

徐文帅, 张大伟, 李云婷, 等. 2016. 北京两次沙尘污染过程中 PM2.5 浓度变化特征 [J]. 气候与环境研究, 21 (1): 78–86. Xu Wenshuai, Zhang Dawei, Li Yunting, et al. 2016. Variation of PM2.5 concentration during two dust pollution events in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (1): 78–86, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15084.

北京两次沙尘污染过程中 PM2.5 浓度变化特征

徐文帅¹ 张大伟¹ 李云婷¹ 陈添² 吴其重³

¹ 北京市环境保护监测中心, 北京 100048

² 北京市环境保护局, 北京 100048

³ 北京师范大学全球变化与地理系统科学研究院, 北京 100875

摘要 利用北京市空气质量监测数据和气象资料,对 2013 年 2 月 28 日和 3 月 9 日两次沙尘污染过程 PM2.5(空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物,即细颗粒物)、PM10(空气动力学当量直径小于等于 10 μm 的颗粒物,即可吸入颗粒物)浓度及 PM2.5 浓度/PM10 浓度比值的变化特征进行了分析,研究结果表明:(1)沙尘开始影响北京时,PM2.5 与 PM10 浓度表现出反位相变化,PM10 浓度在两次沙尘过程中 2 h 内分别上升 50.8%与 202.4%,最高达 800 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以上;PM2.5 浓度分别下降 58.3%与 50.9%,直至下降至 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以下,PM2.5 有明显改善现象。(2)虽然 PM2.5 浓度在沙尘到达前有缓升的迹象,但沙尘抵达后,PM2.5 浓度持续快速下降,PM2.5 浓度/PM10 浓度比值由沙尘影响前的 0.75 以上降至 0.25 以下。沙尘影响前,PM2.5 日均值均超过 150 $\mu\text{g m}^{-3}$,北京地区处于重度污染水平。这说明沙尘来临前以人为污染为主,主要由细粒子“贡献”,沙尘来临后的空气污染,主要由巨、大粒子的沙尘“贡献”。

关键词 PM2.5 沙尘天气 空气质量 重污染 北京

文章编号 1006-9585 (2016) 01-0078-09

中图分类号 X16

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15084

Variation of PM2.5 Concentration during Two Dust Pollution Events in Beijing

XU Wenshuai¹, ZHANG Dawei¹, LI Yunting¹, CHEN Tian², and WU Qizhong³

¹ Beijing Environmental Protection Monitoring Center, Beijing 100048

² Beijing Municipal Environmental Protection Bureau, Beijing 100048

³ College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract Based on air quality automatic monitoring data and meteorological data, this study analyzed the variation of PM2.5, PM10, SO₂, and NO₂ during two dust weather cases that occurred in Beijing on 28 February and 9 March 2013. The results showed that: (1) Concentrations of PM2.5 and PM10 showed clearly opposite change characteristics when the dust arrived at Beijing: The PM10 concentration increased by 50.8% and 202.4% in two hours, respectively, with a maximum of over 800 $\mu\text{g m}^{-3}$. On the contrary, the PM2.5 concentration decreased by 58.3% and 50.9%, respectively, both to lower than 35 $\mu\text{g m}^{-3}$. The dust weather had a significant effect on reducing the concentration of PM2.5 in Beijing. (2) Although concentrations of PM2.5 rose slowly in a few hours before the dust arrived, the concentration of PM2.5 declined consistently during the dust arrival period. The PM2.5/PM10 ration dropped from above 0.75 to below 0.25. In

收稿日期 2015-04-07; **网络预出版日期** 2015-07-10

作者简介 徐文帅, 1980 年出生, 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为空气质量分析与预报。E-mail: xuwenshuai@hotmail.com

通讯作者 张大伟, E-mail: zhangdawei@bjmeml.com.cn

资助项目 北京市科技计划课题 Z13110000611309, 国家环境保护公益性行业科技专项 201409005, 国家科技支撑项目 2014BAC23B03

Funded by Green Avenue Program of Beijing Municipal Science and Technology Commission (Grant Z13110000611309), National Environmental Industry Research Special Funds for Public Welfare Projects (Grant 201409005), and National Science and Technology Support Program (Grant 2014BAC23B03)

both cases, the day before the dust day, daily concentrations of PM_{2.5} were greater than 150 $\mu\text{g m}^{-3}$, and air quality was at a serious pollution level, implying that fine particulate matter contributed to the air pollution. After the arrival of the dust, air pollution was mainly caused by giant and large particulate matter.

Keywords PM_{2.5}, Dust weather, Air quality, Serious pollution, Beijing

1 引言

空气质量标准 GB3095-2012 实施后, PM_{2.5} (空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物, 即细颗粒物) 成为北京市首要空气污染物, PM_{2.5} 在 2013 年甚至有 58 d 达到重度污染水平 (北京市环境保护局, 2014), 北京市的 PM_{2.5} 问题已成为社会关注的焦点。在关注 PM_{2.5} 时, 沙尘天气是一个不可忽视的因素, 北京市地处蒙古国和我国内蒙地区沙尘暴源地的下风向地区, 在合适的天气系统下, 外来沙尘时常会影响北京, 并频繁造成北京市 PM₁₀ 浓度达到重度污染水平 (高庆先等, 2002; 张志刚等, 2009; 徐文帅等, 2014), 因而沙尘天气一直以来都受到科学家的广泛关注。已有研究发现, 内蒙气旋加冷锋是北京产生沙尘天气的最主要天气系统 (尹晓惠等, 2007), 沙尘暴爆发前, 大气层结稳定, 边界层上部有强大的逆温层, 不利于污染物扩散, 随着沙尘过境暴发, 水平风速和平均湍流急剧增强, 逆温层迅速破坏, 边界层各气象要素有利于污染物的扩散 (彭珍等, 2007), 气态污染物迅速降低, PM₁₀ 浓度快速上升 (方修倚等, 2003; 陈辉等, 2012; 徐文帅等, 2012)。PM_{2.5} 作为 PM₁₀ 的一部分, 亦会受沙尘天气的影响, 部分学者研究发现北京市在沙尘影响日表现出 PM₁₀ 浓度明显升高, 而对 PM_{2.5} 浓度影响不大但也有所增加, PM_{2.5} 浓度/PM₁₀ 浓度 (简称为 PM_{2.5}/PM₁₀) 的比例在非沙尘天约为 30%~55%, 而在沙尘天可以下降至 20% 左右 (木拉提等, 2010; 孙珍全等, 2010), 而且地壳元素 Ca、Mg 极易在 PM₁₀ 中聚集, 人为污染元素 Pb、As 则容易在 PM_{2.5} 中聚集 (Wang et al., 2005; 木拉提等, 2010), 也有学者发现在特大沙尘暴中, PM_{2.5} 浓度显著上升, 较沙尘来临前增长 5 倍以上 (张仁健等, 2000, 2003; 庄国顺等, 2001), PM_{2.5} 甚至占总悬浮颗粒物的 30% 左右 (孙业乐等, 2004)。

