宝鸡市街尘重金属元素含量、来源及形态特征

王利军, 卢新卫*, 雷凯, 翟雨翔, 黄静
(陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062)

摘要:利用 XRF 和 AAS 研究了宝鸡市街尘中重金属元素的含量水平. 结果表明,街尘中 Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Cr 和 Cd 的平均含量分别是 123.2、408.4、715.1、804.2、15.9、48.8、126.7 和 5.5 $\mu g \cdot g^{-1}$,均高于世界、中国、陕西省土壤元素背景值,其中 Cu、Pb、Zn 和 Cd 超标最为突出. 利用相关分析、主成分分析、聚类分析等多元统计方法解析了宝鸡市街尘中重金属元素的来源,结果表明,Ni 和 Cr 是自然来源(当地土壤),Cu、Pb、Mn 和 Co 是人为(交通和工业)和自然(当地土壤)的混合来源;Zn 和 Cd 是人为来源(交通来源和工业来源). 同时,利用修正的 BCR 连续提取技术,借助 ICP-MS 研究了宝鸡市街尘中重金属元素的形态特征,结果表明,街尘中 Mn、Co、Ni 和 Cr 主要以残余态形式存在(48.52% 以上),Zn 和 Cd 主要以乙酸可提取态形式存在(44.43% 和 44.08%),Cu 主要以可氧化态和残余态形式存在(48.22% 和 37.65%),Pb 主要以可还原态形式存在(45.42%),重金属元素的迁移顺序是 Cd (90.11%) > Pb (82.33%) > Zn (79.32%) > Cu (62.35%) > Mn (51.48%) > Co (29.02%) > Ni (23.62%) > Cr (18.68%),其中 Cd、Pb、Zn、Cu 和 Mn 有 50% 以上可以发生迁移,易被生物利用,危害较大.

关键词:街尘; 重金属元素; 来源; 形态; 宝鸡市
中图分类号:X53 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2011)08-2470-07

Content, Source and Speciation of Heavy Metal Elements of Street Dusts in Baoji City

WANG Li-jun, LU Xin-wei, LEI Kai, ZHAI Yu-xiang, HUANG Jing
(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Heavy metal concentrations in street dust of Baoji City were investigated by using X-Ray fluorescence spectrometry (XRF) and atomic adsorption spectrometry (AAS). The results show that the mean concentrations of Cu, Pb, Zn, Mn, Co, Ni, Cr and Cd are 123.2, 408.4, 715.1, 804.2, 15.9, 48.8, 126.7 and 5.5 $\mu g \cdot g^{-1}$, respectively, which are higher than those of the element background values of International, Chinese, and Shaanxi Soil, especially for Cu, Pb, Zn and Cd. The source of heavy metal elements in street dust of Baoji City was identifed by multivariate statistics analysis (correlation analysis, principal component analysis and cluster analysis), and the results show that Ni and Cr mainly originate from natural source (local soil); Cu, Pb, Mn and Co have mixed sources of human activities (industry and traffic) and nature (local soil); Zn and Cd represent traffic and industry sources. At the same time, the speciation characteristics of heavy metals in street dust of Baoji City were investigated by using the modified BCR sequential extraction procedure and ICP-MS. The results show that Mn, Co, Ni and Cr are dominated by residue (over 48.52%), Zn and Cd mainly exist in acetic acid extractable part (44.43% and 44.08%), Cu is rich in oxidizable (48.22%) and residual (37.65%) parts, Pb is mainly in reducible part (45.42%). The order of mobility of heavy metal elements is Cd (90.11%) > Pb (82.33%) > Zn (79.32%) > Cu (62.35%) > Mn (51.48%) > Co (29.02%) > Ni (23.62%) > Cr (18.68%), in which of them, Cd, Pb, Zn, Cu and Mn have stronger transformation (over 50%) and higher potential harm.

