

燃煤电厂周边地区积尘重金属污染 特征与健康风险评价*

陈 耿, 刘 军, 杨立辉, 柯钊跃
(广东省环境监测中心, 广东 广州 510308)

摘要: 对广东某燃煤电厂周边地区的民宅积尘和土壤中重金属含量进行测定, 分析重金属的污染特征和分布规律, 并应用美国 EPA 健康风险评价模型对积尘重金属进行健康风险评价。结果表明, 研究区域积尘重金属污染较重, 含量表现为 $Zn > Mn > Pb > Cu > Cr > As > Cd > Hg$, 均不同程度高于土壤中的含量。积尘中 Zn、Pb、Cd、Cu 受到的人为污染较明显, 主要为工业源和交通源影响; As、Hg、Mn 受到的人为污染不明显。积尘重金属的空间分布受电厂排放烟尘的影响明显, 内梅罗指数与当地风向风频有明显相关性, 并随着与电厂距离的增加而减小; 积尘中 Pb、Zn、Hg 含量呈现随着与电厂距离增加而减小的趋势。研究区域儿童潜在的健康风险明显高于成人, 不同元素非致癌风险排序为 $Pb > Mn > Cr > As > Zn > Cu > Hg > Cd$, 致癌风险排序为 $As > Cr > Pb > Cd$ 。Pb 对儿童存在非致癌风险, 需要引起重视; 其它元素对儿童的非致癌风险较小, 成人的非致癌风险可忽略。各元素的致癌风险均在可接受范围, 不会对儿童和成人造成致癌危害。

关键词: 燃煤电厂; 积尘; 重金属; 污染特征; 健康风险

中图分类号: X821 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2016) 01-0107-07

Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in dust surrounding a coal-fired power plant

CHEN Geng, LIU Jun, YANG Lihui, KE Zhaoyue

(Guangdong Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China)

Abstract: The aim of this work was to measure the concentrations of heavy metals in house dust and soil samples as well as study the characteristics and distribution of heavy metal pollution in the surrounding area of coal-fired power plant in Guangdong Province. The risk assessment of heavy metals in dust was also carried out using US EPA Health Risk Assessment Model. The results revealed that the order of concentrations of metals was $Zn > Mn > Pb > Cu > Cr > As > Cd > Hg$. The heavy metal pollution levels of dust were relatively high, which were higher than those in soil to varying degrees. The pollution of Zn, Pb, Cd and Cu in dust was likely to be anthropogenic, mainly due to industrial and traffic sources. However, the pollution of As, Hg and Mn in dust was not obviously anthropogenic. Spatial distribution of heavy metal in dust was clearly affected by soot emissions of power plant. Nemerow Indexes were significantly correlated with local wind direction and frequency, decreased with incremental distance from the power plant. It is evident that the concentrations of Pb, Zn and Hg also decreased with incremental distance from the power plant. Potential health risk for children was significantly higher than for adults. The non-cancer risk of metals was $Pb > Mn > Cr > As > Zn > Cu > Hg > Cd$, while the carcinogen risk of metals was $As > Cr > Pb > Cd$. In particular, the non-cancer risk of Pb for children was high, which required

* 收稿日期: 2015-07-06

基金项目: 广东省环保专项资金资助项目 (2110399)

作者简介: 陈耿 (1985年生), 男; 研究方向: 环境监测与评价; E-mail: q_geng@qq.com

more attention. The non-cancer risks of other metals for children were low. Non-cancer risks for adults were ignorable. Carcinogen risks of metals were in an acceptable range, indicating no carcinogenic hazard to children and adults.

