

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0752

王占山, 李云婷, 孙峰, 等. 2016. 2015 年 1 月下旬北京市大气污染过程成因分析[J]. 环境科学学报, 36(7): 2324-2331

Wang Z S, Li Y T, Sun F, et al. 2016. Formation mechanism of air pollution episodes in Beijing in late January 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(7): 2324-2331

2015 年 1 月下旬北京市大气污染过程成因分析

王占山¹, 李云婷¹, 孙峰¹, 张大伟^{1,*}, 陈添², 邱启鸿¹, 董欣¹, 孙瑞雯¹,
杨妍妍¹, 闫贺¹

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 100044

收稿日期: 2015-09-15 修回日期: 2015-10-23 录用日期: 2015-11-17

摘要: 采用地面观测和数值模拟相结合的方式, 对 2015 年 1 月下旬北京市两次 PM_{2.5} 污染过程进行分析。研究表明, 在第 1 次过程中 PM_{2.5} 浓度经过 3 个抬升阶段达到峰值, 过程前期区域传输的作用明显, 随后区域传输和本地污染积累、化学反应共同加重了污染的程度; 3 个浓度抬升阶段中均出现过 PM_{2.5} 浓度“跃升式”增长, 且污染水平越重, 浓度跃升的幅度越大。第 2 次过程是一次典型的静风、高湿度下的 PM_{2.5} 持续性增长过程, 主要是本地污染物积累和发生化学反应二次生成导致的。大气氧化性分析和 SOR、NOR 分析均验证了对两次污染过程特征和成因的推断。数值模拟结果表明, 第 1 次污染过程中区域传输对不同站点 PM_{2.5} 的贡献率在 15.2%~68.7% 之间; 第 2 次过程区域传输的贡献率在 12.8%~46.3% 之间。

关键词: PM_{2.5}; 污染事件; 水溶性离子; 区域传输; 数值模拟

文章编号: 0253-2468(2016)07-2324-08 中图分类号: X513 文献标识码: A

Formation mechanism of air pollution episodes in Beijing in late January 2015

WANG Zhanshan¹, LI Yunting¹, SUN Feng¹, ZHANG Dawei^{1,*}, CHEN Tian², QIU Qihong¹, DONG Xin¹, SUN Ruiwen¹, YANG Yanyan¹, YAN He¹

1. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048

2. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau, Beijing 100044

Received 15 September 2015; received in revised form 23 October 2015; accepted 17 November 2015

Abstract: Two PM_{2.5} pollution episodes in Beijing in late January 2015 were analyzed through ground-based observation and numerical simulation. The results showed that concentrations of PM_{2.5} reached a peak after three stages of increasing concentration in the first pollution episode. Regional transport had a significant impact on PM_{2.5} in Beijing in the early stage of this episode. Subsequently, regional transport and accumulation, as well as chemical reaction of local pollutant emissions, aggravated this pollution episode. A surge in PM_{2.5} concentrations occurred in all three stages of increasing concentration, and the surge was more significant when the PM_{2.5} concentration was higher. The second pollution episode was a typical continuous increase of PM_{2.5} concentrations in calm wind and high humidity conditions, which was mainly caused by the accumulation of local pollutant emissions and the occurrence of chemical reactions. This was verified by the analysis of O_x, SOR, and NOR. The results of the numerical simulation showed that regional transport contributed to 15.2%~68.7% of PM_{2.5} at four sites during the first pollution episode, and 12.8%~46.3% during the second pollution episode.

Keywords: PM_{2.5}; air pollution episode; water-soluble ions; regional transport; numerical simulation

基金项目: 环保公益性行业科研专项 (No.201409005); 国家科技支撑计划课题 (No.2014BAC23B03)

Supported by the Commonwealth Project of the Ministry of Environmental Protection (No.201409005) and the National Key Technology R&D Program (No.2014BAC23B03)

作者简介: 王占山 (1987—), 男, 工程师, E-mail: 18701650609@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: zhangdawei@bjmemc.com.cn

Biography: WANG Zhanshan (1987—), male, engineer, E-mail: 18701650609@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: zhangdawei@bjmemc.com.cn

1 引言 (Introduction)

大气污染天气的发生会影响公共安全、农业生产、大气能见度和人体健康,甚至影响全球的气候变化(Li *et al.*, 2011).1980 年以来,美国和欧洲实施了严格的污染物排放控制政策,大气污染天数逐年降低(Vineis *et al.*, 2006; Matus *et al.*, 2008),而我国由于社会经济的快速发展和城市化进程的加快,大部分地区年均大气污染天数明显增加(李令军等, 2012).北京市西靠太行山,北依燕山,山脊连成平均海拔 1000 m 左右的弧形屏障,地形呈簸箕状,地理条件不利于污染物扩散;同时北京市城市规模较大,人口超过 2000 万人,能源消耗密集,大气污染物排放强度相对集中;另外北京市还会受到周边区域特别是污染水平较高的南部地区污染物输送的影响.因此一旦遇到持续性不利气象条件,北京市空气质量随之转差,并可能出现大气污染过程(李德平等, 2010;王占山等, 2015a).