Key words: street dust; heavy metal element; source; speciation; Baoji City

街尘是城市环境的重要污染源,受城市工业生产、交通运输、建筑施工、居住生活等人类活动强烈影响,街尘当中累积了大量的有毒有害物质(如重金属、多环芳烃等)[1~3],对居民健康和城市环境具有重要影响. 重金属元素因具有持久性和难降解性,被称为"化学定时炸弹"[4]. 在街尘中累积效应比较明显和研究比较多的是重金属元素,其具有较大的环境污染危害和重要的环境指示意义[5, 6]. 街尘中的重金属元素来自于自然(当地土壤)及人为活动(如工业生产、交通运输等)[5, 7~12],其环境行为和毒性效应不仅与重金属元素的含量有关,而且在很大程度上取决于重金属元素在环境介质中的赋存形态、迁移转化特征以及生物可利用性等. 因此,在街尘重金属污染研究中,街尘重金属元素的形态分析极为必要[13~16]. 当前,国内外学

收稿日期:2010-09-14;修订日期:2010-11-09
基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0861);陕西师范大学青年基金项目
作者简介:王利军(1978~),男,博士研究生,讲师,主要研究方向为环境评价与治理、环境污染修复,E-mail:wanglijun@snnu.edu.cn
* 通讯联系人, E-mail: luxinwei@snnu.edu.cn

者对城市街尘中重金属元素的含量、分布、来源、形态、污染及健康风险评价进行了大量的研究[3, 5~14, 17~30]. 然而,有关宝鸡市街尘中重金属污染方面的研究鲜见报道.

宝鸡市位于关中平原西部,西安以西约 180 km 处,东经106°18′~108°03′,北纬33°35′~35°06′,现有人口约 370×10^4,市区人口约 140×10^4,是陕西省的第二大城市,也是陕西省的一个重工业城市,现有冶金、采矿、机械加工、化工、电力、纺织、有色金属等 35 个工业门类. 同时,宝鸡市也是西部的一个重要交通枢纽,是西去甘肃、宁夏、青海、新疆、西藏和南去四川的交通要塞. 近年来,宝鸡的工业(尤其是机械制造、电子技术、桥梁制造,有色金属加工、冶金等)、商业、交通(截止 2007 年 3 月 31 日,全市汽车已增加到76 813辆)、建筑以及城市的发展速度非常迅速. 宝鸡市南边、西边和北边三面环山,这种地形不利于灰尘的扩散和稀释,相反有利于灰尘在该地区的沉降,再加上渭河从城市当中自西向东穿过,将城市分成南北 2 个部分,受这种自然条件的限制,宝鸡市的发展空间非常有限,致使城市人口、商业、工业、交通、建筑密度特别大.

本研究以宝鸡市街尘为调查对象,在对街尘基本理化性质分析的基础上,首次系统分析了街尘中重金属元素的含量、来源及形态特征,旨在为改善宝鸡市城市环境提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　样品采集与处理

按照城市功能分区(如工业、商业、交通等)布设街尘采样点(图 1). 2006 年 2 月,在一个晴好的天气里(这种天气至少持续 1 周),用塑料刷子和塑料簸箕在每个采样点采集街尘样品[8],每个点采

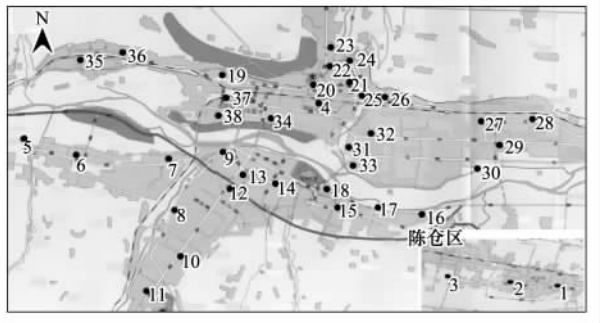

图 1　宝鸡市街尘采样点示意

Fig. 1　Sampling sites of street dust in Baoji City

3~5 处混合,共采集 38 个样品,每个样品重约 500 g,密封在自封的聚乙烯塑料样品袋中.

将采集好的街尘样品带回实验室,在通风、避光、室温的条件下自然风干 1~2 周,过 1 mm 的尼龙筛,去除沙子、烟头、植物根茎等外来杂物. 然后用玛瑙研钵研磨过 200 目尼龙筛,研磨过筛后的街尘样品密封在自封聚乙烯塑料样品袋中待分析.

