

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

太原市采暖季 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属健康风险评价

李丽娟¹, 温彦平², 彭林^{3*}, 白慧玲¹, 刘凤娴¹, 史美鲜¹

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 太原市环境监测中心, 太原 030024; 3. 华北电力大学环境科学与工程学院, 北京 102206)

摘要: 通过采集太原市采暖季环境空气 $PM_{2.5}$ 样品, 经等离子体发射光谱仪对 19 种元素进行测定, 运用富集因子和主因子法揭示其来源, 并对重金属的潜在生态风险、人体暴露和健康风险进行评价。结果表明, 元素 Si、Ca、Al、Na、Mg、K、Fe 为 $PM_{2.5}$ 的主要元素; 土壤风沙尘、煤烟尘、机动车尾气、工业粉尘和建筑尘是元素的主要排放源, 贡献率分别为 43.46%、15.69%、13.41%、9.89% 和 9.03%。重金属潜在生态风险指数为 1 953.82, 具有极强的潜在生态危害程度; 环境空气重金属暴露途径以手口摄食暴露为主, 呼吸吸入暴露最小, 皮肤接触暴露居中, 儿童重金属暴露风险高于成人; $PM_{2.5}$ 中重金属存在非致癌风险, 不具有致癌风险, 儿童非致癌风险值为 2.94, 是成人的 1.39 倍。

关键词: $PM_{2.5}$; 元素; 来源解析; 重金属; 健康风险评价

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4431-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.12.003

Characteristic of Elements in $PM_{2.5}$ and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan

LI Li-juan¹, WEN Yan-ping², PENG Lin³, BAI Hui-ling¹, LIU Feng-xian¹, SHI Mei-xian¹

(1. College of Environmental Sciences and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Taiyuan Environmental Monitoring Center, Taiyuan 030024, China; 3. College of Environmental Sciences and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The fine particulate matter ($PM_{2.5}$) sampled during heating season in Taiyuan city and nineteen samples were used to investigate elemental concentrations and its source potential ecological risks of heavy metals, and to assess human exposure and health risk. The result indicated that main elements were Si, Ca, Al, Na, Mg, K, Fe in $PM_{2.5}$. The main sources of elements in $PM_{2.5}$ were divided into five categories including soil dust (43.46%), coal burning (15.69%), vehicle emission (13.41%), industrial dust (9.89%) and the construction cement dust (9.03%). Moreover, the order of potential ecological risk index of heavy metals in $PM_{2.5}$ was $Cd > Ni > Hg > Pb > Cu > Zn > As > Co > Cr > Mn$, and the ecological hazards were high. The main exposure of heavy metals in atmosphere was respiratory inhalation. The exposure quantity for children was significantly higher than that for adult. The hazard index values suggested a potential non-carcinogenic risk in $PM_{2.5}$.

Key words: $PM_{2.5}$; element; source analysis; heavy metals; health risk assessment

$PM_{2.5}$ (空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm ^[1]) 对大气能见度和人体健康有很大的影响^[2, 3], 并呈现采暖季较非采暖季污染严重的特征^[4]。无机元素是 $PM_{2.5}$ 的主要化学成分, 且大部分元素在冬季呈现较高的浓度。 $PM_{2.5}$ 中包含大量有害元素, 特别是有毒重金属元素对人体产生危害较大。由于人为污染, 大气中有毒重金属含量远远高于天然本底值^[5]。 $PM_{2.5}$ 中的有毒重金属主要通过手口摄食、呼吸吸入、皮肤接触这 3 种主要的暴露途径对人体健康造成危害^[6, 7]。目前, 国内外对于 $PM_{2.5}$ 中元素的研究以来源解析和潜在生态风险评价为主, 健康风险评价也以土壤以及水体中重金属居多^[8, 9], 而有关环境空气尤其是大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中重金属的人体暴露以及健康风险评价较少^[10]。

本研究采集了太原市环境空气颗粒物 $PM_{2.5}$ 样品, 分析 $PM_{2.5}$ 中 19 种元素的浓度水平、分布特征及其主要来源, 计算了重金属 (Mn、Cu、Zn、As、Pb、Cr、Ni、Co、Cd、Hg) 的潜在生态危害以及重金属的人体暴露量, 并对环境空气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中重金属潜在的健康风险进行评价, 以期以太原市环境空气治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2012 年 2 月 14 ~ 27 日, 选取分别代表不同功

收稿日期: 2014-05-04; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41173002)

作者简介: 李丽娟 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境污染, E-mail: 568454414@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: penglin6611@163.com

能区的 3 个采样点(图 1),对太原市采暖季环境空气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 进行同步采集. 每个采样点均设两台 TH-150C 型中流量($100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)、 $2.5 \mu\text{m}$ 切割头的采样器,采样点 1~3 号点位分别代表居民交通混合区、工业区和相对清洁区. 采样时间为当日 07:00~19:00,连续采样 12 h. 采用 90 mm 的聚丙烯膜滤膜. 采样前,将聚丙烯膜置于 60°C 的烘箱中烘干 2 h,再干燥平衡 3 d,去除滤膜中挥发分对称重的影响. 采样前对采样仪进行流量校准. 共获得有效样品 81 个.



