

# 北京 2004 年春季的一次沙尘天气物理化学特性分析

浦一芬, 吴瑞霞, 张仁健

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 分析了 2004 年春季发生在北京的一次沙尘天气的物理化学特性. 这次沙尘天气强度较小, 沙尘过程矿物元素的粗细粒态比重接近, 但粗粒态在沙尘初期的比重大于沙尘后期, 也大于沙尘过后. 各类污染物元素的粗细粒态比重差别较大. 各类元素的直径大于  $16\ \mu\text{m}$  的粒子所占的比重均很小. 大气气溶胶的粒子谱不同于以往研究的其他沙尘暴过程. 这次矿物元素的粗细粒态富集因子差别较小, 但污染物元素的差别较大, 而且污染物元素在沙尘期间和沙尘后有着显著的变化. 这次沙尘天气来源于蒙古的西南部和内蒙的中西部.

**关键词:** 沙尘暴; 化学成份; 质量浓度; 富集因子; 后向轨迹分析

**中图分类号:** X513

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2006)S2-00081-05

## 1 前言

北京市污染物中可吸入颗粒物  $\text{PM}_{10}$  居首位.  $\text{PM}_{10}$  可直接进入人体的呼吸系统, 引发气管炎和其他慢性肺病. 而  $\text{PM}_{2.5}$  则可以黏附在肺泡上, 进入血液, 引起心肺疾病<sup>[1]</sup>.  $\text{PM}_{10}$  的成份复杂, 既包含有机污染气溶胶, 也包含矿物气溶胶和硫酸盐等. 这些气溶胶的产生即与化石燃料燃烧, 建筑工地的扬尘以及汽车尾气排放有关, 又与沙尘远距离输送有关. 北京冬春季可吸入颗粒物  $\text{PM}_{10}$  的值较高, 一些研究表明, 外来源是一个重要的贡献者<sup>[2]</sup>.

我国西北和蒙古的荒漠地区气候异常干燥, 植被稀少, 如果积雪覆盖少, 地表裸露, 遇上冷空气活动, 大风会把土壤和沙地中的颗粒吹起, 形成满天的沙尘. 由于冬春季北京处于盛行风的下风方向, 成为亚洲沙尘输送的一个主要通道<sup>[3]</sup>. 沙尘常常在强劲的北风席卷下长驱直入, 抵达北京. 这些远方而来的沙尘既是北京气溶胶的一个重要来源, 也是北京大气颗粒物污染的直接贡献者. 沙尘暴的到来严重地影响北京的大气环境质量以及人民健康, 也给社会的经济活动带来了不便. 沙尘中携带了大量的矿物元素, 如 Fe, Ca, Al, Ti 等, 使北京大气中这类元素的质量浓度是平常几十倍. 同时, 沙尘也有利于污染元素如 Cu, Pb, As, S 等转化和积累, 使这些元素的浓度显著增加<sup>[4-6]</sup>. 已有不少关于北京地区沙尘暴的理化特性的研究, 这些研究大多集中于某次特大沙尘暴<sup>[4,5]</sup>, 如 2000 年以及 2002 年. 但外来源通过远距离输送影响北京不仅仅限于一两次特大沙尘暴, 历年来均有一些强度并不大的沙尘途经北京, 如 2004 年春季的一

次沙尘天气. 这些沙尘天气也对北京产生了一定影响, 但它们的物理化学特性与其他沙尘暴的区别, 源地是否一样等均有待研究. 本研究拟分析 2004 年春季一次沙尘天气的物理化学特性及其源地, 探讨影响北京的一般沙尘天气的特征.

## 2 实验

### 2.1 沙尘过程

这次沙尘天气分三个时段, 第一个时段为 2004 年 3 月 9 日 20:30~10 日 8:30(简称沙尘夜), 第二个时段为 2004 年 3 月 10 日 8:30~17:30(简称沙尘昼), 第三个时段为 2004 年 3 月 10 日 17:30~11 日 8:30(简称沙尘后).

### 2.2 取样地点

采样点位于中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室的 325 m 气象观测塔小院内 2 层小楼楼顶, 采样点高度约 8 m.

