

方凤满, 张志明, 陈文娟, 等. 2009 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, 29(9): 1871– 1877
Fang F M, Zhang Z M, Chen W J *et al*. 2009 Spatial and particle size distribution of mercury and arsenic on surface dust in spring in the W uhu urban district[J]. A cta Scientiae Circum stantiae, 29(9): 1871– 1877

芜湖市区春季地表灰尘中汞和砷的空间及粒径分布规律

方凤满^{*}, 张志明, 陈文娟, 杨 丁

安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241003
收稿日期: 2008-12-09 修回日期: 2009-04-10 录用日期: 2009-07-10

摘要: 以芜湖市高新技术开发区、中心城区和经济技术开发区为研究区域, 于 2008 年春季对其地表灰尘中汞和砷含量、空间分布特征及其在粒径中的分布规律进行了研究. 结果表明: 芜湖市区地表灰尘中汞、砷含量范围分别为 0.011~ 1.477mg kg⁻¹、3.533~ 169.368mg kg⁻¹, 平均值分别为 0.230、15.371mg kg⁻¹, 分别是土壤背景值的 1.9 和 1.5 倍, 存在一定程度的污染; 灰尘中汞含量在经济技术开发区较高, 而砷则在高新技术开发区出现高值区; 汞属于空间中相关, 说明其变异主要受随机或人为因素的影响; 砷属于空间强相关, 说明其变异主要受土壤母质、土地利用方式等因素影响; 研究区地表灰尘汞和砷含量大体上呈随粒径减小而增加的趋势; 不同粒径上汞和砷含量的富集比例随粒径减小呈增加的趋势, 汞和砷在 > 200 目粒径上的平均富集比例分别为 63.5% 和 55.8%, 说明汞更容易富集在细小颗粒上.
关键词: 地表灰尘; 汞; 砷; 克里格插值; 空间分布; 粒径分布

文章编号: 0253-2468 (2009) 09-1871-07 中图分类号: X513 文献标识码: A

Spatial and particle size distribution of mercury and arsenic on surface dust in spring in the W uhu urban district

FANG Fengnan^{*}, ZHANG Zhi ming, CHEN Wenjuan, YANG Ding

College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003
Received 9 December 2008 **received in revised form** 10 April 2009 **accepted** 10 July 2009

Abstract Mercury & arsenic contents in Wuhu urban area dust, their spatial characteristics and particle size distributions were studied in the spring of 2008 in three districts (High-tech Development Zone, City Center, Economic and Technological Development Zone). The Hg & As concentrations in the study districts were 0.011~ 1.477 mg kg⁻¹ and 3.533~ 169.368 mg kg⁻¹ respectively. The mean concentrations of 0.230 mg kg⁻¹ for Hg and 15.371 mg kg⁻¹ for As were 1.9 and 1.5 times the soil background values. The Hg concentration was high in the Economic and Technological Development Zone, but As content was high in the High-tech Development Zone. Hg fit them iddle spatial correlation which indicates that Hg is mainly influenced by the stochastic or human factor. As fit the strong spatial correlation, so it is mainly influenced by parent material of the soil or land uses. In general, Hg and As concentrations increased as the particle size of the surface dust decreased, and the enrichment ratio showed the same tendency. The enrichment ratios of Hg and As were 63.5% and 55.8% respectively in the 0.074 mm particles (> 200 mesh), which shows that Hg is enriched on the tiny particles.
Keywords surface dust; Hg; As; kriging; spatial distribution; particle size distribution

1 引言 (Introduction)

城市地表灰尘主要是附着、沉积于城市不透水下垫面 (包括道路、桥面、街面、广场) 及地面附着物、建筑物裸露面上, 未被固化粘结且易被水力、风

力和重力等作用带动、运移和飘浮的粒径小于 20 目 (< 0.920mm) 的固体颗粒物 (杜佩轩等, 2004; 常静等, 2007). 城市地表灰尘的形成与居民日常生活、工农业生产和气候因素等有关, 主要来源于建筑路面、裸露地表、各种沉降在路面上的气溶胶粒子、交

基金项目: 安徽高校省级自然科学研究重点项目 (No KJ2009A137); 安徽师范大学优秀创新团队建设计划
Supported by the Natural Science Key Research Projects of Anhui Provincial Universities (No KJ2009A137) and the Program for Innovative Research Team in Anhui Normal University
作者简介: 方凤满 (1974—), 女, 教授, E-mail: ffn1974@mail.ahnu.edu.cn * 通讯作者 (责任作者)
Biography: FANG Fengnan (1974—), female professor, E-mail: ffn1974@mail.ahnu.edu.cn * Corresponding author
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通工具的磨损和建筑物表面涂料的脱落等 (Murakami *et al.*, 2008), 其组成可反映当地土壤的化学成分和环境污染程度 (张慧敏等, 2007). 城市因人口密集、人类活动频繁、污染物排放强度大等原因, 其形成的灰尘中常包含较高的重金属污染物, 在一定条件下, 容易成为潜在污染源对城市环境产生影响. 一方面, 地表灰尘在一定外动力条件下较易扬起, 从而通过呼吸道和皮肤被人体吸收, 在人体内被消化、吸收、累积, 对人体健康产生危害; 另一方面, 它在降水的冲刷作用下进入河道, 对城市水环境造成了直接的污染. 因此, 开展城市地表灰尘重金属污染研究具有重要的现实意义.

