

中国大气颗粒物中金属元素环境地球化学行为研究

方凤满

安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241003

摘要: 大气颗粒物金属污染已成为目前大气污染的研究热点之一。文章梳理、分析归纳了中国近年来大气颗粒中金属元素的环境地球化学方面的研究。目前研究较多的是 Fe、Ca、Mg、Si 等地壳元素和 Cu、Pb、Cd、Zn、Hg 等污染元素; 大气颗粒物中对人体有害的 Cu、Pb、Cd、As、Zn 等污染较严重, 而 Cr、Mn、Co、Ni 等污染较轻。大气颗粒物中金属含量随时间分布变化显著, 总体上呈现冬季>秋季>春季>夏季的特点, 空间分布上一般北方燃煤城市大于南方一般城市; 城市内部一般工业区>交通区>居民区>郊区; 金属元素在细粒径颗粒($<2\ \mu\text{m}$)中, 粗颗粒($>2\ \mu\text{m}$)中低, 尤其以污染元素明显。污染元素与地壳元素的垂直分布规律差异较大。大气颗粒物中金属元素的富集程度与元素种类、区域类型、季节变化、粒径大小等有关。最后, 提出应加强大气颗粒物中金属元素空间分布差异、时间分布的尺度及差异性研究; 同时加强超细颗粒物的研究, 以便建立大气颗粒物金属元素与人类健康关系的风险模型。

关键词: 金属元素; 大气颗粒物; 分布规律; 环境活性与效应

中图分类号: X513; X142

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 04-0979-06

大气颗粒物中的金属污染物具有不可降解性, 并可通过呼吸进入人体, 造成各种人体机能障碍, 甚至引发各种疾病, 是影响人类健康的重要因素, 如 As、Cr、Ni、Pb 和 Cd 具有一定的致癌能力, As 和 Cd 对人体有潜在致畸作用, 而 Pb 和 Hg 对胎儿有毒性作用。目前频繁的交通运输、北方的风沙尘、密集的工业生产和人类活动导致城市大气遭受严重的金属元素污染^[1-6], 使得大气颗粒物金属元素行为研究成为中国环境科学者所关注的热门课题, 并在大气颗粒物金属元素来源、分布特征、富集规律、环境活性、迁移转化等方面积累了较多的研究成果^[6-11]。本文对中国近年来大气颗粒物金属元素的相关研究进行归纳、梳理, 找出存在的问题, 为今后的研究指明方向。

1 大气颗粒物中金属元素含量水平

1.1 大气颗粒物中主要金属元素

根据大气颗粒物中金属元素的来源差异, 将其分为地壳元素和污染元素两大类。地壳元素主要来自土壤分化、建筑工地地面扬尘、沙尘等, 与地表的分化作用关系密切, 包括 Al、Fe、Mn、Ca、Mg、Na、Ti、K、Si 等。污染元素主要由于人类的工业活动、矿业活动、燃煤燃烧、汽车尾气等人为污染造成, 包括 Hg、Cu、Pb、Cr、As、Zn、Se、Cd 等。目前我国对地壳元素研究较多的是 Fe、Ca、Mg、Si, 污染元素研究较多的是 Cu、Pb、Cd、Zn、Hg 等。

1.2 大气颗粒物中金属元素含量

我国对大气颗粒物中金属元素的研究区域主

要集中在北京、广州、南京、成都、上海等大中城市, 而针对小城市以及农村地区的研究较缺乏。各地由于元素背景值、气候规律、人类活动规模等因素的差异, 导致大气颗粒物金属元素含量差异明显。城市地区明显大于农村地区, 北方城市采暖期的大气颗粒物金属污染较为突出, 尤其是人为污染的元素具有明显的富集特点, 如太原燃煤城市大气颗粒物中的 As 和 Se 含量较高; 在不同城市之间, 城市的区位、功能等不同导致金属含量存在显著差异(表 1)。沈阳作为工业城市与北方燃煤城市, 大气颗粒物中的重金属含量相对较高。总体上, 中国大气颗粒物中对人体有害的 Cu、Pb、Cd、As、Zn 等污染较严重, 而 Cr、Mn、Co、Ni 等污染较轻。