### 2.3 取样方法

使用单孔分级撞击采样仪对大气颗粒物进行采样, 采样仪有 8 级, 粒子采集直径分别为  $<0.25$ ,  $0.25\sim0.5$ ,  $0.5\sim1$ ,  $1\sim2$ ,  $2\sim4$ ,  $4\sim8$ ,  $8\sim16$ ,  $>16\ \mu\text{m}$ , 相应级别为 0~7 级. 采样时段为 2004 年 2 月 28 日 8:20~11:00, 2004 年 3 月 9 日 20:30~10 日 8:30, 2004 年 3 月 10 日 8:30~17:30 以及 2004 年 3 月 10 日 17:30~11 日 8:30.

### 2.4 样品化学成份分析

收集的样品在北京师范大学低能核物理研究所的  $2\times1.7\ \text{MV}$  串列加速器上进行质子激发 X 荧光(PIXE)分析, 得到 Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br 和 Pb 共 20 种元素的浓度<sup>[3,5]</sup>.

收稿日期: 2005-10-17, 修回日期: 2006-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 40675074); 863 计划资助项目(编号: 2005AA641010); 973 计划资助项目(编号: 2007CB407300)

作者简介: 浦一芬(1965-), 女, 江苏省无锡市人, 博士, 研究员, 主要从事大气和海洋环境方面的研究, E-mail: pyf@mail.iap.ac.cn.

3 结果与分析

3.1 元素浓度

图 1 为这次沙尘过程北京大气颗粒物的元素总浓度. 沙尘昼与沙尘夜的值相近, 接近 1999 年春无沙尘情况<sup>[5]</sup>, 但远高于沙尘后, 表明这次沙尘较小. 值得注意的是, 沙尘夜的元素总浓度比沙尘昼的略高. 从元素质量浓度排序来看, 沙尘期间和沙尘后, 排列在前 5 位均为: Si, Ca, Fe, Al, K, 可以推测沙尘过后的元素总浓度迅速下降的原因是这些地壳元素的迅速沉降. 总的来说, 这次沙尘过程与 2000 年和 2002 年的几次特大沙尘暴相比, 污染程度较小. 同时沙尘过后的元素总浓度较 1999 年春无沙尘时的低, 表明近几年尽管北京城市扩张和车辆增多, 但由于政府加大了污染治理的力度, 使得北京污染状况有了显著的改善.

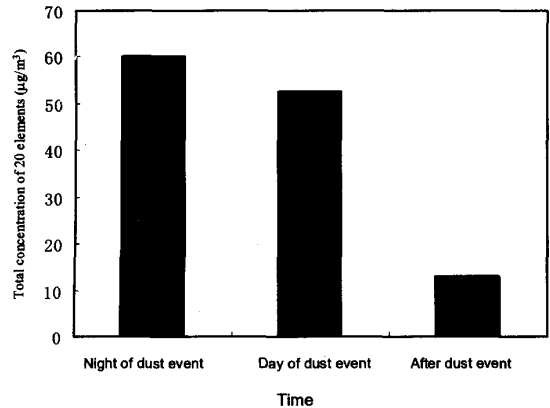


图 1 沙尘过程的元素总浓度  
Fig.1 Total concentrations of 20 elements

图 2 是这次沙尘过程的北京大气颗粒物的元素浓度谱. 从粗、细粒子的分布特征来看, 沙尘夜和沙尘昼显著的不同. 沙尘昼呈以第 6 级为峰值粗粒态为主的单峰分布, 沙尘夜则以 3、4 级以及第 7 级为峰值的双峰态分布. 沙尘夜的细粒态大大高于沙尘昼, 沙尘昼的粗粒态高于沙尘夜. 因此, 沙尘的一个显著特征是粗、细粒子相对分布有昼夜变化. 另外沙尘夜的第 7 级元素大于沙尘昼的第 7 级元素, 这或许与重力沉降和沙尘过程强弱有关, 因为第 7 级元素主要是由沙尘携带. 沙尘夜时, 过境的沙尘处于盛期, 第 7 级粒态含量高. 到白天尤其下午, 沙尘有所减弱, 且前一个晚上沙尘携带的第 7 级粒态粒子迅速沉降, 使得沙尘昼第 7 级粒态比沙尘夜小. 沙尘过后元素的粗细粒子的分布相仿, 且第 7 级的粒子浓度迅速下降, 这是由于重力沉降作用以及夜间人类活动的减少所致. 在沙尘暴期间的粗粒态和细粒态

的浓度值要高于沙尘暴后的值, 沙尘暴增加了北京市的各级别大气颗粒物.

