

北京西北城区春季 PM₁₀ 单颗粒形貌类型及成分特征

李泽熙,邵龙义,侯 聪,王 静,王建英

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083

摘 要: 主要对北京西北城区 2010 年度春季大气可吸入颗粒物的理化特征进行分析研究,通过利用高分辨率场发射扫描电镜和图像分析技术研究了区内可吸入颗粒物的微观形貌类型及百分含量特征,利用扫描电镜及能谱分析研究矿物颗粒的元素组成及富集类型。结果表明,在西北城区春季大气 PM₁₀ 中可识别出烟尘集合体、球形颗粒、矿物和其他未知颗粒等 4 种单颗粒类型,沙尘暴天气对矿物颗粒的数量比例影响较大,同时影响颗粒物粒度分布。矿物颗粒按成分可分为“富 Si”、“富 Ca”、“富 Fe”、“富 S”、“富 Na”、“富 Ti”、“富 Al”、“富 Cl”和“富 Mg”颗粒九大类,沙尘天气与非沙尘天气的矿物颗粒均以“富 Si”颗粒、“富 Ca”颗粒、“富 Fe”颗粒、“富 S”颗粒等为主。

关键词: 可吸入颗粒物(PM₁₀);理化特征;单颗粒分析;沙尘

中图分类号:X823

文献标志码:A

文章编号:1002-6002(2013)04-0028-06

A Study of Morphological Types and Chemical Compositions of Individual Particles of the Spring PM₁₀ in Northwestern Beijing

LI Ze-xi, SHAO Long-yi, HOU Cong, WANG Jing, WANG Jian-ying

School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: The physico-chemical properties of airborne inhalable particles in the Northwest District of Beijing in spring 2010 during the dust storm was investigated in this study, the morphological types of the individual particles in PM₁₀ was investigated by the high resolution Field Emission Scanning Electron Microscopy and image analyzer, the elemental composition of mineral particles and enrichment type in PM₁₀ was investigated by scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray. The results show that the PM₁₀ in the northwestern Beijing in spring 2010 could be subdivided into 4 major categories, including soot aggregates, fly ash, mineral and unresolved particles. Size distribution of PM₁₀ and the proportion of the number of PM₁₀ was affected by dust storm. A total of 9 different mineral categories were classified, namely, “Si-rich”, “Ca-rich”, “Fe-rich”, “S-rich”, “Na-rich”, “Ti-rich”, “Al-rich”, “Cl-rich” and “Mg-rich”. Either in dust storm or in non-dust episodes, the major classes of dust particles were defined as follows: “Si-rich”, “Ca-rich”, “Fe-rich”, “S-rich”.

Key words: inhalable particles (PM₁₀); physico-chemical properties; individual particle analysis; dust storm

PM₁₀是空气动力学直径小于 10 μm 且在空气中中长期悬浮不易沉降的颗粒状物质^[1],现已成为北京市首要空气污染物,因此控制 PM₁₀ 的污染成为当前北京市大气污染防治工作的重点^[2-4]。研究表明^[5-7],北京 PM₁₀的组成相当复杂,直接同矿物有关的成分比机动车和燃煤/工业污染源(分别为 15.5% 和 5.6%)要高得多,而在沙尘暴期间 PM₁₀的浓度更高,超出国家标准的几十倍甚至几百倍,其中矿物是主要成分^[8]。该研究对北京西北城区春季沙尘暴期间沙尘天气与非沙尘天气进行对比,同时对比往年同时期分析得出,沙尘

暴期间 PM₁₀的组成分布特征及矿物类型等有助于对北京空气中 PM₁₀来源及传输路径的分析,加深对沙尘天气气溶胶的认识,为进一步研究沙尘天气提供参考。

1 实验部分

1.1 样品采集

2010 年 3 月北京暴发沙尘暴期间,2010 年 3 月 18 日至 2010 年 3 月 23 日在北京市海淀区中国矿业大学(北京)综合楼五楼平台采集 PM₁₀样

收稿日期:2011-10-09;修订日期:2012-02-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41175109);国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB228503)

