

蚌埠市地表灰尘重金属污染特征及潜在生态风险

朱兰保, 盛蒂, 戚晓明, 赵晓芳

(蚌埠学院 化学与环境工程系, 安徽 蚌埠 233030)

摘要: 调查了安徽省蚌埠市文教区、居民区、商业区、公园绿地区、工业区、交通区 6 个功能区的地表灰尘中重金属 Zn, Cu, Pb, Cd, Mn 的含量, 并采用地累积指数法和 Hakanson 潜在生态危害指数法评价了重金属污染程度及潜在生态风险。结果表明, 蚌埠市地表灰尘中 Zn, Cu, Pb, Cd 和 Mn 平均含量依次为: 254.29, 85.64, 72.39, 2.31 和 535.86 mg/kg, 均高于安徽省土壤环境背景值。地累积指数法评价结果显示, Cd 元素为偏重污染; Zn 和 Cu 为偏中度污染; Pb 为轻度污染; Mn 处于清洁水平。所研究的 6 个功能区均属于偏中度污染。潜在生态危害指数法评价结果表明, Cd 元素污染最严重, 在所有采样点均超出强生态危害水平, 其他 4 种重金属元素均属于轻微生态危害。交通区、商业区、居民区和工业区属于很强生态危害程度, 文教区和公园绿地区处于强生态危害水平。在去除重金属 Cd 以后, 各功能区均表现为轻微生态危害水平。总之, 蚌埠市地表灰尘重金属的生态环境较好, 但存在 Cd 元素的极强潜在生态危害。

关键词: 地表灰尘; 重金属; 地累积指数; 潜在生态风险; 蚌埠市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0242-05

中图分类号: X821

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.048

Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk in Surface Dusts of Bengbu City

ZHU Lan-bao, SHENG Di, QI Xiao-ming, ZHAO Xiao-fang

(Department of Chemistry and Environmental Engineering, Bengbu College, Bengbu, Anhui 233030, China)

Abstract: The concentrations of heavy metals (Zn, Cu, Pb, Cd and Mn) are investigated in surface dusts of Bengbu City, Anhui Province. The geo-accumulation index and the Hakanson potential ecological risk index are employed to evaluate the pollution degree of heavy metals in the surface dusts and the level of potential ecological risks. Results show that the average contents of Zn, Cu, Pb, Cd and Mn in the surface dusts are 254.29, 85.64, 72.39, 2.31 and 535.86 mg/kg, respectively. The concentrations of the heavy metals are higher than their soil background values in Anhui Province. The evaluation results of geo-accumulation indicate that Cd is of partial heavy pollution, Zn and Cu are of partial mild pollution, Pb is of light pollution, and Mn is in clean level. All functional areas are in partial moderate pollution. Assessment results of the potential ecological risks indicate that Cd pollution is the most serious, beyond the strong ecological risk level in all sampling points. The other four heavy metals are in slight ecological risk. The sampling points in traffic, business, residential and industrial districts belong to very strong ecological risk degree and other sampling points are in strong ecological risk. After the removal of heavy metal Cd, various functional areas are in slight ecological risk. In general, the situation of surface dusts of Bengbu City is in a good ecological environment. However there is the very strong potential ecological risk for Cd.

Keywords: surface dust; heavy metal; index of geo-accumulation; potential ecological risk; Bengbu City

地表灰尘主要是指附着、淀积于人工铺地(道路、桥面、街道、广场)及地面附着物、建筑物的裸露面上, 未被固化黏结, 且易于被地表径流、雨水及大气带动、迁移和飘浮的粒径小于 20 目(<0.840 mm)的固体

颗粒物^[1]。由于人类活动的影响, 地表灰尘中累积了大量有毒有害物质, 如重金属、多环芳烃、多氯联苯等^[2-3]。重金属元素的难降解性和持久性, 使其成为危害环境系统和人类健康的重要环境污染物之一^[4]。

收稿日期: 2013-11-12

修回日期: 2013-12-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于遥感和 GIS 的城市景观格局演变与水文效应关系研究”(41001292); 蚌埠学院优秀人才计划项目〔(2012)40 号〕

