relationship between distances from the MSWI and mercury concentrations

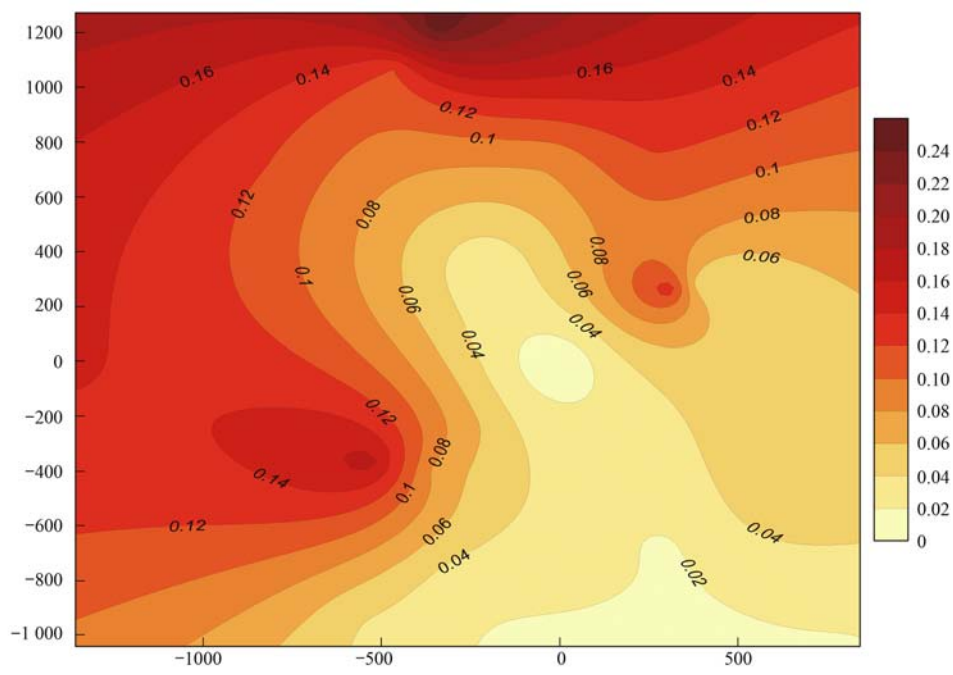
从图4中可看出在焚烧厂的上风向(东南)土壤中汞的浓度均低于该市背景值 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而下风向(西北)700 m以后的采样点均大于 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,下风向土壤受到焚烧厂的影响较大.上风向土壤中汞浓度随着与焚烧厂烟囱距离的增加未出现明显的变化,而下风向在本研究范围内汞浓度随着距离的增加有所增加,这与 Schuhmacher 等^[23]的研究结果类似.从焚烧厂释放出的汞在大气中能随风远距离扩散,这可能是在下风向上较远距离土壤汞浓度依然较高的原因.

2.2.3 汞浓度的空间分布

克里格插值作为一种地质统计学方法,被广泛应用于土壤中环境污染物浓度的空间分析^[24, 25].

本研究利用 Golden Software Surfer 11.0 软件,采用 Kriging Interpolation 模式,绘制了所有采样点的汞等浓度值线图(见图5),以直观显示焚烧源周边土壤中汞的空间分布特征.

汞在焚烧厂周边土壤中的空间分布示意图恰好与夏季风玫瑰图的风频规律近似.在焚烧厂的周围存在3个浓度相对较高的区域,分别位于焚烧厂的西北偏北、东北偏北、西南偏西方向.其中坐标 $(-300, 1200)$ 位置附近土壤中汞的浓度明显高于其他区域,大约距离烟囱1237 m左右,而该区域正好位于下风向上.其它2个较高区域的中心坐标分别约为 $(250, 300)$ 和 $(-500, -300)$,距离焚烧厂的距离分别约为 391 m 和 583 m.