作者简介:李泽熙(1988-),男,湖南澧县人,硕士。

品(见表1),作为北京市西北城区 PM₁₀ 的代表进行分析,其中3月20日和3月22日为沙尘天气。中国矿业大学(北京)位于北京西北城区的中关村科技园区,东面紧临学院路,北面紧靠清华东

路,周围并没有大型的局地工业污染源。所用仪器为 MiniVol 便携式采样器(美国),用聚碳酸酯滤膜(滤膜孔径为 0.67 μm, Millipore, UK)采集,流量为 5 L/min。

表 1 采集样品信息表

采样编号	采样日期	采样时段	气象要素			
			温度/℃	湿度/%	大气压/Pa	天气情况
1	2010-03-18—03-19	22:00—02:00	3.8	69.1	100 190	阴
2	2010-03-19	10:00—14:00	9.3	55.4	99 230	阴
3	2010-03-19—03-20	22:00—02:00	7.3	76.7	99 360	阴雾
4	2010-03-20	10:00—14:00	8.2	32.8	100 190	沙尘暴
5	2010-03-20	16:20—19:20	8.8	26.8	100 680	沙尘暴
6	2010-03-20—03-21	21:30—01:30	7.1	35.5	100 930	晴
7	2010-03-21	10:00—16:00	13.2	21.5	100 520	晴
8	2010-03-21—03-22	22:00—02:00	9.1	36.5	100 780	晴
9	2010-03-22	09:40—11:40	13.0	20.5	100 580	沙尘暴
10	2010-03-22	12:00—14:00	13.3	20.2	100 680	沙尘暴
11	2010-03-22	14:30—16:30	14.8	20.4	100 680	沙尘暴
12	2010-03-22	17:00—19:00	12.5	20.6	100 890	沙尘暴
13	2010-03-22—03-23	22:00—02:00	8.9	28.9	101 350	晴
14	2010-03-23	10:00—14:00	12.6	32.8	101 310	晴

1.2 实验方法

采样后,用场发射扫描电镜(FESEM)对采集在聚碳酸酯滤膜上的颗粒物进行观察,区分出 PM₁₀ 的各种组分,然后用图像分析软件处理,对所得数据进行模块分析,得到各组分的粒度分布及数量百分比,详见文献[9]。利用带能谱的扫描电镜(SEM/EDX)对聚碳酸酯滤膜上的颗粒物进行矿物颗粒元素分析,结合能谱 EDX 识别单颗粒的元素组成及比例等,并对颗粒物分类,详见文献[10]。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物的微观形貌与粒度分布

高分辨率场发射扫描电镜(FESEM)图像可以清晰地显示亚微米级的颗粒尺寸和微观形貌^[11]。通过场发射扫描电镜的观察,从二次电子图像中判断出北京西北城区春季大气中 PM₁₀ 主要包括烟尘集合体、燃煤飞灰、矿物颗粒和其他未知颗粒物,如图1所示。

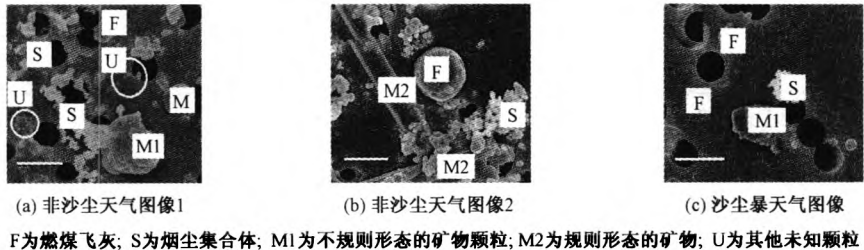


图 1 2010 年春季北京市西北城区不同类型的 PM₁₀ 的显微形貌特征(比例尺 1 μm)

实验中链状、蓬松状、较粗大的烟尘集合体均有所发现,在非沙尘天气中数量较多。造成烟尘集合体产生不同形态的原因可能是来源不同的烟尘集合体的形态也各不相同,也可能是不同来源的烟尘集合体在大气中发生了“吸湿”、“碰并”等作用,导致其形貌发生变化^[12],说明北京西北城区春季 PM₁₀ 中烟尘集合体的来源比较复杂,且发