作者简介: 朱兰保(1979—), 男(汉族), 安徽省灵璧县人, 硕士, 讲师, 主要从事环境质量与安全方向研究。E-mail: zhulanbao@139.com。

随着人们对城市环境质量及身体健康关注度的提高,地表灰尘重金属污染逐渐成为国内外研究的热点问题。相关研究人员对城市地表灰尘重金属污染物的含量、来源、健康风险及其环境效应进行了较为广泛的研究^[5-6],暴露风险评价^[7]、潜在生态危害评价^[8]、内梅罗综合污染指数评价^[9]、地累积指数评价^[10]等都得到了普遍的应用,对于城市地表灰尘中重金属的分布特征、赋存形态、粒径效应以及来源和影响因素的研究^[11-12]也取得了一定的进展。国内外的研究结果表明,交通、工业以及城市建设等人类活动对城市灰尘中重金属的含量影响很大,灰尘中的重金属可通过呼吸、吞食和皮肤接触等途径进入人体,对人体特别是儿童健康造成危害。儿童血铅含量高对其智力、感觉系统发育和学习成绩的影响存在“剂量—效应”关系^[13]。其他重金属元素如 Zn, Cu, Cd 等,过度暴露同样会阻碍儿童和成人对事物的认知、导致轻度痴呆等中枢神经系统紊乱等症状。相比国外而言,中国对城市地表灰尘重金属的研究起步较晚,且大部分的研究都针对上海、北京、沈阳、重庆等大城市,而关于蚌埠地区的研究还是空白。本文分析了蚌埠市地表灰尘中 Zn, Cu, Pb, Cd 和 Mn 等 5 种重金属元素的含量水平和分布特征,并用地累积指数法和潜在生态危害指数法对其污染状况和潜在生态危害程度进行了评价,为从源头上有效控制城市径流污染具有指导性意义,也为当地居民健康防护、生态城市建设规划与环境管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

蚌埠市位于安徽省北部,辖 6 区 3 县,是皖北中心城市。市区位于北纬 33°01′—32°49′和东经 117°31′—117°11′,占地面积 610.55 km²,2012 年全市常住人口 110.2 万人。属亚热带季风气候和温带季风气候的交界地带,雨量充沛,四季分明。蚌埠市是安徽省重要的综合性工业基地,拥有机械、化工、医药、电子、建材等行业齐备的工业体系。

1.2 样品采集与预处理

2012 年 10 月,分别在蚌埠市区的文教区、居民区、商业区、公园绿地区、工业区、交通区 6 个功能区,每个功能区布设 3~5 个采样站点,每个采样站点采集 3 个平行样品,每个样品 50 g 左右,并充分混合代表该站点样品,共计采集了 21 个地表灰尘样品。采样时,天气晴朗保持在 1 周以上,用聚乙烯细毛刷和塑料铲子清扫收集地面灰尘样品,将所采集的样品装入聚乙烯塑料自封袋中密封保存,在自封袋上记下采

样时间、地点标号,并记录周围的环境状况。将所采集的样品带回实验室,摊平在干净的塑料薄膜上,置于阴凉处、室温自然风干,样品风干后用玛瑙研钵研磨,过 100 目尼龙筛,备用。

1.3 样品分析与质量控制

样品经 HNO₃—HF—HClO₄ 消解^[14]处理后,采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP—AES)测定其 Zn, Cu, Pb, Cd, Mn 的质量浓度。重金属含量测定均由空白样和加标回收样进行质量控制,随机抽取 3 份样品进行高、中、低含量的加标回收试验,加标回收率均在 90%~106%;随机抽取 3 份样品分别进行 6 份平行样的测定,其相对标准偏差均 < 5%。实验所使用的试剂均为优级纯,用水均为超纯水,所用的器皿均在 10% 的硝酸中浸泡 24 h 以上。

