

2000年春季北京特大沙尘暴 物理化学特性的分析*

张仁健 王明星 浦一芬
刘 强 符建中 张 文

(中国科学院大气物理所大气边界层和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 2000年春季北京频频发生沙尘天气, 严重影响了北京市大气环境状况。对4月6日北京地区发生的特大沙尘暴化学元素成分的分析表明北京春季沙尘污染极为严重。沙尘暴期间, 20种元素总质量浓度高达 $1536 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 是1999年同期的31.4倍。即使沙尘暴过后, 污染依然严重, 元素总质量浓度仍高达 $338.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 是1999年春季的7倍。研究还发现, 沙尘暴期间来自远方的大粒子占了很大的比例, 绝大多数的元素浓度在粒径大于 $16 \mu\text{m}$ 处出现一个非常高值, 远高于其他谱段的浓度; 在沙尘暴后及其他时间, 还没有观测到这种谱分布。沙尘暴期间的粗粒子 ($d > 2 \mu\text{m}$) 数浓度是沙尘暴后的20倍以上, 细粒子 ($d < 2 \mu\text{m}$) 的数浓度是沙尘暴后的7倍。

关键词: 沙尘暴; 化学成分; 数浓度

1 引言

2000年春季北京多次遭遇沙尘天气, 其频数之多, 强度之大, 为北京十多年来少见, 给北京等广大下游地区的大气环境质量、交通运输、人民的工作生活带来不利影响。

大气颗粒物是大气环境的主要研究内容。颗粒物中不同的成分有不同的来源。为了解沙尘暴对北京市大气环境的影响程度、合理有效而经济地控制和治理沙尘, 必须定量地研究各类源对污染成分浓度的贡献率。因此, 及时取得沙尘暴化学成分的资料是至关重要的。

80年代曾有过北京地区沙尘暴^[1,2]及大气气溶胶化学成分^[3-6]的研究工作。1999年春季我们对北京气溶胶化学成分和粒子谱分布进行过观测研究^[7,8]。但是, 1999年沙尘暴发生的次数较少。1999年4月青海可可西里发生了强烈沙尘暴, 由于随之而来的大面积降雨降雪, 我们在北京没有观测到沙尘暴天气。2000年4月6日, 北京发生了特大沙尘暴天气, 我们在北京及时组织了春季沙尘暴研究。本文是对北京春季“4.6”沙尘暴化学成分和粒子数浓度的分析结果。

1999-06-15 收到

* 本研究得到国家重点基础研究项目G1999043400和中国科学院知识创新工程项目“亚洲沙尘形成、输送机制及其辐射强迫研究”以及知识创新工程项目8-2101和8-2303项目资助

2 北京“4.6”特大沙尘暴简介

根据气象预报和实际天气记录, 2000 年春季北京共发生 9 次沙尘浮尘天气。现列举如下: (1) 3 月 3 日白天浮尘 1 天; (2) 3 月 17 夜至 18 日白天扬沙、浮尘、大风 1 天; (3) 3 月 22 日夜至 23 日白天扬沙、大风 1 天; (4) 3 月 27 日白天扬沙、大风 1 天; (5) 4 月 3 日上午扬沙、大风半天; (6) 4 月 6 日扬沙、浮尘、大风 1 天; (7) 4 月 9 日浮尘 1 天; (8) 4 月 25 日白天扬沙和浮尘天气; (9) 4 月 29 日大风、扬沙和浮尘 1 天。

以上沙尘天气中, 以 4 月 6 日发生的特大沙尘暴天气最为严重。4 月 6 日上午 10 时左右, 京城突降黄尘, 眼前的建筑物只见轮廓, 不见细节; 塑料袋、废纸满天飞舞; 街上行人骤然减少, 人们纷纷进入室内; 建筑工地停工; 办公楼内尘土弥漫; 路上车辆也紧闭车窗, 缓速行驶。

根据卫星云图资料分析, 造成这次沙尘暴天气主要原因是由于蒙古国上空有扬沙浮尘天气, 沿着高空西北气流南下, 加上华北北部已有低气压暖湿气流形成的气旋, 冷暖空气均较活跃而造成的。从影响范围看, 4 月 6 日的沙尘暴波及了中国的大半地区: 西北 5 省区、华北 5 省区、东北的吉林、辽宁以及华东地区的江苏、安徽、山东等。

