

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

城市生活垃圾露天焚烧排放 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征及其暴露健康风险

程轲¹, 季婉婉¹, 郝伟伟¹, 王艳^{1,2}, 易鹏³, 支国瑞³, 张佳羽¹, 张洋¹, 张诗澜¹

(1. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 新乡 453007; 2. 新乡医学院公共卫生学院, 新乡 453003; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 利用烟气稀释采样系统, 针对不同功能区城市生活垃圾(MSW)样品, 分别考虑桶内焚烧和自然堆积焚烧两种常见露天焚烧方式, 对城市生活垃圾露天焚烧排放 $PM_{2.5}$ 中重金属的污染特征及其居民暴露健康风险进行分析和评估。结果表明, 5种不同组分垃圾焚烧排放的重金属中, 锌(Zn)含量均为最高, 可达 $1\,324.03 \sim 3\,703.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 镉(Cd)含量最低, 为 $20.25 \sim 63.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 地累积指数结果显示, 铅(Pb)、Zn、砷(As)和Cd的污染程度较高, 自然堆积焚烧下均已达中度及以上污染水平, Cd的地累积污染指数远大于5; 人体健康风险评估结果表明, 8种重金属(Pb、Zn、Cu、Mn、As、Cd、Cr和Ni)经呼吸暴露的非致癌风险值均小于1, 属于安全范围内; 自然堆积焚烧下, As和Pb对儿童经皮肤接触的非致癌总风险值大于1, 存在非致癌风险; 4种致癌元素(As、Cd、Cr和Ni)的致癌风险值均小于 1.0×10^{-4} , 但若长期处于这种环境下, 会存在较低的潜在致癌风险。

关键词: 城市生活垃圾(MSW); 露天焚烧; 地累积指数法(I_{geo}); 重金属; 健康风险评估

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4337-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903242

Characteristics of Heavy Metal Pollutants of $PM_{2.5}$ from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks

CHENG Ke¹, JI Wan-wan¹, HAO Wei-wei¹, WANG Yan^{1,2}, YI Peng³, ZHI Guo-rui³, ZHANG Jia-yu¹, ZHANG Yang¹, ZHANG Shi-lan¹

(1. Key Laboratory of Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. School of Public Health, Xinxiang Medical University, Xinxiang 453003, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The characteristics and health risk assessment for heavy metal pollutants in $PM_{2.5}$ discharged from the open burning of municipal solid waste (MSW) in different functional areas were studied using a flue gas diluted sampling system. The two common open burning modes of barrel and natural pile-up burning were considered. The results show that the concentration of zinc (Zn) was the highest among the heavy metals produced by five different components of waste incineration, ranging from $1\,324.03$ to $3\,703.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The concentration of cadmium (Cd) was the lowest, ranging from 20.25 to $63.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. According to the geo-accumulation index, lead (Pb), Zn, arsenic (As), and Cd were highly polluted in the measured MSW samples, and all four of these metals reached moderate or higher levels of pollution under natural pile-up burning methods. The geo-accumulation index of Cd was much higher than 5. The results of the human health risk assessment showed that non-carcinogenic risk values for 8 heavy metals (Pb, Zn, Cu, Mn, As, Cd, Cr, and Ni) by respiratory exposure were less than 1, which is within the safe range. For natural pile-up burning, the total non-carcinogenic risk values for As and Pb for children were higher than 1, indicating a non-carcinogenic risk. The carcinogenic risk values for four carcinogenic elements (As, Cd, Cr, and Ni) were less than 1.0×10^{-4} , but still represented a low potential carcinogenic risk under exposure for long periods of time.

Key words: municipal solid waste(MSW); open burning; geo-accumulation index method(I_{geo}); heavy metals; health risk assessment

随着中国城市化进程不断深入和经济不断发展, 产生了大量的城市垃圾, 导致全国过半城市都存在“垃圾围城”的现象^[1]. 垃圾含有大量的微生物, 是病菌、病毒和害虫等的滋生地和繁殖地, 严重危害人身健康^[2]. 长期垃圾堆放不仅侵占地表、传播疾病, 而且污染土壤和水体; 垃圾中的臭气随风飘散, 细小固体废物随风飞扬, 加重大气污染, 因此生活垃圾无害化处理问题研究迫在眉睫^[3]. 堆肥、填埋和焚烧是城市生活垃圾无害化处理的常见方

式^[4]. 相比于堆肥和填埋处理, 焚烧处理具有显著的减量化效果, 并可回收余热, 逐渐成为国内外生活垃圾处置的主要方法. 与焚烧炉焚烧相比, 露天焚烧

收稿日期: 2019-03-26; 修订日期: 2019-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(21507024, 21407122); 中国博士后科学基金项目(2015M580631); 河南省博士后科研项目(2015074, 2015077); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0209)

作者简介: 程轲(1984~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为典型人为源大气污染物排放特征, E-mail: 18858154190@163.com

虽然被法律禁止,但由于操作简单、方便,且节省清运成本^[5],在城市区域尤其是中小城市仍频繁发生且屡禁不止。

生活垃圾成分复杂,含有大量纸类、橡胶塑料、木竹类、金属及电池等组分^[6]。露天焚烧过程属于低温、不完全燃烧,且燃烧后无任何处理设施,会产生大量的大气污染物^[7,8]。重金属是露天焚烧排放的主要污染物之一。即使在低浓度下,部分重金属仍属于有毒的或致癌的元素^[9]。在露天焚烧过程中,垃圾中含有的重金属元素会分解释放出来,附着于细颗粒物上并在大气中长时间停留,易通过呼吸和皮肤接触等进入人体,对人体健康造成不良影响。

