

# 北京地区一次尘暴气溶胶的 化学组成及其来源

温玉璞 杨东贞

(中国气象科学研究院,北京 100081)

杨绍晋 杨亦男 陈冰如

(中国科学院高能物理研究所,北京 100080)

## 提 要

讨论了1990年4月25日北京地区出现的一次强尘暴过程的气溶胶特征,探讨了尘暴的来源,从对形成尘暴的气象背景以及尘暴气溶胶中元素资料和稀土元素分布模式的分析,认为该次尘暴气溶胶主要是由形成大风地区及其途经地区的尘土微粒混合组成的。

**关键词:** 尘暴;气溶胶;元素;来源。

## 1 引 言

大气尘是一种涉及全球环境的物质,它不仅关系到大气本身的物理、化学性质,而且还关系到大气环境质量。我国是全球大气尘土的重要源区之一,气象资料表明,几乎每年春季,在我国西北部干旱地区都会出现程度不同的扬沙,浮尘及尘暴等天气现象。由强冷空气活动引起的尘暴会经过北京,黄淮,江淮,有的还影响到朝鲜、日本甚至太平洋中部。尘暴不仅污染了途经地区上空的大气,而且还造成了一系列的生态环境问题。随着人们对全球沙漠化趋势及全球环境问题的关心,各国科学工作者都非常重视研究起源于我国西北部干旱地区尘暴气溶胶的化学组成,粒度分布以及来源和输送过程。已有的工作分别从形成尘暴的天气条件或气溶胶总量的化学特征做了讨论<sup>[1,2]</sup>,而对尘暴气溶胶化学特征随粒径的分布、变化的讨论则不多。

本文主要对1990年4月25日,在北京地区出现的近十年来少见的一次强尘暴过程,采集了这次尘暴过程的气溶胶样品;结合尘暴过程出现的天气形势,着重研究了气溶胶的元素组成、浓度分布、及随粒度的变化特征和尘暴与非尘暴气溶胶的稀土元素分布模式,以此来讨论该次尘暴过程的气溶胶特征及其来源。

## 2 观测和分析方法

### 2.1 气溶胶采样

用日本高立理化株式会社制造的 KA-200 型安德逊分级采样器(八级撞击式),及国产的 KB-120 型空气采样器(已经标定),分别采集不同粒径的气溶胶粒子和总颗粒物。分级采样器各级(1—8 级)空气动力学当量直径见表 1,流量为 28.3 升/分。空气采样器流量 95 升/分。采样器所用的滤膜均为国产新华滤纸(相当于 Whatman41),关于中子活化分析方法和滤纸性能可参考有关文章<sup>[3]</sup>。两种采样器均放在北京西郊气象科学研究院检定所大楼顶的平台上,离地面约 15 米。1990 年 4 月 25 日 14 时,北京地区开始出现尘暴,从 14 时起到 23 时止,用 KB-120 型采样器连续采集气溶胶样品 5 次,每次采样时间为 1 小时;在此期间同时还用 KA-200 型分级采样器采集三组样品,每次采样时间为 2.5—3 小时。为了与本次采集的尘暴样品进行比较,在无尘暴的 4 月 10 日还采集了一组分级样品,采样时间为 11.5 小时。

表 1 KA-200 多级采样器粒径( $\mu\text{m}$ )分级

级数	1	2	3	4	5	6	7	8
粒径	>11	7.0—11	4.7—7.0	3.3—4.7	2.1—3.3	1.2—2.1	0.43	1.1 < 0.43

### 2.2 分析方法

本工作用仪器中子活化分析(INAA)及质子激发 X 荧光分析(PIXE)测定尘暴气溶胶的元素含量。元素中 Pb、S、Si 采用 PIXE 方法测得。

#### 2.2.1 仪器中子活化分析

样品标准及作为质量监控的标准参考物均盛于同一照射铝筒内,放入原子核反应堆,照射 20 小时,中子注量率为  $6 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ,所用的探测器为 DD-8000 微机程序控制 Ge(Li) $\gamma$  谱仪。根据各被测物的核性质,用不同的衰变时间测得各个核元素的  $\gamma$  能谱,然后由微机进行数据处理。