2013 年 1 月 1 日,《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)正式实施,标准中增设了 $PM_{2.5}$ 浓度限值.根据北京市环境保护监测中心发布的北京市每日空气质量数据,2013 年和 2014 年空气质量超标日(日均浓度超过国家二级标准限值)中 $PM_{2.5}$ 占首要污染物的比例均超过 60%,因此治理 $PM_{2.5}$ 污染成为北京市大气污染防治的关键之一.特别是在冬季,由于采暖燃煤造成北京市及周边地区 $PM_{2.5}$ 及其前体物的排放量增加,在不利的天气条件下更容易发生 $PM_{2.5}$ 污染过程(王占山等, 2015b).孙峰等(2014)对 2013 年 1 月份北京市 $PM_{2.5}$ 污染过程进行了分析,发现该次污染过程是稳定气象条件下导致的局地污染物积累,再叠加华北地区区域性污染的影响共同造成的.张小曳等(2013)分析了 $PM_{2.5}$ 污染天气与气溶胶的联系、维持机制和污染构成,发现新粒子形成和老化阶段均有有机气溶胶的贡献,与有机物混合后的气溶胶潮解点提前,吸湿增长因子变小.异常的静稳天气和居高的气溶胶浓度共同造成了 2013 年 1 月 6—16 日我国中东部大范围的重污染天气.王自发等(2014)对 2013 年 1 月我国中东部地区 $PM_{2.5}$ 污染过程进行了数值模拟,发现静稳天气下京津冀地区仍旧存在显著的区域输送,并直接造成京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度累积;来自区域外的跨城市群输送对京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度贡献为 20%~35%,区域内输送的贡献为 26%~35%.王跃思等(2014)同

样对 2013 年 1 月份我国中东部地区的 $PM_{2.5}$ 污染过程进行了分析,结果表明,天气系统弱、强冷空气活动少和极其不利于污染物扩散的局地气象条件及地理位置是造成本次强霾污染形成的外部条件;一次排放的气态污染物向颗粒态的快速转化,是该次强霾污染“爆发性”和“持续性”的内部促发因子.

2015 年 1 月下旬,北京市发生了两次相邻的 $PM_{2.5}$ 污染过程,其中 1 月 23 日和 25 日两天北京市日均 $PM_{2.5}$ 浓度分别达到五级重度污染和四级中度污染的级别.之前的研究多重点关注北京市某一个重污染过程或同一类型的重污染过程,本研究对污染成因有显著差异的两次相邻的 $PM_{2.5}$ 污染过程进行分析,探讨其气象条件、 $PM_{2.5}$ 浓度演变规律、 $PM_{2.5}$ 水溶性离子组分、大气氧化性和区域传输贡献等污染特征,以期北京市大气污染防治提供科学依据.

2 材料与方 法 (Materials and methods)

2.1 采样地点和观测仪器

目前,北京市环保局对社会实时发布 35 个自动空气质量监测子站的空气质量,选择其中的榆堡站(区域传输监控站)、良乡站(南部郊区监测站)、天坛站(城区监测站)和昌平站(北部郊区监测站)进行分析.在线 $PM_{2.5}$ 化学组分分析仪安装在北京市环境保护监测中心 7 楼楼顶;地面气象观测数据来自北京市观象台,各监测点位置见图 1.自动监测站内使用 Thermo Fisher 1405F 监测仪、Thermo Fisher 49C 紫外光度法分析仪、Thermo Fisher 42C 化学发光 $NO-NO_2-NO_x$ 分析仪和 Thermo Fisher 43i 脉冲紫外荧光法分析仪分别对 $PM_{2.5}$ 、 O_3 、 NO_2 和 SO_2 进行监测.各监测仪器均有校准仪参照国家标准《环境空气气态污染物(SO_2 、 NO_2 、 O_3 、CO)连续自动监测系统技术要求及检测方法》(HJ 654—2013)和《环境空气颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)连续自动监测系统技术要求及检测方法》(HJ 653—2013)定期校准,保证监测数据的准确性和有效性. $PM_{2.5}$ 水溶性离子分析仪采用美国 Thermo Fisher 生产的 URG 9000S 阴阳离子在线监测仪.使用环境保护部标准样品研究所提供的标准样品对仪器进行五点校准,工作曲线相关系数达到 99% 以上;平行样品至少占分析样品总数的 10%. $PM_{2.5}$ 、 O_3 、 NO_2 和 SO_2 监测仪输出的 5 min 数据,根据每 h 内 5 min 数据的算术平均值求得小时浓度;水溶性离子组分在线监测仪输出的为小时数据.本研究中使用的均为小时数据.