长期以来, 国内城市环境重金属污染研究主要集中于大气和土壤环境方面, 而对城市地表灰尘重金属污染关注较少. 近年来, 国内对地表灰尘研究较多的几种元素分别为 Cr Cu Ni Pb 和 Zn 等, 且研究区都集中在大城市或公路沿线 (李章平等, 2006; Zhang *et al.*, 2006; 张菊等, 2007; 李崇等, 2008; 郭广慧等, 2008), 而对新兴中小城市地表灰尘中金属元素 (如 Hg As 等) 的研究较少, 但它们在城市地表灰尘中的累积对当地环境同样具有重要的指示意义和较大的污染危害作用. 目前, 有关城市地表灰尘中重金属的研究一方面侧重于对灰尘中重金属含量的调查与来源研究 (Anju *et al.*, 2003; Manno *et al.*, 2006), 另一方面是通过对灰尘中重金属空间分布特征研究来分析重金属迁移转化规律 (Faruque *et al.*, 2006; Han *et al.*, 2008). 鉴于此, 本研究以芜湖市区为研究区域, 对地表灰尘中 Hg 和 As 含量水平与空间及粒径分布规律进行研究, 以期为城市 Hg 和 As 污染预防与控制对策的制定提供理论依据, 同时为地表水与流域的非点源管理提供基础资料.

2 研究方法 (Study methods)

2.1 研究区概况

芜湖市区位于 $31^{\circ}16' \sim 31^{\circ}27'N$, $118^{\circ}20' \sim 118^{\circ}26'E$, 属亚热带湿润季风气候. 年平均气温为 $15 \sim 16^{\circ}C$, 日照时数 2000h 左右, 年降雨量 1200mm, 无霜期每年达 219~240d. 芜湖地势南高北低, 地形呈不规则长条状. 市区镜湖、弋江、鸠江、三山 4 个区. 为更好地研究地表灰尘的空间分布特征及其原因, 本研究未在 2006 年才划入三山的绿色食品基地以及鸠江区和弋江区东边人类活动影响较小的区

域内进行采样, 而是根据产业布局、人类活动、交通流量等特点将研究区划分为高新技术开发区 (新建区, 以高新技术产业以及高校园区为主导)、中心城区 (芜湖市的政治、经济、商业、文化中心, 人口密度最大, 活动密集)、经济技术开发区 (芜湖市的工业集中地).

2.2 样品采集与处理

为使采样点具有更好的代表性, 采用近似网格布点法 ($1km \times 1km$), 在高新技术开发区布 22 个点, 中心城区 38 个点, 经济技术开发区 16 个点, 共采集 76 个地表灰尘样品 (图 1). 一般在降雨冲刷 48h 后地表灰尘的分布和累积量可恢复到正常水平 (郭琳等, 2003). 芜湖市春季大气污染较严重, 降雨较少, 道路堆积物不易得到有效冲刷; 夏季雨量充沛、降雨频繁, 大气污染相对较轻, 地表灰尘冲刷频繁. 因此, 该区地表灰尘的春季样品代表性较强. 本研究于 2008 年春季 (4 月) 1 次降雨 72h 后采集地表灰尘样品, 用塑料簸箕和刷子在每个网格内的中心街道上采集多个灰尘样品, 然后将多个样品采用四分法混合成 1 个样品, 样品采集后放入自封袋中密封保存.

