

北京春季沙尘暴的近地面特征^①

张仁健 徐永福 韩志伟

(中国科学院大气物理研究所 东亚区域气候—环境国家重点实验室,
全球变化东亚区域研究中心,北京 100029)

提 要

分析了2000年4月6日沙尘暴期间北京近地层气象要素的变化和沙尘期间土壤尘谱分布及其来源。结果表明,沙尘暴发生时,近地层风速明显增大,空气相对湿度迅速减少,边界层湍流交换强烈。沙尘暴期间土壤尘浓度高达 $3906\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是1999年春季非沙尘期间土壤尘浓度的40倍以上。其中粗粒子占了大部分,粒径大于 $16\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 的土壤尘浓度分别占总土壤尘浓度的67%、78%和94%之高。沙尘暴过后,粗粒子的浓度和所占总浓度比重明显下降,但仍大大高于非沙尘期间。后向轨迹分析结果表明,此次沙尘暴主要来源于蒙古和内蒙古地区,并在强烈的西北气流的推动下经过高空长距离输送到达北京。

关键词: 沙尘暴 里查森数 后向轨迹

引 言

沙尘暴是中国北方的主要灾害性天气之一,有着巨大的破坏力^[1]。沙尘粒子是大气气溶胶的一个重要来源^[2]。沙尘气溶胶可以通过长距离输送对区域甚至全球气候环境变化产生重要影响^[3,4]。2000~2002年,中国北方多次发生沙尘暴天气,给当地和广大下游地区的环境带来很大影响,引起了国内外学术界的高度重视和研究^[5,6]。

由于大气边界层是高空自由大气和地面进行双向物质输送的必经地带,地面1~2km的大气边界层对大气污染物质的输送起着重要作用^[7]。因此把沙尘气溶胶的理化特性和气象条件结合起来分析可以更好地探讨沙尘暴的来源及其在大气中的输送规律。

2000年春季北京发生10多次沙尘天气^[8]。其中,以4月6日发生的沙尘暴天气最严重。这次沙尘暴影响了我国的大半地区。2000年4月6日10时左右,沙尘暴到

达北京,我们在北京北郊地区在沙尘暴期间采集了颗粒物样品,分析了其化学成分及分布。本文介绍了这次沙尘暴来临时近地面气象特征和沙尘颗粒物特性的分析结果。

1 观测点和采样方法

采样地点位于北京北三环和北四环之间的中国科学院大气物理所气象观测塔院内南小楼二楼楼顶,高度约8m($39^{\circ}58'\text{N}$ 、 $116^{\circ}22'\text{E}$)。用美国PIXE公司的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,其采集粒子的空气动力学切割直径为 $D < 0.25$, $0.25 \sim 0.5$, $0.5 \sim 1$, $1 \sim 2$, $2 \sim 4$, $4 \sim 8$, $8 \sim 16$ 和 $D > 16\mu\text{m}$ 。实验中在采样开始时和结束时各进行1次流量测量,以2次测量的平均值作为采样的流量,流量为 $1.1\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

收集的颗粒物样品在北京师范大学低能核物理研究所的 $2 \times 1.7\text{MV}$ 串列加速器上

① 本研究得到国家自然科学基金面上基金项目(40205017)和中国科学院“引进国外杰出人才”计划(全球环境变化)项目资助。

进行质子激发 X 荧光分析(PIXE 方法),得到了 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。该方法曾经用标准样品进行多次国际实验比对,并在沙尘气溶胶和污染气溶胶的研究中广泛应用^[9,10]。

本文所用的边界层气象资料来自 325m 气象塔的分层常规气象观测资料。后向轨迹分析采用的是美国大气和海洋管理局提供的 HYSPLIT^[11] 模式和 NCEP FNL 再分析气象资料。

2 结果与分析

2.1 近地层气象要素的变化

沙尘暴来临时,边界层结构发生明显变化^[7]。根据观测,2000 年 4 月 6 日上午 10 时,沙尘暴来临。这里给出沙尘暴来临时北京近地层的风速、风向、温度、相对湿度和梯度里查森数的变化。图 1 给出了 2000 年 4 月 4~7 日观测铁塔距地面 102m 高度风速、温度和相对湿度的变化。可以看出,6 日 0 时风力较大,1~9 时,风力较小,风向变化不明显。10 时以后风力开始急剧增强,风速从 9 时的 $0.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 10 时的 $9.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,此后继续增大,维持较大值,在 13 时达到 $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,20 点达到 $18.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向为西北或偏西方向。可见沙尘暴期间风速明显增大。在 6 日 8~10 时,即沙尘暴发生前的 2 个小时内气温从 7°C 增加到 12.7°C ,增加了 5.7°C ,此后温度略有上升,13 时达到 13.7°C