1.2　样品分析与质量控制

利用 PHSJ-4A 型 pH 计(上海雷磁)、马弗炉、Mastersizer-S 型激光粒度仪(英国 Malvern 仪器有限公司)分析街尘的 pH、烧失量(LOI)及粒径组成等基本理化性质.

采用 PW2403 型 X-Ray 荧光光谱仪(荷兰 PANalytical,原飞利浦仪器公司)分析街尘中 Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni 和 Cr 的含量水平. 街尘中 Cd,采用 HNO_3-HF-$HClO_4$ 混酸消化,TAS-990 型石墨炉原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司)测定.

利用修正的 BCR 连续提取技术[31, 32](表 1),借助 ICP-MS 分析了街尘中 Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Cr 和 Cd 在不同形态中的含量水平.

表 1　修正 BCR 法提取分析流程

Table 1　Extracting and analytical flow of the modified BCR

步骤	提取剂	样品:溶液/g·mL^{-1}	提取时间	形态
1	0.11 mol/L HOAc	1:40	振荡 16 h	乙酸可提取态
2	0.5 mol/L $NH_2OH\cdot HCl$, pH = 1.5	1:40	振荡 16 h	可还原态
	8.8 mol/L H_2O_2, pH 2~3, 85℃水浴	1:10	1 h,偶尔振荡	
3	8.8 mol/L H_2O_2, pH 2~3, 85℃水浴	1:10	1 h,偶尔振荡	可氧化态
	1.0 mol/L NH_4Ac, pH = 2	1:50	振荡 16 h	
4	王水或 $HCl/HNO_3/HClO_4$	1:10		残余态

在分析过程中,利用土壤标样 GSS1 和水系沉积物标样 GSD12(购自地矿部物探化所)来进行质量控制,所分析元素的误差均在 5% 以内.

1.3　数据分析

本研究利用统计学软件 SPSS 13.0 对宝鸡市街尘中重金属元素的含量数据进行了描述性统计分

析、相关分析、主成分分析及聚类分析,并利用多元统计分析进行了重金属元素的来源分析.

2 结果与讨论

2.1 街尘基本理化性质

宝鸡市街尘的基本理化性质见表 2. 由表 2 可知,宝鸡市街尘的 pH 值范围是 8.02 ~ 10.14,平均值是 8.98,呈微碱性;烧失量(LOI)的范围是 2.16% ~ 18.84%,平均值是 8.77%;粒径分析表明,宝鸡市街尘主要由 5 ~ 50 μm(71.30%)的粒径颗粒组成.

表 2 宝鸡市街尘基本理化性质

Table 2 Physicochemical properties of street dust in Baoji City

理化指标	pH	LOI /%	<5 μm /%	5 ~ 50 μm /%	>50 μm /%
最小值	8.02	2.16	2.75	15.47	1.78
最大值	10.14	18.84	15.90	79.96	24.92
平均值	8.98	8.77	11.62	71.30	14.98

2.2 街尘中重金属元素的含量

宝鸡市街尘中重金属元素的测试统计结果见表 3. 由表 3 可知,宝鸡市街尘中 Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Cr 和 Cd 的含量范围分别是 77.9 ~ 259.9、140.6 ~ 1864.6、384.9 ~ 1778.3、544.5 ~ 2335.8、12.6 ~ 22.9、33.3 ~ 219.3、98.9 ~ 214.5 和 2.9 ~ 7.6 $\mu g \cdot g^{-1}$,平均含量分别是 123.2、408.4、715.1、804.2、15.9、48.8、126.7 和 5.5 $\mu g \cdot g^{-1}$. 宝鸡市街尘中所分析的重金属元素的平均含量均高于世界、中国、陕西省土壤元素背景值,Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Cr 和 Cd 分别是世界土壤元素背景值的 4.1、11.7、79.5、0.8、2.0、1.0、1.8、15.7 倍,中国土壤元素背景值的 5.4、15.7、9.6、1.4、1.2、1.8、2.1、56.7 倍,陕西省土壤元素背景值的 5.8、19.1、10.3、1.4、1.5、1.7、2.0、58.5 倍,其中 Cu、Pb、Zn 和 Cd 超标最为突出,分别是世界、中国和陕西土壤元素背景的 4 ~ 6、12 ~ 20、10 ~ 80、16 ~ 60 倍. 从标准偏差和变异系数来看,Cu、Pb、Zn 和 Mn 等的标准偏差和变异系数较大,反映其受人类活动影响较大.