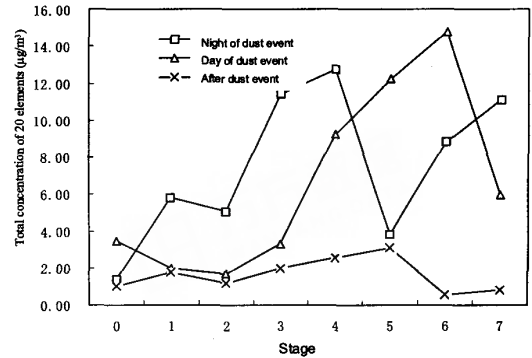


图 2 沙尘过程的元素总浓度谱  
Fig.2 Size distributions of total concentrations of 20 elements in dust period

表 1 为这次沙尘过程的元素浓度比较. 从各级粒子的总元素浓度来看, 沙尘以 0~6 级为主, 第 7 级只占一小部分. 其中沙尘夜的第 7 级粒子的浓度比较高, 占 18%; 沙尘昼第 7 级粒子的浓度则较少, 只占 11%; 沙尘过后的第 7 级粒子迅速下降, 只占 7%. 从具体元素来看, 这次沙尘过程, 除了 Cl, Br, Se 和 Pb 外, 其他元素的第 7 级占整体的比率均是沙尘夜大于沙尘昼, 沙尘昼大于沙尘后. 这体现了沙尘对大部分元素粒子谱半径的影响. 而 Cl 和 Pb 的第 7 级比率则是沙尘昼大于沙尘夜, 沙尘夜大于沙尘后. 这表明这两种元素既受沙尘的影响, 也受人类活动的影响. 而 Se 和 Br 的分布则是沙尘后和沙尘夜较大, 沙尘后较小.

如果进一步将粒子直径谱划分为两类, 一类为细粒子, 直径小于 2 µm, 即 0~3 级; 另一类为粗粒子, 直径大于 2 µm, 即 4~7 级. 沙尘过程各类元素的粗细粒子百分比如表 2. 沙尘夜, 矿物元素粒子半径分布偏向于细粒态, 沙尘昼则偏向于粗粒态. 对比表 1, 可知尽管矿物元素的第 7 级粒子态受沙尘输送的影响而呈现出其占总体比率夜间比白天更大的情形, 但是其他级别的粗粒子却没有受到沙尘输送的影响. 这些增加的粗粒态粒子很有可能是人类活动的结果. 另外, 与 2000 年及 2002 年的几次沙尘暴不同, 这次沙尘过程中矿物元素的粗粒态比例并不是特别高, 尤其是沙尘过后, 就恢复到无沙尘的水平. 考虑到沙尘过后是夜间人类活动减少, 同时风力也弱, 只有 2~3 级, 粗粒子迅速沉降, 这说明沙尘的影响被迅速消除了. 值得注意的是, 污染物元素曾现出与矿物元素完全不同的特点. 例如, Zn 和 S 的粗细粒态比率变化不大, 始终以细粒态为主. 而 Cl 的粗粒态

比率在沙尘夜和沙尘后较小,但在沙尘昼则上升至 50%。尘后接近 50%。沙尘夜和沙尘后的 Cu 粗细粒子分布相当,而沙尘昼 Cu 以细粒态分布为主。

Pb 的粗粒态比率则是在沙尘夜较小,而在沙尘昼和沙

表 1 沙尘期间 0~6 级 ( $d<16\text{ }\mu\text{m}$ ) 和 7 级 ( $d>16\text{ }\mu\text{m}$ ) 元素浓度

