

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明(789)

空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁(795)

2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌(801)

北京市夏季不同O₃和PM_{2.5}污染状况研究 王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪(807)

2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性 王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶(816)

上海典型持续性PM_{2.5}重度污染的数值模拟 常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰(825)

厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛(834)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山(847)

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康(854)

面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒(862)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊(873)

三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征 陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙(884)

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉(893)

岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕(900)

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇(910)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶(917)

涌湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿(925)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良(935)

海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军(942)

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰(950)

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇(955)

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃(963)

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩(970)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东(980)

非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究 张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博(988)

紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹(994)

类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 顾怡冰, 马邕文, 王金泉, 王艳, 关泽宇(1000)

富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛(1008)

铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷(1016)

富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇(1023)

3种低分子量有机酸对紫色土吸附非的影响 谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬(1032)

HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究 蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞(1039)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜, 汪印(1048)

煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚(1055)

硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉(1061)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀荣, 赵乐军, 田乐琪(1070)

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航(1075)

1株*Arthrobacter arilaitensis*菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义(1082)

海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津(1089)

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁(1098)

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义(1106)

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐(1114)

黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼(1121)

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽(1128)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大(1139)

砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝(1147)

以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性 赵艳辉, 赵阳国, 郭亮(1156)

废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东(1163)

淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇(1171)

《环境科学》征订启事(1138) 《环境科学》征稿简则(1155) 信息(824,853,883)

上海典型持续性 PM_{2.5} 重度污染的数值模拟

常炉予^{1,2}, 许建明^{1,2*}, 周广强^{1,2}, 吴剑斌^{1,2}, 谢英^{1,2}, 余钟奇^{1,2}, 杨辰³

(1. 上海市气象局, 上海 200030; 2. 长三角环境气象预报预警中心, 上海 200135; 3. 上海市气象灾害防御工程技术中心, 上海 200030)

摘要: 本研究针对 2013 年 1 月 23~24 日的上海 PM_{2.5} 持续重污染过程, 采用 WRF-Chem 大气化学模式以及 PM_{2.5} 质量浓度、能见度、气象要素等地面实测资料相结合的方式, 揭示了造成上海冬季 PM_{2.5} 持续性重污染的一类“天气学必要成因”, 即一次弱冷空气活动过程导致了两种不利污染天气条件——“弱气压场(静稳形势)”和“弱冷空气扩散(输送形势)”, 两者先后影响上海造成 PM_{2.5} 浓度持续上升。主要过程如下: 首先弱冷空气影响之前, 上海处在不利的局地气象扩散条件下, 受弱气压场控制 10 h 后本地 PM_{2.5} 质量浓度达到重度污染水平, 之后夜间稳定边界层(地面静风和低层逆温)使得 PM_{2.5} 重度污染维持了 7 h, 期间 PM_{2.5} 平均质量浓度为 172.4 μg·m⁻³。后期弱冷空气影响上海, 虽然改善了局地扩散条件但是同时产生了明显的周边污染物输送, 使得本地 PM_{2.5} 质量浓度升高并达到峰值(280 μg·m⁻³), 继续加重污染水平, 期间 PM_{2.5} 平均质量浓度为 213.6 μg·m⁻³。WRF-Chem 模拟结果进一步表明, 整个污染过程周边区域输送对上海 PM_{2.5} 平均贡献率为 23%, 其中两个阶段周边区域输送的平均贡献率分别为 17.2% 和 32.2%, 可见在不同的污染天气条件下周边污染源的贡献存在显著差异, 因此可以根据对污染天气类型的预判制定应急减排方案。

关键词: PM_{2.5}; 污染特征; WRF-Chem; 上海; 输送通量

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0825-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.006

A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM_{2.5} in Shanghai

CHANG Lu-yu^{1,2}, XU Jian-ming^{1,2*}, ZHOU Guang-qiang^{1,2}, WU Jian-bin^{1,2}, XIE Ying^{1,2}, YU Zhong-qi^{1,2}, YANG Chen³

