

石家庄市大气降尘重金属元素来源分析

崔邢涛 栾文楼 李随民 宋泽峰

(石家庄经济学院 资源与环境工程研究所, 河北 石家庄 050031)

摘要: 本文对石家庄市大气降尘重金属含量水平进行了研究, 从 2007 年 11 月起连续收集一年的大气降尘样品, 分析了 As、Cd、Hg、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni、Mo、Mn、Al₂O₃、K₂O 等 12 个元素。结果表明, 与土壤背景值相比, 石家庄市大气降尘中除 Al₂O₃ 外的重金属含量总体明显升高。采用相关分析和主成分分析, 对降尘重金属元素来源进行解析, 认为有三种主要来源: 一是 Pb、Cr、As、Hg、Mo、Cd、Mn 与燃煤活动、道路交通有关。二是 Ni、Cu、Zn 除与燃煤活动有关外, 还与工矿企业废气排放有关。三是 Al₂O₃ 主要与土壤颗粒物有关(自然来源)。以 Al 作为参考元素计算重金属的富集因子表明, 受工业活动影响的 Cd、Hg、Zn 具有较大的富集因子, 大气降尘中的重金属含量高值区与工业区域的分布相吻合。

关键词: 大气降尘; 重金属; 富集因子; 主因子分析; 石家庄

中图分类号: P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)04-1108-

近年来城市化和工业快速发展产生了严重的环境问题。由于大气降尘对气候、人体及生物的危害作用, 因此引起了人们极大的研究兴趣^[1-2]。大气降尘是指在空气环境下, 靠重力自然沉降在集尘缸中的颗粒物, 它可以是被直接排入空气的颗粒物也可以在空气中形成胶粒。自然的大气降尘主要来源于地面的土壤颗粒物, 而污染的大气降尘主要与工业的废物排放有关^[3-4]。研究证实, 大气干湿沉降中重金属污染物来源较为广泛, 人类活动如工业生产、交通运输、燃煤等人为源输入是大气干湿沉降中重金属的最直接最主要的来源^[5-6]。目前, 元素来源研究的方法主要有元素形态分析法^[7-8]、剖面分析法^[9]、空间分布分析法^[10]、富集因子分析法^[11]等。综合运用这些方法可以比较直观地区别出人为来源与土壤母质残留的重金属。但是通过以上方法来辨别人为来源重金属进入土壤的具体途径, 目前尚无更多报道。近年来多元统计分析方法(特别是主成分分析法)被广泛应用于土壤重金属来源研究^[12-13], 该方法与上述方法的综合运用, 可以有效揭示大气降尘中重金属的

主要来源。作为河北省省会城市, 石家庄已具有多种工业类型, 形成了包括医药、纺织、化工、机械、电子、食品、轻工、建材工业为主的工业经济体系, 这些工业活动所产生的废物直接或间接进入了大气降尘, 但有关石家庄市大气降尘重金属来源和累积程度的研究鲜有报道。笔者在分析石家庄市大气降尘重金属含量的基础上, 采用主成分分析和富集因子分析, 对大气降尘的来源和累积程度进行初步研究。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

石家庄市是河北省省会, 是河北省政治、经济、科技、金融、文化和信息中心, 是国务院批准的沿海开放政策和金融对外开放的城市, 其城区辖 6 区和 1 个高新技术开发区, 总面积 456 km², 人口 242.78 万。石家庄市是中国最大的医药工业基地和重要的纺织基地之一, 是国家确认的首批生物产业基地, 也是河北省的工业大市, 基本形成以医药、纺织、化工、机械、电子、食品、轻工、建材工业为主的工业经济体系。

收稿日期: 2011-12-21; 改回日期: 2012-03-16

基金项目: 中国地质调查局和河北省政府合作项目“河北省多目标地球化学调查”(200040007-2)资助。

作者简介: 崔邢涛, 男, 1978 年生, 助理研究员, 土壤学专业, 主要从事环境地球化学方面的研究; E-mail: cxt78520@126.com。

1.2 样品采集与分析

2007 年 11 月—2008 年 11 月,在石家庄市区范围内设置 51 个采样点(图 1),每个采样点收集 1 个样品。采样器选择口径 29.5 cm,高 28.5 cm 塑料桶,用蒸馏水进行处理后携至采样点,固定在距地 5~10 m 的屋顶开阔平台上,远离局部明显的污染源和高大建筑物,接受时间为 1 年。