3 采样

3.1 采样地点

采样点位于北京市北三环外、四环内的中国科学院大气物理研究所 325 m 气象观测塔小院内, 气象塔南约 30 m 的二层小楼楼顶, 采样点高度约 8 m。

3.2 采样方法

使用单孔分级式撞击采样仪对大气颗粒物进行采样, 采样仪有 8 级, 其粒子采集直径分别为 <0.25 、 $0.25\sim0.5$ 、 $0.5\sim1$ 、 $1\sim2$ 、 $2\sim4$ 、 $4\sim8$ 、 $8\sim16$ 、 $>16\ \mu\text{m}$ (见表 1)。

表 1 分级采样仪的级数和采样直径

采样仪的级	0	1	2	3	4	5	6	7
采样粒径范围 / μm	<0.25	$0.25\sim0.5$	$0.5\sim1$	$1\sim2$	$2\sim4$	$4\sim8$	$8\sim16$	>16

由于沙尘浓度较大, 在沙尘暴期间采样时间较短。作为对比, 在沙尘暴结束后又进行了取样观测。本次实验共取得 5 组 40 个分级样品, 取样时间分别为 12:30~17:30 (第 1 天), 17:30~21:30 (第 1 天), 21:30~07:30 (第 2 天), 7:30~17:30 (第 2 天), 17:30~08:30 (第 3 天)。在实验中, 我们在采样开始时和采样结束时各进行一次流量测量, 以两次测量的平均值作为采样的流量。

采用国产苏州 BCJ-1 尘埃粒子计数器测量气溶胶粒子数浓度, 仪器分为 6 档: $0.3\sim0.5$ 、 $0.5\sim0.7$ 、 $0.7\sim1.0$ 、 $1.0\sim2.0$ 、 $2.0\sim5.0$ 、 $>5.0\ \mu\text{m}$ 。采样间隔时间为 2 min, 流量为 $5.66\ \text{L}/2\ \text{min}$ 。观测过程中, 该仪器与另一台同样型号的仪器进行对比, 两者观

子元素浓度占 93%，沙尘暴过后粗粒子仍占 85%。可见，沙尘暴期间，粗粒子占绝大部分，沙尘暴过后，粗粒子浓度比例有所下降，但依然很高。沙尘暴过后，粗粒子和细粒子浓度均大幅度下降，而粗粒子比例降低说明其沉降得更多。沙尘暴过后浓度依然很大，表明沙尘暴的影响并未彻底消除。

对各级元素浓度的分析发现，沙尘暴期间元素的最大粒径级 7 级 ($d > 16 \mu\text{m}$) 的元素浓度明显高于其他各级的浓度。因此，可以把元素浓度分为 0~6 级和 7 级来计算 (表 3)。从表 3 可以看出，在沙尘暴期间，20 种元素总浓度在 7 级的元素浓度占总元素浓度的 66% 以上。各个元素的比例有所差别，其范围在 49%~95% 之间。在沙尘暴发生后，20 种元素总浓度在 7 级的元素浓度仅占总元素浓度的 21%。各元素在 7 级的浓度占总浓度的 30% 以下，其中 Pb 在 7 级仅占 1%。这说明沙尘暴输送了大量远方的土壤沙尘粒子。粗粒子主要来自风蚀过程，来自土壤和沙尘，沙尘暴具有风送土壤沙尘的特点。因此，尽管最近这段时间北京由于城市交通改造和建筑的兴建等而存在大量施工

表 2 沙尘暴期间与其他时间的总元素浓度比较

时 间	20 种元素总浓度 / ($\mu\text{g} / \text{m}^3$)
1998 年冬季(1999-02)	56
1999 年春季(1999-03)	48.5
2000 年春季沙尘暴期间(2000-04-06)	1536
2000 年春季沙尘暴后(2000-04-07)	338.7

表 3 沙尘暴期间及沙尘暴后 1~6 级 ($d < 16 \mu\text{m}$) 和 7 级 ($d > 16 \mu\text{m}$) 元素浓度 $\mu\text{g} / \text{m}^3$

