

西安道路尘中元素分布特征及其来源分析*

唐艳荣^{1,2} 吴 枫¹ 曹军骥¹ 李 鹏^{1,2}

(1. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 2009 年 1 月对西安空间范围的道路尘进行采样, 分析了其元素含量和空间分布特征。结果表明, 道路尘中 Si、Al、Fe、Mg、V、Mn、Ni、Rb 的来源基本没有受到人为活动的影响, Ca、Na、K、Ti、Co、Zr 的来源受到了人为活动的轻微影响, Cr、Ba、As、Sr、Cu、Zn、Pb 的来源则明显受到了人为活动的影响; 非(轻)污染元素中 Si、K、Rb、Zr、Ti 在空间上分布较为一致, 且相关性较好, 其来源主要受黄土地区粉尘沉降的影响, Ca、Fe、Mn 等来源复杂, 在一定区域的道路尘中其含量受到人为活动的轻微影响; 重污染元素中 Pb 与 As 的相关性较好, 且空间分布较为一致, 主要来源于燃煤和农用车尾气排放, Ba 与 Sr、Cu 的相关性也较好, 但空间分布特征并不完全相同, 显示了其来源以及源排放类型的空间差异; 道路尘是一种复杂的环境介质, 用单一的源、或者源类型来代表整个城市范围内道路尘元素(无论是地壳元素或是污染元素)的来源是不科学的, 应该结合每种元素分布状态在空间上客观存在的差异来进行分析。

关键词 道路尘 元素特征 分布 来源

Distribution characteristics and source analysis of road dust in Xi'an TANG Yanrong^{1,2}, WU Feng¹, CAO Junji¹, LI Peng^{1,2}. (1. State Key Laboratory of Loess & Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an Shanxi 710075; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049)

Abstract: 82 sampling sites, which covered basically the whole Xi'an City, were set for collecting the road dust samples in heating period. The concentration of elements in these road dust samples was analyzed and compared with that in loess, the enrichment index of each element were calculated. Base on the obtained data, the distribution characteristics and source analysis of road dust in Xi'an were achieved. The results showed that the enrichment index of Cr, Ba, As, Sr, Cu, Zn and Pb were higher than 2, indicated that they were the main pollution elements. Un-pollution elements, such as Si, K, Ti, Rb, Zr were positive correlated with each other and they presented the similar spatial distribution. These elements might have the same pollution source of Asian dust deposition. A positive correlation between Pb and As showed that they had the same pollution source, which might be the traffic and burning of coal. The spatial distribution of Cu, Pb, Zn presented significant difference, the findings displayed that they had different sources in different area.

Keywords: road dust; characteristic of element; distribution; sources

道路尘是一种复杂的环境介质, 其中含有大量路边风化的土壤、老化的路面物质、汽车尾气排放物、轮胎磨损老化后的物质以及大气气溶胶沉降物等, 其组成特征在一定程度上反映了城市环境受人为影响的程度^[1]。道路尘也是城市易散性粉尘的重要源之一, 是城市大气颗粒物的主要贡献者, 其地球化学特征的研究能为解析大气颗粒物的来源提供重要数据^[2], 进而为利用受体模型解析大气颗粒物源的相对贡献、制定合理有效治理措施、改善城市空气质量提供科学依据。

有关城市道路尘组成元素的地球化学特征研究

已有很多报道, 但主要集中在重金属的污染评价上。研究者大多通过区域采样, 利用因子分析等统计手段定性确定道路尘中重金属的来源^[3,4]。事实上, 虽然污染区域的大气沉降具有面源性^[5], 但道路尘的元素组成、分布模式及其来源类型在整个城市环境中都不尽相同^[6]。不同区域发展的历史差异、道路建设使用的不同材料等因素导致道路尘的物质来源和元素分布存在着空间差异, 这与因子分析法所假设的前提不符。在建立道路尘源谱时, 往往忽略了其元素组成客观存在的空间差异性。

笔者分析了西安道路尘元素的空间分布特征,

第一作者: 唐艳荣, 女, 1985 年生, 硕士研究生, 主要从事城市易散性粉尘源谱的建立研究。

* 国家自然科学基金资助项目(No. 40872211、No. 40925009)。

并分析其可能的来源以及源在空间上的差异,以期利用道路尘进行城市环境的污染评价和城市易散性粉尘源谱的建立提供基础数据。

1 研究区域与采样分析方法

1.1 研究区域概况

西安地处黄土高原南部,位于亚洲粉尘源区的下风区,气候主要受东亚季风系统控制,春秋季节多沙尘天气^[7]。冬春季节气温最低,平均气温为 -1.3°C ,这一时期西安燃煤取暖达到高峰。西安是中国西部较发达的大型城市之一,在不同的区域分布着不同的行业。市中心主要以商业活动为主,人流量、车流量大;城西集中了汽配汽修、建材、军工、电厂等重工业;城东为纺织城,集中了主要的轻工业批发市场;西南主要为高新技术产业开发区;南郊则是以大雁塔、曲江为主的旅游区;北郊正处于开发阶段。地理条件的差异以及污染来源的不同,使得西安不同区域的道路尘的自然沉积环境以及污染来源存在一定的差异。

1.2 样品采集

2009年1月对西安空间范围的道路尘进行采样,共采集82个样品,采样期正值该市燃煤取暖的高峰期。在采样点布设上,以穿过钟楼的东向西和南北向2条主干道为中心轴(见图1),在城市道路的十字路口采样,路面均为柏油材质。为了保证样品的代表性,每个点的样品由采样点周围10 m内的多个子样混合而成,用干净的塑料刷和簸箕进行收集^[8],每个样品收集约150 g,存放于自封袋中带回实验室。