大气干湿沉降样品一般处理为可溶部分(湿沉降)和不溶部分(干沉降)。由于收集时大部分采集桶中无水或水很少,因此本次大气干湿沉降样品的前处理方法为将从市区收回的采样桶放置在房屋中自然晾干或风干,然后将采样桶中的沉淀物称重,按照土壤样品的分析方法进行元素分析,共分析了 Pb、Hg 和 Al_2O_3 等 12 种元素和氧化物含量。所有样品

分析在河北省岩矿测试中心实验室进行,采用以 X 荧光光谱法(XRF)为主,辅以原子荧光光谱法(AFS)和石墨炉原子吸收光谱法(GF-AAS)的多元素配套分析方法(表 1)。分析过程中采用国家标准样、室内外重复样和密码样等检验控制分析精密度和准确度。全部样品分析技术要求符合《生态地球化学评价样品分析技术要求》。

2 结果与讨论

2.1 大气降尘重金属及其他元素含量特征

石家庄市大气降尘重金属及其他元素含量参数统计见表 2。

由表 2 可见, Al_2O_3 、 K_2O 和 Mn 元素的含量变化范围相对较小,以河北省中南部平原土壤平均值

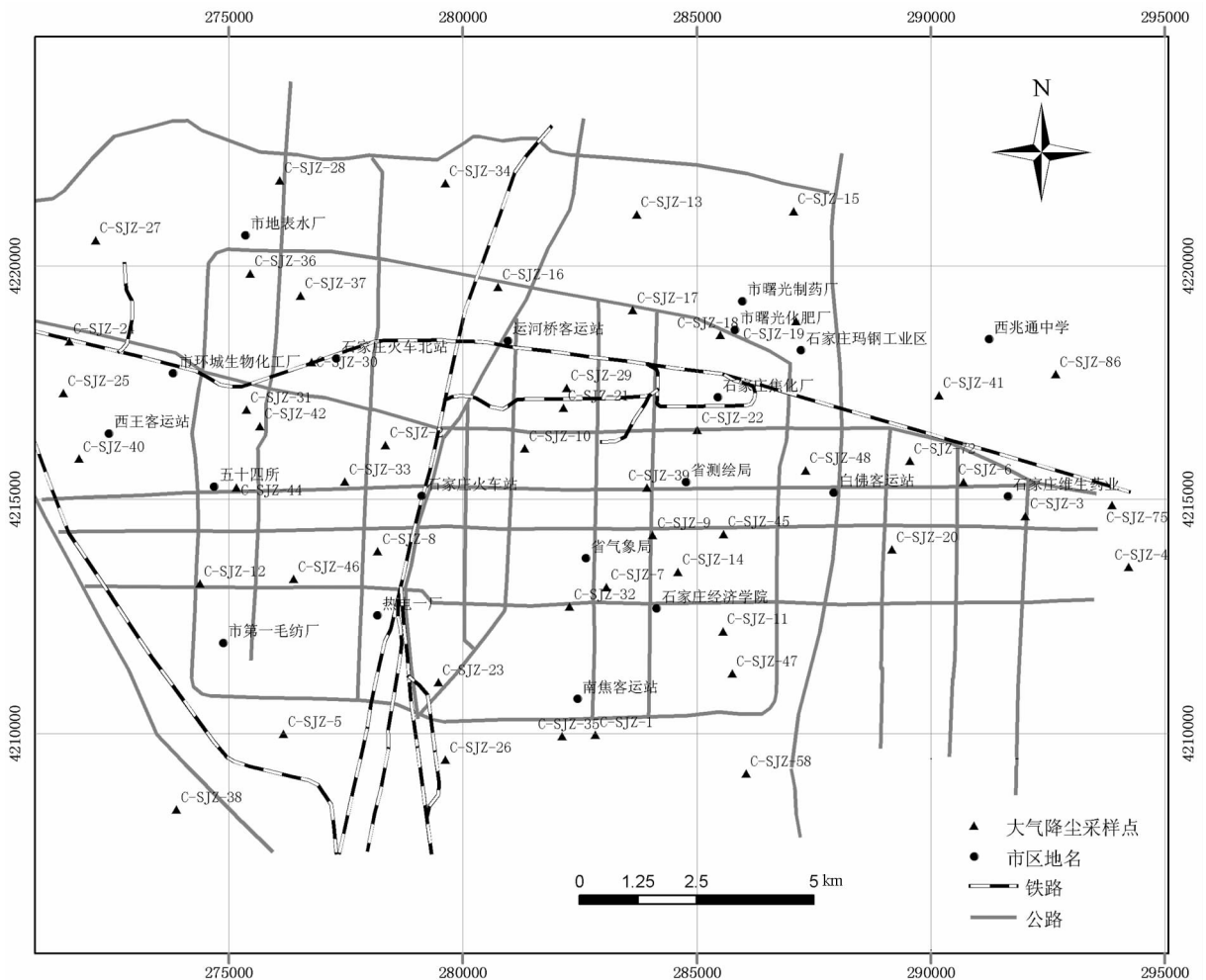


图 1 石家庄市大气降尘样品采集分布图
Fig.1 Sampling location of atmospheric dustfall in Shijiazhuang City

表 1 降尘元素全量分析方法

Table 1 Whole volume analytical method of elements

元素	分析方法	元素	分析方法	元素	分析方法
As	AFS	Ni	XRF	Cr	XRF
Cd	GF-AAS	Cu	XRF	Al ₂ O ₃	XRF
Hg	AFS	Zn	XRF	Mo	XRF
Pb	XRF	Mn	XRF		

作为土壤背景值^①,它们的平均含量与土壤背景值比较接近,它们的变异系数也较小。As、Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、Mo 含量范围较大,与土壤背景值相比,这些元素含量显著偏高,呈现不同程度的富集,这与国内其他城市研究成果相同^[14-17],元素的富集程度由高到低: Cd>Zn>Hg>Mo>Pb>Cu>As>Cr>Ni,即使是富集程度较低的 Ni 元素,其平均含量也达到土壤背景值的 1.45 倍,表明这些元素受到工业污染,可能为工业排放的废物进入大气增加降尘的重金属累积,而 Al₂O₃、K₂O 主要来源于土壤颗粒物(自然来源)。

2.2 元素相关性分析

重金属元素之间的相关性可以有效地指示重金