表 3 宝鸡市街尘重金属元素的含量/$\mu g \cdot g^{-1}$

Table 3 Contents of heavy metal elements of street dust in Baoji City/$\mu g \cdot g^{-1}$

元素	最小值	最大值	平均值	标准偏差	变异系数	世界土壤元素背景值[33]	中国土壤元素背景值[33]	陕西土壤元素背景[33]
Cu	77.9	259.9	123.2	43.25	0.35	30	22.6	21.4
Pb	140.6	1 864.6	408.4	295.94	0.72	35	26.0	21.4
Zn	384.9	1 778.3	715.1	320.08	0.45	9	74.2	69.4
Mn	544.5	2 335.8	804.2	368.62	0.46	1 000	583	557
Co	12.6	22.9	15.9	2.31	0.15	8	12.7	10.6
Ni	33.3	219.3	48.8	29.97	0.61	50	26.9	28.8
Cr	98.9	214.5	126.7	19.67	0.16	70	61.0	62.5
Cd	2.9	7.6	5.5	1.19	0.22	0.35	0.097	0.094

同国内外其他城市街尘中重金属元素的含量(表 4)比较发现:宝鸡市街尘中 Cu 含量高于 Luanda、Hong Kong、Kayseri、Oslo、重庆市和西安市,低于 Avilés、Madrid、上海市和成都市;Pb 的含量高于 Luanda、Hong Kong、Kayseri、Oslo、重庆市、广州市、西安市和成都市,低于 Avilés、Madrid 和上海市;Zn 的含量高于 Luanda、Kayseri、Oslo、Madrid、重庆市、广州市和西安市,低于 Hong Kong、Avilés、上海市和成都市;Mn 的含量低于 Avilés 和 Oslo,高于其他城市(有可利用的数据);Ni 的含量低于上海市和成都市,高于其他城市(西安市没有可利用的数据);Cr 的含量低于上海市和西安市,高于其他城市(Oslo 没有可利用的数据);Cd 的含量低于 Avilés,高于其他城市(Hong Kong、Madrid 和西安市没有可利用的数据). 不同城市街尘中重金属元素的含量差异可能与其来源及人类活动的强度、方式的不同等因素有关.

2.3 街尘中重金属元素的来源分析

2.3.1 重金属元素的相关分析

表 5 是宝鸡市街尘中重金属元素之间的相关分析结果. 由表 5 可知,宝鸡市街尘中 Cu-Pb(0.416)、Cu-Mn(0.548)、Pb-Mn(0.535)、Pb-Co(0.469)之间存在显著正相关($p < 0.01$);Ni 和 Cr 之间存在显著正相关(0.793,$p < 0.01$),但二者和其他重金属元素之间不存在相关关系;Zn、Cd 和其他重金属元素之间不存在相关关系.

2.3.2 重金属元素的主成分分析

宝鸡市街尘中重金属元素的主成分分析结果见表 6. 由表 6 可知,主成分分析提取出 5 个特征值 >1 的因子(主成分),因子 1(1.817)、因子 2(1.774)、因子 3(1.331)、因子 4(1.112)和因子 5(1.033)累积方差贡献率为 88.3%. 因子 1 由 Ni

表 4　宝鸡市和其他城市街尘重金属元素的含量比较[1)]/μg·g^{-1}

Table 4　Comparison of heavy metals contents of street dusts in Baoji and others cities/μg·g^{-1}

