

宝鸡市某工业园区灰尘重金属含量、 形态及生态风险分析

王利军, 卢新卫, 任春辉, 李晓雪, 陈灿灿, 杨琳娜

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 利用 X 射线荧光光谱法(XRF)和原子荧光分光光度法(AFS)分析了宝鸡市某工业园区灰尘中重金属的含量。结果表明,宝鸡市某工业园区灰尘中 As,Co,Cr,Cu,Hg,Mn,Ni,Pb 和 Zn 的平均含量分别为 23.3,16.4,1 591.8,178.2,0.243,346.5,40.2,1 586.2 和 1 918.8 mg/kg,其中,Cr,Cu,Hg,Pb 和 Zn 累积比较明显;铅锌冶炼厂周边灰尘中 As,Cu,Hg,Pb 和 Zn 的含量高于电厂。采用修正 BCR 法(欧洲共同体标准物质局)和原子吸收分光光度法(AAS)研究了灰尘中重金属的形态特征。结果表明,灰尘中 Cu 主要以残渣态和可氧化态的形式存在,Pb 主要以可还原态的形式存在,Zn 主要以乙酸可提取态的形式存在,Mn 和 Co 主要以乙酸可提取态和残渣态存在,Ni 和 Cr 主要以残渣态存在。灰尘中 Pb,Zn,Co,Mn 和 Cu 有 55%~85% 可以发生移动,易被生物利用,危害较大。潜在生态风险评估表明,灰尘中重金属的污染及潜在生态风险达到严重水平,铅锌冶炼厂周边灰尘中重金属的污染和潜在生态风险高于电厂。

关键词: 重金属; 生态风险; 灰尘

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0180-05

中图分类号: X502

Content, Forms and Ecological Risk of Heavy Metals in Dust in Changqing Industrial Park of Baoji City

WANG Li-jun, LU Xin-wei, REN Chun-hui, LI Xiao-xue, CHEN Can-can, YANG Lin-na
(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: The content of heavy metals in the dust in an industrial park of Baoji City was measured by X-Ray fluorescence spectrometry and Atomic fluorescence spectrometry. The results showed that the content of As, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb and Zn was 23.3, 16.4, 1 591.8, 178.2, 0.243, 346.5, 40.2, 1 586.2 and 1 918.8 mg/kg, respectively, of which Cr, Cu, Hg, Pb and Zn accumulated largely and the contents of As, Cu, Hg, Pb and Zn in the dust around lead-zinc smelting plant were higher than that around coal-fired power plant. Analysis on the forms of the heavy metals in the dust by modified BCR (from European Community Bureau of Reference) and AAS(atomic absorption spectrophotometry) indicated that Cu mainly existed oxidizable in residual, Pb reducible, Zn extractable in the acetate acid, Mn and Co rich in residual and extractable in the acetate acid, Ni and Cr mainly the residual. Pb, Zn, Co, Mn and Zn were easy to move and harmfully utilized by living things. Assessment of potential ecological risk demonstrated that the pollution of heavy metals in the dust and its potential ecological reached to the serious level with that around Pb—Zn smelting plant more severe than coal-fired power plant.

Keywords: heavy metals; ecological risk; dust

灰尘是人们生活中经常接触到的一种环境介质^[1],由于工业、交通,特别是有色金属冶炼等人类活动的影响,导致灰尘中累积了大量有毒有害物质,如重金属、多环芳香烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)等。

这些累积于灰尘中的有毒有害物质在环境条件变化的情况下(如 pH、氧化还原电位等)可释放出来,进入土壤及水体,产生污染。同时,灰尘中的有害物质还可通过人的呼吸作用、皮肤吸收及灰尘颗粒物直接

收稿日期:2012-12-26

修回日期:2013-03-18

资助项目:国家自然科学基金项目“冶炼焦电工业区重金属与 PAHs 污染特征及人群健康风险研究”(41271510);中央高校基本科研业务费项目“干旱半干旱区污染土壤中毒害元素与 PAHs 的环境行为研究(GK201305008)”,“关中地区农业土壤中 PAEs 的污染及在蔬菜中的分布累积研究(GK201302032)”