近年来,国内外对垃圾焚烧产生的重金属的研究主要集中于垃圾焚烧炉或垃圾焚烧厂飞灰^[10~12]、周围空气环境^[13~15]和土壤环境中重金属^[16~18]的污染特征及其风险评价。然而,对于露天焚烧生活垃圾排放的PM_{2.5}中重金属污染特征及其对人体的健康风险的研究较少。此外,露天焚烧一般分两种方式进行,即桶内焚烧和自然堆积焚烧,这两种焚烧方式通常同时存在。且不同组分生活垃圾的元素组成差异较大,会对重金属排放造成影响。

鉴于此,本研究利用烟气稀释采样系统,考虑桶内和自然堆积两种不同露天焚烧方式,对不同组分生活垃圾进行模拟焚烧实验,对比两种焚烧方式下不同组分生活垃圾露天焚烧产生的PM_{2.5}中重金属的污染水平和健康风险评价,以期为推进城市环境重金属污染的防控提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集及分析

本实验选取5个不同功能区(商业区、餐饮区、办公区、城乡结合部和道路清扫区),根据生活垃圾采样和物理分析方法(CJ/T 313-2009)^[19]进行采样,将采集到的垃圾样品分选为5类样品组分(混合类、塑料类、纸类、木竹类和纺织类)。

实验采用烟气稀释采样系统^[20]。为了模拟自然堆积和桶内焚烧,分别设置托盘和燃烧桶燃烧,根据实际燃烧条件用明火引燃样品。烟气进入稀释通道内完成稀释冷却等一系列过程时,使用颗粒物采样器将烟气中的PM_{2.5}采集到石英纤维滤膜上,共采集10组样品[A1(混合类桶内焚烧)、A2(混合类自然堆积焚烧)、B1(塑料类桶内焚烧)、B2(塑料类自然堆积焚烧)、C1(纸类桶内焚烧)、C2(纸类自然堆积焚烧)、D1(木竹类桶内焚烧)、D2(木竹类自然堆积焚烧)、E1(纺织类桶内焚烧)、E2(纺织类自然堆积焚烧)]。采样滤膜选用直径为90 mm石英滤膜(1851-090,美国Whatman公司),采样前先将石英滤膜放在500℃马弗炉中烘烤4 h,去除有机碳成分,称其净重,采样结束后,将采集的石英滤膜样品和底灰样品需放入冰箱冷冻保存。实验过程中的焚烧温度和采样时间见表1,采样流量设定为16.7 L·min⁻¹。为了保证实验数据的准确性和有效性,每组测试设置3组平行实验。将采集到的样品进行消解处理后,利用ICP-MS(7500a,美国Agilent公司)

表 1 实验运行参数

Table 1 Test operating parameters

测试	组分	焚烧方式	焚烧时间/s	焚烧温度/℃	
				平均温度	最大温度
A1	混合类	桶内焚烧	2 048	201.4	396.6
A2		自然堆积	1 590	142.1	288.6
B1	塑料类	桶内焚烧	1 721	199.9	473
B2		自然堆积	1 723	127.1	295.3
C1	纸类	桶内焚烧	1 178	191.5	374.7
C2		自然堆积	963	135.2	284.3
D1	木竹类	桶内焚烧	732	203.4	402.5
D2		自然堆积	694	149.7	295.9
E1	纺织类	桶内焚烧	845	187.6	311.4
E2		自然堆积	761	120.6	216.6

进行分析^[21],同时设置空白对照组。

1.2 污染评价方法

地累积指数法(geo-accumulation index, I_{geo})是研究重金属元素在沉积物、土壤和大气颗粒物中污染程度的重要指标。其公式如式(1)。

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right] \quad (1)$$

式中, I_{geo} 是元素的地累积指数, C_n 为所测元素 n 的含量,mg·kg⁻¹; B_n 为相应元素的土壤背景值,mg·kg⁻¹,采用河南省土壤元素背景含量的中位

数^[22]；1.5 为分析给定物质自然环境波动和非常小的人为影响的校正值^[23]。本研究中元素的 I_{geo} 与污染程度的关系分级见表 2^[24]。

表 2 元素的 I_{geo} 与污染程度的关系分级
Table 2 Relationship between the element's I_{geo} and the degree of pollution

I_{geo}	分级	污染程度
$I_{geo} < 0$	0	无污染
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	轻度污染
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	中度污染
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中到强度污染
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	强度污染
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	强到极强污染
$I_{geo} \geq 5$	6	极强污染

1.3 健康风险评价模型

1.3.1 暴露剂量

根据 EPA 综合风险信息数据库 (IRIS) 和国际

癌症研究所 (IARC) 的相关研究, 污染物可分为致癌物 (无阈化合物) 和非致癌物 (有阈化合物), 本研究中的 As、Cd、Cr 和 Ni 属于致癌物, Pb、Zn、Cu 和 Mn 属于非致癌物^[25]。研究对象分为成人和儿童。本次研究是根据美国环保署 (USEPA) 提供的健康风险评估模型^[26,27], 对露天焚烧生活垃圾产生的 PM_{2.5} 中的重金属进行评估。人体暴露于 PM_{2.5} 中的重金属的健康风险主要通过两种途径: 经呼吸吸入和皮肤直接接触。两种途径的暴露量计算如下:

$$ADD_{inh} = \frac{C \cdot IR_{inh} \cdot EF \cdot ED}{PEF \cdot BW \cdot AT} \quad (2)$$

$$ADD_{der} = \frac{C \cdot CF \cdot SA \cdot AF \cdot ABS \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \quad (3)$$