尽管研究人员利用各种研究方法对外来沙尘影响北京市 PM_{2.5} 的特征进行了研究, 但这些研究

主要集中于沙尘过境时 PM_{2.5} 的日均特征, 对于 PM_{2.5} 的小时变化及其与各项污染物之间的差异仍然比较缺乏, 而 2010 年以后外来沙尘对北京空气质量影响往往不足 10 h (徐文帅等, 2012), 日均值有可能难以准确评估外来沙尘对 PM_{2.5} 的影响特征。本文将基于北京市 2013 年外来沙尘污染过程中 PM_{2.5} 的影响特征进行分析, 着重研究 PM_{2.5} 的小时变化特征, 同时研究 PM_{2.5} 与 PM₁₀、NO₂、SO₂ 之间的变化特征, 探究外来沙尘输送对北京市 PM_{2.5} 影响的规律, 以期更好地服务于空气质量预报预警工作。

2 数据资料与方法

2.1 污染物浓度监测数据

本文选取了北京市西北部边界八达岭站作为判断上游外来沙尘经过北京判据之一, 以主要分布在城区的 11 个国控站污染物监测数据代表北京市的空气质量 (图 1) (所有站点名及分布见 [http://zx.bjmemc.com.cn/\[2015-01-01\]](http://zx.bjmemc.com.cn/[2015-01-01]))。本文除单独说明外, PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂ 的日、小时数据均为国控站点 (接受国家级别的检测监督的站点) 平均值。

2.2 气象数据

选取北京市观象台每小时的主要地面风向风速数据, 用于分析风场与污染物小时浓度之间的关系; 采用气象业务系统 MICAPS (Meteorological Information Comprehensive Analysis And Process System) 中各气象站点的沙尘观测资料, 结合 NCEP 再分析资料绘制地面天气实况分析图, 分析沙尘影响期间的天气形势。

本文通过分析边界监测站点与国控站点 PM₁₀ 的浓度变化特征, 结合沙尘观测资料, 得到沙尘对北京市空气质量影响的时段, 筛选出 2013 年外来沙尘天气造成 PM₁₀ 超标 (日均浓度大于 150 $\mu\text{g m}^{-3}$) 的污染过程; 然后详细分析沙尘影响前后 PM_{2.5} 与 PM₁₀、SO₂、NO₂ 的变化情况, 结合气象要素数据, 比对不同沙尘过程污染物浓度变化的差异, 归纳得出两次外来沙尘天气对北京市 PM_{2.5} 影

响的特征、程度和时间长度。

3 2013年2月28日沙尘过程中PM2.5特征分析

根据北京地理特征以及3个方向上边界站点空气相对比较干净的特点,当北京上游有观测到沙尘天气过程,在相应气流作用下,北京市PM10浓度呈现先高山边界站、后国控站陡然增加的特征,判定为北京市受到外来沙尘影响(徐文帅等,2012),影响时段由PM10快速上升开始,至PM10低于 $150 \mu\text{g m}^{-3}$ 结束。

基于沙尘影响判据,北京市在2013年2月28日10:00(北京时间,下同)至16:00受到外来沙尘影响,沙尘爆发前的2月27日,各项污染物日均浓度较高,PM10与PM2.5浓度均超过 $150 \mu\text{g m}^{-3}$ (表1),PM2.5浓度甚至达到重度污染水平,NO₂浓度处于轻度污染水平。PM10浓度在沙尘影响日(28日)较前日有明显上升,PM2.5浓度略有上升,气态污染物有所下降,这与之前研究结果类似(Zhang et al., 2008; 木拉提等, 2010; 孙珍全等, 2010); 沙尘过境后一日,各项污染物均快速下降至 $30 \mu\text{g m}^{-3}$,处于优的水平。

表1 北京市2013年2月27日至3月1日各污染物日均浓度

	$\mu\text{g m}^{-3}$			
	PM2.5 浓度	PM10 浓度	NO ₂ 浓度	SO ₂ 浓度
2月27日	191	194	97	51
2月28日	207	350	60	35
3月1日	6	10	23	10

3.1 地面天气形势分析

从天气形势图(图2)可以看出,这次沙尘天气形成的天气形势仍然是内蒙气旋加冷锋型(尹晓惠等,2007; 徐文帅等,2012)。在2月27日14:00,在内蒙中部已形成一低压系统,在其后部为强高压系统,高低压结合部观测到明显沙尘现象,此时北京处于低压系统前部,等压线相对比较稀疏,天气系统相对静稳;高低压系统随后往东南向继续移动。2月28日08:00,低压系统东移至辽宁北部,北京处于低压系统底部,同时高压系统前部接近北京,高低压结合部经过蒙古国与我国内蒙交界的中东部沙源地,已形成大范围沙尘天气,沙尘带前端

到达北京西北边界,北京城区表现为低压底部过境的特征;2月28日14:00,北京市处于沙尘带中,同时受高压系统前部作用,有较明显的偏北风;2月28日20:00,高压中心靠近北京,北京仍处于等压线比较密集区,偏北风风力较大,沙尘带已远离北京。