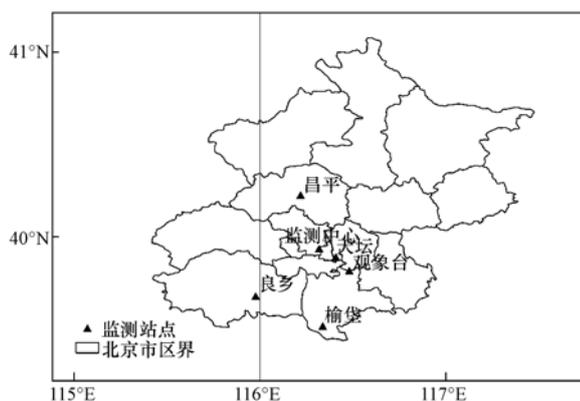


图1 各监测站点位置

Fig.1 Location of the monitoring sites

2.2 模型系统设置与验证

采用 CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extension) 模式 (Tesche *et al.*, 2006) 模拟 2015 年 1 月份北京市 $PM_{2.5}$ 浓度及其化学组成, 采用颗粒物来源解析技术 PSAT (Particulate Source Apportionment Technology) 对 $PM_{2.5}$ 进行源-受体关系分析. 该技术通过对不同区域或不同种类的污染源添加示踪物, 追踪从源排放到污染物生成的物理和化学过程, 从而得到不同源的贡献率. 模式中心网格点坐标为 $36^{\circ}N$ 、 $104^{\circ}E$. 模式采用双向嵌套技术, 水平分辨率分别为 36 km、12 km; 第 1 层网格数为 200×160 , 模拟区域覆盖东亚地区; 第 2 层网格数为 120×102 个, 覆盖京津冀、山东、河南等华北地区. 采用 WRF3.2 模拟气象场, 输入数据为 NCAR (National Center for Atmosphere Research) 和 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 的再分析逐日资料, GFS 空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 时间分辨率为 6 h. 污染源数据来自于 2006 年 INTEX-B 清单 (Zhang *et al.*, 2009), 空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. 模式第 1 次运行时模拟 5 d 初始场, 后续模拟采用前 1 次模拟输出结果作为初始场, 以消除初始条件的影响.

由北京市环境保护监测中心位置所在网格的 $PM_{2.5}$ 和 SO_4^{2-} 质量浓度的模拟值和监测值的对比 (图 2) 可以看出, 模拟值能够较好的反映监测值的变化趋势, 在时间序列上的分布具有较好的一致性. 但模拟值整体上较监测值偏低, 可能与模式的分辨率以及源清单的准确度有关. 为进一步评价模式的模拟性能, 参照文献王占山等 (2014b) 中的方法计算了模拟值和监测值的标准平均偏差 (NMB)、标准平均误差 (NME)、平均相对偏差 (MFB) 和平均相对

误差 (MFE), 结果见表 1. 评价参数的统计结果与 Boylan 等 (2006) 设定的评价颗粒物模拟结果较好的标准 ($MFB \leq 60\%$; $MFE \leq 75\%$) 较为一致. 整体来看, 模拟结果在误差可接受的范围之内, 模式系统能够满足本研究的分析.

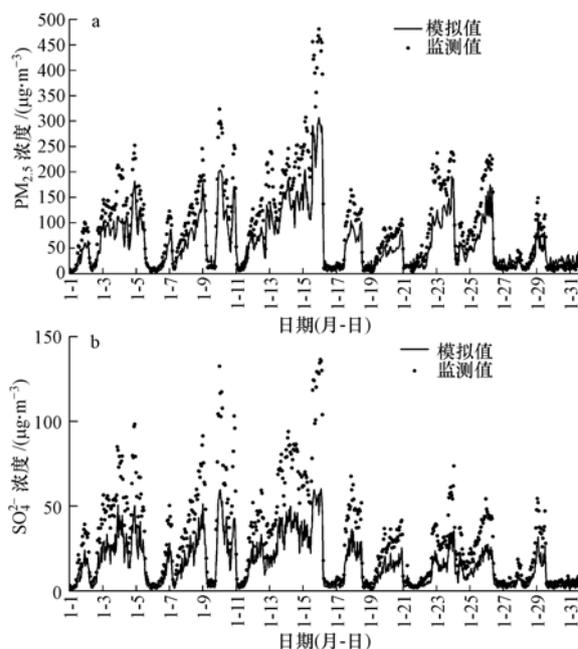
图2 2015年1月北京市环境保护监测中心站点 $PM_{2.5}$ (a) 和 SO_4^{2-} (b) 的模拟值和监测值对比Fig.2 Comparison of observed and simulated data of $PM_{2.5}$ (a) and SO_4^{2-} (b) in January 2015 in Beijing Municipal Environmental Monitoring Center site

表1 2015年1月北京市环境保护监测中心站点模拟值与监测值的统计参数

Table 1 Statistical results of observed and simulated data in January 2015 in Beijing Municipal Environmental Monitoring Center site

污染物	样本数/个	NMB	NME	MFB	MFE
SO_4^{2-}	726	-9.28%	11.24%	-10.28%	8.35%
$PM_{2.5}$	724	-10.35%	22.67%	-19.67%	24.06%

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 污染物浓度演变情况

自北京市业务化监测 $PM_{2.5}$ 以来, 1 月份历来污染程度较重. 2013 年 1 月份北京市共发生 13 d $PM_{2.5}$ 重污染过程, 重污染时 $PM_{2.5}$ 平均浓度约为 $270 \mu g \cdot m^{-3}$; 2014 年 1 月份北京市共发生 4 d $PM_{2.5}$ 重污染过程, 重污染时 $PM_{2.5}$ 平均浓度约为 $230 \mu g \cdot m^{-3}$; 2015 年 1 月份北京市共发生 5 d $PM_{2.5}$ 重污染过程,

重污染时 $PM_{2.5}$ 平均浓度约为 $220 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 近两年来 1 月份北京市 $PM_{2.5}$ 污染程度与 2013 年相比有所改善. 2015 年 1 月下旬的两次 $PM_{2.5}$ 污染过程发生在 1 月 21—26 日之间, 期间各站点 $PM_{2.5}$ 日均浓度如图 3 所示. 可以看出, 在两次污染过程的开端(1 月 21 日), 各站点 $PM_{2.5}$ 浓度尚维持较低水平; 污染最为严重的 1 月 23 日, 各站点 $PM_{2.5}$ 日均浓度均超过国家标准中重度污染的浓度限值; 污染过程的其他时间段, 也有部分站点的 $PM_{2.5}$ 日均浓度超过或接近重度污染浓度限值.

