

# 长株潭市区近地表灰尘中重金属分布污染研究

龙永珍, 邹海洋, 戴塔根

(中南大学 地学与环境工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:**在长沙、株洲、湘潭(即长株潭)地区系统采集近地表灰尘样品 155 件, 用 ICP-MS 法、聚类分析、相关分析、X 线衍射法及尼梅罗综合污染指数法等方法对其重金属的含量、空间分布特征、主要污染物来源及污染程度进行研究。研究表明:本区灰尘中 Cd, Cu, Pb 和 Zn 的平均含量分别为 29.93, 149.10, 926.40 和 1 759.00 mg/kg, 分别是长株潭土壤背景值的 57.56, 1.57, 24.31 和 19.19 倍; Cd, Cu, Pb 和 Zn 污染空间分布特征表现为在株洲、湘潭工业区、长沙及湘潭内环交通繁忙区严重, 尤其是与有色金属生产有关的工业区最为突出; 灰尘中较高的 Cu, Cd, Pb 和 Zn 主要源于有色金属工业生产及交通工具的应用; Cd, Pb 和 Zn 平均污染水平达到严重污染级别, 总体污染程度由大至小为 Cd, Pb, Zn 和 Cu; 灰尘中的 Cu, Cd, Pb 和 Zn 污染以重度污染和极度污染为主, 在进行城市规划和建设时, 应注意住宅区远离工业区。

**关键词:**灰尘; 重金属; 污染评价; 长株潭地区

中图分类号: X142

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)04-1633-06

## Heavy metal pollution in dust of Chang-Zhu-Tan city region

LONG Yong-zhen, ZOU Hai-yan, DAI Ta-gen

(School of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** 155 dust samples were collected around Chang-Zhu-Tan area, the levels of heavy metals in dust were determined, and the characteristics of spatial distributions and main sources of heavy metals were investigated. Moreover, the pollution assessment of heavy metals was conducted by way of ICP-MS, cluster analysis, correlation analysis and X-ray diffraction analysis. The results show that the average contents of Cd, Cu, Pb and Zn in dust are 29.93, 149.10, 926.40 and 1 759.00 mg/kg, which are 57.56, 1.57, 24.31 and 19.19 times of the soil background values respectively. The dusts are polluted by Cd, Cu, Pb, Zn which are much higher in the industrial estate and busy roads of Changsha and Xiangtan, particularly in industrial estate of non-ferrous metal production. The pollution of Cu, Cd, Pb and Zn is primarily due to the production of nonferrous metals industry and transport applications. The pollution of Cd, Pb, Zn and Cu in this region reaches severe pollution level and the pollution degree from large to small is Cd, Pb, Zn and Cu. Therefore, while working out an overall city plan for this region, residential areas should be away from industrial areas.

**Key words:** dust; heavy metal; pollution assessment; Chang-Zhu-Tan region

灰尘是由细干而成粉末的土或其他物质的粉粒所组成。它不同于土壤, 在一定的外动力条件下较易扬起, 一方面通过呼吸道和皮肤被人体吸收或直接摄入,

对人体健康产生危害; 另一方面, 在降水的冲刷作用下进入土壤、河流及地下水系, 对人类造成直接危害<sup>[1]</sup>。城市灰尘在城市中普遍存在, 是城市的重要

收稿日期: 2009-09-07; 修回日期: 2009-11-20

基金项目: 中国区调局项目(1212010310304)

通信作者: 邹海洋(1966-), 男, 湖南湘乡人, 博士后, 副教授, 从事环境地球化学研究; 电话: 0731-88877077; E-mail: zhy20040808@126.com