式中, ADD_{inh} 和 ADD_{der} 分别表示经呼吸和皮肤暴露的日均暴露量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; C 表示 PM_{2.5} 中的重金属含量, $mg \cdot kg^{-1}$ 。模型中其他参数取值见表 3^[28,29]。

表 3 健康风险评估模型中参数的意义和取值

Table 3 Significance and values for the parameters included in the health risk assessment model

参数	物理意义	单位	成人取值	儿童取值
ED	暴露年限	a	24	6
EF	暴露频率	$d \cdot a^{-1}$	180	180
AT	平均暴露时间	d	70×365 (致癌)	$ED \times 365$ (非致癌)
SA	暴露皮肤面积	cm^2	5 700	2 800
ABS ¹⁾	皮肤吸收因子	无量纲	0.01	0.01
PEF	颗粒物排放因子	$m^3 \cdot kg^{-1}$	1.36×10^9	1.36×10^9
BW	平均体重	kg	70	15
AF	皮肤黏着度	$mg \cdot cm^{-2}$	0.07	0.2
CF	转换系数	$kg \cdot mg^{-1}$	10^{-6}	10^{-6}
IR_{inh}	呼吸速率	$m^3 \cdot d^{-1}$	20	7.6

1) ABS: Cd 是 0.001、As 是 0.03、Pb 是 0.1, 其余元素为 0.01

1.3.2 暴露风险

(1) 非致癌风险

用非致癌风险商 (hazard quotient, HQ) 和非致癌总风险 (hazard index, HI) 来评估非致癌风险。非致癌风险商表示暴露途径中单一污染物的非致癌风险。非致癌风险的评估方程如下:

$$HQ = ADD/RFD \quad (4)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (5)$$

式中, RFD 表示元素的参考剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$, 经呼吸和皮肤暴露的 8 种元素的参考剂量如表 4 所示。HI 是多污染物多暴露途径的非致癌总风险, 等于 HQ 的总和。若 HI 或 HQ 的值小于 1, 则表示非致癌风险较小或可以忽略; 若 HI 或 HQ 的值大于或等于 1, 则表示存在非致癌风险, 且风险随着 HI 值的增大而加强^[30]。

(2) 致癌风险

致癌风险一般以终生增量致癌风险 (incremental lifetime cancer risk, ILCR) 表示, 4 种致

癌元素 As、Ni、Cd 和 Cr 致癌风险的计算公式如下:

$$ILCR = ADD \times SF \quad (6)$$

式中, ILCR 表示终生增量致癌风险, SF 表示致癌斜率因子 (表示人体暴露于一定剂量某种污染物下产生致癌效应的最大概率), $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ 。当 ILCR 值介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围内时, 表明该重金属不具备致癌风险。呼吸和皮肤接触途径下 As、Cd、Ni 和 Cr 的 SF 值^[31,32]如表 4 所示。

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 中重金属的含量分布

图 1 为 5 种不同组分的生活垃圾在桶内和自然堆积焚烧方式下产生的重金属含量分布。8 种重金属在 5 种组分不同的垃圾中都有检出, Cr、As、Ni、Cd、Zn、Mn、Cu 和 Pb 的含量范围分别为: 23.77 ~ 118.76、91.86 ~ 303.57、29.93 ~ 123.37、20.25 ~ 63.68、1 324.03 ~ 3 703.12、189.39 ~ 651.79、

表 4 呼吸和皮肤接触两种暴露途径下的 SF 值

Table 4 SF values for respiratory and skin exposure pathways

项目	As	Cd	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Mn
RFD _{der} /mg·(kg·d) ⁻¹	1.23 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁵	1 × 10 ⁻³	2.5 × 10 ⁻⁴	5.25 × 10 ⁻⁴	1.9 × 10 ⁻³	6.0 × 10 ⁻²	2.4 × 10 ⁻³
RFD _{inh} /mg·(kg·d) ⁻¹	3.01 × 10 ⁻⁴	1 × 10 ⁻³	2.06 × 10 ⁻²	2.86 × 10 ⁻⁵	3.52 × 10 ⁻³	4.02 × 10 ⁻²	3.01 × 10 ⁻¹	1.4 × 10 ⁻⁵
SF _{inh} /mg·(kg·d) ⁻¹	15.1	6.4	0.84	42	—	—	—	—
SF _{der} /mg·(kg·d) ⁻¹	3.66	—	42.5	20	—	—	—	—

466.02 ~ 1 566.96 和 102.54 ~ 342.51 mg·kg⁻¹. 图 1 中显示 5 种组分在两种焚烧方式下产生的重金属分布规律整体相同,部分金属略有波动,大致表现为: Zn > Cu > Mn > As > Pb > Ni > Cr > Cd,但在自然堆积焚烧下,混合类垃圾和塑料类垃圾中 Cr 含量高于 Ni 含量. 同一种组分在两种焚烧方式下产生的重金属含量虽然不同,但重金属的含量分布较为一致. 比如,除 Zn 外,各组分垃圾在以自然堆积方式焚烧产生的重金属含量略高于在桶内燃烧. 由此,重金属含量受垃圾组分和焚烧方式的双重影响.