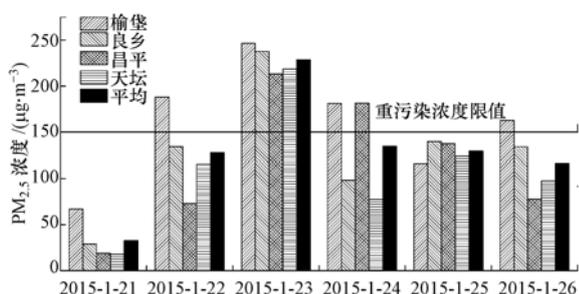


图3 2015年1月21—26日各站点 $PM_{2.5}$ 日均浓度

Fig.3 Daily average concentrations of $PM_{2.5}$ in the monitoring sites during January 21—26, 2015

将这两次污染过程分为 4 个阶段(S1—S4), 如图 4 所示. 第 1 次污染过程包括 S1、S2 和 S3, 第 2 次污染过程即为 S4. S1 前期北京市受较强偏北风控制, 相对湿度较低, 各污染物浓度处于较低水平. S1 后期北京市主导风向转为风力较大的西南风, 相对湿度明显上升, 随之各污染物浓度迅速升高. 1 月 21 日 17:00 时榆堡站 SO_2 浓度为 $2.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 到 22 日 01:00 时已经达到 $124.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (中间数据由于仪器故障缺失), 其他站 SO_2 浓度增速明显小于榆堡站. 各站点 NO_2 浓度变化趋势较为接近, 在 1 月 21 日夜间升至 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 随后保持平稳. 榆堡站 $PM_{2.5}$ 浓度由 1 月 21 日 18:00 的 $11.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 跃升至 19:00 的 $107.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 1 h 之内增长了近 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 良乡站、天坛站和昌平站 $PM_{2.5}$ 浓度分别在 1 月 22 日 03:00、05:00 和 09:00 达到第 1 个峰值. 榆堡站 $PM_{2.5}$ 浓度跃升时, 其前体物浓度仍处于相对较低水平, 发生化学反应造成该现象的可能性较小. 因此, S1 中榆堡站 SO_2 和 $PM_{2.5}$ 浓度的“跃升式”增长, 以及从南到北的 4 个监测站浓度峰值出现时间的先后顺序, 均体现了明显的区域传输的影响. S1 是第 1 个 $PM_{2.5}$ 污染过程第 1 个浓度抬升阶段, S1 过后榆堡站 $PM_{2.5}$ 升至 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其他 3 个站

$PM_{2.5}$ 浓度也接近 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

S2 中北京市主导风向仍为弱偏南风, 部分时段出现静风(风速小于 $0.5 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); 相对湿度略高于 S1. 榆堡站 SO_2 仍保持较高浓度, 最高时接近 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 明显高于其他站点且波动剧烈; 各站点 NO_2 浓度在 S2 过后升至 $110 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右. $PM_{2.5}$ 浓度继续上升, 榆堡、良乡、天坛和昌平站浓度峰值分别在 1 月 22 日 20:00 和 1 月 23 日 02:00、03:00、10:00 出现, 同样表现出区域传输的特征. 榆堡站 $PM_{2.5}$ 出现峰值时, 浓度由 $270.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 升至 $428.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 1 h 内浓度跃升超过 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 考虑到此时较高的前体物浓度以及边界层高度降低等不利于污染物扩散的条件, 该现象是由区域传输和本地排放、积累、反应共同造成的. S2 是第 1 个污染过程的第 2 个浓度抬升阶段, S2 过后 4 个站点 $PM_{2.5}$ 浓度均达到 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右.

S3 前期气象条件与 S2 类似, 各污染物浓度均达到这次污染过程的最高值. SO_2 峰值浓度最高的仍为榆堡站, NO_2 峰值浓度最高的为天坛站, 体现了城区机动车排放对 NO_2 浓度的影响. 4 个站点 $PM_{2.5}$ 浓度峰值出现的时间较为接近, 也没有表现出自南向北依次滞后的特征. 另外, 各站点 $PM_{2.5}$ 峰值出现时间滞后于前体物 SO_2 和 NO_2 峰值出现时间, 体现了本地化学生成的特征. 榆堡站 $PM_{2.5}$ 出现峰值时, 浓度由 $328.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 升至 $575.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 1 h 内浓度跃升接近 $250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 其他站点 $PM_{2.5}$ 最高浓度也达到或接近 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. S3 后期北京市受到较强的东北风的清除作用, 各污染物浓度迅速降至较低水平. S3 是第 1 个污染过程的第 3 个浓度抬升阶段和迅速清除阶段.