Key words: coal-fired power plant; dust; heavy metal; pollution characteristic; health risk

煤是我国最主要的能源, 2012 年我国燃煤电厂耗煤量为 17.4 亿 t, 占煤炭消耗总量的 49.3%^[1]。煤中所含的 Hg、Pb、As、Cr、Cd 等痕量重金属在燃烧过程中会部分或全部挥发成气态^[2-4], 富集在细颗粒物表面随废气排放^[5]。燃煤重金属的排放量巨大, Nraigu^[6] 测算出燃煤电厂排放的痕量金属占人为源的贡献率为 As 2%~6%、Cd 2%~3%、Cr 14%~17%、Hg 9%~17%。吴文俊等^[7] 估算我国 2007 年燃煤 Pb 和 As 大气排放量分别为 12 228.9 和 1 591.9 t。

电厂烟尘中所含重金属毒性大且化学稳定性强, 具有迁移性和沉积性, 对环境和人体健康危害较大^[8]。这些烟尘沉降到环境中, 经过长期暴露, 降水淋洗, 水溶性和挥发性成分流失后, 形成重金属明显富集的积尘, 其部分重金属含量大大高于土壤^[9-11]。积尘普遍存在于人群住宅的角落, 与人体接触的概率高, 通过呼吸道和皮肤被人体吸收或直接摄入, 对人体健康的影响是潜在的、隐蔽的、长期的。我国对积尘重金属健康风险评价的研究起步较晚, 已有的研究多集中于城市地表灰尘^[12-21], 而燃煤电厂周边地区民宅积尘重金属的污染水平和分布特征尚缺基础的研究数据。现有的《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011) 仅关注到汞, 对其他重金属均无标准要求; 燃煤电厂环境影响评价也尚未关注到积尘这种长期的累积影响, 即便在烟尘达标排放的情况下, 积尘多种重金属对人体健康的危害仍然不可忽视, 但如何评估电厂长期生产造成的此类累积污染对人体的健康风险尚未见报。

本文选取广东省一家大型山区燃煤电厂作为研究对象。该电厂投产至今 10 年, 设 6 台循环流化床机组, 年耗煤 700 多万 t, 所处地形较不宜宜大气污染扩散。本文采集了该电厂周边的民宅积尘和土壤样品, 测定了 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn 和 Hg 等 8 种元素的含量, 利用富集因子法和内梅罗综合污染指数法评价积尘的污染程度, 研究积尘重金属的分布规律, 并应用美国 EPA 健康风险评价模型开展健康风险评价, 旨在为类似电厂对周边环境造成的污染修复和人群卫生防护提供参考。

1 材料与方法

1.1 点位布设和样品采集

据环评资料, 该电厂大气污染物最大落地浓度约为距厂界 1 km 处。以其为中心, 在当地主导风向西北方向和次主导风向西南方向的上风向距厂界 1 km 处和下风向距厂界 1、3 和 5 km 处各设 1 个监测点, 共 8 个监测点 (图 1)。于 2014 年 9 月在各点位随机选择 3 户民宅分别采集室内外积尘样品, 采集表层 20 cm 土壤样品, 共采集 48 个积尘样品和 8 个土壤样品。

1.2 样品分析与数据处理

积尘和土壤样品前处理先进行风干, 再用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 进行消解。元素 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb 和 Zn 采用 PE optima 8300 型等离子发射光谱仪测定, Hg 采用 DMA80 型测汞仪测定。质控方面, 选测 6 组平行样相对偏差为 0%~11%, 测 3 组标准样品相对误差为 -16%~31%。同时, 积尘样品在现场采用 Alpha6500 型手持式 X 射线荧光光谱仪进行快速测定。