3.2 污染物小时变化特征

27日14:00至28日09:00,在沙尘影响前PM2.5浓度的小时变化与PM10高度一致,这一时段北京以偏南风为主,风力较小,风速大部分时刻低于 2 m s^{-1} (图3),水平扩散条件不利,污染物浓度容易累积;同时相对湿度在傍晚以后快速上升,28日02:00至09:00甚至大于80%(图4),也有利于污染物吸湿增长;27日18:00开始,PM10浓度 $200 \mu\text{g m}^{-3}$ 以上,PM2.5浓度达到 $150 \mu\text{g m}^{-3}$,NO₂浓度超过 $100 \mu\text{g m}^{-3}$,PM2.5浓度与PM10浓度均表现为同步缓慢上升的变化趋势;尤其是28日00:00至09:00 PM2.5/PM10均大于0.8,PM2.5与PM10浓度已高于 $400 \mu\text{g m}^{-3}$,PM2.5甚至处于严重污染水平。沙尘于28日10:00开始经过北京城区,风向转为偏北风,风速跃升至 6.7 m s^{-1} ,相对湿度也骤降至20%以下,此时PM2.5浓度表现出与PM10截然相反的变化特征,28日10:00 PM10国控站点平均浓度快速上升,由09:00的 $576 \mu\text{g m}^{-3}$ 跃升至 $871 \mu\text{g m}^{-3}$,11:00 PM10为 $869 \mu\text{g m}^{-3}$,保持在 $800 \mu\text{g m}^{-3}$ 以上,较沙尘到达前上升50.8%;PM2.5浓度则由 $470 \mu\text{g m}^{-3}$ 迅速下降至 $196 \mu\text{g m}^{-3}$,两小时下降58.3%;PM2.5/PM10也由0.816快速下降至0.22;12:00至17:00 PM2.5浓度与PM10浓度均表现出持续快速下降的特征,PM2.5浓度在15:00以后低到 $35 \mu\text{g m}^{-3}$ 左右,处于优的水平,这一时段PM2.5/PM10均低于0.20,PM2.5占比较小。整个沙尘影响时段PM2.5/PM10值为0.22。

在沙尘到达前、过境、离开3个时段,气态污染物(SO₂、NO₂)与PM2.5变化基本一致。2月28日沙尘影响前,NO₂与SO₂缓慢上升,NO₂在27日17:00至28日10:00时段均高于 $100 \mu\text{g m}^{-3}$,峰值时段出现在27日19:00至24:00,可能与下班晚高峰机动车排放影响有关;SO₂在27日17:00至28日10:00浓度相对其他时段亦有明显上升,与NO₂略有不同,SO₂浓度在 $60 \mu\text{g m}^{-3}$ 左右波动,变化相对平缓,这与SO₂主要以工业及采暖排放为主,排放强度日变化并不明显有关。NO₂与SO₂浓度在2

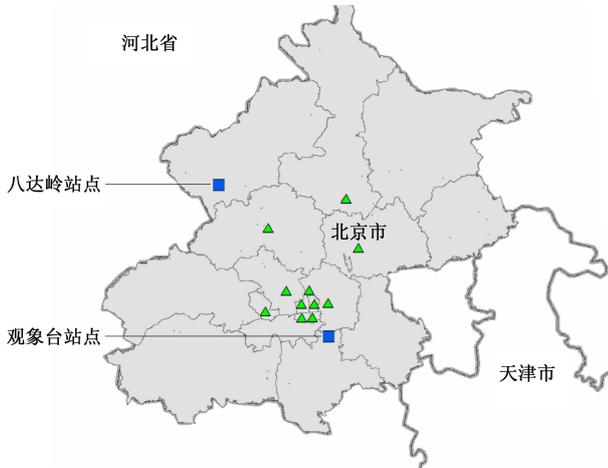


图 1 观测站点分布图 (三角形为国控站点)
Fig. 1 Distribution of observation sites in Beijing (triangles are national standard air quality observation stations)

月 28 日 10:00 至 17:00 则快速下降, 尤其是 2 月 28 日 10:00 至 11:00, 两小时内分别同比下降 76.9% 与 86.0%。28 日 12:00 开始, SO₂ 低于 10 μg m⁻³, NO₂ 浓度低于 20 μg m⁻³, 一直维持在较低浓度。沙尘过境时, PM_{2.5} 与 PM₁₀ 反向变化, 而与气态污染物一样快速下降的特征, 说明外来沙尘对 PM_{2.5} 浓度增加影响极小, PM_{2.5} 主要受水平扩散条件影响, 以快速下降为主。

4 2013 年 3 月 9 日沙尘过程中 PM_{2.5} 特征分析

根据第 3 小节第一段的判据, 北京市在 2013 年 3 月 9 日 10:00 至 16:00 受到外来沙尘影响, 沙尘爆发前一日, PM₁₀ 与 PM_{2.5} 浓度仍然超过 150 μg m⁻³ (表 2), 但与 2 月 28 日的沙尘过程有明显