S4 中北京市主导风向由东北风转为西南风又转为东南风, 在海上气流影响下相对湿度明显升高, 夜间时段超过 80%. 各站点 SO_2 和 NO_2 浓度基本保持平稳; $PM_{2.5}$ 浓度则缓慢持续增长, 由 1 月 24 日 18:00 的 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右经过 28~40 h 的增长达到各自峰值. 榆堡和良乡站 $PM_{2.5}$ 浓度峰值超过 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 天坛和昌平站 $PM_{2.5}$ 浓度峰值超过 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是一次典型的高湿度下 $PM_{2.5}$ 持续性增长的污染过程. S4 后期北京市受到较强的偏北风的清除作用, 各污染物浓度迅速降至较低水平. 与第 1 次污染过程相比, 该过程中同一污染物浓度在不同站点之间并未表现出显著差异, 不同站点污染物浓度峰值出现时间也较为接近, 表明造成本次污染过程

的主要原因是本地污染物排放积累和发生化学反应二次生成.

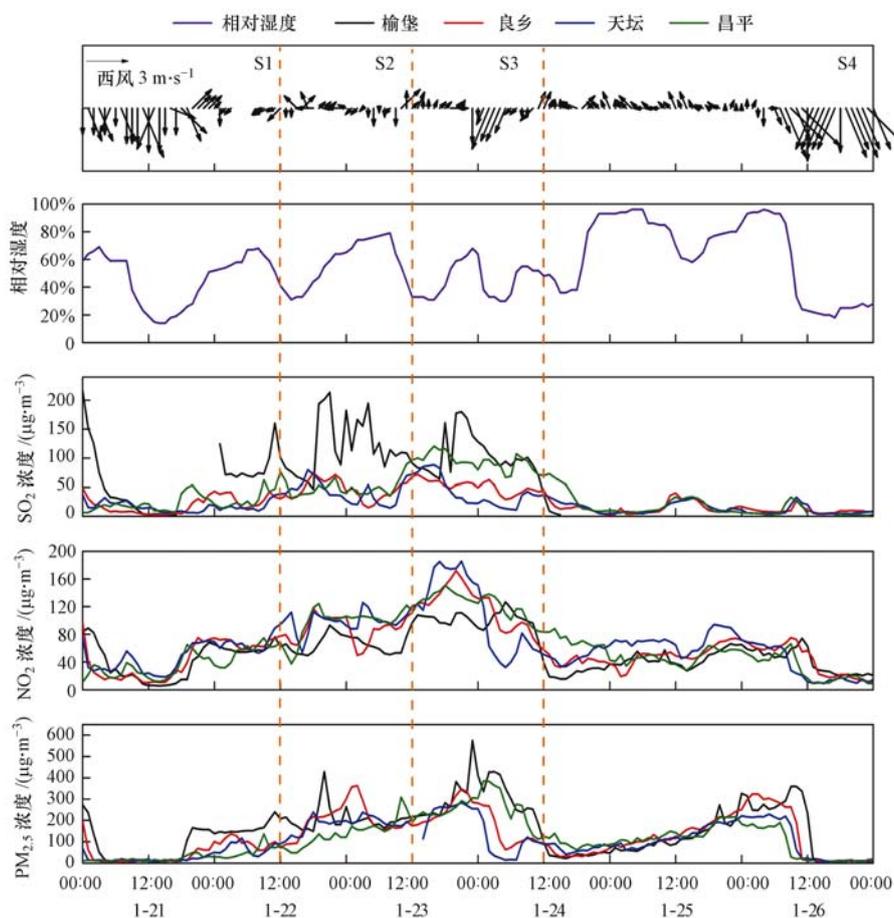


图4 2015年1月21—26日北京市气象要素和各站点污染物浓度演变情况

Fig.4 Evolutions of meteorological elements and air pollutants concentrations during January 21—26, 2015 in Beijing

因此,2015年1月下旬北京市发生的第1次 $PM_{2.5}$ 污染过程的特征为: $PM_{2.5}$ 经过3个浓度抬升阶段达到峰值,过程前期区域传输的作用明显,随后区域传输和本地污染积累、化学反应共同加重了污染的程度;过程的3个阶段中均出现过 $PM_{2.5}$ 浓度“跃升式”增长,且污染水平越重,浓度跃升的幅度越大.2015年1月下旬北京市发生的第2次 $PM_{2.5}$ 污染则是一次典型的静风、高湿度下的 $PM_{2.5}$ 持续性增长过程,主要是本地污染积累和发生化学反应二次生成导致的.

3.2 大气氧化性和 $PM_{2.5}$ 化学组分分析

大气氧化剂 $O_x(NO_2+O_3)$ 可作为评价大气氧化能力的指标(王占山等,2014a;徐敬等,2012;朱李华等,2010). SO_4^{2-} 和 NO_3^- 主要通过 SO_2 和 NO_2 等气态污染物的二次反应生成,其浓度高低与 SO_2 和 NO_2 的氧化效率有关.因此 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的生成通常用硫酸转化率SOR和氮转化率NOR来表征,其中SOR =

$[SO_4^{2-}]/([SO_4^{2-}]+[SO_2])$, $NOR = [NO_3^-]/([NO_3^-]+[NO_2])$ (Sun *et al.*, 2006).由于 $PM_{2.5}$ 水溶性离子分析仪安装在城区,因此选择城区的天坛站进行分析,见图5.同时计算了城区 $PM_{2.5}$ 、 O_x 、SOR、NOR以及 $PM_{2.5}$ 化学组分之间的相关性系数,见表2.

