

沙尘天气过境前后北京大气 污染物质质量浓度的变化 *

方修琦¹⁾ 李令军²⁾ 谢 云¹⁾

(1) 北京师范大学资源与环境科学系, 100875, 北京 2) 北京市环境保护监测中心系统室,
100044, 北京 // 第一作者 40 岁, 男, 教授)

摘要 影响北京的沙尘天气可分为沙尘暴、浮尘和扬沙 3 种类型。沙尘暴和浮尘天气发生前后的污染物类型和质量浓度 ρ 有明显的差异, 属 2 类不同性质的污染。在沙尘天气发生之前, 大气中 SO_2 、 NO_2 等气态污染物的 ρ 往往较高, 在大气逆温的情况下污染尤其严重, 并且与颗粒物的 ρ 相关性较好。随着沙尘天气的爆发, 颗粒物的 ρ 骤然增加, 但伴随沙尘天气出现的大风使 SO_2 、 NO_2 等污染物的 ρ 显著下降, 大气污染转变为由降尘过程造成的相对单一的颗粒物污染, 属典型的沙尘污染。

关键词 沙尘暴; 北京; 大气污染

分类号 X 16

地处沙尘源地下游的北京每年都不同程度地受到沙尘天气的影响。影响北京的沙尘天气可分为沙尘暴、浮尘和扬沙 3 种类型。近几年影响北京地区的沙尘主要是由蒙古低涡造成的, 上游尘源地主要是蒙古国和中国的内蒙古等地的沙漠边缘和沿途退化草原以及风蚀农田等生态脆弱区。北京周边的裸露地表和施工地也是一个沙尘来源。影响北京的沙尘暴和浮尘主要是由蒙古和内蒙古源区及沿途被带入大气的细小颗粒通过高空输送造成的, 而北京及周边的沙尘源是造成局地扬沙的重要原因^[1-2]。中国北方的沙尘天气在经过近 20 年的低频率期之后, 于近年呈现显著增加的趋势, 由此造成的沙尘污染问题倍受重视, 国内开展了大量研究工作。其中在沙尘天气过程、源地、传输路径以及沙尘的化学组成等方面受到特别重视^[1-5]。对沙尘天气所造成的污染元素质量浓度 ρ 的变化亦有研究^[6], 但对沙尘天气过境前后大气气态化合物污染状况的变化讨论较少。本文在分析 1998—2001 年影响北京的主要沙尘天气的基础上, 从中选取 2000 年 4 月 3—9 日的沙尘暴和 2000 年 11 月 3—5 日的浮尘天气 2 个典型案例, 探讨沙尘天气过境前后近地面大气污染状况的变化。

1 2000 年 4 月 3—9 日沙尘暴过程与大气污染物的 ρ 的变化

1.1 沙尘天气过程与北京大气 PM_{10} 的 ρ 的变化 2000 年 4 月 3—9 日有 3 次东北低涡影响我国, 其中以 6 日影响最大。3 次过程均为春季季风冷平流沿低涡后部由贝加尔湖北部侵入我国^[1]。4 月 3—9 日沙尘暴天气发生时, 北京位于东北气旋的冷锋西南尾部, 而冷锋的西北和东南部均为高气压控制, 因此冷暖空气交绥及大风辐合异常强烈。上游蒙古高原及冷空气移动路径上扬起的沙尘, 沿锋面辐合带卷入气旋中心, 细小沙粒被垂直输送到边界层以上的自由大气中, 沙尘随西北气流输送到北京上空^[1]。与 3 次低涡活动相对应, 北京分别于 4 月 3、6 和 9 日 3

* 教育部骨干教师基金资助项目

收稿日期: 2003-01-20

次受到沙尘天气的影响，在近地面的 PM_{10} 指数曲线上相应地出现 3 次峰值，其中以 6 日最大。

沙尘天气从 3 日下午影响北京，表现为 4 日的 PM_{10} 的 ρ 较前期略有增加（文中日均 ρ 为前一日 13 时至当日 12 时的平均值），达 $329 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，约相当于 2000 年平均值的 2 倍（图 1）。