作者简介:王利军(1978—),男(汉族),陕西省宝鸡市人,博士,讲师,研究方向为环境污染评价。E-mail:wanglijun@snnu.edu.cn。

通信作者:卢新卫(1968—),男(汉族),陕西省蓝田县人,博士,教授,博士生导师,研究方向为环境污染与修复。E-mail:luxinwei@snnu.edu.cn。

摄入等途径进入人体危害健康,尤其是儿童。重金属是环境中常见的一类污染物,因具有持久性和难降解性被誉为“化学定时炸弹”^[2]。因此,近年来灰尘重金属污染引起国内外地理学、环境科学、生态学等学科专家学者的高度关注,相关研究主要集中在城市灰尘(如地表灰尘、街道灰尘、道路灰尘等)重金属的含量、分布、来源、形态、污染及健康风险评价等方面^[3-11]。研究表明^[12-14],重金属的环境行为、毒性效应不仅与重金属的全量有关,而且在很大程度上还取决于重金属的赋存形态、迁移特征。然而,有关金属冶炼、燃煤发电及焦化工业区灰尘重金属污染的研究相对较少^[15-16]。为诊断工业园区建设、发展对周边环境的影响,本研究以宝鸡市某工业园区为例,分析工业园区灰尘重金属含量、形态特征及其生态风险,研究结果可为区域环境保护、治理及居民健康防护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

宝鸡市位于关中平原西部(东经 106°18′—108°03′,北纬 33°35′—35°06′),是陕西省的第二大城市(位于西安以西 180 km 处)。同时,也是一个重要的工业城市(现有冶金、采矿、机械加工、电力、纺织、有色金属等 35 个工业门类)。工业园区位于宝鸡市东北部,园区的主要工业活动有铅锌冶炼、焦化(30 万吨铅锌冶炼和 70 万吨焦化项目)和燃煤发电(装机容量 120 万千瓦,年发电能力 80 亿千瓦时),企业的周边为村庄和农田。2009 年工业园区周边村庄出现儿童血铅超标。

1.2 样品的采集与分析

在实际调研的基础上,选择晴朗的天气(最少持续一周),在工业园区的铅锌冶炼厂和电厂周边的路边、居民房屋等建筑物顶部用塑料刷子和塑料簸箕清扫灰尘样品,每个点清扫 3~5 处后混合组成一个混合样品,共采集了 38 个灰尘样品(电厂周边 18 个,铅锌冶炼厂周边 20 个),每个样品重约 500 g,然后密封在自封的聚乙烯塑料样品袋中。

将采集好的灰尘样品带回实验室,使其在通风、避光、室温的条件下使其自然风干 1~2 周,过 1mm 尼龙筛,去除沙砾、烟头、树叶、植物根茎等外来杂质。然后将灰尘样品分成两份,一份用长春光学精密机械与物理研究所研制的 ZM-1 型振动研磨 10 s(确保粒径小于 0.075 mm),保存在自封的聚乙烯塑料样品袋中进行灰尘重金属元素含量和形态分析;另一份没有研磨的灰尘样品也保存在自封的聚乙烯塑料样品袋中进行灰尘理化性质分析。

利用 PW2403 型 X-Ray 荧光光谱仪(荷兰帕纳科,原飞利浦仪器公司)分析灰尘中 Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb 和 Zn 的含量。采用 HCl—HNO₃ 混合溶液消化,利用 AFS-810 型双道原子荧光分光光度计(北京吉天仪器有限公司)分析了灰尘中 As 和 Hg 的含量^[17]。同时,利用欧共体修正 BCR 连续提取技术,借助 TAS-990 型原子吸收分光光度计分析了灰尘重金属形态特征^[18]。