属的相同物质来源或迁移途径。2010 年笔者对石家庄市、唐山市等地的燃煤尘、建筑尘、交通尘、汽车尾气尘、土壤风沙尘^②特征元素进行了研究,同时结合车亚非等^[18]研究结果,根据相关系数的大小(表 3),石家庄市大气降尘中元素含量相关系数可明显地分为 4 类:Pb 与 Cr、Ni、As、Hg、Mo、Mn 等元素之间呈显著正相关,表明他们可能有相同的来源,一般认为 Pb 是汽车尾气排放的示踪元素^[19],是道路尘的特征性最强元素^②,而 As、Hg 是燃煤的指示元素^[20-23],Mo、Ni 元素也为煤烟尘中特征较强元素^[24-25],因而可以认为大气降尘中的 Pb、Cr、Ni、As、Hg、Mo、Mn 与燃煤活动、道路交通有关。As 与 Cd、Hg 等元素之间呈显著正相关,表明大气降尘中的 As、Cd、Hg 元素与燃煤活动有关。Ni 和 Cu、Zn 元素之间呈显著正相关,Ni 为燃煤尘特征性较强元素,Zn 为冶金尘特征性较强元素^[6],表明大气降尘中的 Ni、Cu、Zn 元素除与燃煤活动有关外,还与工矿企业废气排放有关。Al₂O₃ 与 K₂O 等元素之间呈显著正相关,元素组合表明上述物质主要来自土壤颗粒物。

2.3 富集因子分析

富集因子(Enrichment Factors,EFs)是一个反映人类活动对自然环境扰动程度的重要指标。它是通

表 2 石家庄市大气降尘重金属及其它元素含量

Table 2 Heavy metal and other element concentrations of atmospheric dustfall in Shijiazhuang City

元素	含量单位	含量范围	平均值	中值	标准偏差	变异系数/%	土壤背景值	富集系数
As	mg/kg	4.8~47.8	14.9	13	8.13	54.58	9.5	1.57
Cd	mg/kg	0.23~362	11.4	4	50.14	440.9	0.15	76
Hg	μg/kg	150~775	346	325	135.51	39.17	37.7	9.18
Pb	mg/kg	48.3~312	140.3	135	50.85	36.24	22.56	6.22
Cr	mg/kg	29.6~187	96.2	91	27.92	29.02	65.21	1.48
Ni	mg/kg	12~66.5	40.6	39	17.38	42.8	28.06	1.45
Cu	mg/kg	26.4~167	74.9	69	26.82	35.81	22.95	3.26
Zn	mg/kg	135~8670	1019.6	594	1466.31	143.81	69.63	14.64
Mn	mg/kg	129~855	561.4	556	128.2	22.84	588.89	0.95
Mo	mg/kg	1.69~8.41	3.8	4	1.45	38.16	0.55	6.91
K ₂ O	%	0.61~2.55	1.53	1	0.35	22.88	2.41	0.63
Al ₂ O ₃	%	6.43~13.62	9	9	1.48	16.44	12.73	0.71

①河北省地质调查院,中华人民共和国多目标区域地球化学调查报告(河北平原区及近岸海域),2009.