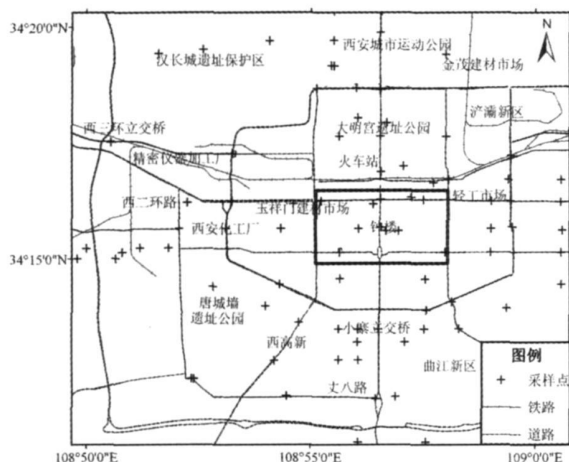


图1 采样点布设

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

1.3 样品分析

样品先通过20目塑料筛,剔除其中的沙砾石块

及植物残体;然后全样通过100目尼龙筛,每个样品取约10 g,用玛瑙钵研磨至小于200目。采用压片法制样(将研磨好的样品在30 N的力作用下制成32 mm直径的圆片)。样品的元素组成采用Axios advanced PW4400 X射线荧光光谱仪进行分析,利用26种土壤标准参考物质(GSS)建立工作曲线。测试过程中每分析20个样品,设1个平行样。结果表明,实测值与参考值之间的相对标准偏差小于10%。此外,随机选取5个样品作重复样,平行测定3次,其相对标准偏差均不超过5%。

2 结果与讨论

2.1 道路尘样品中各元素含量

表1列出了本研究得到的西安道路尘样品中各主要元素质量浓度,并将其与其他人对西安道路尘的研究结果以及其他城市道路尘的研究结果进行了比较。由表1可见,本研究道路尘主要元素中质量浓度较高($> 10\,000\text{ mg/kg}$)为Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K,其次是Ti,其他元素均在 $1\,000\text{ mg/kg}$ 以下。

富集因子可以用来研究道路尘中元素的来源是否受人为活动影响,以及受影响的程度^[14]。以中国黄土中元素组成背景值为参比^[15],选Al为参考元素,计算了本研究道路尘样品中各元素的平均富集因子(见表1)。由表1可见,道路尘样品中元素的平均富集因子均小于5,其中Si、Al、Fe、Mg、V、Mn、Ni、Rb的平均富集因子均小于1或接近于1,可见样品中这些元素的含量与黄土中近似,表明这些元素的来源基本没有受到人为活动的影响,属于非污染元素;Ca、Na、K、Ti、Co、Zr的平均富集因子为1.11~1.51,可见样品中这些元素的含量略高于黄土,表明这些元素的来源受到了人为活动的轻微影响,属于轻污染元素;Cr、As、Sr、Ba的平均富集因子均大于2且小于3,表明这些元素的来源受到了人为活动的较重影响,属于重污染元素;Cu、Zn和Pb的平均富集因子均大于3,分别为3.74、4.92和4.50,在一些样品中甚至高达13.10和10,表明这些元素的来源明显受到了人为活动的严重影响,属于重污染元素。

与HAN等^[9]2006年对西安道路尘所做的研究相比,本研究中As浓度均值比其高出近50%,而Cr、Mn、Cu、Zn和Pb的浓度明显降低,其中Pb浓度均值不足其50%。

与其他城市相比,本研究道路尘中各元素受污染的程度总体居中,其中Cu质量浓度均值为 74 mg/kg ,大于北京(43 mg/kg)和重庆(46 mg/kg),

表 1 西安道路尘样品中各主要元素质量浓度及与其他相关研究的比较¹⁾
 Table 1 Concentration of elements in road dust and comparison with other cities

元素	本研究					西安	北京	上海	重庆	香港
	极小值	极大值	均值	标准偏差	平均富集因子					
Si	161 800	274 000	211 140	14 242.41	1.06				226 800	204 000
Al	42 200	57 000	47 334	2 826.57	1.00		39 860		42 500	40 200
Fe	21 800	40 400	30 990	3 114.21	1.02		29 683		34 500	14 100
Mg	11 500	22 400	13 417	1 803.13	0.83		11 199		9 300	
Ca	53 100	93 000	66 011	7 215.50	1.51		52 361		85 000	199 000
Na	10 800	22 900	13 921	2 163.88	1.41		22 576		8 700	4 040
K	12 100	17 200	14 431	794.88	1.13				12 500	12 700
Ti	2 564	3 663	3 154	207.98	1.11		3 183		4 200	2 370
V	46	77	58	4.83	0.75				76.8	37
Cr	61	165	96	17.77	2.60	167.28		105	101.4	124
Mn	367	621	501	46.50	1.01	687	556			994
Co	7	14	10	1.36	1.11		16		13.2	10
Ni	21	53	29	5.29	0.95		72	65	18.9	29
Cu	32	229	74	32.90	3.74	94.98	43	152	46	110
Zn	143	616	301	96.51	4.92	421.46	163	584	193.8	1 140
As	8	35	16	4.16	2.01	10.62			22.4	67
Rb	58	89	69	4.52	0.90					187
Sr	220	502	322	43.57	2.52					121
Zr	169	328	237	29.91	1.33					378
Ba	518	1 006	702	97.63	2.19					253
Pb	59	209	104	32.68	4.50	230.52	126	196	102.1	120