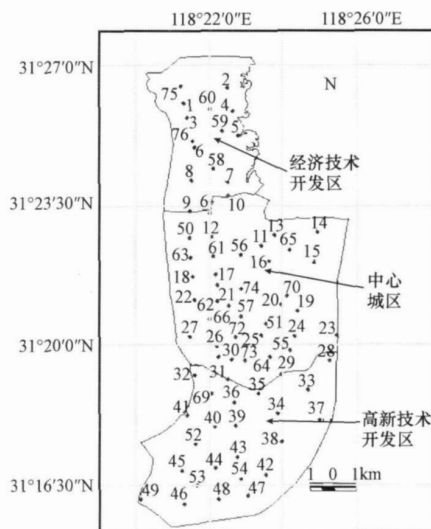


图 1 研究区示意及采样点分布图

Fig 1 Study area and dust sample sites

用不锈钢镊子除去杂物, 低温 ($35^{\circ}C$) 烘干后, 过 20 目 ($0.920mm$) 尼龙网筛去除较小的杂物; 然后将样品采用四分法分成 2 部分, 一部分用玛瑙研钵研磨, 过 100 目 ($0.149mm$) 尼龙网筛, 以备测定灰尘中砷汞总量; 从另一部分样品中选择 21 个样 (其中, 经济技术开发区 6 个, 中心城区 8 个, 高新技

术开发区 7 个), 分别过 60 100 160 和 200 目的尼龙筛, 把每个样品分成 20~ 60 60~ 100 100~ 160 160~ 200 和 > 200 目 5 个粒径等级, 再把其中 20~ 60 和 60~ 100 目的 2 个粒径等级的样品用玛瑙研钵研磨, 使其过 100 目尼龙网筛, 过筛后的样品放入自封袋中保存备用, 以备测定各粒径等级中的砷汞含量.

2 3 样品分析

2 3 1 测汞 为减少样品间的相互干扰, 对汞和砷分别进行测量. 准确称取 0.2g (精确到 0.0001g) 灰尘样品于 50mL 比色管中, 加 10mL 新配置的 1:1 (体积比) 的 HCl-HNO₃ 混合液, 在沸水浴中加热 2h. 其间至少摇动 2 次 (王利军等, 2007; 中华人民共和国农业行业标准, 2006); 冷却后用 5% HNO₃ (V/V) - 0.05% K₂Cr₂O₇ (m/V) 混合液定容至 50mL 后摇匀即为汞待测液, 同时做空白.

2 3 2 测砷 准确称取 0.1g (精确到 0.0001g) 灰尘样品于 25mL 比色管中, 加入新配置的王水 5mL, 在沸水浴中加热 2h. 其间至少摇动 2 次 (王利军等, 2007; 中华人民共和国农业行业标准, 2006); 冷却后加入 5mL 新配置的 5% 硫脲 (m/V) - 5% 抗坏血酸 (m/V) 混合溶液, 再用体积分数 5% HNO₃ 稀释液定容后摇匀放置 2h 以上, 取上述溶液上层清液 5mL 于 50mL 比色管中, 用 5% HNO₃ 稀释液定容后即为砷待测液, 同时做空白. 砷汞待测液用北京吉天仪器有限公司生产的 AFS-820 双道原子荧光光度计测定.

2 4 实验质量控制

每批样品随机抽取 3 个样品重复做 3 次, 测得平行样中汞和砷含量的相对标准偏差达到国家规定的精密度要求 (中华人民共和国农业部, 2006). 同步分析土壤标准物质 GBW 07401 (GSS-1), 测得汞和砷的回收率位于 83% ~ 109% 之间. 实验过程中所用试剂均为优级纯; 所用器皿均在体积分数 10% 的稀硝酸中浸泡 48h 以上, 用自来水冲洗干净后再用去离子水冲洗 3 遍.

3 结果 (Results)

3 1 城市地表灰尘 Hg 和 As 含量

芜湖市区地表灰尘汞和砷的含量分别为 0.011 ~ 1.477mg kg⁻¹、3.533 ~ 169.368mg kg⁻¹, 平均含量分别是 0.230 15.371mg kg⁻¹, 是土壤汞和砷背景值的 1.9 和 1.5 倍.

3 2 城市地表灰尘 Hg 和 As 含量的空间分布特征

3 2 1 城市地表灰尘 Hg 和 As 空间分布类型和趋势消除 利用 ArcGIS 9.2 地统计分析工具对灰尘中重金属含量的空间特征预分析, 得到芜湖市区地表灰尘汞含量由西向东方向呈现倒 U 型趋势, 在南北方向上表现为从南向北逐渐升高的趋势; 而地表灰尘砷含量由西向东和由南向北方向都呈现减小的趋势. 结果表明, Hg As 均属于对数正态分布; 其中, Hg 为二次函数趋势, 砷为一次函数趋势. 因此, 在空间插值时应剔除趋势, 以减小插值造成的误差 (李海雯等, 2007).