图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Locations of ambient sampling

1.2 样品处理及分析

采样完成后,将滤膜剪碎于锥形瓶中,经去离子水润湿,加 15 mL 分析纯的 HNO_3 ($1.42 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$) 以及 5 mL HClO_4 (72%) 100°C 以下加热,当酸剩余约 3 mL 时,冷却锥形瓶,加少量去离子水,过滤残渣并定容至 15 mL,待测. 过滤的残渣放回原锥形瓶中,加入 2% 的 KOH 溶液 30 mL,煮沸 0.5 h,再过滤定容至 50 mL 于容量瓶中,检测 Si 容量. 采用等离子体发射光谱仪 (ICP-9000 (N + M) 型,美国热电公司) 对处理好的样品进行分析测试,被测元素包括 Si、Ti、Al、Mn、Mg、Ca、Na、K、Cu、Zn、As、Pb、Cr、Ni、Co、Cd、Hg、Fe、V,共 19 种元素. 为保证整个实验过程的准确性和可靠性,进行空白膜实验,结果表明,空白膜中各元素的含量均低于检出限,对所测元素的结果无影响.

1.3 富集因子分析法

富集因子法(enrichment factor, EF) 主要用于研

究环境空气中元素的富集程度,从而判断和评价元素的来源(自然来源和人为来源)的方法^[11]. 计算公式如下:

$$\text{EF}_i = \frac{(C_i/C_r)_{\text{环境}}}{(C_i/C_r)_{\text{背景}}} \tag{1}$$

式中,EF 为富集因子, C_i 、 C_r 分别为元素 i 和参比元素的含量; C'_i 、 C'_r 分别为元素 i 和参比元素的背景值. 若 $\text{EF}_i < 10$,认为元素相对于地壳未富集,主要来源为自然源,由土壤岩石风化造成;若 EF_i 在 $10 \sim 1 \times 10^4$ 范围,认为元素被富集,主要来源为人为源.

1.4 潜在生态危害指数法

潜在生态危害风险分析以元素丰度为基础条件,即沉积物中金属潜在生态危害指数(RI)与金属污染程度正相关,且多种金属污染的生态危害具有加和性. 评价指标如下:

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_n} \tag{2}$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \tag{3}$$

$$\text{RI} = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \cdot C_f^i = \sum_i^m T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n} \tag{4}$$

式中, C_f^i 为第 i 种重金属的污染系数; C_i 为样品中第 i 种重金属含量的实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_n 为第 i 种重金属的背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态风险系数; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数,反映其毒性水平和生物对其污染的敏感性; RI 为多种重金属的潜在生态风险指数; 潜在生态风险评价指标的分级见表 1^[12].

表 1 潜在生态风险评价指标的分级

Table 1 Classification criteria of the potential ecological risk index			
E_r^i	单因子生态危害程度	RI	总的潜在生态风险程度
<40	轻微	<150	轻微
40~80	中	150~300	中等
80~160	较强	300~600	强
160~320	强	>600	极强
>320	极强		

1.5 人体暴露评估

1.5.1 暴露量的计算

自然界的重金属主要通过食物链、呼吸吸入以及皮肤接触这 3 种暴露途径对人体产生危害. 研究中考虑的环境空气重金属主要暴露途径为:经手口摄食、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种途径. 暴露计量模型采用美国环保总署推荐使用的土壤健康风险模型. 式(5)~(7)分别为经手口摄食、呼吸吸入、皮

肤接触这 3 种暴露方式产生的日平均暴露剂量公式. 公式(8)为呼吸吸入途径的致癌重金属终身日均暴露量.

$$D_{\text{ingest}} = C \times \frac{\text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (5)$$

$$D_{\text{inh}} = C \times \frac{\text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (6)$$

$$D_{\text{dermal}} = C \times \frac{\text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (7)$$

$$\text{EC}_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{EF}}{\text{PEF} \times \text{AT}} \times \left(\frac{\text{InhR}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{InhR}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \quad (8)$$

式中, D_{ingest} 为经手口摄食暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; D_{inh} 为呼吸吸入暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; D_{dermal} 为皮肤接触暴露量 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; EC_{inh} 模型为致癌重金属呼吸吸入的终身日均暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 模型中各参数的取值见表 2^[13, 14].

表 2 模型参数取值
Table 2 Model parameters

项目	参数	单位	参数含义	儿童取值	成人取值	文献
基础参数	C	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	PM _{2.5} 中重金属元素的含量			本研究
	ED	a	暴露年限	6	24	[10]
	EF	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	暴露频率	350	350	[13]
	BW	kg	人均体重	15	60	[13]
	CF	$\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$	转换因子	10^{-6}	10^{-6}	[10]
	AT(非致癌作用)	d	平均暴露时间	$365 \times \text{ED}$	$365 \times \text{ED}$	[10]
经手口摄入	AT(致癌作用)	d	平均暴露时间	365×70	365×70	[10]
	IngR	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	手口的摄食量	200	100	[10]
呼吸摄入	InhR	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	呼吸摄入	5	20	[10]
	PEF	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	颗粒物排放因子	1.32×10^9	1.32×10^9	[13]
皮肤接触	SA	cm^2	皮肤暴露表面积	1600	4350	[13]
	AF	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	皮肤附着因子	1	1	[13]
	ABS		皮肤吸收因子	0.001	0.001	[10]