注: ¹⁾除平均富集因子外,单位均为 mg/kg。西安、北京、上海、重庆、香港的数据分别引自文献[9]至文献[13]。

但小于香港(110 mg/kg)和上海(152 mg/kg); Zn 质量浓度均值为301 mg/kg,大于北京(163 mg/kg)和重庆(193.8 mg/kg),小于上海(584 mg/kg)和香港(1 140 mg/kg)。

2.2 道路尘样品中各元素的分布特征

2.2.1 非(轻)污染元素的分布特征

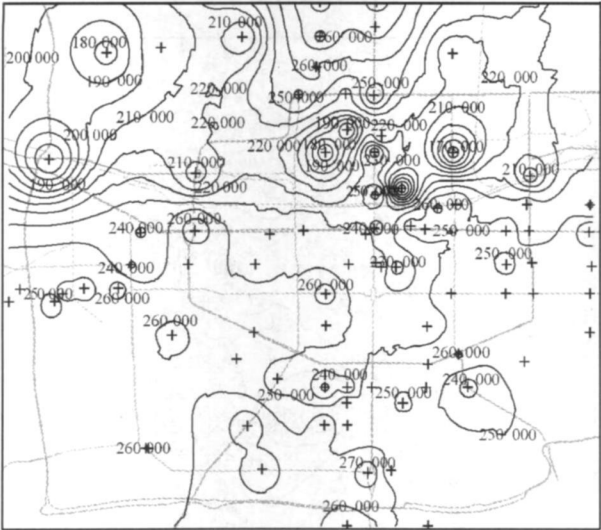
选取西安道路尘中非(轻)污染元素中分布规律明显的 Si、K、Rb、Zr、Ti、Mg、Al、V、Fe、Mn、Ca、Na 作分布特征分析,结果见图 2。由图 2 可见,Si 的分布在空间上的变化梯度较小,总体呈现北低南高的分布格局,高值主要出现在城南,在丈八路附近出现最高值,低值主要出现在城北,在汉长城遗址保护区和东北方向浐灞新区一带,但在正北方向西安城市运动公园附近 Si 的质量浓度较高,达到 260 000 mg/kg。K 与 Rb 分布状态几乎一致,总体呈现北低南高的分布格局,两者总体分布情况均与 Si 类似,主要区别在于两者的高值出现位置较 Si 稍偏北,出现在唐城墙遗址公园以东。Zr 和 Ti 的分布情况总体相似,两者在城北的分布状态均与 Si 相似,高值出现在西安城市运动公园附近,低值出现在汉长城遗址保护区和浐灞新区一带,两者在城南的局部区域表现出较

低的浓度。Mg 虽然也呈现出北高南低的分布格局,但高、低值分布状态与 Si 几乎完全相反,高值出现在汉长城遗址保护区、大明宫遗址公园和浐灞新区一带,低值则主要出现在城南。

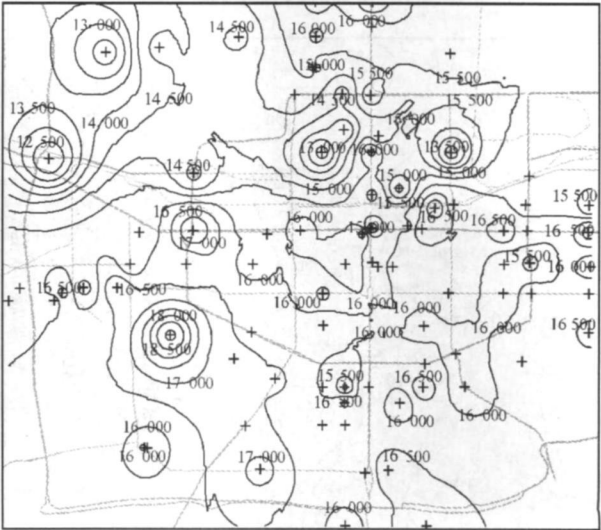
Al 是典型的地壳元素,西安道路尘中 Al 整体呈西高东低状态分布,沿西安主城区有一低值分布异常三角区域,平均约为 4 900 mg/kg。Al 高值分布出现在城西,平均大于 5 200 mg/kg。V 的空间变化规律与 Al 基本相似,在城墙以北二环以内(大明宫遗址公园附近)区域为其低值区。

Fe 的高值区总体来看由城西向城内方向延伸,平均约为 32 000 mg/kg,在城西工业密集区(精密仪器加工厂及西安化工厂一带)以及东郊铁路线(浐灞新区一带)密集处均有高值,最高达 36 000 mg/kg,低值区主要出现在汉长城遗址保护区以及火车站北大明宫遗址公园一带。Mn 的分布状态与 Fe 近似,但 Mn 沿东北-西南方向的浓度梯度较小。

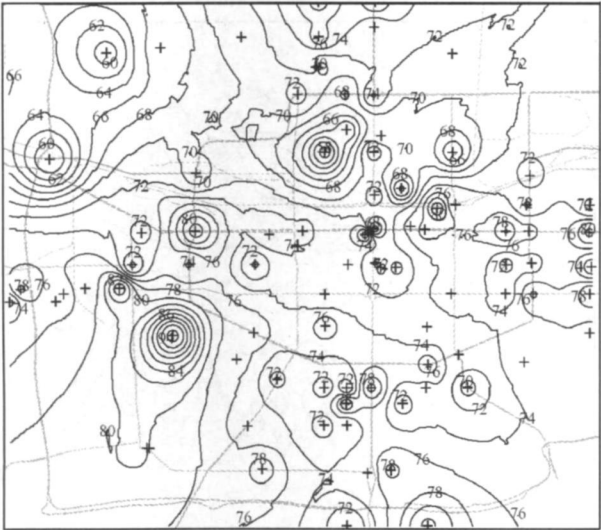
Ca 的分布状态与其他元素不同,变化较复杂,总体来看在汉长城遗址保护区以及北郊的浓度较低,在东郊、西高新以及大明宫遗址公园西面分布有高值。Na 的分布状态与其他元素没有相似的规律,



