

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

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

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估

廖志恒^{1,2}, 孙家仁^{1,2*}, 吴兑^{2,3}, 范绍佳², 任明忠¹, 吕家扬¹

(1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 3. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

摘要: 采用 CALPUFF 模式模拟某城市垃圾焚烧烟气中重金属 Pb 和 Cd 的地面大气浓度, 并借助土壤浓度模型以 Monte Carlo 模拟不确定性处理方法估算重金属经沉降在土壤中的累积, 最后利用潜在生态危害指数法对重金属在土壤中的长期累积量进行生态风险评估。结果表明, Pb 和 Cd 的大气浓度最大值分别为 $5.59 \times 10^{-3} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $5.57 \times 10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 土壤浓度增量中值最大分别为 $2.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 高生态风险区集中在焚烧炉附近的下风向地区, 生态风险主要由 Cd 贡献, Pb 基本无污染风险; 城市最大污染点达较高生态危害水平概率为 55.30%, 农村最大污染点达中等生态危害水平概率达 72.92%。此外, 对土壤浓度模型的参数进行敏感性分析表明, 城、乡区域模拟结果分别对土壤混合厚度和干沉降速率敏感性最强。

关键词: CALPUFF 模式; 重金属; 潜在生态危害指数法; Monte Carlo 模拟; 生态风险评估

中图分类号: X131; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2264-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.06.031

Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission

LIAO Zhi-heng^{1,2}, SUN Jia-ren^{1,2*}, WU Dui^{2,3}, FAN Shao-jia², REN Ming-zhong¹, LÜ Jia-yang¹

(1. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 2. School of Environmental Science and Engineer, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The CALPUFF model was applied to simulate the ground-level atmospheric concentrations of Pb and Cd from municipal solid waste incineration (MSWI) plants, and the soil concentration model was used to estimate soil concentration increments after atmospheric deposition based on Monte Carlo simulation, then ecological risk assessment was conducted by the potential ecological risk index method. The results showed that the largest atmospheric concentrations of Pb and Cd were $5.59 \times 10^{-3} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $5.57 \times 10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, while the maxima of soil concentration incremental medium of Pb and Cd were $2.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively; High risk areas were located next to the incinerators, Cd contributed the most to the ecological risk, and Pb was basically free of pollution risk; Higher ecological hazard level was predicted at the most polluted point in urban areas with a 55.30% probability, while in rural areas, the most polluted point was assessed to moderate ecological hazard level with a 72.92% probability. In addition, sensitivity analysis of calculation parameters in the soil concentration model was conducted, which showed the simulated results of urban and rural area were most sensitive to soil mix depth and dry deposition rate, respectively.

Key words: CALPUFF model; heavy metals; potential ecological risk index method; Monte Carlo simulation; ecological risk assessment

城市生活垃圾焚烧 (municipal solid waste incineration, MSWI) 处理技术是经济发达城市生活垃圾管理方式的重要组成部分, 具有显著的减量化、无害化、资源化等特征。目前, 我国的垃圾焚烧厂主要分布在经济发达地区和一些大城市, 随着经济发展, 中西部地区越来越多的城市也选择了建设生活垃圾焚烧厂^[1]。然而, 生活垃圾的焚烧处理不可避免地会产生各种二次污染物^[2], 其中, 排放烟气中的重金属污染物及其对人体健康、生态物种的潜在危害已成为人们关注的热点话题。与其它污染物不同, 重金属污染威胁在于其不能被微生物所降解,

在地表环境中具有累积性, 可被农作物吸收、富集, 从而引起代谢失调, 生长发育受阻或导致遗传变异, 并通过食物链直接威胁人们的健康和安全^[3]。

我国采用城市生活垃圾混合收集方式, 含重金属垃圾未经分选直接进入垃圾焚烧过程, 易导致较

收稿日期: 2013-10-16; 修订日期: 2014-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41105082, 41275017); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2011CB403403); 环境保护公益性行业科研专项 (2011467001, 201409022); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (PM-zx021-201211-103, PM-zx021-201211-024)

作者简介: 廖志恒 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: lzhiheng118@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sunjiaren@scies.org

高的重金属排放浓度,重金属经干湿沉降在地表土壤一旦形成高浓度积累,可能给生态环境带来污染隐患。目前,国内已有垃圾焚烧炉周边地区环境重金属污染的相关报道^[4,5],随着垃圾焚烧处理工程的推进,在建或拟建的焚烧厂将陆续投入运营,生态环境将面临更大的风险挑战。因此,不论是在垃圾焚烧处理设施建设前后,都有必要对排放的重金属污染物的生态环境风险进行预测评估。迄今国内外对垃圾焚烧的风险评估多集中于其对人体健康风险评估方面^[6~8],在生态风险评估方面,虽然对焚烧厂周边环境土壤重金属浓度及植物体重金属含量进行了较多监测研究^[9~11],然而由于背景浓度资料的匮乏以及重金属来源的多样性,监测到的重金属浓度增量是否来源于垃圾焚烧厂,垃圾焚烧厂贡献的大小等问题仍然缺乏证据来证明或定量,因此难以单一地对垃圾焚烧源的影响进行评价。