②石家庄经济学院,河北省地质调查院,河北省城市生态系统区域生态地球化学评价报告,2010 年.

过样品中元素的实测值与元素的背景含量进行对比来判断表生环境介质中元素的人为影响状况^[26]。富集因子的计算引入了参比元素进行标准化,其中参比元素的选取应遵从以下原则:所选元素含量应有一定稳定性,所应用的方法对该元素有足够高的灵敏度,测定结果足够准确,该元素最好为参比体系中的主要组成元素,该元素又在样品中普遍存在。据以上原则,本次选取 Al 作为参比元素计算了重金属元素的富集因子。

富集因子计算公式如下:

$$EF = \frac{(C_x / C_{Al})_{\text{降尘}}}{(C_x / C_{Al})_{\text{地壳}}}$$

上式中: C_x —元素 X 的含量, C_{Al} —Al 元素的含量。降尘和地壳分别表示元素在大气降尘含量和地壳中的丰度。

由于降尘中元素的富集与否是相对于本地土壤或地壳而言的,如元素富集因子接近于 1,可以认为该元素相对于土壤或地壳来源基本没有富集,主要由土壤颗粒物所组成;因此参考介质最好为当地土壤或地壳,而不是全球地壳均值。本次各元素富集因子的计算即以石家庄市河北省表层土壤元素平均值为基础,计算结论明显优于以地壳元素为均值的参

照系统,主要表现在 Pb、S、Cd、Zn 等元素如果以地壳均值为参考,绝大部分样品中上述元素富集因子较小,与实际情况差别较大。而以石家庄市表层土壤样品均值为参考,各元素富集因子能较好地反映降尘的污染叠加情况。

根据富集因子大小可以将元素大体上分为两类,如果元素富集因子接近于 1,可以认为该元素相对于土壤来源基本没有富集,主要由土壤颗粒物所组成;如果元素富集因子大于 10,则表明元素除土壤来源外还受人类活动的影响。

13 个大气降尘元素富集因子见图 2。由图可见,As、Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、Mo、Al₂O₃ 与 K₂O 等元素富集因子大致可以分为三类:第一类是 K₂O 元素,其富集因子普遍接近 1,其平均值分别为 0.9,表明大气降尘中的 K₂O 元素主要来自于土壤颗粒;第二类是 As、Pb、Cr、Ni、Cu、Mo、Mn,它们的富集因子主要在 1~10 之间,表明这些元素除土壤来源外,还可能叠加工业污染的影响;第三类是 Cd、Hg、Zn 等元素,它们的富集因子普遍大于 10,其平均值分别为 43.4、13.1、14.9,暗示这些元素受到明显的污染。

2.4 主成分分析

因子分析方法能够很好地将元素按照相关性密

表 3 石家庄市大气降尘元素相关系数
Table 3 Correlation matrix for elements of atmospheric dustfall in Shijiazhuang City

元素	相关系数											
	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Cr	Pb	Zn	Cu	Ni	Mn	As	Cd	Hg	Mo
Al ₂ O ₃	1											
K ₂ O	0.367**	1										
Cr	0.013	-0.040	1									
Pb	0.137	-0.137	0.551**	1								
Zn	-0.030	-0.087	0.012	0.191	1							
Cu	0.112	0.256	0.086	0.257	0.110	1						
Ni	0.060	0.013	0.289*	0.417**	0.655**	0.379**	1					
Mn	-0.332**	-0.010	0.742**	0.439**	0.120	0.112	0.434**	1				
As	0.294*	-0.021	0.471**	0.593**	0.082	0.054	0.298*	0.380**	1			
Cd	-0.018	-0.113	0.322*	0.294*	-0.022	0.067	0.043	0.126	0.588**	1		
Hg	0.181	-0.070	0.159	0.546**	0.069	0.233	0.132	0.015	0.384**	0.295*	1	
Mo	-0.139	-0.268	0.513**	0.483**	0.168	0.187	0.357*	0.696**	0.276*	0.072	0.062	1