3 2 2 ArcGIS 空间插值预测方法及有效性检验

克里格法 (Kriging) 从统计学意义上讲, 是从变量相关性和变异性出发, 在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法; 从空间插值角度讲, 是对空间分布的数据求线性最优、无偏内插估计的一种方法. 芜湖市地表灰尘中汞与砷含量属于对数正态分布, 故采用普通克里格插值预测法 (表 1) (赵其国等, 2007). 利用 Kriging 模型对重金属进行空间插值时, 必须符合一定的评判标准才能进行. 评判标准主要包括: 1) 空间预测值的平均误差 (ME) 绝对值最接近于 0; 2) 标准化平均误差 (MSE) 最接近于 0; 3) 平均标准误差 (ASE) 与均方根误差 (RMSE) 越接近, RMSE 越小, 模拟的越好; 4) 标准化均方根误差 (RMSE) 最接近于 1 (李海雯等, 2007; 赵其国等, 2007). 通过表 1 可知, 利用普通克里格法对 Hg As 进行空间插值预测的可靠性较高. 砷预测值的均方根误差 (RMSE = 18.78) 较大, 这可能与砷含量的区域差异比较大有关.

表 1 汞、砷理论模型、相关参数及空间插值的预测误差
Table 1 Models of dust heavy metal interpolation corresponding Kriging parameters & prediction errors

元素	Kriging 方法	变异函数模型	块金常数 / 阈值	ME	MSE	ASE	RMSE	RMSE
Hg	普通克里格	球状模型	0.6606	-0.0220	-0.1171	0.3152	0.2935	1.0770
As	普通克里格	高斯模型	0.0523	-0.5573	-0.0425	18.32	18.78	1.0000

3 2 3 城市地表灰尘 Hg和 As空间分布特征

块金常数通常表示由于实验误差和小于实验采样尺度所引起的变异,块金常数大,表示较小尺度上的某些过程影响不容忽视.一般以块金常数与基台值的比值作为衡量变量空间相关程度,如果其值小于 0.25 则为空间强相关;介于 0.25~0.75 之间为中等程度空间相关;0.75 以上为空间弱相关.从表 2 可以看出:汞的块金常数/基台值为 0.6606,属于空间中等相关,说明引起变异的因素相对复杂,主要由随机或人为因素引起的变异(李海雯等,2007;赵永存等,2002);砷的块金常数较小,块金常数/基台值仅为 0.0523,属于空间强相关,说明其变异主要受土壤母质或地形特征、土地利用类型等因素影响.

图 2和图 3为芜湖市地表灰尘汞、砷含量的克里格插值和分布特征图.其中,分级主要是根据大部分文献以及软件默认的分级数确定为 10级,然后通过聚类分析将相似性最大的数据分在同一级,差异性最大的数据分在不同级,这种方法可以较好保持数据的统计特性.由图 2和图 3可以看出,芜湖市区地表灰尘汞的空间分布格局为在西北方(经济技术开发区内)和市中心(中心城区)出现 2 个高值区,南侧的高新技术开发区汞含量最低;汞含量整体上呈带状分布,东侧和西南部含量相对较低,并由两侧向中间呈增加趋势,其中有一南北偏西方向的带状高值区(图 2a).从图 2b可以看出,砷的空间分布呈现出北、中、南 3 处偏高,东部和北部零星出现低值区.砷含量最高值出现在西南部的高新技术开发区,中心城区次之(其中,东部分布有低值点),经济技术开发区最低.