#### 2.2.2 质子激发 X 荧光分析

取一定量的尘暴气溶胶样品,制靶后放入静电室内进行照射,质子束流强度为 30—50nA,测量仪器为 Si(Li)探测器,探测器与束流方向成 90 度,水平位置测量,获取的谱数据,由计算机进行处理。

上述两种方法均不需对样品进行处理,避免了因样品制备所引进的人为误差,具有较高的可信度。但因 KA-200 采样器采样不均匀性、用 PIXE 方法分析时,制靶造成的分析误差,可控制在 20%—30%。

### 3 尘暴期间的天气形势

尘暴期间,由于天气形势、气团来源及途经地区植被状况和土壤类型的差异,气溶胶的质量浓度、化学组成和粒度分布都会有很大的不同。为了了解这次尘暴过程气溶胶化学组分与来源之间的关系,我们考察了造成这次尘暴的东亚强冷空气的天气形势。根据资料分析可知在1990年4月下旬影响我国的冷空气活动路径偏北,4月24日蒙古高原中西部即有冷锋移过,锋后先后出现了大范围的扬沙、浮尘及沙暴天气,地面风力5—7级,阵风达9级以上。次日午后在南下冷空气的影响下,我国内蒙中西部、河北北部及北京地区也相继出现了沙尘天气,傍晚前后北京的水平能见度降至最低,仅百余米。25日前半夜风力开始减弱,能见度开始有所好转。26日华北部分地区受东移高压后部偏南风回流的影响,仍出现了沙尘天气。这次沙尘天气过程在26日中午即告结束。因蒙古气旋发展,由南下冷空气活动而导致的这次尘暴及沙尘天气的复盖区主要包括蒙古及黄土高原和华北平原沿途广大的风蚀地区。这次尘暴过程还在黄河下游的部分地区造成了浮尘天气(图1)。

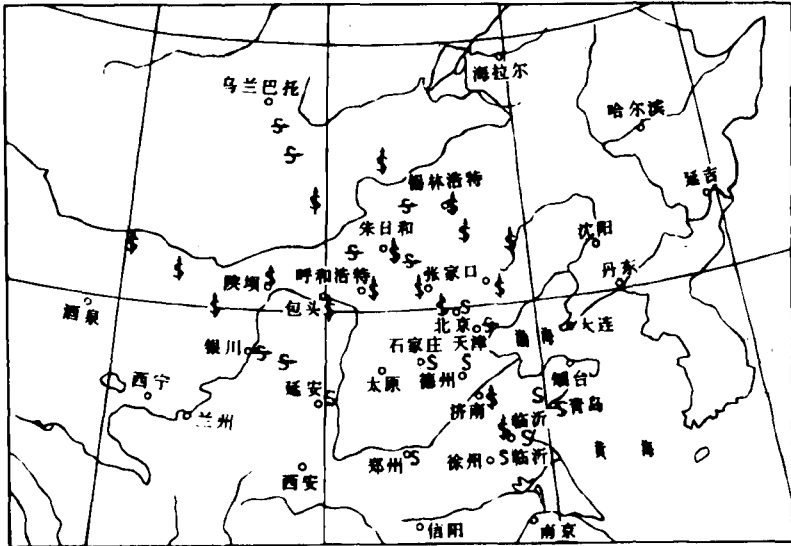


图1 1990-4-24—26日沙尘天气分布  
(图中符号:⊕ 沙尘暴,⊕ 扬沙,S 浮尘)

### 4 结果与讨论

#### 4.1 尘暴气溶胶的浓度特征

北京城市地区气溶胶浓度,通常在 $400\text{--}700\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,而尘暴期间气溶胶浓度可陡然增加到 $9844\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,比平时高一个量级。图2是气溶胶浓度随时间的变化情况,从图