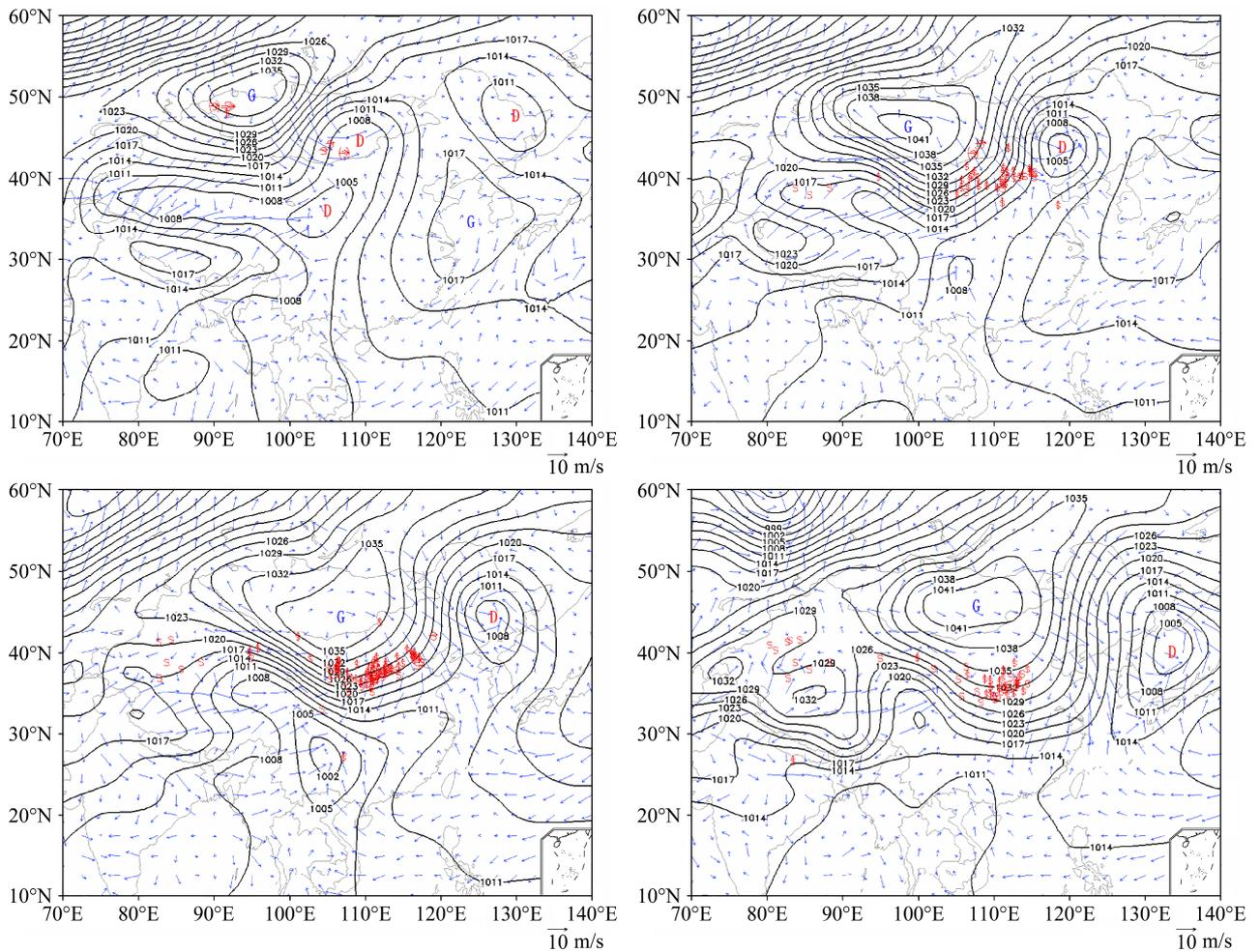


图 2 2013 年 2 月 27~28 日地面天气形势 (单位: hPa) 与沙尘观测图 (红色 S 符号为该测点观测到沙尘现象): (a) 2 月 27 日 14:00; (b) 2 月 28 日 08:00; (c) 2 月 28 日 14:00; (d) 2 月 28 日 20:00
Fig. 2 Surface pressure fields (hPa) and dust observation from 27 to 28 February 2013 (the red symbol “S” means dust phenomenon): (a) 1400 LST 27 Feb; (b) 0800 LST 28 Feb; (c) 1400 LST 28 Feb; (d) 2000 LST 28 Feb

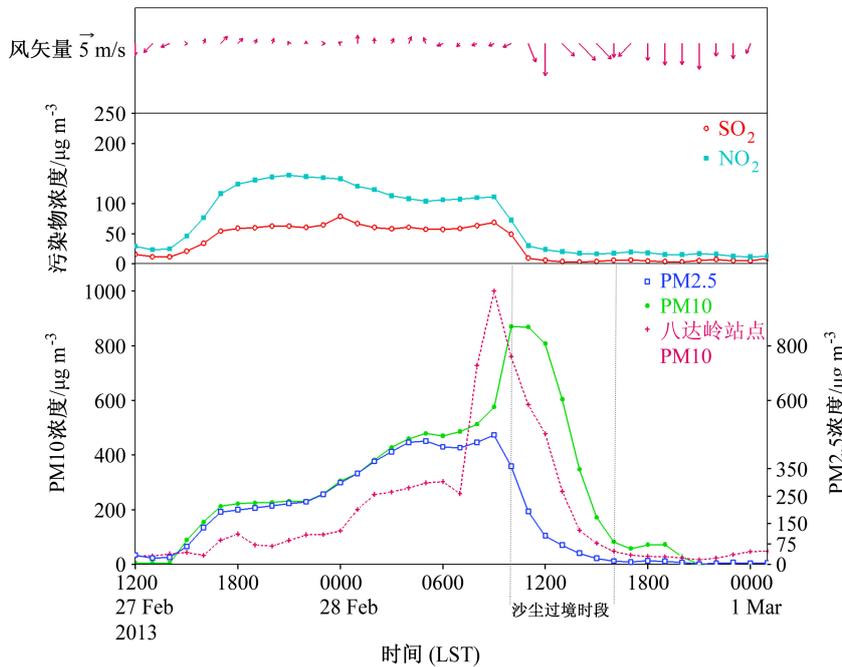


图3 2013年2月27日12:00至3月1日00:00风矢量及各污染物小时变化
Fig. 3 Time series of surface wind speed and pollutant concentration in Beijing from 1200 LST 27 Feb to 0000 LST 1 Mar 2013