(1. Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030, China; 2. Yangtze River Delta Center for Prediction and Warning of Environmental Meteorology, Shanghai 200135, China; 3. Shanghai Meteorological Disaster Protection Technology Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: To analyze the characteristics and formation mechanism of a heavy air pollution episode in Shanghai City from January 23th to January 24th, 2013, the observed data of PM_{2.5} concentration and ground meteorological data and the WRF-Chem model were collected. The analysis revealed that the synoptic necessary mechanism of the heavy air pollution episode could be characterized by the following patterns: Accompanied with weak cold front activities, the city experienced weak winds (i. e. stable atmosphere) at first and then northerly winds (i. e. pollutant transport process), causing the continuous increase and maintaining of pollutant concentration. The detailed results are shown as follows: Firstly, the stable atmosphere circulation pattern which lasted for 10 hours was not good for air pollution dispersion, as a result, local PM_{2.5} concentrations continued to increase and reached severe pollution level and the high concentrations maintained for 7 hours caused by the stable boundary layer (e. g. static surface winds and low level temperature inversion) during nighttime, and the average PM_{2.5} concentrations during the stable weather process was 172.4 μg·m⁻³. Secondly, the dispersion condition was slightly improved later on with the arrival of a weak cold front, the upstream pollution transportation occurred at the same time, leading to further increase of PM_{2.5} concentration (up to 280 μg·m⁻³), and the average PM_{2.5} concentration during the upstream transportation process was 213.6 μg·m⁻³. Numerical simulation with the WRF-Chem model showed that, average contribution of upstream transportation to local PM_{2.5} concentrations during the episode was 23%. Among them, the contribution during the stable weather and upstream transportation stage was 17.2% and 32.2%. Our results suggested that there were significant differences in the contribution of upstream transportation to the local PM_{2.5} concentration of Shanghai due to variation of weather conditions. Therefore, the government can design effective emission control strategy in advance taking pollution weather forecasting into account.

Key words: PM_{2.5}; pollution characteristics; WRF-Chem; Shanghai; transportation flux

收稿日期: 2015-07-08; 修订日期: 2015-10-08

基金项目: 华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201401); 上海市气象局科学与技术发展项目(YJ201407); 国家科技支撑计划项目(2014BAC16B05); 上海市气象局科技开发项目(QM201516, QM201517)

作者简介: 常炉予(1989~), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为大气环境数值模拟, E-mail: changluyu1989@126.com

* 通讯联系人, E-mail: metxujm@163.com

2013年1月和12月我国东部地区出现了大范围、持续性霾天气^[1],细颗粒物PM_{2.5}污染严重^[2],受到政府和公众的广泛关注。很多学者从边界层特征^[3,4]、大气传输^[5~7]、化学生成^[8]角度研究重污染天气的形成机制和传输特征,为污染预报预警、防御治理提供科学依据。