1.5.2 风险值的计算

风险评估包含非致癌风险和致癌风险评估. 非致癌风险是通过暴露风险值 HQ 进行评估. 致癌风险通过人体暴露于致癌物质所造成的终身致癌风险 TR 进行评估. 由于现阶段仅能获取由呼吸吸入途径的 SF 值, 因此仅考虑由呼吸吸入导致的致癌风险. 评估计算公式见(9)~(12):

$$\text{HQ} = \text{EXP}_{\text{total}} / \text{RfD} \quad (9)$$

$$\text{HI} = \sum \text{HQ}_i \quad (10)$$

$$\text{TR} = \text{EC}_{\text{inh}} \times \text{SF} \quad (11)$$

$$R = \sum \text{TR}_i \quad (12)$$

式中, $\text{EXP}_{\text{total}}$ 为暴露途径所造成的人体暴露量之总和; RfD 为暴露途径的参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; SF 为斜率系数, 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, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. HI 、 R 分别为单种重金属多种暴露途径下的非致癌风险总和及致癌风险总和. 当 $\text{HI} > 1$ 时, 认为存在非致癌风险; 当 $\text{HI} < 1$ 时, 认为不存在非致癌风险. 当 $R > 10^{-6}$ 时, 认为存在致癌风险; 当 $\text{HI} < 10^{-6}$ 时, 认为

不存在致癌风险^[15].

2 结果与讨论

2.1 元素的分布特征

2.1.1 元素的浓度水平

太原市采暖季环境空气 PM_{2.5} 中 19 种元素浓度水平见表 3. 从中数据可知, PM_{2.5} 中各元素浓度依次为 Si > Al > Fe > Na > Ca > K > Mg > Zn > Ti > Mn > Cu > Pb > Cr > Ni > As > Co > V > Cd > Hg. 其中, 地壳元素(Si、Ca、Al、Na、Mg、K、Fe、Ti)的浓度水平大于微量元素(Mn、Cu、Zn、Cr、As、Pb、Ni、Co、Cd、V). 太原市 PM_{2.5} 中元素浓度与北京市、广州市的比较见表 3. 太原市 PM_{2.5} 中 Ti、Ca、Cu、Fe、Cr 元素浓度较北京市和广州市高, 表明该地区与北京和广州相比元素污染较重, 其他元素浓度均较低. 太原市 PM_{2.5} 中 Fe 的浓度较高, 可能与该城市的燃煤与工业企业有关.

2.1.2 元素分布特征

太原市冬季各采样点环境空气 PM_{2.5} 中 19 种元素浓度水平见表 3. 其中数据显示: 各采样点均表现

为地壳元素的浓度大于微量元素的浓度,但不同功能区 PM_{2.5}中各元素的浓度水平仍存在明显差异.

1 号点位 PM_{2.5}中 Si、Al、Mg、Ca、Na、K、Zn、Co、V 元素的浓度水平较 2 号和 3 号点位的高. 采样期间 1 号点位周围有大规模的道路施工和房屋建设,故地壳元素 Si、Al、Mg、Ca、Na、Mg、K 主要来自城市建设所产生的建筑尘和扬尘; 1 号点位处于居民交通混合区,冬季城市居民供热燃煤可能是 Co 的主要来源,燃煤、垃圾焚烧和相对较大的车流量是 Zn 的主要来源^[16],而燃煤和机动车尾气的共同作用导致 V 的含量相对较高^[17].

2 号点位 PM_{2.5}中 As、Ni、Cd 和 Fe 元素浓度较 1 号和 3 号点位的高,原因在于 2 号点位属于工业区,周围有大型钢铁企业,而文献[18]报道的 As、Cd 和 Fe 主要来源于工业排放,特别是有色金属冶

炼厂的排放,Ni 主要来源于焦化煤燃烧和冶炼废气排放. 故本文认为 As、Ni、Cd、Fe 元素主要与钢铁冶炼有关. 太原市冬季盛行西北风,1 号点位位于 2 号点位的下风向,相距约 4 km,3 号点位位于 2 号点位的上风向,相距约 15 km,故 1 号和 2 号点位处元素 Fe 浓度较 3 号点位的高,并呈现明显的钢铁工业的污染特征.

3 号点位 PM_{2.5}中 Cr、Pb 元素浓度较采样点 1 和 2 处高. Pb 的主要来源为燃煤和机动车尾气排放,Cr 的主要来源为煤和石油燃烧的废气^[19],3 号点位周边“城中村”冬季室内取暖绝大多数采用无除尘设备的小煤炉,且分布分散,而车流量极少,故认为该点位 Cr 和 Pb 元素主要来自燃煤过程. 此处周围村镇冬季燃煤锅炉分布多,可知燃煤对 Cr、Pb 贡献较大.