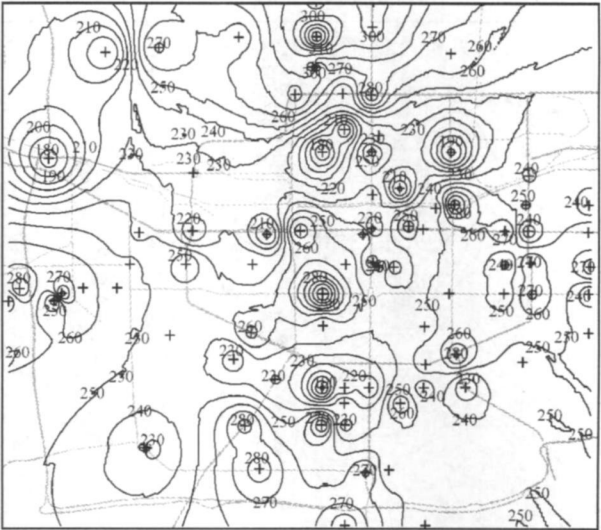
(a) Si



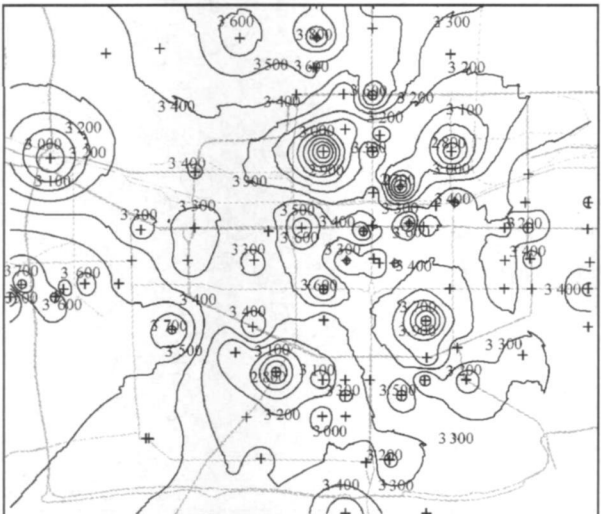
(b) K



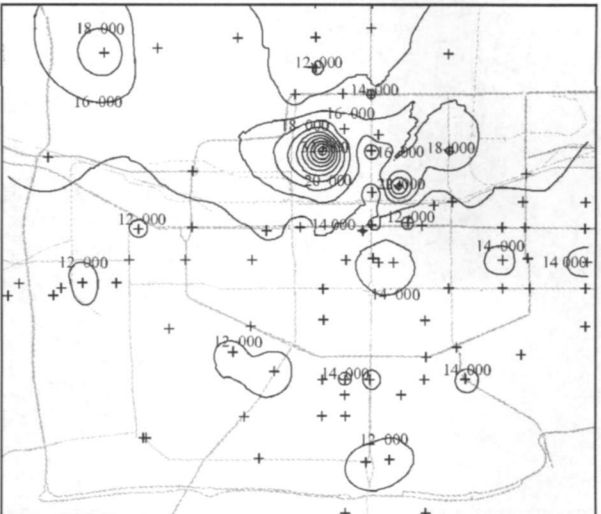
(c) Rb



(d) Zr



(e) Ti



(f) Mg

图 2 非(轻)污染元素分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of un-pollution elements