数据处理采用 SPSS 及 Excel 软件。

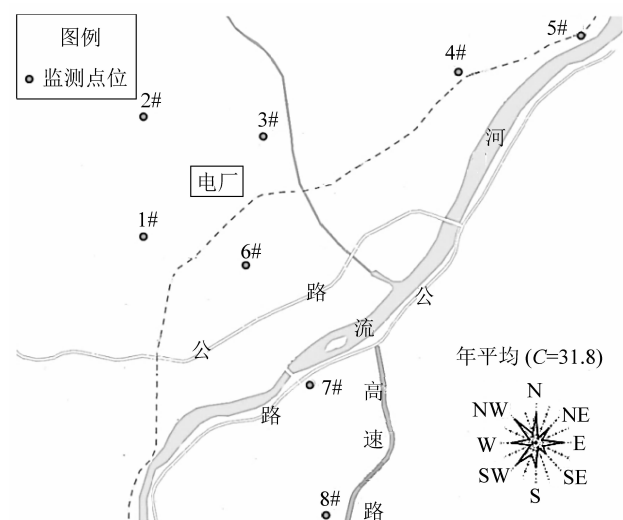


图 1 燃煤电厂周边地区积尘和土壤采样布点

Fig. 1 Sampling sites of dust and soil surrounding coal-fired power plant

1.3 富集因子法

富集因子通过参考元素减小自然差异对污染评价的影响,是判断表生环境中污染程度的有效指标^[21]。富集因子的计算公式为^[22-23]

$$EF = \frac{(C_i/C_n)_s}{(C_i/C_n)_b}$$

式中, C_i 为元素 i 的浓度, C_n 为参比元素的浓度, s 和 b 分别表示样品和背景。研究认为^[24], 当 $EF < 10$ 时, 元素未富集, 主要为自然源; $EF \geq 10$ 时, 元素被富集, 数值越大富集程度越高, 主要是人为污染。

1.4 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数 ($P_{\text{内梅罗}}$) 法可用于评价多种污染物的综合污染水平

$$P_{\text{内梅罗}} = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中, C_i 为污染物 i 的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_i 为参照标准; $(C_i/S_i)_{\max}$ 为污染中指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为污染中指数平均值。

1.5 健康风险评价方法

参考美国 EPA 推荐健康风险评价模型 CDI^[25-26]、我国场地环境评价指南^[27] 和国内外相关研究^[12,28-29], 对研究区域民宅积尘的重金属进行健康风险评价。积尘重金属的暴露途径主要有经手-口摄入、皮肤接触和经呼吸系统吸入, 对人体健康的风险效应可分为非致癌风险与致癌风险。

1.5.1 暴露模型与参数 经手-口摄入途径日平均暴露量 (CDI_{or})

$$CDI_{\text{or}} = \frac{C \times \text{OR} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}}$$

皮肤接触日平均暴露量 (CDI_{der})

$$CDI_{\text{der}} = \frac{C \times \text{SA} \times \text{SL} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}}$$

吸入途径日平均暴露量 (CDI_{inh})

$$CDI_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{In} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}}$$

慢性日平均暴露量 (CDI)

$$CDI = CDI_{\text{or}} + CDI_{\text{der}} + CDI_{\text{inh}}$$

式中, CDI 、 CDI_{or} 、 CDI_{der} 、 CDI_{inh} 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, C 为积尘重金属平均含量的 95% 置信上限, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 其余参数含义及取值见表 1^[27]。

1.5.2 健康风险表征 非致癌风险大小由风险商 (HQ) 来表征, 致癌风险大小由致癌指数 (CR) 来表征^[25]

$$HQ = CDI/R_{\text{D}}, CR = CDI \times SF$$

表 1 积尘重金属日平均暴露量计算参数取值

Table 1 Parameter values in average daily dose calculation models of heavy metals in dust

参数	含义	儿童取值	成人取值
OR	经消化道摄入量/ ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$)	200	100
In	呼吸频率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	5	20
PEF	颗粒物排放因子/ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.32×10^9	1.32×10^9
SA	暴露皮肤表面积/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	1800	5000
SL	皮肤黏着度/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	0.2	0.07
ABS	皮肤吸收系数, 无量纲	0.001	0.001
EF	暴露频率/ ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$)	350	350
ED	暴露年限/ a	6	24
BW	体质量/ kg	15	55.9
AT	平均作用时间/ d	365×6 (非致癌)	365×24 (非致癌)
		365×70 (致癌)	365×70 (致癌)
CF	转换系数/ ($\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$)	10^{-6}	10^{-6}

