

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0076-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.015

太行山东麓煤矿区气溶胶重金属元素污染特征及来源分析

樊景森^{1, 2}, 浑凌云³, 靳晓洋^{1, 2}, 于倩倩^{1, 2}, 赵金波^{1, 2}, 郝栗涛^{1, 2}, 程文净^{1, 2}, 牛红亚^{1, 2}

(1. 河北工程大学 河北省资源勘测重点实验室, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 河北省煤炭资源综合开发与利用协同创新中心, 河北 邯郸 056038; 3. 河北工程大学 科信学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为了探究太行山东麓煤矿区气溶胶中重金属元素的污染特征及来源, 于2017年春、夏、秋、冬四季分别在峰峰矿区采集PM_{2.5}和PM₁₀样品, 使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测试样品中的重金属元素, 分析讨论PM_{2.5}和PM₁₀中重金属元素的污染特征。结果表明, 峰峰矿区春、夏、秋、冬四个季节PM_{2.5}的平均质量浓度分别为84、108、107和174 μg/m³, 春、夏、秋季PM₁₀质量浓度分别为204、177和179 μg/m³, 均超过我国环境质量二级标准, 表明矿区大气污染较为严重; PM_{2.5}/PM₁₀的比值夏秋季明显高于春季, 这可能与夏秋季强烈的光化学反应生成大量二次粒子有关; 峰峰矿区PM_{2.5}中Zn元素含量最高, Pb次之, 其他元素含量由高到低依次为Mn、Cr、Cu、As、Mo、V、Sn、Ni、Cd、Co。PM₁₀中Zn元素含量最高, Mn次之, 其他元素含量由高到低依次为Pb、Cr、Cu、V、As、Mo、Ni、Sn、Cd、Co。峰峰矿区PM_{2.5}和PM₁₀中Cd元素的富集系数超过100, 严重富集, 明显受到人为活动影响; Mo、Pb、Sn、Zn元素富集系数均超过了10, 表明Mo、Pb、Sn、Zn等四种元素在峰峰矿区轻微富集, 受到人为活动影响; Cu、As、Cr、Ni、V、Mn、Co元素的富集系数小于10, 表明Cu、As、Cr、Ni、V、Mn、Co这七种元素主要来自于地壳。

关键词: 邯郸; PM_{2.5}; PM₁₀; 元素

中图分类号: X513

文献标志码: A

The pollution characteristics and sources of heavy metals in aerosol in the coal mine area of eastern foot of Taihang Mountain

FAN Jingsen^{1, 2}, HUN Lingyun³, JIN Xiaoyang^{1, 2}, YU Qianqian^{1, 2}, ZHAO Jinbo^{1, 2},
HAO Litao^{1, 2}, CHENG Wenjing^{1, 2}, NIU Hongya^{1, 2}

(1. Collaborative Innovation Center of the Comprehensive Development and Utilization of Coal Resource, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. Hebei Province and The resources surveying and researching laboratory of HeBei Province, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 3. Kexin college, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China.)

Abstract: In order to study the characteristics and sources of heavy metals in aerosol in the coal mine area of eastern foot of Taihang Mountain, PM_{2.5} and PM₁₀ samples were collected in Fengfeng mining area of Handan, China in 2017. The heavy metal contents in the sample were measured by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. The mean mass concentration of PM_{2.5} in spring, summer, autumn and winter in Fengfeng mining area were 84, 108, 107 and 174 μg/m³ respectively. The PM₁₀ mean mass concentration in spring, summer and autumn were 204, 177 and 179 μg/m³ respectively. PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentration exceeded Chinese National Ambient Air Quality Standards (grade- II), it indicated that air pollution in coal mining area was more serious. The ratio of PM_{2.5}/PM₁₀ in summer

收稿日期: 2108-03-02

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41541038); 河北省杰出青年科学基金资助项目(D2018402149); 河北省自然科学基金面上项目(D2016402120); 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2017015)