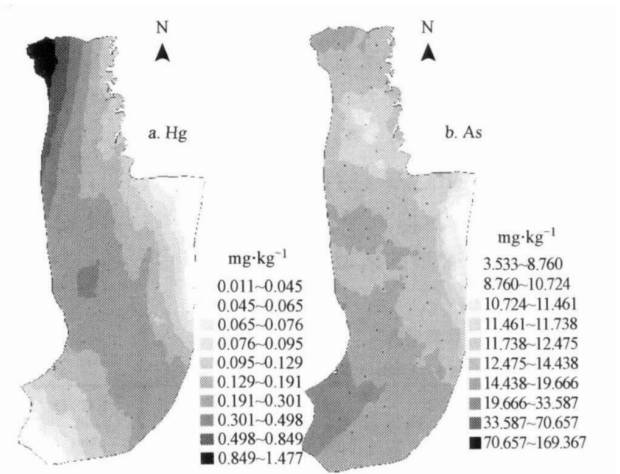


图 2 芜湖市区地表灰尘汞、砷克里格插值

Fig 2 Kriging maps of Hg As in Wuhu surface dust

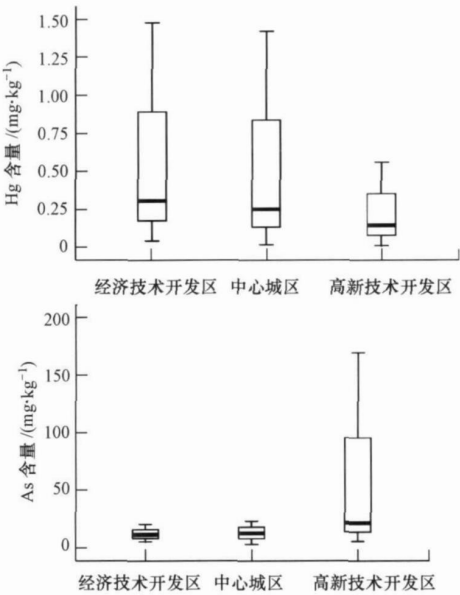


图 3 芜湖市区地表灰尘汞、砷含量特征

Fig 3 Hg and As content in surface dust in Wuhu City

3 3 地表灰尘不同粒径 Hg和 As分布规律

不同粒径水平下,各功能区城市地表灰尘汞和砷含量随粒径的变化趋势如图 4所示(图例为各样品编号).从图 4可看出,城市地表灰尘汞和砷含量总体上随着粒径的减小呈增加的趋势,但也出现一些异常,部分地表灰尘中汞和砷含量最高值不是出现在 >200目(<0.075mm)的粒径上,而是出现在 160~200目(0.097~0.075mm)的粒径上,其中,砷的这种规律较明显.粒径在 160~200目之间的地表灰尘中有 2/3 的样品汞含量超过背景值,砷则全部都超过背景值,其汞和砷含量平均值分别是背景值的 3 倍和 2.8 倍;粒径在 >200目的地表灰尘有 86% 的样品汞含量超过背景值,而砷除 1 个样品外其余全部超过背景值,其汞和砷含量平均值分别是背景值的 4 倍和 2.9 倍.由此可见,灰尘粒径越小其中富集的汞和砷越多,对人体造成危害的可能性就越大.

汞和砷在不同粒径上的富集比例随粒径的变化趋势如图 5所示(图中趋势线为所选取的 21 个分级样品的趋势线,对应图 4 中的全部样点).从图 5 可看出,汞、砷在不同粒径上的富集比例变化趋势与其在不同粒径上的分布规律有相似.不同采样点,汞在 >200目粒径上的富集比例范围为 24.3%~91.5%,平均为 63.5%,砷在 >200目粒径上的富集比例是 15.0%~85.5%,平均为 55.8%.相比较而言,汞、砷在不同粒径上的富集比例从 160~200

目到大于 200目段变化更大, 含量更高, 说明 Hg As 在 > 200目粒径上富集较多 (表 2).