生过一系列的物理变化,使得烟尘集合体的形态呈现多样性。

矿物颗粒主要为不规则矿物,规则矿物并不多见,多为长条状。规则矿物主要来源一般认为是二次大气化学反应生成的^[13-14],相关研究表明,长条或针状矿物一般为石膏,石膏的存在与大气中的污染气体 SO₂ 有关,但北京大气中发现的

石膏矿物粒径大小不一,形成机理尚无明确论^[1],说明在北京西北城区春季大气中存在一定的SO₂污染气体,对大气质量有一定影响。结合烟尘集合体形态的多样性,可以说明大气中发生了一系列的物理化学变化,且对PM₁₀的组分产生一定影响。

燃煤飞灰数量不少,多数呈现较规则圆球形,表面光滑,偶尔可见非圆球形燃煤飞灰,极个别表面吸附有超细颗粒物,其成因可能是燃煤飞灰自身具有自吸附作用而吸附部分超细颗粒。3月仍为北京采暖期,与非采暖期相关数据比较,采暖期燃煤飞灰数量较多,说明主要来源于采暖排放。

对二次电子图像进行对比,并结合图2和图3可以看出,沙尘暴天气PM₁₀以矿物颗粒为主,烟尘集合体和燃煤飞灰相对较少,而矿物颗粒的主峰为1~1.25 μm,次峰在大于2.5 μm段,以粗颗粒为主,结合采样时的特殊沙尘暴天气,这2个峰值代表沙尘暴期间输入的大量以粗颗粒为主的沙尘颗粒,从而使烟尘集合体和燃煤飞灰的数量比例相对较小;而非沙尘天气不受大量沙尘颗粒的影响,PM₁₀中燃煤飞灰、矿物颗粒和烟尘集合体的数量比例相差不大,整个颗粒物呈单峰分布,主要集中在0.1~0.3 μm,绝大部分集中在0.1~0.6 μm,以细颗粒为主。