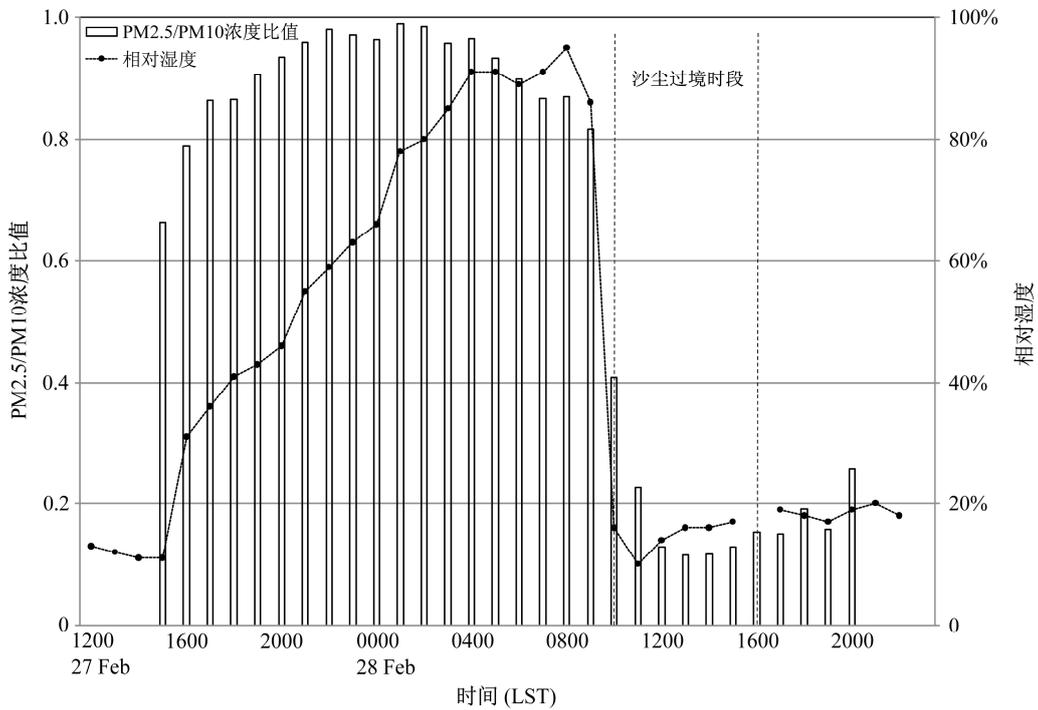


图4 2013年2月27日12:00至3月1日00:00 PM2.5/PM10与相对湿度变化
Fig. 4 PM2.5/PM10 concentration ratio and relative humidity in Beijing from 1200 LST 27 Feb to 0000 LST 1 Mar 2013

不同, PM10在沙尘影响日与爆发前一日基本相当, 而PM2.5则由 $199 \mu\text{g m}^{-3}$ 大幅下降至 $56 \mu\text{g m}^{-3}$ 。气态污染物与2月28日过程类似, 3月9日日均浓度均大幅下降。

4.1 地面天气形势分析

3月9日的沙尘天气过程仍然是由于内蒙与蒙古国中南部, 形成一高低压系统, 低压系统有较强的上升运行, 高低压系统结合部等压线比较密集,

表 2 北京市 2013 年 3 月 8 日至 3 月 10 日各污染物日均浓度
Table 2 Daily concentrations of air pollutants in Beijing from 8 to 10 March 2013

	PM10 浓度	PM2.5 浓度	NO ₂ 浓度	SO ₂ 浓度
3 月 8 日	199	239	114	61
3 月 9 日	56	240	42	28
3 月 10 日	41	67	51	25

风速极大，形成沙尘天气（尹晓惠等，2007）。如图 5 所示，与 2 月 28 日沙尘过程略有不同，低压系统较强，等压线相对密集，3 月 8 日 14:00 北京市处于低压系统前部，偏南风较大，水平扩散条件较 2 月 27 日略微有利。3 月 9 日 08:00，低压系统中心东移至辽宁东南部，高低压结合部同样经过高低压结合部经过蒙古国与我国内蒙交界的中东部沙源地，并形成大范围沙尘天气，北京处于低压系

统底部，同时开始高压系统前部作用，沙尘带抵达北京西北边界。9 日 14:00 沙尘带快速经过北京城区，这次沙尘天气同样表现出低压底部过境的特征；至 9 日 20:00，北京处于高压中心控制，沙尘已到达山东境内，远离北京。

4.2 污染物小时变化特征

在沙尘过境前，3 月 8 日 00:00 至 3 月 9 日 09:00 各项污染物浓度水平比 28 日略低（图 6），夜间时段的相对湿度处于 70% 左右（图 7），较上次污染过程亦略低；尤其是 3 月 8 日 13:00 至 16:00，偏东南风风速大于 4 m s⁻¹，水平扩散条件相对有利，各项污染物快速下降，国控站点的 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 浓度在 3 月 8 日 16:00 以后大部分时间均低于 200 μg m⁻³。在沙尘到达前 10 h（8 日 23:00 至 3 月 9 日 09:00），随着风速的减小，PM_{2.5} 与 PM₁₀ 浓度变