由于以上考虑,本文借助数值模拟技术,在综合考虑气象、地形分布等影响因素的基础上,对广东省某区域已建和拟建(论证阶段)的多个垃圾焚烧厂,采用其设计排放源强,对焚烧炉排放的重金属 Pb 和 Cd 的迁移过程进行模拟,模拟其在大气中的浓度分布,并采用计算模型估算重金属通过干湿沉降在地表土壤中的累积,据此,从区域性角

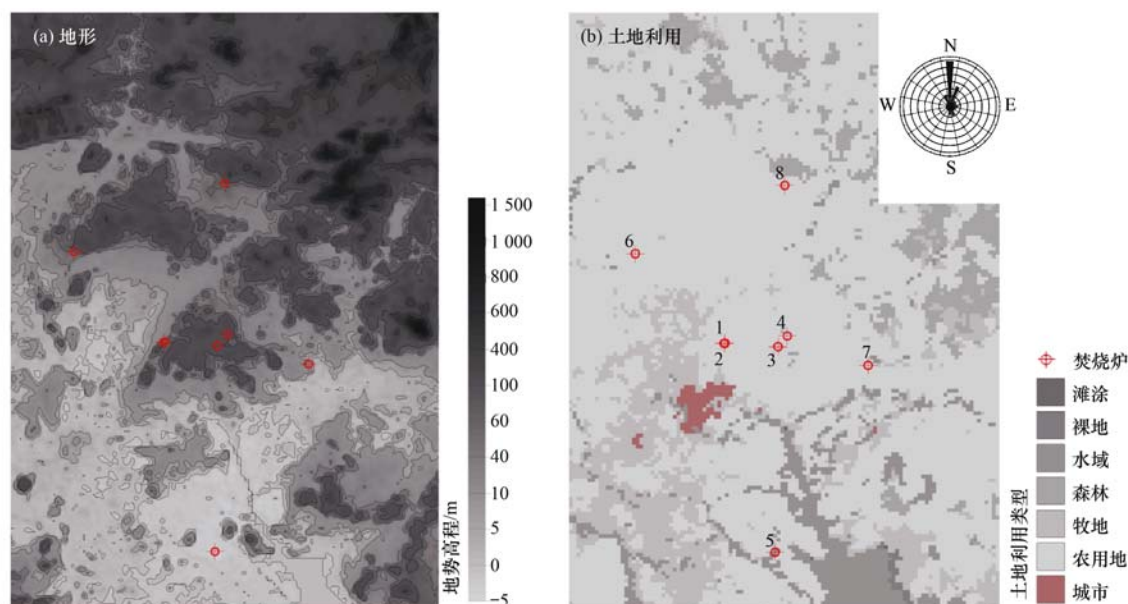
度单一地评估垃圾焚烧厂炉排放重金属对生态环境的影响。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所使用的数据资料主要包括地形、土地利用资料、地面/高空气象要素和排放源数据。地形高程资料选用美国地质调查局(USGS)航天飞机雷达拓扑测绘(SRTM3)90 m × 90 m 分辨率的数据,土地利用类型资料为 USGS 全球土地覆盖特征(GLCC)1 km × 1 km 分辨率的数据。地面气象数据(包括风向风速、气温、相对湿度、低云量、总云量和降水量等)来源于研究区域4个气象站2012年逐时观测数据,因研究区域范围内没有探空站,逐时的高空气象数据资料采用第五代中尺度气象模式MM5进行模拟,模拟过程充分借鉴了广东省气象局多年预报模拟经验。

研究地区地势北高南低,区域年主导风向为偏北风,次主导风为偏东北风(见图1),区域内规划垃圾焚烧厂共计8个,各焚烧炉排放特征参数详见表1。为了获取降水量的概率分布以进行土壤浓度增量估算,对研究区域1952~2012年的年降水量进行了拟合,年降水量数据源自中国气象科学数据共享服务网。



右上角为年风向频率分布

图1 研究区域地形及土地利用类型

Fig. 1 Regional terrain and land use

1.2 研究方法

采用 CALPUFF 模式^[12]模拟研究垃圾焚烧排放重金属的年平均地面大气浓度空间分布,再基于各

网格区域的大气浓度值,借助土壤浓度计算模型^[6,7,13]估算由干湿沉降导致的土壤浓度累积增量,最后采用潜在生态风险指数法^[14]进行生态风险评

表 1 垃圾焚烧排放源特征参数

Table 1 Characteristic parameters of MSWI sources

烟囱编号	状态	设计烟气流量 /m ³ ·h ⁻¹	Pb 设计排放标准 /mg·m ⁻³	Cd 设计排放标准 /mg·m ⁻³
1	已运营	198 146	0.5	0.05
2	在建	436 350	0.5	0.05
3	拟建	290 900	0.5	0.05
4	拟建	436 350	0.5	0.05
5	拟建	436 350	0.5	0.04
6	拟建	290 900	0.5	0.05
7	拟建	436 350	0.5	0.05
8	拟建	209 576	0.5	0.05

估. 为了更深入地揭示各过程对生态风险评估的不确定性,土壤浓度增量以及生态风险指数的计算过程运用 Monte Carlo 模拟技术进行多次抽样.

