

有色冶金区街道灰尘中 As 和 Pb 的空间分布特征及其生态风险

徐素娟^{1,2}, 郑娜¹, 刘景双^{1*}, 孙崇玉^{1,2}, 王洋¹, 常守志²

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:应用 ArcGIS 地统计学方法研究了葫芦岛市有色冶金区街道灰尘中 As、Pb 的含量水平和空间分布特征, 并采用地积累指数法和潜在生态危害指数法对样品中 As、Pb 的生态风险进行评价。结果表明, 葫芦岛市街道灰尘中 As 和 Pb 的平均含量为 33.10 mg·kg⁻¹、533.2 mg·kg⁻¹, 分别是辽宁省土壤环境背景值的 4 倍、25 倍; As、Pb 分布呈现出以锌厂周围为中心向四周呈辐射状扩散的空间分布格局; 葫芦岛市锌厂附近街道灰尘中 As、Pb 污染严重, 潜在生态危害最高级别分别为很强、极强生态危害, Pb 污染比 As 污染严重。

关键词:砷; 铅; 街道灰尘; 空间分布; 生态风险

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1441-06

Spatial Distribution and Environmental Risk of As and Pb from Street Dust in Non-ferrous Metals Smelting Areas

XU Su-juan^{1,2}, ZHENG Na¹, LIU Jing-shuang¹, SUN Chong-yu^{1,2}, WANG Yang¹, CHANG Shou-zhi²

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: ArcGIS analysis was applied to study the content level and the spatial distribution characteristics of As and Pb in street dust of Huludao city. Geoaccumulation Indexes and Potential Ecological Risk Index technique were applied to assess the ecological risk of As and Pb. The average contents of As and Pb were 33.10 mg·kg⁻¹ and 533.2 mg·kg⁻¹, which was 4 and 25 times as high as the background value respectively. The trends for Pb and As were similar with higher concentrations near Huludao Zinc Plant (HZP). The ecological risk of As and Pb contamination in street dust were serious, and the accumulation of Pb in street dust was higher than the As.

Key words: As; Pb; street dust; spatial distribution; ecological risk

有色冶金区由于其特殊的自然条件和工业发展的需要, 重金属污染尤为突出。国内外对有色冶金区重金属污染进行的一些研究表明, 有色冶金区周围土壤、植物等受到不同程度的重金属污染^[1~4]。目前, 人群对重金属的暴露主要通过饮食、土壤灰尘的接触等不同途径, 大多数学者以饮食为切入点, 一定程度上忽视了灰尘重金属暴露带来的危害。锌矿石中含有大量的铅等重金属元素以及类金属砷, 在锌冶炼的过程中大量的铅、砷吸附在街道灰尘上, 造成污染, 损害人群的健康。葫芦岛市锌厂始建于 1937 年, 是中国最大的锌冶炼厂, 已有很多报道称葫芦岛锌厂周围土壤、水体、植物、动物受到了不同程度的重金属污染^[5~11]。但对葫芦岛地区街道灰尘中 As、Pb 的污染研究鲜有报道。本研究开展葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 的污染分析, 不仅是深刻认识环境污染问题的迫切需求, 而且是保障区域人群健康的长期需求。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

葫芦岛市位于辽宁省西南部(40°56'N, 120°28'E), 属温带大陆性季风气候, 四季分明, 年平均降水量为 590 mm, 年平均气温 9.0℃; 受大气环流的影响, 秋冬季盛行东北风, 夏季盛行西南风; 土壤类型主要为褐土、草甸土。葫芦岛锌厂位于葫芦岛市东南部, 集有色金属冶炼和化工产品生产于一体, 并综合回收其他有价值金属的国家特大型企业。

1.2 样品采集

收稿日期: 2010-05-19; 修订日期: 2010-07-22
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(40803021); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-QN306)
作者简介: 徐素娟(1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态与生物地球化学, E-mail: piaoxuedu@126.com
* 通讯联系人, E-mail: liujingshuang@neigae.ac.cn

本研究采样沿葫芦岛市主要街道进行,针对不同类型地区,选取代表性交通区、商业区、住宅区、文教区等进行采样(如图1)。采样半径为1 m,用塑料刷子和铲子收集灰尘,每个样品大约收集500 g灰