Table 1 Element concentrations for particles with diameters less than 16 $\mu\text{m}$ and bigger than 16 $\mu\text{m}$ in dust period in Beijing												
Element	Night of dust event				Day of dust event				After dust event			
	0~6 stage	7 stage	Total	%	0~6 stage	7 stage	Total	%	0~6 stage	7 stage	Total	%
	A	B	C	B/C	A	B	C	B/C	A	B	C	B/C
Al	5.479	1.474	6.953	21	5.686	0.799	6.485	0.123	1.377	0.102	1.479	7
As	0.054	0.012	0.066	18	0.041	0.004	0.045	0.099	0.029	0.002	0.032	7
Br	0.068	0.01	0.078	12	0.081	0.002	0.083	0.024	0.029	0.006	0.034	16
Ca	7.885	1.115	9.001	12	6.778	0.747	7.524	0.099	2.195	0.119	2.315	5
Cl	1.02	0.051	1.071	5	0.418	0.033	0.451	0.073	0.18	0.008	0.188	4
Cr	0.029	0.008	0.038	22	0.032	0.001	0.033	0.034	0.01	0.001	0.012	9
Cu	0.093	0.02	0.112	17	0.823	0.005	0.828	0.006	0.033	0.001	0.034	4
Fe	6.487	1.306	7.793	17	5.069	0.629	5.698	0.11	1.151	0.044	1.195	4
K	3.095	0.584	3.679	16	2.339	0.288	2.626	0.11	0.724	0.026	0.75	3
Mg	1.115	0.231	1.346	17	1.527	0.167	1.695	0.099	0.39	0.056	0.446	13
Mn	0.167	0.028	0.195	14	0.129	0.013	0.142	0.091	0.038	0.002	0.04	6
Ni	0.066	0.018	0.083	21	0.061	0.006	0.067	0.096	0.018	0.001	0.019	5
P	0.452	0.08	0.531	15	0.651	0.101	0.752	0.134	0.333	0.057	0.389	15
Pb	0.134	0.012	0.145	8	0.083	0.017	0.1	0.167	0.055	0.007	0.061	11
S	1.91	0.09	2	5	1.032	0.043	1.075	0.04	0.46	0.01	0.47	2
Se	0.03	0.006	0.036	18	0.045	0.002	0.047	0.042	0.019	0.004	0.024	18
Si	20.095	5.957	26.052	23	21.364	3.057	24.421	0.125	4.849	0.35	5.199	7
Ti	0.467	0.106	0.573	19	0.423	0.045	0.469	0.097	0.106	0.002	0.108	2
V	0.015	0.003	0.019	18	0.016	0.003	0.019	0.141	0.008	0.001	0.009	9
Zn	0.393	0.004	0.397	1	0.133	0.007	0.139	0.047	0.122	0.002	0.124	2
Sum	49.048	11.115	60.163	19	46.73	5.969	52.698	0.113	12.125	0.802	12.927	6

表 2 沙尘天气粗细粒子分布  
Table 2 Percentages of coarse and fine particles in dust period

Element	Night of dust event		Day of dust event		After dust event	
	Fine (%)	Coarse (%)	Fine (%)	Coarse (%)	Fine (%)	Coarse (%)
Al	37	63	16	84	44	56
As	46	54	46	54	65	35
Br	51	49	43	57	47	53
Ca	38	62	26	74	54	46
Cl	74	26	50	50	69	31
Cr	45	55	48	52	64	36
Cu	55	45	96	45	72	28
Fe	39	61	13	87	39	61
K	51	49	20	80	55	45
Mg	18	82	20	80	47	53
Mn	55	45	27	73	50	50
Ni	35	65	19	81	54	46
P	46	54	52	48	55	45
Pb	73	27	51	49	51	49
S	75	25	67	33	82	18
Se	48	52	33	67	47	53
Si	35	65	14	86	36	64
Ti	42	58	19	81	54	46
V	48	52	35	65	57	43
Zn	82	18	94	6	82	18

20 种元素的粒子谱分布可大致分为两类,一类是 Cl, S 等粒子谱分布(如图 3),其特征为对于沙尘夜来说,其 0 级粒子浓度最大,其他级别的粒子浓度很小,而沙尘昼则呈以 1 级粒子为主的细粒态单峰谱分布,沙尘后的粒子谱分布则比较水平,各级粒子的浓度接近.这体现了沙尘过程的昼夜变化.另一类是以矿物元素为主的分布(如图 4),这些元素有 Al, Ca, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Si, Ti 和 V 等.其特征为对于沙尘夜的粒子谱分布的峰出现在 3, 4 级和 6, 7 级,是双峰分布.而沙尘昼的粒子谱分布呈现以粗粒态为主的单峰分布.这类分布与图 2 相似,表明北京的大气颗粒物在沙尘过程中的主要颗粒物的粒子半径谱分布主要由沙尘中的矿物元素决定.而这两类分布特征与以往研究的沙尘暴过程有很大不同,体现了元素谱分布的多变性和多样性.值得注意的是 Cu 的分布比较特殊,沙尘昼的第 0 级粒子的质量浓度异常大,但沙尘夜的质量浓度和沙尘后的近似(图略).