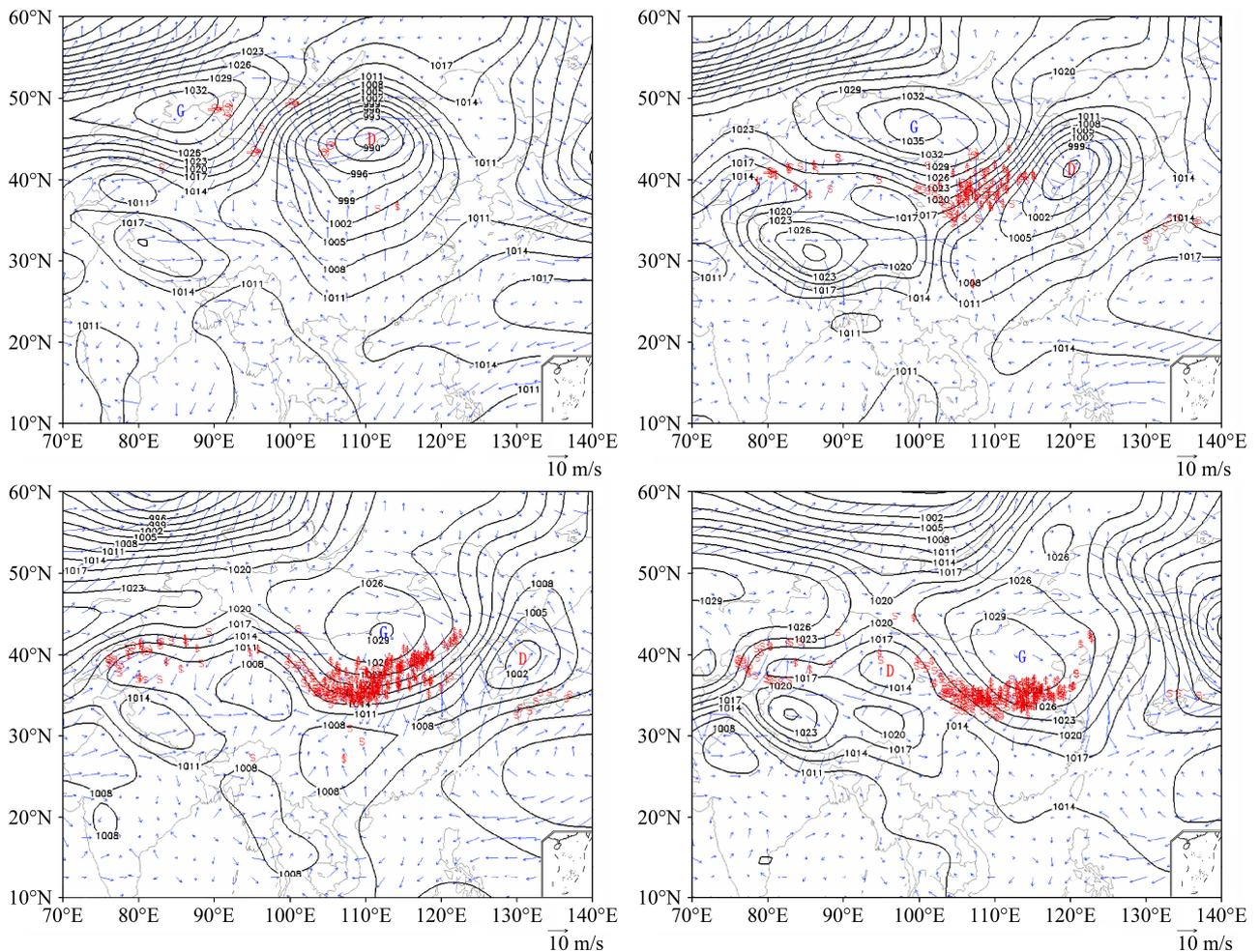


图 5 2013 年 3 月 8-9 日地面天气形势（单位：hPa）与沙尘观测图（红色 S 符号为该测点观测到沙尘现象）：(a) 3 月 8 日 14:00；(b) 3 月 9 日 08:00；(c) 3 月 9 日 14:00；(d) 3 月 9 日 20:00
Fig. 5 Surface pressure fields (hPa) and dust observation from 8 to 9 March 2013: (a) 1400 LST 8 Mar; (b) 0800 LST 9 Mar; (c) 1400 LST 9 Mar; (d) 2000 LST 9 Mar

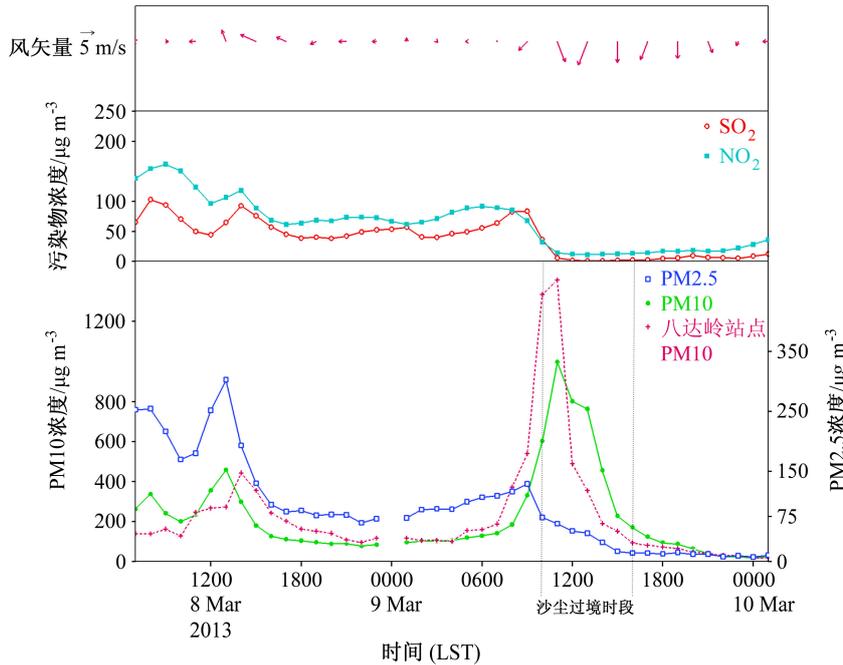


图6 2013年3月9日00:00至3月10日00:00风矢量及各污染物小时变化

Fig. 6 Time series of surface wind speed and pollutant concentration in Beijing from 0000 LST 8 March to 0000 LST 10 March 2013

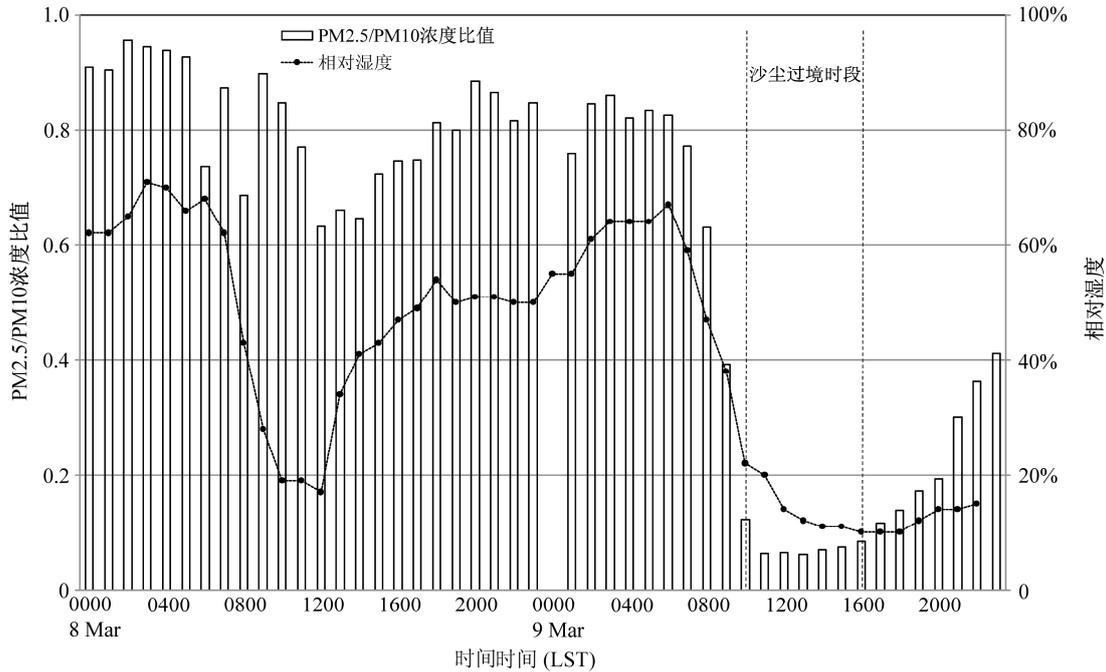


图7 2013年3月8日00:00至3月9日23:00 PM2.5/PM10与相对湿度

Fig. 7 PM2.5/PM10 concentration ratio and relative humidity in Beijing from 0000 LST 8 March to 2300 LST 9 March 2013