元素	沙尘暴期间				沙尘暴后			
	0~6 级	7 级	全部	百分比	0~6 级	7 级	全部	百分比
	A	B	C	B/C	A	B	C	B/C
Mg	13.307	12.688	25.995	49%	6.118	1.299	7.417	18%
Al	64.796	92.824	157.62	59%	30.205	7.327	37.532	20%
Si	267.290	510.124	777.414	66%	120.931	35.547	156.478	23%
P	15.353	6.258	21.611	29%	5.530	1.099	6.629	17%
S	9.967	5.648	15.615	36%	6.575	0.677	7.252	9%
Cl	3.711	1.617	5.328	30%	5.379	0.256	5.635	5%
K	26.215	56.743	82.958	68%	14.376	3.460	17.836	19%
Ca	45.993	106.17	152.163	70%	34.169	10.387	44.556	23%
Ti	6.380	18.916	25.296	75%	3.149	0.878	4.027	22%
V	0.046	0.87	0.916	95%	0.097	0.004	0.102	4%
Cr	0.376	0.529	0.905	58%	0.235	0.046	0.282	16%
Mn	1.906	3.78	5.686	66%	1.240	0.261	1.501	17%
Fe	65.368	173.235	238.603	73%	35.113	9.363	44.475	21%
Ni	1.176	3.462	4.638	75%	0.579	0.179	0.758	24%
Cu	1.651	5.557	7.208	77%	0.963	0.238	1.201	20%
Zn	1.066	3.589	4.655	77%	1.544	0.174	1.718	10%
As	0.307	1.097	1.404	78%	0.208	0.062	0.270	23%
Se	0.291	1.46	1.751	83%	0.069	0.035	0.104	33%
Br	0.159	1.43	1.589	90%	0.130	0.014	0.144	10%
Pb	0.908	3.765	4.673	81%	0.808	0.011	0.819	1%
合计	526.265	1009.76	1536.03	66%	267.801	71.318	338.738	21%

工地, 我们还是确定这次沙尘暴来自远方输送而不是局地。沙尘暴过后, 在 7 级的浓度依然较高但其绝对值已大幅度下降, 这是由于 7 级 ($d > 16 \mu\text{m}$) 的粒子粒径较大, 通过重力迅速沉降到地面, 因此其浓度迅速减少。在以前的研究中曾观测到这种类似的结果^[9]。从下面的元素谱分布可更直观地看到这一点。

由于气溶胶中元素形成机制和来源不同, 元素的富集程度也不同。元素的富集因子 (E_F) 表示元素的富集程度, 按下列公式计算:

$$E_F = c_a / c_c, \quad (1)$$

其中, c_a 代表气溶胶中元素 X 与元素 Fe 的元素浓度之比, c_c 代表地壳中元素 X 与元素 Fe 的元素浓度之比。地壳元素浓度取自参考文献[10], Fe 为参比元素。沙尘暴期间和沙尘暴过后的元素浓度及富集因子列于表 4。

表 4 北京沙尘暴和非沙尘暴期间的气溶胶元素的富集因子

元素	2000 年 4 月				1999 年 3 月(无沙尘暴) ^[1]	
	沙尘暴期间		沙尘暴后		细粒态 ($d < 2 \mu\text{m}$)	粗粒态 ($d > 2 \mu\text{m}$)
	细粒态 ($d < 2 \mu\text{m}$)	粗粒态 ($d > 2 \mu\text{m}$)	细粒态 ($d < 2 \mu\text{m}$)	粗粒态 ($d > 2 \mu\text{m}$)		
Mg	1.51	0.36	1.24	0.54	—	—
Al	1.16	0.65	1.09	0.77	4.61	2.20
S	109.17	15.20	209.38	27.93	1533.70	151.84
Cl	98.73	8.70	369.88	37.58	904.48	119.45
K	0.98	1.14	2.18	1.08	2.70	0.86
Ca	1.03	1.51	1.70	2.20	1.93	4.16
Ti	1.20	2.09	1.49	1.62	1.19	1.76
V	0.57	2.52	3.15	1.08	0.58	0.84
Cr	4.84	3.09	12.74	3.91	10.32	2.77
Mn	2.11	2.12	7.10	2.21	9.06	2.48
Fe	1.21	1.72	1.93	1.52	1.28	1.50
Ni	15.61	22.31	21.13	17.29	20.56	15.63
Cu	24.98	47.83	64.46	34.98	72.00	22.06
Zn	15.47	24.08	204.93	21.90	262.11	40.72
As	143.52	285.02	726.15	204.01	1485.19	366.59
Se	7145.43	12740.90	6208.60	3350.06	12423.86	4081.63
Br	167.09	228.66	320.23	73.01	1007.22	99.77
Pb	92.17	129.56	485.13	61.45	1220.20	109.02