1.4 地累积指数重金属污染评价方法

采用地累积指数(I_{geo})法^[15]对蚌埠市地表灰尘重金属污染程度进行评价。地累积指数是德国海德堡大学沉积物研究所的 Muller 提出的一种研究水环境沉积物中重金属污染的指标,目前也应用于城市地表灰尘重金属污染的研究^[10]。 I_{geo} 的计算式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)] \quad (1)$$

式中: C_n ——样品重金属含量实测值(mg/kg); B_n ——元素背景值(mg/kg),本研究选择安徽省土壤环境背景值^[16]作为参比值; k ——修正系数(取值为 1.5),以考虑成岩作用可能会引起背景值的变动。地累积指数与重金属污染程度分级的关系见参考文献^[10]。

1.5 潜在生态危害指数评价方法

潜在生态危害指数(RI)^[17]评价方法是瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年建立的一套应用沉积学原理评价重金属污染及生态危害的方法。该方法的优势在于从重金属的生物毒性角度出发,能够反映多种污染物的综合影响,并以定量的方式划分出潜在生态危害程度。计算方法如下:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad (2)$$

式中: C_f^i ——单个重金属污染指数; C_s^i ——灰尘中重金属含量实测值(mg/kg); C_n^i ——计算所需的参比值(mg/kg),本研究选择安徽省土壤环境背景值作为参比值。

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (3)$$

式中: E_r^i ——单个重金属的潜在生态危害指数; T_r^i ——重金属元素的毒性系数,根据 Hakanson 提出的重金属元素毒性系数,再按照其制定的标准化 RI 重金属元素毒性系数为评价依据,对毒性系数作规范处理后,Cd, Pb, Cu, Zn, Mn 的毒性系数分别取值为 30, 5, 5, 1, 1^[18]; C_f^i ——单个重金属污染指数。

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^i \quad (4)$$

式中:RI——多种重金属综合潜在生态危害指数;
 E_i^i ——单个重金属的潜在生态危害指数; n ——重金属的种类。重金属污染的生态危害指数分级标准见文献[17]。

2 结果与讨论

2.1 地表灰尘中不同重金属元素含量分析

从表 1 可知,蚌埠市地表灰尘中 Zn,Cu,Pb,Cd,Mn 这 5 种重金属含量的平均值分别为 254.29, 85.64,72.39,2.31 和 535.86 mg/kg。与安徽省土壤元素背景值相比,蚌埠市地表灰尘中 5 种重金属

元素平均含量均超出背景值,Cd 平均含量是背景值的 23.8 倍;Cu 为背景值的 4.2 倍;Zn 为背景值的 4.1 倍;Pb 为背景值的 2.7 倍;Mn 与背景值相当。从样品的重金属含量超标率来看,除 Mn 元素的超标率为 66.67% 以外,其他 4 种重金属元素超标率均为 100%,表明蚌埠市地表灰尘重金属污染已相当严重。

通过计算变异系数^[19]可知,蚌埠市地表灰尘中重金属 Pb,Cd,Cu,Mn,Zn 元素的变异系数依次为:43.47%,38.98%,30.15%,20.27%,19.05%,Pb,Cd,Cu 属于强变异,Mn,Zn 为中等变异。说明蚌埠市地表灰尘中重金属含量的空间分布差异较大,来源受外界干扰明显。

表 1 蚌埠市地表灰尘重金属含量范围和平均值

污染元素	含量/ (mg · kg ⁻¹)	平均值/ (mg · kg ⁻¹)	变异系数/%	超标率/%	安徽省土壤背景值/ (mg · kg ⁻¹)
Zn	176.14~370.50	254.29	19.05	100.00	62.000
Cu	43.10~143.87	85.64	30.15	100.00	20.400
Pb	37.25~173.71	72.39	43.47	100.00	26.600
Cd	0.37~4.06	2.31	38.98	100.00	0.097
Mn	321.72~695.16	535.86	20.27	66.67	530.000