式中, CDI 为慢性日平均暴露量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; R_{D} 为参考剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 分为经手-口摄入参考剂量 $R_{\text{D}_{\text{or}}}$ 、皮肤接触参考剂量 $R_{\text{D}_{\text{der}}}$ 和经呼吸吸入参考剂量 $R_{\text{D}_{\text{inh}}}$; SF 为各暴露途径的致癌风险斜率系数, $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。重金属不同暴露途径的 R_{D} 和 SF 见表 2^[12,27-28,30]。

评价标准: 当 $HQ < 1$ 时, 认为非致癌风险较小或可以忽略; 当 $HQ > 1$ 时, 认为存在非致癌风险。当 $CR < 10^{-6}$ 时, 认为无致癌风险; 当 $CR = 10^{-6} \sim 10^{-4}$ 时, 认为致癌风险可接受; 当 $CR > 10^{-4}$ 时, 认为存在致癌风险。

2 结果与讨论

2.1 民宅积尘和土壤中重金属含量特征

由表 3 可见, 研究区域积尘中各元素平均含量表现为 $Zn > Mn > Pb > Cu > Cr > As > Cd > Hg$, 土壤则表现为 $Mn > Zn > Pb > Cu > Cr > As > Hg > Cd$ 。积尘中重金属污染较重, 8 种元素的平均含量均不同程度高于土壤的平均含量, 其中 Zn 、 Pb 、 Cd 、 Cu

表 2 重金属不同暴露途径的参考剂量和斜率因子
Table 2 Reference doses and gradient factors of heavy metals for different exposure routes

元素	R_{fdo}	R_{fdl}	R_{fdi}	SF
Pb	3.5×10^{-3}	3.52×10^{-3}	5.25×10^{-4}	8.5×10^{-3} (口)
Zn	0.30	6.0×10^{-2}	0.30	
As	3.0×10^{-4}	8.6×10^{-5}	1.23×10^{-4}	1.5(口), 7.5(皮肤), 1.5(呼吸)
Cu	4.0×10^{-2}	1.2×10^{-2}	4.02×10^{-2}	
Mn	4.7×10^{-2}	2.4×10^{-3}	1.40×10^{-5}	
Cd	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	5.00×10^{-5}	6.4(呼吸)
Cr	3.0×10^{-3}	6.0×10^{-5}	2.86×10^{-5}	42(呼吸)
Hg	3.0×10^{-4}	8.57×10^{-5}	2.10×10^{-5}	

平均含量分别为土壤的 11.3 倍、7.3 倍、7 倍、5.1 倍。常静等^[12]测得上海地表灰尘 Zn、Pb、Cu、Cd 平均值分别是土壤背景值的 6~8 倍, 与本研究结果接近。积尘中 Zn、Mn、Cd、Cr 室外平均含量比室内高 0.1~0.5 倍, Pb、Cu、Hg 室内平均含量比室外高 0.1~0.7 倍, As 则室内外相同。

上海、北京、重庆等地也开展了相同环境介质

灰尘中重金属的研究(表 3), 通过对比其平均含量水平可见, 较湖南长株潭(长沙、株洲、湘潭市)城区和安徽铜陵市等有色金属产区, 本研究积尘重金属含量相对较低; 但较其他的 9 个地区, 本研究积尘重金属含量较高, 其中 Pb、Zn、Mn、Hg 为最高, Cu、Cd 为第二高。可见, 研究区域积尘重金属污染达到国内中上水平。

表 3 积尘重金属含量参数统计
Table 3 Summary of analytical results of heavy metals concentrations in dust