污染源,其主要化学成分可分为可溶性成分(大多数无机离子)、有机成分、微量元素和碳元素。目前,在城市灰尘中富集较明显且研究较多的常见微量元素包括 Cd, Cu, Pb 和 Zn 等重金属元素<sup>[2]</sup>。重金属元素是一种持久性有毒污染物,进入环境或生态系统后极难降解,可在介质中累积、存留,并参与其中的物质循环过程<sup>[3-4]</sup>。目前,人们对灰尘中重金属的研究主要集中在重金属含量、来源、空间分布规律及污染评价等方面<sup>[5-10]</sup>。就其来源来说, Napiera 等<sup>[8]</sup>认为英国大气环境中重金属污染主要来源于交通工具的使用; Swietlicki 等<sup>[9]</sup>利用元素的主成分分析方法对中欧地区气溶胶的污染源进行了研究,认为其金属污染物主要来源为钢铁厂或有色金属冶炼厂;史贵涛等<sup>[10]</sup>用 Pearson 相关分析和主成分分析法,对上海公园土壤和灰尘中重金属的积累进行分析,认为工业和交通污染其最主要的污染源;李海雯等<sup>[2]</sup>对上海城市灰尘重金属空间分布特征进行了研究,认为工业区、商业区以及交通繁忙区是重金属累积的主要区域<sup>[5]</sup>。长株潭地区灰尘污染的研究很少。长株潭地区位于东经 110°53′至 114°15′、北纬 26°3′至 28°40′范围内,包括长沙、株洲、湘潭 3 座城市,其中:长沙是湖南省省会,也是湖南省政治、经济、科技、文化中心和交通枢纽;株洲是中国的老工业基地,也是湖南省最大的工业城市,市内有亚洲最大的有色金属冶炼基地、硬质合金研发和制造基地,其硬质合金、铅、锌和二氧化硫等 10 多种工业品产量位居全国第一,电锌、电铅的出口量居全国首位;湘潭是湖南省乃至全国重要的工业基地。随着长株潭一体化进程的加快,城市生态系统不断扩大,对本区灰尘中重金属元素进行研究将是长株潭生态环境领域中不可忽视的问题。

## 1 样本布点及样品采集

□5:□ 上布置采样点,图上 GPS 定点位置误差不大于 2 mm;采用 GPS 定位,实测距离不大于 10 m。在长株潭城区以 2 km × 2 km 的网格划分采样单元,在近城区以 4 km × 4 km 的网格划分采样单元,包括商业区、工业区和办公区等,在典型工业区加密采样。于 2005 年 6 月 23—28 日,在每个采样站位内选取 3 个平行采样点,用毛刷和玻璃瓶采集中、低层居民楼二楼窗户上的灰尘样品,然后,将采来的 3 个样品等量均匀混合,作为 1 个采样站位的近地表灰尘样品<sup>[5]</sup>,共采集有效样品 155 个(每个样品质量 10 g),其中:长沙市 69 个样品,株洲市 45 个样品,湘潭市

41 个样品。将所有样品在实验室内自然干燥,用 1 mm 尼龙分样筛将样品过筛以剔除杂物,然后,放入聚乙烯塑料袋中密封保存<sup>[11]</sup>。

将所采样品于 35 °C 条件下烘干后,用玛瑙碾钵研磨成粉末,过 125 μm 尼龙网筛,测定 Cd, Cu, Pb 和 Zn 含量。样品中重金属元素用 HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 微波消解,仪器型号为 MPR-300/12S medium pressure rotor 微波处理系统;用 ICP-MS 法进行测定,仪器型号为美国热电 VG PQ EXCELL ICP-MS。测定方法:用意大利 Milestone ETHOS 天平准确称取 0.100 00 g 样品放入 Teflon 溶样罐中,用少量水湿润,加入 2 mL HNO<sub>3</sub> 预消化过夜,然后,加入 5 mL HF(40%)和 2 mL HClO<sub>4</sub> 进入微波消解,完全消解后,定量地转入干净的 100 mL PTFE 烧杯中;于 200 °C 恒温电热板上加热至近干,用 2 mL HClO<sub>4</sub> 去除 HF 2 次,再用 1 mL HNO<sub>3</sub> 去除 1 次;之后,转入 100 mL 新聚丙烯容量瓶中,用 2%的 HNO<sub>3</sub> 稀释至刻度,摇匀,待测,控制标样为 GBW 07401。试剂 Cd, Cu, Pb 和 Zn 单元素水溶液均为高纯溶液(北京化学试剂研究所生产);水是电阻为 18.4 MΩ的纯水。在重金属元素的分析测定中,采用国家标准土壤样品(GBW07401)进行全过程质量控制,相对标准偏差均小于 3%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 灰尘中重金属元素含量特征