1.3 生态风险评价

潜在生态风险指数是瑞典学者 Hakanson^[19]应用沉积学原理建立的一套评价重金属污染以及生态风险性的方法,被广泛应用于灰尘、土壤及沉积物重金属污染的评价。其计算公式为:

(1) 重金属元素污染程度 C_d :

$$C_d = \sum C_f = \sum C_i / C_n^i \quad (1)$$

式中: C_f ——重金属元素 i 的污染系数; C_i ——重金属元素 i 的实测浓度; C_n^i ——重金属元素 i 的评价参比值,一般采用工业化以前的沉积物中元素最高背景值(表 1),也有学者采用当地土壤元素背景值。

表 1 重金属元素背景参考值和毒性系数

元素	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn
$C_n^i / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.25	1	15	50	70	90	175
T_r^i	40	30	10	5	5	2	1

注: C_n^i 参比值, T_r^i 为毒性响应系数。

(2) 重金属元素潜在生态风险指数 E_{RI} :

$$E_{RI} = \sum E_r^i = \sum T_r^i \cdot C_f = \sum T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i} \quad (2)$$

式中: E_r^i ——重金属元素 i 的潜在生态风险指数; T_r^i ——重金属元素 i 的毒性响应系数,反映重金属元素的毒性水平以及生物对重金属污染的敏感程度(表 1)。重金属元素污染程度和潜在生态风险程度的分级详见表 2。本研究选取有害元素 Cu, Pb, Zn, Cr, As 和 Hg,并以陕西省土壤元素背景值为评价参比,进行污染和潜在生态风险评价。

2 结果与讨论

2.1 灰尘重金属含量

表 3 为宝鸡市某工业园区灰尘重金属的含量。由表 3 可知,宝鸡市某工业园区灰尘中 As, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb 和 Zn 的平均含量分别为 23.3, 16.4, 1 591.8, 178.2, 0.243, 346.5, 40.2, 1 586.2 和 1 918.8 mg/kg,分别是陕西省土壤背景值的 2.1, 1.5, 25.5, 8.3, 8.1, 0.6, 1.4, 74.1 和 27.6 倍,为中国土壤背景值的 2.1, 1.3, 26.1, 7.9, 3.7, 0.6, 1.5,

61.0 和 25.9 倍, Cr, Cu, Hg, Pb 和 Zn 在灰尘中累积比较明显。与宝鸡市街道灰尘重金属含量比较发现^[17-18], As, Hg, Mn 和 Ni 低于宝鸡市街道灰尘的含量, Co 与宝鸡市街道灰尘的含量相当, 但 Cr, Cu, Pb 和 Zn 远高于宝鸡市街道灰尘的含量。与葫芦岛市锌冶炼区灰尘重金属含量相比^[15-16], Cu 与葫芦岛市锌冶炼区街道灰尘中含量水平相当, Hg 和 Zn 略低于葫芦岛市街道灰尘中的含量水平, Pb 远高于葫芦岛市锌冶炼区街道灰尘中的含量水平。从标准偏差

和变异系数看, As, Cr, Cu, Hg, Pb 和 Zn 的标准偏差和变异系数较大, 说明受当地人类活动(铅锌冶炼、焦化和发电)影响明显。同时, 由表 3 可以看出, 宝鸡市某工业园区铅锌冶炼厂周边灰尘 As, Cu, Hg, Pb 和 Zn 的含量明显高于其在电厂周边灰尘中的含量(分别为 2.0, 6.0, 3.3, 9.3 和 6.0 倍), 其他重金属含量在铅锌冶炼厂和电厂周边灰尘中的含量基本一致(但 Cr 在铅锌冶炼厂和电厂周边灰尘中的含量远高于土壤背景值)。

表 2 潜在生态风险指数法的分级

污染系数 C_f	单因子污染物污染程度	污染程度 C_d	总体污染程度	单元素潜在生态风险指数 E_r^i	单因子污染物生态危害程度	总的潜在生态风险指数 E_{RI}	总的潜在生态风险程度
<1	低	<8	低	<40	低	<150	低
1~3	中等	8~16	中等	40~80	中等	150~300	中等
3~6	重	16~32	重	80~160	较重	300~600	重
≥6	严重	≥32	严重	160~320	重	≥600	严重
				≥320	严重		

