

2004 年春季北京一次沙尘暴的理化特性分析

何新星, 王跃思*, 温天雪, 胡波

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 2004-03-27 ~ 2004-03-29 北京发生沙尘暴天气期间, 监测了气溶胶 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的浓度, 利用撞击式采样器采集了 8 级膜样品, 并用 ICP-MS 分析了气溶胶中元素的含量, 同时监测了地面辐射和风速的变化。结果显示, 此次沙尘暴导致 TSP 浓度比平时增加 3 ~ 4 倍, PM₁₀ 浓度增加 2 ~ 3 倍, PM_{2.5} 浓度有所降低。研究还表明: 地壳元素 Na、Mg、Al、Mn 和 Fe 主要分布在粗粒子上, 而污染元素 Zn、Pb 主要分布在细粒子上, 污染元素主要是本地源。沙尘暴对总辐射有明显的影 响, 导致地面总辐射衰减了 37.8%。受大风影响粗粒子浓度增加显著, 细粒子浓度明显减少。

关键词: 沙尘; 辐射; 元素含量; 北京

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)05-0001-06

Analysis on Chemical and Physical Properties of Beijing Super Dust Storm in Spring of 2004

HE Xin-xing, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, HU Bo

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

Abstract: On March 27, 2004 a super dust storm occurred in Beijing. The concentration of the aerosol and the element concentration of the aerosol were analyzed. The velocity of wind and radiation of ground were also measured. TSP increased 300 ~ 400 percent. PM_{2.5} increased 200 ~ 300 percent, but the concentration of the fine particle decreased. The elements like Na, Mg, Al, Mn and Fe mainly distribute in coarse particles. The contaminated elements such as Zn and Pb mainly distribute in fine particles. The contaminated elements mainly come from local source. The total radiation reduced 37.8 percent. With the increased of the velocity of the wind, the concentration of the coarse particle increased notably, the concentration of the fine particle decreased.

Key words: dust; radiation; element concentration; Beijing

大气气溶胶是当今大气化学研究的前沿领域, 对气溶胶理化性质的分析更是其中的热点。2000 年以来, 北京频繁发生沙尘天气, 特别是 2000 年以及 2002 年春季北京都发生了特大沙尘暴, 给道路交通和人类健康造成了严重影响, 中国及中亚地区的沙尘长距离传输到东亚的韩国、日本, 甚至远及太平洋西岸的美国和加拿大。沙尘暴已成为区域性和全球性的环境问题^[1-3]。许多学者对历史上发生的强沙尘暴个例进行了大量研究^[4,5]。研究了沙尘源区, 沙尘暴发生规律及其与天气过程的关系; 沙尘气溶胶的粒度谱分布、光学特征、化学成分以及沙尘的长距离传输^[6,7]。张仁健^[8]、庄国顺^[9,10]等对几次沙尘暴的理化特性进行过报道。

2004-03-27 在北京爆发了本年度最强沙尘天气, 这次沙尘暴过程从 03-27 傍晚一直持续到 03-29。本次沙尘暴是受东移蒙古气旋的影响, 在我国西北中东部、华北北部、东北西部先后出现了沙尘天气, 其中甘肃河西地区、内蒙古中西部出现大范围区域性沙尘暴, 在内蒙古锡林浩特市甚至还出现了黑风暴。03-27 傍晚沙尘暴移入北京上空, 03-29 中午

北京出现 6 ~ 7 级大风, 产生了局地扬沙与内蒙古输送来沙尘相混合, 在北京上空形成更强的沙尘暴, 到 03-29 17:00 左右这次沙尘暴过程结束。本文报道了此次沙尘暴期间地面总辐射以及颗粒物浓度的变化趋势, 分析了不同粒径颗粒物的元素组成, 比较了此次沙尘暴与前几次的异同。

1 实验

1.1 采样地点

采样点位于北京市北三环和北四环之间, 中国科学院大气物理研究所 325 m 气象观测塔院内, 气溶胶采样头高度离地面约 20 m, 辐射和气象要素采样点为相同高度, 水平距离约 10 m。

1.2 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的实时监测

用 2 台美国 RP 公司生产的 RP1400 颗粒物分析仪对 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 进行连续、实时监测。仪器

收稿日期: 2004-12-04; 修订日期: 2005-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(40222202)

作者简介: 何新星(1970 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气化学。

* 通讯联系人: E-mail: wys@dq.cern.ac.cn

分别使用 PM10 和 PM2.5 切割头,采样滤膜为圆形 Teflon 膜,采样流量为 16.7L/min,样品和测量单元 50℃恒温.