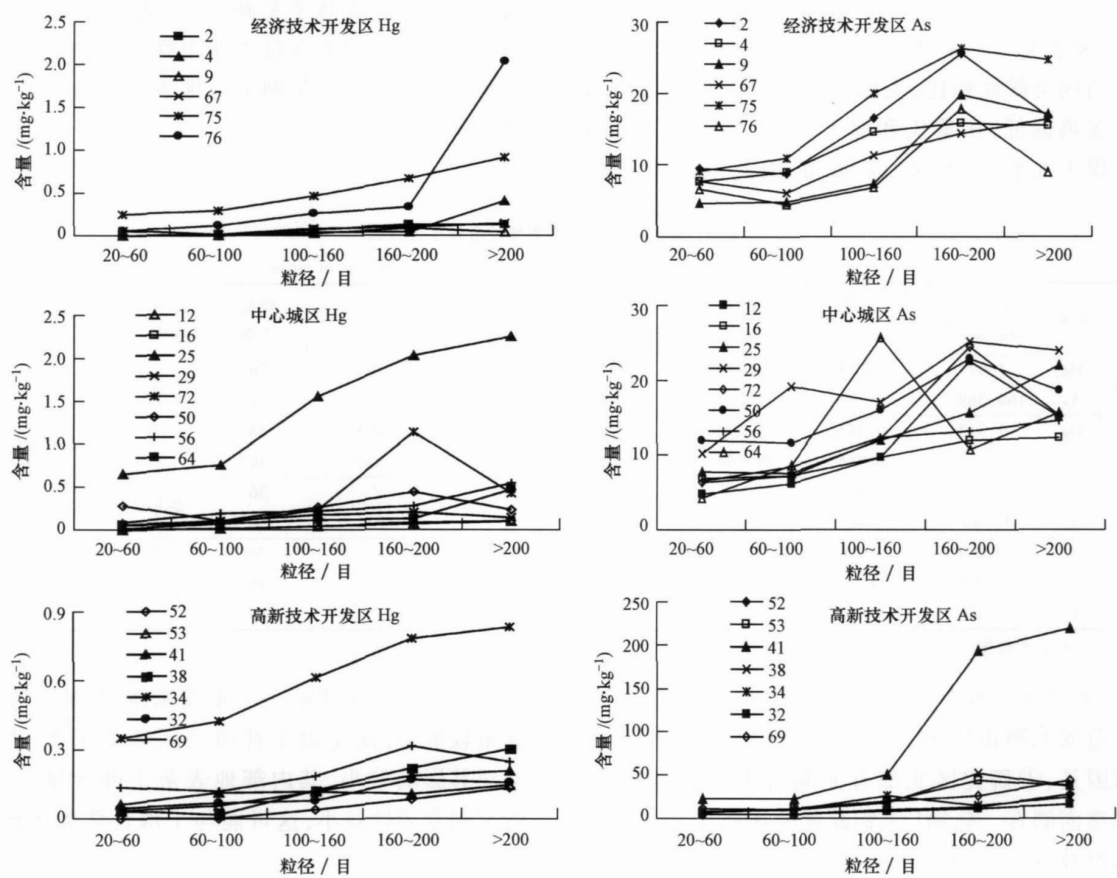


图 4 地表灰尘各粒径汞、砷含量变化趋势
Fig. 4 Trends of Hg and As content with surface dust particle size

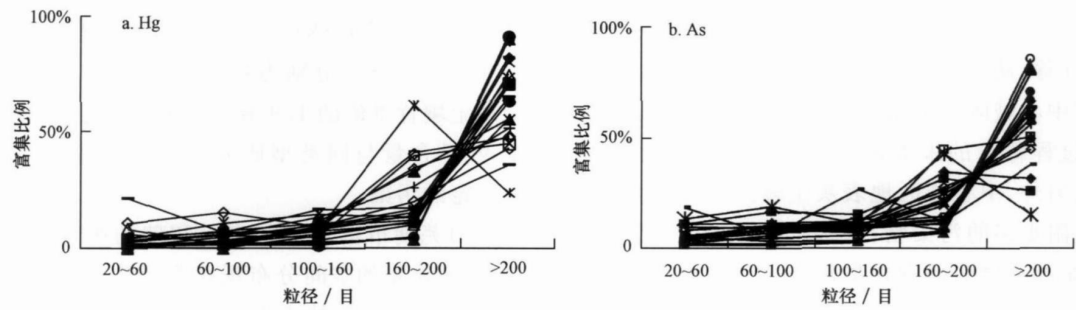


图 5 地表灰尘各粒径汞、砷富集比变化趋势
Fig. 5 Enrichment ratio of Hg,As on different sized surface dust particle

表 2 地表灰尘各粒径汞、砷平均含量与平均富集比例

Table 2 Mean values and enrichment ratios ofHg As on surface dust particles by size				
粒径 / 目	Hg平均含量 / (mg kg ⁻¹)	Hg富集比例	As平均含量 / (mg kg ⁻¹)	As富集比例
20~ 60	0.105	3.8%	8.142	6.0%
60~ 100	0.122	4.5%	9.273	8.3%
100~ 160	0.233	8.3%	16.305	9.7%
160~ 200	0.362	19.9%	29.540	20.1%
> 200	0.475	63.5%	30.566	55.8%

4 讨论 (Discussion)

4.1 地表灰尘中汞砷含量分析

与同类研究相比, 芜湖市区地表灰尘中汞砷含量较宝鸡偏低, 比重庆和渥太华高, 这与城市的性质有很大关系, 宝鸡为工业城市, 因此, 宝鸡市灰尘

中汞砷的含量最高; 北京采样季节处于采暖期, 其灰尘中汞含量要高于芜湖市区 (表 3), 说明城市区地表灰尘中汞砷的含量受城市性质、采样时间等因素的影响. 总体上, 芜湖市区地表灰尘汞、砷存在一定程度的污染.

表 3 各城市地表灰尘汞和砷含量统计分析
Table 3 Statistical analysis of surface dust Hg & As contents in cities

城市	元素	最大值 / (mg kg ⁻¹)	最小值 / (mg kg ⁻¹)	平均值 / (mg kg ⁻¹)	中值 / (mg kg ⁻¹)	背景值 / (mg kg ⁻¹)	标准 偏差	样品 个数	采样 季节	文献来源
芜湖	Hg	1 477	0.011	0.230	0.107	0.120	0.313	76	春季	本研究
	As	169 368	3.533	15.371	11.989	10 600	18.817	76		
宝鸡	Hg	2 318	0.483	1.112	1.277	0.065	0.408	38	/	王利军等, 2007
	As	42 822	8.985	19 764	18.17	11.2	7.882	38		
重庆	Hg	0.33	0.03	0.11	/	/	/	36	全年	李章平等, 2006
	As	15.49	2.30	6.82	/	/	/	36		
北京	Hg	1.378	0.045	0.340	0.189	0.009~0.08	/	20	冬季	Zhang <i>et al.</i> , 2006
渥太华	Hg	0.188	0.004	0.029	0.018	/	/	45	冬季	Raamussen 2001
	As	2.9	0.0	1.3	1.4	/	/	45		

注: / 表示无数据.