2 大气颗粒物中金属元素分布规律

2.1 时间分布规律

2.1.1 季节变化

由于气候变化、人为因素以及来源不同, 金属元素在大气颗粒物中的时间分布变化显著, 总体上呈现冬季>秋季>春季>夏季的特点^[4,10,13]。原因为: ①中国大部分城市夏季为湿季, 湿沉降较强; ②夏季地表植被茂盛, 土壤源相对减弱; ③冬季寒冷, 燃煤量较大, 尤其是北方城市, 人为源排放的污染物较多。Hao 等^[13]报道青岛市气溶胶中的微量元素平均值最大均出现在冬季, 而夏季最低。不同元素的季节分布规律不同, 北方地区尤其是受沙尘影响的地区, 地壳元素如 Al、Si、Mg、Ca、Fe 等在春季表现出较高的浓度^[4], 而由于居民供暖时间长, 如北京、长春等城市 Zn、Hg、As 等污染元素在采

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901258); 安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2009A137)

作者简介: 方凤满(1974年生), 女, 博士, 主要从事表生环境中污染物的迁移与转化研究。E-mail: ffm1974@mail.ahnu.edu.cn

收稿日期: 2010-01-06

表 1 不同区域大气颗粒物中金属元素质量浓度
Table 1 Concentrations of metal elements in atmospheric particles from different areas in China

城市	介质	Al μg·m ⁻³	Fe μg·m ⁻³	Mn μg·m ⁻³	Cu μg·m ⁻³	Pb μg·m ⁻³	Zn μg·m ⁻³	Ca μg·m ⁻³	Cr ng·m ⁻³	Cd ng·m ⁻³	As ng·m ⁻³	Ni ng·m ⁻³
沈阳 ^[12]	TSP	/	/	0.740	0.397	3.434	11.738	/	78.65	1043.8	/	30.33
锦州 ^[12]	TSP	/	/	0.348	0.191	0.263	0.585	/	94.15	4.2	/	22.84
葫芦岛 ^[12]	TSP	/	/	0.129	0.059	0.063	0.067	/	69.58	1.75	/	12.91
青岛 ^[13]			7.466	0.210	0.073	0.701	0.701			10		26.2
北京 ^[3]	TSP	2.731	3.308	0.103	0.105	0.265	0.503	5.542	169.3	/	77.1	26.3
重庆 ^[14]	PM10	3.962	6.037	0.252	0.081	0.327	0.882	7.159	156.4	15.6	36.7	25.25
沈阳 ^[15]	PM10	/	/	0.040	0.056	0.346	0.388	/	35.5	1.87	30.2	26.9
哈尔滨 ^[10]	PM10	4.19	2.59	0.10	0.09	0.20	0.46	3.75	90.01	/	120.8	80.7
大连 ^[15]	PM10	/	/	0.075	0.032	0.265	0.273	/	36.8	1.94	18.4	10.2
广州 ^[16]	PM2.5	2.081	1.457	0.063	0.057	0.202	0.505	/	/	4.431	/	6.454
南京 ^[17]	PM2.5	3.30	2.80	0.05	/	0.49	0.83	4.30	/	/	30.5	/
北京 ^[2]	PM2.5	/	0.897	0.046	0.042	0.137	0.239	1.643	/	/	27.6	/

注: /无数据

暖期明显高于非采暖期^[6,18];北京大气颗粒物中采暖期 As、Se、Mo、Cd 浓度较采暖前上升 2 倍以上,采暖期燃烧源的贡献增强,地壳源的贡献减弱^[2]。而在南方地区,地壳元素的季节变化并不明显,而污染元素分布则呈现一定的规律性。如沈轶^[19]报道上海市大气 PM2.5 中的 Cu、Zn、Pb 等元素浓度的季节变化具有一定的规律性,而 Fe 和 As 元素浓度的季节变化规律并不明显。

2.1.2 日变化

大气颗粒物中金属含量存在明显的日变化特征,不同元素的日变化特征不同。地壳元素的日变化特征不明显^[14],而人为污染元素受日照、降雨、人类活动、气候条件等因素的影响,日变异显著^[20]。李晓和杨立中^[20]报道成都市东郊大气颗粒物中 Pb、Cd、Hg、As 等在 5:00~9:00 和 17:00~21:00 两个时段呈现双峰,其变化与人为活动、大气对流和湍流活动以及酸雨等因素有关。元素本身的性质也影响元素的时间变化规律,如 Zn 受污染源和气象条件的影响,日变化最剧烈。张丹等^[14]报道重庆市大气颗粒物中大部分金属元素的浓度值都是晴天偏高,尤其是污染元素如 Zn、Pb 等在晴天与雨天的比值超过了 2 倍,而地壳元素 Na、Al、Si、Mg 的比值则相对较低,说明雨水对污染元素的洗脱效果明显大于地壳元素。杨勇杰等^[21]报道泰山顶大气气溶胶中 Na、Ca、Pb、Mg、Fe、Mn 等白天的浓度明显大于夜间,说明区域输送和大气边界层对流混合对气溶胶金属元素浓度变化具有明显影响。