2000 年 4 月 6 日的沙尘过程是 4 月 3—9 日期间 3 次沙尘天气过程中最强的。由 4 月 6 日 8 时卫星云图推测，内蒙古浑善达克沙地西部和南部边缘是沙尘暴形成初始源地^[2]。这些地区属农牧交错带，气候相对干旱，分

布着广阔的小型沙地、严重沙化的农耕地、退化的草地等。低涡移动过程中一并将沿途沙尘卷入东北气旋中心，使沙尘暴得到加强。4 月 6 日 10 时北京昌平区定陵环境监测站观测到空气中沙尘的 ρ 的峰值超过 $1000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。4 月 6 日 13 时左右，锋面移入北京后，冷锋过境时来自近周边（包括冀北高原、河北平原及京津地区）辐合大风的起沙作用，使沙尘天气得到增强，进入最盛阶段。从 PM_{10} 曲线看，7 日北京市区 PM_{10} 的 ρ 显著升高，达 $963 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，是 2000 年平均值的 5.8 倍。

7 日沙尘暴过境后，8 日 PM_{10} 的 ρ 显著回落到 $283 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。9 日沙尘天气再次影响北京， PM_{10} 指数再次显著升高，9 日和 10 日 PM_{10} 的 ρ 分别为 645 和 $529 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。随着沙尘过程结束，11 日的 PM_{10} 明显减小， ρ 为 $224 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

中国北方城市大气中的颗粒物主要集中在 $0.5 \sim 1.8$, $2 \sim 8$ 和 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 3 个粒级范围内^[6]，其中人类活动造成的颗粒物主要集中在 $0.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 粒级上，沙尘天气所造成的悬浮颗粒物的增加主要分布在 $2 \sim 8 \mu\text{m}$ 的粒径上。2000 年 4 月 6 日大气气溶胶中小于 2.1 和 $9 \mu\text{m}$ 的含量分别占总含量的 16.1% 和 76.9%^[5]，为典型的沙尘污染类型。

1.2 沙尘天气过程中 SO_2 、 NO_2 的 ρ 的变化

4 日沙尘天气过境前， SO_2 和 NO_2 的 ρ 均略高于 2000 年春季（3 月 1 日至 5 月 31 日）的平均值；沙尘暴发生期间，4 月 5—10 日 SO_2 、 NO_2 的 ρ 几乎都在平均值以下。 SO_2 的 ρ 较前期低 50% 以上，大约相当于春季平均值的一半。 NO_2 的 ρ 约减少 40%（表 1）。每次沙尘过境之后， SO_2 和 NO_2 的 ρ 均较前期显著降低，随后又有回升，呈同步的波动性变化（图 1）。

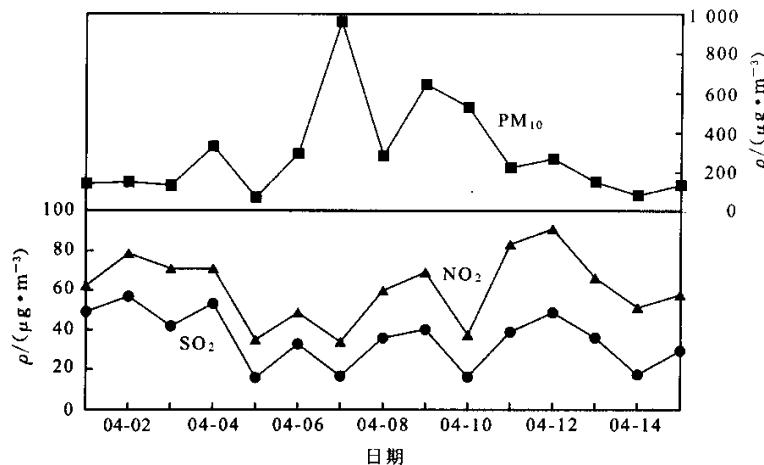


图 1 2000 年 4 月 1—15 日北京大气污染物的 ρ 的变化

表 1 沙尘过境前后 SO_2 、
 NO_2 、 PM_{10} 的 ρ 的变化 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