2.2 蚌埠市地表灰尘重金属相关性分析

地表灰尘中的重金属主要来源于土壤母质、大气沉降等自然源,汽车尾气、轮胎磨损及工业排污等人为源。灰尘又极易被扬起,所以其分布与它的扩散源关系密切。研究城市灰尘中重金属含量的相关性,有利于推测其来源是否相同。一般情况下,如果重金属含量有显著的相关性,那么它们出自同一污染源的可能性较大,否则来源可能不止一个。在自然环境中,单个重金属污染虽有发生,但更多的是几种金属元素的复合污染。为探讨蚌埠市地表灰尘中重金属的主要来源,利用 SPSS 16.0 软件对灰尘中各重金属含量作了 Pearson 相关系数分析,结果如表 2 所示。

表 2 蚌埠市重金属含量之间的相关性

元素	Zn	Cu	Pb	Cd	Mn
Zn	1				
Cu	0.659**	1			
Pb	0.728**	0.391*	1		
Cd	-0.030	0.330	-0.068	1	
Mn	0.287	0.379*	-0.024	0.430*	1

注:*表示在 $p < 0.05$ 水平显著; **表示在 $p < 0.01$ 水平显著。

由表 2 可知,Zn 和 Pb,Zn 和 Cu 的相关系数分别为 0.728 和 0.659,它们之间存在极显著的相关性,

而且 Cu,Zn,Pb 三者在地表灰尘中的含量均超出安徽省土壤环境背景值,分别为背景值的 4.2,4.1,2.7 倍,表现出较高的一致性,说明它们三者来自相同污染源的较大;Cu 和 Pb,Cu 和 Mn,Cd 和 Mn 之间相关性较强,说明它们有着相似的污染来源;Cd 除与 Mn 相关外,与其他 3 种重金属元素的相关性均不明显,而且 Cd 含量为安徽省土壤环境背景值的 23.8 倍,说明蚌埠市地表灰尘中 Cd 的来源有一定的独特性。

2.3 蚌埠市重金属地积累指数污染评价

蚌埠市各功能区地表灰尘中重金属元素的地质累积指数见表 3。根据地累积指数与污染程度分级关系,从各重金属元素的 I_{geo} 平均值来看,地表灰尘中重金属元素存在不同程度的污染。Cd 元素的地累积指数最大,平均值为 3.85,为偏重污染,其中 Cd 在交通区为重污染;Zn 和 Cu 次之,地累积指数平均值分别为 1.46 和 1.45,均为偏中度污染,其中 Cu 在公园绿地为轻度污染;再次是 Pb 元素,地累积指数平均值为 0.87,属于轻度污染,其中 Pb 在工业区为偏中度污染;Mn 元素的地累积指数最小,平均值为负 0.59,在所有功能区 I_{geo} 值都小于 0,没有引起污染,处于清洁水平。

从各功能区的 I_{geo} 平均值来看,本文所研究的 6

个功能区均属于偏中度污染,但地累积指数从大到小依次为:工业区>商业区>交通区>文教区>居民区 > 公园绿地;工业区、商业区和交通区污染程度相对较为严重,文教区和居民区居中,公园绿地相对较轻。

表 3 蚌埠市地表灰尘中重金属的地累积指数 I_{geo}

污染元素	地累积指数 I_{geo}						平均值	污染程度
	文教区	居民区	商业区	公园绿地	工业区	交通区		
Zn	1.56	1.28	1.64	1.19	1.74	1.33	1.46	偏中度污染
Cu	1.35	1.16	1.85	0.88	1.91	1.54	1.45	偏中度污染
Pb	0.95	0.54	0.87	0.79	1.53	0.51	0.87	轻度污染
Cd	3.52	3.96	3.92	3.25	3.86	4.57	3.85	偏重污染
Mn	-0.58	-0.60	-0.46	-0.94	-0.45	-0.49	-0.59	清洁
平均值	1.36	1.27	1.56	1.03	1.72	1.49		
污染程度	偏中度污染	偏中度污染	偏中度污染	偏中度污染	偏中度污染	偏中度污染		

2.4 蚌埠市重金属潜在生态危害评价

2.4.1 潜在生态危害水平 根据公式(2)~(4),计算出蚌埠市地表灰尘在所有采样点中单个重金属的潜在生态危害指数(E_i^p)及 5 种重金属的综合潜在生态危害指数(RI)(见表 4)。