注: ** 表示显著性水平为 0.01, * 表示显著性水平为 0.05。

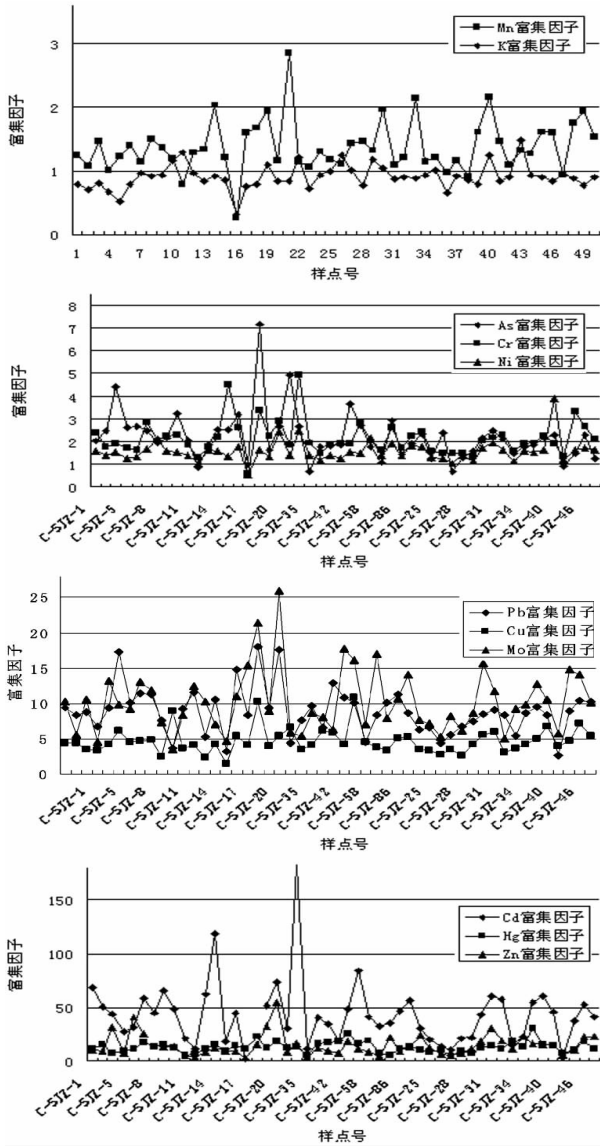


图2 石家庄大气降尘中元素富集因子

Fig.2 Enrichment factors plotted against studied elements of atmospheric dustfall in Shijiazhuang City

切程度分类,从而通过各因子中的特征元素,判断该因子中的元素来源。该方法广泛运用于土壤或沉积物乃至大气沉降的元素来源的识别研究中^[6,13,27]。它能有效降低实测变量和揭示变量之间的相互关系。笔者对研究区51个样点中的12种元素进行主成分分析(Principal Component Analysis),因子矩阵经方差极大旋转后,得到大于1的特征值4个,其对应的主成分累积方差贡献率为70.448%。第一主成分

Cr、Mn、Mo,贡献率为22.233%;第二主成分是Pb、As、Cd、Hg,贡献率为19.363%;第三主成分是Zn、Cu、Ni,贡献率为15.743%;第四主成分是Al₂O₃、K₂O,贡献率为13.109%;各元素的因子负荷分析结果如表4所示。

2.5 大气降尘重金属元素的空间分布

以中山路和京广铁路为轴将石家庄市区分为四个区,各个区的重金属元素含量平均值见表5。从表5可以看出,重金属元素在石家庄市大气降尘中的含量差别较大^①,As、Cr、Cd都在市区的东北部形成高值区,这与石家庄城市工业区域分布有关;这里是石家庄重要的工业区所在地,区内分布着众多的工业企业,如石家庄钢铁有限责任公司、石家庄焦化厂、石家庄热电三厂、石家庄水泥制品厂、石家庄化肥厂、石家庄煤机厂、石家庄内燃机配件厂、石家庄市曙光化肥厂、石家庄市曙光制药厂等。Cu、Zn、Hg在市区的西南部形成高值区,此区域位于石家庄市西南工业区内,分布着石家庄热电一厂、石家庄第二印刷厂、石家庄华南碳素厂、时光供热站等,这些污染源会对石家庄市的大气降尘中的重金属含量造成一定的影响。Ni元素含量空间分布比较均匀,污染程度和富集程度普遍都在轻度污染和低富集。Mn、Mo在市区的东北部和高开区的东部出现高值