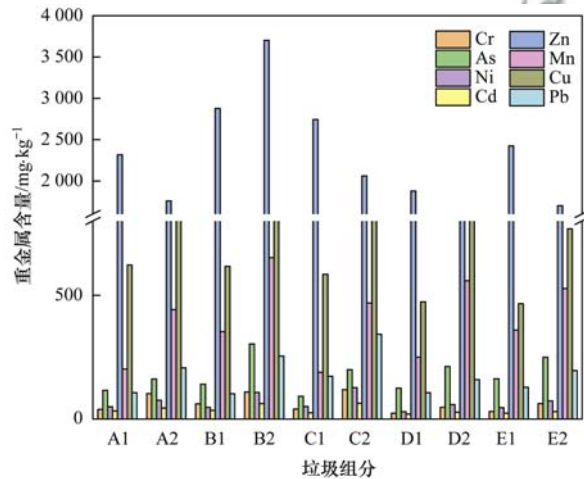


图 1 两种燃烧方式下产生的重金属含量
Fig. 1 Content of heavy metals produced from two modes of combustion

2.2 污染评价

图 2 为两种焚烧方式下产生的重金属的地累积指数. 可以看出, Cr、As、Ni、Cd、Zn、Mn 和 Cu 及 Pb 的污染程度相差较大. Cr 和 Mn 在两种焚烧方式下 I_{geo} 值均小于 0, 处于无污染的状态, 也说明这两种元素未受到人为源污染. Cu 的污染程度受垃圾组分和焚烧方式的影响变化较大; 对于混合类生活垃圾, Cu 的 I_{geo} 值处在 4.37 ~ 5.24, 处于强度到极强度污染; 塑料类、纸类、木竹类和纺织类在桶内焚烧下的 I_{geo} 值介于 -0.57 ~ 0.21, 处于无污染到轻度污染水平; 在桶内焚烧时, Cu 的 I_{geo} 值介于 -0.1 ~ 1.09, 处于无污染到中度污染. Ni 的污染程度处于轻度到中度污染. 在桶内焚烧时, Pb 的 I_{geo} 值介于 1.64 ~ 2.40, 处于中度至中到强度污染水平, 以自然

堆积方式焚烧时, Pb 的 I_{geo} 值介于 2.29 ~ 3.39, 属于中到强度污染至强度污染水平. Zn 和 As 达中到强度污染至极强度污染水平. Cd 的 I_{geo} 值大于 5, 已达到极强度污染水平. 两种燃烧方式下重金属元素的 I_{geo} 排序不同, 主要是因为焚烧方式影响重金属元素的释放与富集.

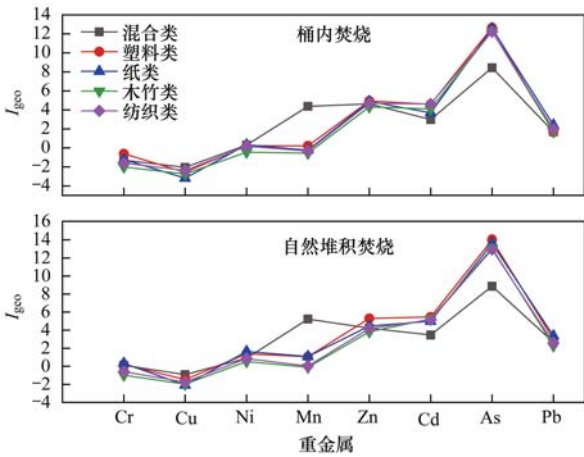


图 2 重金属元素的地累积指数
Fig. 2 Geo-accumulation index for heavy metal elements

2.3 健康风险评价

2.3.1 非致癌风险

(1) 呼吸吸入暴露的非致癌风险

根据美国 EPA 的暴露评估模型, 对于不同人群, 在不同焚烧方式下重金属经呼吸吸入暴露途径的非致癌风险商如表 5 所示. 图 3 为经呼吸吸入暴露途径的非致癌总风险 (HI_{inh}) 和经皮肤接触暴露的非致癌总风险 (HI_{der}). 整体来说, 各类人群通过呼吸途径暴露的各种重金属的非致癌风险商介于 $1.51E-07 \sim 8.55E-03$ 之间, 非致癌总风险介于 $1.13E-06 \sim 1.78E-02$ 之间 (图 3), 均低于可接受健康风险水平 1, 因此通过呼吸途径暴露于重金属的潜在非致癌健康风险并不显著. 表中显示: 儿童吸入的非致癌风险商高于成人, 对于儿童和成人吸入的非致癌风险商均表现为按 $Mn > Cr > As > Cd > Pb > Cu > Zn > Ni$ 的趋势下降, 儿童吸入 Mn 的非致癌风险值最高可达 $8.55E-03$, 非致癌总风险最高可达 $3.47E-02$, 尽管 Mn 的非致癌健康风险值小于可接受健康风险水平 1, 其潜在非致癌健康风险并不显著, 但不能忽视长期吸入的非致癌风险.