表 4 蚌埠市地表灰尘重金属潜在生态风险程度

项目	潜在生态危害指数 E_i^p					RI
	Zn	Cu	Pb	Cd	Mn	
最小值	2.84	10.56	7.00	114.43	0.61	135.44
最大值	5.98	35.26	32.65	1 255.67	1.31	1 330.87
平均值	4.10	20.99	13.61	714.43	1.01	754.14

从表 4 可知,蚌埠市地表灰尘中单个重金属在研究区域上的潜在生态危害指数(E_i^p)大小顺序为: Cd

(714.43)>Cu(20.99)>Pb(13.61)>Zn(4.10)>Mn(1.01)。Cd 元素的潜在危害指数(E_i^p)最高,平均值高达 714.43,而且其在所有采样点均超出强生态危害水平,这与 Cd 污染较重以及 Cd 的毒性系数较大有关。重金属 Zn,Cu,Pb,Mn 单一污染程度较低,在所有采样点均属于轻微生态危害。5 种重金属的综合潜在生态危害指数(RI)平均值为 754.14,表明蚌埠市地表灰尘处于很强生态危害水平。

2.4.2 重金属潜在生态危害空间分布 为了解蚌埠市地表灰尘重金属污染程度的空间分布情况,根据不同功能区地表灰尘各重金属的平均潜在生态危害指数,结果如表 5 所示。

表 5 蚌埠市不同功能区地表灰尘各重金属的平均潜在生态危害指数

功能区	平均潜在生态危害指数 E_i^p					RI	生态风险等级
	Zn	Cu	Pb	Cd	Mn		
文教区	4.43	19.12	14.47	516.49	1.01	555.52	Ⅲ级
居民区	3.65	16.71	10.94	698.97	0.99	731.26	Ⅳ级
商业区	4.69	27.12	13.68	685.51	1.09	732.09	Ⅳ级
公园绿地	3.42	13.76	13.00	426.80	0.78	457.76	Ⅲ级
工业区	5.02	28.24	21.68	655.67	1.10	711.71	Ⅳ级
交通区	3.77	21.85	10.70	1 070.10	1.07	1 107.49	Ⅳ级

从表 5 可以看出,蚌埠市不同功能区的 5 种重金属综合潜在生态危害指数(RI)值依次为:交通区(1 107.49)>商业区(732.09)>居民区(731.26)>工业区(711.71)>文教区(555.52)>公园绿地(457.76)。对比评价标准可知,交通区、商业区、居民区和工业区属于很强生态危害程度,文教区和公园绿地处于强生态危害水平。对不同功能区中各种重金属含量分析可知,文教区中安徽财大西校地表灰尘中各种重金属含量最高,蚌埠医学院灰尘各重金属含量均比安徽财经大学东校区高。这与安徽财经大学

西校区地处蚌埠市老城区,人口和机动车流动量大有关;蚌埠医学院和安徽财大东校虽然都位于蚌埠市大学城新区,但蚌埠医学院紧邻蚌埠火车站,各种污染因子出现的几率相对较高。居民区中和顺家园地表灰尘中重金属含量均比其他居民区大,这与它的地理位置有很大的关系,和顺家园小区处于商业地段,而且在所调查的小区当中是建成时间最早、居住人口最多的小区,导致重金属富集明显。商业区中宝龙广场地表灰尘重金属含量除 Cd,Mn 外,Zn,Cu,Pb 含量明显低于百货大楼和光彩大市场,可能是与这 3 个