本区 155 个灰尘样品中重金属元素 Cd, Cu, Pb 和 Zn 的平均含量分别为 29.93, 149.10, 926.40 和 1 759.00 mg/kg,与长株潭土壤背景值相比较,Cd, Pb 和 Zn 的富集度均较大,尤以 Cd 富集度最大,其富集度高达 57.56 倍,平均含量均高于纽约、汉城和香港<sup>[5]</sup>灰尘中的含量;长沙、湘潭、株洲灰尘中重金属元素含量差异明显,其中,株洲灰尘中重金属元素含量最高,湘潭含量次之,长沙含量最低。

从不同人为活动类型对重金属元素富集强度影响来看,灰尘中重金属元素含量最高的是冶炼厂,其次是交通繁忙区(市中心汽车站),城区灰尘中重金属元素含量明显比近城区的含量高,其中,Cd 在城区较近城区富集了 4 倍多,其他元素富集 1~2 倍(表 1)。

### 2.2 灰尘中重金属元素空间分布特征

不同功能区灰尘重金属含量见表 2。从表 2 可见:长株潭地区 Cd 的含量均明显高于上海市公园灰尘中 Cd 的含量及本区土壤背景值,其中,株洲工业区重金属含量最高均值为 114.70 mg/kg,长沙三环的重金属

表 1 典型区域灰尘样品重金属元素平均含量

Table 1 Average contents of heavy metal in dust of

地点(样本数)	typical region mg/kg			
	Cd	Cu	Pb	Zn
钢铁厂(4)	4.51	60.60	538.40	1 556.00
冶炼厂(4)	1 400.00	1 416.00	25 620.00	3 558.00
火力发电厂(4)	18.57	95.01	553.60	1 879.00
长沙、湘潭汽车站(4)	11.15	131.00	686.10	2 201.00
城区(82)	56.01	180.30	1 503.00	2 031.00
近城区(33)	13.30	76.33	551.40	1 690.00

含量最低, 其均值为 2.36 mg/kg; 除长沙三环的重金属 Cu 含量 40.41 mg/kg 低于本区土壤背景值外, 其余重金属含量均值均高于土壤背景值, 其中, Cu 含量最高的为株洲工业区均值 347.10 mg/kg; Pb 的含量是长株潭土壤背景值的 2.53~112.26 倍, 株洲工业区的 Pb 含量最高, 均值为 4 277.00 mg/kg, 长沙三环的 Pb 含量最低, 均值为 96.23 mg/kg, 除长沙二环、三环及外, 其余功能区的 Pb 含量均值均高于上海城市公园的 Pb 含量; Zn 的含量均高于长株潭土壤背景值, 是土壤背景值的 7.15~87.61 倍, 其中, 株洲工业区 Zn 含量最高, 均值为 5 280.00 mg/kg, 长沙三环 Zn 含量最低, 均值为 430.70 mg/kg。本区各个城市灰尘重金属的空间分布特征如下。

长沙从一环到三环(由城市中心到外围), 重金属元素含量呈下降趋势(表 2), Cd 含量由 6.10 mg/kg 下

降至 2.36 mg/kg, Cu 含量由 99.05 mg/kg 下降至 40.41 mg/kg, Pb 含量由 540.1 mg/kg 下降至 96.23 mg/kg, Zn 含量由 1 331.00 mg/kg 下降至 430.70 mg/kg, 远离城区, 也就是植被覆盖较高或交通及人口密度较低的地区, 重金属含量降低。

株洲市灰尘中重金属含量见图 1。可见: 株洲市灰尘中重金属含量较高, 样品均源自株洲东部的工厂测区, 且远离工业区, 重金属元素含量具有逐渐降低的趋势, 说明有色金属工业生产对灰尘中重金属元素含量具有重要的影响。

湘潭灰尘中重金属含量较高的地区主要为工厂集中区, 如其南部湘江左岸以及东部湘江右岸区域, 前者属于湘潭县易俗河工业开发区, 集中在水泥厂、氧化锌等冶炼厂; 后者也是开发区, 是包括冶炼、五金、印染等多种类型工厂的集中地。此外, 市中心的重金属含量也比湘潭大学、湖南科技大学等绿化率较高及远郊工业、交通影响较弱的地区样品中的重金属含量要高。