人为排放和天气条件是形成大气污染的主要原因^[9,10]。短期内由于人为排放基本稳定,污染过程的演变主要受天气条件控制^[11],在相同的排放强度下不同天气条件所造成的近地层污染物体积分数可相差几十倍乃至几百倍。如果不考虑降水清除作用,大气扩散条件和输送效应是决定本地污染水平和变化的关键因素。在不考虑输送的前提下,霾污染事件的发生主要归结为不利于扩散的天气条件,该方面的研究已达成一定共识^[12];大范围均压场的持续演变为重污染的形成提供了有利的大气条件;地面风向、风速等气象条件对空气污染物的扩散起着决定性的作用;接地或近地逆温层出现时大气层结稳定,不利于空气污染物的垂直扩散。张人禾等^[1]和王跃思等^[8]研究也有类似结论,强调了局地扩散气象条件是2013年1月强霾污染形成的关键外部条件。此外,除了不利于污染物扩散的天气条件,在经济发达的京津冀、长三角、珠三角等“城市群”,周边区域输送过程的影响也不可小觑:污染物大尺度传输可类似沙尘暴现象,呈跨境、跨省、市、地区远距离输送^[13,14]。王自发等^[2]研究发现静稳天气下京津冀地区仍旧存在显著的区域输送,直接造成2013年1月京津冀地区PM_{2.5}浓度的累积。程念亮等^[15]的研究结果还发现区域输送过程中污染物的二次转化生成同样在2013年1月北京一次重污染形成中发挥了关键作用。Xu等^[3]研究发现,本地扩散条件差和上游输送叠加是形成2013年12月上海持续性大气污染的重要条件。然而,目前对于持续性重度污染事件发生的天气学背景特征仍然缺乏系统了解,周边污染源对持续性重污染过程的贡献变化亦是目前预报工作的难点,且各城市针对重污染天气的应急减排方案比较粗略。因此从天气学角度分析持续性重污染过程的形成和演变机制、定量计算本地和周边污染源的贡献对于发布准确的预报预警和提供有效的应急减排策略都具有重要科学意义。

上海是国际化大都市,2013年度上海十大舆情事件雾霾问题排在第二位,开展污染天气的形成演变机制和科学应对研究尤为重要。2013年1月23

~25日,长三角地区出现了PM_{2.5}持续性重污染天气,其中1月24日上海空气质量达到重度污染,首要污染物为PM_{2.5},峰值浓度达到260 μg·m⁻³。期间上海城区的水平能见度普遍小于2 km,上海市气象局发布了霾橙色预警信号。本研究针对这次持续性重污染过程,综合利用地面观测和地基遥感资料分析本次污染过程的天气学特征和边界层特征,揭示形成持续性重污染的“天气学必要条件”及其在不同阶段对污染过程形成、维持和加重的影响。同时利用WRF-Chem模式进行数值模拟,定量计算在不同污染天气条件下影响上海的输送通量,通过设计敏感性试验定量计算周边污染源对本地PM_{2.5}的贡献,分析在不同污染天气条件的差异,以期上海重污染天气的预报预警和应急联动提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 地面观测资料

1.1.1 地面气象观测资料

2013年1月23~25日上海宝山站逐小时地面风速风向、气温、相对湿度、水平能见度实测数据。宝山站(121°E,31°N)是上海唯一的气候观象台,观测数据参与世界气象组织(WMO)领导的全球资料交换,代表了上海本地的气象特征。

1.1.2 地面PM_{2.5}质量浓度观测资料

2013年1月23~25日上海宝山、金山(121.35°E,30.75°N)、徐家汇(121.43°E,31.19°N)这3个站逐小时PM_{2.5}质量浓度资料,它们隶属于中国气象局大气成分观测站网。观测仪器采用Thermo Scientific 5030型颗粒物同步混合监测仪,该仪器的观测方法是国家环保部认可的β射线吸收法。5030型颗粒物同步混合监测仪应用独特的数字滤波器对光浊度计的PM_{2.5}测量进行连续的质量校准。高精度的时间分辨率和检测限,能提供精确实时连续数据的监测仪。智能湿度控制系统用一套加热装置调整湿度。加热装置有一个能直接测量采样口湿度的传感器。系统需要时才加热,这样既能有效消除湿气又保留了挥发性颗粒物,保证了测量的准确性。仪器的运维和数据质控按照文献[16]实施。为了验证观测数据的准确性,将该污染时段徐家汇站的PM_{2.5}质量浓度观测数据和上海市环境监测中心国控点上师大站(121.41°E,31.16°N)的观测数据进行对比,两者的相关系数达到0.99,均方根偏差小于5 μg·m⁻³。

1.1.3 风廓线雷达观测

风廓线雷达 (Vaisala LAP-3000) 位于上海浦东新区 (121.53°E, 31.37°N), 2007 年业务运行, 观测高度为 3 km, 采用高、低两个模态连续观测水平风向风速, 时间分辨率为 30 min. 本研究侧重边界层特征分析, 因此参照文献 [3] 采用的是“低模态”观测数据, 从 164 ~ 1 537 m 垂直共 23 层 (164、226、288、351、413、476、538、601、663、726、788、850、913、975、1 038、1 100、1 163、1 225、1 287、1 350、1 412、1 475 和 1 537 m).