1.2.1 大气扩散模式

CALPUFF 由西格玛研究公司开发,是美国国家环保署长期支持开发的法规导则模式,也是我国环境保护部颁布的《环境影响评价技术导则大气导则》(修订版)推荐的模式之一. 它是一个非稳态拉格朗日烟团模式系统,采用时变的气象场资料,考虑复杂地形的动力学效应以及静风等非稳态条件,能很好地模拟不同尺度污染物扩散情景,可以处理连续排放、间断排放情况,能够追踪质点在空间与时间上随流场的变化规律^[12]. 研究选取 2012 年气象资料作为模式气象场输入,模拟范围设置为 116 km (东西方向) × 160 km (南北方向),建立起覆盖整个研究区域的水平分辨率为 1 km × 1 km 的受体网格,共计 18 560 个. 由于重金属化学性质稳定,模式中不考虑其化学转化,干湿沉降过程在土壤浓度计算模型另行计算,模式中也不予以考虑. 最后将所获得的地形、土地利用类型、气象及焚烧炉排放数据转换成合适的格式输入到模式中进行地面大气浓度 c_a 的模拟.

1.2.2 土壤浓度计算模型

大气中重金属颗粒物经干湿沉降过程在地表土壤积累,可能造成表层土壤重金属浓度升高. 采用土壤浓度模型模拟城市和农村下垫面土壤重金属输入和消散(降解)的整体长期效应^[6,7,13],其计算方法如下:

$$D_{\text{tot}} = D_{\text{dry}} + D_{\text{wet}} = c_a \cdot V_d + c_a \cdot W \cdot H \quad (1)$$

$$c_s = \frac{D_{\text{tot}} \cdot [1 - \exp(-k_s \cdot t)]}{z \cdot k_s \cdot BD} \quad (2)$$

式中, D_{tot} 为年平均总沉降通量 [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], D_{dry} 为年平均干沉降通量 [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], D_{wet} 为年平均

湿沉降通量 [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], c_a 为地面大气浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), V_d 为干沉降速率 ($\text{cm} \cdot \text{s}$), W 为下洗系数 (无量纲), H 为年降水量 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$), c_s 为土壤浓度增量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), BD 为土壤密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), k_s 为损失系数 (a^{-1}), t 为排放年限 (a), z 为土壤混合厚度 (cm). 计算过程中需对参数量纲进行统一.

由于计算参数所限,研究仅考虑城市和农村两种下垫面条件,因此对所有非城市区域(农用地、牧地、森林、水域等)均当作农村下垫面处理; Pb 和 Cd 在烟气中均以颗粒态形式存在,粒径相当,因此采用相同的干沉降速率、下洗系数及损失系数.

1.2.3 潜在生态危害指数法

潜在生态风险指数法是瑞典 Hakanson 于 1980 年研究水污染控制时建立的一种计算水体中重金属等主要污染物的沉积学方法^[14],现在在土壤重金属污染评价中应用较多,对大气降尘重金属的生态风险评价也适用^[15,16]. 其计算公式如下:

$$C_i^i = \frac{c_i}{c_n^i}, \quad E_r^i = T_r^i \times C_i^i, \quad RI = \sum E_r^i \quad (3)$$

式中, c_i 为重金属 i 实测浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), c_n^i 为全球工业化前沉积物中重金属 i 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_i^i 为重金属 i 的污染系数 (无量纲), T_r^i 为重金属 i 生物毒性系数 (无量纲), E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数 (无量纲), RI 为多种金属潜在生态风险指数 (无量纲).

本研究 c_n^i 取研究区域 1990 年土壤浓度背景值^[17], c_i 设为浓度增量与背景浓度之和. 根据研究涉及的重金属种类和数量,考虑各元素毒性系数的权重,参照文献[18],对 Hakanson 制定的指标分级评价标准进行了修订,表 2 为经过修订的生态风险程度等级划分标准.