统计参数	$w/(mg \cdot kg^{-1})$								
	Pb	Zn	As	Cu	Mn	Cd	Cr	Hg	
本研究区域	平均值	332	1137	6	172	717	1.3	92	0.91
	最小值	105	170	1	57	387	0.1	18	0.003
	最大值	769	5 840	19	381	1 800	7.8	404	3.39
	标准差	136	1 194	4	72	263	1.8	77	0.80
	95% UCL	372	1 484	7	193	793	1.8	115	1.13
	土壤平均值	46	102	5	34	381	0.1	28	0.73
各个对比城市	上海 ^[12]	213	687		186		0.97	219	
	北京 ^[13]	51			64	564	0.47	77	
	重庆 ^[14]	74	145	12	78		0.31	84	0.16
	西安 ^[15]	181	462	13	71	558		149	
	长株潭 ^[11]	1 502	2 031		180		56	70	
	合肥 ^[16]	132	1 071		68		4.5	97	
	铜陵 ^[17]	312	2 690	259	1347		20.7	145	
	兰州 ^[18]	96	227		86		0.84	95	
	开封 ^[19]	243	297		39			54	
	乌鲁木齐 ^[20]	83	549		81	586		110	
	沈阳 ^[31]	122	296	10	66		1.21	0.41	0.21

1) 95% UCL 为平均值的 95% 置信上限

2.2 快速测定与实验室分析方法比较

使用手持式 X 射线荧光光谱仪在现场对未经前处理的积尘样品快速测定, 若以实验室分析结果为真值, 各点位积尘中 Pb 含量的相对误差为 -26.1% ~ 18.1%, Zn 含量的相对误差为 -39.8% ~ 33.8%, Cu 含量的相对误差为

-17.3% ~ 18.5%, Mn 含量的相对误差为 -1.7% ~ 23.8%, Cr 含量的相对误差为 -33.1% ~ 32.5%, As 含量的相对误差为 312% ~ 1 833%, Cd 和 Hg 均未检出。快速测定方法检出限较高, 无法测出低含量的 Cd 和 Hg; As 分析结果偏大, 准确度较差; 而 Pb、Zn、Cu、Mn 和 Cr 的检测结果

相对误差均在 $\pm 40\%$ 以内。可见，虽然快速测定方法的精度和检出限不如实验室分析方法，但对某些金属的检测结果误差在可接受范围，节约了大量的时间与工作量，在精度要求不高或应急监测时可以发挥出重要作用。

2.3 积尘重金属的富集因子

本研究中选用 Ti 作为参比元素^[32-33]，以电厂周边地区表层土壤背景值计算各元素的富集因子，结果见表 4。

表 4 积尘中重金属的富集因子

Table 4 Enrichment factors of heavy metals in dust

元素	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	Hg
EF 值	2.83	16.95	7.96	12.25	4.58	17.74	27.30	3.02

研究区域民宅积尘中各重金属的富集因子 (EF) 排序为 $Zn > Pb > Cd > Cu > Cr > Mn > Hg > As$ ，Zn、Pb、Cd、Cu 的 EF 值 > 10 ，受到的人为污染较明显，主要为工业源和交通源影响^[34]。As、Hg、Mn 的 EF 值较小，受到的人为污染不明显。

2.4 积尘重金属空间分布特征

为综合评价各点位重金属污染程度，采用内梅罗综合污染指数法对各点位积尘重金属进行计算，Si 参照《土壤环境质量标准》(GB15618-1995) 二级标准。评价结果见表 5。

表 5 各点位积尘重金属污染内梅罗指数与气象条件

Table 5 Nemerow indexes of heavy metal pollution and weather conditions on sampling sites

监测 点位	与电厂相对 方位	受电厂影 响时风向	风频/ %	$P_{\text{内梅罗}}$
1#	西南 1 km	NE	4.4	3.07
2#	西北 1 km	SE	3.9	2.24
3#	东北 1 km	SW	7.5	4.28
4#	东北 3 km	SW	7.5	2.88
5#	东北 5 km	SW	7.5	1.94
6#	东南 1 km	NW	8.6	5.26
7#	东南 3 km	NW	8.6	4.54
8#	东南 5 km	NW	8.6	4.62

由表 5 可见，各点位积尘重金属污染内梅罗指数与当地风向风频有明显相关性，距电厂厂界 1 km 处各点位内梅罗指数由高至低为 $6\# > 3\# > 1\# > 2\#$ ，与各方向的风频大小对应。有关研究也有类似的结论^[35-36]，认为风向是造成积尘或土壤重金属空间分布差异的主要原因。随着与电厂厂界距离的