1.1.4 输送通量

PM_{2.5} 输送通量表示单位时间输送通过单位面积的 PM_{2.5} 浓度^[17], 通常细颗粒物及其传输大多集中在边界层内, 故本文定义的 PM_{2.5} 输送通量是指边界层以内各层累计输送通量的平均值^[17], 计算公式如下:

$$\text{输送通量} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=\text{stc}}^{i=\text{PBL}} (c_i \cdot V_i)$$

式中, N 表示边界层以内的模式层数, c_i 表示各层 PM_{2.5} 的质量浓度, V_i 表示各层全风速.

1.2 数值模拟

1.2.1 WRF-Chem 模式

WRF-Chem (Weather Research and Forecasting Chemical model-WRF-Chem) 是由 NOAA、NCAR 等单位在天气模式 WRF (Weather Research and Forecasting) 基础上通过耦合化学模块建立的在线区域大气动力-热力-化学耦合模式^[18], 被广泛应用于空气质量预报和科研工作. 本研究采用的是 Tie 等^[19,20] 改进的 WRF-ChemV3.2 版本, 被成功应用于上海、北京等超大城市重污染天气的形成机制研究^[20-22].

1.2.2 数值方案

本研究中以 (118°E, 31.5°N) 为模式中心, 水平分辨率为 6 km, 水平网格数 316 (东西) × 397 (南北)、垂直方向 51 层, 其中 1 km 以下包含 12 层. 气象初始和边界条件采用 NCEP FNL 1° × 1° 资料 (每 6 h 更新), 化学侧边界采用全球大气化学模式 MOZART 的月平均值. 上海本地的排放清单采用 Tie 等^[20] 的研究, 上海之外采用清华大学 MEIC (Emission Inventory for China, 2010 年) 清单 (<http://www.meicmodel.org>)^[23], 其中 MEIC 包括月平均的 SO₂、NO_x、CO、NH₃、PM_{2.5}、PM_{coarse}、BC、OC 和 NMVOCs 排放总量, 涵盖农业、工业、电厂、居民和交通五类, 水平分辨率为 0.25°. 生物排放采用 MEGAN 模块在线计算. 模式采用的气相化

学机制为 RADM2, 包含 36 个物种和 158 个化学反应, 采用 Madronich 光解算法; 无机气溶胶模块采用 ISORROPIA (V1.7) 动力平衡气溶胶机制, 二次有机气溶胶采用 SORGAM^[24]. 物理方案包括 WSM 6-class 微物理方案、KF 积云参数化方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、Unified Noah 陆面方案和 YSU 边界层参数化方案等.

WRF-Chem 模式的积分时段为 2013 年 1 月 22 日 20:00 ~ 24 日 18:00, 其中前 12 h 作为模式 spin-up, 后 28 h (23 日 14:00 ~ 24 日 18:00) 的模拟结果用于数值诊断分析. 为了分析本次重污染天气的形成机制, 本研究在控制试验的基础上采用“清零”方法 (zero-out)^[17] 设计了一组敏感性试验. “清零”就是将上海本地的人为排放源关闭, 理论上模式模拟的 PM_{2.5} 浓度完全由周边输送产生, 因此通过对比控制试验和敏感性试验的差异就可获得周边输送的贡献. 虽然由于大气化学过程的非线性特征, “清零”方法并不能获得精确结果, 但是仍然被广泛应用于污染源的解析研究尤其是定量评估输送的贡献^[15,17]. 参照 Zhang 等^[17] 的研究, 在评估时将模式网格中整个上海 (除了崇明岛) 区域作为接受点 (receptor), 从而避免本地网格之间的影响.