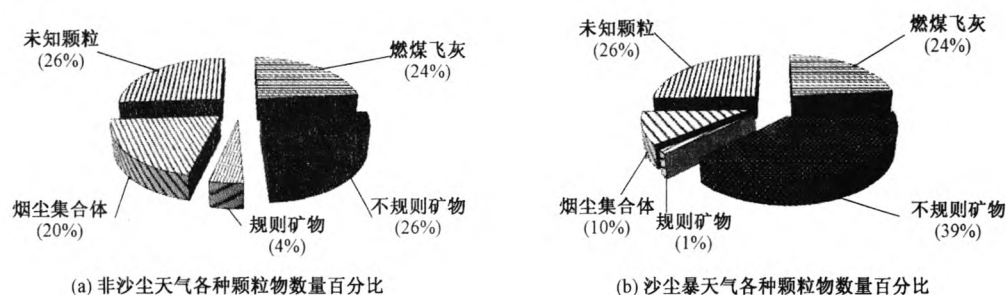


图2 北京市西北城区2010年春季各种颗粒物数量百分比图

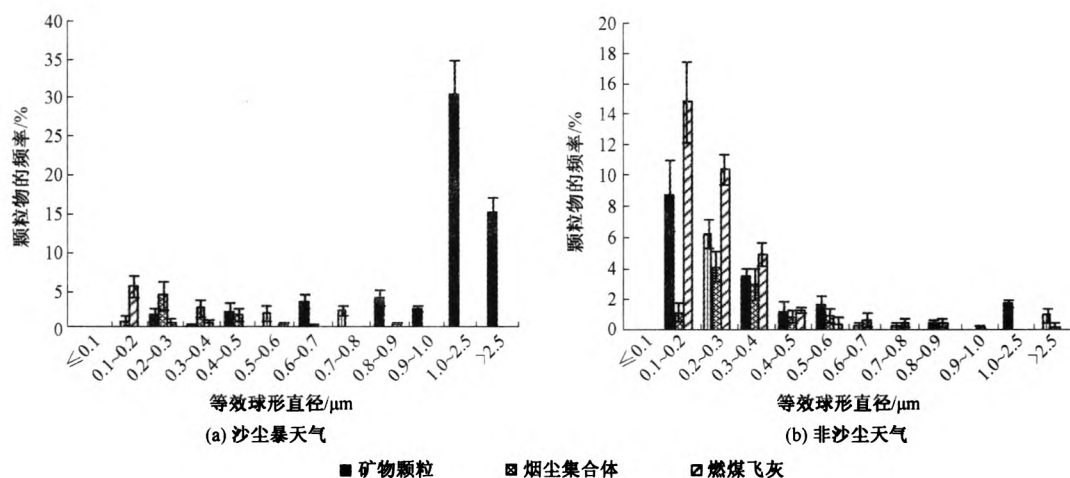


图3 沙尘暴天气与非沙尘天气所采样品的数量-粒度分布

2.2 矿物颗粒类型与元素分析

对采自沙尘天气与非沙尘天气的12个样膜(样品2和样品5不可用)共698个矿物颗粒进行能谱分析,结果显示,矿物颗粒化学成分主要包括O、Na、Mg、Al、Si、S、Cl、K、Ca、Fe、Ti等元素。根据Okada等^[15]对颗粒物元素富集情况的分类方法,以颗粒物中去除氧元素后质量分数第一的元素X为标准进行分类,可将698个矿物颗粒分为“富

Si”、“富Ca”、“富Fe”、“富S”、“富Na”、“富Ti”、“富Al”、“富Cl”和“富Mg”等九大类;以首要元素X质量分数65%为亚类分类标准,首要元素X质量分数大于65%的为“X质”颗粒,并计算元素X质量分数,首要元素X质量分数小于65%,则引用第二比重元素Y命名为“X+Y”颗粒,计算得到去掉氧元素后占质量分数前三位元素的质量分数和标准偏差,在每一亚类中质量分数第三的