表 3 宝鸡市某工业园区灰尘重金属含量

项目	As	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	mg/kg
工业园区	最小值	4.2	10.4	195.3	29.4	0.008	106.8	21.0	59.8	142.0
	最大值	60.9	24.1	10 013.6	3 008.7	1.114	517.9	94.7	14 778.5	10 424.9
	平均值	23.3	16.4	1591.8	178.2	0.243	346.5	40.2	1 586.2	1 918.8
	标准偏差	13.16	3.31	2 087.08	483.12	0.27	137.26	15.63	2 650.34	2 262.58
	变异系数	0.56	0.20	1.31	2.71	1.12	0.40	0.39	1.67	1.18
	偏度	0.962	0.610	2.784	5.733	1.922	-0.414	2.088	3.640	1.971
	峰度	0.488	0.176	8.289	34.205	3.074	-1.238	5.104	16.544	4.345
电厂周边	最小值	4.2	10.4	195.3	29.4	0.041	106.8	27.5	59.8	142.0
	最大值	31.2	23.5	10 013.6	89.3	0.222	517.9	56.1	854.4	1336.8
	平均值	15.3	15.1	1703.2	49.0	0.109	353.1	35.7	295.3	530.9
	标准偏差	6.28	3.42	2497.52	16.93	0.05	159.32	7.87	194.41	315.12
	变异系数	0.41	0.23	1.47	0.35	0.47	0.45	0.22	0.66	0.59
	偏度	0.620	1.098	2.545	1.535	0.930	-0.477	1.260	1.501	1.268
	峰度	1.376	0.754	7.136	2.019	0.268	-1.609	1.155	3.013	1.567
铅锌冶炼厂周边	最小值	9.6	13.1	416.2	32.3	0.008	106.8	21.0	180.8	355.8
	最大值	60.9	24.1	7 913.9	3 008.7	1.114	494.1	94.7	14 778.5	10 424.9
	平均值	30.5	17.7	1 491.5	294.5	0.364	340.5	44.3	2 748.0	3 167.9
	标准偏差	13.67	2.74	1 696.83	651.32	0.33	117.91	19.58	3 262.76	2 532.38
	变异系数	0.45	0.16	1.14	2.21	0.91	0.35	0.44	1.19	0.80
	偏度	0.361	1.140	3.220	4.203	1.014	-0.437	1.525	2.829	1.294
	峰度	-0.278	1.386	11.566	18.259	0.034	-0.738	2.160	9.975	2.084
陕西土壤背景值 ^[20]	11.1	10.6	62.5	21.4	0.030	557	28.8	21.4	69.4	
中国土壤背景值 ^[20]	11.2	12.7	61.0	22.6	0.065	583	26.9	26.0	74.2	

2.2 灰尘重金属形态

图 1 为宝鸡市某工业园区灰尘重金属形态分析的结果。由图 1 可知, 宝鸡市某工业园区灰尘中 Cu 主要以残渣态(45.16%)和可氧化态(28.04%)的形式存在, Pb 主要以可还原态(58.44%)的形式存在, Zn 主要以乙酸可提取态(52.25%)的形式存在, Mn

和 Co 主要以乙酸可提取态(乙酸可提取态分别为 26.77% 和 33.70%)和残渣态(残渣态分别为 40.07% 和 37.65%)存在, Ni 和 Cr 主要以残渣态存在(残渣态分别为 67.08% 和 83.36%)。弱酸性条件下 Zn 最容易迁移, 还原条件下 Pb 最容易迁移, 氧化条件下 Cu 容易迁移。在 BCR 形态分析中, 残渣态是