图中坐标(0,0)代表该焚烧厂烟囱,横纵坐标代表距焚烧厂烟囱的实际距离(m),图中数值代表汞浓度(mg·kg⁻¹)

图 5 土壤样品中 Hg 浓度等浓度值线

Fig. 5 Kriged map of Hg concentrations in soil samples

2.3 土壤汞污染评价

单项污染指数法和地累积指数法是常用的对土壤污染程度进行评价的方法,可将土壤中汞污染程度划分为不同等级^[22]. 土壤汞单项污染指数^[26]公式如下:

$$P_i = C_i/S_i \tag{1}$$

式中, P_i 为汞污染指数; C_i 为汞实测浓度(mg·kg⁻¹); S_i 为汞的评价标准(mg·kg⁻¹),选用该市土壤汞的背景值(0.069 mg·kg⁻¹)^[18].

单项污染指数只能给出初步的浓度评价结果,与其相比,地累积指数法^[27]不仅反映了汞分布的自然变化特征,而且可以判别人为活动对环境的影响,其公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_i}{K \times B_i} \right] \tag{2}$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为汞实测浓度(mg·kg⁻¹); K 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数(一般取值为 1.5); B_i 为该

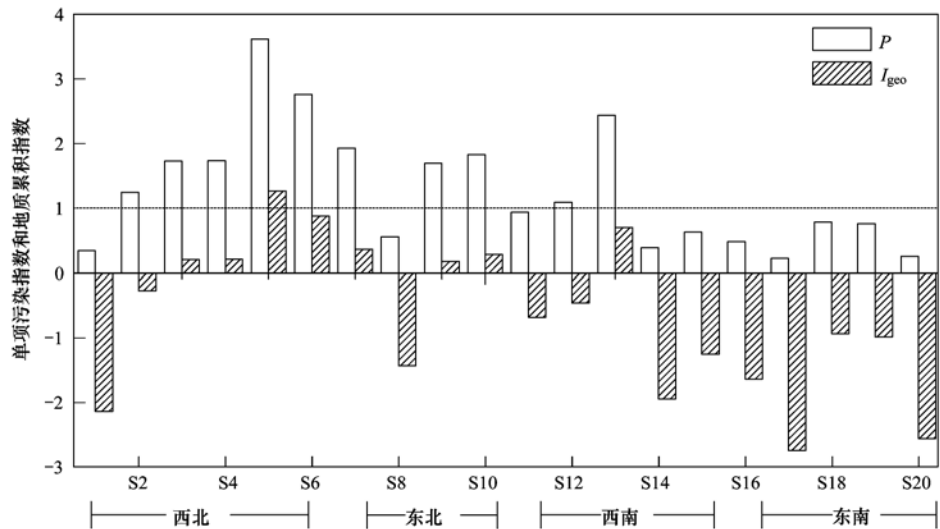


图 6 垃圾焚烧厂周边土壤汞污染评价结果

Fig. 6 Evaluation result of the concentrations of mercury around MSWI

市汞的背景值(0.069 mg·kg⁻¹)^[18]. 根据单项污染指数和地累积污染指数公式,计算结果如图6所示.

以单项污染指数法作为评价标准,有50%的采样点受到了污染(指数>1),其中西北方向受到的影响最大,其次是东北>西南方向,而东南方向的样点均低于背景值. 其中S5的指数大于3,污染程度较重,S6、S13的指数在2~3之间,属于中度污染,其它超标点属于轻度污染. 以地累积污染指数法评价,有40%的样点受到了污染(指数>0),西北受到影响最大,而东南方向未受到污染. 除了S5点属于偏中度污染外(指数1~2),其余超标点均属于轻度污染(指数0~1).