1.3 膜采样方法

使用美国 Andersen 公司生产的 8 级撞击式采样器对大气颗粒物进行采样,粒径范围为 0.4 ~ 0.7,0.7 ~ 1.1,1.1 ~ 2.1,2.1 ~ 3.3,3.3 ~ 4.7,4.7

表 1 分级采样仪的级数和采样直径

Table 1 Relation of stage and aerodynamic dimension of the particles

级数	0	1	2	3	4	5	6	7	8
采样粒径/ μm	<0.4	0.4~0.7	0.7~1.1	1.1~2.1	2.1~3.3	3.3~4.7	4.7~5.8	5.8~9.0	>9

1.4 样品前处理及化学成分分析

采集的膜样品运用美国 PE 公司生产的 Multiwave 3000 微波消解装置进行样品消煮,加入美国 Meck 公司生产优级纯浓盐酸 8 mL,浓硝酸 2 mL,样品在 200℃、 5×10^5 Pa 下消解 50 min,称重定容,采用美国 Agilent 公司生产的 7500a ICP-MS 分析元素含量.

1.5 辐射观测方法与数据处理

气象要素使用 Milos 520(Vaisala,芬兰)自动气象站观测,辐射观测全部使用 Kipp & Zionne(荷兰)生产的辐射表,气象要素和辐射数据由 DM520 数据采集器每分钟采集 1 次.

2 结果与讨论

2.1 TSP、PM10 和 PM2.5 质量浓度随时间的变化

2.1.1 2004 年上半年 PM10 和 PM2.5 质量浓度月变化

使用 RP1400 颗粒物分析仪得到每 10 min 的颗粒物质量浓度数据.表 2 是 2004 年上半年 PM10 和 PM2.5 质量浓度月变化,从表 2 中可以看出 PM10 和 PM2.5 质量浓度的变化有较好的相关性,3 月和 4 月份 PM10 和 PM2.5 质量浓度都高于其它月份,尤其是 PM10 与 PM2.5 之间的差值增加了 1 倍左右,而这 2 个月正是大风扬沙的多发月,可见风沙天气对粗粒子影响更为明显.分析其原因可能是从 3 月份开始,北方开始解冻,遇见大风天气,土壤沙尘容易被扬起,使气溶胶浓度尤其是总悬浮颗粒物浓度升高.而进入 5 月,植物开始生长,多数土地被植被覆盖,悬浮颗粒物浓度降低,颗粒物浓度出现低值.而进入 6 月后,北京地区进入夏季,气温开始升高,各种挥发性组分浓度增加,2 次粒子浓度增加,导致 PM2.5 浓度增加,结果 6 月 PM10 和 PM2.5

~5.8,5.8~9.0,>9 μm (见表 1).采样流量为 1.7 m³/h,使用 Andersen 公司提供的聚脂纤维滤膜,从 03-27 T11:30~03-30 T11:30 每 24h 采集 1 个,连续采集 4 个样品,同时为了作比较,对 3 月份采集的其它样品也进行了分析.样品采集后在干燥器中恒温 24h,使用 Sartorius 公司十万分之一电子天平称重,装入聚乙烯封口袋中,在冰箱中保存.

浓度比 5 月升高.另外,从 PM2.5 与 PM10 的质量百分比可以看出:3、4、5 这 3 个月其比值要比其它月份低,可见北京春季大风天气对 PM10 的影响更为明显.

表 2 2004 年上半年 PM10 和 PM2.5 质量浓度月变化/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 2 Concentrations monthly variations of PM10 and PM2.5/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

粒径大小	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
PM2.5	61.5	65.5	75.8	70.9	40.5	69.6
PM10	105.4	122.1	180	163.5	81.4	112.3
PM10~PM2.5	43.9	56.6	104.2	92.6	40.9	42.7

2.1.2 沙尘暴期间 TSP、PM10 和 PM2.5 质量浓度随时间的变化

TSP 的数据由 Andersen 公司生产的 8 级撞击式采样器获得,PM10 和 PM2.5 质量浓度由 RP1400 颗粒物分析仪测得.