表 3 太原市各采样点环境空气 PM_{2.5} 中元素浓度与其他城市的比较/ng·m⁻³

Table 3 Comparison of elemental concentration in PM_{2.5} between Taiyuan and other cities/ng·m⁻³

元素	采样点 1	采样点 2	采样点 3	平均值	北京市 ^[4]	广州市 ^[4]	太原市 土壤背景值 ^[13]
Si	9 576.27 ± 5 848.63	5 992.10 ± 38.86	3 337.45 ± 1 411.26	6 301.94 ± 1 050.32			
Ti	100.45 ± 45.81	107.33 ± 32.61	65.44 ± 28.22	112.48 ± 18.75	47.20	55.70	
Al	4 435.04 ± 2 034.19	4 479.47 ± 3 296.87	2 467.36 ± 1 169.3	3 431.66 ± 571.94			
Mn	62.20 ± 52.79	77.96 ± 46.92	48.41 ± 29.37	62.86 ± 10.48	77.60	42.40	600.00
Mg	231.20 ± 229.52	91.25 ± 37.51	58.2 ± 24.29	126.88 ± 21.15			
Ca	2 213.67 ± 1 613.35	328.15 ± 428.48	163.01 ± 105.02	858.80 ± 143.13	634.80	1 267.80	
Na	931.39 ± 428.73	815.94 ± 264.07	528.84 ± 194.77	758.72 ± 126.45			
K	1 001.77 ± 455.00	820.08 ± 460.36	612.42 ± 492.26	787.57 ± 131.26	633.30	1 685.00	
Cu	53.3 ± 43.52	67.29 ± 34.89	60.42 ± 28.04	57.80 ± 9.63	35.70	58.40	23.00
Zn	335.79 ± 246.34	259.43 ± 168.92	184.96 ± 124.98	260.06 ± 43.34	165.40	473.50	68.00
As	1.9 ± 1.34	4.88 ± 6.56	2.57 ± 0.59	1.97 ± 0.33	24.10	22.20	11.20
Pb	27.15 ± 19.98	36.20 ± 17.4	63.06 ± 86.18	34.62 ± 5.77	117.60	266.40	20.00
Cr	23.43 ± 27.4	16.58 ± 31.44	19.53 ± 30.28	15.22 ± 2.54	9.30	4.70	64.00
Ni	11.99 ± 5.57	43.89 ± 39.98	6.77 ± 5.62	7.23 ± 1.21	13.90	17.40	29.00
Co	7.28 ± 10.16	1.20 ± 0.51	0.99 ± 0.18	1.79 ± 0.30			13.00
Cd	0.49 ± 0.19	0.75 ± 0.40	0.43 ± 0.45	0.52 ± 0.09			0.10
Hg	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01			0.07
Fe	1 872.93 ± 1 599.46	1 880.39 ± 1 203.79	837.6 ± 671.57	1 530.31 ± 255.05	574.80	523.80	
V	1.89 ± 1.14	1.59 ± 0.66	0.87 ± 0.48	1.45 ± 0.24	0.70	28.50	

2.2 来源解析

2.2.1 富集因子分析

以不同元素为参比元素所得的富集因子的值可能存在较大的差别^[20],故分别以地球化学性质稳定的 Ti、Al、Fe 作为参比元素,以太原市土壤为背景值,对太原市 PM_{2.5}中 19 种元素进行分析. 研究显示^[20],太原市土壤中 Si、Ti、Al、Mn、Mg、Ca、Na、K、Cu、Zn、As、Pb、Cr、Ni、Co、Cd、Hg、Fe、V 的背景值(质量分数)分别为 29.56%、0.39%、6.83%、0.06%、0.88%、1.54%、1.15%、1.92%、

0.002 3%、0.068%、0.000 702%、0.002%、0.006 4%、0.002 9%、0.001 3%、 $9.7 \times 10^{-6}\%$ 、 $6.5 \times 10^{-6}\%$ 、3.08%、0.008%. 依据公式(1)计算得出太原市 PM_{2.5}中各元素的富集因子见图 2.

由图 2 可知,所得到的 19 种元素的富集因子差别不大,表明研究太原市 PM_{2.5}元素的富集程度可以选用 Ti、Al、Fe 中任一种元素作为背景元素. PM_{2.5}中富集因子均大于 10 的元素为 Cu、Zn、Pb、Cd,均为重金属元素,表明这些元素的富集主要与人类活动有关,即 PM_{2.5}中 Cu、Zn、Pb、Cd 元素主要来源

是人为源,是污染元素;而其他 15 种元素富集因子均小于 10,相对于地壳未富集,因此主要来源为自然源.

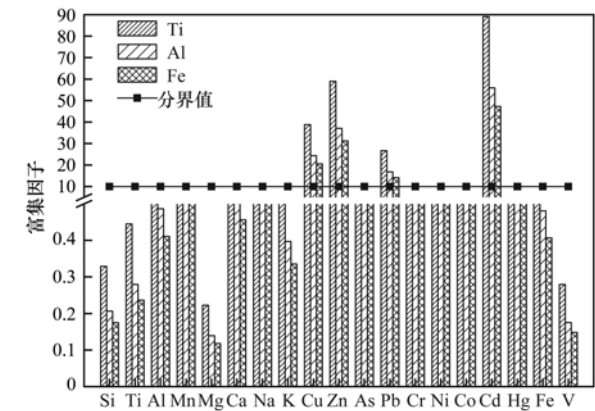


图2 太原市 PM_{2.5} 中 19 种元素的富集因子

Fig. 2 Enrichment factors of 19 elements in PM_{2.5} in Taiyuan

2.2.2 主因子分析

采用 SPSS 软件对太原市环境空气颗粒物 PM_{2.5} 中 19 种化学元素的浓度进行最大方差旋转因子分析. 所得各元素与主因子的相关系数见表 4.