表4 对应4个主成分因子的大气降尘重金属分析
Table 4 Results of principal component analysis and varimax rotated loading for the atmospheric dustfall samples

元素	主成分			
	1	2	3	4
Al ₂ O ₃	-0.080	0.242	-0.010	0.730
K ₂ O	-0.033	-0.197	-0.044	0.851
Cr	0.831	0.305	-0.040	0.043
Pb	0.459	0.645	0.312	0.036
Zn	-0.015	0.008	0.855	-0.152
Cu	0.095	0.093	0.473	0.441
Ni	0.337	0.096	0.833	0.091
Mn	0.927	0.043	0.128	0.033
As	0.368	0.760	0.028	0.147
Cd	0.116	0.731	-0.148	-0.103
Hg	-0.110	0.763	0.204	0.083
Mo	0.785	0.059	0.244	-0.216
特征值	2.668	2.324	1.889	1.573
贡献率/%	22.233	19.363	15.743	13.109
累计贡献率/%	22.233	41.596	57.339	70.448

① 石家庄经济学院,河北省地质调查院,河北省城市生态系统区域生态地球化学评价报告,2010年。

表 5 石家庄城市不同区域重金属元素含量平均值(单位: mg/kg)
Table 5 Heavy metal element average concentrations of atmospheric dustfall in different areas of Shijiazhuang City (unit: mg/kg)

分区	Cr	Pb	Zn	Cu	Ni	Mn	As	Cd	Hg	Mo
东北区	107.41	145.6	723.73	67.22	29.41	579.53	17.98	28.78	0.34	4.37
西北区	83.79	128.05	1157.5	69.17	30.85	540.5	14.34	3.26	0.38	3.09
西南区	87.72	122.9	2191.9	92.12	30.2	497	12.96	3.90	0.40	3.03
东南区	97.53	159.53	822.46	86.34	31.77	558.77	14.55	5.22	0.32	4.12

区,这些地区都是石家庄市的工业区所在地,其一为石家庄东部工业区所在地,其一为石家庄制药基地。Pb 元素含量值整体呈现西北-东南逐渐增加的趋势,表现出降尘受西北风向的控制作用。

2.5 重金属来源解析

通过以上相关分析表明,石家庄市大气降尘中 Pb、Cr、As、Hg、Mo、Cd、Mn 可能具有相同的来源,与土壤背景值相比,它们都具有较高的含量和较大的富集因子。从元素含量的空间分布特征来看,这些元素都在市区的东北部出现了高值区,一般认为 Pb 是汽车尾气排放的示踪元素,也是道路尘的特征性最强元素,而 As、Hg 是燃煤的指示元素,即这些元素与燃煤活动、道路交通有关。主成分分析结果显示,这些元素组成两个主成分即 Cr、Mn、Mo 和 Pb、As、Cd、Hg、Cr 为道路尘的特征性较强元素^[6], Pb 是汽车尾气排放的示踪元素,也是道路尘的特征性最强元素,而 As、Hg 是燃煤的指示元素,因此,这些元素主要来源于燃煤活动、道路交通等。相关分析表明,石家庄市大气降尘中 Ni、Cu、Zn 可能具有相同的来源。Ni 为燃煤尘特征性较强元素,Zn 为冶金尘特征性较强元素^[6],表明大气降尘中的 Ni、Cu、Zn 元素除与燃煤活动有关外,还与工矿企业废气排放有关。主成分分析表明,这些元素组成一个主成分,因此,认为 Ni、Cu、Zn 主要来源于燃煤或工矿企业废气排放。大气降尘中的 Al₂O₃ 与 K₂O 含量与背景值相近,具有较小的富集因子,主成分分析表明,它们具有相同的来源,主要来源于土壤颗粒物。

3 结论

本文对石家庄市大气降尘重金属进行了研究,结果表明,与土壤背景值相比,大气降尘中重金属(Mn 除外)含量明显偏高。通过相关分析和主成分分析,认为 Pb、Cr、As、Hg、Mo、Cd、Mn 主要来源于燃

煤活动、道路交通;Ni、Cu、Zn 元素除与燃煤活动有关外,还与工矿企业废气排放有关;而 Al₂O₃ 与 K₂O 主要来源于研究区地面的土壤颗粒物。重金属元素富集因子分析表明,大气降尘中 Cd、Hg、Zn 受到明显的污染和富集;As、Pb、Cr、Ni、Cu、Mo、Mn 受到一定程度的富集;Al₂O₃ 与 K₂O 含量与土壤背景值接近,没有受到明显的富集,大气降尘中的重金属含量高值区与工业区域的分布相吻合。