Cl 的富集因子在沙尘暴后大于沙尘暴期间, 但小于 1999 年春季值, 表明 Cl 元素存在局地源。Ca、Ti、K、Al、Mg 的富集因子值在 1~3 之间, 表明此类元素的富集程度不高, 接近地壳平均丰度, 他们主要来自土壤、沙尘等自然源。2000 年 Br 的富集因子较高, 说明沙尘中含有丰富的 Br, 但低于 1999 年春季值。在无沙尘暴时, Br 富集值较高, 其来源是人类燃烧活动和海洋。

以前的研究^[10]发现, Se 在沙尘暴期间富集因子明显下降; 而这次沙尘暴期间 Se 的富集因子变化并不大, 其浓度值和富集因子都非常大, 造成这一现象的原因可能是 PIXE 分析误差造成的。在沙尘暴期间采集的样品中, Fe 的含量很高, 在进行常规

PIXE 分析时, 由于 Fe 的特征 X 射线计数率很强, 在电子线路分辨时间内, 有可能有两个 Fe 的特征 X 射线产生的脉冲进入。这时, 电子线路将这两个脉冲叠加成一个脉冲信号输出, 这种叠加信号被记录在 Fe 的特征 X 射线两倍左右的能区, 形成 Fe 的叠加峰, 它与 Se、Br 的特征 X 射线峰重叠, 如不作叠加峰校正, 就会使 Se、Br 的值偏高。

Pb 在沙尘暴期和沙尘暴后的富集因子相差不大, 但比 1999 年春季的富集因子小得多。这可能是北京逐步取消含铅汽油的结果。S 的富集因子在沙尘暴期最低, 沙尘暴后有所增大, 但远远低于 1999 年春季值。这表明 S 主要来自局地的人类活动源^[11]。

4.1.2 沙尘气溶胶元素谱分布

图 2 给出了这次观测的 Fe 和 Al 的元素谱分布图。在沙尘暴期间, 粒子在第 7 级的元素浓度远远高于其他各级。这种特殊现象的谱型, 在以前非沙尘天气中一般是观测不到的。在沙尘暴发生期后, 5、6、7 级均处于浓度高值, 差别不明显。这表明即使在沙尘过后, 大气中还有一定数量的粗粒子; 处于 7 级的粒子元素浓度由于重力沉降迅速下降, 已没有沙尘暴期间的明显高值。Ca、Si、K 等元素谱分布与 Al 类似。其他元素 (除 Cl 外) 均在 $>16 \mu\text{m}$ 的粒径范围出现非常高值。以前的研究结果^[7]表明, 1999 年春季气溶胶中 Al、Ca、Si 等元素的谱分布为单峰型, 峰值出现在 5 级。