2.2 空间分布规律

受气象条件的影响及人为源释放的影响,大气颗粒物中不同金属元素的空间分布差异很大。地壳元素的浓度在城市区与非城市区的差异不大,而污染元素的浓度城市地区由于受工业污染源的影响

要远高于非城市区。一般来说,北方燃煤城市大气颗粒物中金属元素含量明显高于南方一般城市。重工业城市和大的综合型城市的大气颗粒物中金属元素污染较中小型轻工业城市以及农村地区严重。大气颗粒物中金属元素含量在城市内部不同功能区差异较大,一般工业区>交通区>居民区>郊区。杨水秀^[22]报道贵阳市大气降尘中重金属含量由高到低排序是:工业区,商业区,混合区,清洁区。陶俊等^[23]报道重庆市大气颗粒物重金属含量在人群密集区和工业活动频繁的区域明显高于其他区域,说明城市重金属主要源于人为因素。元素的空间分布充分体现了与污染源地域分布的一致性。由于城市扩张、乡镇发展等原因,城市大气金属污染目前已呈现出郊区化趋势。

2.3 粒径分布规律

大气颗粒物中的金属浓度总体上表现出在细颗粒(<2 μm)中高,粗颗粒(>2 μm)中低的特点。大约 75%~90%的重金属均富集在 PM10 上,粒径越小,金属含量越高,对人类健康威胁更大。大气颗粒物在不同粒径上的分布规律受多种因素的影响,如元素的性质、来源、动力学特征、形成条件等^[24]。挥发性元素在粗细粒子中均有富集,但更容易富集在小于 1 μm 的细颗粒物上进入人体对人类造成危害。污染元素比地壳元素在细颗粒物上的累积比例大得多。并且细颗粒物能随大气进行远距离迁移,导致区域性污染。林俊等^[6]报道上海市大气颗粒物中来源于自然源(如土壤扬尘)的 Ca 和 Ti 主要分布于粗粒径上(>2 μm),Cr, Mn, Ni, Zn, Cu, Pb 主要分布于 0.1~1.0 μm 细颗粒物上。徐宏辉等^[25]报道北京市颗粒物中金属的粒径分布主要由排放源的类型决定,来自于土壤风沙尘和建筑尘等排放源的 Ca、Fe、Al、Mg 等在 3.3~5.8 μm(粗粒子)

的粒径范围出现峰值,来自于生物质燃烧和燃煤等排放源的 K、Pb、As、Cd 在 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ (细粒子) 的粒径范围出现峰值。Zn、Cu 和 Ni 在 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 和 $3.3 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 的粒径范围出现双峰; Na, Mn, V 在各粒径分布比较均匀,是自然来源和人为污染共同作用的结果。

2.4 垂直分布规律

气溶胶中不同元素在近地层的垂直分布有各自的特征,影响因子主要有气溶胶排放源的类型、气溶胶的粒径分布、城市下垫面的类型、城市的湍流输送特征、气象条件等。一般距离地面越高,大气颗粒物中金属元素浓度越低,表明地面是该金属元素的来源或主要来源,反之,随距离增高,金属元素浓度越高,表明人为活动释放是该元素的主要来源。李尉卿等^[27]报道郑州市大气颗粒物中来源于生活燃气、金属冶炼、化工产品的制造和提纯等活动的 As、Cd、Pb、Se、Zn 等元素含量随高度的增加而增加,主要因这些元素随着烟气或烟尘排放、挥发或蒸发到高于近地层的大气中,被边界层的大气气溶胶吸附,而被富集、滞留在大气边界层下层的细粒子中。而来源于地壳分化的 Al、Ca、Co、Cu、Fe 等地壳元素则相反,其含量随高度的增加而降低,且变化幅度不明显。