(1)主因子 1 与元素 Si、Ca、Na、K、Fe、V 的相关性最高,均大于 0.8,它们的富集因子小于 10,且这 6 种元素富集因子的值均小于 1. 其中 Si 为土壤风沙尘的标识元素^[21],因此可认为主因子 1 代表自然因子中的土壤风沙尘.

(2)主因子 2 与元素 Mn、Zn、Pb 的相关性最高,分别为 0.897、0.884 和 0.864,且 Pb 的富集因子大于 10. 环境空气中的 Mn、Pb 主要来自燃煤^[19],说明主因子 2 代表人为因子,主要来源为人为源. 故主因子 2 可代表煤烟尘.

(3)主因子 3 与元素 Cu 的相关性很高,为

表 4 太原市环境空气环境 PM_{2.5} 中 19 种元素最大方差旋转因子分析 (n=42)

Table 4 Orthogonal rotation-Varimax matrix of 19 elements in PM_{2.5} in Taiyuan (n=42)

元素	主因子 1	主因子 2	主因子 3	主因子 4	主因子 5
Si	0.928	0.011	0.320	0.050	-0.072
Ti	0.130	0.017	-0.009	-0.151	0.961
Al	0.795	0.386	-0.059	0.175	0.168
Mn	0.237	0.897	-0.198	0.271	-0.111
Mg	0.776	-0.112	-0.342	0.043	0.422
Ca	0.932	0.147	0.174	-0.131	0.023
Na	0.902	-0.049	0.135	0.19	0.168
K	0.869	0.360	0.003	0.022	0.268
Cu	0.208	0.117	0.938	-0.036	-0.055
Zn	0.299	0.884	0.104	-0.022	-0.193
As	-0.047	0.075	0.067	0.905	-0.019
Pb	-0.164	0.864	0.154	0.048	0.369
Cr	0.559	-0.020	0.795	-0.102	-0.008
Ni	0.778	-0.098	-0.38	0.031	0.391
Co	0.642	0.308	-0.577	-0.184	-0.126
Cd	0.335	0.150	-0.172	0.807	-0.156
Hg	0.788	-0.004	0.251	0.312	-0.072
Fe	0.810	0.383	0.271	0.144	-0.198
V	0.878	0.203	0.208	0.007	-0.232
方差贡献率/%	43.460	15.690	13.410	9.590	9.030
累计贡献率/%	43.460	59.150	72.570	82.160	91.190

0.938,且 Cu 的富集因子大于 10,而环境空气中 Cu 含量升高的主要原因是机动车辆尾气直接排放,说明主因子 3 代表人为因子,代表了机动车尾气,贡献率达 13.41%.

(4)主因子 4 与元素 As 的相关性很高,为 0.905,As 主要来源于有色金属冶炼厂,属工业排放,说明主因子 4 代表人为因子,代表工业粉尘,贡献率达 9.59%.

(5)主因子 5 与元素 Ti 的相关性很高,为 0.961,Ti 为地壳元素,与土壤资源有关^[22],可能由周围广泛的建筑活动引起的,故主因子 5 代表人为因子中的建筑尘,贡献率达 9.03%.

2.3 重金属的潜在生态风险特征

由公式(2)、(3)、(4)计算太原市各点位环境空气颗粒物中重金属生态危害系数以及潜在生态风险指数,见表 5.

表 5 太原市环境空气颗粒物重金属潜在生态危害系数及生态风险指数
Table 5 Potential ecological risk index of heavy metals in particulate matters

项目	潜在生态风险系数 E_r^i										潜在生态 风险指数 RI
	Mn	Cu	Zn	As	Pb	Cr	Ni	Co	Cd	Hg	
毒性系数	1	5	1	10	5	2	5	5	30	80	
点位 1	0.81	103.64	54.60	13.31	68.01	5.91	21.27	20.37	1 203.09	160.00	1 651.01
点位 2	1.32	154.41	41.18	44.28	100.69	5.07	69.32	5.29	1 578.2	137.32	2 137.08
点位 3	1.31	215.90	46.2	40.16	305.45	9.48	512.05	6.18	800.64	136.00	2 073.37
兰州 ^[22]		260.38	64.46		36.33	12.62	198.08		1 163.79		1 735.67

由表 5 可知, 3 个点位 $PM_{2.5}$ 中 10 种重金属生态危害程度基本一致, 依次为: $Cd > Ni > Hg > Pb > Cu > Zn > As > Co > Cr > Mn$. 其中, Mn、As、Cr、Co 的潜在风险系数均小于 40, 生态危害程度为轻微; Cd 的潜在风险系数最高, 为 1 193.98, 生态危害程度为极强; Ni 的潜在风险系数为 200.88, 介于 160 ~ 320 之间, 生态危害程度为强; Cu、Pb、Hg 的潜在生态风险系数相差不大, 在 80 ~ 160 之间, 生态危害程度为较强; Zn 的潜在生态风险系数为 47.33, 在 40 ~ 80 之间, 生态危害程度为中等. 由多种重金属总的潜在生态风险指数可知, 太原市环境空气 $PM_{2.5}$ 中重金属的潜在生态风险指数 RI 为 1 953.82, 远远大于 600, 潜在的生态风险极强. 太原市 $PM_{2.5}$ 中 Pb、Ni 的潜在生态风险系数较兰州市高, 且太原市 $PM_{2.5}$ 中 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、Cd 这 6 种重金属的 RI 为 1 889.72, 较兰州市 RI 值高, 两市潜在的生态风险均为极强.