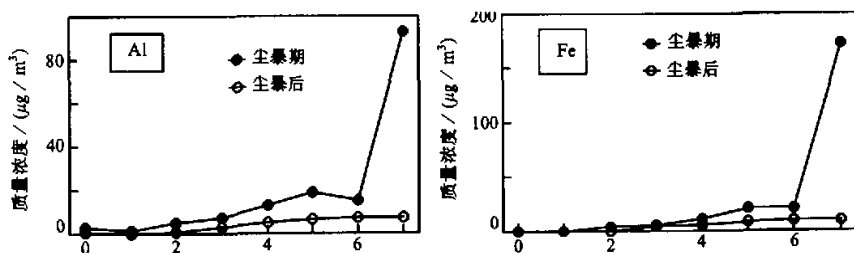


图 2 北京沙尘暴期间和沙尘暴后的 Al 和 Fe 元素谱分布

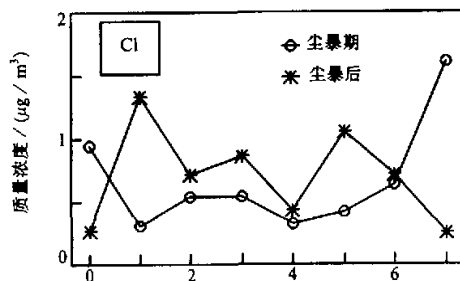


图 3 北京沙尘暴期间和沙尘暴后的 Cl 元素谱分布

值得注意的是 Cl 元素浓度在沙尘暴期间和沙尘暴后的浓度值变化不大, 二者比值为 0.95, 这与以前沙尘暴分析结果有明显的差别。Cl 元素谱分布见图 3, 其谱型均为双峰型, 沙尘暴期间的峰值出现在粒径为 $0.25 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 和 $4 \sim 8 \mu\text{m}$ 处, 沙尘暴后出现在粒径 $<0.25 \mu\text{m}$ 和 $>16 \mu\text{m}$ 处。对甘肃、新疆的“93.5.5”沙尘暴的气溶胶观测^[9]表明, 北京沙尘暴期间的 Cl 元素浓度比沙尘暴结束后浓度高 10 倍以上。造成

这一差别的原因是这次沙尘暴的源区与“93.5.5”沙尘暴的西北沙尘源区的组成有所不同。其余各元素在沙尘暴期间浓度均高于沙尘暴后, 二者比值在 2.15~16.8 之间。

4.2 沙尘暴的粒子谱分布研究

粒子尺度谱分布是气溶胶的一个重要指标, 大气气溶胶数浓度与大气条件有密切的关系^[8]。图 4 是从应用粒子计数器观测的沙尘暴发生期及沙尘暴发生后的气溶胶粒度谱分布。观测时间从 4 月 6 日 11:30 到第 2 天 16:00。从气象资料看, 4 月 7 日 2:00 左右大风停止, 沙尘粒子浓度明显下降, 沙尘暴天气过程结束。在沙尘暴期间大气中气溶胶数浓度急剧增大, 其中粗粒子增加幅度更大。粗粒子 ($d > 2 \mu\text{m}$) 的数浓度在沙尘暴期间最高达到 25 个/ cm^3 , 沙尘暴过后粗粒子浓度迅速降低, 为 1 个/ cm^3 。沙尘暴期间的粗粒子数浓度是沙尘暴后的 20 倍以上。相比之下, 沙尘暴期间细粒子 ($d < 2 \mu\text{m}$) 的粒子数浓度为 60 个/ cm^3 , 沙尘暴过后细粒子浓度为 8 个/ cm^3 。沙尘暴期间的细粒子数浓度是沙尘暴后的 7 倍。因此, 沙尘暴期间粗粒子数浓度增长的倍数更大。

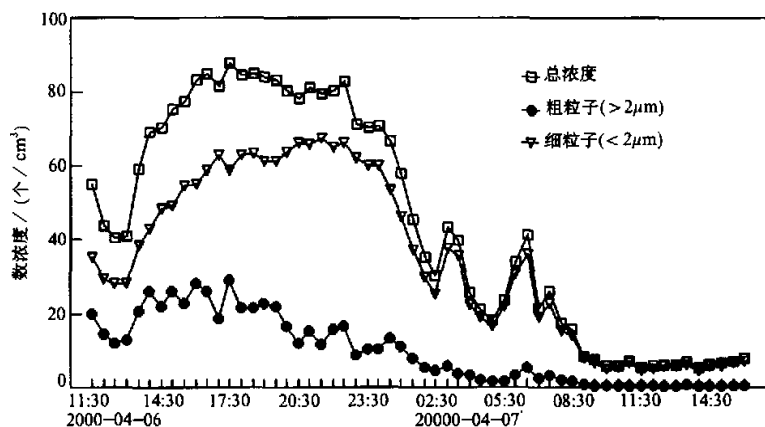


图 4 北京沙尘数浓度分布

5 主要结论

通过本次观测实验, 及时取得了北京“4.6”特大沙尘暴的宝贵资料。通过分析, 得到以下主要结论:

(1) 北京春季沙尘暴期间污染极为严重, 20 种元素总浓度高达 $1\,536 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 是 1999 年春季的 31.4 倍。即使沙尘暴过后, 污染依然严重, 元素总浓度仍高达 $338.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 是 1999 年春季的 7 倍。

(2) 研究沙尘暴的元素谱分布发现, 沙尘暴期间所有元素浓度在粒径 $> 16 \mu\text{m}$ 处出现非常高值, 而在沙尘暴出现前后均没有这种谱分布。这表明沙尘暴期间来自远方的土壤和沙尘粒子占了很大的比重。

(3) 沙尘暴期间的粗粒子数浓度是沙尘暴后的 20 倍以上; 沙尘暴期间的细粒子数浓度是沙尘暴后的 7 倍。因此, 沙尘暴期间粗粒子数浓度增长的倍数更大。

(4) 值得注意的是, 北京地区颗粒物来源复杂, 有局部的, 有北京周边地区的, 有新疆、黄土高原、内蒙古、蒙古等地的。目前, 关于北京沙尘来源及其贡献率还不清楚, 需要进一步开展沙尘源解析的研究工作。

参 考 文 献

- 1 周明煜, 曲绍厚, 北京春季沙尘暴期间的一些特性研究, 环境科学学报, 1981, 1, 207~215.
- 2 王明星, J.W.温彻斯特, T.A.开希尔, 任丽新, 北京一次尘暴的化学成分及其谱分布, 科学通报, 1982, 27, 419~422.
- 3 任丽新, 吕位秀, 王明星, 北京冬春季大气气溶胶的化学成分的研究, 大气科学, 1982, 6, 11~17.
- 4 王明星, 北京冬春季大气气溶胶来源的研究, 科学探索, 1983, 3, 13~20.
- 5 王明星, 任丽新, 吕位秀等, 北京一月大气气溶胶的化学成分及其谱分布, 大气科学, 1986, 10, 46~54.
- 6 王明星, 用因子分析法研究大气气溶胶的来源, 大气科学, 1985, 9, 73~81.
- 7 张仁健, 王明星, 张 文, 王跃思, 北京冬春季气溶胶元素化学成分及谱分布研究, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 6~12.
- 8 张仁健, 王明星, 戴淑玲, 张文, 北京地区气溶胶度谱分布初步研究, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 85~89.
- 9 杨东贞, 丁晓岚, 颜 鹏, 李兴生, "93.5.5 黑风" 沙尘气溶胶的分析, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 103~110.
- 10 Winchester, J.W., Lu Weixiu, Ren Lixin, Wang Mingxing, Fine and coarse aerosol composition from a rural area in northern China, *Atmospheric Environment*, 1981, 15, 933~937.
- 11 汪安璞, 黄衍初, 马慈光, 王庆广, 北京地区大气飘尘的化学特征, 环境科学学报, 1981, 1, 220~233.

Analysis on the Chemical and Physical Properties of "2000.4.6" Super dust Storm in Beijing

Zhang Renjian, Wang Mingxing, Pu Yifen, Liu Qiang, Fu Jianzhong and Zhang Wen

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract In the spring of 2000, dust storm weather occurred frequently in Beijing, which resulted in bad effect on atmospheric environment. Analysis on the chemical composition on "4.6" super dust storm show that the pollution caused by dust storm is very serious. In dust storm period, the total concentration of 20 elements reached $1\ 536\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ which is 31.4 times as that in last spring. Even after dust storm, the concentration of 20 elements reached $338.7\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, which is 7 times as that in last spring. It is found that concentrations of most elements of particles whose diameter is above $16\ \mu\text{m}$ has a very high peak, while there is no such a phenomena in non-dust time. Observation by optical particles counter shows that the number concentrations of coarse particles ($d > 2\ \mu\text{m}$) are more than 20 times as that after dust storm while the number concentrations of fine particles ($d < 2\ \mu\text{m}$) are only 7 times as that after dust storm.

Key words: dust storm; chemical composition; number concentration