1.2.4 Monte Carlo 模拟

Monte Carlo 模拟又称统计实验法,是一种通过

对每一参数进行抽样,将其代入数据模型中确定函数值的模拟技术,是目前解决风险评估中随机性和不确定性问题最为有效的方法之一^[19,20]。本研究涉及的输入参数及其概率分布见表 3,模拟过程对每个网格点进行了1 000次抽样计算。

1.2.5 数据处理与图形绘制

采用 Crystal Ball 软件进行数据的 Monte Carlo 模拟处理,利用 ArcGIS 9.3 和 Origin 8.1 进行图形绘

制,并以 Photoshop CS6 软件对图件进行加工处理。

表 2 潜在生态风险评价指标和等级划分

Table 2 Evaluation index and grade division of potential ecological risk

E_r^i	RI	风险等级	风险程度
<30	<35	I	生态危害低
30~60	35~70	II	生态危害中等
60~120	70~140	III	生态危害较高
120~240	140~280	IV	生态危害高
≥240	≥280	V	生态危害极高

表 3 参数及其分布¹⁾

Table 3 Parameter and its probability distribution

参数	概率分布型	参数(城市/农村)	数据来源
$c_a/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	确定值	与网格点有关	CALPUFF 模拟
$V_d/\text{cm}\cdot\text{s}$	Gamma 分布	$L=1.25/1.17$ $Sc=1.28/1.37$ $Sh=3.50/2.88$	[6]
W	Gamma 分布	$L=76.98$ $Sc=558\,000$ $Sh=0.16$	[21~23]
$H/\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	Beta 分布	1 150~2 990 $\alpha=1.64$ $\beta=3.49$	气象数据拟合
$BD/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	对数正态分布	$M_g=1.39$ $SD_g=1.11$ [0.93~1.84]	[24]
k_s/a^{-1}	正态分布	$M=0.06/0.03$ $SD=0.01$	[6]
t/a	三角分布	30~40~60	[25]
z/cm	均匀分布	1~5(城市) 10~20(农村)	[25,26]
$c_n^i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	确定值	47.1(Pb) 0.144(Cd)	[17]
T_r^i	确定值	5(Pb) 30(Cd)	[14]

1) L 为位置参数, Sc 为尺度参数, Sh 为形状参数, M 为均值, SD 为标准差,[~]表示限定分布范围

2 结果与分析

2.1 浓度分布

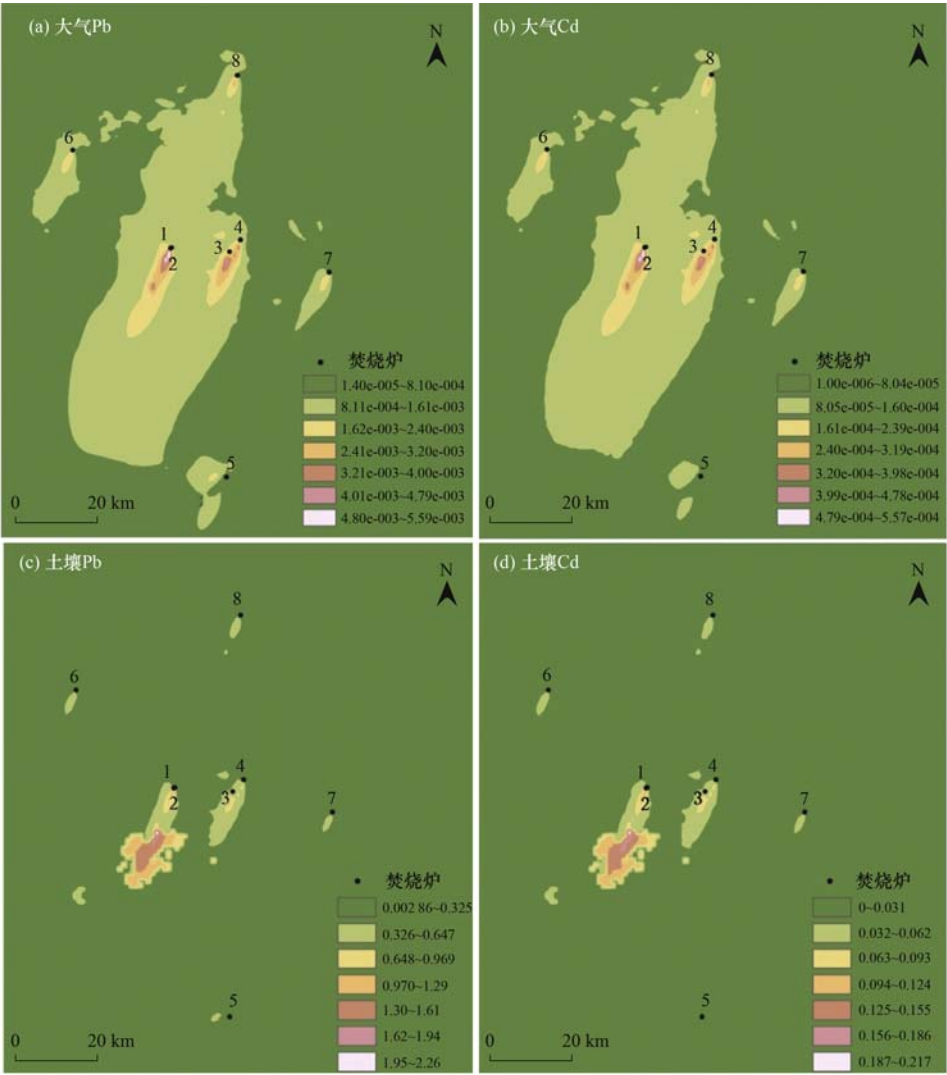
图 2 为 Pb 和 Cd 的大气浓度和土壤浓度的空间分布。可见,受主导风的影响,污染物自东北向西南方向扩散,大气浓度分布曲线呈狭长分布,焚烧炉附近的下风向区域污染物浓度较高。重金属土壤浓度增量来源于大气污染物的干湿沉降,因此大气浓度高值区对应的土壤浓度增量值也相对较高,而城市下垫面因其较小的土壤混合厚度,土壤浓度增量明显偏高。整个区域内,Pb 和 Cd 的大气浓度最大值分别为 $5.59\times10^{-3}\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $5.57\times10^{-4}\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,土壤浓度增量中值最大分别为 $2.26\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.21\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与大气环境浓度限值(Pb: $0.5\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,Cd: $5.0\times10^{-3}\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[27] 和土壤浓度背