比较分析各采样点重金属的潜在生态风险系数, 3 号点位作为相对清洁区, 其 $PM_{2.5}$ 中, Cu、Pb、Cr、Ni 的生态风险明显高于 1 号点位与 2 号点位,

且 Mn、As 的生态风险系数均高于 1 号点位. 比较分析各采样点的 RI 值, 其潜在生态风险指数为 2 073.33, 明显高于 1 号点位, 且与 2 号点位相差不大. 这表明采样点 3 周围可能存在重金属污染源, 具体原因还需进一步的研究.

2.4 人体暴露评估

2.4.1 暴露量的计算

根据公式(5) ~ (8) 以及表 2 列出的模型参数, 计算得到不同暴露途径的暴露量, 结果见表 6. 其中数据显示, 经手口摄食暴露强度最大, 呼吸吸入暴露强度最小, 皮肤接触暴露强度居中, 表明环境空气中人体暴露的主要途径是经手口摄食暴露; 各重金属非致癌风险暴露剂量强度顺序为: $Zn > Cu > Mn > Pb > Ni > Co > Cr > As > Cd > Hg$, 致癌重金属呼吸吸入终身暴露剂量均较小, 其强度顺序为: $Ni > Co > Cr > As > Cd$. 儿童的手口摄食暴露明显高于成人, 其余两种暴露途径的暴露量为成人高于儿童, 且儿童在 3 种暴露途径的总暴露剂量为成人的 2.00 倍, 表明儿童重金属暴露风险高于成人.

表 6 重金属日暴露量
Table 6 Heavy metal daily exposure values

元素	D_{ingest}		D_{inh}		D_{dermal}		EC_{inh}
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	
Mn	8.86×10^{-3}	4.43×10^{-3}	1.68×10^{-7}	6.71×10^{-7}	7.09×10^{-5}	1.93×10^{-4}	
Cu	9.27×10^{-3}	4.63×10^{-3}	1.75×10^{-7}	7.02×10^{-7}	7.41×10^{-5}	2.02×10^{-4}	
Zn	4.08×10^{-2}	2.04×10^{-2}	7.72×10^{-7}	3.09×10^{-6}	3.26×10^{-4}	8.86×10^{-4}	
As	3.85×10^{-5}	1.92×10^{-5}	7.29×10^{-10}	2.91×10^{-9}	3.08×10^{-7}	8.37×10^{-7}	3.85×10^{-9}
Pb	7.86×10^{-3}	3.93×10^{-3}	1.49×10^{-7}	5.96×10^{-7}	6.29×10^{-5}	1.71×10^{-4}	
Cr	1.12×10^{-4}	5.62×10^{-5}	2.13×10^{-9}	8.52×10^{-9}	8.99×10^{-7}	2.44×10^{-6}	1.13×10^{-8}
Ni	1.24×10^{-3}	6.22×10^{-4}	2.36×10^{-8}	9.42×10^{-8}	9.94×10^{-6}	2.70×10^{-5}	1.25×10^{-7}
Co	2.20×10^{-4}	1.10×10^{-4}	4.18×10^{-9}	1.67×10^{-8}	1.76×10^{-6}	4.79×10^{-6}	2.21×10^{-8}
Cd	6.85×10^{-6}	3.43×10^{-6}	1.30×10^{-10}	5.19×10^{-10}	5.48×10^{-8}	1.49×10^{-7}	6.87×10^{-10}
Hg	1.44×10^{-6}	7.19×10^{-7}	2.72×10^{-11}	1.09×10^{-10}	1.15×10^{-8}	3.13×10^{-8}	
$\sum$	6.83×10^{-2}	3.42×10^{-2}	1.29×10^{-6}	5.18×10^{-6}	5.47×10^{-4}	1.48×10^{-3}	1.62×10^{-7}

2.4.2 风险值的计算

根据公式(9)、(10), 以及表 7 列出的 10 种重金属的非致癌参考剂量 RfD, 计算得到成人和儿童

的暴露风险值 HQ、HI, 结果见表 7. 其中数据显示, 各途径的非致癌风险强度顺序为: 经手口摄食 > 皮肤接触 > 呼吸吸入; 各重金属非致癌风险强度顺序

一致, 表现为: Pb > Cu > Mn > Zn > Ni > Cr > Co > Hg > Cd > As, 其中 Pb 的非致癌风险比其它重金属高出 1~3 个数量级; 儿童非致癌风险明显高于成人. 所有重金属 3 种途径的非致癌风险叠加值大于 1, 表明存在非致癌风险.

根据公式(11)、(12), 以及表 8 列出的 5 种致

癌重金属的斜率系数 SF, 计算得到的致癌风险 TR, 结果见表 8. 结果显示, 5 种致癌重金属的呼吸吸入途径致癌风险程度为: Cr > Co > Ni > As > Cd, 单种重金属的 TR 值以及 R 值均小于 10⁻⁶, 低于致癌风险的量级水平, 表明 PM_{2.5} 中重金属不具有致癌风险.