“稳定态”,比例越高,可迁移部分、生物可利用部分越少,对生态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,对生态环境影响也就越大。灰尘中各重金属元素“非稳定态” $Pb(84.35\%) > Zn(77.97\%) > Co(62.35\%) > Mn(59.93\%) > Cu(54.84\%) > Ni(32.92\%) > Cr(16.64\%)$,可见,灰尘中 Pb, Zn, Co, Mn 和 Cu 有 55%~85% 以上可以发生迁移,易被生物利用,危害较大。

2.3 灰尘重金属生态风险

表 4 为以陕西省土壤元素背景值为参比,对宝鸡

市某工业园区灰尘重金属进行的污染及潜在生态风险评价结果。

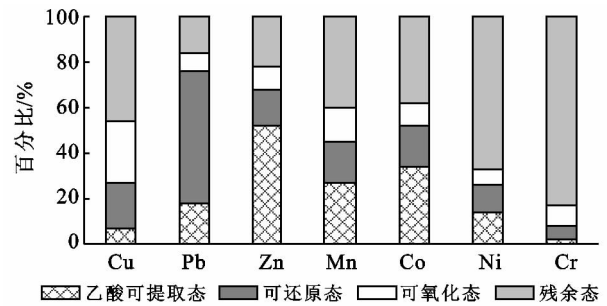


图 1 宝鸡市某工业园区灰尘重金属形态

表 4 宝鸡市某工业园区灰尘重金属潜在生态风险指数

工业园区	As	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn	C_d/E_{RI}	
C_f^i	最小值	0.377	3.125	1.374	0.258	2.794	2.046	9.975
	最大值	5.489	160.218	140.593	37.133	690.584	150.215	1 184.232
	平均值	2.099	25.469	8.329	8.105	74.119	27.649	145.771
E_{RI}^i	最小值	3.775	6.250	6.869	10.333	13.972	2.046	43.245
	最大值	54.885	320.435	702.967	1 485.333	3 452.921	150.215	6 166.756
	平均值	20.993	50.938	41.645	324.219	370.597	27.649	836.040
电厂周边	As	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn	C_d/E_{RI}	
C_f^j	最小值	0.377	3.125	1.374	1.358	2.794	2.046	11.075
	最大值	2.809	160.218	4.173	7.383	39.925	19.262	233.771
	平均值	1.379	27.251	2.292	3.632	13.798	7.650	56.002
E_{RI}^j	最小值	3.775	6.250	6.869	54.333	13.972	2.046	87.245
	最大值	28.092	320.435	20.864	295.333	199.626	19.262	883.614
	平均值	13.791	54.503	11.458	145.278	68.989	7.650	301.668
铅锌冶炼厂周边	As	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn	C_d/E_{RI}	
C_f^k	最小值	0.867	6.659	1.509	0.258	8.449	5.127	22.869
	最大值	5.489	126.622	140.593	37.133	690.584	150.215	1 150.637
	平均值	2.747	23.865	13.763	12.132	128.409	45.647	226.563
E_{RI}^k	最小值	8.671	13.318	7.547	10.333	42.243	5.127	87.239
	最大值	54.885	253.245	702.967	1 485.333	3 452.921	150.215	6 099.566
	平均值	27.475	47.729	68.813	485.267	642.044	45.647	1 316.976

注: C_f^i 表示污染系数; E_{RI}^i 表示潜在生态风险系数。

由表 4 可知,宝鸡市某工业园区灰尘重金属的污染指数 (C_d) 和潜在生态风险指数 (E_{RI}) 分别为 145.771 和 836.040,灰尘重金属污染程度和潜在生态风险程度达到严重水平。

从单个重金属的污染系数 (C_f^i) 和潜在生态风险系数 (E_{RI}^i) 来看,As 处于中等污染水平和低潜在生态危害;Cr, Cu, Hg, Pb 和 Zn 达到严重污染水平, Cr, Cu 和 Zn 属于中等潜在生态危害,而 Hg 和 Pb 的潜在生态危害达到严重水平。同时,由表 4 可以看出,无论是从重金属的污染指数 (C_d) 和潜在生态风险指