化趋势一致，表现为缓慢上升的趋势，这一时段 PM2.5/PM10 的小时比值均高于 0.75。9 日 10:00，观象台风场转为西北风，风速达 7.4 m s^{-1} ，沙尘到市区；3 月 9 日 10:00 至 11:00，PM10 与 PM2.5 表现出相反的变化特征，PM10 浓度经过两小时由 330

$\mu\text{g m}^{-3}$ 上升至 $998 \mu\text{g m}^{-3}$ ，上升 202.4%；PM2.5 则由 $129.4 \mu\text{g m}^{-3}$ 下降至 $63.1 \mu\text{g m}^{-3}$ ，下降 50.9%；PM2.5/PM10 值快速下降至 0.06。9 日 12:00 至 17:00，北京一直以偏北风为主，风速保持在 5.5 m s^{-1} 以上，PM2.5 与 PM10 浓度均表现出快速持续下降

的特征, PM_{2.5} 浓度从 15:00 开始下降至 35 $\mu\text{g m}^{-3}$, 处于较低水平; 与 2 月份的沙尘过程类似, 本次沙尘影响时段 PM_{2.5}/PM₁₀ 均低于 0.07, PM_{2.5} 在 PM₁₀ 中占比同样处于较低水平, 说明此次外来沙尘过程绝大部分同样以粗颗粒为主, 即沙尘来临后 PM_{2.5}/PM₁₀ 的空气污染, 主要由巨、大粒子的沙尘“贡献”。

在此次沙尘影响过程中, 气态污染物亦表现出与 PM_{2.5} 极为相近的变化特征, PM_{2.5} 处于高浓度时段的 3 月 8 日 00:00 至 12:00, NO₂ 浓度大于 80 $\mu\text{g m}^{-3}$, SO₂ 浓度也高于 40 $\mu\text{g m}^{-3}$, 受人为排放明显; 3 月 9 日 10:00 至 11:00, 在沙尘过境时段, NO₂ 和 SO₂ 浓度分别同比下降 80.4% 与 93.1%, 并且从 9 日 11:00 开始, SO₂ 浓度低于 10 $\mu\text{g m}^{-3}$, NO₂ 浓度低于 20 $\mu\text{g m}^{-3}$, 一直维持在较低浓度。气态污染物主要以人为排放为主, PM_{2.5} 与气态污染物同步变化特征说明在沙尘来临前的空气污染, 主要由人为排放造成的细粒子“贡献”为主。

5 结论

本文将基于北京市 2013 年 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂ 与气象资料, 研究了外来沙尘输送对北京市 PM_{2.5} 的日、小时浓度特征, 可以为沙尘天气对北京市 PM_{2.5} 浓度影响预报提供帮助, 主要结论有:

(1) 这两次沙尘过程的天气形势均表现为低压底部过境型, 影响时间低于 10 h, 同时两次沙尘过程均处于采暖季, 人为排放较大。两次沙尘影响的前一日, 2 月 27 日和 3 月 8 日, 一般表现为低压前部的特征, 以偏南风为主, 扩散条件往往不利, PM_{2.5} 日均浓度均超过 150 $\mu\text{g m}^{-3}$, 处于重度污染水平; 沙尘影响前主要以人为排放为主, PM_{2.5}/PM₁₀ 在沙尘临近前的大部分时刻大于 0.75, PM_{2.5} 占比较高, 说明在沙尘到达前治理 PM₁₀ 应控制 PM_{2.5} 直接排放及其前体物为主。PM_{2.5} 日均浓度在两次沙尘过境日有明显差异, PM_{2.5} 在 2 月 28 日沙尘影响日比沙尘前一日略有上升 8 $\mu\text{g m}^{-3}$, 3 月 9 日则比前一日大幅下降 144 $\mu\text{g m}^{-3}$, 这一差异可能是由于本地排放受扩散条件影响造成, 因此在以手工采样样品评估沙尘影响时, 建议时间分辨率精确至小时。

(2) 在两次沙尘影响过程中, PM_{2.5} 与 PM₁₀ 小时浓度在沙尘过境前均表现出缓慢上升的特征。

沙尘到京开始的 2 h 内, PM_{2.5} 与 PM₁₀ 表现出完全相反的变化特征, PM₁₀ 在两次沙尘过程中分别大幅上升 51.2% 与 202.4%, 小时浓度大于 800 $\mu\text{g m}^{-3}$, 处于重度污染水平; PM_{2.5} 则分别大幅下降 70.6% 与 50.9%; 沙尘过境时 PM_{2.5}/PM₁₀ 快速降低至 0.25 以下, PM_{2.5} 占比快速减小说明外来沙尘携带的 PM₁₀ 中主要以空气动力学当量直径 2.5~10 μm 的颗粒物为主, PM_{2.5} 含量较低。

(3) 气态污染物与 PM_{2.5} 在两次沙尘过程中变化基本一致, 沙尘到达北京后, 气态污染物开始快速下降, SO₂ 在 2 h 内下降至 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以下, NO₂ 则在 3 h 之内下降至 20 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以下。说明在这两次沙尘影响过程中, PM_{2.5} 与气态污染物比较接近, 主要受水平扩散条件的影响为主, 沙尘过境时风速往往大于 5 m s^{-1} , PM_{2.5} 容易与气态污染物一样迅速下降。

参考文献 (References)