4.2 芜湖市区地表灰尘汞砷的空间分布特征分析

造成芜湖市区地表灰尘中汞的分布特征的主要原因是: ①研究区北部有芜湖火电厂和冶炼厂, 东部靠南侧有一轧钢厂 (靠近青弋江); 工厂排放的气体以及在生产过程中产生的颗粒物吸附携带一定含量的汞等污染物质, 而地表颗粒物沉降的多少与多种因素有关, 一般随着距离的增加而减少, 因此, 距离污染源越近, 地表灰尘中汞含量越高; ②样品采集是在 4 月, 当时的主导风向为东南风, 灰尘随着风而迁移, 从而吸附在灰尘上的污染物质也发生迁移; ③中心城区人类活动频繁、交通量大、汽车尾气排放过程释放的汞等污染物被颗粒物吸附降落在附近; 另外, 中心城区地表灰尘较细, 其吸附能力强, 能吸附更多的污染物, 汞含量高于周边地区; ④研究区东部和西南部汞含量较低, 可能是因为神山公园位于东部, 人类活动对其影响较小, 其内部地表灰尘汞含量较低; 而研究区西南部是高新技术开发区与三山绿色工业园区的结合段, 没有污染型企业的存在, 另外, 该区建设的时间并不长, 因而研究区东部和西南部汞含量较低.

造成芜湖市区地表灰尘中砷的分布特征的主要原因是高新技术开发区在规划以前基本上都是耕地, 土壤以水稻土为主, 长期使用化学农药使该区土壤中积累了大量的砷. 目前, 该区正在进行大规模建设, 建筑施工和道路建设等过程中产生的尘

土是该区灰尘中砷的一个重要来源. 研究区东部砷含量较低, 可能是由于神山公园位于东部, 人类活动对其影响较小, 其内部地表灰尘砷含量较低; 砷的空间变异性较小, 这可能与土壤母质和土地利用方式有关.

5 结论 (Conclusions)

1) 芜湖市区地表灰尘中汞、砷的含量分别为 0.011~1.477mg kg⁻¹、3.533~169 368mg kg⁻¹, 汞和砷平均含量分别为 0.230 15.371mg kg⁻¹, 是芜湖土壤背景值的 1.9 和 1.5 倍. 芜湖市区地表灰尘汞、砷含量与同类型研究相比含量偏低, 但仍存在一定的污染.

2) 芜湖市区地表灰尘汞和砷的统计分析结果表明, 汞含量的空间分布规律为经济技术开发区 > 中心城区 > 高新技术开发区, 呈南北方向带状分布, 这与主要污染源及风向有关; 汞属于空间中相关, 引起变异的因素相对复杂, 主要由随机或人为因素引起, 经济技术开发区灰尘中的汞主要来源于燃煤电厂和冶炼厂排放的烟尘; 中心城区的高密度人类活动和高交通流量是灰尘中汞的主要来源; 高新技术开发区建区时间不长, 并无明显污染企业存在, 灰尘中汞含量最低. 砷含量的空间分布规律为高新技术开发区 > 中心城区 > 经济技术开发区, 总体上呈块状分布, 属于空间强相关, 其变异主要由

土壤母质以及土地利用类型不同引起。高新技术开发区规划前的耕地利用方式是导致该区灰尘中砷含量高的主要原因,建设期内建筑施工和道路建设导致土壤扬尘的沉积是灰尘中砷的主要来源。

3)芜湖市地表灰尘中汞和砷含量大体上随着粒径的减小呈增加的趋势。汞和砷在不同粒径上的富集比例也随粒径的减小呈明显增加趋势,63.5%的汞和55.8%的砷富集在>200目的粒径上,说明汞、砷均易富集在细小颗粒物上,而这些小颗粒物能通过呼吸作用进入人体,对人体存在较大的潜在危害。

责任作者简介:方凤满(1974—),女,教授。主要从事表生环境污染物的环境过程与机制研究。E-mail: ffn1974@mail.ahnu.edu.cn

参考文献 (References):