3 大气颗粒物中金属元素环境行为及效应

3.1 赋存形态及环境活性

不同化学形态的金属元素具有不同的化学活性和生物可利用性。大气颗粒物金属元素对环境的危害首先取决于其化学活性,其次才取决于其含量。目前国内主要采用 Tesseir 的连续化学浸提法将大气颗粒物中的金属形态分为:交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机态、残渣态等五种形态。一般而言,可交换态和碳酸盐态容易被生物利用,对人类和环境危害较大,铁锰氧化物结合态和有机结合态较为稳定,在外界条件变化时也可释放出来,残渣态非常稳定,几乎不被利用。当大气环境条件发生改变,颗粒物上的金属元素可转化成不同的形态并溶出,对环境及人体产生危害。

影响金属元素在环境中活性的因素主要有:金属元素本身的性质、粒径大小、元素来源、外界环境条件等。大气颗粒物中各金属元素的环境活性差异很大,总体上,Cu、Pb、Zn、As 环境活性较高,Cd、Cr 环境活性较低。冯素萍等^[28]报道济南市大气颗粒物中 Cu、Pb、Zn、Cr、Mn 在不同区域中的形态分布差别较大,以残渣态为主。来源于自然源的金属元素主要以残渣态存在,而来自于人为源的元素环境活性较高。颗粒粒径分布是影响重金属环境活性的重要因素,由于粒径小,比表面积大,其

中的有毒有害物质往往比大颗粒物呈现更大的活性和毒性^[29]。可能与金属特性有关,不同元素在不同粒径上的活性差异较大,Cu、As 的环境活性随粒径增加而降低,Zn 的环境活性与粒径关系不明显。Cd、Cr 的环境活性在各粒径中无明显变化。大气颗粒物粒径越小,越容易被人体吸收,因此重金属化学形态的分布与粒径的关系研究受到关注。

3.2 富集程度

金属元素在大气颗粒物中的富集程度与区域环境、元素性质、来源、季节、颗粒粒径等因素有关。不同金属元素在各功能区的富集特征不同,人为源释放的污染元素比地壳元素有较高的富集因子,尤其是在细颗粒物上和冬季。金属元素富集因子存在以下规律:①元素差异。仅受地面扬尘等自然因素影响的地壳元素富集系数接近1,如K、Ti、V、Co;受周边土壤及人为作用双重影响的元素如Na、Mg、Cr、Mn、Fe、Ni、As,其富集系数往往在1~10之间;来自人为污染源的污染元素的富集因子值往往大于10,如Cu、Zn、Pb等。②区域差异。元素富集特征因人类活动的强度和区域环境特征不同而存在空间分布规律^[30]。地壳元素在各功能区的富集程度差异不大;污染元素随着功能区的差异、人类活动的强度而存在很大的差异。③季节差异。不同元素的富集程度存在季节差异,污染元素的富集系数冬季基本都大于夏季。主要原因因为不同地区元素的来源不同,不同季节人们的出行和工业生产活动不同,导致季节差异。如天津市大气PM10中Pb、Cu、Co受人们出行和工业活动排放等的影响,非采暖季富集度最高,Zn元素富集系数采暖季>非采暖季>风沙季,可能与采暖季煤炭的燃烧有关。Na、Ca、Cr、Mn、Ni等表现出各季之间有明显差别^[30]。杨复沫等^[31]报道北京大气细颗粒物中金属元素的富集因子均在春季最低,反映了其主要排放源的季节性变化。④粒径差异。金属元素在细粒径颗粒物上的富集因子明显大于粗颗粒物上,尤其以人为源污染元素的差异显著。林俊等^[6]报道上海市大气颗粒物Cr、Ni、Cu、Zn、Pb的富集因子随粒径减小而增大。Pb在超细颗粒物上($<0.1 \mu\text{m}$)的富集因子达到2 023.7~2 244.2。

3.3 环境效应

大气颗粒物可通过干湿沉降进入地表或水体中,然后通过生物化学过程,将金属元素带入动植物体内,最终通过食物链进入人体。在很多工业区,大气沉降是生态系统中金属元素沉积的主要因素^[32]。大气颗粒物附着的重金属量与土壤中累积的重金属量呈一定正相关性,说明在颗粒物污染严重的地区,由大气沉降输入到土壤中的重金属不能忽