尘,共采集46个样品。样品用自封袋密封带回实验室。将采集的样品放在室内阴凉处自然风干后,过1 mm 不锈钢筛去除杂质和石子等,然后过100 μm 不锈钢筛,装入自封袋中待测。

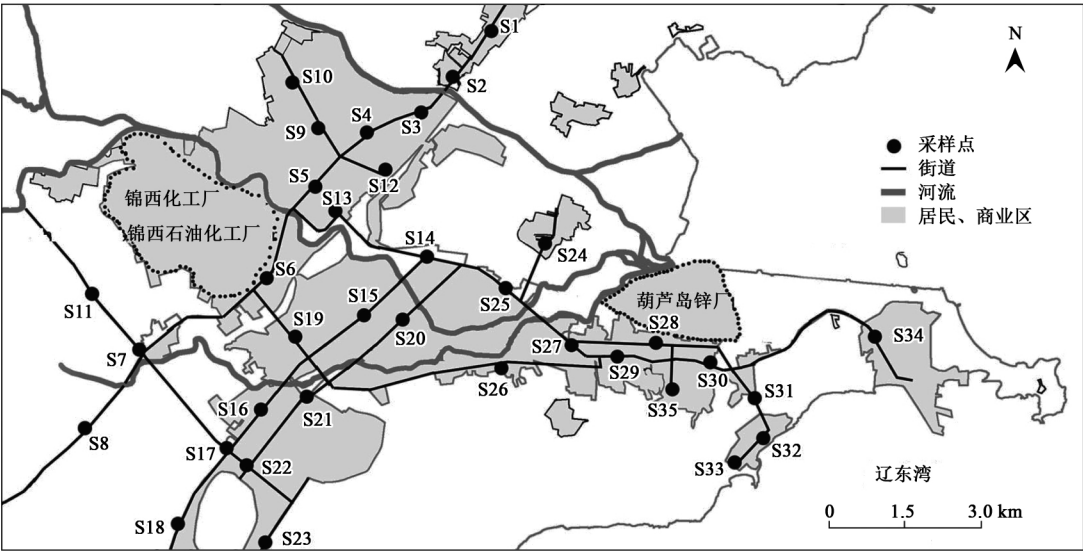


图1 葫芦岛市街道灰尘采样点示意

Fig.1 Sampling sites of street dust in Huludao city

1.3 实验分析

准确称取0.2~0.3 g 灰尘样品,用HNO₃-HClO₄-HF法(GB/T 17138-1997)消解,采用PF6非色散原子荧光光度计测定灰尘样品中的As含量,ICP-MS(Thermo Fisher)测定灰尘样品中的Pb含量。每批样品做一个试剂空白、2个标样。同步分析标准物质GBW 08301进行质量控制,测得样品中As、Pb含量在标准物质误差范围之内。实验所用器皿用15%的硝酸溶液浸泡24 h,用自来水冲洗干净后用二次去离子水冲洗3遍。

1.4 研究方法

在SPSS13.0中对原始数据进行统计分析,采用ArcGIS软件分析具有位置属性要素的区域分布特征,采用地统计Kriging插值得到As和Pb含量空间分布图,并通过栅格运算得到As和Pb地积累指数

和潜在生态危害系数空间分布图。

2 结果与讨论

2.1 有色冶金区街道灰尘中As、Pb的含量

如表1所示,葫芦岛市街道灰尘中As的含量范围为3.33~185.1 mg·kg⁻¹,平均含量为33.10 mg·kg⁻¹,是辽宁省土壤环境背景值的4倍,最高值是背景值的21倍。Pb的含量范围为96.71~3 903 mg·kg⁻¹,平均值为533.2 mg·kg⁻¹,是辽宁省土壤环境背景值的25倍,最高值是背景值的182倍。从街道灰尘中As和Pb的含量范围和变异系数来看,葫芦岛市街道灰尘中As和Pb含量差异较大,受人为因素影响较为明显。葫芦岛市街道灰尘中As、Pb含量均高于国内外其他城市(表2)。宝鸡虽为工业城市,但街道灰尘中As、Pb含量均低于葫芦岛市^[17, 18]。

表1 葫芦岛市街道灰尘中As和Pb的特征值
Table 1 Characteristic value of As & Pb of street dust in Huludao city