2.3 灰尘中重金属污染源分析

灰尘中重金属主要来源于土壤母质灰尘、大气沉降等自然源、汽车尾气、轮胎磨损以及工业排污等人为源<sup>[2]</sup>。灰尘又极易被扬起, 所以, 其分布与其扩散源有着密切的关系。通过 SPSS 软件对灰尘中 Cd, Cu, Pb 和 Zn 进行 Spearman 相关分析(见表 3)。可见: 株洲灰尘样品中 Cd-Zn, Cd-Pb 及 Pb-Zn 之间存在着显著的正相关关系, 相关系数分别为 0.909, 0.957 和 0.857; 湘潭灰尘样品中, 它们之间有一定的正相关性,

表 2 重金属在长株潭功能区中的平均含量

Table 2 Average contents of heavy metal in dust of Chang-Zhu-Tan faction areas

采样区 (样品数)	Cd		Cu		Pb		Zn	
	平均含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数	平均含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数	平均含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数	平均含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数
长沙一环(n=7)	6.10	0.17	99.05	0.11	540.10	0.63	1 331.00	0.08
长沙二环(n=24)	3.65	0.82	98.01	0.10	177.00	0.23	632.30	0.35
长沙三环(n=26)	2.36	0.44	40.41	0.07	96.23	0.54	430.70	0.42
湘潭商业区(n=10)	11.49	0.85	152.50	0.74	464.60	0.96	1 375.00	0.55
湘潭工业区(n=10)	16.48	0.73	132.50	0.98	688.60	0.32	2 167.00	0.58
株洲工业区(n=10)	114.70	1.34	347.10	0.88	4 277.00	0.89	5 280.00	1.29
株洲商业区(n=12)	41.01	0.07	160.60	0.12	1 213.00	0.36	2 262.00	0.48
株洲公园(工业区中心 n=6)	100.70	2.34	323.80	1.21	3 650.00	0.66	4 001.00	0.56
湘潭高校校园(n=12)	4.51	0.55	108.70	1.22	338.40	0.78	1 256.00	0.69
上海城市公园 <sup>[1]</sup> (n=44)	1.58		235.89		416.60		906.30	
长株潭土壤背景值(2003 年) <sup>[7]</sup>	0.52		95.00		38.10		60.27	

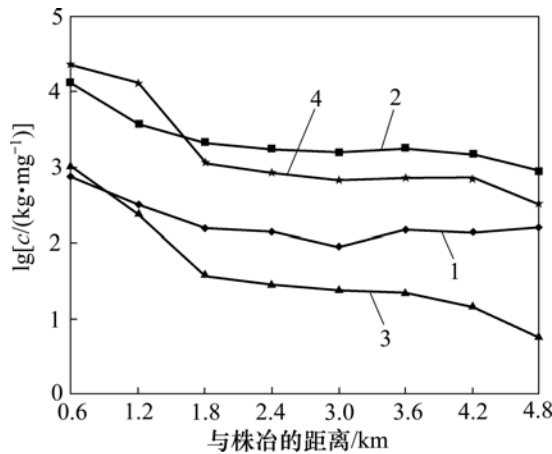


图 1 株洲冶炼厂由西往东灰尘重金属元素含量  
 Fig.1 Content of heavy metals in dust of Zhuzhou Smelter from west to east

表 3 长株潭城区灰尘重金属含量的相关性  
 Table 3 Relationships among contents of different heavy metals in Chang-Zhu-Tan region

城市 (样品数)	元素	Cu	Zn	Cd	Pb
长沙 (n=57)	Cu	1	0.335	0.173	0.470
	Zn		1	0.190	0.256
	Cd			1	0.473
	Pb				1
株洲 (n=31)	Cu	1	0.167	0.178	0.188
	Zn		1	0.909	0.857
	Cd			1	0.957
	Pb				1
湘潭 (n=20)	Cu	1	0.011	0.046	-0.134
	Zn		1	0.578	0.699
	Cd			1	0.608
	Pb				1

相关系数分别为 0.578, 0.608 和 0.699, 而长沙样品中, 其相关性相对不显著, 相关系数分别为 0.190, 0.473 和 0.256。李海雯等<sup>[2]</sup>认为灰尘中重金属元素相关关系显著, 说明此区灰尘在接受外界污染时可能存在一定的相似性, 或者有相同的污染源; 相关关系较显著, 说明此区灰尘重金属存在复合污染, 其重金属的来源有多元性和复杂性。株洲灰尘样品中 Cd-Zn, Cd-Pb 及 Pb-Zn 相关系数高, 说明它们之间存在相同的污染源。湘潭灰尘重金属元素含量间也有较高的相关系数, 说明湘潭灰尘重金属存在复合污染, 说明其重金属的来源有多元性和复杂性。