从表 3 可见 03-28 和 03-29 的 2 天沙尘暴来临时,TSP 浓度有大幅上升,最高日均浓度达到 836 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,比沙尘暴来临前的 03-24 高出约 4 倍,但此次沙尘暴 TSP 的浓度比 2002-03-20(TSP 浓度 $1.09 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)低约 13 倍^[8],比 2000-04-06(TSP 平均浓度 7 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)低 9 倍^[10],只有 03-29 T13:00~03-29 T17:00 PM10 的浓度达到 1400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上(图 1).但到达地面的总辐射显著降低,可见此次沙尘暴主要受高空气流影响,从外地携带来的气溶胶粒子主要从高空过境北京.

图 1 是沙尘暴来临前后 PM10 和 PM2.5 质量浓度随时间的变化.从图 1 中可以发现,在 03-26 沙尘暴来临前空气中 PM10 和 PM2.5 质量浓度就较高,结合气象数据知道,沙尘暴来临前受低气压控制,风力较小,不利于污染物扩散,挥发性气体在空气中富集,2 次气溶胶浓度增加,导致细粒子浓度增

加,主要是本地源发生作用.沙尘暴来临时,PM10 浓度增加了 2~3 倍,而 PM2.5 浓度反而有所降低,到 03-30 PM10 和 PM2.5 浓度分别降低到 57.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 7.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,浓度远低于 3 月平均水平,可见大风天气对细粒子有强烈的清除作用,同时证明此次沙尘暴的组成粗粒子的浓度较高,而 PM2.5 以下的细粒子浓度较低,其浓度小于平时北京大气中细粒子的浓度.03-29 T13:00~03-29 T17:00,PM10 的

浓度达到 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上,同时风速达到 8 m/s,而 PM2.5 浓度变化并不大,可见风力增大主要影响粒径大的颗粒物.

表 3 TSP 浓度的日变化/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Daily variations of the concentrations of TSP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

日期/月-日	03-24	03-28	03-29	03-30
TSP	220.4	835.9	627.4	93.6

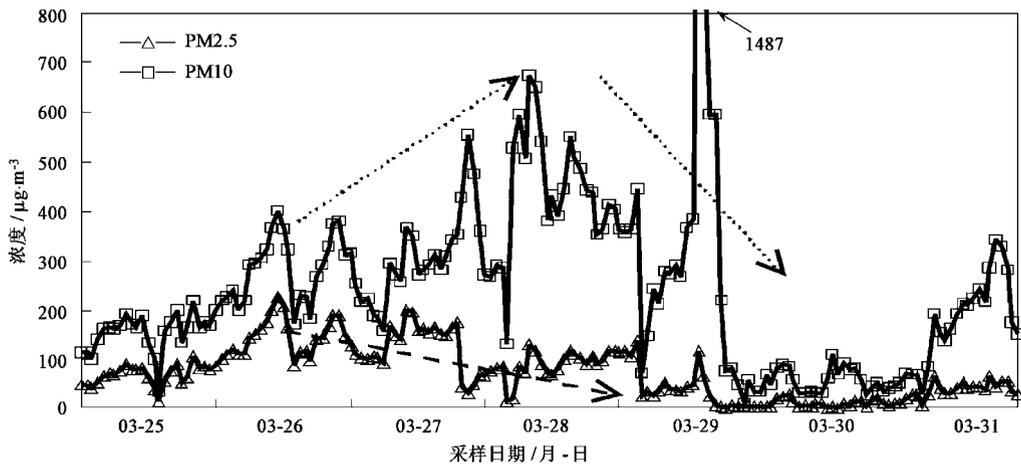


图 1 粒子浓度随时间的变化

Fig.1 Variety of the concentrations of the PM10 and PM2.5

2.2 气溶胶质量浓度的粒径分布

图 2 是使用撞击式采样器获得的颗粒物浓度的粒径分布.沙尘暴期间(03-28)粒径大的粒子($> 2.1\mu\text{m}$)浓度比沙尘暴来临前的 03-24 高,且粒径越大浓度增加越多,在 03-28 和 03-29 沙尘暴期间的细颗粒物($< 2.1\mu\text{m}$)浓度分别为 65.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 44.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,到 03-30 浓度降为 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,可见大风对细颗粒物强烈的清除作用.沙尘暴来临时,北京近地面 TSP 的平均浓度为 630~830 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,约为来临前的 4 倍,03-28 PM2.1 占 TSP 的质量百分比为 8%,而沙尘暴来临前的 03-24 PM2.1 占 TSP 的质量百分比为 26%,可见沙尘暴来临时 PM2.1 占 TSP 的质量百分比大幅降低,这些数据表明此次沙尘暴和 2000 年及 2002 年发生的特大沙尘暴有明显不同,上 2 次的监测结果^[8,10]都表现为沙尘暴期间细颗粒物浓度也显著增加.