可以看出随着尘暴逐渐移出本市,气溶胶浓度随之回落。

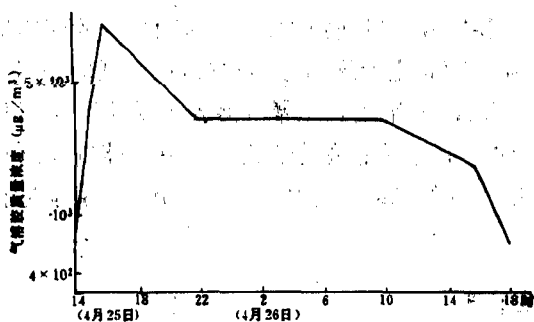


图2 尘暴期间气溶胶质量浓度随时间的变化

#### 4.2 尘暴气溶胶的元素组成

表2列出了尘暴和无尘暴期间,气溶胶化学元素的组成。在尘暴期间,不仅气溶胶质量浓度增高,部分元素的浓度也随之增加,其中尤以Al, Si, Ti及稀土等地壳元素更为明显。而S, Pb, Se, Br和Zn等易挥发元素的浓度,尘暴期间却比无尘暴期间的更低,尘暴过

表2 尘暴气溶胶元素含量( $\text{ng}/\text{m}^3$ )随时间的变化( $\text{ng}=10^{-9}\text{g}$ )

元素	4月25日					4月26日			4月29日
	15:00	16:00	17:00	20:00	22:00	9:50	14:00	16:00	8:00
Al	201000	690000	483000	270000	169000	184000	140000	145000	25300
As	67	156	123	84	47	53	58	20	8
Au	0.07	0.33	0.10	0.06	0.09	0.08	0.04	0.07	0.35
Ba	1750	4760	3930	1830	1300	1410	1060	1220	473
Br	27.6	28.8	37.2	22.2	25.8	37.2	13.8	16.6	70
Ca	231000	641000	531000	219000	155000	96100	152000	176000	70800
Ce	252	605	496	336	210	176	145	139	31.4
Cl	10300	20000	54500	5900	11300	9100	2950	2540	6000
Cr	263	816	572	312	224	218	178	215	53.5
Cs	26.9	81.9	61.3	34.3	24	25	21	19.6	4.5
Eu	4.6	13.4	9.0	5.2	2.8	3.0	3.4	3.1	0.78
Fe	119000	350000	242000	130000	87400	89100	83600	75000	18000
Mn	2270	7810	5610	3050	2070	1980	1600	1710	658
K	80300	181000	154000	82600	52400	53500	38300	38600	9630
La	136	422	319	169	119	120	93	86	20
Mg	103000	387000	285000	149000	46400	113000	21000	60600	16000
Na	31200	87700	81800	33500	23500	23300	18500	16900	4760
Pb	633	104	--	239	60	43	86	--	1844
S	--	--	--	--	2771	--	7508	17665	27770
Sb	8.1	15.4	16.3	9.3	4.6	6.3	3.2	11.3	21.7
Se	--	--	8.1	2.6	1.5	6.4	--	5.8	10.5
Si	369100	733800	382000	358000	294000	256000	227000	231000	86300
Ti	14200	51200	29600	18100	9950	13600	8150	7640	1600

注:作为对照,4月29日是在无尘暴日采集的样品

后,易挥发元素的浓度又逐渐回升.此结果反映出在城市地区易挥发元素主要来自燃料燃烧的人为污染源<sup>[1]</sup>.因尘暴期间的风速很大,人类活动排放的污染物很快被风吹散带走,使易挥发元素的浓度稀释.随着尘暴逐渐移出本市,风速减弱,易挥发元素的浓度又恢复到通常水平.但是唯独元素As的浓度在尘暴气溶胶中反而增加.根据我们已测定过的尘土样品的As含量结果,估计是与源地输送来的沙土中含砷量较高有关,北京上风方的崇礼、康保、呼和浩特的松散砂壤的As含量为11—17ppm,均远远高于世界土壤As含量的平均值(6ppm).