景值(Pb: $47.1\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd: $0.144\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[17] 相比,Pb 的大气浓度和土壤浓度增量均较小,而 Cd 的大气浓度最高可达大气浓度限值的十分之一,土壤浓度中值最高可达背景浓度的 1.5 倍。

2.2 生态风险评估

2.2.1 生态风险空间分布

图 3 为重金属 Pb 和 Cd 的潜在生态风险指数 RI(系数 E_r^i)空间分布,其分布情况与土壤浓度分布一致。图 3(a)为 Pb 的生态风险系数中值(最可能值)的分布,可见,区域内 Pb 生态风险系数较低,中值约为 5,考察 90% 分位值(可能最大值,图略)发现风险系数最大也仅为 6,远低于单一金属 I、II 级生态风险划分值 30,表明垃圾焚烧厂炉排放重金属 Pb 在土壤中的累积量所造成的生态危害较低;由 Cd 的生态风险系数中值的空间分布[图 3(b)]可



大气: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 土壤: $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

图2 浓度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of concentration

见,相比于 Pb, Cd 的生态风险系数明显偏高,焚烧炉附近的下风向地区,风险系数达 35 以上,属Ⅱ级生态风险水平,生态危害中等,1、2 号炉下风向的部分城市区域生态风险偏高,可达Ⅲ级生态危害水平. Cd 的生态风险系数较高,主要是由于 Cd 的土壤浓度背景值极低而生态毒性水平较高所致. 图 3 (c) 为综合生态风险指数中值分布,其与 Cd 的生态风险系数中值分布较一致,表明生态风险主要由 Cd 贡献,且风险指数越大, Cd 的贡献率越高. 图 3 (d) 为综合生态风险指数 90% 分位值分布,相对于中值,生态风险系数在大部分地区变化不大,在焚烧炉附近的下风向地区则明显增加.

2.2.2 生态风险概率分布

城、乡大气浓度最大值点分别对应于城、乡区域土壤浓度增量最大值点,出现在 1、2 号源主导风

下风向约 11.6 km 和 1.8 km 处(不妨称其为城、乡最大污染点). 图 4 为城、乡最大污染点生态风险指数 RI 的累计概率分布,10% ~ 90% 分位值为可能出现情况^[6],因此城、乡最大污染点的风险指数可能出现范围分别为 55.33 ~ 138.40 和 46.50 ~ 83.90,风险等级处于Ⅱ ~ Ⅲ级之间,其概率分布均近似遵循对数正态分布,分布参数为 $L = 42.71/38.86$, $M_g = 91.24/40.39$, $SD_g = 62.45/16.91$ (城/乡). 进一步统计城、乡最大污染点的生态风险程度概率分布情况(图 5)表明,城市最大污染点生态风险达Ⅲ级危害水平概率最大,概率值为 55.30%,其次为Ⅱ级(概率值 34.83%);农村最大污染点生态风险程度可能为Ⅱ级,概率为 72.92%.