- 北京市环境保护局. 2014. 2014 年北京市环境状况公报[EB]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/413526/413663/413717/413719/index.html>. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. 2014. Beijing Environmental Bulletin in 2014 [EB]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/413526/413663/413717/413719/index.html>.
- 陈辉, 赵琳, 赵鲁强, 等. 2012. 沙尘天气过程对北京空气质量的影响 [J]. 环境科学研究, 25 (6): 609–614. Chen Hui, Zhao Linna, Zhao Luqiang, et al. 2012. Effects of sand dust weather on the air quality of Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 25 (6): 609–614.
- 方修倚, 李令军, 谢云. 2003. 沙尘天气过境前后北京大气污染物质量浓度的变化 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 39 (3): 407–411. Fang Xiuyi, Li Lingjun, Xie Yun. 2003. Difference of air pollution during the duststorm process in Beijing [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science) (in Chinese), 39 (3): 407–411.
- 高庆先, 苏福庆, 任阵海, 等. 2002. 北京地区沙尘天气及其影响 [J]. 中国环境科学, 22 (5): 468–471. Gao Qingxian, Su Fuqing, Ren Zhenhai, et al. 2002. The dust weather of Beijing and its impact [J]. China Environmental Science (in Chinese), 22 (5): 468–471.
- 木拉提, 王佳佳, 丽娜, 等. 2010. 沙尘天气期间大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中部分元素浓度的变化特征 [J]. 环境与健康杂志, 27 (9): 755–758. Mu Lati, Wang Jiajia, Li Na, et al. 2010. Feature analysis of metal components of PM_{2.5} and PM₁₀ during sand dust weather [J]. Journal of Environment and Health (in Chinese), 27 (9): 755–758.
- 彭珍, 刘熙明, 洪钟祥, 等. 2007. 北京地区一次强沙尘暴过程的大气边界层结构和湍流通量输送特征 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 267–276. Peng Zhen, Liu Ximing, Hong Zhongxiang, et al. 2007. Characteristics of atmospheric boundary-layer structure and turbulent flux transfer during a strong dust storm weather process over Beijing area [J]. Climatic and

- Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 267–276, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2007.03.007.
- 孙业乐, 庄国顺, 袁惠, 等. 2004. 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, 49 (4): 340–346. Sun Yele, Zhuang Guoshun, Yuan Hui, et al. 2004. Characteristics and sources of 2002 super dust storm in Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 49 (7): 398–705, doi: 10.1007/BF03184268.
- 孙珍全, 邵龙义, 李慧. 2010. 沙尘期间大气颗粒 PM10 与 PM2.5 化学组分的浓度变化及来源研究 [J]. 中国粉体技术, 16 (1): 35–40. Sun Zhenquan, Shao Longyi, Li Hui. 2010. Concentration variation of Airborn particles PM10 and PM2.5 chemical composition and their sources during dust events [J]. China Powder Science and Technology (in Chinese), 16 (1): 35–40, doi: 10.3969/j.issn.1008-5548.2010.01.008.
- Wang Y, Zhuang G S, Sun Y L, et al. 2005. Water-soluble part of the aerosol in the dust storm season-evidence of the mixing between mineral and pollution aerosols [J]. Atmos. Environ., 39 (37): 7020–7029, doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.08.005.
- 徐文帅, 魏强, 冯鹏, 等. 2012. 2010 年春季沙尘天气对北京市空气质量的影响及其天气类型分析 [J]. 中国环境监测, 28 (6): 19–26. Xu Wenshuai, Wei Qiang, Feng Peng, et al. 2012. The effects of dust weather on air quality and its synoptic type in spring 2010 of Beijing [J]. Environmental Monitoring in China (in Chinese), 28 (6): 19–26.
- 徐文帅, 李云婷, 孙瑞雯, 等. 2014. 典型沙尘回流天气过程对北京市空气质量影响的特征分析 [J]. 环境科学学报, 34 (2): 297–302. Xu Wenshuai, Li Yunting, Sun Ruiwen, et al. 2014. Impact characteristics of a typical dust backflow weather on the air quality in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 34 (2): 297–302.
- 尹晓惠, 时少英, 张明英, 等. 2007. 北京沙尘天气的变化特征及其沙尘源地分析 [J]. 高原气象, 26 (5): 1039–1044. Yin Xiaohui, Shi Shaoying, Zhang Mingying, et al. 2007. Change characteristic of Beijing dust weather and its sand-dust source areas [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (5): 1039–1044.
- 张仁健, 王明星, 浦一芬, 等. 2000. 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, 5 (3): 259–266. Zhang Renjian, Wang Mingxing, Pu Yifen, et al. 2000. Analysis on the chemical and physical properties of “2000.4.6” super dust storm in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (3): 259–266, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2000.03.004.
- 张仁健, 徐永福, 韩志伟. 2003. ACE-Asia 期间北京 PM2.5 的化学特征及其来源分析 [J]. 科学通报, 48 (7): 730–733. Zhang Renjian, Xu Yongfu, Han Zhiwei. 2003. Inorganic chemical composition and source signature of PM2.5 in Beijing during ACE-Asia period [J]. Chinese Science Bulletin, 48 (10): 1002–1005, doi: 10.1007/BF03184216.
- Zhang R J, Fu C B, Han Z W, et al. 2008. Characteristics of elemental composition of PM2.5 in the spring period at Tongyu in the semi-arid region of Northeast China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 25 (6): 922–931, doi: 10.1007/s00376-008-0922-7.
- 张志刚, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 2009. 沙尘天气对北京大气重污染影响特征分析 [J]. 环境科学研究, 22 (3): 309–314. Zhang Zhigang, Jiao Haiyan, Bi Baogui, et al. 2009. Analysis of the heavy polluting effects of sand dust weather in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 22 (3): 309–314.
- 庄国顺, 郭敬华, 袁惠, 等. 2001. 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, 46 (3): 191–197. Zhuang Guoshun, Guo Jinghua, Yuan Hui, et al. 2001. The compositions, sources, and size distribution of the dust storm from China in spring of 2000 and its impact on the global environment [J]. Chinese Science Bulletin, 46 (11): 895–900, doi: 10.1007/BF02900460.