### 4.3 尘暴气溶胶的粒度分布

#### 4.3.1 尘暴气溶胶的质量粒度分布

图3表示尘暴和无尘暴期间颗粒的质量粒度分布.从分布图可以看出,这次尘暴气溶胶中,大于2微米的粗颗粒占96%,其中大于11微米的颗粒占44.2%.尘暴气溶胶的质量绝大部分集中在粗颗粒,这也是风载尘土的一个特征.至于小于2微米的细颗粒,在无尘暴期间占总颗粒的20.3%,而尘暴期间只有4%.这是因为城市地区,细颗粒气溶胶主要来自燃煤等燃料燃烧的排放物.由于尘暴过程中,西北风很强,人为排放的细颗粒气溶胶很快被风带出北京地区,向下游方向输送.因此,无尘暴期间细颗粒气溶胶的量比尘暴期间多.

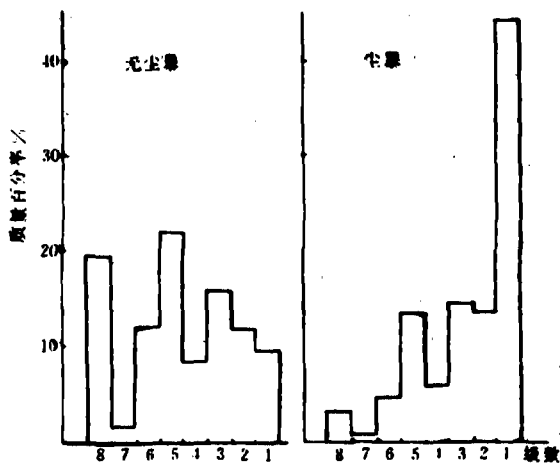


图3 尘暴与无尘暴气溶胶质量粒度分布

#### 4.3.2 尘暴气溶胶的元素浓度粒度分布

根据分级采样器采集的气溶胶样品,测定其各级粒径范围内的元素浓度,可观察到各种元素的分布特征.图4a画出尘暴与无尘暴期间,地壳元素Fe的粒度分布特征(其它地壳元素的分布特征都与Fe相似,不另列举).从粒度分布特征曲线可以看出Fe呈双峰型,说明有两种不同的来源,估计是燃煤和尘土.无尘暴期间地壳元素Fe的第二峰值在2.1—3.3微米之间,而尘暴过程中,开始在4月25日14:40—17:00采集的样品中,地壳元素Fe的第二个峰值仍在2.1—3.3微米之间,但到17:05—20:15采集的样品,其分布特征就稍有改变,第二峰值移向粒度较粗的3.3—4.7微米范围.此结果说明在尘暴