元素	算术平均值 /mg·kg ⁻¹	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	标准差	变异系数 /%	样品数 /个	分布类型	背景值 ^[19] /mg·kg ⁻¹
As	33.10	3.33	185.1	36.08	109.0	46	对数正态	8.8
Pb	533.2	96.71	3 903	815.4	152.9	46	对数正态	21.4

表 2 各城市街道灰尘中砷、铅平均含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			
Table 2 Mean concentration of As & Pb in street dust			
in cities/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			
城市	As	Pb	文献
葫芦岛(灰尘)	33.10(3.33~185.1)	533.2(96.71~3 903)	本研究
	64.77(7.25~492.6)	—	[12]
葫芦岛(土壤)	—	49.48(14.13~239.6)	[13]
Ottawa	1.33(0.0~2.9)	39.05(12.63~122.4)	[14]
Luanda	5(3.5~7.8)	351(74~1856)	[15]
Kavala	16.7(—)	300.9(—)	[16]
	19.8(9.0~42.8)	—	[17]
宝鸡	—	408.4(140.6~1847)	[18]
重庆市	6.82(2.30~15.49)	75.62(37.30~148.8)	[20]
北京	6.2(—)	54(—)	[21]
芜湖	15.37(3.533~169.4)	—	[22]

1) —表示无数据

2.2 有色冶金区街道灰尘中 As、Pb 空间分布特征

用 ArcGIS9.2 中的 Kriging 插值法对葫芦岛市街道灰尘中 As 和 Pb 含量进行空间分析(图 2、3)。葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 的空间分布形成了以葫芦岛锌厂周围为中心向外围呈辐射状,且延伸方向主要为北偏东和南偏西的空间格局,与葫芦岛市盛行季风方向一致。这说明葫芦岛锌厂的大气排放是该区域周围街道灰尘中 As、Pb 的污染源之一。As、Pb 主要以颗粒物的形式伴随锌厂烟尘排出,通过大气沉降降落到周围街道地面,导致重金属元素在灰尘中累积。葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 含量空间分布格局与葫芦岛锌厂周围土壤 As、Pb 的分布格局相似^[12,13]。因此,受到大气沉降影响的地表土壤也是影响灰尘中 As、Pb 累积的原因之一。

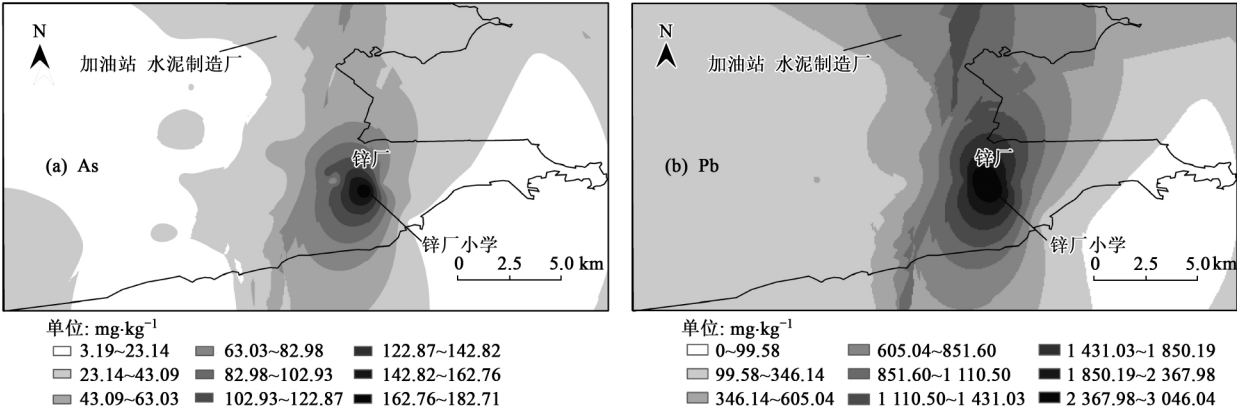


图 2 葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 含量空间分布示意
Fig.2 Spatial distribution of As & Pb in the street dust of Huludao city