S1中当 $PM_{2.5}$ 浓度达到峰值时,大气氧化剂 O_x 浓度并未随之上升,SOR和NOR也没有明显升高, $PM_{2.5}$ 离子组分中只有 SO_4^{2-} 的浓度明显上升,其他的组分浓度变化不明显,这些也验证了S1阶段主要受区域传输影响.S2和S3前期,随着前体物浓度的增加和不利气象条件的持续, O_x 浓度上升,大气氧化性增强,SOR和NOR也出现明显上升, $PM_{2.5}$ 多数离子组分浓度也出现较明显上升, $PM_{2.5}$ 浓度峰值出现时刻与 O_x 、SOR、NOR以及各组分浓度峰值出现时刻较为吻合.S3后期,随着扩散条件的迅速改善, $PM_{2.5}$ 浓度迅速降低,随之大气氧化性、SOR和NOR以及各化学组分浓度均迅速降低.S4中 $PM_{2.5}$ 与 O_x

变化趋势具有较强的一致性, SOR 和 NOR 水平均高于第 1 次过程, 这也验证了第 2 次污染过程主要是本地污染积累和发生化学反应二次生成导致的。Sun 等 (2013) 的研究表明, 较高的相对湿度能促进颗粒物中二次无机离子的生成, 其中对 SO_4^{2-} 的影响最为显著。因此虽然第 2 次污染过程中 SO_2 浓度远低于第 1 次过程, 但受较高相对湿度的影响, SOR 水平却明

显高于第 1 次过程。由于湿度对 SO_4^{2-} 的影响主要是通过液相反应和改变气-粒分配比例等途径实现的, 因此本研究中数值模式对 SO_4^{2-} 的模拟偏低, 除了源清单的误差外, 还有可能与 CAMx 模式在多相氧化过程和湿清除过程的不确定性有关 (Tesche *et al.*, 2006)。

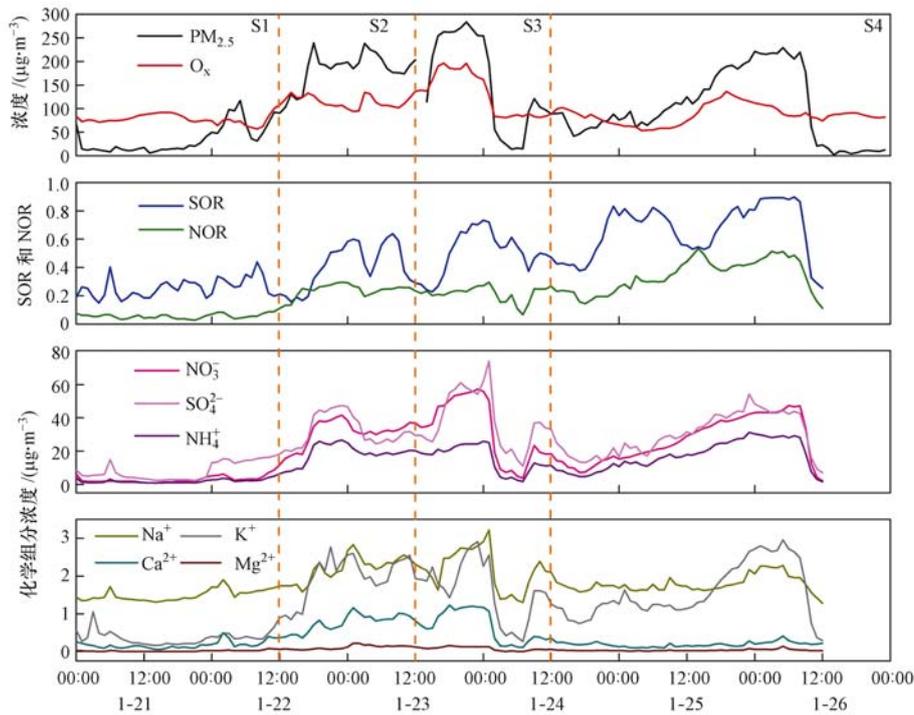


图 5 2015 年 1 月 21—26 日城区 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、SOR、NOR 以及 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分演变趋势

Fig.5 Evolutions of $\text{PM}_{2.5}$, O_3 , SOR, NOR and chemical compositions of $\text{PM}_{2.5}$ during January 21—26, 2015 in urban Beijing

表 2 城区 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、SOR、NOR 以及 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分之间的相关性系数

Table 2 Correlation coefficients among $\text{PM}_{2.5}$, O_3 , SOR, NOR and chemical compositions of $\text{PM}_{2.5}$ in urban Beijing

	$\text{PM}_{2.5}$	O_3	SOR	NOR	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
$\text{PM}_{2.5}$	1	0.650	0.498	0.684	0.934	0.888	0.906	0.85	0.887	0.727	0.848
O_3		1	-	0.234	0.588	0.543	0.518	0.57	0.545	0.708	0.702
SOR			1	0.783	0.646	0.655	0.695	0.494	0.652	-	0.283
NOR				1	0.818	0.824	0.875	0.602	0.804	0.272	0.472
NO_3^-					1	0.958	0.975	0.836	0.937	0.639	0.780
SO_4^{2-}						1	0.953	0.831	0.914	0.622	0.755
NH_4^+							1	0.815	0.955	0.574	0.748
Na^+								1	0.867	0.806	0.899
K^+									1	0.641	0.798
Ca^{2+}										1	0.920
Mg^{2+}											1