最强烈时,气溶胶的来源不同于平时的及其前后采集的样品。

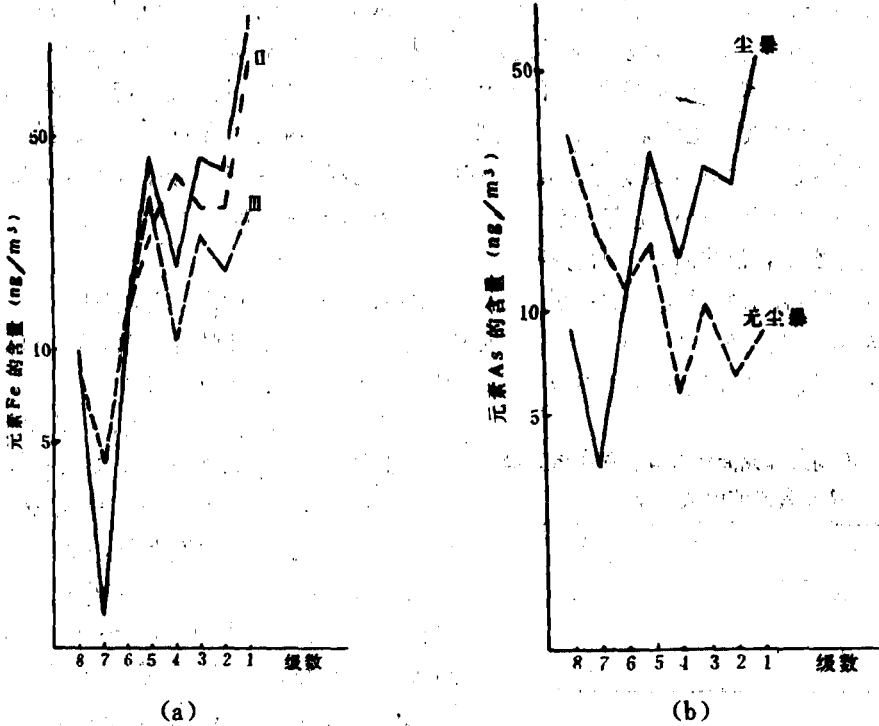


图4 尘暴与无尘暴气溶胶中地壳元素 Fe(a)和易挥发元素 As(b)的含量-粒度分布  
 (说明:折线 I、II 为尘暴期间不同时段测出的结果, III 为无尘暴期间测得的结果(实际值应为图中读数的 1/10))

图 4b 给出了尘暴与非尘暴期间,易挥发元素(以 As 为代表)的粒径分布特征,可明显看出,尘暴气溶胶中 As 的分布从粗颗粒到细颗粒呈下降趋势,但非尘暴期间则与其相反,此特征充分反映了非尘暴期间易挥发元素 As 主要来自燃煤等燃料的细颗粒,尘土中的 As 在粗颗粒中也有部分贡献;而尘暴期间人为排放的部分被稀释扩散,尘土的比例增加,因此粗颗粒中 As 浓度就显著上升。

表 3 尘暴和无尘暴期间不同粒径( $\mu\text{m}$ )气溶胶中元素的富集因子

粒径		>11	11	7	4.7	3.3	2.1	1.1	0.43
无	Fe	1.2	1.2	1.2	1.7	1.3	1.4	1.8	1.4
	Ti	1.3	1.3	1.1	1.0	1.2	1.7	1.9	1.2
尘	Sc	1.0	1.1	1.1	1.0	1.2	1.2	0.8	0.9
	As	101	121	153	168	175	335	2013	1324
暴	Sb	49	58	83	80	220	1660	6374	2592
	Fe	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1
尘	Ti	1.1	1.1	0.9	1.2	1.0	1.2	1.6	1.2
	Sc	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
暴	As	17	18	21	21	24	27	120	65
	Sb	13	10	15	15	15	21	148	122

### 4.3.3 尘暴气溶胶的富集特征

从气溶胶元素浓度看,在大于11微米的大颗粒中都富含硅、铝、铁、钛等地壳元素。但是从表3列出的富集因子可以看出,无论是尘暴或非尘暴期间,地壳元素在各种粒径范围内的富集因子都接近于1,说明地壳元素主要来自自然源。但是对易挥发元素As和Sb来说,非尘暴期间粗颗粒中的富集因子比尘暴期间大一个量级,尤其是小于1微米的细颗粒则相差近二个量级。此结果说明非尘暴期间,在北方煤烟型污染的城市,来自燃料燃烧排放,使得气溶胶中大量富集易挥发元素,其中细颗粒富集得更多。同时由于部分沉降地面,随着二次扬尘使得粗颗粒也有一定的富集,所以其富集因子都大于10。

### 4.3.4 尘暴气溶胶的质量中值直径

中值直径表示所采集物质粒子为50%时的空气动力学当量直径,它能较好地反映气溶胶颗粒在各粒径范围的集中趋势。根据安德逊分级采样器获得的数据,可以对气溶胶颗粒的质量中值直径及元素浓度中值直径分别进行计算,其结果列于表4。

表4 不同采样期间气溶胶质量中值直径及元素浓度中值直径( $\mu\text{m}$ )