续图 2：

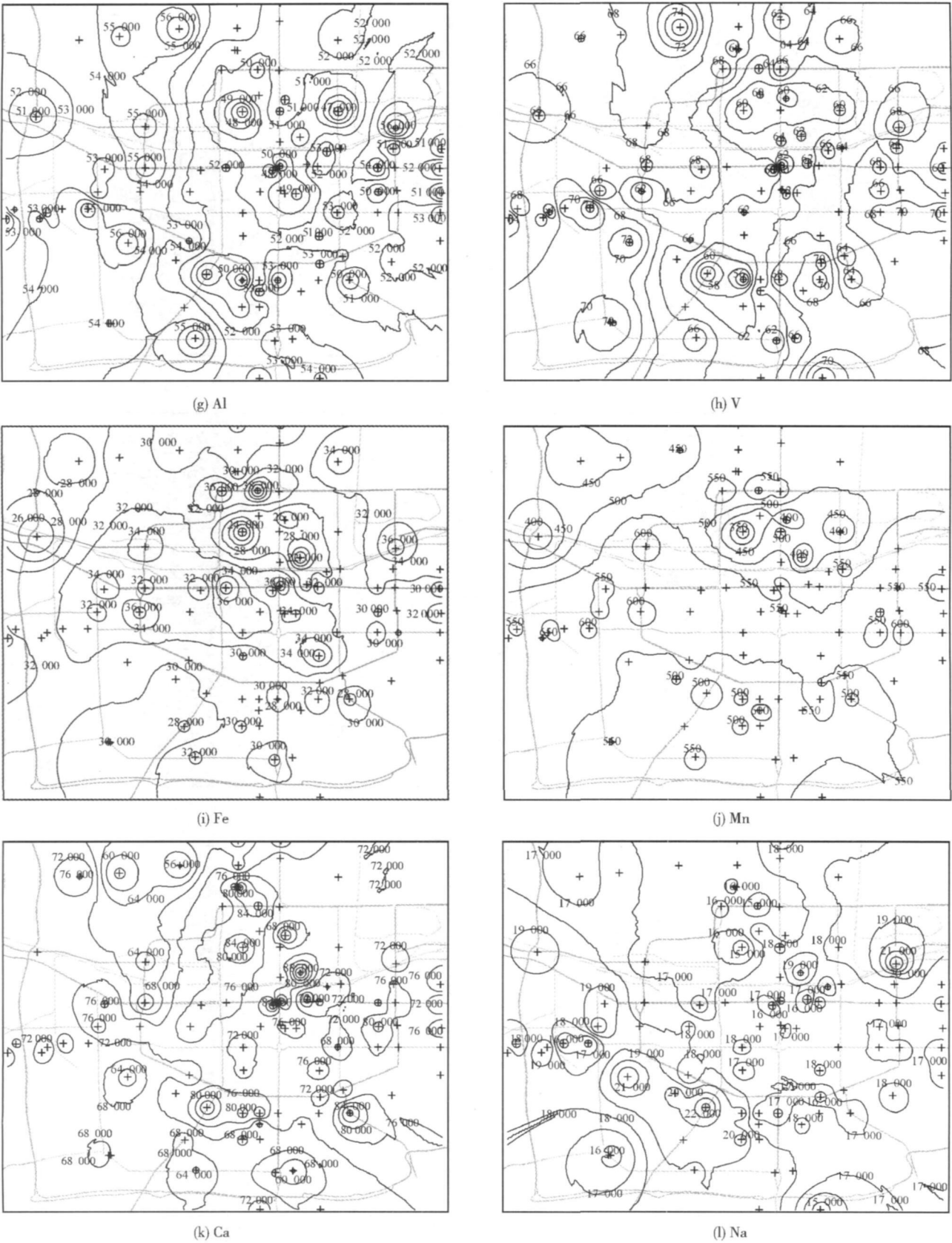


图 2 非(轻)污染元素分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of un-pollution elements
 注：数值单位为 mg/kg，图 3 同。

在西高新出现最高值, 低值区主要分布在城北及西南方向。

2.2.2 重污染元素的分布特征

选取西安道路尘中重污染元素中分布规律明显的 Pb、As、Zn、Cu、Ba、Sr 作分布特征分析, 结果见图 3。由图 3 可见, Pb 的高值主要出现在汉长城遗址保护区、西安城市运动公园、城内和西高新等区域, 其中汉长城遗址保护区一带的高值分布范围大、质量浓度高 ($> 120 \text{ mg/kg}$), 最高约为 200 mg/kg , 最低值出现在东北郊, 约 60 mg/kg 。As 与 Pb 分布状态类似, 但 As 在北郊的高值分布范围相对较小。Zn 的高值分布状态与 Pb 类似, 在城内和西高新附近出现高值区, 但在汉长城遗址保护区和西安城市运动公园一带, 两者又呈现出不同的分布趋势。

Cu 的分布状态明显不同于 Pb, 在城内和西二环路内出现高值区, 其中城内最高值大于 180 mg/kg , 玉祥门(玉祥门建材市场附近)附近平均为 160 mg/kg ; 低值区主要分布在大明宫遗址保护区和西安城市运动公园等地, 其他区域分布较均一。Ba 的低值分布状态与 Cu 类似, 但两者的高值分布却存在差异, Ba 在城内的高值分布范围相对较大, 且在玉祥门附近 Ba 没有表现出明显的高值异常, Ba 在西高新一带浓度较高, 而 Cu 在该区却表现出相对较低的浓度。Sr 与 Ba 的分布状态几乎一致, 但 Sr 在城内的高值异常不明显, 此外在城东南一带 Sr 有着明显的高值异常, 而在相同区域 Ba 却表现出低值。

2.3 各主要元素的相关性分析

表 2 显示了西安道路尘中各主要元素的相关性。由表 1 和表 2 可见, 平均富集因子小于 2 的非(轻)污染元素间的相关性相对较好, 其中 K 与 Rb、Fe 与 Mn、Al 与 V 具有较好的相关性, 相关系数分别达 0.879、0.709、0.699; Si 与 K、Mn、Rb、Zr 均表现出较好的相关性, 相关系数均达 0.6 以上; Mg 与 Si、K 等元素呈负相关, 相关系数达 -0.6 以下, 说明这些元素有相似的来源。而 Ca、Na、Co、Ni 与其他元素相关性总体较差。

平均富集因子大于 2 的重污染元素间的相关关系一般。其中, As 和 Pb 的相关系数为 0.694, Ba 与 Sr、Cu 的相关系数分别为 0.677、0.609, Cr、Cu、Zn、Pb 间的相关系数为 0.3~0.6, 说明这些重污染元素的来源具有一定的相关性, 但相关性没有非(轻)污染元素明显, 这可能与重污染元素的来源更为复杂有关。

2.4 道路尘中元素的来源分析

2.4.1 非(轻)污染元素的来源分析

来自于各种污染源的大气颗粒物经干湿沉降过程沉降到地面, 同时又在风力或其他外界动力下进入到大气中, 在各种化学物理作用下, 各类源会在一定程度上相互混合、相互影响^[12]。不同区域道路尘的粒度差异、源的种类以及各个源谱特征的差异是影响其元素空间分布特征的主要因素, 而不同的源组合对应于不同的元素组合^[16]。