表 5 呼吸吸入途径的非致癌风险商
Table 5 Hazard quotient of the respiratory inhalation pathway

焚烧方式	组分	对象	Cr	As	Ni	Cd	Zn	Mn	Cu	Pb
桶内焚烧	混合	儿童	2.50E-04	7.07E-05	4.49E-07	6.11E-06	1.41E-06	2.65E-03	2.84E-06	5.55E-06
		成人	1.41E-04	3.99E-05	2.53E-07	3.44E-06	7.98E-07	1.50E-03	1.60E-06	3.13E-06
	塑料	儿童	3.96E-04	8.61E-05	4.26E-07	6.37E-06	1.76E-06	4.63E-03	2.82E-06	5.35E-06
		成人	2.23E-04	4.86E-05	2.40E-07	3.59E-06	9.91E-07	2.61E-03	1.59E-06	3.02E-06
	纸类	儿童	2.62E-04	5.61E-05	4.56E-07	4.70E-06	1.68E-06	2.49E-03	2.67E-06	9.04E-06
		成人	1.48E-04	3.16E-05	2.57E-07	2.65E-06	9.45E-07	1.40E-03	1.51E-06	5.10E-06
	木竹	儿童	1.53E-04	7.63E-05	2.67E-07	3.72E-06	1.15E-06	3.28E-03	2.16E-06	5.56E-06
		成人	8.61E-05	4.30E-05	1.51E-07	2.10E-06	6.46E-07	1.85E-03	1.22E-06	3.13E-06
	纺织	儿童	2.01E-04	9.94E-05	4.14E-07	4.36E-06	1.48E-06	4.71E-03	2.13E-06	6.70E-06
		成人	1.13E-04	5.61E-05	2.33E-07	2.46E-06	8.35E-07	2.66E-03	1.20E-06	3.78E-06
	混合	儿童	6.59E-04	9.90E-05	6.79E-07	8.21E-06	1.07E-06	5.80E-03	5.18E-06	1.08E-05
		成人	3.72E-04	5.58E-05	3.83E-07	4.63E-06	6.05E-07	3.27E-03	2.92E-06	6.09E-06
自然堆积焚烧	塑料	儿童	7.03E-04	1.85E-04	9.56E-07	1.15E-05	2.26E-06	8.55E-03	7.16E-06	1.33E-05
		成人	3.96E-04	1.04E-04	5.39E-07	6.48E-06	1.27E-06	4.82E-03	4.04E-06	7.49E-06
	纸类	儿童	7.63E-04	1.22E-04	1.14E-06	1.17E-05	1.26E-06	6.14E-03	5.47E-06	1.79E-05
		成人	4.30E-04	6.87E-05	6.41E-07	6.60E-06	7.09E-07	3.46E-03	3.09E-06	1.01E-05
	木竹	儿童	3.09E-04	1.30E-04	5.25E-07	5.13E-06	8.08E-07	7.32E-03	3.86E-06	8.33E-06
		成人	1.74E-04	7.31E-05	2.96E-07	2.89E-06	4.56E-07	4.13E-03	2.18E-06	4.70E-06
	纺织	儿童	4.04E-04	1.53E-04	6.58E-07	5.62E-06	1.04E-06	6.92E-03	3.51E-06	1.02E-05
		成人	2.28E-04	8.60E-05	3.71E-07	3.17E-06	5.86E-07	3.90E-03	1.98E-06	5.77E-06

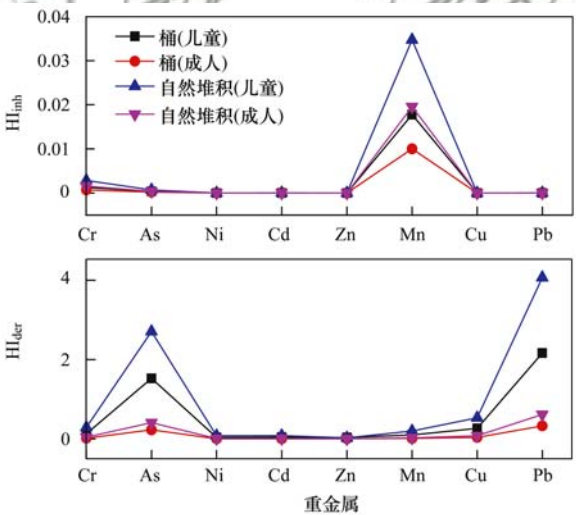


图 3 呼吸和皮肤接触暴露的非致癌总风险

Fig. 3 Hazard index values for respiratory and skin exposure

8 种重金属的非致癌风险随其组分来源和焚烧方式的不同呈不规则性变化。例如：在桶内焚烧时，塑料类垃圾产生的 Cr 的非致癌风险最高，木竹类最低；而以自然堆积方式焚烧时，纸类垃圾产生的 Cr 的非致癌风险最高，木竹类最低。

(2) 皮肤接触途径的非致癌风险

通过皮肤途径暴露的 PM_{2.5} 中 8 种重金属的非致癌风险商和非致癌总风险分别如表 6 和图 3 所示。由表 6 可知，以自然堆积方式焚烧产生重金属的经皮肤暴露途径的非致癌风险略高于桶内焚烧产生

的；在同一焚烧条件下，同一类生活垃圾产生的非致癌风险：儿童高于成人；8 种重金属经皮肤暴露接触的非致癌风险表现为：Pb > As > Cu > Cr > Mn > Cd > Ni > Zn；儿童经皮肤接触纸类生活垃圾以自然堆积方式焚烧产生的 Pb 的非致癌风险值为 1.2，超过了皮肤暴露途径的可接受范围，存在非致癌风险。