2.3 沙尘暴期间颗粒物的元素含量及富集系数

表 4 列出了 2004-03-28 沙尘暴高峰期间 TSP 和 PM2.1 的元素浓度以及它们的富集系数.元素的富集系数表示元素的富集程度,按(1)公式计算:

$$Ef = C_i / C_j \quad (1)$$

其中: C_i 表示气溶胶中元素 X 与元素 Al 的元素浓度之比, C_j 代表地壳中元素 X 与元素 Al 的元素浓度之比,地壳元素浓度来自参考文献[14],Al 为参比元素.

沙尘暴来临时,矿物气溶胶主要元素的含量 Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn 和 Fe 等的浓度都比来临前高 2 倍以上,其中 Na、Mg、Al、Mn 和 Fe 的富集系数在沙尘暴来临前和来临时都在 1~3 左右,表明以上元素在来临前和来临时主要都来自地壳源,Ca 的富集系数在沙尘暴来临时为来临前的 2.5 倍且富集系数为 63 和 26,含量远远高于地壳中的含量,可见 Ca 应该另有其它来源.因为北京西北方向建筑工地众多,需要使用大量的石灰、水泥等建材,因此 Ca 的可能来源是石灰粉尘^[13].沙尘暴来临时由于大风,石灰扬尘浓度更高,富集系数更大.

Co、Ni、Cu 和 Zn 4 种元素在沙尘暴来临前的 03-24 富集系数在 TSP 中达到 6、20、8 和 43,在 PM2.1 中达到 56、236、51 和 11,沙尘暴来临时的 03-28 它们的富集系数降低很多,且这些元素的含量远比它们在地壳中的元素含量高,这些数据表明这几种元素在非沙尘暴来临时污染源主要是本地

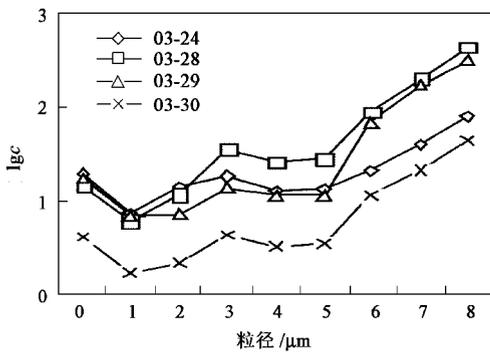


图 2 颗粒物浓度的粒径分布(纵坐标为质量浓度的对数值)

Fig.2 Concentrations of the particle in different aerodynamic dimension

源.王明星等^[11]认为气溶胶中的 Cu 大部分来源于石油化工,Zn 主要来源于石油化工和城市垃圾处理,本研究的数据印证了这一结论,Co 和 Ni 的污染源有待进一步考察.和庄国顺^[10]等的结论相同,

沙尘暴来临时它们的富集系数降低,可能原因是因为外地沙尘中这几种元素的含量较低,外地沙尘的输入稀释了这几种元素的含量,导致富集系数降低.

Li、Ga、As、Se、Ag、Cd 和 Pb 这些元素在沙尘暴天气和平常天气,不论在 TSP 或 PM_{2.1} 中的富集系数都特别高,元素含量也远比它们在地壳中的含量高,这表明它们是北京气溶胶中的主要污染元素.沙尘暴来临时它们的富集系数都有降低,表明它们主要是本地源,其中的 Cd 主要来自于燃煤烟尘和垃圾焚烧,As 主要来自燃煤烟尘和机动车尾气,Pb 的富集系数 2002 年比 1999 年春季小很多.张仁健等^[8]认为是北京 1999 年开始逐步取消含铅汽油的结果,而这次 Pb 的富集系数与 2002 年相差不大,Pb 的污染主要来自汽车尾气和垃圾焚烧,可见随着北京大气污染治理力度的加大,Pb 的污染得到了有效的控制.另外 Li、Ga 和 Ag 等元素的富集系数都相当高,其原因有待进一步的研究.