参考文献(References):

- [1] Yatin M, Tuncel S, Aras N K, et al. Atmospheric trace elements in Ankara, Turkey:1. Factors affecting chemical composition of fine particles [J]. Atmospheric Environment,2000, 34:1305-1318.
- [2] Wong C S C, Li X D, Zhang G, et al. Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37:767-776.
- [3] Sabbak O A. Metal concentration of atmospheric respirable particulates in Jeddah[J]. Environmental Managa Health, 1995, 6(5):7-13.
- [4] Adachi K, Tainosho Y. Single particle characterization of size - fractionated road sediments [J]. Applied Geochemistry, 2005, 20: 849-859.
- [5] Mirlean N, Robinson D, Kawashita K, et al. Identification of local sources of lead in atmospheric deposits in an urban area in Southern Brazil using stable lead isotope ratios[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(33):6204-6212.
- [6] 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 等. 成都经济区 As 等元素大气干湿沉降通量及来源研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(3):213-222.
Tang Qifeng, Yang Zhongfang, Zhang Benren, et al. A study of elements flux and sources from atmospheric bulk deposition in the Chengdu Economic Region [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (3):213-222(in Chinese with English abstract).
- [7] 刘杰, 钟雪梅, 梁延鹏, 等. 电镀废水污染水稻田土壤中重金属的形态分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2):398-401.
Liu Jie, Zhong Xuemei, Liang Yanpeng, et al. Fractionations of heavy metals in paddy soils contaminated by electroplating wastewater[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(2): 398-401(in Chinese with English abstract).

- [8] Chen W, Qian G R, Lim T T, et al. Speciation of heavy metals in surface sediments from Suzhou Creek [J]. *Journal of Shanghai University(English Edition)*, 2007, 11(4):415-425.
- [9] Tyler G. Vertical distribution of major, minor, and rare elements in a Haplic Podzol [J]. *Geoderma*, 2004, 119(3/4):277-290.
- [10] Hamlett J M, D A Miller, R L Day, et al. Statewide GIS-based ranking of watersheds for agricultural pollution [J]. *Soil and Water Cons.*, 1992, 47(5):399-404.
- [11] 姬亚芹, 朱坦, 白志鹏, 等. 天津市土壤风沙尘元素的分布特征和来源研究[J]. *生态环境*, 2005, 14(4):518-522.
Ji Yaqin, Zhu Tan, Bai Zhipeng, et al. Distribution characteristics and sources of the elements in soil dust [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14 (4):518-522 (in Chinese with English abstract).
- [12] Slavkovic L, Skrbic B, Miljevic N, et al. Principal component analysis of trace elements in industrial soils [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2004, 2(2):105-108.
- [13] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属元素的富集特征与来源识别[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(1):84-88.
Wang Xuesong, Qin Yong. Accumulation and identification of heavy metals in Xuzhou urban topsoil [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35 (1):84-88 (in Chinese with English abstract).
- [14] 田晖, 杜佩轩, 梅琳. 西安市城市灰尘微量元素环境异常研究[J]. *地质力学学报*, 2005, 30(3):361-369.
Tian Hui, Du Peixue, Mei Lin. Environmental anomalies of trace elements in urban dust of Xi'an City [J]. *Journal of Geomechanics*, 2005, 30(3):361-369(in Chinese with English abstract).
- [15] 吴辰熙, 祁士华, 方敏, 等. 福建省泉州湾大气降尘中的重金属元素的沉降特征[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(6):27-30.
Wu Chenxi, Qi Shihua, Fang Min, et al. Precipitation characteristics of heavy metal in dustfall to Quanzhou bay of Fujian Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(6):27-30(in Chinese with English abstract).
- [16] 张菊, 陈振楼, 许世远, 等. 上海城市街道灰尘重金属铅污染现状及评价[J]. *环境科学*, 2006, 27(3):519-523.
Zhang Ju, Chen Zhenlou, Xu Shiyuan, et al. Lead pollution and its assessment in urban street dust of Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(3):519-523(in Chinese with English abstract).
- [17] 黄顺生, 华明, 金洋, 等. 南京市大气降尘重金属含量特征及来源研究[J]. *地学前缘*, 2008, 15(5):161-166.
Huang Shunsheng, Hua Ming, Jin Yang, et al. Concentrations and sources of heavy metal in atmospheric dustfall in the Nanjing city, East China. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15 (5):161-166 (in Chinese with English abstract).
- [18] 车亚非, 咎晓辉. 成都市大气飘尘中主要排放源成分谱研究[J]. *城乡生态环境*, 1994, 18(2):21-26.
Che Yafei, Zan Xiaohui. A study on composition spectrum of main sources of airborne particulates in Chengdu [J]. *Ecology and Environment*, 1994, 18 (2):21-26 (in Chinese with English abstract).
- [19] Lewis J. Lead poisoning: a historical perspective [J]. *EPA Journal*, 1985, 11:15-18.
- [20] Kowalczyk G S, Gordon G E, Rheingrover S W. Identification of atmospheric particulate sources in Washington D.C., using chemical element balances [J]. *Environmental Science & Technology*, 1982, 16(2):79-90.
- [21] Taylor D R, Tompkins M A, Kirton S E. Analysis of fly ash produced from combustion of refuse-derived fuel and coal mixtures [J]. *Environmental Science & Technology*, 1982, 16(3):148-154.
- [22] He B, Liang L N, Jiang G B. Distributions of arsenic and selenium in selected Chinese coal mines [J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 296:19-26.
- [23] 杨丽萍, 陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究[J]. *环境科学学报*, 2002, 22(4):499-502.
Yang Liping, Chen Fahu. Study on the source apportionment of atmospheric dust pollutants in Lanzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22 (4):499-502 (in Chinese with English abstract).
- [24] 李随民, 栾文楼, 宋泽峰, 等. 河北省南部平原区大气降尘来源及分布特征[J]. *中国地质*, 2010, 37(6):1769-1774.
Li Suimin, Luan Wenlou, Song Zefeng, et al. The distribution and source of atmospheric dustfall in the southern plain of Hebei Province [J]. *Geology in China*, 2010, 37 (6):1769-1774 (in Chinese with English abstract).
- [25] 宋泽峰, 栾文楼, 崔邢涛, 等. 冀东平原土壤重金属元素的来源分析[J]. *中国地质*, 2010, 37(5):1530-1538.
Song Zefeng, Luan Wenlou, Cui Xingtao, et al. An analysis of the sources of heavy metals in soils of eastern Hebei plain [J]. *Geology In China*, 2010, 37 (5):1530-1538 (in Chinese with English abstract).
- [26] Buat-Menard P, Chesselet P. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, 42:398-411.
- [27] 刘俊华, 王文华, 彭安. 降水中汞及其它元素来源的识别分析[J]. *环境科学*, 2003, 21(2):77-80.
Liu Junhua, Wang Wenhua, Peng An. The source of mercury in rainfall in Beijing [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 21(2):77-80(in Chinese with English abstract).