图 3 中儿童 As (桶内焚烧 $HI_{der} = 1.53$ ，自然堆积焚烧 $HI_{der} = 2.71$) 和 Pb (桶内焚烧 $HI_{der} = 2.16$ ，自然堆积焚烧 $HI_{der} = 4.07$) 的非致癌总风险均大于 1，说明重金属 As 和 Pb 对儿童存在非致癌风险。综上所述，8 种重金属通过皮肤接触途径对儿童的非致癌风险不应忽视，且需重点关注 As 和 Pb 引起的非致癌风险。

2.3.2 致癌风险

(1) 呼吸暴露的致癌风险

表 7 为经呼吸吸入的终量致癌风险。5 种组分的垃圾焚烧产生的致癌重金属 Cr、As、Ni 和 Cd 的 ILCR 值均小于 10^{-6} ，无致癌风险。在同一种焚烧方式下，重金属对成人的致癌风险要高于儿童；对于儿童或成人，均是以自然堆积焚烧方式产生的重金属的致癌风险更高。

(2) 皮肤接触的致癌风险

表 8 给出 As、Ni、和 Cr 等 3 种重金属经皮肤接触暴露的终量致癌风险。As 的致癌风险介于 $9.72E-06 \sim 4.33E-05$ ，Ni 的致癌风险介于 $1.23E$

表 6 皮肤接触途径的非致癌风险商
Table 6 Hazard quotient for skin exposure

焚烧方式	组分	对象	Cr	As	Ni	Cd	Zn	Mn	Cu	Pb
桶内焚烧	混合	儿童	2.87E-02	2.78E-01	9.27E-03	1.22E-02	7.11E-03	1.55E-02	6.03E-02	3.73E-01
		成人	4.38E-03	4.25E-02	1.41E-03	1.87E-03	1.09E-03	2.37E-03	9.20E-03	5.69E-02
	塑料	儿童	4.54E-02	3.39E-01	8.80E-03	1.28E-02	8.83E-03	2.71E-02	5.98E-02	3.60E-01
		成人	6.94E-03	5.17E-02	1.34E-03	1.95E-03	1.35E-03	4.14E-03	9.13E-03	5.49E-02
	纸类	儿童	3.00E-02	2.21E-01	9.41E-03	9.41E-03	8.42E-03	1.45E-02	5.66E-02	6.08E-01
		成人	4.58E-03	3.37E-02	1.44E-03	1.44E-03	1.29E-03	2.22E-03	8.64E-03	9.28E-02
	木竹	儿童	1.75E-03	3.00E-01	5.51E-03	7.46E-03	5.76E-03	1.92E-02	4.59E-02	3.74E-01
		成人	2.67E-04	4.58E-02	8.41E-04	1.14E-03	8.80E-04	2.93E-03	7.01E-03	5.70E-02
	纺织	儿童	2.30E-02	3.91E-01	8.54E-03	8.74E-03	7.44E-03	2.76E-02	4.52E-02	4.50E-01
		成人	3.52E-03	5.97E-02	1.30E-03	1.33E-03	1.14E-03	4.21E-03	6.89E-03	6.87E-02
	混合	儿童	7.56E-02	3.90E-01	1.40E-02	1.65E-02	5.40E-03	3.39E-02	1.10E-01	7.26E-01
		成人	1.15E-02	5.95E-02	2.14E-03	2.51E-03	8.24E-04	5.18E-03	1.68E-02	1.11E-01
自然堆积焚烧	塑料	儿童	8.05E-02	7.29E-01	1.97E-02	2.30E-02	1.14E-02	5.00E-02	1.52E-01	8.92E-01
		成人	1.23E-02	1.11E-01	3.01E-03	3.51E-03	1.73E-03	7.63E-03	2.32E-02	1.36E-01
	纸类	儿童	8.75E-02	4.79E-01	2.34E-02	2.34E-02	6.32E-03	3.59E-02	1.16E-01	1.20E+00
		成人	1.34E-02	7.32E-02	3.58E-03	3.58E-03	9.65E-04	5.48E-03	1.77E-02	1.83E-01
	木竹	儿童	3.54E-03	5.10E-01	1.08E-02	1.03E-02	4.06E-03	4.28E-02	8.19E-02	5.60E-01
		成人	5.40E-04	7.79E-02	1.66E-03	1.57E-03	6.20E-04	6.54E-03	1.25E-02	8.55E-02
	纺织	儿童	4.64E-02	6.00E-01	1.36E-02	1.13E-02	5.22E-03	4.04E-02	7.44E-02	6.87E-01
		成人	7.08E-03	9.17E-02	2.07E-03	1.72E-03	7.97E-04	6.17E-03	1.14E-02	1.05E-01

表 7 呼吸吸入的终量致癌风险
Table 7 Incremental lifetime cancer risk from respiratory inhalation