2.4 土壤汞健康风险评价

健康风险评价是指识别环境中可能的风险源,评价其与人体发生接触的暴露途径以及定量评价暴露结果对人体健康产生的危害程度的一种评价方法^[28]. 土壤中的汞主要通过以下途径进入人体:一是经口直接摄入;二是通过呼吸摄入空气中的飞尘;三是通过与人体皮肤的接触而摄入. 还有研究认为,汞除了上述途径对人体健康产生危害,还可以通过蒸气的摄入进入人体^[29]. 参照美国环保署(USEPA)推荐的健康风险方法,及我国场地环境评价指南^[30,31],给出各种暴露途径的风险模型,计算公式如下:

经口直接摄入:

$$EDI_{\text{经口摄入}} = \frac{C \times IFP \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (3)$$

表2 健康风险暴露量计算参数含义及取值

Table 2 Meaning and value of health risk parameters

参数	含义	单位	参考值	文献
VF	蒸发系数	m ³ ·kg ⁻¹	32 657.6	[29]
IR	空气摄入量	m ³ ·d ⁻¹	20	[32]
IFP	土壤摄入量	mg·d ⁻¹	114	[32]
EF	暴露频率	d·a ⁻¹	350	[32]
ED	暴露年限	a	25	[32]
AF	皮肤对土壤的吸附系数	mg·cm ⁻²	1	[32]
BW	体重	kg	55.9	[33]
AT	暴露周期	d	365 × ED	[33]
SA	可能接触土壤的皮肤面积	cm ² ·d ⁻¹	5 000	[33]
ABS	皮肤呼吸率		0.001	[33]
PEF	土壤尘产生因子		1.32 × 10 ⁹	[34]

通过单项污染指数和地累积污染指数可知焚烧厂周边部分采样点受到了不同程度的污染,因此对居住在附近的居民进行健康风险评价,就显得尤为重要. 根据健康风险评价公式(3)~(8)、暴露量计算参数及采样点数据计算了对当地成人人体可能造

通过呼吸摄入:

$$EDI_{\text{呼吸摄入}} = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} \quad (4)$$

人体皮肤直接接触途径:

$$EDI_{\text{皮肤摄入}} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (5)$$

汞蒸气摄入途径:

$$EDI_{\text{蒸气摄入}} = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT \times VF} \quad (6)$$

健康风险评价通常分为非致癌和致癌风险评价,通常对汞进行非致癌风险评价,用危害商HQ来评价:

$$HQ = \frac{EDI_i}{RfD_i} \quad (7)$$

式中,C为实测浓度,EDI_i为慢性日暴露量,mg·(kg·d)⁻¹;RfD_i各种途径的风险评价参考剂量,mg·(kg·d)⁻¹,以上4种途径的RfD值^[29,31]分别为3.0 × 10⁻⁴、1.07 × 10⁻⁴、2.4 × 10⁻⁵和1 × 10⁻³ mg·(kg·d)⁻¹. 式(3)~(7)中参数的含义见表2. 汞在不同途径的总非致癌风险值用HI表示,即:

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ \quad (8)$$

当HI或HQ>1时,认为存在潜在的非致癌风险,HI或HQ<1时认为风险较小,或可以忽略. 参照现有研究资料^[29, 32~34]确定健康风险暴露量参数取值,如表2所示.

成的非致癌暴露风险值,结果如表3所示. 汞的各途径非致癌风险值排序为HQ_{蒸气摄入}>HQ_{经口摄入}>HQ_{皮肤摄入}>HQ_{呼吸摄入}. 其中S5点的非致癌风险最大,达到了5.14 × 10⁻³,S17点的非致癌风险最小,为3.20 × 10⁻⁴,相差了一个数量级. 从采样区域的

方向上可以看出,西北方向的非致癌风险 > 东北方向 > 西南方向 > 东南方向,下风向(西北)上的非致癌风险比上风向(东南)高出一个数量级,但所有途径暴露风险及总暴露风险值均远小于 1,表明研究区域中的土壤汞并未对当地成人人体造成健康危害.