增加，内梅罗指数有下降的趋势，东北方向 $3\# > 4\# > 5\#$ ，东南方向 $6\# > 7\#$ 和 $8\#$ 。8# 点内梅罗指数高于 7# 点，可能由于 8# 点在高速公路旁，同时受机动车废气和道路扬尘的污染^[13]。

燃煤中 Pb、Zn、Hg 等元素存在于硫铁化合物中，燃烧时易于快速挥发，继而在烟气冷却过程中富集到细微粒子上^[8,37]，在大气环境中发生长距离迁移。本研究电厂主导风向和次主导风向下风向的民宅积尘中 Pb、Zn、Hg 含量均呈现随着与电厂距离增加而减小的趋势，与有关燃煤重金属迁移机理研究相符。

综上，研究区域民宅积尘中重金属受电厂排放烟尘的影响明显，其分布与气象条件有关，污染程度随着与电厂距离的增加而减小。

2.5 积尘重金属健康风险评价

2.5.1 评价结果 积尘重金属健康风险评价结果见表 6。3 种暴露途径的重金属非致癌日均暴露量均表现为儿童 $>$ 成人，手-口摄入 $>$ 皮肤接触 $>$ 呼吸系统吸入，经手-口摄入是重金属暴露风险的主要途径。

不同元素的非致癌风险商 HQ 表现为 $Pb > Mn > Cr > As > Zn > Cu > Hg > Cd$ 。儿童的 HQ 明显高于成人，其中 Pb 的 HQ > 1 ，存在非致癌风险；其它元素的 HQ 均小于 1，非致癌风险较小。成人的各元素 HQ 均小于 1，最高仅为 0.184，非致癌风险可以忽略。若减少儿童通过手-口摄入途径的接触量，培养好的卫生习惯，可有效降低当地积尘重金属的暴露风险。

致癌指数 CR 表现为 $As > Cr > Pb > Cd$ ，儿童 As、Cr、Pb 和成人 As 的 CR 值在癌症风险阈值范围 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ ，表明致癌风险较低，在可接受范围；儿童 Cd 和成人 Cr、Pb、Cd 的 $CR < 10^{-6}$ ，表明无致癌风险，对人体不会造成致癌危害。

2.5.2 不确定性分析 风险评价的不确定性和变异性来源于数据本身的变异、仿真模式或暴露参数的不确定性。本研究基于积尘中部分常见重金属进行健康风险评价，且为单元素评价，未考虑到其他污染物以及多种污染物联合作用产生的潜在风险。计算呼吸摄入量时，颗粒物排放因子使用的是土壤参考值，但民宅内积尘含水率更低、更松散，容易扬起，积尘实际排放因子应该高于土壤参考值，故可能低估了呼吸摄入部分的风险。评价模型使用暴露剂量代替摄入剂量，未考虑人体组织器官所吸收的有效剂量等因素，且保守估计的时间远长于真正的暴露时间，故风险在该部分被高估。