采样期间	尘	暴	无尘暴
质量中值直径	9.2	2.8	2.8
浓度	As	6.6	1.4
中值	Sb	3.6	0.9
直径	Fe	8.0	4.5
	Al	8.5	4.7

从列出的数据可以看出,尘暴期间气溶胶质量中值直径为9.2微米,这比非尘暴期间2.8微米大,说明尘暴气溶胶粗颗粒占主要部分。关于元素浓度的中值直径,易挥发元素和地壳元素,在尘暴期间均比非尘暴期间的大,特别是元素As其中值直径为6.6微米,较非尘暴期间1.4微米约大5倍,从另一方面再次说明尘暴粗颗粒气溶胶中As含量较高。

## 4.4 尘暴气溶胶中稀土元素(REE)的特征

稀土元素的化学性质相似,彼此不易分离,在地球化学研究领域内,以稀土元素作为地球化学“指示剂”的应用越来越广,它可为岩石成因、成岩成矿的物理、化学条件及地球的形成与演化提供重要的地球化学信息。关于大气气溶胶中稀土元素的行为能否反映其主要组分的性质,至今尚在探索中。本工作试图通过对尘暴气溶胶稀土元素含量、分布模式与其它不同污染源排放物的稀土分布特征进行比较研究,进一步探索尘暴气溶胶的来源。为了讨论尘暴气溶胶的稀土分布模式,我们对气溶胶、尘暴途经地区的土壤及燃煤排放的飞灰,分别进行稀土元素测定,求得各种样品中稀土元素的平均值,并以球粒陨石值标准化<sup>4</sup>作图<sup>[1]</sup>。由图5可见,不同来源的气溶胶稀土分布模式是有差异的,尘暴和非尘暴气溶胶都富集其中的轻稀土元素(LREE)部分,其La/Lu大于1、分布曲线向右倾斜(即主要富集轻稀土元素),其中La-Eu曲线较陡,Eu-Lu曲线较为平坦。根据稀土元素分布模式的相似性,可以判明不同时期采集的气溶胶样品中都含有尘土组分。虽然它们的稀土分布模式曲线相近,但因尘土中稀土元素之间的分馏情况的不同,其分布也有差异。这些差异反映了它们各自的来源不同。这次尘暴气溶胶的稀土分布没有呈现元素Eu的负

· 绝大多数球粒陨石的稀土元素丰度是很相近的,因此多以它做为稀土元素标准化的标准。

异常,而从图 6 可以看出燃煤飞灰及北京远郊区表层土的稀土元素分布模式均呈现 Eu 负异常。上述结果说明在无尘暴期间,北京大气气溶胶的稀土元素主要来自燃煤排污以及附近地区尘土的贡献。而尘暴期间,它的分布模式与上游途经地区的尘土很相似。由此根据稀土元素分布模式的特征,我们判断这次尘暴气溶胶是由形成尘暴地区及其途经地区的扬沙微粒混合组成的。