注: -表示无显著相关性, 其余置信水平均为 $\alpha=0.01$ (2-tailed)。

从相关性上来看, 二次过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与 O_3 浓度以及 SOR、NOR 均表现出显著的正相关性, 与

二次离子的相关性最高, 表明较强的大气氧化性和较高的二次离子转化率能够造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增长, 加

重污染程度。 O_3 与 SOR 未表现出显著相关性,与 NOR 表现出显著的正相关性,另外 NOR 与 NO_3^- 的正相关性强于 SOR 与 SO_4^{2-} 的正相关性,表明 NO_3^- 主要是由本地化学反应生成的,而 SO_4^{2-} 受区域传输的影响相对明显。

3.3 $PM_{2.5}$ 来源分析及污染过程期间周边城市污染状况

图 6 为 CAMx 模式计算的 2015 年 1 月 21—26 日区域传输对 4 个站点 $PM_{2.5}$ 的贡献率。可以看出,第 1 次污染过程中区域传输对不同站点 $PM_{2.5}$ 贡献率在 15.2%~68.7%之间,其中 1 月 22 日区域传输平均贡献率最大,达到 52.7%。第 2 次污染过程区域传输贡献率在 12.8%~46.3%之间,整体低于第 1 次过程,与前文分析一致,但南部站点受区域传输影响仍较为明显。同时统计了其他研究中区域传输对北京 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献率(表 3),调研表明区域传输

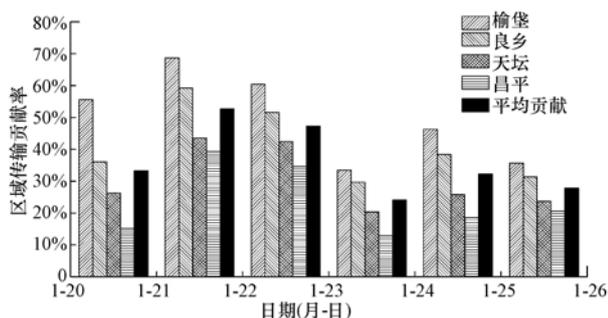


图 6 2015 年 1 月 21—26 日区域传输对 4 个站点 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献率

Fig.6 Contributions of regional transport to $PM_{2.5}$ in the four sites during 21—26 January, 2015

对北京 $PM_{2.5}$ 的贡献在 15%~70%之间。不同的模式、不同的排放源清单、不同的模式参数设置和计算方法以及不同的模拟时间和模拟区域,导致计算得出的区域贡献率也不尽相同。

表 3 区域传输对北京市 $PM_{2.5}$ 的贡献率

模式	模拟时间	贡献率	数据来源
CAMx	2013 年全年	37%	薛文博等,2014
CMAQ	2008 年 8 月	50%~70%	Street 等,2007
CMAQ	2010 年 1、4、7、10 月	42%	Lang 等,2013
CAMx	2013 年 1 月 20—24 日	66%	李璇等,2015
CMAQ	2005 年 4 月 3—7 日	15%~53%	An 等,2007

表 4 显示了两个污染过程期间环保部公布的北京及周边城市逐日 AQI 指数(环境保护部,2012)。可以看出,2015 年 1 月 21 日北京市空气质量尚处于一级优水平,而南部的保定、邯郸和衡水等城市已经达到 3 级轻度污染的水平。第 1 次污染过程期间的 1 月 22 日和 23 日,石家庄、保定和廊坊等城市 AQI 指数均高于或接近北京市指数。周边城市较重的 $PM_{2.5}$ 污染状况为区域传输提供了可能性。1 月 24 日,受西北方向冷空气的影响,北京市污染得以迅速清除,而南部地区 $PM_{2.5}$ 浓度下降较为滞后。第 2 次污染过程期间的 1 月 25 日,北京市 AQI 指数为周边城市中最高,结合当天的弱风速和高湿度等气象条件分析可得出,区域传输不是这次污染过程的主要影响因素。周边城市 AQI 指数分析结果与前文中关于两次污染成因的分析一致。

表 4 2015 年 1 月 21—26 日北京及周边城市 AQI 指数

Table 4 AQI values of Beijing and the surrounding cities during 21—26 January, 2015

城市	1 月 21 日	1 月 22 日	1 月 23 日	1 月 24 日	1 月 25 日	1 月 26 日
北京市	48	143	257	117	185	119
天津市	89	117	203	129	112	180
石家庄市	94	162	223	223	125	250
唐山市	85	147	198	155	169	182
邯郸市	106	122	216	331	152	258
保定市	139	220	332	244	176	285
廊坊市	61	175	227	165	125	165
衡水市	130	108	200	305	133	238

4 结论和建议(Conclusions and suggestions)

1)分 4 个阶段对 2015 年 1 月下旬北京市两次 $PM_{2.5}$ 污染过程进行了分析。第 1 次过程特点为:

$PM_{2.5}$ 经过 3 个浓度抬升阶段达到峰值,前期区域传输作用明显,随后区域传输和本地污染积累、反应共同加重了污染程度;过程 3 个阶段中均出现过 $PM_{2.5}$ 浓度“跃升式”增长,且污染水平越重,浓度跃

升幅度越大.第 2 次过程则是一次典型的静风、高湿度下 $PM_{2.5}$ 持续性增长过程,主要是本地污染积累和发生化学反应二次生成导致的.