表 6 积尘重金属健康风险评估结果

Table 6 Evaluation of health risk assessment for heavy metals in dust

人群	重金属	非致癌日均暴露量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)			致癌日均暴露量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	非致癌风险商 HQ	致癌指数 CR
		手-口	皮肤	呼吸			
儿童	Pb	4.76×10^{-3}	8.56×10^{-6}	3.60×10^{-6}	4.08×10^{-4}	1.368	3.47×10^{-6}
	Zn	1.90×10^{-2}	3.42×10^{-5}	1.44×10^{-5}		0.064	
	As	8.95×10^{-5}	1.61×10^{-7}	6.78×10^{-8}	7.69×10^{-6}	0.301	1.16×10^{-5}
	Cu	2.47×10^{-3}	4.44×10^{-6}	1.87×10^{-6}		0.062	
	Mn	1.01×10^{-2}	1.83×10^{-5}	7.68×10^{-6}		0.772	
	Cd	2.30×10^{-5}	4.14×10^{-8}	1.74×10^{-8}	1.49×10^{-9}	0.023	9.56×10^{-9}
	Cr	1.47×10^{-3}	2.65×10^{-6}	1.11×10^{-6}	9.55×10^{-8}	0.573	4.01×10^{-6}
	Hg	1.45×10^{-5}	2.60×10^{-8}	1.10×10^{-8}		0.050	
成人	Pb	6.38×10^{-4}	2.23×10^{-6}	4.84×10^{-7}	5.47×10^{-5}	0.184	4.65×10^{-7}
	Zn	2.55×10^{-3}	8.91×10^{-6}	1.93×10^{-6}		0.009	
	As	1.20×10^{-5}	4.20×10^{-8}	9.10×10^{-9}	1.03×10^{-6}	0.041	1.57×10^{-6}
	Cu	3.31×10^{-4}	1.16×10^{-6}	2.51×10^{-7}		0.008	
	Mn	1.36×10^{-3}	4.76×10^{-6}	1.03×10^{-6}		0.105	
	Cd	3.09×10^{-6}	1.08×10^{-8}	2.34×10^{-9}	2.01×10^{-10}	0.003	1.28×10^{-9}
	Cr	1.97×10^{-4}	6.90×10^{-7}	1.50×10^{-7}	1.28×10^{-8}	0.082	5.38×10^{-7}
	Hg	1.94×10^{-6}	6.78×10^{-9}	1.47×10^{-9}		0.007	

3 结 论

1) 研究区域民宅积尘中重金属污染水平较高, 均不同程度高于土壤中的含量。积尘中 Zn、Pb、Cd、Cu 受到的人为污染较明显, 主要为工业源和交通源影响; As、Hg、Mn 受到的人为污染不明显。

2) 使用 X 射线荧光光谱仪快速测定方法对积尘重金属检测的精度和检出限不如实验室分析方法, 但对某些金属的检测结果误差在可接受范围, 节约了大量的时间与工作量, 在精度要求不高或应急监测时可以发挥作用。

3) 研究区域民宅积尘中重金属分布有一定的规律性, 受电厂排放烟尘的影响明显, 内梅罗指数与当地风向风频有明显相关性, 随着与电厂距离的增加而减小; 积尘中 Pb、Zn、Hg 含量均呈现随着与电厂距离增加而减小的趋势, 与有关燃煤重金属迁移机理研究相符。

4) 本研究燃煤电厂周边地区儿童潜在的健康风险明显高于成人, 不同元素非致癌风险排序为 Pb > Mn > Cr > As > Zn > Cu > Hg > Cd, 致癌风险排序为 As > Cr > Pb > Cd。Pb 对儿童存在非致癌风险, 需要引起重视; 其它元素对儿童的非致癌风险较小, 成人的非致癌风险可忽略。各元素对儿童和成人的致癌风险均在可接受范围, 不会造成致癌危害。

参考文献:

- [1] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2013 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [2] 王文峰, 秦勇, 宋党育. 燃煤电厂中微量元素迁移释放研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 748-752.
- [3] 裴冰. 上海市燃煤电厂重金属排放状况研究[C]. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2013: 5236-5241.
- [4] 秦攀. 煤燃烧重金属生成规律的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 8-9.
- [5] HELBLE J J. Trace element behavior during coal combustion: result of a laboratory study[J]. Fuel Processing Technology, 1990, 24: 1811-1818.
- [6] NRAIGU J O, PACYNA J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. Nature, 1988, 333: 134-139.
- [7] 吴文俊, 蒋洪强. 大气砷铅污染排放模型及重点源排放特征研究[J]. 中国管理科学, 2011, 19: 725-732.
- [8] 郝吉明, 段雷, 易红宏, 等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 94-115.
- [9] 赵宙. 石家庄市街道积尘重金属污染研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2009: 21.
- [10] 任春辉, 卢新卫, 李晓雪, 等. 宝鸡长青镇工业园区周围灰尘重金属污染特征及健康风险[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 367-374.
- [11] 龙永珍, 戴塔根, 邹海洋. 长株潭地区积尘的地球化学特征[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2008, 30(4): 106-111.