城市名称	Cu	Pb	Zn	Mn	Co	Ni	Cr	Cd	文献
Luanda	42	351	317	258	2.9	10	26	1.1	[8]
Hong Kong	110	120	3 840	594	9.52	28.6	124	/	[10]
Avilés	183	514	4 892	1661	7.03	27.5	41.6	22.3	[11]
Oslo	123	180	412	833	19	41	/	1.4	[12]
Madrid	188	1 927	476	362	3	44	61	/	[12]
Kayseri	36.6	74.8	112	237	16.5	44.9	29	2.53	[13]
重庆市	79.38	75.62	169.67	/	/	22.17	87.26	4.95	[22]
上海市	235.89	416.63	906.29	/	/	92.19	162.59	1.58	[34]
广州市	176	240	586	481	13	23	78.8	2.41	[35]
西安市	94.98	230.52	421.46	687	/	/	167.28	/	[5]
成都市	240	372	1078	/	/	82	112	4.33	[36]
宝鸡市	123.2	408.4	715.1	804.2	15.9	48.8	126.7	5.5	本研究

1)"/"表示没有可利用的数据

表 5　宝鸡市街尘重金属元素的相关分析[1)]

Table 5　Correlation analysis of heavy metal elements of street dust in Baoji City

	Cu	Pb	Zn	Mn	Co	Ni	Cr	Cd
Cu	1							
Pb	0.416**	1						
Zn	−0.013	0.093	1					
Mn	0.548**	0.535**	0.125	1				
Co	0.206	0.469**	0.216	0.202	1			
Ni	0.006	0.040	−0.080	−0.091	0.266	1		
Cr	0.050	0.024	−0.012	0.159	0.267	0.793**	1	
Cd	0.076	0.297	0.169	0.098	−0.059	−0.155	−0.101	1

1) ** 表示在 $p<0.01$ 水平显著相关

表 6　宝鸡市街尘重金属元素的主成分分析

Table 6　Principal component analysis of heavy metal elements of street dust in Baoji City

元素	因子(主成分)					共同度
	1	2	3	4	5	
Cu	0.007	0.845	0.117	−0.001	−0.089	0.736
Pb	−0.035	0.497	0.673	0.367	−0.059	0.839
Zn	−0.037	0.023	0.110	0.090	0.977	0.977
Mn	0.026	0.886	0.109	0.059	0.141	0.821
Co	0.203	0.083	0.904	−0.121	0.167	0.908
Ni	0.928	−0.086	0.149	−0.058	−0.090	0.902
Cr	0.952	0.110	0.037	−0.042	0.045	0.923
Cd	−0.075	0.046	−0.003	0.972	0.095	0.962
特征值	1.817	1.774	1.331	1.112	1.033	
方差贡献率/%	22.7	22.2	16.6	13.9	12.9	
累积方差贡献率/%	22.7	44.9	61.5	75.4	88.3	

(0.928)和 Cr(0.952)构成,方差贡献率为 22.7%. 因子 2 主要由 Cu(0.845)和 Mn(0.886)及适量的 Pb(0.497)构成,方差贡献率为 22.2%. 因子 3 由 Pb(0.673)和 Co(0.904)构成,方差贡献率为 16.6%. Cd(0.972)和 Zn(0.977)分别构成因子 4 和因子 5,方差贡献率分别为 13.9%和 12.9%.

2.3.3　重金属元素的聚类分析

图 2 是宝鸡市街尘中重金属元素的聚类分析结果. 由图 2 可知,聚类分析将宝鸡市街尘中所分析的重金属元素分为以下 5 类,即:Ni-Cr、Cu-Mn、Pb-Co、Zn 和 Cd,类 2 和类 3 一起构成一个更高水平的类,说明有相同来源,类 4 和类 5 也一起构成一个更高水平的类,说明有另外一个相同来源.

2.3.4　重金属元素的来源

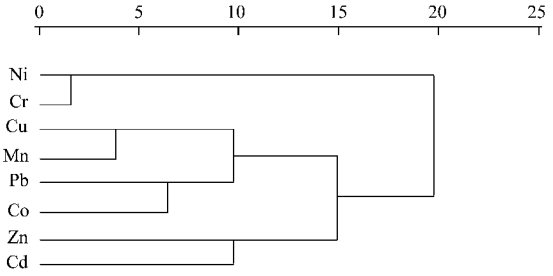

图 2 宝鸡市街尘重金属元素的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of heavy metal elements of street dust in Baoji City

宝鸡市街尘中 Cu、Pb、Zn 和 Cd 的含量远远高于世界、中国和陕西省土壤元素背景值,受人类活动影响强烈,可能主要是人为来源;Mn、Co、Ni 和 Cr 的含量接近或略高于世界、中国和陕西土壤元素背景值,受人类活动影响较小,可能主要是自然来源(当地土壤). 依据相关分析、主成分分析及聚类分析结果可以推断出宝鸡市街尘中重金属元素主要有 3 种来源:Cu、Pb、Mn 和 Co 是人为(工业来源和交通来源)和自然(当地土壤)的混合来源;Zn 和 Cd 是人为来源(工业来源和交通来源);Ni 和 Cr 主要是自然来源(当地土壤).