日期	SO_2	NO_2	PM_{10}
过境前	56	78	200
过境后	26	47	464
春季平均	53	67	212

2 2000年11月3—5日浮尘天气过程与大气污染物的 ρ 的变化

2.1 浮尘天气过程与北京大气PM₁₀的 ρ 的变化 11月3日以前,我国北部为深厚低涡控制,华北位于锋前和高压后部偏南气流中。我国东部沿海及华北平原为大范围雾区,气压分布均匀,低空大气属稳定层结,不利于污染物大尺度扩散,在太行山和燕山山麓有明显的复合带聚合作用,使北京和唐山一带形成重雾区,造成严重大气污染。3日北京市PM₁₀的 ρ 上升为355 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图2)朝阳区气候站观测的能见度仅为0.9 km^[2,8]。

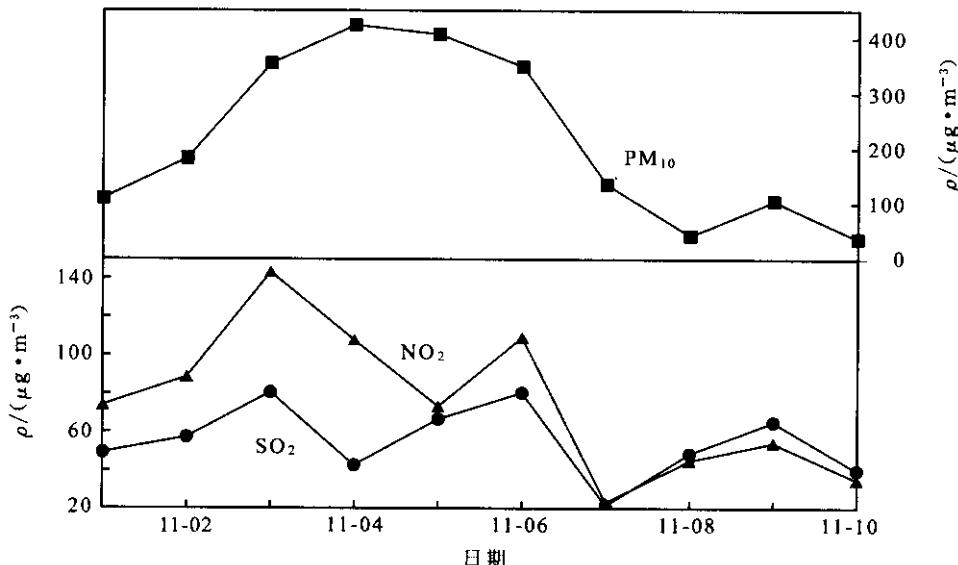


图2 2000年11月1—10日北京大气污染物的 ρ 的变化

11月3日由贝加尔湖经蒙古高原东部、内蒙古东部、河套西北部、河北北部为低涡后部西北气流控制,下午内蒙古中部西北冷平流大风经过地区有大范围扬沙和浮尘天气。4日,由于低涡东移过程中逐渐向北转入东北地区,对北京地区的影响减弱,只有沙尘云系的西南尾部影响北京地区。根据沙尘源地追踪分析,这次侵入北京的沙尘来自西北路径,由朱日和、经察汗卓、东洋河、张家口、官厅水库、南口等地,大量沙尘随低空西北气流影响北京^[2,9]。