Si 是道路尘中的主要组成元素, 且通常富集在粗颗粒中。由于道路尘中 Si 的含量通常较高, 其“稀释效应”也会导致其他主要元素的含量相对降低, 因此当粒度组成成为影响道路尘中元素含量的主要因素时, Si 与其他主要元素之间通常表现出负相关。而本研究中 Si 与 K、Mn、Rb、Zr 表现出很好的正相关, 表明粒度的变化不是影响西安道路尘中各元素含量的主要因素。而 Si 与 K、Rb、Zr、Ti 在空间上分布较为一致, 且相关性较好, 说明它们在整个城市的空间范围内来自于共同源。同时, 这些元素的平均富集因子为 0.9~1.4, 可见道路尘中这些元素的含量与黄土中基本相似, 表明这些元素主要来源于黄土地区粉尘的沉降。

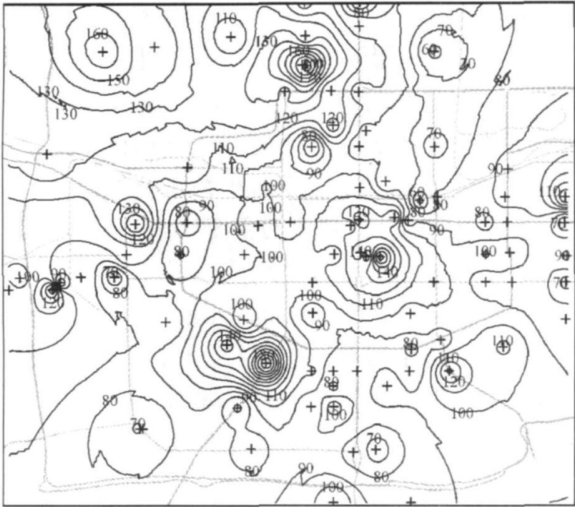
本研究道路尘中 Fe 和 Mn 的相关性较为复杂, 在受人为活动影响较小的区域, Fe 和 Mn 的变化相似, 且与 Si 等地壳元素的分布相同, 说明它们与 Si 有共同的来源。但 Fe、Mn 在人为活动密集区(如玉祥门附近、城内及东郊铁路线密集区)含量相对较高, 表明 Fe、Mn 除与 Si 有共同的来源外, 同时也受汽配汽修、建材生产、铁路运输等的影响。Ca 在分布上与其他元素不同, 而且与其他元素没有明显相关性, 表明 Ca 在不同区域的来源复杂, 可能受土壤扬尘等自然源因素的影响, 也可能与路肩类型、建筑扬尘情况等相关, 而采样期间城内以及东郊是建筑工地的主要分布区, 进一步证明了 Ca 在这些区域可能来源于建筑扬尘等污染源。

2.4.2 重污染元素的来源分析

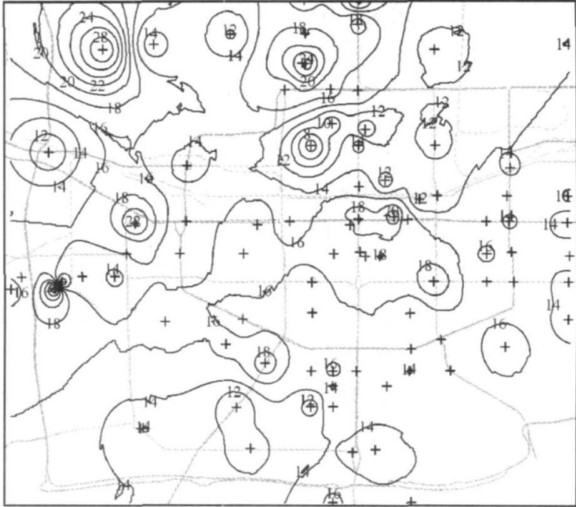
Cu、Pb、Zn、Ba 和 As 等一般被认为与局地大气沉降、机动车尾气排放、工业过程、机械磨损、城市绿化带、城市垃圾等复合源有关^[17,18], 但不同元素组合所表征的来源不同, 如城市污水污泥中含有大量 Cu、Zn 等重金属元素^[19]; 机动车尾气中含有大量的 Cu、Zn 和 Pb; Ba 与 Sr 的来源与颜料等相关^[10]; Cu、Zn、Ba 是轮胎磨损、紧急刹车时车辆尾气排放等的主要产物^[20]。本研究道路尘中 Pb 与 As 在空间上分布

一致,且相关性较好,说明两者有相同的来源。Pb 与 As 是燃煤的主要产物,本研究采样时间正值西安燃

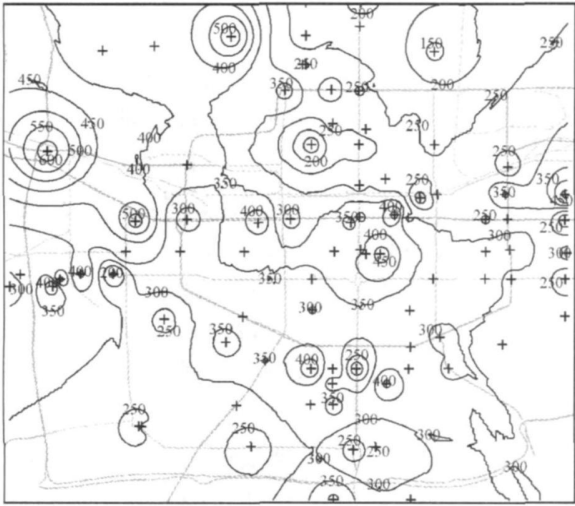
煤采暖的高峰期,说明燃煤很可能是道路尘中这 2 种元素的主要来源。在西安西北方向 Pb、As 均出现高