2) 大气氧化性分析和 SOR、NOR 分析均验证了对两次污染过程特征的分析.相关性分析的结果表明,较强的大气氧化性和较高的二次离子转化率能够造成 $PM_{2.5}$ 浓度增长,加重污染程度; NO_3^- 主要是由本地化学反应生成的,而 SO_4^{2-} 受区域传输影响相对明显.

3) 区域传输对北京市 $PM_{2.5}$ 污染过程有十分明显的影响,因此区域联防联控是京津冀地区大气污染治理的方向.另外较强大气氧化性下前体物的二次转化也会造成 $PM_{2.5}$ 浓度升高,因此控制 NO_2 和 SO_2 等 $PM_{2.5}$ 前体物以及控制 O_3 等氧化性气体将会对 $PM_{2.5}$ 治理起到协同控制的作用.

责任作者简介: 张大伟(1978—),男,研究员,主要从事环境规划和管理研究.

参考文献(References):

- An X, Zhu T, Wang Z, *et al.* 2007. A modeling analysis of a heavy air pollution episode occurred in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(12): 3103-3114
- Boylan J W, Russell A G. 2006. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models [J]. *Atmospheric Environment*, 40(26): 4946-4959
- 环境保护部. 2012. HJ 633-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社
- Lang J, Cheng S, Li J, *et al.* 2013. A monitoring and modeling study to investigate regional transport and characteristics of $PM_{2.5}$ pollution [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(3): 943-956
- Li W J, Zhang D Z, Shao L Y, *et al.* 2011. Individual particle analysis of aerosols collected under haze and non-haze conditions at a high-elevation mountain site in the North China plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(22): 11733-11744
- 李德平, 程兴宏, 于永涛, 等. 2010. 北京地区三级以上污染日的气象影响因子初步分析[J]. *气象与环境学报*, 26(3): 7-13
- 李令军, 王英, 李金香, 等. 2012. 2000—2010 北京大气重污染研究[J]. *中国环境科学*, 01: 23-30
- 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2015. 2013 年 1 月北京市 $PM_{2.5}$ 区域来源解析[J]. *环境科学*, 04: 1148-1153
- Matus K, Yang T, Paltsev S, *et al.* 2008. Toward integrated assessment of environmental change: air pollution health effects in the USA [J]. *Climatic Change*, 88(1): 59-92
- Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* 2007. Air quality during the 2008 Beijing Olympic games [J]. *Atmospheric Environment*, 41(3): 480-492
- 孙峰, 张大伟, 孙瑞雯, 等. 2014. 北京地区冬季典型 $PM_{2.5}$ 重污染案例分析[J]. *中国环境监测*, 06: 1-12
- Sun Y, Zhuang G, Tang A, *et al.* 2006. Chemical characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in haze-fog episodes in Beijing [J]. *Environmental science & technology*, 40(10): 3148-3155
- Sun Y, Wang Z, Fu P, *et al.* 2013. The impact of relative humidity on aerosol composition and evolution processes during wintertime in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 77(3): 927-934
- Tesche T W, Morris R, Tonnesen G, *et al.* 2006. CMAQ/CAMx annual 2002 performance evaluation over the eastern US [J]. *Atmospheric Environment*, 40(26): 4906-4919
- Vineis P, Hoek G, Krzyzanowski M, *et al.* 2006. Air pollution and risk of lung cancer in a prospective study in Europe [J]. *International Journal of Cancer*, 119(1): 169-174
- 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2014. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. *中国科学: 地球科学*, (57): 14-25
- 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2014a. 北京市臭氧的时空分布特征[J]. *环境科学*, 35(12): 4446-4453
- 王占山, 潘丽波, 李云婷, 等. 2014b. 火电厂大气污染物排放标准对区域酸沉降影响的数值模拟[J]. *中国环境科学*, (9): 2420-2429
- 王占山, 张大伟, 陈添, 等. 2015a. 2013 年北京市 NO_2 的时空分布[J]. *环境科学学报*, 35(5): 1529-1536
- 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 2015b. 2014 年春节期间北京市空气质量分析[J]. *环境科学学报*, 35(2): 371-378
- 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2014. 2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策[J]. *中国科学: 地球科学*, (57): 3-13
- 徐敬, 马建中, 张小玲, 等. 2012. 北京城区夏季 O_3 化学生成过程[J]. *环境科学学报*, 32(1): 93-100
- 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 2014. 中国 $PM_{2.5}$ 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. *中国环境科学*, (6): 1361-1368
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 58(13): 1178-1187
- Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14): 5131-5153
- 朱李华, 陶俊, 张仁健, 等. 2010. 冬夏季广州城区碳气溶胶特征及其与 O_3 和气象条件的关联[J]. *环境科学学报*, 30(10): 1942-1949