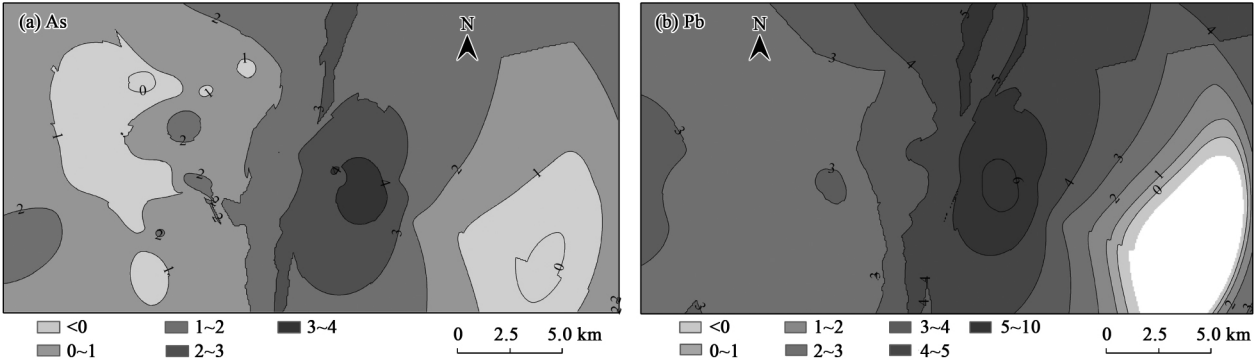


图 3 葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 地积累指数空间分布示意
Fig.3 Distribution on the geoaccumulation indexes of As & Pb in street dust of Huludao city

锌厂小学位于锌厂厂区附近,街道灰尘中 As、Pb 含量分别为 $185.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $3\,486\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 同比其他学校街道灰尘中 As、Pb 含量,最高分别可达

56、3 869 倍,因此,锌厂小学的学生摄入的 As、Pb 含量也要相应高于其他的学校。6 岁左右的儿童每天摄入土壤、灰尘约 $200\text{ mg}^{[15]}$, 灰尘中高含量 As、Pb

暴露可能对学生的健康造成严重危害. 加油站和水泥制品厂距离锌厂较远,但因其自身生产经营活动可能造成污染,街道灰尘中 As、Pb 含量较高. 锌厂附近的市场、居民小区等采样点街道灰尘中 As、Pb 含量比其它采样点均较高,排除锌厂附近采样点,对其它不同功能区街道灰尘中 As 含量进行排序为:工业区(工厂、加油站,29.44 mg·kg⁻¹) > 学校(25.92 mg·kg⁻¹) > 商业区(市场及商场,20.50 mg·kg⁻¹) > 居民区(各居民小区,19.06 mg·kg⁻¹);Pb 含量排序为:工业区(416.7 mg·kg⁻¹) > 学校(343.22 mg·kg⁻¹) > 商业区(264.0 mg·kg⁻¹) > 居民区(210.0 mg·kg⁻¹). 工业区街道灰尘中 As、Pb 含量高的原因可能是工业区的企业主要是炼油厂、加油站等,石油、汽油等材料中含有大量的 As、Pb. 另外,汽车尾气的排放及刹车磨损等交通问题也是街道灰尘重金属污染的一个主要原因^[21],但与葫芦岛市街道灰尘主要受大气沉降的影响相比,交通带来的影响相对较小.

2.3 街道灰尘中 As 和 Pb 的相关性分析

自然界中重金属污染大多是复合污染,研究街道灰尘中重金属的相关性,能够判断它们的来源是否相同^[23]. 葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 含量相关分析(表3)表明:As 和 Pb 之间在 0.01 水平上显著相关,且在大部分样品中出现 As、Pb 值同时增高的现象,表现出较强的复合污染特征. 这说明葫芦岛市街道灰尘中 As 和 Pb 来自相同污染源的概率很大,2 种元素的关系密切,受彼此的影响较大.

表 3 As、Pb 间相关性系数¹⁾ (n = 46)

Table 3 Correlation coefficients between As & Pb (n = 46)		
元素	As	Pb
As	1	
Pb	0.915 **	1

1) **表示相关系数在 0.01 概率水平上显著

2.4 有色冶金区街道灰尘中 As、Pb 污染评价

目前国内外研究中还没有街道灰尘中重金属污染评价的统一标准和方法,大多都采用土壤中重金属环境标准进行对比. 污染程度评价方法主要有:地积累指数评价法、单因子污染指数评价、内梅罗综合污染指数评价、富集因子评价等^[18, 24, 25]. 本研究采用国内外文献中常用的地积累指数法对葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 污染状况进行评价.