第一组元素 Ni 和 Cr,在相关分析和主成分分析中存在显著正相关关系,同时与其他重金属元素之间不存在相关关系,在聚类分析中被聚为一类. Ni 和 Cr 在所有街尘样品中,接近或略微高于当地土壤元素背景值,说明主要是自然来源(当地土壤).

第二组元素 Cu、Pb、Mn 和 Co,在相关分析和主成分分析中显著正相关,在聚类分析中被聚为一大类. 研究表明,汽车金属部件的磨损可以释放 Cu[3, 9],车辆轮胎、润滑剂、建筑材料及大气粉尘中均含有 Pb[37]. 宝鸡市绝大多数街尘样品中 Cu 和 Pb 的含量远远高于当地土壤元素背景值,尤其是在一些重交通区和工业区尤为显著,说明宝鸡市街尘中 Cu、Pb 主要是交通来源和工业来源. Mn 和 Co 在绝大多数街尘样品中,接近或略微高于当地土壤元素背景值,只是在一些重交通区和工业区含量较高,说明宝鸡市街尘中 Mn 和 Co 以自然来源(当地土壤)为主,其次部分来自工业生产等人为活动.

第三组元素 Zn 和 Cd 在所有街尘样品中含量远远高于当地土壤元素背景值,尤其是在一些重交通区和工业区. 汽车轮胎和车体的机械磨损及润滑油的泄露可以引起街尘中 Zn 和 Cd 含量的升高[3, 10, 12]. 因此,可以推断宝鸡市街尘中 Zn 和 Cd 明主要是人为来源(交通来源和工业来源).

2.4 街尘中重金属元素的形态特征

图 3 给出了宝鸡市街尘中重金属元素各形态含量所占的质量分数. 从图 3 可以看出,宝鸡市街尘中,Mn、Co、Ni 和 Cr 主要以残余态形式存在(残余态占四态总和的 48.52% 以上),Zn 和 Cd 主要以乙酸可提取态形式存在(乙酸可提取态分别占四态总和的 44.43% 和 44.08%),Cu 主要以可氧化态和残余态形式存在(可氧化态和残余态分别占四态总和的 48.22% 和 37.65%),Pb 主要以可还原态形式存在(可还原态占四态总和的 45.42%). 在重金属元素 BCR 形态分析中,残余态是“稳定态”,比例越高,可迁移部分、生物可利用部分越少,对环境的影响也就越小;乙酸可提取态、可还原态和可氧化态是“非稳定态”,比例越高,可迁移部分、生物可利用部分越高,对环境影响也就越大. 由图 3 可见,在酸性条件下,重金属元素迁移顺序是:Zn (44.43%) > Cd (44.08%) > Mn (27.75%) > Co (13.55%) > Pb (11.63%) > Cu (5.33%) > Ni (3.85%) > Cr (2.70%),其中 Zn 和 Cd 易迁移,易被生物利用,危害较大;在还原性条件下,重金属元素迁移顺序是:Pb (45.42%) > Cd (24.26%) > Mn (18.33%) > Zn (15.61%) > Co (9.58%) > Ni (9.41%) > Cu (8.81%) > Cr (3.48%),其中 Pb 易迁移,易被生物利用,危害较大;在氧化性条件下,重金属元素迁移顺序是:Cu (48.22%) > Pb (25.28%) > Cd (21.78%) > Zn (19.28%) > Cr (12.50%) > Ni (10.36%) > Co (5.90%) > Mn (5.41%),其中 Cu 易迁移,易被生物利用,危害较大;在街尘质中,重金属元素整体迁移顺序是:Cd (90.11%) > Pb (82.33%) > Zn (79.32%) > Cu (62.35%) > Mn (51.48%) > Co (29.02%) > Ni (23.62%) > Cr (18.68%),其中 Cd、Pb、Zn、Cu 和 Mn 有 50% 以上可以发生迁移,易被生物利