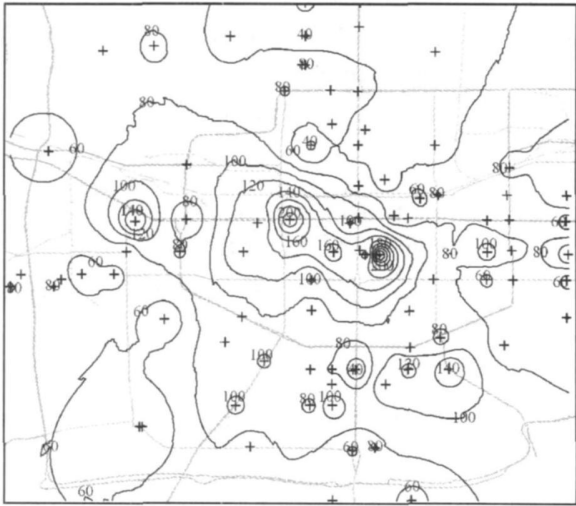
(a) Pb



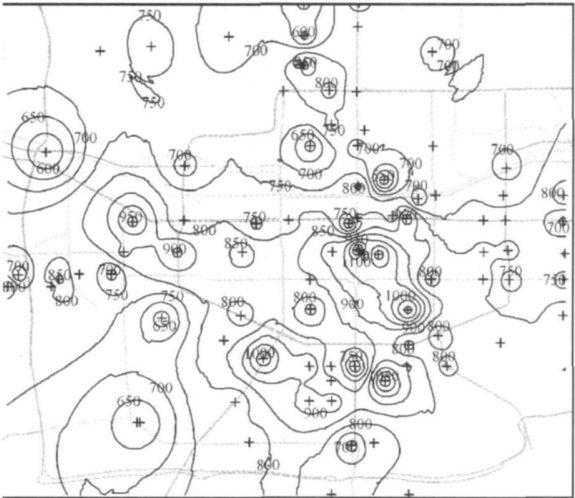
(b) As



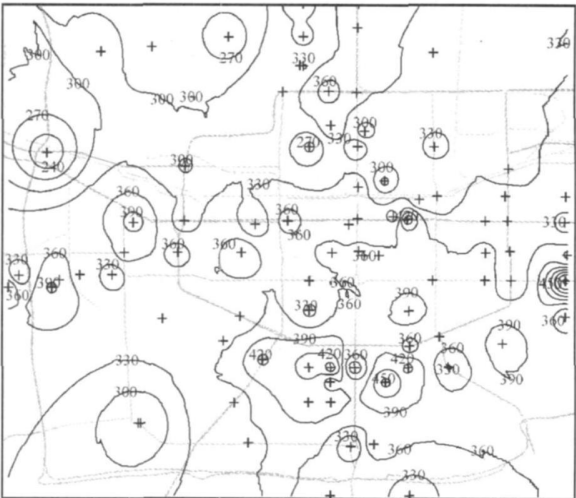
(c) Zn



(d) Cu



(e) Ba



(f) Sr

图 3 重污染元素分布特征
 Fig. 3 Spatial distribution of pollution elements

表 2 各主要元素间的相关性分析结果
Table 2 Correlations among elements

元素	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	V	Cr
Al	0.325									
Fe	0.186	0.004								
Mg	-0.733	-0.403	-0.321							
Ca	-0.278	-0.627	0.086	0.303						
Na	-0.038	-0.037	0.097	-0.177	0.046					
K	0.806	0.389	0.172	-0.613	-0.308	0.179				
Ti	0.516	0.495	0.320	-0.540	-0.392	-0.165	0.311			
V	0.174	0.699	0.106	-0.206	-0.335	-0.307	0.227	0.500		
Cr	-0.089	-0.173	0.572	-0.149	0.191	0.305	-0.081	-0.014	-0.102	
Mn	0.635	0.305	0.709	-0.569	-0.029	-0.098	0.553	0.493	0.370	0.243
Co	-0.267	0.303	-0.137	0.132	-0.198	-0.170	-0.250	0.216	0.362	-0.009
Ni	0.011	-0.013	0.085	-0.220	-0.001	0.119	-0.091	0.249	0.062	0.342
Cu	0.009	-0.306	0.456	-0.067	0.271	0.098	0.062	0.011	-0.087	0.468
Zn	-0.262	-0.196	0.196	-0.106	0.042	0.093	-0.333	0.083	-0.035	0.461
As	0.119	-0.009	0.206	-0.310	0.251	-0.009	-0.015	0.350	0.076	0.366
Rb	0.756	0.612	0.095	-0.605	-0.464	-0.063	0.879	0.468	0.473	-0.191
Sr	0.282	-0.184	0.379	-0.314	0.272	0.263	0.292	0.023	-0.150	0.339
Zr	0.675	0.282	0.239	-0.475	-0.382	0.027	0.423	0.627	0.158	-0.009
Ba	0.168	-0.323	0.433	-0.252	0.312	0.222	0.142	-0.017	-0.215	0.529
Pb	-0.211	-0.262	0.079	-0.085	0.311	0.116	-0.309	0.071	-0.162	0.366

元素	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Zr	Ba
Al										
Fe										
Mg										
Ca										
Na										
K										
Ti										
V										
Cr										
Mn										
Co	-0.142									
Ni	-0.037	0.383								
Cu	0.267	-0.167	0.012							
Zn	-0.018	0.170	0.278	0.456						
As	0.228	0.203	0.373	0.278	0.389					
Rb	0.543	-0.007	-0.011	-0.169	-0.354	-0.002				
Sr	0.329	-0.239	0.061	0.338	0.087	0.190	0.089			
Zr	0.436	-0.181	0.092	-0.066	-0.211	0.048	0.392	0.004		
Ba	0.281	-0.300	-0.034	0.609	0.376	0.253	-0.134	0.677	-0.041	
Pb	-0.116	0.098	0.189	0.382	0.548	0.694	-0.394	0.030	-0.091	0.342