地积累指数(I_{geo})计算方法:

$$I_{geo} = \log_2 [c_n / 1.5B_n] \quad (1)$$

式中, c_n 为样品中元素 n 的浓度; B_n 为元素 n 的地球化学背景值,As、Pb 的 B_n 值取辽宁省土壤环境背景值,分别为 8.8 mg·kg⁻¹、21.4 mg·kg⁻¹. 地积累指数分级表见表 4.

表 4 地积累指数分级表

Table 4 Grades of geoaccumulation indexes		
地积累指数 (I_{geo})	分级	污染程度
< 0	0	无污染
0 ~ 1	1	轻度污染
1 ~ 2	2	偏中度污染
2 ~ 3	3	中度污染
3 ~ 4	4	偏重污染
4 ~ 5	5	重污染
5 ~ 10	6	严重污染

依据公式(1)计算:葫芦岛市街道灰尘中 As 的地积累指数范围为 -1.99 ~ 3.81,平均值为 0.77,处于轻度污染水平(表4);Pb 的地积累指数范围为 1.49 ~ 6.93,平均值为 3.28,处于偏重污染水平. 但从各采样点的地积累指数看,差异很大. As 和 Pb 的地积累指数均在锌厂区附近出现最高值,分别为 2.07 ~ 3.81 和 4.29 ~ 6.93,其他地区较低. 街道灰尘中 As 无污染、轻度污染、偏中度污染、中度污染、偏重污染所占比例分别为 23.9%、37%、23.9%、8.7%、6.5%;Pb 污染等级所占比例分别为:偏中度污染(10.9%)、中度污染(43.4%)、偏重度污染(19.6%)、重度污染(15.2%)、严重污染(10.9%). 通过 ArcGIS 插值分级得到葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 污染分级图. 可以更直观的看出,葫芦岛市街道灰尘中 As 污染分为 5 个等级,Pb 污染分为 7 个等级. 锌厂周围街道灰尘中 As 和 Pb 污染严重,污染程度随距锌厂距离的增加逐渐减小,以锌厂为中心,相同污染等级在南北方向比在东西方向分布范围更广,且街道灰尘中 Pb 污染空间分布复杂,比 As 污染严重.

3 潜在生态风险评价

潜在生态危害指数法是关于沉积学方面的方法. 由于潜在生态危害指数法主要反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度,反映对人体的潜在危害性,已被应用于灰尘中重金属污染评价的研究中^[25, 26].

单个重金属污染系数(C_r^i):

$$C_r^i = C^i / C_n^i \quad (2)$$

某单个重金属的潜在生态危害系数 (E_r^i):

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \tag{3}$$

多种重金属潜在生态危害指数 (RI)

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \cdot C_f^i = \sum_i^m T_r^i \cdot \frac{C^i}{C_n^i} \tag{4}$$

式中, C^i 为重金属浓度实测值; C_n^i 为计算所需的参比值, 选择辽宁省土壤环境背景值为参比值, As、Pb 的 C_n^i 值分别为 $8.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $21.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。按照 Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数为评价依据, As、Pb 的 T_r^i 值分别取 10、5。

根据公式(2)~(4)计算表明:从潜在生态危害系数 E_r^i 值来看, As 和 Pb 的 E_r^i 值范围分别在 3~211 和 21~912 之间, 数值范围跨度很大, 说明葫芦岛市街道灰尘中 As 和 Pb 的污染状况差异较大。在所采集的单个街道灰尘样品中, 大部分街道灰尘中 Pb 的 E_r^i 值高于 As; As 属于轻微生态危害、中等生态危害、强生态危害、很强生态危害级别的比例分别为 71.7%、19.6%、6.5%、2.2%; Pb 属于轻微生态危害、中等生态危害、强生态危害、很强生态危害、极强生态危害级别的比例分别为 19.6%、50%、10.8%、13.1%、6.5%。街道灰尘中重金属潜在生态危害指数 (RI) 值范围在 24~1 071 之间, 均值为 157, 处于轻微生态危害等级 (表 5)。

表 5 E_r^i 、RI 与污染程度的关系

Table 5 Relationship of E_r^i , RI and pollution level		
E_r^i	RI	污染程度
$E_r^i < 40$	$RI < 150$	轻微生态危害 (Ⅰ级)
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害 (Ⅱ级)
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强生态危害 (Ⅲ级)
$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 600$	很强生态危害 (Ⅳ级)
$E_r^i \geq 320$		极强生态危害 (Ⅴ级)