表 4 2004-03-28 沙尘暴高峰期 TSP 及 PM_{2.1} 中元素浓度及其富集系数/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 4 Concentration of elements and E_f in TSP and PM_{2.1} on March 28, 2004/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

元素	TSP (03-24 非沙尘暴)		TSP(03-28 沙尘暴)		PM _{2.1} (03-24 非沙尘暴)		PM _{2.1} (03-28 沙尘暴)	
	浓度	富集系数	浓度	富集系数	浓度	富集系数	浓度	富集系数
Li	1.3	488	27.8	4 609	0.3	1 488	7.5	6 065
Be	0.01	37	0.02	41	0.003	169	0.008	81
Na	2.6	2	5.5	2	0.9	8	1.9	3
Mg	1.3	1	2.3	0.8	0.02	0.2	0.3	0.4
Al	4.0	1	9.0	1	0.3	1	1.8	1
K	6.3	5	13.1	5	2.4	22	4.0	7
Ca	45.5	26	247.1	63	10.8	75	79.8	99
V	0.9	85	2.3	94	0.3	339	0.9	181
Cr	2.9	183	7.1	195	1.0	781	2.8	376
Mn	0.2	3	0.4	4	0.06	12	0.1	5
Fe	2.7	1	11.3	2	0	3	1.8	1.7
Co	0.01	6	0.01	2	0.005	56	0.002	4
Ni	0.2	20	0.04	1.6	0.2	236	0.02	4
Cu	0.05	8	0.05	4	0.02	51	0.02	8
Zn	0.5	43	0.3	13	0.4	411	0.2	43
Ga	0.2	3 552	0.5	3 766	0.05	12 179	0.2	6 099
As	1.4	5 195	2.5	4 154	0.5	22 374	1.0	8 295
Se	0.2	4 116	0.4	4 261	0.06	17 479	0.1	7 573
Mo	0.06	103	0.04	34	0.04	902	0.01	56
Ag	0.01	1 665	0.02	1 244	0.003	6 766	0.006	2 439
Cd	0.1	347	0.1	245	0.03	1 533	0.05	398
Pb	0.1	121	0.08	43	0.08	1 099	0.05	134

2.4 气溶胶中元素的粒径分布

图 3 ~ 图 6 是沙尘暴前(03-24)和沙尘暴时(03-28)不同元素的粒径分布,主要地壳元素如 Na、Mg、Al、K 和 Fe 等的粒径分布变化趋势按粒径从大到小其浓度也从大到小,但在 3.3 ~ 4.7 μm 处浓度呈现

高值,其原因有待进一步研究.沙尘暴期间这些主要的地壳元素浓度的增加在细颗粒物上表现不明显,而在粗颗粒物上增加更多,这主要是因为沙尘暴期间粗颗粒物浓度增加所致.从表 4 可以看出,这些元素在 PM_{2.1} 的颗粒物上的百分含量在非沙尘暴时

要比在沙尘暴期间低,可能原因是外地输入的细粒子地壳元素含量较高,导致沙尘暴期间地壳元素的百分含量增加.可见沙尘暴期间虽然细粒子的浓度没有增加,从元素含量上还是可以看出外地输入源对对细粒子的影响.

Zn 和 Pb 的粒径分布与上述元素相反,它们在粗粒子上的浓度较小,在细粒子上的浓度大,呈现粒子由大到小浓度增加的趋势,由前面的叙述表明:这 2 种元素主要是本地源,是污染元素的标志物,可见此类污染元素主要分布在细粒子上,而细粒子可以进入人的肺泡,因此细粒子对人体危害更大.另外沙尘暴来临时这 2 种元素的浓度比沙尘暴前浓度低,一方面是沙尘暴伴随的大风对本地细粒子有清除作用,另一方面外地输入的细粒子中污染元素的含量较低,导致这些污染元素的浓度降低.同时也说明污染元素主要是本地源,外来气溶胶对它们的浓度贡献很小.