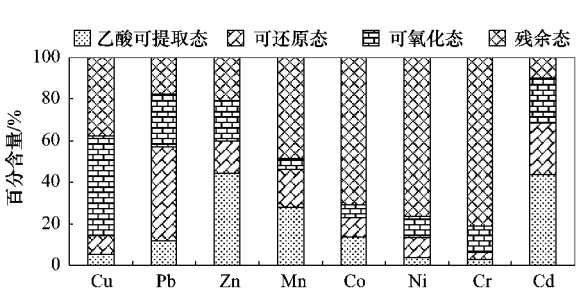

图 3 宝鸡市街尘重金属元素形态分布

Fig. 3 Distribution of speciation of heavy metal elements of street dust in Baoji City

用,危害较大.这一结果与 Tokalıoğlu 等[13]的研究结果,即:Cd (93.3%) > Zn (83.8%) > Pb (77.2%) > Co (75.9%) > Mn (73.0%) > Ni (60.1%) > Cu (59.0%) > Cr (58.6%)略有差异,但均反映出 Cd、Pb、Zn 和 Mn 均容易发生迁移,易被生物利用,危害较大.

3　结论

(1)重金属元素含量分析表明,街尘中 Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Cr 和 Cd 的平均含量分别是 123.2、408.4、715.1、804.2、15.9、48.8、126.7 和 5.5 $\mu g \cdot g^{-1}$.街尘中所分析的重金属元素含量均高于世界、中国、陕西土壤元素背景值,其中 Cu、Pb、Zn 和 Cd 超标最为突出.

(2)街尘中重金属来源分析结果表明,Ni 和 Cr 主要是自然来源(当地土壤),Cu、Pb、Mn 和 Co 是人为(交通来源和工业来源)和自然(当地土壤)的混合来源,Zn 和 Cd 主要是人为来源(交通来源和工业来源).

(3)形态分析表明,街尘中 Mn、Co、Ni 和 Cr 主要以残余态形式存在(48.52% 以上),Zn 和 Cd 主要以乙酸可提取态形式存在(44.43% 和 44.08%),Cu 主要以可氧化态和残余态形式存在(48.22% 和 37.65%),Pb 主要以可还原态形式存在(45.42%).在街尘中,重金属元素的迁移顺序是:Cd (90.11%) > Pb (82.33%) > Zn (79.32%) > Cu (62.35%) > Mn (51.48%) > Co (29.02%) > Ni (23.62%) > Cr (18.68%),其中 Cd、Pb、Zn、Cu 和 Mn 有 50% 以上可以发生迁移,易被生物利用,危害较大.

参考文献:

[1] Xie S J, Dearing J A, Boyle J F, *et al*. Association between magnetic properties and element concentrations of Liverpool street dust and its implications[J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, **48**(2): 83-92.

[2] Akther M S, Madany I M. Heavy metals in street and house dust in Bahrain[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1993, **66**(1-2): 111-119.

[3] 向丽, 李迎霞, 史江红, 等. 北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 159-167.

[4] Stigliani W M, Doelman P, Salomons W, *et al*. Chemical time bombs-predicting the unpredictable[J]. Environment, 1991, **33**(4): 4-30.

[5] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al*. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dust of Xi'an, Central China[J]. Science of the Total Environment, 2006, **355**(1-3): 176-186.

[6] Sezgin N, Ozcan H K, Demir G, *et al*. Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway[J]. Environment International, 2004, **29**(7): 979-985.

[7] Al-Khashman O A. The investigation of metal concentrations in street dust samples in Aqaba city, Jordan[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, **29**(3): 197-207.

[8] Ferreira-Baptista L, Miguel E D. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropic urban environment[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(25): 4501-4512.

[9] Al-Khashman O A. Heavy metal distribution in dust, street dust and soil from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(39): 6803-6812.

[10] Yeung Z L L, Kwok R C W, Yu K N. Determination of multi-element profile of street dust using energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF)[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2003, **58**(3): 339-346.