此次沙尘天气,初始源区为蒙古国,由于冷空气势力较弱,沿途主要以扬沙、浮尘为主,未形成典型沙尘暴,起尘量相对较小^[2]。因初始源距离北京较远,输入北京的主要是通过高空输送来的细小颗粒,但由于细小颗粒在大气中的停留时间较长,北京沙尘天气4—7日PM₁₀的 ρ 持续偏高,其中相当一部分是受上游浮尘影响。

4日,北京低空大气中的固体微粒和飘尘大量增加,沿西北风通道分布的八达岭、昌平、海淀、朝阳气候站为霾,上游的西斋堂为浮尘^[7]。市区PM₁₀的 ρ 上升为424 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图2),形成严重污染,但能见度与3日相比明显好转。海淀、朝阳能见度转变为6 km,其他各县区能见度皆高于6 km^[8]。

5日小股冷空气过境后,北京再次转变为稳定性天气,地面至430 m为接地逆温,580~1 200 m为低空逆温,形成双层性的逆温结构^[2,8]。低层大气中的PM₁₀含量虽较4日减少,但仍较高,污染级别为4级。此后,随着沙尘天气结束,7日虽然风速不低于4日,且大风持续时间更长,PM₁₀的 ρ 仍然维持在较低水平,甚至在8日北京市市区空气质量达到优级(图2)。

总之,从11月1日到11月7日,PM₁₀指数经历了从升到降的波动过程,在低涡冷锋过境前

后3—5日连续3d PM_{10} 的 ρ 均显著偏高,但前后阶段偏高的成因显著不同。11月3日北京位于低涡冷锋前部,受低涡尾部锋前偏南风和偏东风影响,城市气溶胶粒子在北京辐合,属典型的城市污染。11月4日冷锋过境后,冷锋后部沙漠边缘及裸露地大风区的沙尘沿西北路径输送到北京,造成北京大气中的颗粒物的 ρ 增大,上游沙尘暴天气引起的飘尘远输送和周边近输送的汇聚和沉降是造成后期污染的主要原因,属典型的沙尘型污染。该次沙尘过程中TSP的 ρ 的变化与 PM_{10} 类似,只是变化幅度有所不同,二者比值在沙尘过境前后差别较大,以沙尘过境时数值最大,说明沙尘中细小颗粒含量较多,而沙尘过后大气中 PM_{10} 含量明显减少,这说明浮尘与城市源颗粒物的粒径有明显区别。

2.2 沙尘天气过程中 SO_2 , NO_2 的 ρ 的变化

11月北京已进入采暖期,面源、点源群排放源污染物的排放量增大。11月2日之前, PM_{10} , SO_2 , NO_2 等污染物的 ρ 均显著偏低,空气质量良好。但到11月3日,受大尺度低空逆温阻挡层及冷锋前3m·s⁻¹以下的偏东南风输送的影响,不仅不利于污染物扩散,而且增强了北京地区污染物的汇聚和累积。11月1—3日,大气中的 SO_2 , NO_2 的 ρ 与 PM_{10} 同步增加,3日 SO_2 , NO_2 的 ρ 分别达80和143 $\mu g\cdot m^{-3}$,均高于全年平均值。其中 NO_2 的 ρ 高出2倍,从而造成北京空气污染加重(图2)。

11月4日冷锋过境后,由于冷空气主力偏北,北京只受小股冷空气影响,夜间至清晨风力较大,大风时间虽很短,但造成4日市区 SO_2 , NO_2 等污染物的 ρ 显著下降,特别是 SO_2 的 ρ 降低近50%。

5日小股冷空气过境后,北京再次转变为稳定性天气。与低层大气中的 PM_{10} 含量减少的趋势相反,5—6日市区 SO_2 , NO_2 的 ρ 均显著回升,6日午后至7日,由于风速的再次增大,市区 SO_2 , NO_2 等污染物的 ρ 显著下降。