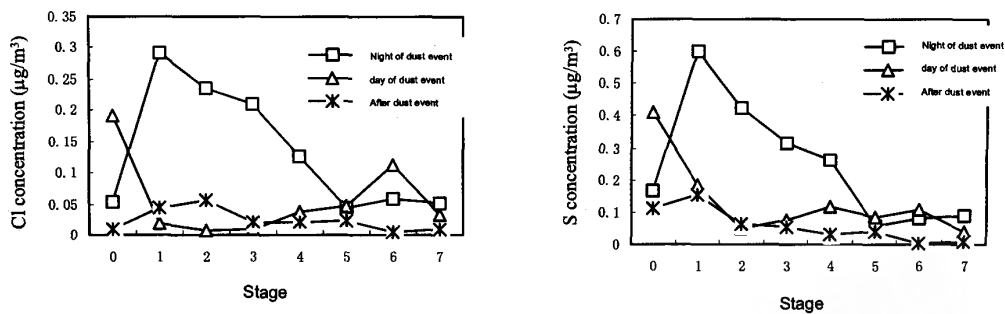


图3 Cl 和 S 元素谱  
Fig.3 Distributions of Cl and S

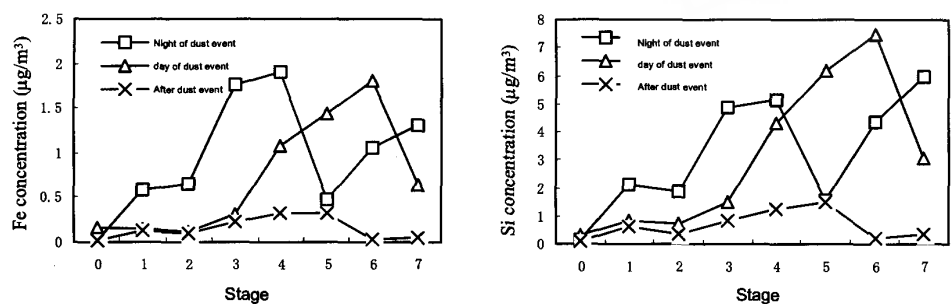


图4 Fe 和 Si 元素谱  
Fig.4 Distributions of Fe and Si

3.2 富集因子

因为大气气溶胶可以有不同的来源和不同的形成机制, 因此其中所含的元素富集程度也不尽相同. 分析沙尘期间元素的富集程度, 有助于确定沙尘的源地. 元素富集度的算法如下:

$$E_f = (C_x/C_r)_g / (C_x/C_r)_r$$

其中,  $C_x$  代表所要分析的元素浓度,  $C_r$  为参照物的元素浓度,  $g$  指的是大气气溶胶,  $r$  指的是参考元素. 参考元素一般指来自地壳和海洋的丰度高且人为污染少的元素, 如 Al, Si, Fe 等. 这里取地壳中的 Fe 作为参照元素<sup>[8]</sup>. 表 3 为沙尘天气过程各类元素以铁为参照物的粗细粒态富集因子.

表 3 富集因子(参照元素为 Fe)  
Table 3 Enrichment factors of dust particles with reference element of Fe

Element	Night of dust event		Day of dust event		After dust event	
	Fine particles	Coarse particles	Fine particles	Coarse particles	Fine particles	Coarse particles
Al	0.516	0.567	0.854	0.675	0.872	0.688
As	280.472	206.491	792.018	137.527	1224.431	421.105
Br	263.974	158.753	978.752	191.196	695.765	494.400
Ca	1.529	1.615	3.656	1.537	3.667	2.012
Cl	100.424	22.598	118.152	17.540	108.121	30.519
Cr	2.788	2.183	10.692	1.710	7.994	2.799
Cu	18.568	9.659	984.983	6.806	48.518	12.167
Fe	1	1	1	1	1	1
K	1.197	0.723	1.376	0.814	1.728	0.876
Mg	0.190	0.552	1.0901	0.651	1.079	0.769
Mn	1.854	0.970	2.712	1.103	2.285	1.422
Ni	6.401	7.587	11.331	7.325	14.21	7.830
Pb	134.525	31.579	268.888	37.929	258.46	158.638
S	95.798	19.811	190.172	13.670	160.852	21.746
Se	5675.444	3968.837	21384.51	6420.19	23768.37	17208.41
Si	0.542	0.649	0.838	0.774	0.742	0.820
Ti	0.900	0.795	1.419	0.863	1.439	0.777
V	1.099	0.746	3.249	0.902	4.0817	1.922
Zn	76.434	10.934	128.855	1.121	156.346	21.941

### 3.3 后向轨迹分析

后向轨迹计算使用的是 NOAA 的 HYSPLIT (Hybrid Single-particle Lagrangian Integrated Trajectory) 模型(Version 4)<sup>[9]</sup>。结果表明, 沙尘源地可能在蒙古的西南部和内蒙的中西部(图 5)。