- [12] 常静,刘敏,李先华,等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 中国环境科学,2009,29(5):548-554.
- [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] 李燕燕,李章平,熊海灵,等. 重庆市街道灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 西南大学学报(自然科学版),2015,37(2):18-23.
- [15] 常玉玉,卢新卫,陈颢,等. 西安市小学及幼儿园灰尘重金属含量及健康风险评价[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2013,41(4):100-104.
- [16] 李如忠,周爱佳,童芳,等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价[J]. 环境科学,2011,32(9):2661-2668.
- [17] 李如忠,潘成荣,陈婧,等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 中国环境科学,2012,32(12):2261-2270.
- [18] 白泽琳,赵梦竹,李萍,等. 兰州市城关区地表灰尘重金属污染健康风险评价[J]. 环境污染与防治,2014,36(5):54-58.
- [19] 王晓云,马建华,侯千,等. 开封市幼儿园地表灰尘重金属积累及健康风险[J]. 环境科学学报,2011,31(3):583-593.
- [20] 刘玉燕,刘浩峰,刘敏. 乌鲁木齐市地表灰尘重金属含量及其健康风险[J]. 干旱区研究,2009,26(5):750-754.
- [21] 薛建龙. 污染场地周边农田土壤重金属的污染特征及PMF源解析研究[D]. 杭州:浙江大学,2013:19-20.
- [22] 张秀芝,鲍征宇,唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报,2006,25(1):65-72.
- [23] 刘立,胡辉,李娴,等. 东莞市PM1中重金属元素的污染特征及来源解析[J]. 环境科学学报,2014,34(2):303-309.
- [24] ODABASI M, MUEZZINOGLU A, BOZLAKER A. Ambient concentrations and dry deposition fluxes of trace elements in Izmir, Turkey [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(38):5841-5851.
- [25] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2001:4-24.
- [26] US EPA. Risk assessment guidance for superfund (volume I): Human health evaluation manual [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989:1-89.
- [27] 姜林,王岩. 场地环境评价指南[M]. 北京:中国环境科学出版社,2004:45-50.
- [28] 彭道平,姚远,段求应,等. 铅锌矿厂周围土壤环境中重金属污染评价[J]. 广东农业科学,2013,6:171-173.
- [29] FERREIRA - BAPTISTA L, De MIGUEL E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment [J]. Atmospheric Environment, 2005,39:4501-4512.
- [30] US EPA. The risk assessment information system (RAIS) [EB/OL]. http://rais.ornl.gov/tools/tox_profiles.html,2015.
- [31] 马志孝,任婉侠,薛冰,等. 老工业搬迁区街道灰尘重金属污染物的人体健康风险评价[J]. 生态科学,2014,33(5):963-971.
- [32] 冯经昆,钟山,孙立文,等. 重庆某垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染分布特征及来源解析[J]. 环境化学,2014,33(6):969-975.
- [33] 温先华,胡恭任,于瑞莲,等. 厦门市大气降尘中重金属生态风险评价与源解析[J]. 地球与环境,2015,43(1):1-7.
- [34] CANCIO J L, CASTELLANO A V, HERNANDEZ M C, et al. Metallic species in atmospheric particulate matter in Las Palmas de Gran Canaria [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,160(2/3):521-528.
- [35] 郎春燕,王登菊,黄军. 成都燃煤电厂周围土壤中砷、锑、铅、镉分布特征及污染评价[J]. 环境化学,2011,30(8):1439-1444.
- [36] 雷凯,卢新卫,王利军. 宝鸡市街尘中铅的污染与评价[J]. 环境科学与技术,2007,30(11):43-45.
- [37] 张晶,崔龙鹏,唐修义. 淮南平圩电厂粉煤灰微量元素迁移性评价[J]. 环境化学,2008,27(3):387-388.