An analysis of the sources of heavy metals in atmospheric dustfall of Shijiazhuang City

CUI Xing-tao, LUAN Wen-lou, LI Sui-min, SONG Ze-feng

(Institute of Resource and Environmental Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

Abstract: Fifty-one atmospheric dustfall samples were collected successively from November 2007 to November 2008 in Shijiazhuang. All dustfall samples were analyzed for concentrations of As, Cd, Hg, Pb, Cr, Cu, Zn, Ni, Mn, Mo, Al_2O_3 and K_2O . The results indicate that, compared with the background values of soil in Shijiazhuang area, atmospheric dustfalls have elevated metal concentrations on the whole, except for the concentration of Al_2O_3 . Correlation coefficient analysis and principal component analysis (PCA) were performed and three main sources were identified: (1) Pb, Cr, As, Hg, Mo, Cd and Mn, which are mainly derived from coal combustion and traffic pollution; (2) Ni, Cu and Zn, which are probably related not only to coal combustion but also to factory exhaust; (3) Al_2O_3 , which is mainly derived from soil particles. Based on concentration analysis and correlation analysis, the authors selected Al as the reference element to calculate the heavy metal enrichment factors (EFs), which in turn further validated the source identification. However, industrially enhanced Cd, Hg and Zn show maximum enrichments. Therefore, EFs shed a light on the level of human influence on atmospheric dustfalls. High concentrations of heavy metals in atmospheric dustfalls are consistent with the distribution of the industrial area.

Key words: atmospheric dustfall; heavy metals; enrichment factors; principal component analysis; Shijiazhuang

About the first author: CUI Xing-tao, male, born in 1978, master, assistant researcher, mainly engages in the study of soil science, environmental geochemistry and GIS; E-mail: cxt78520@126.com.