2.3 敏感性分析

敏感性分析通常认为是概率不确定性分析结果

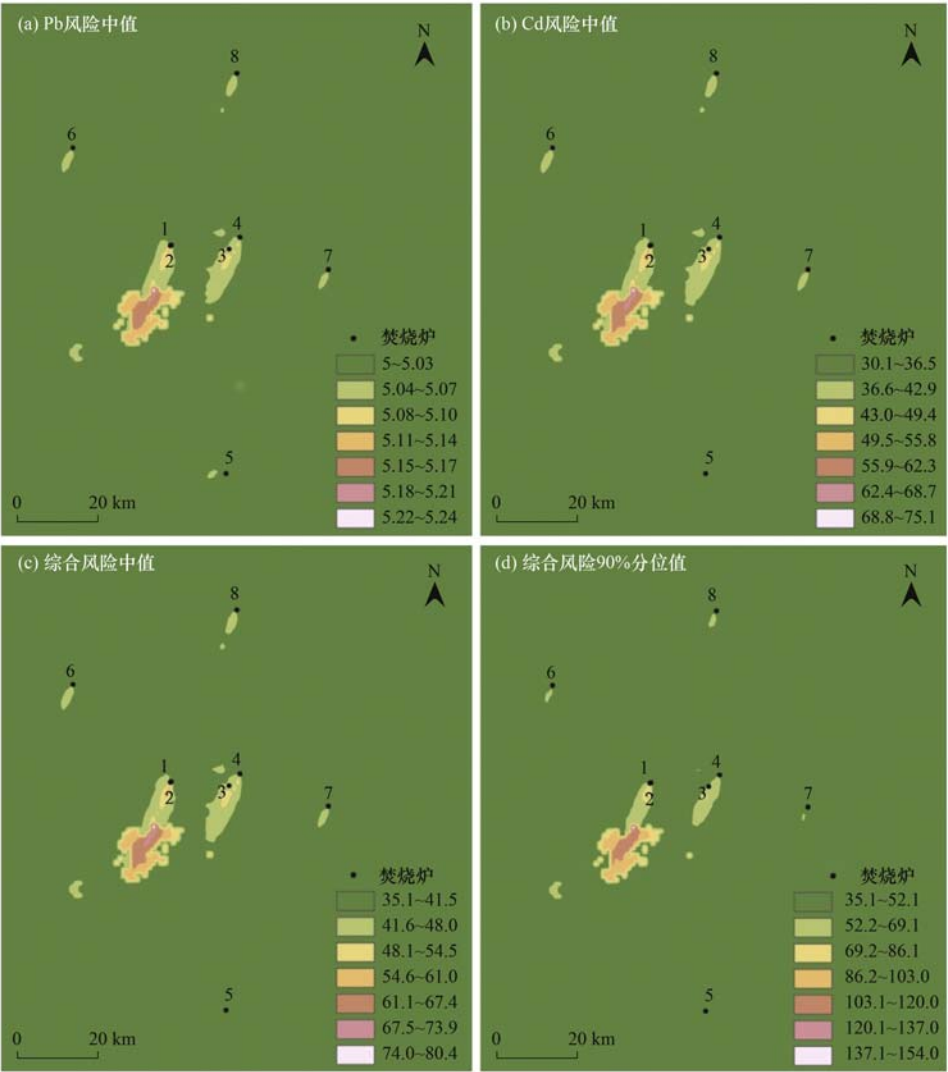


图3 生态风险指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of potential ecological risk index

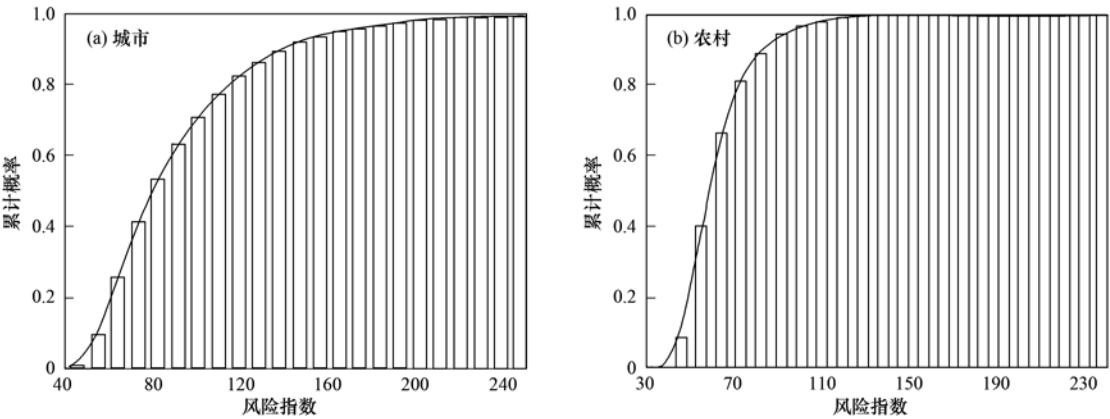


图4 最大污染点风险指数的累计概率分布

Fig. 4 Cumulative probability distribution of risk index in the most polluted areas