视。余涛等^[12]报道沈阳市典型地区 TSP 中 Pb、Cu、Cr 的含量与土壤中的含量显著正相关, 其中 Cd、Pb 元素在 TSP 和土壤中的含量相关系数分别达 0.709 和 0.715, 但是 Mn 在 TSP 和土壤之间的相关性不高, 这 and 不同元素的沉降特性有关, 同时, 高金属含量的大气颗粒物还会沉降在农作物上, 对农作物带来生态危害。赵珂^[33]报道南京市大气降尘中 Ni 大约有 32% 沉降到厂址周围约 4 km 范围内的土壤中。大气颗粒物中金属元素在土壤中的累积效应与大气颗粒物中金属元素的含量、降水、元素本身特性、地表特征、周边环境等多种因素有关。笔者曾报道长春市森林土壤对大气颗粒汞沉降的富集能力较强^[34]。杨勇杰等^[7]报道长春市大气 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 大气年干湿沉降量的平均值明显高于北美和欧洲, 且 As、Cd 和 Cr 在采暖期的日均干湿沉降量高于非采暖期; Zn 在表层土壤中的累积最明显。冬季京津冀地区大气颗粒物中 Al、Fe、Mn、K、Na、Ca、Mg 等地壳元素干沉降通量明显高于 Cu、Pb、Cr、Ni、V、Zn 等人为源元素^[35]。同时, 大气重金属污染也容易造成植物叶片中重金属的富集^[36]。

4 研究展望

目前在大气颗粒物中金属元素来源、分布与积累、环境活性、迁移转化等方面取得了很多成果, 但与国外相比, 在研究的范围、内容及方法上还比较局限, 尤其在对人体健康效应和时空尺度方面还存在很多不足。

(1) 大气颗粒物中金属元素的环境地球效应, 特别是对人体健康的影响已成为科学家们关注的问题, 但对于金属在颗粒物中的状态结构与环境行为的关系, 转化机制, 对人类健康、动植物生理生态等方面研究不深入。气候要素和环境条件的改变对金属迁移转化产生重要影响, 该领域的研究对深入理解其生态环境效应具有非常重要的意义。

(2) 国外长时间尺度的连续研究以及微观尺度的变化研究值得国内借鉴^[37-40]。如 Morawska 等^[37]报道大气颗粒物中金属元素的含量在工作日与周末存在显著的差异, Colombo 等^[38]报道大气颗粒物中金属元素含量白天与晚上差异显著。因此, 应加强大气颗粒物中金属元素空间分布特征及差异性、时间分布的尺度及差异性研究。

(3) 大量关于 TSP 和 PM₁₀ 及其组成浓度已成为国内外大城市常规监测项目。因细颗粒物对人类健康的威胁更大, 国外对于细颗粒物如 PM₁ 及其成分的分析也逐渐成熟^[41]。中国未来研究应侧重于超细颗粒物的研究, 以便建立大气颗粒物金属元素与人类健康关系的风险模型。

参考文献:

- [1] YUE W S, LI X L, LIU F, et al. Characteriation of PM_{2.5} in the ambient air of Shanghai city by analyzing individual particles[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368: 916-925.
- [2] 杨勇杰, 王跃思, 温天雪, 等. 采暖期开始前后北京大气颗粒物中化学元素特征及来源[J]. *环境科学*, 2008, 29, 11: 6722-6726.
YANG Yongjie, WANG Yuesi, WEN Tianxue X, et al. Characteristics and sources of elements of atmospheric particles before and in heating period in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2008, 29, 11: 6722-6726.
- [3] 王开燕, 张仁健, 王雪梅, 等. 北京市冬季气溶胶的污染特征及来源分析[J]. *环境化学*, 2006, 25(6): 776-780.
WANG Kaiyan, ZHANG Renjian, WANG Xuemei, et al. Analysis of aerosol characteristics and sources in winter over Beijing[J]. *Environmental Chemistry*, 2006, 25(6): 776-780.
- [4] 吕森林, 邵龙义, 吴明红, 等. 北京 PM₁₀ 中化学元素组成特征及来源分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 36(5): 684-688.
LV Senlin, SHAO Longyi, WU Minghong, et al. Characteristics of chemical elements in Beijing PM₁₀ and their source apportionment[J]. *Journal of China University of Mining and Technolgy*, 2006, 36(5): 684-688.
- [5] XIE R K, HANS M S, GRETHE W, et al. Heavy coal combustion as the dominant source of particulate pollution in Taiyuan, China, corroborated by high concentrations of arsenic and selenium in PM₁₀[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370: 409-415.
- [6] 林俊, 刘卫, 包良满. 上海市郊区大气细颗粒和超细颗粒物中元素粒径分布研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(4): 982-987.
LIN Jun, LIU Wei, BAO Liangman. Elemental size distribution of airborne fine and ultrafine particulate matters in the suburb of Shanghai China[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(4): 982-987.
- [7] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥. 长春市城区重金属大气干湿沉降特征[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(1): 28-34.
YANG Zhongping, LU Wenxi, LONG Yuqiao. Atmospheric dry and wet deposition of heavy metals in Changchun City, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(1): 28-34.
- [8] YANG Y J, WANG Y S, WEN T X et al. Elemental composition of PM_{2.5} and PM₁₀ at Mount Gongga in China during 2006[J]. *Atmospheric Research*, 2009, 93: 801-810.
- [9] 周震峰, 刘康, 孙英兰. 苏南农村地区大气 PM_{2.5} 元素组成特征及其来源分析[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(3): 24-29.
ZHOU Zhenfeng, LIU Kang, SUN Yinglan. Characteristics of elements in PM_{2.5} and sources analysis of PM_{2.5} in rural areas of southern Jiangsu province[J]. *Research of Environmental Science*, 2006, 19(3): 24-29.
- [10] 袁春欢, 王琨, 师传兴, 等. 哈尔滨市空气中 PM₁₀ 的元素组成特征分析[J]. *环境保护科学*, 2009, 35(1): 1-3.
YUAN Chunhuan, WANG Kun, SHI Chuanxing, et al. Characteristics analysis of elements contained in air suspended particles in Harbin[J]. *Environmental Protection Science*, 2009, 35(1): 1-3.
- [11] 韩力慧, 庄国顺, 程水源, 等. 北京地面扬尘的理化特性及其对大气颗粒物污染的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 1-8.
HAN Lihui, ZHUANG Guoshun, CHENG Shuiyuan, et al. Characteristics of re-suspended road dust and its significant effect on the air-borne particulate pollution in Beijing[J]. *Environmental Science*,