表 7 重金属非致癌暴露参考值及风险值

Table 7 Elemental hazard quotient, risk and exposure pathways

群体	元素	RfD _{ingest}	RfD _{inh}	RfD _{dermal}	HQ _{ingest}	HQ _{inh}	HQ _{dermal}	HI
儿童	Mn	4.70 × 10 ⁻²	1.40 × 10 ⁻⁵	2.40 × 10 ⁻³	1.89 × 10 ⁻¹	1.20 × 10 ⁻²	1.70 × 10 ⁻⁷	2.01 × 10 ⁻¹
	Cu	3.70 × 10 ⁻²	4.02 × 10 ⁻²	1.90 × 10 ⁻³	2.50 × 10 ⁻¹	4.18 × 10 ⁻⁶	1.41 × 10 ⁻⁷	2.50 × 10 ⁻¹
	Zn	3.00 × 10 ⁻¹	3.01 × 10 ⁻¹	6.00 × 10 ⁻²	1.36 × 10 ⁻¹	2.56 × 10 ⁻⁶	1.96 × 10 ⁻⁵	1.36 × 10 ⁻¹
	As	3.00 × 10 ⁻⁴	3.01 × 10 ⁻⁴	1.23 × 10 ⁻⁴	1.28 × 10 ⁻⁴	2.42 × 10 ⁻⁶	3.79 × 10 ⁻¹¹	1.31 × 10 ⁻⁴
	Pb	3.50 × 10 ⁻³	3.52 × 10 ⁻³	5.25 × 10 ⁻⁴	2.24	4.23 × 10 ⁻⁵	3.30 × 10 ⁻⁸	2.25
	Cr	5.00 × 10 ⁻³	2.86 × 10 ⁻⁵	2.50 × 10 ⁻⁴	2.24 × 10 ⁻²	1.27 × 10 ⁻⁴	3.85 × 10 ⁻¹⁰	2.25 × 10 ⁻²
	Ni	2.00 × 10 ⁻²	2.06 × 10 ⁻²	1.00 × 10 ⁻³	6.22 × 10 ⁻²	1.14 × 10 ⁻⁶	9.95 × 10 ⁻⁹	6.22 × 10 ⁻²
	Co	2.00 × 10 ⁻²	5.71 × 10 ⁻⁶	1.60 × 10 ⁻²	1.10 × 10 ⁻²	7.31 × 10 ⁻⁴	2.82 × 10 ⁻⁸	1.17 × 10 ⁻²
	Cd	1.00 × 10 ⁻³	1.00 × 10 ⁻³	5.00 × 10 ⁻⁵	6.85 × 10 ⁻³	1.30 × 10 ⁻⁷	2.74 × 10 ⁻¹²	6.85 × 10 ⁻³
	Hg	3.00 × 10 ⁻⁴	8.57 × 10 ⁻⁵	2.10 × 10 ⁻⁵	4.8 × 10 ⁻³	3.18 × 10 ⁻⁷	2.42 × 10 ⁻¹³	4.80 × 10 ⁻³
Σ					2.93	1.29 × 10 ⁻²	1.99 × 10 ⁻⁵	2.94
成人	Mn	4.70 × 10 ⁻²	1.40 × 10 ⁻⁵	2.40 × 10 ⁻³	9.43 × 10 ⁻²	4.79 × 10 ⁻²	8.03 × 10 ⁻²	2.22 × 10 ⁻¹
	Cu	3.70 × 10 ⁻²	4.02 × 10 ⁻²	1.90 × 10 ⁻³	1.25 × 10 ⁻¹	1.67 × 10 ⁻⁵	1.06 × 10 ⁻¹	2.31 × 10 ⁻¹
	Zn	3.00 × 10 ⁻¹	3.01 × 10 ⁻¹	6.00 × 10 ⁻²	6.79 × 10 ⁻²	1.03 × 10 ⁻⁵	1.47 × 10 ⁻²	8.27 × 10 ⁻²
	As	3.00 × 10 ⁻⁴	3.01 × 10 ⁻⁴	1.23 × 10 ⁻⁴	6.40 × 10 ⁻⁵	9.67 × 10 ⁻⁶	6.80 × 10 ⁻³	6.88 × 10 ⁻³
	Pb	3.50 × 10 ⁻³	3.52 × 10 ⁻³	5.25 × 10 ⁻⁴	1.124	1.69 × 10 ⁻⁴	3.26 × 10 ⁻¹	1.45
	Cr	5.00 × 10 ⁻³	2.86 × 10 ⁻⁵	2.50 × 10 ⁻⁴	1.92 × 10 ⁻²	5.10 × 10 ⁻⁴	9.78 × 10 ⁻³	2.95 × 10 ⁻²
	Ni	2.00 × 10 ⁻²	2.06 × 10 ⁻²	1.00 × 10 ⁻³	3.11 × 10 ⁻²	4.57 × 10 ⁻⁶	2.70 × 10 ⁻²	5.81 × 10 ⁻²
	Co	2.00 × 10 ⁻²	5.71 × 10 ⁻⁶	1.60 × 10 ⁻²	1.26 × 10 ⁻²	6.67 × 10 ⁻³	2.99 × 10 ⁻⁴	1.96 × 10 ⁻²
	Cd	1.00 × 10 ⁻³	1.00 × 10 ⁻³	5.00 × 10 ⁻⁵	3.43 × 10 ⁻³	5.19 × 10 ⁻⁷	2.98 × 10 ⁻³	6.41 × 10 ⁻³
	Hg	3.00 × 10 ⁻⁴	8.57 × 10 ⁻⁵	2.10 × 10 ⁻⁵	2.39 × 10 ⁻²	1.27 × 10 ⁻⁶	1.49 × 10 ⁻³	3.89 × 10 ⁻³
Σ					1.48	5.53 × 10 ⁻²	5.75 × 10 ⁻¹	2.11