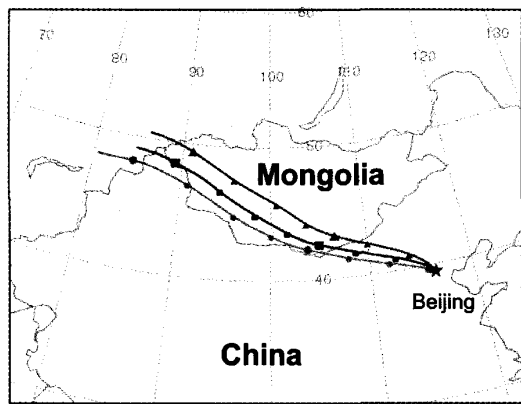


图 5 沙尘过程的后向轨迹分析(其中, 五角星为北京, 圆实线为 100 m 高度的空气质点轨迹, 方实线为 500 m 高度的空气质点轨迹, 三角实线为 1000 m 高度的空气质点轨迹, 每个 6 h 一次标记)

Fig.5 Back trajectory analysis of dust event (Circle, square and triangle lines represent air back trajectories to the height of 100, 500 and 1000 m in Beijing respectively.)

## 4 结 论

通过此次沙尘过程的分析, 取得以下主要结论:

(1) 在沙尘暴期间的粗粒态和细粒态的浓度值要高于沙尘暴后的值, 沙尘暴增加了北京市的各级别大气颗粒物。

(2) 沙尘天气颗粒富集因子分析表明, 地壳元素沙尘期间变化较小, 变化也小。大多数污染物元素的粗细粒态富集因子在沙尘过程中降低, 沙尘过后升高。

(3) 后向轨迹分析表明, 这次影响北京的沙尘源地可能在蒙古的西南部和内蒙的中西部。

### 参考文献:

- [1] 曹国良, 郑方成, 王亚强. 中国大陆生物质燃烧排放的 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 清单 [J]. 过程工程学报, 2004, 4(增刊): 700-705.
- [2] 韩力慧, 庄国顺, 孙业乐, 等. 北京大气颗粒物污染本地源与外来源的区分—元素比值 Mg/Al 示踪法估算矿物气溶胶外来源的贡献 [J]. 中国科学(B 辑), 2005, 35(3): 237-246.
- [3] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust Emission from Chinese Deserts Linked to Variation in Atmospheric Circulation [J]. J. Geophys. Res., 1997, 102(D19): 28041-28047.
- [4] 孙业乐, 庄国顺, 袁惠, 等. 2002 年北京特大沙尘暴的理化特性及其组份来源分析 [J]. 科学通报, 2004, 49(4): 340-346.
- [5] 张仁健, 王明星, 浦一芬, 等. 2000 年北京春季特大沙尘暴物理化学特性的分析 [J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 259-266.
- [6] 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): 76-81.
- [7] 张仁健, 徐永福, 韩志伟. ACE-ASIA 期间北京 PM<sub>2.5</sub> 的化学特征及其来源分析 [J]. 科学通报, 2003, 48(7): 730-733.
- [8] Winchester J, Wang M X, Lu W X, et al. Fine and Coarse Aerosol Composition from a Rural Area in Northern China [J]. Atmos. Environ., 1981, 15: 933-937.
- [9] Draxler R R. Description of the HYSPLIT\_4 Modeling System [R]. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, 2005, 28, Appendices. [Available from <http://www.arl.noaa.gov>]

## Physical and Chemical Characterization of a Dust Event in Spring 2004 in Beijing

PU Yi-fen, WU Rui-xia, ZHANG Ren-jian

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The physical and chemical characteristics of a dust storm episode occurred in Beijing in the spring of 2004 has been studied. This is a small dust event and its concentration is not very high. Concentrations of crustal elements in the fine particles are close to those in coarse particles. The percentage of coarse particles in the beginning of dust period is higher than those in late dust period and after the dust period. For the pollution elements, the percentages of the fine and coarse particles change according to the specific element and time. The percentage of the particles with diameter more than 16  $\mu\text{m}$  is very small. The enrichment factors of the crustal elements have little change in and after the dust storm period. But the pollution elements such as Cu, As, S and Br have significant changes during the dust period and after dust period. The sources of this dust event came from the southwestern Mongolia and western part of Inner Mongolia.

**Key words:** dust storm; chemical composition; concentration; enrichment factor; backward trajectory