元素若有多个则只对其进行列举。因此,分别得到北京西北城区春季可吸入颗粒物中九大类矿物颗粒的各亚类以及各亚类颗粒物的主要元素比例,见表 2、表 3。

表 2 北京西北城区春季可吸入颗粒物单颗粒矿物颗粒的数量统计和化学成分分类

类型	非沙尘天气		沙尘暴天气		主要元素 质量分数/%	标准 偏差/%
	颗粒数 量/个	数量百 分比/%	颗粒数 量/个	数量百 分比/%		
富 Si 颗粒	234	58.79	244	81.33		
①Si 质	40	10.05	38	12.67	Si 为 85.12	Si 为 1.04
②Si + Al	135	33.92	172	57.33	Si 为 49.77, Al 为 22.77	Si 为 0.35, Al 为 0.27
③Si + Fe	18	4.52	12	4.00	Si 为 38.20, Fe 为 24.86	Si 为 1.00, Fe 为 0.72
④Si + Ca	24	6.03	11	3.67	Si 为 39.22, Ca 为 24.77	Si 为 1.54, Ca 为 0.89
⑤Si + K	10	2.51	6	2.00	Si 为 55.79, K 为 20.99	Si 为 1.21, K 为 0.60
⑥Si + Mg	5	1.26	3	1.00	Si 为 45.33, Mg 为 20.94	Si 为 3.18, Mg 为 1.30
⑦Si + Na	0	0.00	2	0.67	Si 为 47.47, Na 为 20.04	Si 为 12.75, Na 为 0.20
⑧Si + S	1	0.25	0	0.00	Si 为 29.91, S 为 18.48	Si 为 0, S 为 0
⑨Si + Ti	1	0.25	0	0.00	Si 为 54.67, Ti 为 16.07	Si 为 0, Ti 为 0
富 Ca 颗粒	129	32.41	44	14.67		
①Ca 质	50	12.56	20	6.67	Ca 为 82.37	Ca 为 1.29
②Ca + Si	37	9.30	20	6.67	Ca 为 49.35, Si 为 34.44	Ca 为 1.38, Si 为 1.97
③Ca + Mg	22	5.53	1	0.33	Ca 为 53.51, Mg 为 35.59	Ca 为 1.53, Mg 为 2.09
④Ca + S	18	4.52	3	1.00	Ca 为 49.92, S 为 36.25	Ca 为 1.41, S 为 2.15
⑤Ca + Fe	2	0.50	0	0.00	Ca 为 47.36, Fe 为 24.11	Ca 为 2.26, Fe 为 2.68
富 Fe 颗粒	20	5.03	7	2.33		
①Fe 质	13	3.27	4	1.33	Fe 为 88.86	Fe 为 2.37
②Fe + Si	7	1.76	2	0.67	Fe 为 42.52, Si 为 31.80	Fe 为 3.76, Si 为 3.48
③Fe + Ti	0	0.00	1	0.33	Fe 为 53.46, Ti 为 25.11	Fe 为 0, Ti 为 0
富 S 颗粒	9	2.26	2	0.67		
①S 质	1	0.25	1	0.33	S 为 72.23	S 为 4.68
②S + Ca	4	1.01	1	0.33	S 为 45.55, Ca 为 30.06	S 为 5.47, Ca 为 2.55
③S + Si	4	1.01	0	0.00	S 为 32.72, Si 为 22.41	S 为 5.74, Si 为 0.85
富 Na 颗粒	1	0.25	1	0.33		
①Na + S	0	0.00	1	0.33	Na 为 40.06, S 为 21.93	Na 为 0, S 为 0
②Na + Cl	1	0.25	0	0.00	Na 为 25.87, Cl 为 23.83	Na 为 0, Cl 为 0
富 Ti 颗粒	3	0.75	1	0.33	Ti 为 74.34	Ti 为 4.09
富 Al 颗粒	0	0.00	1	0.33	Al 为 39.73, Fe 为 23.57	Al 为 0, Fe 为 0
富 Cl 颗粒	1	0.25	0	0.00	Cl 为 53.01, Na 为 41.00	Cl 为 0, Na 为 0
富 Mg 颗粒	1	0.25	0	0.00	Mg 为 33.96, Ca 为 27.51	Mg 为 0, Ca 为 0

非沙尘天气所采 7 个样品共 398 个矿物颗粒中,“富 Si”颗粒为 234 个,占总数的 58.79%;“富 Ca”颗粒为 129 个,占总数的 32.41%;“富 Fe”颗粒为 20 个,占总数的 5.03%;“富 S”颗粒为 9 个,占总数的 2.26%。在沙尘天气所采 300 个矿物颗粒中,“富 Si”颗粒共 244 个,占总数的 81.33%;“富 Ca”颗粒为 44 个,占总数的 14.67%，“富 Fe”颗粒为 7 个,占总数的 2.33%，“富 S”颗粒为 2 个,占总数的 0.67%。“富 Si”颗粒主要来自于地壳中的硅酸盐类颗粒(如石英、黏土类和长石类矿物颗粒)^[16-17]。“富 Ca”颗粒的比例与 Okada 等^[15, 18]在靠近塔克拉玛干沙漠的采集样品中“富 Ca”颗粒为 6%~9%、在乌鲁

木齐上空采集的样品中“富 Ca”颗粒为 18%的结果比较近似,对比参照,可能来源为当地的地表土壤、远距离传送、二次扬尘等。“富 Fe”颗粒的具体来源不仅有地壳中的一些矿物(如赤铁矿和硅酸铁等),同时还有工地和工厂等人为排放源。“富 S”颗粒与硫化现象有关,大量来源于大气中的二次化学反应。

对比 2 种天气的矿物颗粒,其矿物类型并无明显不同,且都以“富 Si”颗粒为主要类型,“富 Ca”颗粒次之,“富 Fe”颗粒和“富 S”颗粒较少。但是在沙尘天气时,输入的大量沙尘颗粒使“富 Si”颗粒的比例明显增大,其他类型的颗粒比例随之变小。相比在各类型矿物颗粒中,各亚类所占