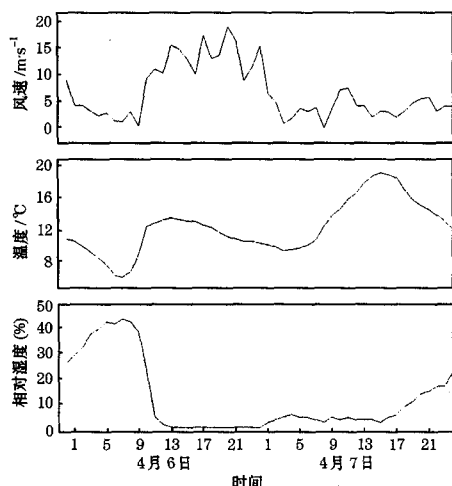


图 1 2000 年 4 月 6~7 日北京 102m 高度风速、温度和相对湿度的变化

后开始下降。4 月 5 日、6 日和 7 日温度日变化分别为 9.2°C 、 7.4°C 和 9.7°C 。可见沙尘暴爆发使温度日变化减小。6 日 00 时相对湿度为 27%,此后迅速增大,5~8 时高达 44%,10 时以后迅速减少为 24%,11 时为 6%,12 时以后相对湿度均小于 3%。图 2 给出了 2000 年 4 月 6 日北京风速的时间-高度分布。可以看到沙尘暴来临时,风速明显增加,风速随高度变化非常剧烈,上层风速增加更大,近地层出现了很强的风切变,湍流活动强烈。

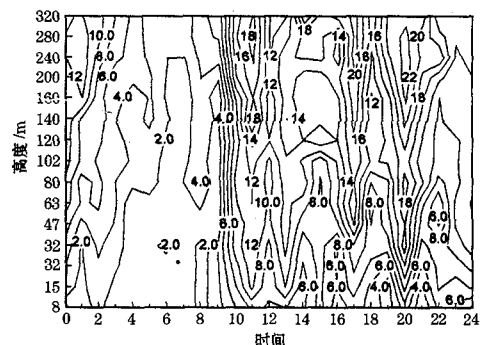


图 2 2000 年 4 月 6 日风速的时间-高度分布图

2.2 近地层梯度里查森数的变化

大气梯度里查森数定义为:

$$R_i = \frac{\frac{g}{\theta_v} \frac{\partial \theta_v}{\partial z}}{\left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

其中, θ_v 是位温, U 、 V 是风速, z 是高度, g 是重力加速度。图 3 给出根据边界层气象资料计算的 2000 年 4 月 6 日沙尘暴来临时北京 102m 高度以下梯度里查森数的变化。在沙尘暴来临前的 3~7 时, R_i 数高于 0.25 的

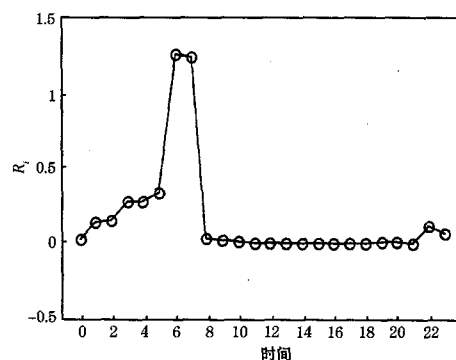


图 3 2000 年 4 月 6 日北京 102m 梯度里查森数

临界值,表明大气层结是稳定的。8时以后迅速降低到0.1以下,远小于0.25的临界值,这表明很强的风切变导致湍流能量明显增加,边界层内湍流交换强烈,上层的动量迅速向下输送,导致地面沙尘浓度也迅速升高。可以看到,沙尘暴发生时,风速明显增大,空气相对湿度迅速减少,边界层湍流迅速发展,湍流混合强烈。

2.3 土壤尘浓度谱分布

这里根据观测到的气溶胶样品中化学元素浓度计算得到气溶胶中的土壤尘质量浓度^[12]。计算公式为:

$$[\text{土壤尘}] = 2.2[\text{Al}] + 2.49[\text{Si}] + 1.63[\text{Ca}] + 2.42[\text{Fe}] + 1.94[\text{Ti}] \quad (2)$$