Carpenter 等<sup>[13-14]</sup>认为: 金属之间的相关性可能表

明其共同来源(自然源或人为源), 在进行重金属污染源研究时, 多金属共生可能是一个重要的考虑因素。在自然界特别是在原生矿床中, 铅锌具有密切的共生关系<sup>[13]</sup>, 而 Cd 是锌矿冶炼时的副产品。株洲是湖南最大的工业城市, 其中, 株洲冶炼厂成立于 1956 年, 是中国有色行业的国有大型一档企业, 以生产铅、锌系列产品为主, 并综合回收铜、金、银、铟、镉、铋等 10 余种稀有有色金属, 所以, 冶炼厂对株洲灰尘中重金属的影响较大。从图 1 也可看出: 距离冶炼厂越远, 其灰尘中重金属含量越低。

为了进一步了解有色金属冶炼对灰尘中重金属元素的影响, 对冶炼厂及其周边灰尘样品进行 X 线衍射分析, 结果如图 2 所示。从图 2 可见: 冶炼厂附近灰尘中矿物组成复杂, 除一般灰尘中常见的造岩矿物如长石、石英、云母外, 还可见闪锌矿、方铅矿、赤铁矿、菱镉矿(图 2 中谱线对应的为菱镉矿衍射峰)、硫镉矿等金属矿物, 且具有远离冶炼厂, 灰尘中造岩矿物含量增多, 有色金属矿物含量下降的特点。这进一步说明本区灰尘中重金属污染来源与有色金属有关的工厂有密切的关系。

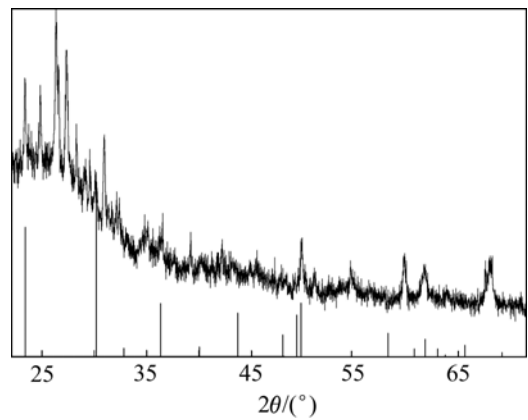


图 2 冶炼厂附近灰尘中菱镉矿 X 线衍射谱  
 Fig.2 X-ray diffraction pattern of otavite in dust near a smelter

对长沙、株洲、湘潭灰尘中的 Cd, Cu, Pb 和 Zn 进行聚类分析, 结果表明: 在 3 个市区的灰尘中, Cd, Cu, Pb 和 Zn 的聚类特征都有差别, 其中, 长沙与湘潭灰尘中的 Cd, Cu, Pb 和 Zn 聚类特征较相近, 而株洲灰尘则表现明显不同, 其 Pb 和 Zn 表现为一类, 这进一步说明株洲灰尘中重金属污染应与有色金属生产的铅锌矿关系密切。

从长沙灰尘中的 Cd, Cu, Pb 和 Zn 含量分布特征来看, 从三环向一环, 重金属含量递增。由于长沙是湖南省政治、经济、科技、文化中心, 随着长沙城市的发展, 一环内已基本没有与有色金属相关的工业企

业, 中心城区人口密度大, 交通流量也逐年增大, 所以, 可推断 Cd, Cu, Pb 和 Zn 主要源于车辆尾气和车轮磨损<sup>[2]</sup>。从表 1 可看出: 长沙、湘潭汽车站灰尘中 Cd, Cu, Pb 和 Zn 的含量明显高于长沙灰尘中的相应均值, 说明交通污染是影响长沙、湘潭 Cd, Cu, Zn 和 Pb 污染的一个重要因素。