数 (E_{RI}) 看还是从单个重金属的污染系数 (C_f^i) 和潜在生态风险系数 (E_{RI}^i) 看, Cu, Hg, Pb 和 Zn 的污染水平及潜在生态危害程度均表现为铅锌冶炼厂周边灰尘高于电厂周边灰尘;As 的污染水平和潜在生态危害程度在电厂周边灰尘和铅锌冶炼厂周边灰尘基本一致;Cr 在电厂周边灰尘和铅锌冶炼厂周边灰尘的污染水平和潜在生态危害程度均达到严重污染水平和中等潜在生态危害,在电厂周边局部区域灰尘的潜在生态危害高于铅锌冶炼厂周边灰尘的潜在生态危害。

3 结论

(1) 宝鸡市某工业园区灰尘中 As, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb 和 Zn 的平均含量分别为 23.3, 16.4, 1591.8, 178.2, 0.243, 346.5, 40.2, 1586.2 和 1918.8 mg/kg, 其中, Cr, Cu, Hg, Pb 和 Zn 累积比较明显。铅锌冶炼厂周边灰尘中 As, Cu, Hg, Pb 和 Zn 的含量高于其在电厂周边灰尘中的含量。

(2) 宝鸡市某工业园区灰尘中 Cu 主要以残渣态和可氧化态的形式存在, Pb 主要以可还原态的形式存在, Zn 主要以乙酸可提取态的形式存在, Mn 和 Co 主要以乙酸可提取态和残渣态存在, Ni 和 Cr 主要以残渣态存在。灰尘中 Pb, Zn, Co, Mn 和 Cu 有 55%~85% 以上可以发生迁移, 易被生物利用, 危害较大。

(3) 潜在生态风险评价表明, 宝鸡市某工业园区灰尘重金属的污染程度和潜在生态风险均达到严重水平, 工业园区铅锌冶炼厂周边灰尘重金属的污染程度和潜在生态风险高于电厂周边灰尘。

[参 考 文 献]

- [1] 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(1/3):176-186.
- [2] Stigliani W M, Doelman P, Salomons W, et al. Chemical time bombs-predicting the unpredictable[J]. *Environment*, 1991, 33(4):4-30.
- [3] Apeagyei E, Bank M S, Spengler J D. Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(13): 2310-2323.
- [4] 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, 15(3/4): 257-263.
- [5] Al-khashman. Determination of metal accumulation in deposited street dusts in Amman, Jordan [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2007, 29(1): 1-10.
- [6] Duong T T T, Lee B K. Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3):554-562.
- [7] Wei Binggan, Jiang Fengqing, Li Xuemei, 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.
- [8] Shi Guitao, Chen Zhenlou, Bi Chunjuan, et al. A Comparative study of health risk of potential toxic metals in urban and suburban road dust in the most populated city of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(3): 764-771.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Hu Xin, Zhang Yun, Jun Luo, et al. Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a mega-city, Nanjing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(5): 1215-1221.
- [13] Duong T T T, Lee B K. Partitioning and mobility behavior of metals in road dusts from national-scale industrial areas in Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(22/23):3502-3509.
- [14] Tokalioglu S, Kartal S. 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.
- [15] Zheng Na, Liu Jingshuang, Wang Qichao, et al. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(4):726-733.
- [16] Zheng Na, Liu Jinshuang, Wang Qichao, et al. Heavy metals exposure of children from stairway and sidewalk dust in the smelting district, northeast of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(27): 3239-3245.
- [17] 王利军, 卢新卫, 雷凯. 宝鸡市街尘中 As 和 Hg 含量及其环境风险评价[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(5): 35-38.
- [18] 王利军, 卢新卫, 雷凯, 等. 宝鸡市街尘重金属元素含量、来源及形态特征[J]. *环境科学*, 2011, 32(8): 2470-2476.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment logical approach[J]. *Water Research*, 1980, 14: 975-1001.
- [20] 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.