百分比与非沙尘天气相比没有显著的差异,天气状况与各亚类百分比无明显相关性,说明2种天

气的矿物颗粒在主要来源和运输途径方面并无显著不同。

表3 北京西北城区春季各个样品中各类颗粒物数量统计

类型	非沙尘天气/个							沙尘暴天气/个					总数/个
	样品1	样品3	样品6	样品7	样品8	样品13	样品14	样品4	样品9	样品10	样品11	样品12	
富 Si 颗粒													478
①Si 质	3	5	9	5	7	6	5	11	5	7	5	10	78
②Si + Al	9	5	30	19	23	16	33	37	37	38	38	22	307
③Si + Fe			2	4	6	1	5	2	1	4	3	2	30
④Si + Ca	4	5	1	3	3	3	5	1	3	4	1	2	35
⑤Si + K	3	3	1	2		1		2	1		2	1	16
⑥Si + Mg	2			1		1	1	1			1	1	8
⑦Si + Na									1		1		2
⑧Si + S	1											1	1
⑨Si + Ti				1								1	1
富 Ca 颗粒													173
①Ca 质	3	15	7	6	7	6	6	2	4	5	6	3	70
②Ca + Si	3	6	5	9	6	5	3	5	5	1	1	8	57
③Ca + Mg	5	5	1	3	3	2	3					1	23
④Ca + S	7	4			1	4	2			1	1	1	21
⑤Ca + Fe						2							2
富 Fe 颗粒													27
①Fe 质	1	2	2	1	3	2	2			1	1	2	17
②Fe + Si		3			2	1	1			1		1	9
③Fe + Ti									1				1
富 S 颗粒													11
①S 质						1						1	2
②S + Ca	4											1	5
③S + Si	2	1				1							4
富 Na 颗粒													2
①Na + S											1		1
②Na + Cl	1												1
富 Ti 颗粒						2	1					1	4
富 Al 颗粒										1			1
富 Cl 颗粒	1												1
富 Mg 颗粒	1												1
总计	50	54	58	54	61	53	68	61	58	63	61	57	698

在2004年2—3月沙尘暴期间,同一监测点所采集的透射实验样品中,沙尘天气5个样品共481个矿物颗粒被分为“富Si”、“富Ca”、“富S”、“富Fe”、“富Al”、“富Mg”、“富K”、“富Na”共八大类^[10,19]。其中“富Si”颗粒的数量占分析的颗粒总数的75.4%，“富Ca”颗粒占分析颗粒总数的12.0%，“富S”颗粒占分析颗粒总数的7.9%，“富Fe”颗粒占分析颗粒总数的2.1%。“富Si”颗粒中以“Si质”和“Si+Al”为主,“Si+Al”的矿物颗粒占到54.1%。将此次样品矿物颗粒的类型与2004年样品进行对比,两者矿物类型大体一致,“富Si”类矿物颗粒仍是最主要成分,占总数的很大比例,此次样品中“富Si”所占比例大于

2004年样品,达到81.33%;“富Ca”的比例2次实验较一致,与2004年研究结果大致相同;但“富Si”类中,除“Si质”和“Si+Al”颗粒外,“Si+Fe”颗粒的数量也达到较大比例,同时此次样品中“富Fe”类矿物颗粒的比例也上升很多;而“富S”颗粒所占比例差别较大,下降至低于“富Fe”颗粒;其他几类均较少。说明与2004年春季沙尘暴时期相比,两者在沙尘暴期间所输入沙尘颗粒的来源大体上一致,但同时存在一定的差异,此次样品铁元素含量较高,含铁矿物的来源可能有所变化或存在新的铁质矿物、含铁硅类矿物等的输入源;同时“富S”颗粒减少,“富Si”颗粒、“富Ca”颗粒比例稍有增加,各主要元素的来源和运输过

程也可能存在一定的差异。至于其他小比例矿物类,则主要来自于痕量矿物,不做定量分析。

3 结论

北京西北城区春季大气颗粒物微观形貌类型主要有矿物颗粒、烟尘集合体、燃煤飞灰和一些其他未知颗粒。沙尘天气期间矿物颗粒的数量比例占优势,而非沙尘天气期间则三大类颗粒物的比例较相近,其中因为3月仍为北京市的采暖期,与非采暖期相比,其燃煤飞灰数量占有相当的比例。