的一部分,反映各参数对评价结果的动态扰动^[19,20,28].通过 Monte Carlo 随机模拟土壤浓度模型中计算参数与土壤浓度增量的相关性来判断各参

数对评价结果影响的相对大小.图6为敏感性分析结果,可见,城市区域土壤浓度增量与土壤混合厚度以及干沉降速率具有较强相关性,相关系数在 0.5

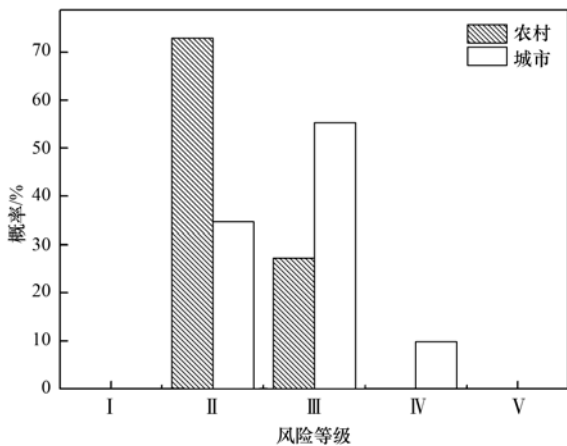


图5 最大污染点风险程度概率分布

Fig. 5 Probability distribution of risk grade in the most polluted areas

以上,表明土壤混合厚度和干沉降速率对城市区域的模拟结果影响较大.与城市区域相比,农村区域模拟结果对土壤混合厚度敏感性有明显下降,对于干沉降速率敏感性增加,模拟结果与干沉降速率之间的相关系数达0.72.对于此类敏感性参数,因其对模拟结果有较大影响,因此其精确性需要进一步研究予以验证.

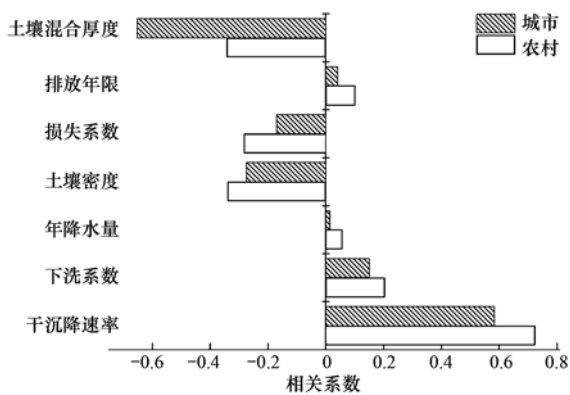


图6 参数敏感性

Fig. 6 Parameter sensitivity

3 讨论

由于垃圾成分的复杂性以及污染源的多样性,目前学者们针对垃圾焚烧产生的二次污染的研究结果中还存在许多相悖之处^[29-31],主要集中于垃圾焚烧炉周围污染物来源的解析问题上.鉴于土壤实测研究对污染源解析的复杂性,本研究利用模型模拟,追踪垃圾焚烧排放污染物的迁移轨迹来研究其对生态风险的影响.对比国内外的研究,本研究模拟的地面大气浓度最大值高于国外报道^[6,7]的模拟结果(高1~4个数量级),低于国内报道^[32]的实测

结果(低约2个数量级),而模拟的土壤浓度累计增量中值与国内运营多年的焚烧炉周围土壤实测浓度增量^[10]差异却不大(1个数量级以内).与国外相比,国内模拟的地面大气浓度明显偏高,这与国内外垃圾焚烧重金属排放源强存在数量级的差异有关,而模拟值较实测值偏低,表明垃圾焚烧炉排放的重金属污染物对环境贡献量较低.

研究借助 Monte Carlo 方法模拟城市垃圾焚烧排放重金属的生态风险指数,在一定程度上反映了风险评价的系统随机性和不确定性水平.理想情况应该是任何相关参数均由概率密度函数表征,但是由于缺乏焚烧厂排放速率的实测数据,且国内外焚烧厂排放速率差别较大,使得直接替代研究不合理,因此排放速率采用设计值;另外,由于土壤浓度累积是多年干湿沉降的结果,因此年平均地面大气浓度由多年的气象条件模拟取其均值可能更准确,但本研究可利用的气象数据仅有研究区域2012年的4个地面观测站的逐时气象数据,且研究区域无高空数据,高空数据采用中尺度模式模拟结果代替,这些可能使土壤浓度积累增量计算值产生一定误差;此外,关于土壤重金属元素背景值和毒性响应系数,文献资料基本仅提供相应的统计值,无法获得原始数据信息,因此这两个参数的概率分布函数也难以确定,最终也按确定值来处理,而实际上这两个参数的变化情况复杂,重金属元素背景值在区域内必然存在空间上的差异,而生态毒性水平还与重金属的赋存形态有一定关系,且当多种重金属同时存在时,重金属间的拮抗或协同作用对毒性效应也有影响^[11].对于研究已采用的由概率密度函数表征的计算参数,其概率分布函数的确定多基于国外的相关研究,考虑这些参数可能存在的地域差异,特别是干沉降速率等敏感参数,也会使计算结果产生一定误差.有关学者对深圳市清水河垃圾焚烧厂的研究就认为在气温高、降水量大的自然条件下,酸性土壤受到强烈的风化和淋溶使得土壤中微量元素含量明显降低,致使重金属浓度检测水平低于估算的25年累积输入量^[10].鉴于以上因素对生态风险评估可能产生的不确定性,因此有必要对这些因素进行进一步研究.