表 3 各种途径的非致癌暴露风险值

Table 3 Hazard quotient values for each exposure pathway

采样区域	风险指数				
	HQ _{经口摄入}	HQ _{呼吸摄入}	HQ _{皮肤摄入}	HQ _{蒸气摄入}	HI
西北方向	$8.57 \times 10^{-4} \pm 5.17 \times 10^{-4}$	$3.19 \times 10^{-7} \pm 1.92 \times 10^{-7}$	$4.70 \times 10^{-4} \pm 2.83 \times 10^{-4}$	$1.38 \times 10^{-3} \pm 8.33 \times 10^{-4}$	$2.71 \times 10^{-3} \pm 1.63 \times 10^{-3}$
东北方向	$6.76 \times 10^{-4} \pm 2.87 \times 10^{-4}$	$2.52 \times 10^{-7} \pm 1.07 \times 10^{-7}$	$3.71 \times 10^{-4} \pm 1.57 \times 10^{-4}$	$1.09 \times 10^{-3} \pm 4.62 \times 10^{-4}$	$2.14 \times 10^{-3} \pm 9.06 \times 10^{-4}$
西南方向	$4.94 \times 10^{-4} \pm 3.58 \times 10^{-4}$	$1.84 \times 10^{-7} \pm 1.33 \times 10^{-7}$	$2.71 \times 10^{-4} \pm 1.96 \times 10^{-4}$	$7.95 \times 10^{-4} \pm 5.77 \times 10^{-4}$	$1.56 \times 10^{-3} \pm 1.13 \times 10^{-3}$
东南方向	$2.26 \times 10^{-4} \pm 1.20 \times 10^{-4}$	$8.42 \times 10^{-8} \pm 4.49 \times 10^{-8}$	$1.24 \times 10^{-4} \pm 6.60 \times 10^{-5}$	$3.64 \times 10^{-4} \pm 1.94 \times 10^{-4}$	$7.14 \times 10^{-4} \pm 3.81 \times 10^{-4}$

3 结论

研究区域中的土壤受到了焚烧厂的一定影响,但是由于焚烧厂配备了完善的污染控制设施,降低了焚烧厂排放汞对于周边环境的影响.焚烧厂周边土壤中汞的浓度明显受到当地风向的影响,下风向(西北)土壤中汞的浓度明显高于上风向(东南)汞的浓度,从土壤中汞浓度与距离关系、空间分布特征等研究角度都得到了类似的结论.单项污染指数和地累积污染指数评价结果表明西北方向受到的影响最大,其次是东北 > 西南方向,东南方向未受到影响.健康风险评价结果显示土壤汞未对当地成人人体造成健康危害.

致谢:感谢中国科学院生态环境研究中心黄益宗老师为本研究提供的实验支持及相关分析指导.

参考文献:

[1] Zhang H, He P J, Shao L M. Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration in Shanghai [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **156**(1-3): 365-373.

[2] Xu M X, Yan J H, Lu S Y, *et al.* Agricultural soil monitoring of PCDD/Fs in the vicinity of a municipal solid waste incinerator in Eastern China: Temporal variations and possible sources [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **166**(2-3): 628-634.

[3] Bie R S, Li S Y, Wang H. Characterization of PCDD/Fs and heavy metals from MSW incineration plant in Harbin [J]. Waste Management, 2007, **27**(12): 1860-1869.

[4] Hu C W, Chao M R, Wu K Y, *et al.* Characterization of multiple airborne particulate metals in the surroundings of a municipal waste incinerator in Taiwan [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(20): 2845-2852.

[5] 张晓平, 朱延明. 西藏土壤中汞的含量及其地理分布 [J]. 环境科学, 1994, **15**(4): 27-29.

[6] 赵宏伟, 钟秀萍, 刘阳生, 等. 深圳市清水河垃圾焚烧厂周围地区优势植物的汞污染研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2786-2791.

[7] Brunner P H, Mönch H. The flux of metals through municipal solid waste incinerators [J]. Waste Management & Research, 1986, **4**(1): 105-119.