作者简介: 樊景森(1977-), 男, 河北泊头人, 博士, 副教授, 从事气溶胶方面的研究。

and autumn was obviously higher than that in spring, which may be related to the strong photochemical reaction in summer and autumn. The metal contents of Zn in $PM_{2.5}$ in Fengfeng mining area were the highest, and the contents of other elements from high to low are Pb, Mn, Cr, Cu, As, Mo, V, Sn, Ni, Cd, Co, etc. The content of Zn in PM_{10} was the highest, followed by Mn, the contents of other elements ranged from high to low in order of Pb, Cr, Cu, V, As, Mo, Ni, Sn, Cd, Co, and so on. The enrichment coefficient of Cd elements in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Fengfeng mining area was more than 100, which is seriously enriched and influenced by human activities. The enrichment coefficient of Mo, Pb, Sn and Zn elements were more than 10, which indicated that Mo, Pb, Sn and Zn were slightly enriched in Fengfeng mining area and were affected by human activities. The enrichment factors of As, Cr, Ni, V, Mn and Co were less than 10, which indicated that the seven elements of Cu, As, Cr, Ni, V, Mn and Co mainly come from the crust.

Key words: Handan city; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; elements

国家环保部发布的 2013—2016 年全国污染最严重的 10 个城市中,太行山东麓的山前地带的邯郸、邢台、保定和石家庄市均位列其中^[1]。太行山东麓山前地区地势自西向东呈阶梯状下降,高差悬殊,地理条件造成的西部高山屏障使污染物容易在山前集聚,且使得年大风次数少,不利于污染物稀释扩散^[2]。位于太行山东麓的邯邢矿区是我国的主要能源基地之一,大量煤炭资源的开发与利用势必会产生大量的气态污染物和气溶胶颗粒,从而对矿区及整个京津冀地区的空气质量产生影响。

众多研究发现^[3-16],重金属是大气颗粒物的重要污染源之一,具有生物毒性、不可降解性和生物累积性,能导致人体机能功能性障碍和不可逆性损伤,对人体健康有极大的危害。大气气溶胶中重金属来源于自然过程(火山喷发、地表扬尘扬沙、海洋飞沫等)和人为过程(化石燃料燃烧、生物质燃烧、交通排放等)^[17-18]。我们可以根据重金属的形貌和化学组成来识别其来源^[19-20]。目前关于太行山东麓煤矿区的大气气溶胶重金属的相关研究鲜见报道,因此,开展太行山东麓煤矿区气溶胶的重金属研究具有重要的科学意义,能够为矿区大气污染及重金属的防治提供理论依据和数据支持。

1 样品采集与实验方法

1.1 样品采集

采样点位于太行山东麓峰峰矿区某酒店(114° 13'E, 36° 24'N)三楼楼顶,采样高度离地面约 20 m,东临滏阳河,西侧为生活居民区,周围高大建筑少见且周边未见明显污染源,观测数据能够较好地反映当地矿区污染影响情况。采样时间为 2017 年 2 月至 2017 年 10 月,选用 KB-120F 型中流量采样器,流量为 100 L/min,所用采样滤膜为 $\Phi 90$ mm 的石英滤膜,采样前滤膜于马弗炉中 550℃ 焙烧 5.5 h 去除滤膜上可能存在的有机物,使用十万分之一的精密电子天平称重,采样后样品于 -4℃ 冰箱中保存直至分析,共采集 64 个样品(表 1)。

1.2 电感耦合等离子质谱

采用 Agilent 7700X 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析重金属元素 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Cd、Sn 和 Pb。测试前用陶瓷剪刀将滤膜样品剪成小块于特氟隆坩埚中,加入 5 ml 稀王水,1 滴 HF,盖好盖子,在恒温电热板上 120℃ 加热 2 h,然后升温至 130℃,开盖,蒸至恰

表 1 采样地点及时间的详细描述

Tab.1 Sampling location and time

采样地点	采样季节	采样时间	采集样品	采样点描述
峰峰矿区	冬	2.06—2.13	$PM_{2.5}$	采样点设在峰峰矿区某酒店的三楼楼顶,采样点东临滏阳河,西侧为生活居民区,周边未见明显污染源
	春	4.23—4.28	$PM_{2.5}$ 、 PM_{10}	
	夏	8.02—8.09	$PM_{2.5}$ 、 PM_{10}	
	秋	10.23—10.30	$PM_{2.5}$ 、 PM_{10}	