- 2009, 30(1): 1-8.
- [12] 余涛, 程新彬, 杨忠芳, 等. 辽宁省典型地区大气颗粒物重金属元素分布特征及对土地质量影响研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 146-154.
- YU Tao, CHENG Xinbing, YANG Zhongfang, et al. Distributional characteristics of heavy metal elements in atmospheric particulate matter and their impact on land quality in Liaoning province[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(5): 146-154.
- [13] HAO Y C, GUO Z G, YANG Z S, et al. Seasonal variations and sources of various elements in the atmospheric aerosols in Qingdao, China[J]. Atmospheric Research, 2007, 85: 27-37.
- [14] 张丹, 张卫东, 蒋昌潭, 等. 重庆市春季大气中PM10元素污染特征[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(5): 38-40.
- ZHANG Dan, ZHANG Weidong, JIANG Changtan, et al. Element pollution on feature of PM10 in spring of Chongqing[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(5): 38-40.
- [15] 杜刚. 辽宁省大气可吸入颗粒物中重金属及多环芳烃污染特征研究[J]. 环境保护科学, 2007, 33(2): 1-3.
- DU Gang. Study on pollution characteristic of heavy metal elements and PAHs in absorbable particulate matter of Liaoning province[J]. Environmental Protect Science, 2007, 33(2): 1-3.
- [16] 冯茜丹, 党志, 黄伟林. 广州市秋季PM2.5中重金属的污染水平与化学形态分析[J]. 环境科学, 2008, 29(3): 569-575.
- FENG Xidan, DANG Zhi, HUANG Weilin. Pollution level and chemical speciation of heavy metals in PM2.5 during autumn in Guangzhou city[J]. Environmental Science, 2008, 29(3): 569-575.
- [17] 樊曙先, 樊建凌, 郑有飞, 等. 南京市市区与郊区大气PM2.5中元素含量的对比分析[J]. 中国环境科学, 2005, 25(2): 146-150.
- FAN Shuxian, FAN Jianlin, ZHENG Youfei, et al. Compared analysis of element content in atmospheric PM2.5 in Nanjing urban and suburban area[J]. China Environmental Science, 2005, 25(2): 146-150.
- [18] FANG F M, WANG Q C, LI J F. Urban environmental mercury in Changchun, a metropolitan city in northeastern China: source, cycle, and fate[J]. Science of the Total Environment, 2004, 330(1-3): 159-170.
- [19] 沈轶, 陈立民, 孙久宽, 等. 上海市大气PM2.5中Cu、Zn、Pb、As等元素的浓度特征[J]. 复旦大学学报, 2002, 41(4): 405-408.
- SHEN Yi, CHEN Liming, SUN Jiukuan, et al. Concentration feature of element Cu, Zn, Pb, As, et al in PM(2.5) of Shanghai atmosphere[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2002, 41(4): 405-408.
- [20] 李晓, 杨立中. 成都市东郊TSP及Pb、Cd、Hg、As浓度日变化规律研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(3): 35-38.
- LI Xiao, YANG Lizhong. The study on atmosphere particle in eastern suburb of Chengdou[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2004, 15(3): 35-38.
- [21] 杨勇杰, 王跃思, 徐宏辉, 等. 泰山顶大气气溶胶中金属元素的特征分析[J]. 分析测试学报, 2008, 27(4): 390-395.
- YANG Yongjie, WANG Yuesi, XU Honghui, et al. Characteristics of metallic elements of atmospheric aerosol at the summit of Mount Tai[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2008, 27(4): 390-395.
- [22] 杨水秀. 贵阳市大气降尘中某些金属元素分布状况初探[J]. 贵州环保科技, 2002, 8(1): 13-19.
- YANG Shuixiu. Study on some metal elements distribution in atmospheric dustfall in Guiyang[J]. Guizhou Environmental Protection Science and Technology, 2002, 8(1): 13-19.
- [23] 陶俊, 陈刚才, 赵琦, 等. 重庆市大气TSP中重金属分布特征[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(12): 15-18.
- TAO Jun, CHEN Gangcai, ZHAO Qi, et al. Analysis of heavy metals character in the TSP in Chongqing[J]. Chongqing Environmental Science, 2003, 25(12): 15-18.
- [24] 戴塔根, 罗莹华, 梁凯. 重金属在不同粒径PM10中的含量与形态[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(4): 87-91.
- DAI Tageng, LUO Yinghua, LIANG Kai. Contents and form of heavy metal in PM10 of different diameters[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(4): 87-91.
- [25] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京市大气气溶胶中金属元素的粒径分布和垂直分布[J]. 环境化学, 2007, 26(5): 675-679.
- XU Honghui, WANG Yuesi, WEN Tianxue, et al. Size distributions and vertical distributions of metal elements of atmospheric aerosol in Beijing[J]. Environmental Chemistry, 2007, 26(5): 675-679.
- [26] 谢华林, 张萍, 贺惠, 等. 大气颗粒物中重金属元素在不同粒径上的形态分布[J]. 环境工程, 2002, 20(6): 55-57.
- XIE Huelin, ZHANG Ping, HE Hui, et al. Distribution of heavy metal elements in the different diametral atmospheric particulate matters[J]. Environmental Engineering, 2002, 20(6): 55-57.
- [27] 李尉卿, 毛晓明, 李舒, 等. 郑州市近地层1.5和40米处大气气溶胶中微量元素及晶体物质的分布[J]. 现代科学仪器, 2007, 1: 92-95.
- LI Weiqing, MAO Xiaoming, LI Shu, et al. Vertical distributing of microelements and crystalloids of aerosol in atmosphere a near ground layer of Zhengzhou City[J]. Modern Scientific Instruments, 2007, 1: 92-95.
- [28] 冯素萍, 赵祥峰, 唐厚全, 等. 大气颗粒物中元素Cu、Pb、Zn、Cr、Ni和Mn的形态分析[J]. 山东大学学报: 理学版, 2006, 41(4): 137-141.
- FENG Suping, ZHAO Xiangfeng, TANG Houquan, et al. Speciation analysis of Cu, Pb, Zn, Cr, Ni and Mn in TSP[J]. Journal of Shandong University, 2006, 41(4): 137-141.
- [29] NEL A, XIA T, MADLER L, et al. Toxic potential of materials at the nanolevel[J]. Science, 2006, 311: 823-829.
- [30] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 天津市PM10中元素的浓度特征和富集特征研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(7): 49-53.
- JI Yiaqing, ZHU Tan, FENG Yingchang, et al. Concentration and enrichment characteristics of elements in PM(10) of Tianjin[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(7): 49-53.
- [31] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京大气PM2.5中微量元素的浓度变化特征与来源[J]. 环境科学, 2003, 24(6): 33-37.
- YANG Fumo, HE Kebing, MA Yongliang, et al. Characteristics and sources of trace elements in ambient PM2.5 in Beijing[J]. Environmental Science, 2003, 24(6): 33-37.
- [32] 倪刘建, 张甘霖, 杨金玲, 等. 钢铁工业区降尘对周边土壤的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 637-642.
- NI Liujian, ZHANG Ganlin, YANG Jinling, et al. Effects of atmospheric dust on soils in industrial zones[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 637-642.
- [33] 赵珂. 大气降尘对土壤重金属累积量估算方法探讨-以重庆市綦江县永新冶炼厂为例[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(11): 55-58.
- ZHAO Ke. Discussions on the method of estimating accumulated-quantity of heavy metal in soil caused by dustfall-as Yongxin smelt factory an example in Qijiang county of Chongqing[J]. Envi-