值,这主要与这一区域的农户取暖、农用机动车(主要燃料为柴油)尾气排放有关。

Ba 与 Sr、Cu 的相关系数较高,3 者在空间上分布有所类似,且均在曲江新区及其以南地区出现较高值。曲江新区一带绿化面积大,曲江新区以南地区在采样期间仍是农田活动区,道路尘中 Ba、Sr、Cu

的含量在这一区域主要受农业活动影响;在大雁塔(曲江新区一带)附近, Ba 与 Sr 较其他几种污染元素有较为明显的高值区, Ba、Sr 均是颜料的主要组成元素,因此这可能与大雁塔一带密集的唐式建筑梁画所用的颜料有关; Ba 与 Sr 在北郊一带的分布状态与 Si 等类似,由于采样密度有限,无法单独分

析该区域内 Ba、Sr 与 Si 等的相关性, 只能初步推断在北郊 Ba、Sr 主要来自于粉尘沉降等自然源。

在城内以及玉祥门一带, Cu 与 Fe、Mn 等有类似的富集状态, 玉祥门是西安最大的建材批发市场以及汽车配件市场, 因此推断这一区域内的工业活动是道路尘中 Cu、Fe、Mn 的主要来源。Cu 在曲江新区以南地区与 Ba、Sr 有共同的来源, 在玉祥门附近与 Fe、Mn 等有共同的来源, 而且在整个西安范围内, 交通源也是 Cu 的主要来源之一。由此可见, 西安道路尘中的各种元素的来源较复杂, 应该结合每种元素分布状态在空间上客观存在的差异来进行分析。

3 结 论

(1) 西安道路尘中 Si、Al、Fe、Mg、V、Mn、Ni、Rb 的平均富集因子均小于 1 或接近于 1; Ca、Na、K、Ti、Co、Zr 的平均富集因子为 1.11~1.51, 这些元素的来源受到了人为活动的轻微影响; Cr、Ba、As、Sr、Cu、Zn、Pb 的平均富集因子均大于 2, 这些元素的来源明显受到人为活动的影响。

(2) 非(轻)污染元素中 Si、K、Rb、Zr、Ti 在空间上分布较为一致, 且相关性较好, 道路尘中这些元素的含量主要受黄土地区粉尘沉降的影响; Ca、Fe、Mn 等来源复杂, 在一定区域的道路尘中其含量受到人为活动的轻微影响。

(3) 重污染元素中 Pb 与 As 的相关性较好, 且空间分布较为一致, 主要来源于燃煤和农用车尾气排放; Ba 与 Sr、Cu 的相关性也较好, 但空间分布特征并不完全相同, 显示了其来源以及源排放类型的空间差异。

(4) 道路尘是一种复杂的环境介质, 用单一的源、或者源类型来代表整个城市范围内道路尘元素(无论是地壳元素或是污染元素)的来源是不科学的, 应该结合每种元素分布状态在空间上客观存在的差异来进行分析。

参考文献:

[1] SUTHERLAND R A, TOLOSA C A. Multi-element analysis of road deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii[J]. Environmental Pollution, 2000, 110(3): 483-495.

[2] YEUNG Z L L, KWOK R C W, YU K N. Determination of multi-element profiles of street dust using energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2003, 58(3): 339-346.

[3] CHARLES W, EVERETT S M, MCCARTHY R, et al. A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK [J]. Environment International, 2003, 29(5): 563-573.

[4] LU Xinwei, LI L Y, WANG Lijun, et al. Contamination assessment of mercury and arsenic in roadway dust from Baoji, China [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(15): 2489-2496.

[5] 孙玉焕, 骆永明, 吴龙华, 等. 长江三角洲地区城市污水污泥中 Cu 和 Zn 的含量及其污染评价[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(7): 84-88.

[6] DE MIGUEL E, LAMAS J F, CHACON 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.

[7] ZHANG X Y, ARIMOTO R, AN Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997, 102(23): 28041-28047.

[8] ASHBAUGH L L, CARVACHO O F, BROWN M S, et al. Soil sample collection and analysis for the fugitive dust characterization study [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(9/10): 1163-1173.

[9] HAN Yongming, DU Peixuan, CAO Junji, et al. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China [J]. Science of the Total Environment, 2006, 355(1/2/3): 176-186.

[10] 韩力慧, 庄国顺, 程水源, 等. 北京地面扬尘的理化特性及其对大气颗粒物污染的影响 [J]. 环境科学, 2009, 30(1): 1-8.

[11] 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其评价 [J]. 环境科学, 2006, 27(3): 519-523.

[12] 张远航, 胡可钊. 重庆市交通扬尘源的鉴别 [J]. 环境科学研究, 1993, 6(1): 20-24.

[13] LI Xiangdong, POON C S, LIU P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong [J]. Applied Geochemistry, 2001, 16(11/12): 1361-1368.

[14] 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.

[15] 文启忠. 黄土地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.

[16] CHOW J C, WATSON J G. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study [J]. Chemosphere, 2004, 54(2): 185-208.

[17] KABATA P A, MUKHERJEE A B. Trace elements from soil to human [J]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2005.

[18] AKHTER 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.

[19] 王加恩, 康占军, 许新苗, 等. 矿区土壤中重金属元素含量异常的调查 [J]. 环境污染与防治, 2008, 30(7): 105-108.

[20] FERGUSSON J E, KIM N D. Trace elements in street and house dusts: sources and speciation [J]. Science of the Total Environment, 1991, 100: 125-150.

编辑:卜岩枫 (修改稿收到日期: 2010-05-27)