通过插值法得到葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 潜在生态危害系数空间分布 (图 4) 和潜在生态危害指数空间分布 (图 5)。葫芦岛市绝大多数地区街道灰尘中 As 都处于轻微生态危害级别, 仅在锌厂附近出现很强生态危害级别。而 Pb 污染中心潜在生态危害级别和面积相对于 As 来说, 都有所增加, 大部分区域生态危害水平在中度生态危害级别以上, 且中心出现极强生态危害水平。由此可见, 葫芦岛市街道灰尘中 Pb 污染比 As 污染严重, 且污染严重区域集中在锌厂周围。葫芦岛市街道灰尘中重金属潜在生态危害指数在锌厂附近表现出很强生态危害级别, 其余大部分区域处于轻微生态危害级别。所以, 应该加强锌厂生产过程的排出物处理及周围环境治理, 避免周围环境、人类受到污染危害。

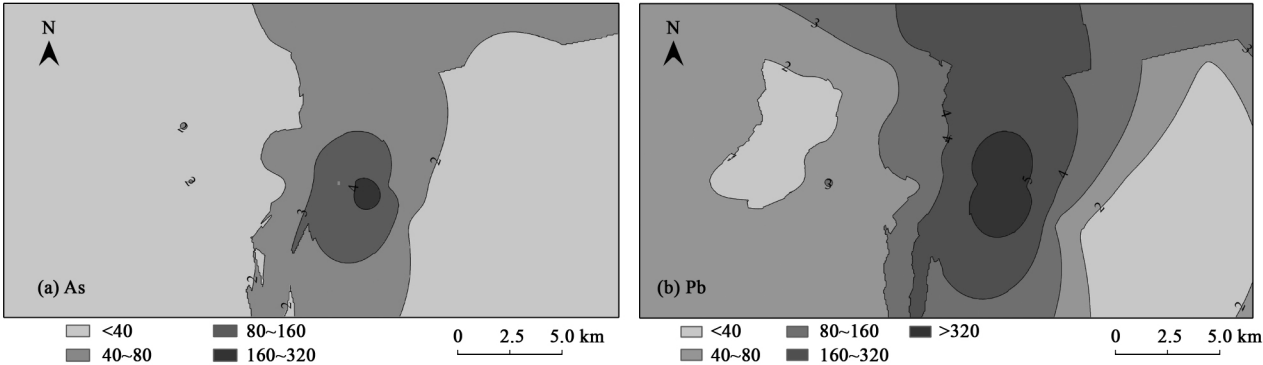


图 4 葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 潜在生态危害系数的空间分布示意
Fig. 4 Spatial distribution of As & Pb E_r^i in the street dust of Huludao city

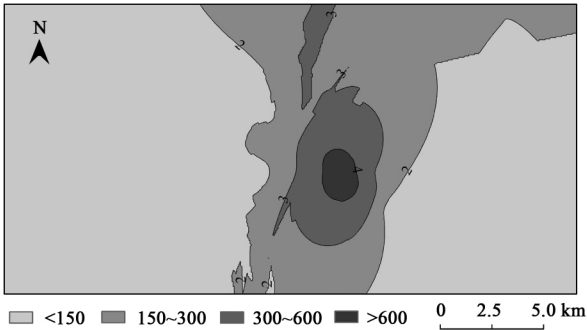


图 5 葫芦岛市街道灰尘金属潜在生态危害指数空间分布示意
Fig. 5 Spatial distribution of metals RI in the street dust of Huludao city

4 结论

(1) 葫芦岛市街道灰尘中 As 和 Pb 的平均含量分别为 $33.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $533.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 含量范围为 $3.33\sim185.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $96.71\sim3\,903\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是辽宁省土壤环境背景值的 4 和 25 倍, 说明葫芦岛市街道灰尘存在 As、Pb 污染。

(2) 葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 含量的空间差异较大, 主要是以葫芦岛锌厂周围为中心向四周辐射状扩散。锌厂区附近街道灰尘中 As、Pb 污染最大, 排除锌厂区, 不同功能区街道灰尘中 As、Pb 含

量排序均为:工业区 > 学校 > 商业区 > 居民区.