[8] 汤庆合, 丁振华, 江家骅, 等. 大型垃圾焚烧厂周边环境汞影响的初步调查 [J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 196-199.

[9] 刘春阳, 张宇峰, 滕洁. 土壤中重金属污染的研究进展 [J]. 污染防治技术, 2006, **19**(4): 42-45.

[10] 王定勇, 石孝洪, 杨学春. 大气汞在土壤中转化及其与土壤汞富集的相关性 [J]. 重庆环境科学, 1998, **20**(5): 22-25.

[11] 张刚, 王宁, 王媛, 等. 松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征 [J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 2953-2959.

[12] Rimmer D L, Vizard C G, Pless-Mulloli T, *et al.* Metal contamination of urban soils in the vicinity of a municipal waste incinerator: one source among many [J]. Science of the Total Environment, 2006, **356**(1-3): 207-216.

[13] 王俊坚, 赵宏伟, 钟秀萍, 等. 垃圾焚烧厂周边土壤重金属浓度水平及空间分布 [J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 298-304.

[14] Meneses M, Llobet J M, Granero S, *et al.* Monitoring metals in the vicinity of a municipal waste incinerator: temporal variation in soils and vegetation [J]. Science of the Total Environment, 1999, **226**(2-3): 157-164.

[15] Shi J B, Meng M, Shao J J, *et al.* Spatial distribution of mercury in topsoil from five regions of China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(3): 1756-1761.

[16] Morselli L, Passarini F, Bartoli M. The environmental fate of heavy metals arising from a MSW incineration plant [J]. Waste Management, 2002, **22**(8): 875-881.

[17] Wang J J, Zhao H W, Zhong X P, *et al.* Investigation of mercury levels in soil around a municipal solid waste incinerator in Shenzhen, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **64**(4): 1001-1010.

[18] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 354.

[19] Carpi A. Mercury from combustion sources: a review of the chemical species emitted and their transport in the atmosphere [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1997, **98**(3-4): 241-254.

[20] Cheng H F, Hu Y A. Mercury in municipal solid waste in China and its control: a review [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(2): 593-605.

[21] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准 [S].

- [22] 王凌青, 卢新卫, 王利军, 等. 宝鸡燃煤电厂周围土壤环境 Hg 污染及其评价 [J]. 土壤通报, 2007, **38**(3): 622-624.
- [23] Schuhmacher M, Meneses M, Granero S, *et al.* Trace element pollution of soils collected near a municipal solid waste incinerator; human health risk [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1997, **59**(6): 861-867.
- [24] Dao L G, Morrison L, Kiely G, *et al.* Spatial distribution of potentially bioavailable metals in surface soils of a contaminated sports ground in Galway, Ireland [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2013, **35**(2): 227-238.
- [25] Imperato M, Adamo P, Naimo D, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) [J]. Environmental Pollution, 2003, **124**(2): 247-256.
- [26] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 522.
- [27] 王利军, 卢新卫, 荆淇, 等. 宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(2): 325-330.
- [28] 杨刚, 伍钧, 孙百晔, 等. 雅安市耕地土壤重金属健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(S1): 74-79.
- [29] 陈奔, 邱海源, 郭彦妮, 等. 尤溪铅锌矿集区重金属污染健康风险评估研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2012, **51**(2): 245-251.
- [30] EPA/540/1-89/002. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (PartA) [S].
- [31] DB11 T 656-2009, 场地环境评价导则[S].
- [32] Vilavert L, Nadal M, Schuhmacher M, *et al.* Concentrations of metals in soils in the neighborhood of a hazardous waste incinerator; assessment of the temporal trends [J]. Biological Trace Element Research, 2012, **149**(3): 435-442.
- [33] Du Y R, Gao B, Zhou H D, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in road dusts in urban parks of Beijing, China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, **18**: 299-309.
- [34] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(8): 2006-2015.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUO Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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