表 8 重金属呼吸吸入途径致癌风险值

Table 8 Slope factors for carcinogens and carcinogenic risks of heavy metals

项目	As	Cr	Ni	Co	Cd	Σ
SF _{inh}	15.1	42	0.84	9.8	6.4	
TR	5.82E-08	4.73E-07	1.05E-07	2.16E-07	4.39E-09	8.57E-07

3 结论

(1) 太原市采暖季环境空气 PM_{2.5} 中主要的无机元素为地壳元素; 工业区多数元素高于居民交通混合区和相对清洁区.

(2) 富集因子分析显示, 太原市环境空气 PM_{2.5} 中的 Cu、Zn、Pb、Cd 与人类的活动有关. 主因子分析进一步显示太原市 PM_{2.5} 中元素的主要排放源包括: 土壤风沙尘、煤烟尘、机动车尾气、工业粉尘和建筑尘, 贡献率分别为 43.46%、15.69%、13.41%、9.89%、9.03%, 因此进一步加强有关这 5 类源的控制, 能够有效降低环境空气颗粒物的

污染.

(3) 太原市环境空气 PM_{2.5} 中 Cd 的潜在生态风险系数最高, 生态危害极强; 10 种重金属 Mn、Cu、Zn、As、Pb、Cr、Ni、Co、Cd、Hg 的潜在生态风险极强. 重金属不同途径的暴露强度为: 经手口摄食暴露 > 皮肤接触暴露 > 呼吸吸入暴露; 儿童重金属暴露风险高于成人; PM_{2.5} 中重金属存在非致癌风险, 但不具有致癌风险, 儿童非致癌风险明显高于成人.

参考文献:

[1] 王平利, 戴春雷, 张成江. 城市大气中颗粒物的研究现状及健康效应[J]. 中国环境监测, 2005, 21(1): 83-87.

- [2] 黄鹂鸣, 王格慧, 王荟, 等. 南京市空气中颗粒物 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 污染水平[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(4): 334-337.
- [3] 浦一芬, 吴瑞霞. 2004 年北京秋季大气颗粒物的化学组分和来源特征[J]. 气候与环境研究, 2006, **11**(6): 739-744.
- [4] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 广州市夏、冬季室内外 $PM_{2.5}$ 中元素组分的特征与来源[J]. 分析科学学报, 2007, **23**(4): 383-388.
- [5] Charlesworth S, De Miguel E, Ordonez A. A review of the distribution of particulate trace elements in urban terrestrial environments and its application to considerations of risk [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, **33**(2): 103-123.
- [6] 林俊, 刘卫, 李燕, 等. 上海市郊区大气细颗粒和超细颗粒物中元素粒径分布研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 982-987.
- [7] Dockery D W, Schwartz J, Spengler J D. Air pollution and daily mortality: associations with particulates and acid aerosols [J]. *Environmental Research*, 1992, **59**(2): 362-373.
- [8] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment [J]. *Atmospheric Environment*. 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [9] Diaz R V, Dominguez E R. Health risk by inhalation of $PM_{2.5}$ in the metropolitan zone of the City of Mexico [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, **72**(3): 866-871.
- [10] Hu X, Zhang Y, Ding Z H, *et al.* Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and $PM_{2.5}$ in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **57**: 146-152.
- [11] 牟林, 彭林, 任照芳, 等. 潞城市大气 PM_{10} 中化学元素分布特征[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(3): 619-622.
- [12] 林海鹏, 武晓燕, 战景明, 等. 兰州市某城区冬夏季大气颗粒物及重金属的污染特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 810-815.
- [13] 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价[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(8): 2006-2015.
- [14] 王宗爽, 武婷, 段小丽, 等. 环境健康风险评价中我国居民呼吸速率暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(10): 1171-1175.
- [15] 黄勇, 杨忠芳, 张连志, 等. 基于重金属的区域健康风险评价——以成都经济区为例 [J]. 现代地质, 2008, **22**(6): 990-997.
- [16] 李伟芳, 白志鹏, 史建武, 等. 天津市环境空气中细粒子的污染特征与来源[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 394-400.
- [17] 古金霞. 天津市区 $PM_{2.5}$ 污染特征及灰霾等级评价方法研究 [D]. 天津: 南开大学, 2010.
- [18] Thomaidis N S, Bakeas E B, Siskos P A. Characterization of lead, cadmium, arsenic and nickel in $PM_{2.5}$ particles in the Athens atmosphere, Greece [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(6): 959-966.
- [19] 谭吉华, 段菁春. 中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议[J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, **30**(2): 145-155.
- [20] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 用富集因子法评价我国城市土壤风沙尘元素的污染[J]. 南开大学学报, 2006, **39**(2): 94-99.
- [21] 谢骅, 黄世鸿, 李如祥, 等. 我国若干地区总悬浮颗粒物和沉积尘来源解析[J]. 气象科学, 1999, **19**(1): 26-32.
- [22] Balasubramanian R, Qian W B. Characterization and source identification of airborne trace metals in Singapore [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2004, **6**(10): 813-818.
- [23] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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