组分	重金属	桶内焚烧		自然堆积焚烧	
		儿童	成人	儿童	成人
混合	Cr	2.58E-08	5.81E-08	6.79E-08	1.53E-07
	As	2.76E-08	6.21E-08	3.86E-08	8.70E-08
	Ni	6.66E-10	1.50E-09	1.01E-09	2.27E-09
	Cd	3.35E-09	7.56E-09	4.51E-09	1.02E-08
塑料	Cr	4.08E-08	9.20E-08	7.23E-08	1.63E-07
	As	3.36E-08	7.57E-08	7.22E-08	1.63E-07
	Ni	1.87E-09	4.21E-09	4.02E-09	9.06E-09
	Cd	3.50E-09	7.89E-09	6.30E-09	1.42E-08
纸类	Cr	2.69E-08	6.07E-08	7.85E-08	1.77E-07
	As	2.18E-08	4.93E-08	4.75E-08	1.07E-07
	Ni	6.76E-10	1.53E-09	1.68E-09	3.80E-09
	Cd	2.58E-09	5.81E-09	6.42E-09	1.45E-08
木竹类	Cr	1.57E-08	3.55E-08	3.18E-08	7.17E-08
	As	2.97E-08	6.70E-08	5.05E-08	1.14E-07
	Ni	3.96E-10	8.93E-10	7.79E-10	1.76E-09
	Cd	2.04E-09	4.60E-09	2.81E-09	6.34E-09
纺织	Cr	2.07E-08	4.67E-08	4.16E-08	9.39E-08
	As	3.87E-08	8.74E-08	5.94E-08	1.34E-07
	Ni	6.14E-10	1.38E-09	9.75E-10	2.20E-09
	Cd	2.39E-09	5.40E-09	3.08E-09	6.95E-09

-05 ~ 8.54E - 05, Cr 的致癌风险介于 4.58E - 06 ~ 3.75E - 05, 3 种重金属的致癌风险均在 10⁻⁶ ~ 10⁻⁴, 说明皮肤接触重金属未达到致癌风险. 桶内焚

烧条件下, 儿童的致癌风险高于成人. 与桶内焚烧相比, 以自然堆积方式焚烧产生的重金属的致癌风险更高, 但不同人群与金属之间的风险趋势保持不变.

表 8 皮肤接触的终量致癌风险
Table 8 Incremental lifetime cancer risk from skin contact

组分	重金属	桶内焚烧		自然堆积焚烧	
		儿童	成人	儿童	成人
混合	Cr	1.23E-05	7.51E-06	3.24E-05	1.98E-05
	As	2.01E-05	1.23E-05	2.81E-05	1.72E-05
	Ni	3.38E-05	2.06E-05	5.11E-05	3.12E-05
塑料	Cr	1.95E-05	1.19E-05	3.45E-05	2.11E-05
	As	2.44E-05	1.49E-05	5.26E-05	3.21E-05
	Ni	3.21E-05	1.96E-05	7.19E-05	4.39E-05
纸类	Cr	1.29E-05	7.85E-06	3.75E-05	2.29E-05
	As	1.59E-05	9.72E-06	3.46E-05	2.11E-05
	Ni	3.43E-05	2.09E-05	8.54E-05	5.22E-05
木竹类	Cr	7.50E-06	4.58E-06	1.52E-05	9.26E-06
	As	2.17E-05	1.32E-05	3.68E-05	2.25E-05
	Ni	2.01E-05	1.23E-05	3.95E-05	2.41E-05
纺织	Cr	9.87E-06	6.03E-06	1.99E-05	1.21E-05
	As	2.82E-05	1.72E-05	4.33E-05	2.65E-05
	Ni	3.11E-05	1.90E-05	4.95E-05	3.02E-05

3 结论

(1) 露天焚烧排放重金属含量受垃圾组分和焚烧方式的影响,波动性较大.除 Zn 外,其它 7 种重金属的含量均表现为自然堆积焚烧条件下更高.

(2) MSW 露天焚烧排放 Zn、As、Cd 和 Pb 均已达到中度及以上程度污染;Cd 污染水平最高,已达到极强污染程度;Cr 和 Mn 属于无污染程度.重金属的污染水平受垃圾组分影响较大.

(3) 风险分析的结果表明,只有 As 和 Pb 对儿童经皮肤暴露表现出一定的非致癌风险,其它元素对成人和儿童的非致癌风险较低.两种焚烧方式条件下,致癌元素(As、Cd、Cr 和 Ni)对儿童和成人均未达到致癌风险,但不能忽视其长期暴露影响.

参考文献:

[1] Ma H T, Cao Y, Lu X Y, *et al.* Review of typical municipal solid waste disposal status and energy technology [J]. *Energy Procedia*, 2016, **88**: 589-594.

[2] Lu J W, Zhang S K, Hai J, *et al.* Status and perspectives of municipal solid waste incineration in China: a comparison with developed regions [J]. *Waste Management*, 2017, **69**: 170-186.

[3] 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.

[4] Wang Y, Cheng K, Wu W D, *et al.* Atmospheric emissions of typical toxic heavy metals from open burning of municipal solid waste in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **152**: 6-15.

[5] Kumari K, Kumar S, Rajagopal V, *et al.* Emission from open burning of municipal solid waste in India [J]. *Environmental Technology*, 2017, **27**: 1-14.

[6] Sørum L, Frandsen F J, Hustad J E. On the fate of heavy metals in municipal solid waste combustion Part I: devolatilisation of heavy metals on the grate [J]. *Fuel*, 2003, **82**(18): 2273-

2283.

[7] Nagpure A S, Ramaswami A, Russell A. Characterizing the spatial and temporal patterns of open burning of municipal solid waste (MSW) in Indian Cities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(21): 12904-12912.

[8] Estrellan C R, Iino F. Toxic emissions from open burning [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(3): 193-207.

[9] Li T, Wan Y, Ben Y J, *et al.* Relative importance of different exposure routes of heavy metals for humans living near a municipal solid waste incinerator [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **226**: 385-393.