- Anju D K. 2003. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India [J]. *Environmental Pollution*, 123: 95—105
- 常静, 刘敏, 侯立军, 等. 2007. 城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应 [J]. *应用生态学报*, 18(5): 1153—1158
- Chang J, Liu M, Hou L J *et al*. 2007. Concept, pollution character and environmental effect of urban surface dust [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(5): 1153—1158 (in Chinese)
- 杜佩轩, 田晖, 韩永明. 2004. 城市灰尘概念、研究内容与方法 [J]. *陕西地质*, 22(1): 73—79
- Du P X, Tian H, Han Y M. 2004. Concept, research content and method of urban dust [J]. *Geology of Shanxi*, 22(1): 73—79 (in Chinese)
- Faruque A, Hinoaki I. 2006. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh [J]. *Atmospheric Environment*, 40: 3835—3844
- Han Y M, Cao J J, Eric S Posmentier *et al*. 2008. Particulate-associated potentially harmful elements in urban road dusts in Xi'an, China [J]. *Applied Geochemistry*, 23: 835—845
- 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 等. 2008. 交通活动对公路两侧土壤与灰尘中重金属含量的影响 [J]. *环境科学学报*, 28(10): 1937—1945
- Guo G H, Lei M, Chen T B *et al*. 2008. Effect of road traffic on heavy metals in road dusts and roadside soils [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(10): 1937—1945 (in Chinese)
- 郭琳, 曾光明, 程运林. 2003. 城市街道地表物特性分析 [J]. *中国环境监测*, 19(6): 40—42
- Guo L, Zeng G M, Cheng Y L. 2003. Identity analysis of the surface sediment on the urban streets [J]. *Environmental Monitoring in China* [J], 19(6): 40—42 (in Chinese)
- 李崇, 李法云, 张营, 等. 2008. 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*, 17(2): 560—564
- Li C, Li F Y, Zhang Y *et al*. 2008. Spatial distribution characteristics of heavy metals in street dust in Shenyang city [J]. *Ecology and Environment*, 17(2): 560—564 (in Chinese)
- 李章平, 陈玉成, 杨学春, 等. 2006. 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*, 20(1): 114—138
- Li Z P, Chen Y C, Yang X C *et al*. 2006. Heavy metals contamination of street dusts in core zone of Chongqing municipality [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 20(1): 114—138 (in Chinese)
- 李海雯, 陈振楼, 王军, 等. 2007. 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*, 27(5): 803—809
- Li H W, Chen Z L, Wang J *et al*. 2007. Research of spatial variability of heavy metal pollution of dust in Shanghai urban area based on the GIS [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27(5): 803—809 (in Chinese)
- Manno E, Varrica D, Dongarra G. 2006. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily [J]. *Atmospheric Environment*, 40: 5929—5941
- Murakami M, Takada H. 2008. Perfluorinated surfactants (PFSs) in size-fractionated street dust in Tokyo [J]. *Chemosphere*, 63: 1—6
- Rasmussen P E, Subramanian K S, Jessiman B J. 2001. 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*, 267: 125—140
- 王利军, 卢新卫, 雷凯. 2007. 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*, 20(5): 35—38
- Wang L J, Lu X W, Lei K. 2007. The contents of arsenic and mercury and environmental risk assessment of street dusts in Baoji [J]. *Research of Environmental Science*, 20(5): 35—38 (in Chinese)
- 张慧敏, 章明奎. 2007. 杭州不同功能区道路灰尘中污染物的分布和有效性 [J]. *广东微量元素科学*, 14(12): 14—18
- Zhang H M, Zhang M K. 2007. The concentration and availability of pollutants in road dust from different functional zones of Hangzhou city [J]. *Guangzhou Weiliang Yuanxue Kexue*, 14(12): 14—18 (in Chinese)
- 张菊, 邓焕广, 陈振楼, 等. 2007. 上海市区街道灰尘重金属污染研究 [J]. *土壤通报*, 38(4): 727—731
- Zhang J, Deng H G, Chen Z L *et al*. 2007. Heavy metal pollution in the urban street dust of Shanghai city [J]. *Chinese Journal of Science*, 38(4): 727—731 (in Chinese)
- Zhang X M, Luo K L, Sun X Z *et al*. 2006. Mercury in the topsoil and dust of Beijing City [J]. *Science of the Total Environment*, 368: 713—722
- 赵其国, 史学正, 张甘霖, 等. 2007. 土壤资源概论 [M]. 北京: 科学出版社, 162—190
- Zhao Q G, Shi X Z, Zhang G L *et al*. 2007. *Soil Resource Introduction* [M]. Beijing: Science Press, 162—190 (in Chinese)
- 中华人民共和国农业部. 2006. NY/T 1121.10—2006和NY/T 1121.11—2006 中华人民共和国农业行业标准 [S]. 北京: 中华人民共和国农业部
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. 2006. NY/T 1121.10—2006 and NY/T 1121.11—2006 Agricultural profession standard of the People's Republic of China [S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (in Chinese)
- 赵永存, 汪景宽, 王铁宇, 等. 2002. 吉林公主岭土壤中砷、铬和锌含量的空间变异性及分布规律研究 [J]. *土壤通报*, 33(5): 372—376
- Zhao Y C, Wang J K, Wang T Y *et al*. 2002. Spatial variability and distribution pattern of arsenic, chromium and zinc contents in the soils in Gongzhuling area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 33(5): 372—376 (in Chinese)