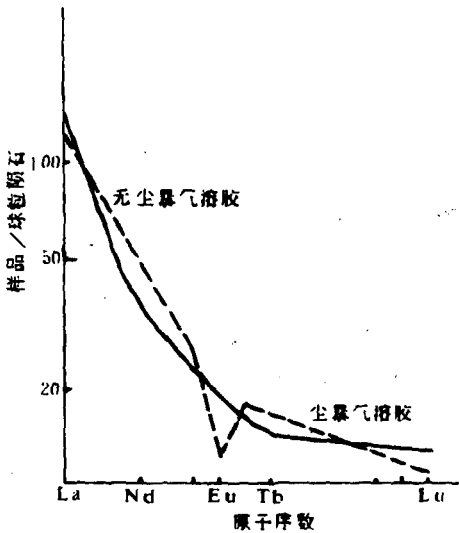


图 5 本次尘暴过程与无尘暴气溶胶稀土元素分布模式

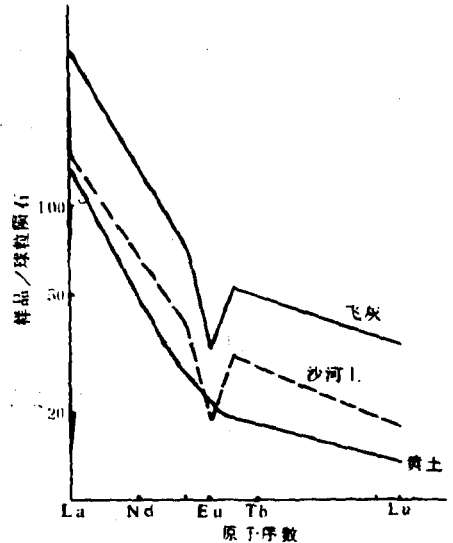


图 6 北京燃煤飞灰、河北黄土与北京沙河土的稀土分布模式

## 5 结束语

从对 1990 年 4 月 25—26 日尘暴过程所采集的气溶胶样品的分析,和对尘暴期间气象条件的描述,可以认为:

(1) 这次出现在北京上空的尘暴现象是因中西伯利亚强冷空气南下,由蒙古及大风途经的黄土高原及华北地区的沙尘天气所造成的。

(2) 尘暴期间,不仅气溶胶的质量浓度比平常约高出一个数量级,其化学成分的浓度也有明显的变化,Al、Si、Fe、Ti 等地壳元素及稀土元素浓度大为增加,而来自燃烧和人为污染的元素 S、Pb、Se、Br 及 Zn 等却明显减少。不同的是,尘暴气溶胶中粗粒子的易挥发元素 As 的浓度反而较平时有所增加,这可能与沙尘源地及沿途土壤含砷量较高有关。

(3) 尘暴气溶胶的质量-粒度分布、元素的浓度-粒度分布及元素富集的粒度分布特征都与非尘暴气溶胶的粒度分布有明显差异。

(4) 尘暴气溶胶的质量中值直径为 9.2 微米,非尘暴气溶胶则为 2.8 微米,粗粒子在尘暴气溶胶中占主要部分。各元素的中值直径在尘暴气溶胶中也比平常增大。

(5) 尘暴与非尘暴气溶胶的 REE 分布模式有显著区别,它们中的稀土元素有完全不同的来源,并由此可判断出这次尘暴气溶胶主要是由形成大风的地区及大风途经地区的



沙尘混合而成。

致谢:邵志清、杨树勇同志为本文的打印付出了大量劳动,谨表谢意。

### 参 考 文 献

- 1 周明煜,曲绍厚,宋锡铭,李五英,杨绍晋,钱琴芳.北京地区一次尘暴过程的气溶胶特征.环境科学学报,1981,1(3),207—219.
- 2 Yang Dongzhen, Xu Xiaobin and Wen Yupu. A case study on sandstorm. *ACTA Meteorologica Sinica*, 1991, 5(2), 150—159.
- 3 杨绍晋,倪骏.仪器中子活化分析方法测定大气悬浮颗粒中的微粒量元素.环境科学,1982,3(2),40—42.
- 4 赵振华.某些常用稀土元素地球化学参数的计算方法及其地球化学意义.地质地球化学,1985,增刊,11—14.

## CHEMICAL COMPOSITION AND ORIGIN OF A DUSTSTORM OVER BEIJING

Wen Yupu Yang Dongzhen

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Yang Shaojin Yang Yinan Chen Bingru

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

### Abstract

In this paper, the origin of aerosol particle for a severe duststorm process, which occurred in the period of 25—26 April 1990 over Beijing, is discussed based on the analyses of the weather situation concerning the duststorm and data of the chemical elements, as well as the rare-earth element distribution of the aerosol particles collected in Beijing. The results show that the aerosol particles of the duststorm was made of the sand soil originated from the areas where the strong wind was appeared.

**Key words:** Duststorm; Aerosol; Element; Origin.