4 结论

(1) Pb 和 Cd 大气浓度最大值分别为 $5.59 \times 10^{-3} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $5.57 \times 10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 土壤浓度中值最大分别为 $2.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

(2) 高生态风险区集中在焚烧炉附近的下风向地区, 生态风险主要由 Cd 贡献, Pb 基本无污染风险。

(3) 城市最大污染点可能达较高生态危害水平, 概率为 55.30%, 农村最大污染点可能达中等生态危害水平, 概率达 72.92%。

(4) 城、乡区域模拟结果分别对土壤混合厚度和干沉降速率敏感性最强, 此类敏感参数的精确性需要再进一步研究。

参考文献:

- [1] 中国环境保护产业协会城市生活垃圾处理委员会. 我国城市生活垃圾处理行业 2012 年发展综述[J]. 中国环保产业, 2013, 3(1): 20-26.
- [2] Valberg P A, Drivas P J, McCarthy S, *et al.* Evaluating the health impacts of incinerator emissions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1996, 47(1-3): 205-227.
- [3] Azimi S, Rocher V, Muller M, *et al.* Sources, distribution and variability of hydrocarbons and metals in atmospheric deposition in an urban area [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 337(1-3): 223-239.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Lonati G, Zanoni F. Probabilistic health risk assessment of carcinogenic emissions from a MSW gasification plant [J]. *Environment International*, 2012, 44(1): 80-91.
- [7] Federico C, Gianluca I, Lorenzo L, *et al.* Health risk assessment of air emissions from a municipal solid waste incineration plant - A case study[J]. *Waste Management*, 2008, 28(5): 885-895.
- [8] 孙冬, 王玉才, 谢春梅. 垃圾焚烧烟气中污染物对人体健康风险评估[J]. *环境卫生工程*, 2004, 12(3): 144-147.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 钟秀萍, 王俊坚, 赵宏伟, 等. 垃圾焚烧厂周围优势植物的重金属污染特征研究[J]. *北京大学学报*, 2010, 46(4): 674-680.
- [12] USEPA. A comparison of CALPUFF modeling results to two tracer field experiments [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/scram/7thconf/calpuff/tracer.pdf>.
- [13] 许梦侠. 城市生活垃圾焚烧厂二恶英排放的环境影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 83-87.
- [14] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [15] 胡恭任, 戚红璐, 于瑞莲, 等. 大气降尘中重金属形态分析及生态风险评估[J]. *有色金属*, 2011, 63(2): 286-291.
- [16] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 天津采暖期大气 PM_{2.5} 中重金属元素污染及其生态风险评估[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(9): 1596-1600.
- [17] 广东省环境监测中心站. 广东省土壤环境背景值调查研究[R]. 广州: 广东省环保局, 1990.
- [18] 侯千, 马建华, 王晓云, 等. 开封市幼儿园土壤重金属生物活性及潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2011, 32(6): 1764-1771.
- [19] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 基于 Monte Carlo 模拟的潜在生态危害指数模型及其应用[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(12): 1336-1343.
- [20] 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 等. 基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评估[J]. *环境科学*, 2012, 33(4): 1091-1097.
- [21] Arimoto R, Duce R A, Roy B J, *et al.* Trace elements in the atmosphere of American Samoa; concentrations and deposition to the tropical South Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(D7): 8465-8479.
- [22] Koester C J, Hites R A. Wet and dry deposition of chlorinated dioxins and furans[J]. *Environmental Science and Technology*, 1992, 26(7): 1375-1382.
- [23] Sakata M, Marumoto K, Marukawa M, *et al.* Regional variations in wet and dry deposition fluxes of trace elements in Japan[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(3): 521-531.
- [24] Travis C C. Municipal waste incineration risk assessment: deposition, food chain impacts, uncertainty, and research needs [M]. New York: Plenum Press, 1991. 314.
- [25] Kumar V, Mari M, Schuhmacher M, *et al.* Partitioning total variance in risk assessment: application to a municipal solid waste incinerator [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2009, 24(2): 247-261.
- [26] Bakoglu M, Karademir A, Durmusoglu E. Evaluation of PCDD/F levels in ambient air and soils and estimation of deposition rates in Kocaeli, Turkey[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(10): 1373-1385.
- [27] GB 3095-2012 环境空气质量标准[S].
- [28] Liu Z Q, Zhang Y H, Li G H, *et al.* Sensitivity of key factors and uncertainties in health risk assessment of benzene pollutant [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(10): 1272-1280.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Bretzel F, Calderisi M. Contribution of a municipal solid waste incinerator to the trace metals in the surrounding soil [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 182(1): 523-533.
- [32] 张海龙, 李祥平, 林必桂, 等. 珠三角某垃圾焚烧厂周边环境空气重金属分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(7): 1833-1839.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuaishui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 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