对春季沙尘天气和非沙尘天气,矿物颗粒根据单颗粒化学成分可以分为“富Si”、“富Ca”、“富Fe”、“富S”、“富Na”、“富Ti”、“富Al”、“富Cl”和“富Mg”等九大类,均以“富Si”为主,“富Ca”次之,少量“富Fe”、“富S”颗粒,沙尘暴天气大量沙尘颗粒输入使“富Si”颗粒比例明显增大,但各亚类在所在分类中数量百分比并无明显差异,可知2种天气矿物颗粒来源基本一致。与已有相关研究大致分类结果一致,痕量矿物稍有差异。但与2004年研究相比,含Fe元素颗粒的含量较高,“富Fe”颗粒数量超过“富S”颗粒,可能含铁矿物的来源产生较大变化与差异,“富Si”、“富Ca”、“富S”颗粒比例稍有变化,其来源与运输较往年也可能存在一定的差异。

参考文献:

- [1] 邵龙义,杨书申,时宗波,等.城市大气可吸入颗粒物物理化学特征及生物活性研究[M].北京:气象出版社,2006.
- [2] 王雪松,李金龙.北京地区夏季PM₁₀污染的数值模拟研究[J].北京大学学报,2003,39(3):419-421.
- [3] Lu S, Shao L, Wu M, et al. Mineralogical characterization of airborne individual particles in Beijing PM₁₀ [J]. Journal of Environment Sciences, 2006, 18(1): 90-95.
- [4] 张仁健,王明星,胡非,等.采暖期前和采暖期北京大气颗粒物的化学成分研究[J].中国科学院研究生院学报,2002,19(1):75-81.
- [5] He K, Yang F, Ma Y, et al. The Characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35:4 954-4 970.
- [6] 孙业乐,庄国顺,袁蕙,等.2002年北京特大沙尘暴的理化特性及其组分来源分析[J].科学通报,2004,49(4):340-346.
- [7] 王玮,汤大钢,刘红杰,等.中国PM_{2.5}污染状况和污染特征的研究[J].环境科学研究,2000,13(1):1-5.
- [8] 庄国顺,郭敬华,袁蕙,等.2000年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J].科学通报,2001,46(3):191-197.
- [9] 吕森林.北京市大气PM₁₀的矿物学特征及质粒DNA损伤的研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2003.
- [10] 李卫军,邵龙义,余华,等.内陆输送过程中沙尘单颗粒类型及其非均相反应[J].中国环境科学,2008,28(3):193-197.
- [11] Mamani-Paco R M, Helble J J. Particle size and time of the day influences on the morphology distributions of atmospheric fine particles at the Baltimore supersite [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 8 021-8 029.
- [12] 邵龙义,时宗波.北京西北城区与清洁对照点夏季大气PM₁₀的微观特征及粒度分布[J].环境科学,2003,24(5):11-16.
- [13] 杨书申,邵龙义,王志石,等.澳门夏季大气颗粒物单颗粒微观形貌分析[J].环境科学,2009,30(5):1 514-1 519.
- [14] 李金香,董树屏,虞统,等.北京夏季典型天气TSP组成和来源对比[J].环境科学研究,2007,20(6):87-93.
- [15] Okada K, Qin Y, Kai K. Elemental composition and mixing properties of atmospheric mineral particles collected in Hohhot, China [J]. Atmospheric Research, 2005, 73:45-67.
- [16] 李卫军,邵龙义,时宗波,等.城市雾天单个矿物颗粒物理和化学特征[J].环境科学,2008,29(1):253-258.
- [17] 于令达,王广甫,朱光华,等.2008年北京采暖开始前后大气颗粒物化学成分及来源研究[J].环境科学学报,2010,30(1):205-210.
- [18] Okada K, Kai K. Atmospheric mineral particles collected at Qira in the Taklamakan Desert, China [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38:6 927-6 935.
- [19] 王丽丽,张仁健,李定龙,等.北京秋季气溶胶化学成分的高分辨率观测及来源分析[J].气候与环境研究,2009,14(4):399-404.