[10] 李建陶, 曾鸣. 生活垃圾焚烧飞灰矿物学特性及重金属分布 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4834-4840.

Li J T, Zeng M. Mineralogy characteristics and heavy metal distribution of MSWI fly ash [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4834-4840.

[11] Zhou J Z, Wu S M, Pan Y, *et al.* Enrichment of heavy metals in fine particles of municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash and associated health risk [J]. *Waste Management*, 2015, **43**: 239-246.

[12] 陈江, 费勇, 马鑫雨, 等. 燃煤与垃圾焚烧飞灰中细颗粒物 PM_{2.5} 的重金属元素风险评价 [J]. *中国粉体技术*, 2016, **22**(2): 104-107.

Chen J, Fei Y, Ma X Y, *et al.* Risk assessment on heavy metal elements of fine particulate matter PM_{2.5} in fly ash origin from coal and waste incineration [J]. *China Powder Science and Technology*, 2016, **22**(2): 104-107.

[13] Zhang H L, Chen Y H, Qi J Y, *et al.* Characterization of heavy metals in the surrounding of municipal solid waste incinerator (MSWI) and health risks assessment via inhalation in Shenzhen Nanshan, China [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **790**: 425-428.

[14] 齐剑英, 张海龙, 方建德, 等. 垃圾焚烧设施周边环境空气重金属分布特征及呼吸暴露风险 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(S1): 113-118.

Qi J Y, Zhang H L, Fang J D, *et al.* Characterization of airborne particulate metals in the surroundings of a municipal solid waste incinerator (MSWI) in the Nanshan Shenzhen and health risk assessment via inhalation exposure [J]. *China Environmental*

- Science, 2013, **33**(S1): 113-118.
- [15] 刘军, 赵金平, 杨立辉, 等. 南方典型生活垃圾焚烧设施环境呼吸暴露风险评估[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(3): 440-446.
- Liu J, Zhao J P, Yang L H, *et al.* Inhalation exposure risk assessment of a typical municipal solid waste incinerator, south China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(3): 440-446.
- [16] 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 等. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5262-5271.
- Guo Y H, Sun X C, Zhang S B, *et al.* Pollution characteristics, source analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in Shanghai[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5262-5271.
- [17] Ma W C, Tai L Y, Qiao Z, *et al.* Contamination source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil around municipal solid waste incinerator: a case study in North China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 348-357.
- [18] 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.
- Wang J J, Zhao H W, Zhong X P, *et al.* Concentration levels and spatial distribution of heavy metals in soil surrounding a municipal solid waste incineration plant (Shenzhen) [J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 298-304.
- [19] CJ/T 313-2009, 生活垃圾采样和分析方法[S].
- CJ/T 313-2009, Sampling and analysis methods for domestic waste[S].
- [20] 王艳, 郝伟伟, 程轲, 等. 城市生活垃圾露天焚烧PM_{2.5}及其组分排放特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3518-3523.
- Wang Y, Hao W W, Cheng K, *et al.* Emission characteristics and chemical components of PM_{2.5} from open burning of municipal solid waste [J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3518-3523.
- [21] 薛园园, 刘国红, 田海娇, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定PM_{2.5}中的重金属元素[J]. 广州化学, 2016, **41**(3): 45-48, 69.
- Xue Y Y, Liu G H, Tian H J, *et al.* Determination of heavy metal elements in PM_{2.5} in Taiyuan by ICP-MS[J]. Guangzhou Chemistry, 2016, **41**(3): 45-48, 69.
- [22] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 12-13.
- [23] Li P H, Kong S F, Geng C M, *et al.* Assessing the hazardous risks of vehicle inspection workers' exposure to particulate heavy metals in their work places [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013, **13**(1): 255-265.
- [24] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市PM_{2.5}中有毒重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 2225-2232.
- Li Y P, Liu H F, Zhou H, *et al.* Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in PM_{2.5} in Chengdu [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 2225-2232.
- [25] DB11/T 656-2009, 场地环境评价导则[S].
- DB11/T 656-2009, Environmental site assessment guideline [S].
- [26] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (Part A) [R]. Washington, DC, USA: Office of Emergency and Remedial Response, U. S. Environmental Protection Agency, 1989.
- [27] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk assessment guidance for superfund: volume III-Part A, process for conducting probabilistic risk assessment[R]. EPA 540-R-02-002, Washington, DC, USA: Office of Emergency and Remedial Response, U. S. Environmental Protection Agency, 2001.
- [28] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington, DC, USA: Office of Emergency and Remedial Response, U. S. Environmental Protection Agency, 2002.
- [29] Cheng Z, Chen L J, Li H H, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals exposure via household dust from urban area in Chengdu, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**: 621-629.
- [30] Huang C L, Bao L J, Luo P, *et al.* Potential health risk for residents around a typical e-waste recycling zone via inhalation of size-fractionated particle-bound heavy metals [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, **317**: 449-456.
- [31] 李越洋, 姬亚芹, 王士宝, 等. 天津市春季道路降尘PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(5): 853-859.
- Li Y Y, Ji Y Q, Wang S B, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of PM_{2.5}-bound heavy metals in road dust deposition during Spring in Tianjin City [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(5): 853-859.
- [32] Liu Y X, Li S S, Sun C Y, *et al.* Pollution level and health risk assessment of PM_{2.5}-bound metals in Baoding City before and after the heating period [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(10): 2286.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)