湘潭灰尘中 Cd, Cu, Pb 和 Zn 分布特征为: 市中心区及与有色金属生产有关的工业区重金属含量较高, 重金属元素含量的相关系数介于株洲与长沙重金属元素含量的相关系数之间, 说明其污染源比较复杂: 与有色金属生产有关的工业区主要来源于工厂污染, 而市中心区可能与交通污染有关。

2.4 灰尘重金属污染评价

对介质中重金属的污染等级进行评价的方法有很多<sup>[15-17]</sup>, 我国近年来采用的方法有单因子法、综合污染指数法、聚类分析法、模糊数学法、层次分析法、因子克里格法等。这里采用单因子法及尼梅罗综合污染指数法来进行评价。

2.4.1 单因子评价法

单因子质量指数是介质中污染物的实测浓度与评价标准之比, 为环境质量污染指数, 即  $P_i = c_i / s_i$  (式中:  $P_i$  为灰尘中某一种重金属污染物的污染指数;  $c_i$  为灰尘中重金属污染物的实测浓度;  $s_i$  为灰尘中重金属污染物的评价浓度)。由于目前还未制定出针对城市生态环境的灰尘重金属含量标准, 因此, 为了更好地反映

灰尘中重金属的污染水平, 选择长株潭土壤环境背景值(2003 年)<sup>[12]</sup>作为参比的标准。根据区域生态地球化学评价指南(DD 2005—02)的要求, 污染分级方案如表 4 所示。

研究表明: 研究区内污染程度比较严重的元素为 Cd, 其次为 Pb 和 Zn, Cu 污染较轻。按照每种元素在各污染等级所占比例进行排序, 总体污染程度由大至小排序为 Cd, Pb, Zn 和 Cu; 城市总体污染严重程度由大至小排列为株洲、湘潭和长沙(表 5); 将样品中各元素的污染指数取平均值, 则 Cd, Pb 和 Zn 的平均污染指数分别为 57.56, 15.37 和 12.92, 达到严重污染级别; Cu 平均污染指数为 3.91, 达到重度污染级别。

2.4.2 尼梅罗综合污染指数法

采用尼梅罗综合污染指数法对介质重金属污染进行评价:

$$I_{ij} = \sqrt{\frac{(1/n \sum P_{ij})^2 + P_{ij\max}^2}{2}}$$

其中:  $I_{ij}$  为尼梅罗综合污染指数;  $P_{ij}$  为单元素标准化污染指数, 为单元素实测值与评价标准值之比;  $n$  为元素个数;  $P_{ij\max}$  为所有元素污染指数中的最大值。分别以 GB 15618—1995 三级标准和 2003 年长株潭土壤背景值标准对本区灰尘进行尼梅罗综合污染评价, 结果如表 6 所示。可见: 长株潭地区的灰尘重金属污染非常严重。

表 4 单因子指数质量模型元素污染程度分级表

Table 4 Metal pollution grades of single-factor index quality model

污染指数	< 1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~5.0	5.0
污染程度	未污染	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染

表 5 长株潭地区灰尘重金属元素的样本数

Table 5 Heavy metal single-factor assessment in dust of Chang-Zhu-Tan region

重金属	未污染			轻度污染			中度污染			重度污染			严重污染		
	长沙	株洲	湘潭	长沙	株洲	湘潭	长沙	株洲	湘潭	长沙	株洲	湘潭	长沙	株洲	湘潭
Cd	1	0	0	0	0	0	1	0	0	8	0	3	59	45	38
Cu	3	4	3	16	9	7	37	7	14	10	15	14	3	10	3
Pb	1	0	2	7	1	0	13	1	1	24	5	7	24	38	31
Zn	0	0	1	0	0	0	3	0	1	14	2	0	52	43	39

表 6 长株潭地区灰尘尼梅罗综合指数评价结果

Table 6 Heavy metal Nemerow integrated pollution index assessment in dust of Chang-Zhu-Tan region

评价标准	清洁区	轻度污染区	中度污染区	重度污染区	极度污染区
GB 15618—1995 三级标准	1.29	7.10	12.26	24.52	54.84
2003 年长株潭土壤重金属含量背景值	0	0.65	6.45	18.06	74.84