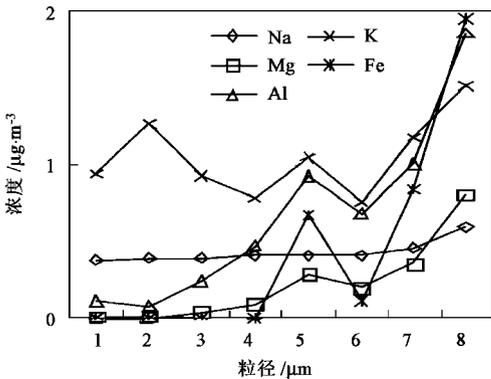


图 3 03-24 主要地壳元素的粒径分布

Fig. 3 Concentration of the crust elements in different aerodynamic dimension on March 24, 2004

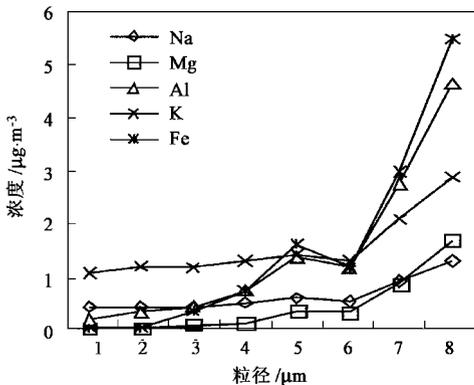


图 4 03-28 主要地壳元素的粒径分布

Fig. 4 Concentration of the crust elements in different aerodynamic dimension on March 28, 2004

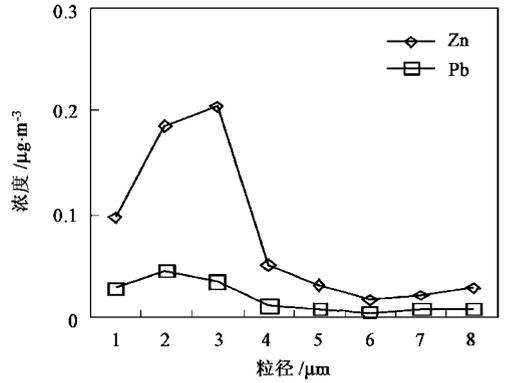


图 5 03-24 污染元素的粒径分布

Fig. 5 Concentration of the pollutant elements in different aerodynamic dimension on March 24, 2004

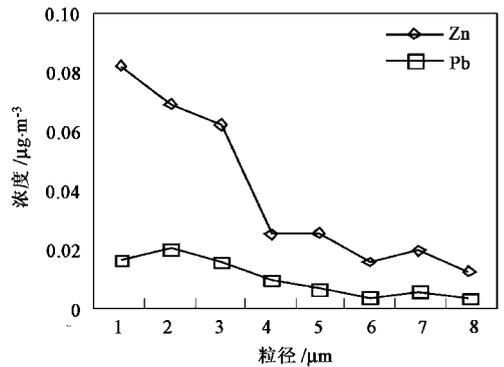


图 6 03-28 污染元素的粒径分布

Fig. 6 Concentration of the pollutant elements in different aerodynamic dimension on March 28, 2004

2.5 地面辐射

图 7 是 03-26 ~ 03-30 每天 08:00 ~ 17:00 测得的总辐射数值.表明在沙尘暴到来时,由于大气中沙尘含量大,使得太阳短波辐射大量被散射和反射回太空,致使达到地面的太阳短波辐射明显减少,从而使总辐射大幅度减少.在沙尘暴爆发期间总辐射的最大值在 595 W/m²,而在沙尘暴发生前后总辐射的最大值可达到 880.1 W/m²,总辐射衰减了 37.8%.由此可见沙尘暴对总辐射有明显的影 响,并可通过改变到达地面的太阳辐射量进一步影响气候.

2.6 气溶胶浓度与风速的关系

图 8 是 PM10、PM2.5 日平均浓度与日平均风速的关系.从图中看到 PM2.5 浓度与风速大小接近负相关,03-25 ~ 03-26 是 PM2.5 和 PM10 粒子的累计过程,从 03-27 ~ 03-29 风速持续增加,外地粗粒子开始输入北京,PM10 粒子浓度开始累计,到 03-28 达到最高;而 PM2.5 浓度持续降低,随后到

03-30 由于大风对气溶胶的清除作用,PM10 粒子浓度降低到 $56.7\mu\text{g}/\text{m}^3$,约为当月平均值的 $1/3$,PM2.5 的浓度降到约 $7\mu\text{g}/\text{m}^3$,大约是当月平均值的 $1/10$.