商业街中宝龙广场位于新城区、建成时间最短,人口流动量较小,而百货大楼位于老城区,光彩大市场人口、机动车流动量大有关。公园绿地中南山儿童公园中重金属 Zn, Cu, Pb 含量高于其他公园, Cd, Mn 的含量介于张公山公园和龙子湖公园之间。工业区地表灰尘中 Zn, Pb 最高含量出现在电力总公司, Cu, Cd, Mn 最高含量出现在晶菱机床有限公司, 丰原集团除 Mn 外, 其他各重金属含量最低。交通区地表灰尘中 Zn, Pb 最高含量在胜利路, Cu, Cd 最高含量在涂山路, Mn 在胜利路和涂山路中富集最多。另外, 在去除重金属 Cd 以后, 本文所研究的 6 个功能区均表现为轻微生态危害水平。究其原因, 这主要是由于蚌埠市地表灰尘中 Cd 含量严重超标所致。总体上来说, 蚌埠市地表灰尘重金属的生态环境较好, 但存在 Cd 元素的极强潜在生态危害。

3 结论

(1) 蚌埠市地表灰尘中 Zn, Cu, Pb, Cd, Mn 的平均含量分别是 254.29, 85.64, 72.39, 2.31, 535.86 mg/kg, 均超出安徽省土壤背景值。在所有采样点中除 Mn 元素的超标率为 66.67% 外, 其他 4 种重金属元素超标率均为 100%。

(2) 地累积指数法评价结果显示, Cd 元素为偏重污染; Zn 和 Cu 均为偏中度污染; Pb 属于轻度污染; Mn 处于清洁水平。所研究的 6 个功能区均属于偏中度污染。

(3) 单个重金属在研究区域上的潜在生态危害指数(E_i^p)大小顺序为: Cd > Cu > Pb > Zn > Mn。Cd 元素污染最严重, 在所有采样点均超出强生态危害水平, 其他 4 种重金属元素均属于轻微生态危害。

(4) 蚌埠市不同功能区地表灰尘 5 种重金属综合潜在生态危害指数(RI)依次为: 交通区 > 商业区 > 居民区 > 工业区 > 文教区 > 公园绿地区。交通区、商业区、居民区和工业区属于很强生态危害程度, 文教区和公园绿地区处于强生态危害水平。在去除重金属 Cd 以后, 6 个功能区均表现为轻微生态危害水平。

(5) 总体上来说, 蚌埠市地表灰尘重金属的生态环境较好, 但存在 Cd 元素的极强潜在生态危害。

[参 考 文 献]

[1] 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.
[2] 陈灿灿, 卢新卫, 王利军, 等. 宝鸡市街道灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 城市环境与城市生态, 2011,

24(2): 53-58.

- [3] 王利军, 卢新卫, 任春辉, 等. 宝鸡市某工业园区灰尘重金属含量、形态及生态风险分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 180-184.
[4] 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.
[5] Caravanos J, Weiss A L, Blaise M J, et al. A survey of spatially distributed exterior dust lead loadings in New York City[J]. Environmental Research, 2006, 100(2): 165-172.
[6] 方凤满, 林跃胜, 王海东, 等. 城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7301-7310.
[7] 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.
[8] 张一修, 王济, 张浩. 贵阳市区地表灰尘重金属污染分析与评价[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 169-174.
[9] 陈青林, 王惠, 杨宝山, 等. 济南市地表灰尘重金属含量及其污染评价[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2013, 27(4): 428-432.
[10] 徐玮, 吕宾, 储金宇, 等. 镇江市老城区不同功能区地表灰尘重金属污染评价[J]. 环境化学, 2012, 31(2): 182-188.
[11] 李崇, 李法云, 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.
[12] 王丽丽, 刘敏, 欧冬妮, 等. 上海城市地表灰尘重金属污染粒级效应与赋存形态研究[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2009(6): 64-70.
[13] 贺敬义, 吴成银, 龙瑞芳, 等. 城乡儿童血铅含量对智力、行为、学习影响及“剂量—效应”关系的研究[J]. 精神医学杂志, 2009, 22(2): 85-88.
[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 147-211.
[15] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118.
[16] 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: 329-497.
[17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
[18] 刘德鸿, 王发园, 周文利, 等. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 253-259.
[19] 韩亚芬, 李琦. 基于模糊数学的宿州市街尘重金属污染评价[J]. 光谱实验室, 2012, 29(4): 2300-2305.