### 3 结论

(1) 长株潭灰尘 Cd, Cu, Pb 和 Zn 的含量较高, 其均值远远高于长株潭土壤背景值。

(2) 长株潭灰尘重金属含量的空间分布特征表现为: 城区含量大于近城区含量; 工业区含量大于商业区含量; 城市总体污染严重程度由大至小为株洲、湘潭和长沙。通过分析推测: 株洲灰尘重金属污染主要来源于有色金属工业生产, 长沙灰尘主要源于车辆尾气、轮胎摩擦等; 湘潭灰尘重金属污染来源比较复杂, 既有工厂污染, 也有交通工具污染。

(3) 用单因子评价法对长株潭灰尘重金属污染进行评价, 污染最严重的元素是 Cd, 污染最严重的城市是株洲, 其次是湘潭和长沙。长株潭灰尘总体污染很严重。

#### 参考文献:

- [1] 史贵涛, 陈振楼, 王利, 等. 上海城市公园灰尘重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(4): 40-43.  
SHI Gui-tao, CHEN Zhen-lou, WANG Li, et al. Heavy metal pollution and the ecological risk in dust of Shanghai urban park[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2006, 19(4): 40-43.
- [2] 李海雯, 陈振楼, 王军, 等. 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, 2007, 27(5): 803-809.  
LI Hai-wen, CHEN Zhen-lou, WANG Jun, et al. Research of spatial variability of heavy metal pollution of dust in Shanghai urban area based on the GIS[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(5): 803-809.
- [3] Manno E, Varrica D, Dongarrà G. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily[J]. Atmospheric Environment, 2006(30): 5929-5941.
- [4] 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.  
LI Chong, LI Fa-yun, ZHANG Ying, et al. Spatial distribution characteristics of heavy metals in street dust in Shenyang city[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 560-564.
- [5] Chutke N L, Ambulkar M N, Garg A N. An environmental pollution study from multielemental analysis of pedestrian dust in Nagpur city, Central India[J]. The Science of the Total Environment, 1995, 164: 185-194.
- [6] Tokalioglu E, 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): 2797-2805.
- [7] 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: 165-172.
- [8] Napiera F, D'Arcyb B, Jefferies C. A review of vehicle related metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the UK environment[J]. Desalination, 2008, 226(1/3): 143-150.
- [9] Swietlicki E, Krejci R. Source characterisation of the Central European atmospheric aerosol using multivariate statistical methods[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 1996, 109(110): 519-525.
- [10] 史贵涛, 陈振楼, 许世远, 等. 上海城市公园土壤及灰尘中重金属污染特征[J]. 环境科学, 2007, 28(2): 239-242.  
SHI Gui-tao, CHEN Zhen-lou, XU Shi-yuan, et al. Characteristics of heavy metal pollution in soil and dust of urban parks in Shanghai[J]. Environmental Science, 2007, 28(2): 239-242.
- [11] 施泽明, 倪师军, 张成江. 成都市近地表大气尘的地球化学特征[J]. 地球与环境, 2004, 32(3/4): 53-58.  
SHI Ze-ming, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang. The geochemical characteristics of air dust near the ground in Chengdu[J]. Earth and Environment, 2004, 32(3/4): 53-58.
- [12] 戴塔根, 吴堃虹, 邓吉秋, 等. 长株潭城市群区域地球区域地球化学评价[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2008: 88-99.  
DAI Ta-gen, WU Qian-hong, DENG Ji-qiu, et al. Ecosystem geochemistry assessment in city of Changsha, Zhuzhou and Xiangtan[M]. Changsha: Central South University Press, 2008: 88-99.
- [13] Carpenter D O, Arcaro K, Spink D C. Understanding the human health effects of chemical mixtures[J]. Environ Health Prospect, 2002, 110: 25-42.
- [14] Aelion C M, Davis H T, McDermott S, et al. Metal concentrations in rural topsoil in South Carolina: Potential for human health impact[J]. Science of the Total Environment, 2008, 402: 149-156.
- [15] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 128-135.  
LI Zuo-yong, DIN Jing, PENG Li-hong. Environmental quality assessment principles and methods[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 128-135.
- [16] 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.  
ZHANG Ju, CHENG Zhen-lou, XU Shi-yuan, et al. Lead pollution and its assessment in urban street dust of Shanghai[J]. Environmental Science, 2006, 27(3): 519-523.
- [17] Meza F D, Dela O M, Dela P M L. Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo, Sonora, Mexico[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(2): 276-288.

(编辑 陈灿华)