无溶液,再准确加2%盐酸10 ml,盖好盖子,于电热板回流20 min,取下,直接倒入塑料比色管中,无须定容,与标准溶液一起在选定的仪器最佳工作条件进行测定。

1.3 质量保证和质量控制

每次称重前将滤膜在恒湿恒温箱中平衡24 h,每张滤膜的2次称重误差小于10 μg ,否则重新称重。

为了确保测试数据的质量,测试时严格按照仪器相关的规范进行操作。样品分析时同时测试空白样品和平行样品。选择一级标准物质,按照样品分析步骤制备后测试标准物质元素浓度。本测试方法所选用的定量校正方法为内标校正方法。

1.4 数据分析

富集因子(EF)可以用于研究大气颗粒物中元素的富集程度,判断和分析人为源与自然源对颗粒物中元素含量的贡献水平,以表征颗粒物的来源和污染特征^[21]。

大气颗粒物中元素富集因子(EF)的定义是:
(EF)地壳或土壤 $= (C_i/C_R) \text{ 颗粒物} / (C_i/C_R) \text{ 地壳或土壤}$
其中 C_i 为某种元素的浓度; C_R 为参比元素的浓度。

一般选择全球地壳物质中或当地土壤中含丰富、受人为污染影响小、化学性质比较稳定的元素作为参比元素,其中地壳元素作为参比元素计算的富集因子称为相当于地壳的富集度,以土壤作为参比元素计算的富集因子称为相当于土壤尘的富集度^[22]。国际上常选用Al、Fe、Si和Sc作为参比元素。本文中 choice 河北省土壤中Fe元素作为参比元素,其他元素的背景值同样取自河北省土壤中的元素丰度值^[23](中国环境监测总站)。元素 i 的富集因子越高,受人为源的影响越大,受自然源的影响越小。若 $EF_i < 10$,表明元素 i 主要来自地壳;若 $10 \leq EF_i \leq 100$,表明元素 i 轻微富集,受到人为活动影响;若 $EF_i > 100$,表明元素 i 严重富集,明显受到人为活动影响^[24]。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物质量浓度分析

2017年春、夏、秋、冬四季分别采集峰峰矿区 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 样品。峰峰矿区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 气溶胶质量浓度特征如图1所示,峰峰矿区春、夏、

秋 PM_{10} 的日均质量浓度分别为200.19、195.69和184.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,均高于我国《环境空气质量标准》(GB3095-2012)执行二级标准150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[25]。 $\text{PM}_{2.5}$ 春、夏、秋、冬的日平均浓度分别为83.80、114.18、111.75和171.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,均高于我国《环境空气质量标准》(GB3095-2012)执行二级标准75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,表明矿区大气污染较严重,其中冬季超标2.3倍,表明冬季矿区大气污染最为严重。尽管我国已采取工业企业限产停产、机动车限行、严控扬尘污染、加强道路清洁等多种控制措施,但 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的污染依然非常严重。与2017年邯郸市比较显示,峰峰矿区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度均高于邯郸市,表明矿区污染比邯郸市更为严重,煤炭资源开发对大气污染有一定的影响,因此相关部门应制定相应措施对矿区大气污染进行治理。

细颗粒物的粒径越小,进入人体的部位就越深,对人体健康产生的影响也就越严重。国内大多数城市中 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的比值为40%~60%。峰峰矿区 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的比值春季为42%、夏季为61%、秋季为58%。 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的比值夏秋季节明显高于春季,这可能与夏秋季强烈的光化学反应生成大量二次粒子有关。峰峰矿区 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的比值与2013年邯郸市(59%)^[26]较为接近,但要小于美国东海岸地区比值(68%)^[27]。因此,控制细颗粒物是降低区域大气污染的有效途径。

2.2 峰峰矿区气溶胶中重金属元素污染特征

峰峰矿区 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素的含量如表2, $\text{PM}_{2.5}$ 中Zn含量范围从71.60~395.68 ng/m^3 ,所测元素中均值最高,达到183.72 ng/m^3 ,Pb的均值达到79.09 ng/m^3 ,Mn的均值达到50.80 ng/m^3 ,然后依次为Cr、Cu、As、Mo、V、Sn、Ni、Cd、Co。