从污染角度看,冷空气过境前后各种气象要素及污染物 ρ 有明显的差异,属2类不同性质的污染。3日前由于气象条件的恶化,城市各种污染物逐渐复合积累,形成较严重污染,属典型的城市污染类型;4日由于沙尘天气的影响,大气中颗粒物的 ρ 迅速上升,而气态污染显著下降,为典型的沙尘污染过程。

3 结论

影响北京的沙尘天气可分为沙尘暴、浮尘和扬沙3种类型。通过对2000年4月3—9日沙尘暴及2000年11月3—5日浮尘天气2个典型沙尘天气过程个例的分析,探讨了沙尘天气对北京近地面大气污染的影响。

沙尘天气发生前后的污染物类型和 ρ 有明显的差异,属2类不同性质的污染。

第一,在沙尘天气发生之前,大气中 SO_2 , NO_2 等化学污染物与 PM_{10} 的 ρ 都维持在较高水平,相关性较好,在大气逆温的情况下污染尤其严重,这是典型的城市污染物造成的大气污染;随着沙尘天气的爆发,伴随沙尘天气过程的大风使城市气态污染物的 ρ 显著下降,而从蒙古国及内蒙古等上游地区的沙漠边缘或退化的草地和农田吹来的大量粉尘使北京大气颗粒物的 ρ 骤然增加,大气污染转变为由降尘过程造成的相对单一的颗粒物污染,属典型的沙尘污染。

第二,颗粒物是北京一年中绝大多数日子里的首要污染物,其中只有少数几天是由强沙尘天气造成。尽管沙尘天气和非沙尘天气均能导致大气中颗粒物的 ρ 的升高,但2种天气状况下大气中颗粒物的粒径分布存在显著差异,非沙尘天气以小于2 μm 的城市污染物为主,沙尘天气中2~8 μm 粒径为主的外来浮尘含量显著增加。

本文得到任阵海院士、苏福庆教授和高庆先博士的指导和帮助,谨致谢意。

4 参考文献

- [1] 高庆先,李令军,张运刚,等.我国春季沙尘暴研究[J].中国环境科学,2000,20(3):495.
- [2] 李令军,高庆先.2000年北京沙尘暴源地解析[J].环境科学研究,2001,13(2):1.
- [3] 刘毅,周明煜.北京近中国海春季沙尘气溶胶浓度变化规律的研究[J].环境科学学报,1999,19(6):642.
- [4] 王玮,汤大钢,刘红杰,等.中国PM_{2.5}污染和污染特征的研究[J].环境科学研究,2000,13(1):1.
- [5] 李君,谭利华,邱维理,等.黄羊滩沙地的形成及其对北京沙尘暴天气的影响[J].北京师范大学学报(自然科学版),2002,38(2):279.
- [6] 庄国顺,郭敬华,袁惠,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.
- [7] Ning Datong, Zhong Liangxi, Chung Y. Aerosol size distribution and elemental composition in urban areas of northern China[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(13): 2355.
- [8] 李令军.北京沙尘天气污染利弊的个例分析[J].地学前缘,2002,9(2):276.

DIFFERENCE OF AIR POLLUTION DURING THE DUSTSTORM PROCESS IN BEIJING

Fang Xiuqi¹⁾ Li Lingjun²⁾ Xie Yun¹⁾

(1) Department of Resources and Environmental Sciences, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

(2) Systemic Department, Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, 100044, Beijing, China)

Abstract The objective of this paper is to study the difference of air pollution before and after a duststorm event. The results show that duststorm events occurring in Beijing are caused mainly by Mongolia low. There are two different kinds of air pollution in Beijing during a duststorm process. Before a duststorm, chemical air pollutants are in high concentration due to temperature inversion. At the beginning of a duststorm when dust has not come yet, air quality is improved because strong wind blows chemical pollutant like SO₂, NO₂ away, and their concentration is decreased. During the duststorm when dust comes, concentration of PM₁₀ is increased but atmospheric visibility is decreased. It is typical dust air pollution.

Key words duststorm; air pollution; Beijing