- ronmental Science and Management, 2007, 32(11): 55-58.
- [34] FANG F M, WANG Q C, LI J F. Atmospheric particulate mercury concentration and its dry deposition flux in Changchun City, China[J]. Science of the Total Environment, 2001, 281: 229-236.
- [35] 潘月鹏, 王跃思, 杨勇杰, 等. 区域大气颗粒物干沉降采集及金属元素分析方法[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 553-559.
- PAN Yuepeng, WANG Yuesi, YANG Yongjie, et al. Determination of Trace Metals in Atmospheric dry deposition with a heavy matrix of PUF by inductively coupled plasma mass spectroscopy after microwave digestion[J]. Environmental Science, 2010, 31(3): 553-559.
- [36] 庄树宏, 王克明. 城市大气重金属(Pb, Cd, Cu, Zn)污染及其在植物中的富积[J]. 烟台大学学报, 2000, 13(1): 31-37.
- ZHUANG Shuhong, WANG Keming. Study on the relationship between atmospheric heavy metal pollution(Pb, Cd, Cu, Zn) and its accumulations in leaves of urban trees[J]. Journal of Yantai University, 2000, 13(1): 31-37.
- [37] MORAWSKA L, JAYARATNE E R, MENGENSEN K, et al. Differences in airborne particle and gaseous concentrations in urban air between weekdays and weekends[J]. Atmosphere Environment, 2002, 36: 4375-4383.
- [38] COLOMBO J C, LANDONI P, BILOS C. Sources, distribution and variability of airborne particles and hydrocarbons in La Plata area, Argentina[J]. Environment Pollution, 1999, 104(2): 305-314.
- [39] MARIA R, ROSA C, MARIA M, et al. Trace elements in daily collected aerosol: Level characterization and source identification in a four-year study[J]. Atmospheric Research, 2008, 89: 206-217.
- [40] SAMUEL M, VERNON M, DHARMARAJ R, et al. Seasonal variation of heavy metals in ambient air and precipitation at a single site in Washington, DC[J]. Environmental Pollution, 2008, 155: 88-98.
- [41] KARANASIOU A A, SITARASI E, SISKOS P A, et al. Size distribution and sources of trace metals and n-alkanes in the Athens urban aerosol during summer[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(11): 2368-2381.

Research on environmental geochemistry of metal elements in atmospheric particles in China

FANG Fengman

College of Terrestrial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

Abstract: Metal elements pollution of atmospheric particles had become a hot study area in environmental science field. This paper carded and summed up environmental geochemistry of metal elements of atmospheric particles in recent years in China. Fe, Ca, Mg, Si etc crustal elements and Cu, Pb, Cd, Zn, Hg pollution elements were studied a lot at present. Cu, Pb, Cd, As, Zn which are harmful to human health were polluted serious, and while Cr, Mn, Co, Ni were light pollution. Metal content of atmospheric particles had obvious time distribution change, generally showing as: winter>autumn>spring>summer. Metal element concentrations of Northern coal-fired cities are generally higher than those in the general urban city in south China. Within the city, generally showing as: industrial district>transportation district>residential>suburb. Metal elements are mainly distributed on the fine particle size (<2 μm), especially for the pollution elements. Pollution elements and crustal elements had different vertical distribution law. Enrichment degree of metals in atmospheric particles were related with element type, area type, seasonal change, particle size and so on. Finally, research on metal spatial distribution and time distribution of the scale and diversity studies of atmospheric particles should be strengthened, while, in order to create risk model about the relationship between metal elements in atmospheric particles and human health, research on ultrafine particles should be strengthened.

Key words: metal elements; atmospheric particles; distribution law; environmental activity and affection