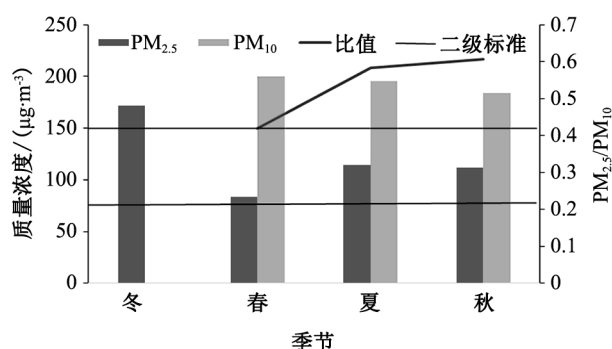


图1 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度特征
Fig.1 Mass concentration of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10}

峰峰矿区 PM₁₀ 中重金属元素的含量见表 3，Zn 元素均值为最高，达到 233.82 ng/m³，含量范围从 81.89 ~ 514.61 ng/m³，然后是 Mn 的均值达到 110.56 ng/m³，Pb 元素的均值达到 89.48 ng/m³，然后依次为 Cr、Cu、V、As、Mo、Ni、Sn、Cd、Co。

为了掌握不同重金属元素在不同粒径中的含量，使用春、夏、秋 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中重金属元素均值进行计算，PM_{2.5} 与 PM₁₀ 中重金属元素的比值见表 4。由表 4 可知，Mo、As、Sn、Cu、Cr、Zn、Pb、Cd、Ni、V 等在 PM_{2.5} 中所占比重均超过 60%，表明这些元素主要存在于细颗粒物 PM_{2.5} 中，而元素 Co、Mn 在 PM_{2.5} 中所占比重仅为 40.08% 和 39.04%，表明 Co、Mn 元素主要存在于粗颗粒物中。

2.3 峰峰矿区气溶胶中重金属元素富集系数及来源分析

为了了解峰峰矿区气溶胶中重金属元素的来源，使用富集系数来判断其来自自然源还是人为源。峰峰矿区 PM_{2.5} 中重金属元素的富集系数 (EF) 如图 2，由图可知，峰峰矿区 PM_{2.5} 中 Cd 元素的富集系数超过 100，严重富集，明显受到人为活动影响；Mo、Pb、Sn、Zn 元素富集系数均超过了 10，表明 Mo、Pb、Sn、Zn 等四种元素在峰峰矿区轻微富集，受到人为活动影响；Cu、As、Cr、Ni、V、Mn、Co 元素的富集系数小于 10，表明 Cu、As、Cr、Ni、V、Mn、Co 这七种元素主要来自于地壳。

峰峰矿区 PM₁₀ 中重金属元素的富集系数 (EF) 如图 3，由图可知，峰峰矿区 PM₁₀ 中 Cd 元素的富集系数最高，超过 100，表明该元素在峰峰矿区 PM₁₀ 中严重富集，明显受到人为活动影响；Mo、Pb、Sn、Zn 元素富集系数均超过了 10，表明 Mo、Pb、Sn、Zn 等四种元素在峰峰矿区轻微富集，受到

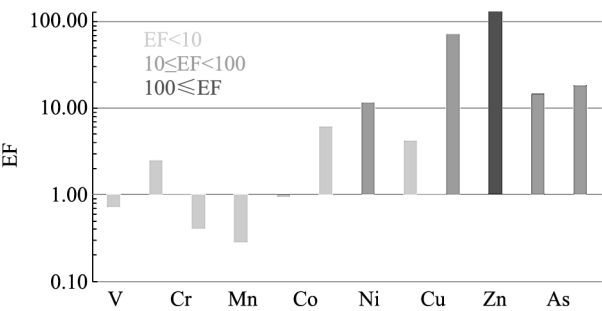


图 2 PM_{2.5} 中重金属元素富集系数
Fig.2 Enrichment factors of heavy metals in PM_{2.5}

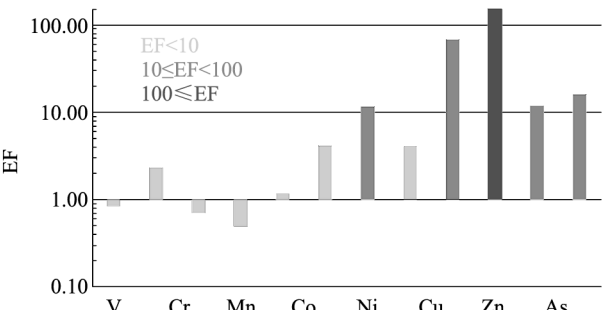


图 3 PM₁₀ 中重金属元素富集系数
Fig. 3 Enrichment factors of heavy metals in PM₁₀

表 2 PM_{2.5} 中重金属元素的 (单位: ng/m³)
Tab2. Heavy metal contents in PM_{2.5}

	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Sn	Pb
最小值	2.78	13.73	23.10	0.36	2.58	7.52	71.60	2.90	3.62	0.38	4.58	12.76
最大值	22.44	57.91	199.65	1.89	11.52	163.28	395.68	58.23	29.65	7.68	14.56	317.71
均值	10.34	33.85	50.80	0.70	5.93	27.23	183.72	11.54	10.42	2.51	7.73	79.09