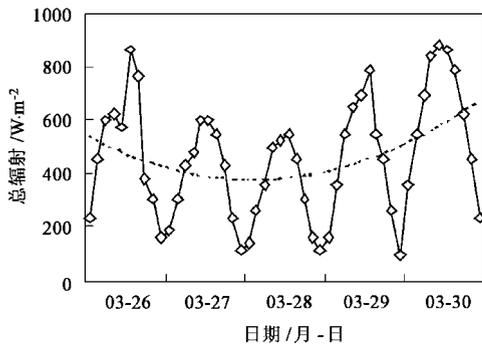


图 7 总辐射日变化曲线(曲线为趋势线)

Fig.7 The daily variation of global radiation

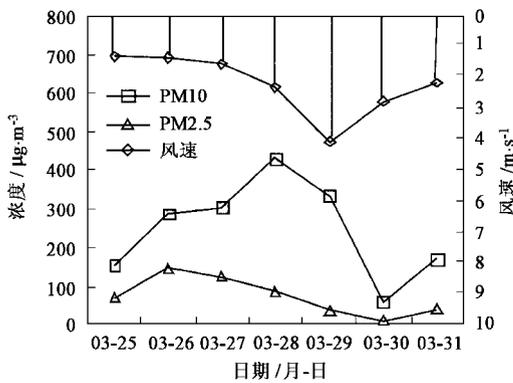


图 8 粒子浓度与风速的关系

Fig.8 Daily variation of particle concentration and wind speed

3 结论

(1) 3 ~ 4 月由于北京大风扬沙天气影响,PM10 明显比其它月份要高,而 PM2.5 影响不大,大风主要增加北京粗颗粒物浓度.

(2) 2004-03-27 北京发生了沙尘暴天气,TSP 浓度比平时增加 3 ~ 4 倍,PM10 浓度增加 2 ~ 3 倍,PM2.5 浓度有所降低.此次沙尘暴的来临主要影响粗粒子的浓度,对细粒子是清除作用.

(3) 地壳元素 Na、Mg、Al、Mn 和 Fe 主要分布

在粗粒子上.污染元素 Zn 和 Pb 主要分布在细粒子上,污染元素主要是本地源.

(4) 沙尘暴对总辐射有明显的影晌,总辐射衰减了 37.8%.

(5) 北京沙尘成分与理化性质的变化具有很大的不可预报性,因此实际的观测与研究十分必要.

参考文献:

[1] Arimoto R, Ray B J, *et al*. Mass-particle size distribution of atmospheric dust and the dry deposition of dust to the remote ocean[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (D13): 15867 ~ 15874 .

[2] Duce R A, Liss P S, *et al*. The atmospheric input of trace species to the world ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, **5** : 193 ~ 259 .

[3] 陈立奇.中国沙漠尘土向北太平洋的长距离大气传输[J]. *海洋学报*,1985, **7**(5) :554 ~ 559 .

[4] 许宝玉,钱正安,焦虑军.西北地区五次特强沙尘暴前期形势和要素场的综合分析与预报[A].见:中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997.44 ~ 51 .

[5] 胡泽勇,黄荣辉.2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化[J].*大气科学*,2002,**26** (1) :1 ~ 8 .

[6] 黄美元,王自发.东亚地区黄沙长距离输送模式的设计[J].*大气科学*,1998,**22**:625 ~ 637 .

[7] Wang Z, H Ueda, *et al*. A deflation module for use in modeling longrange transport of yellow sand over East Asia[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000,**105**(D22):26947 ~ 26960 .

[8] 张仁健,王明星,等.2000 年春季北京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 .

[9] 庄国顺,郭敬华,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 .

[10] 孙业乐,庄国顺,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 .

[11] 王明星.用因子分析法研究大气气溶胶的来源[J].*大气科学*, 1985,**9**(1) :73 ~ 81 .

[12] 汪安璞,黄衍初,等.北京地区大气飘尘的化学特征[J].*环境科学学报*,1981,**1**:220 ~ 230 .

[13] Zhang D, Iwasaka Y. Nitrate and sulfate in individual Asian duststorm particles in Beijing, China in Spring of 1995 and 1996 [J]. *Atmospheric Environment*, 1999,**33**: 3213 ~ 3223 .

[14] Talor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. New York: Oxford, 1985. 311 ~ 313 .