图4给出了根据气溶胶元素成分计算得到的土壤尘分粒径质量浓度及对应取样观测时间。观测记录表明,这次沙尘暴是从4月6日上午10时开始的。通过分析地面气象资料得知,大风在4月7日凌晨2时变小结束。采集的4组样品中,前2组在沙尘暴期间,沙尘暴结束时间是在第3组样品时间内,最后1组样品为沙尘暴结束期间。2组沙尘暴期间样品的土壤尘总浓度为3410.1和3906.2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,是1999年春季非沙尘期间的土壤尘浓度^[13]的40倍以上,是国家Ⅱ级空气质量标准的13倍。其他的研究^[14,15]表明,这次沙尘暴期间总颗粒物质量浓度达到5~6 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,这表明沙尘暴期间北京大气中土壤尘总浓度占总颗粒物浓度的65%~78%。

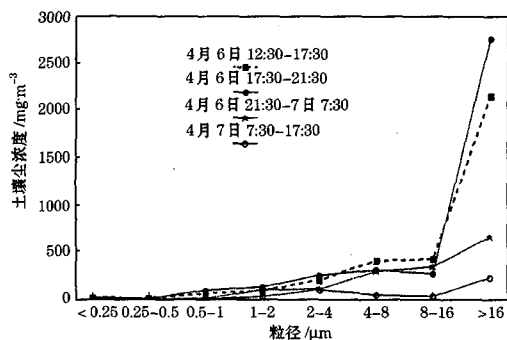


图4 北京2000年4月6~7日土壤尘分粒径质量浓度

在沙尘暴期间,粒径大于16 μm 土壤尘浓度分别为2142.5和2764.5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,占总土壤尘浓度的63%和71%。粒径大于8 μm

土壤尘浓度分别为2575.8和3044.7 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,占总土壤尘浓度的76%和78%。粒径大于2 μm 土壤尘浓度分别为3210.9和3630.3 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,占总土壤尘浓度的94%和93%。在1999年3月非沙尘期间^[13],粒子直径大于16 μm 、8 μm 和2 μm 的土壤尘浓度分别为17、33.8和72.1 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,占总土壤尘浓度的19%、38%和81%。沙尘暴过后的4月7日白天,粒子直径大于16 μm 、8 μm 和2 μm 的土壤尘浓度分别为242.1、274.6和431.8 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,占其总土壤尘浓度的49%、56%、88%。由此可见,沙尘暴期间粗粒子所占比重是很高的;沙尘天气过后,粒径较大的粒子很快通过重力沉降到达地面,粗粒子浓度大幅度下降,粗粒子所占比重也明显减低,但仍然大大高于非沙尘期间。

2.4 沙尘输送的轨迹

沙尘的来源和输送路径对于沙尘暴的研究十分重要。轨迹分析是利用气象资料随时间变化反推污染物(如沙尘)来源并确定输送路径的一种直观的方法。采用由美国大气和海洋管理局提供的HYSPLIT^[11]后向轨迹模式对2000年4月6日北京时间12:00进行了48小时后向轨迹分析(图5)。所用的气

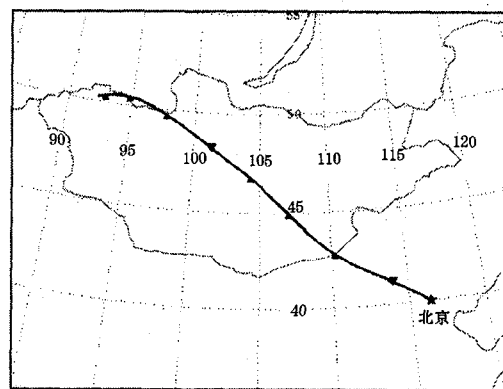


图5 2000年4月6日12:00时(BJT) 48小时后向轨迹分析

象资料是 $5^\circ \times 5^\circ$ NCEP FNL再分析气象资料^①。结果表明,北京的2000年4月6日沙尘暴主要起源于蒙古和内蒙古的沙漠和荒地,并在强烈的西北气流作用下经过长距离高空输送到达北京。

① <http://www.arl.noaa.gov/ss/transport/archives.html>

3 结 论

本文利用观测资料分析研究了沙尘暴发生期间北京近地层气象要素和气溶胶特性, 主要结论有:

(1) 沙尘暴发生后, 近地层风速明显增大, 空气相对湿度迅速减少, 边界层湍流交换强烈。

(2) 沙尘暴期间土壤尘浓度高达 $3906.2\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是 1999 年春季非沙尘期间土壤尘浓度的 40 倍以上。其中粒径大于 $16\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 的土壤尘浓度分别占总浓度的 67%、78% 和 94% 之高。沙尘过后, 粗粒子的浓度和所占总浓度比重明显下降, 但仍大大高于非沙尘期间。

(3) 后向轨迹分析结果表明, 此次沙尘暴主要来源于蒙古和内蒙古地区, 经过长距离高空输送到达北京。

参考文献

- 1 杨东贞, 房秀梅, 李兴生. 我国北方沙尘暴天气趋势分析. 应用气象学报, 1998, 9(3): 352~353.
- 2 Wang Z F, Ueda H, Huang M Y. A Deflation Module for Use in Modeling Long-range Transport of Yellow Sand over East Asia, J. Geophys. Res., 2000, 105: 26947—26959.
- 3 Sokolik, I. N., D. M. Winker, G. Bergametti, et al. Introduction to Special Section: Outstanding Problems in Quantifying the Radiative Impacts of Mineral Dust. J. Geophys. Res., 2001, 106: 18015—18027.
- 4 Zhang Meigen, I. Uno, H. Akimoto, et al. Large-scale Structure of Trace Gas and Aerosols Distributions over the Western Pacific Ocean during TRACE-P, J. Geophys. Res. 108 (D21), 8820, doi: 10. 1029/2002JD002946, 2003.
- 5 Zhang X Y, Gong S L, Shen Z X et al. Characterization of Soil dust Aerosol in China and Its Transport and Distribution during 2001 ACE-Asia: 1. Network Observations, J. Geophys. Res., 2003, 108: 2002JD002632.
- 6 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954~2002年). 科学通报, 2003, 48(11): 1224~1228.
- 7 周明煜, 曲绍厚, 宋锡铭等. 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.
- 8 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远等. 关于中国华北地区沙尘天气的成因与治理对策. 地理学报, 2000, 55(5): 513~521.
- 9 Zhu G H, Wang G F. Investigation of the Particulate Derived from in Digenous Zinc Smelting Using PIXE Analytical Technique, Nuclear Instruments and Methods on Physics Research B, 1998, 136: 966—969.
- 10 Zhang X Y., An Z S, Liu D S, et al. Study on Their Dust Storms in China-Source Characterization of Atmospheric Trace Element and Transport Process of Mineral Aerosol Particles, Chinese Science Bulletin, 1992, 37(11): 940—945.
- 11 Draxler, R. R. Boundary Layer Isentropic and Kinematic Trajectories during the August 1993 North Atlantic Regional Experiment Intensive, J. Geophys. Res., 1996, 101: 29255—29268.
- 12 Malm, W C, Sisler J F, Huffman D et al. Spatial and Seasonal Trends in Particle Concentration and Optical Extinction in the United States. J. Geophys. Res., 1994, 99: 1347—1370.
- 13 Zhang Renjian, Wang Mingxing, Xia Xiangao. Chemical Composition of Aerosols in Winter/spring in Beijing, Journal of Environmental Sciences, 2002, 14(1): 7—11.
- 14 王纬, 岳欣, 刘红杰等. 北京市春季沙尘暴天气大气气溶胶污染特征研究. 环境科学学报, 2002, 22(4): 494~498.
- 15 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. 科学通报, 2001, 46(3): 191~197.

Characteristics of Dust Storm in Boundary Layer over Beijing

Zhang Renjian Xu Yongfu Han Zhiwei

(State Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029)

Abstract

A dust storm attacked Beijing on April 6, 2000. The variation of meteorological parameters in the boundary and physical-chemical properties of this dust events are studied. The results show that the dust storm leads to the distinct and sharp increase of wind speed, decrease of relative humidity, development of turbulence and mixing capability in boundary layer. The total soil mass concentration of dust on April 6 reached $3906\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 40 times as that of the non-dust weather days in 1999 spring. Mass concentration of dust with diameter above $16\mu\text{m}$, $8\mu\text{m}$ and $2\mu\text{m}$ account for 67%, 78% and 94% respectively. Back trajectory analysis shows that this dust storm on April 6, 2000 originated from Mongolia and Inner Mongolia in China, and arrived in Beijing through long-range transportation via strong northwest wind.

Key Words: dust storm Richardson Number back trajectory