表 3 PM₁₀ 中重金属元素的质量 (单位: ng/m³)
Tab3. Heavy metal contents in PM₁₀

	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Sn	Pb
最小值	6.17	18.78	60.14	0.75	4.94	9.88	81.89	3.12	4.26	0.45	4.60	22.03
最大值	31.83	128.51	230.26	3.05	51.40	42.44	514.61	61.64	29.28	11.39	12.00	387.94
均值	16.31	41.26	110.56	1.61	9.31	23.32	233.82	14.76	12.06	4.06	7.99	89.48

表 4 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 中重金属元素的比值 (%)
Tab. 4 The ratio of heavy metal elements in PM_{2.5} and PM₁₀ (%)

	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Sn	Pb
比值	62.42	82.41	40.08	39.04	63.26	87.40	73.00	90.72	98.44	63.85	88.49	72.77

人为活动影响; Cu、As、Cr、Ni、V、Mn、Co 元素的富集系数小于 10, 表明 Cu、As、Cr、Ni、V、Mn、Co 这三种元素主要来自于地壳。

3 结论

1) 峰峰矿区春、夏、秋、冬四个季节 $PM_{2.5}$ 的平均质量浓度分别为 84、108、107 和 174 $\mu g/m^3$, 春、夏、秋季 PM_{10} 质量浓度分别为 204、177 和 179 $\mu g/m^3$, 均超过我国环境质量二级标准, 表明矿区大气污染较为严重; 峰峰矿区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度均高于邯郸市 2017 年的质量浓度, 表明煤炭资源开发对大气污染有一定的影响, 因引起相关部门的高度重视; $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比值夏秋季节明显高于春季, 这可能与夏秋季节强烈的光化学反应生成大量二次粒子有关。

2) 峰峰矿区 $PM_{2.5}$ 中 Zn 元素含量最高, Pb 次之, 其他元素含量由高到低依次为 Mn、Cr、Cu、As、Mo、V、Sn、Ni、Cd、Co; PM_{10} 中 Zn 元素含量最高, Mn 次之, 其他元素含量由高到低依次为 Pb、Cr、Cu、V、As、Mo、Ni、Sn、Cd、Co; Mo、As、Sn、Cu、Cr、Zn、Pb、Cd、Ni、V 等元素主要存在于细颗粒物 $PM_{2.5}$ 中, 而 Co、Mn 元素主要存在于粗颗粒物中。