[11] Ordóñez A, Loredo J, Miguel E D, *et al*. Distribution of heavy metals in the street dusts and soils of an industrial city in Northern Spain[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, **44**(2): 160-170.

[12] Miguel E D, Llamas J F, Chacón E, *et al*. Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead[J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(17): 2733-2740.

[13] Tokalıoğlu Ş, Kartal Ş. Multivariate analysis of the data and speciation of heavy metals in street dust samples from the organized industrial district in Kayseri (Turkey)[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(16): 2797-2805.

[14] Banerjee A D K. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of delhi, India[J]. Environmental Pollution, 2003, **123**(1): 95-105.

[15] Lu Y, Zhu F, Chen J, *et al*. Chemical fractionation of heavy metals in urban soils of Guangzhou, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, **134**(1-3): 429-439.

[16] Singh K P, Mohan D, Singh V K, *et al*. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments-a tributary of the Ganges, India[J]. Journal of Hydrology, 2005, **312**(1-4): 14-27.

[17] Ahmed F, Ishiga H. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka City, Bangladesh[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(21): 3835-3844.

[18] Joshi U M, Vijayarghavan K, Balasubramanian R. Elemental composition of urban street dusts and their dissolution characteristics in various aqueous media[J]. Chemosphere, 2009, **77**(4): 526-533.

[19] 李海雯, 陈振楼, 王军, 等. 基于 GIS 的上海城市灰尘重金属空间分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(5): 803-809.

[20] 刘春华, 岑况. 北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(7): 1181-1188.

[21] 朱伟, 边博, 阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1584-1589.

[22] 李章平, 陈玉成, 杨学春, 等. 重庆市主城区街道地表物中重金属的污染特征[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(1): 114-116.

[23] 张菊, 邓焕光, 陈振楼, 等. 上海市区街道灰尘重金属污染研究[J]. 土壤通报, 2007, **38**(4): 727-731.

[24] Ahmed F, Bibi M H, Ishiga H. Environmental assessment of Dhaka City (Bangladesh) based on trace metal contents in road dusts[J]. Environmental Geology, 2006, **51**(6): 975-985.

[25] Christoforidis A, Stamatis N. Heavy metal contamination in street dust and roadside soil along the major national road in Kavala's region, Greece[J]. Geoderma, 2009, **151**(3-4): 257-263.

[26] Shi G, Chen Z, Bi C, *et al*. Comprehensive assessment of toxic metals in urban and suburban street deposited sediments (SDSs) in the biggest metropolitan area of China[J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(3): 694-703.

[27] Wei B G, Jiang F Q, Li X M, *et al*. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urumqi, NW China[J]. Microchemical Journal, 2009, **93**(2): 147-152.

[28] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al*. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in zinc smelting district, Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(4): 726-733.

[29] 郑小康, 李春晖, 黄国和, 等. 保定城区地表灰尘污染物分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(10): 2195-2202.

[30] 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.

[31] Sahuquillo A, Rauret G, Bianchi M, *et al*. Mercury determination in solid phases from application of the modified BCR-sequential extraction procedure: a valuable tool for assessing its mobility in sediments[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2003, **375**(4): 578-583.

[32] Umoren I U, Udoh A P, Udousoro I I. Concentration and chemical speciation for the determination of Cu, Zn, Ni, Pb and Cd from refuse dump soil using the optimized BCR sequential extraction procedure[J]. Environmentalist, 2007, **27**(2): 241-252.

[33] 国家环境保护局, 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. 87-90, 330-496.

[34] 史贵涛, 陈振楼, 许世远, 等. 上海城市公园土壤及灰尘中重金属污染特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 238-242.

[35] Duzgoren-Aydin N S, Wong C S C, Aydin A, *et al*. Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, **28**(4): 375-391.

[36] 施择明, 倪师军, 张成红. 成都市近地表大气尘的地球化学特征[J]. 地球与环境, 2004, **32**(3-4): 53-58.

[37] 李崇, 李发云, 张营, 等. 沈阳市街道灰尘中重金属的空间分布特征研究[J]. 生态环境, 2008, **17**(2): 560-564.