(3)地积累指数评价葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 污染程度表明,葫芦岛市街道灰尘中 As、Pb 污染以葫芦岛锌厂周围为中心,污染程度向四周逐渐减轻. 潜在生态风险评价表明,葫芦岛市大部分街道灰尘中 As 处在轻微生态危害水平,Pb 潜在生态危害系数处在中等生态危害级别以上的面积较大. 葫芦岛市街道灰尘中 Pb 污染比 As 污染严重.

参考文献:

[1] Lee C G, Chon H T, Jung M C. Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au-Ag-Pb-Zn mine in Korea [J]. Applied Geochemistry, 2001, **16** (11-12) : 1377-1386.

[2] 廖国礼, 吴超, 谢正文. 铅锌矿山环境土壤重金属污染评价研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2004, **19** (4) : 78-82.

[3] Marguí E, Queralt I, Carvalho M L, *et al.* Assessment of metal availability to vegetation (*Betula pendula*) in Pb-Zn ore concentrate residues with different features [J]. Environmental Pollution, 2007, **145** (1) : 179-184.

[4] 郭朝晖, 宋杰, 肖细元, 等. 有色矿冶区污染蔬菜土壤中重金属活性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, **40** (1) : 12-18.

[5] Zheng N, Wang Q, Zheng D. Mercury contamination and health risk to crops around the zinc smelting plant in Huludao City, northeastern China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, **29** (5) : 385-393.

[6] Zheng N, Wang Q, Zhang X, *et al.* Population health risk due to dietary intake of heavy metals in the industrial area of Huludao city, China[J]. Science of the Total Environment, 2007, **387** (1-3) : 96-104.

[7] Zheng N, Wang Q, Liang Z, *et al.* Characterization of heavy metal concentrations in the sediments of three freshwater rivers in Huludao City, Northeast China [J]. Environmental Pollution, 2008, **154** (1) : 135-142.

[8] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征[J]. 环境科学, 2007, **28** (6) : 1349-1354.

[9] 李亮亮, 依艳丽, 王延松, 等. 葫芦岛市连山区、龙港区土壤重金属空间分布及污染评价[J]. 土壤通报, 2006, **37** (3) : 495-499.

[10] 张仲胜, 王起超, 郑冬梅, 等. 葫芦岛地区汞在土壤-植物-昆虫系统中的生物地球化学迁移[J]. 环境科学学报, 2008, **28** (10) : 2118-2124.

[11] 郑冬梅, 王起超, 张仲胜, 等. 葫芦岛市五里河土壤-植物系统中汞的迁移[J]. 中国环境科学, 2007, **27** (5) : 676-680.

[12] 张秀武, 王起超, 郑冬梅, 等. 葫芦岛锌厂周围土壤砷污染空间格局和风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27** (5) : 1769-1773.

[13] 李亮亮, 王延松, 张大庚, 等. 葫芦岛市土壤铅空间分布及污染评价[J]. 土壤, 2006, **38** (4) : 465-469.

[14] Rasmussen P E, Subramanian K S, Jessiman B J. A multi-element profile of house dust in relation to exterior dust and soils in the city of Ottawa, Canada [J]. Science of the Total Environment, 2001, **267** (1-3) : 125-140.

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

[16] 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.

[17] Lu X, Li L Y, Wang L, *et al.* Contamination assessment of mercury and arsenic in roadway dust from Baoji, China [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43** (15) : 2489-2496.

[18] Lu X, Wang L, Lei K, *et al.* Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161** (2-3) : 1058-1062.

[19] 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. 330, 366.

[20] 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) : 114-117.

[21] 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.

[22] 方风满, 张志明, 陈文娟, 等. 芜湖市区春季地表灰尘中汞和砷的空间及粒径分布规律[J]. 环境科学学报, 2009, **29** (9) : 1871-1877.

[23] 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.

[24] Wei B, Jiang F, Li X, *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.

[25] 李凤全, 潘虹梅, 叶玮, 等. 城市灰尘重金属污染特征及生态危害评价[J]. 安徽农业科学, 2008, **36** (6) : 2495-2498.

[26] 林啸, 刘敏, 侯立军, 等. 上海市土壤和地表灰尘重金属污染现状及评价[J]. 中国环境科学, 2007, **27** (5) : 613-618.