3) 峰峰矿区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 Cd 元素严重富集, 明显受到人为活动影响; Mo、Pb、Sn、Zn 等四种元素在峰峰矿区轻微富集, 受到人为活动影响; Cu、As、Cr、Ni、V、Mn、Co 这七种元素主要来自于地壳。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 环境质量公报 [EB/OL]. (2017.5.31)[2018.2.10]. <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/>.
- [2] 付桂琴, 赵春生, 张迎新, 等. 河北省霾日变化趋势及成因初步分析 [C]// 中国气象学会 2012 城市气象论坛. 2012.
- [3] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学 [M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [4] MOHANRAJ R, AZEEZ P A, PRISCILLA T. Heavy metals in airborne particulate matter of urban Coimbatore[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 47(2): 162-167.
- [5] LIU W, HOU X, LIU D, et al. S100 β in heavy metal-related child attention-deficit hyperactivity disorder in an informal e-waste recycling area[J]. Neurotoxicology, 2014, 45(4): 185-191.
- [6] YANG H, HUO X, YEKEEN T A, et al. Effects of lead and cadmium exposure from electronic waste on child physical growth[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2013, 20(7): 4441-4447.
- [7] ZHANG Y, HUO X, CAO J, et al. Elevated lead levels and adverse effects on natural killer cells in children from an electronic waste recycling area[J]. Environmental Pollution, 2016, 213: 143-150.
- [8] COSSELMAN K E, NAVASACIEN A, KAUFMAN J D. Environmental factors in cardiovascular disease[J]. Nature Reviews Cardiology, 2015, 12(11): 627-642.
- [9] NORDBERG G F, GOYER R, NORDBERG M. Comparative toxicity of cadmium-metallothionein and cadmium chloride on mouse kidney[J]. Archives of Pathology, 1975, 99(4): 192-197.
- [10] SATARUG S, BAKER J R, URBENJAPOL S, et al. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population[J]. Toxicology Letters, 2003, 137(1-2): 65-83.
- [11] KADIRVEL R, SUNDARAM K, MANI S, et al. Supplementation of ascorbic acid and alpha-tocopherol prevents arsenic-induced protein oxidation and DNA damage induced by arsenic in rats[J]. Human & Experimental Toxicology, 2007, 26(12): 939-946.
- [12] YANG G Q, ZHOU R H. Further observations on the human maximum safe dietary selenium intake in a seleniferous area of China[J]. Journal of Trace Elements & Electrolytes in Health & Disease, 1994, 8(3-4): 159-165.
- [13] REILLY C. Selenium in Food and Health[M]. 2nd ed. Springer: New York Connor, 2006.
- [14] AL-AHMARY K M. Selenium content in selected foods from the Saudi Arabia market and estimation of the daily intake[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2009, 2(2): 95-99.
- [15] FOSTER L H, SUMAR S. Selenium in health and disease: a review[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 1997, 37(3): 211-228.
- [16] ELLIS D R, SALT D E. Plants, selenium and human health[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2003, 6(3): 273-279.
- [17] 张蓉. 中国气溶胶中重金属的特征、来源及其长途传

- 输对城市空气质量及海域生态环境的可能影响[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [18] 邓丛蕊. 中国大气气溶胶中生物质燃烧的源追踪及灰霾的形成机制[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [19] XIAO R, CHEN X, WANG F, et al. The physicochemical properties of different biomass ashes at different ashing temperature[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(11): 244-249.
- [20] LASKIN A, COWIN J P, IEDEMA M J. Analysis of individual environmental particles using modern methods of electron microscopy and X-ray microanalysis[J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2006, 150(2): 260-274.
- [21] 张元勋, 王荫淞, 李德禄, 等. 上海冬季大气可吸入颗粒物的 PIXE 研究[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(Z): 1-5.
- [22] 牛生杰, 张澄昌. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶的化学组分和富集因子分析[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(3): 264-268.
- [23] 中国环境监测总站. 中国元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [24] KYLLNEN K, KARLSSON V, RUOHO-AIROLA T. Trace element deposition and trends during a ten year period in Finland[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(7): 2260-2269.
- [25] GB3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [26] 张芬芬, 王丽涛, 苏捷, 等. 邯郸市 PM_{2.5} 中含碳组分的特征及来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(8): 94-100.
- [27] ZHAO Y, GAO Y. Mass Size Distributions Of Water-soluble Inorganic And Organic Ions In Size-segregated Aerosols Over Metropolitan Newark In The Us East Coast[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(18): 4063-4078.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第75页)
- Mineralogist*, 2010, 95(1): 185-187.
- [10] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the Continental Crust [M]. In: RUDNICK R L (ed). *The Crust, Treatise on Geochemistry 3*. Amsterdam: Elsevier, 2003: 1-64.
- [11] MCDONOUGH W F, SUN S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120 (3-4): 223-253.
- [12] 权瑞, 董国臣, 缪广, 等. 太行山南段洪山矿化正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地球化学特征[J]. *地质论评*, 2016, 62(4): 1064-1080.
- [13] 赵平. 章村三井隔水层微观研究及煤系地层叶腊石的发现[J]. *中国煤田地质*, 2007, 19(6): 19-20.
- [14] 王夕明, 张景森, 张静, 等. 磁西煤系下岩溶热水水文地球化学特征及成因[J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2009, 26(3): 97-101.
- [15] 孙玉壮, 赵存良, 李彦恒, 等. 煤中某些伴生金属元素的综合利用指标探讨[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(4): 744-748.
- [16] DZ/T 0204-2002, 稀土矿产地质勘查规范[S].
- (责任编辑 王利君)