2 结果与讨论

2.1 WRF-Chem 数值模拟结果检验

2.1.1 水平风

近地面风速风向对污染物的变化非常关键, 它们直接影响大气扩散能力和输送效应. 图 1 为

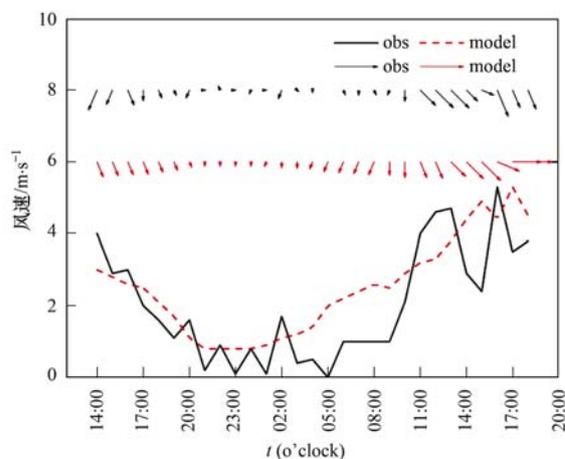


图 1 上海宝山测站 1 月 23 ~ 24 日风速、风向 (十六位风向角) 模拟值与观测值的比较

Fig. 1 Comparison between simulated and observed values of wind speed and wind direction (sixteen wind direction) during January 23-24 at Baoshan station in Shanghai

WRF-Chem 模拟 1 月 23 日 14:00 ~ 24 日 18:00 上海宝山站 10 m 风向、风速和实况对比,可见模式较好刻画了本次污染过程第一阶段风速下降、小风维持,第二阶段弱冷空气影响后风速变化的变化特征,模拟值和观测值的相关系数达到 0.77(见表 1,通过 99% 的信度检验),水平风速的均方根偏差仅为 $1.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。但模式高估了 1 月 24 日凌晨(03:00 ~ 08:00)的风速,实况风速基本小于 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,WRF-Chem 的模拟结果偏高约 $1 \sim 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,一方面是因

表 1 上海宝山测站 1 月 23 日 14:00 ~ 24 日 18:00 气象要素模拟结果的统计评估

Table 1 Statistical evaluation of meteorological elements simulation results in the period from 14:00 on January 23 to 18:00 on January 24 in Baoshan station

模拟时段	模拟平均	观测平均	相关系数	均方根偏差
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.0	2.4	0.77	1.02

2.1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度

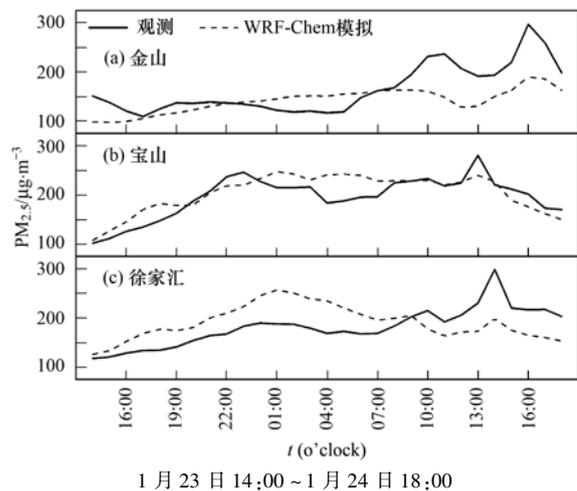
图 2 为 WRF-chem 模拟的 1 月 23 日 14:00 ~ 24 日 18:00 宝山、金山和徐家汇三站的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与观测值对比。表 2 为模拟指标评估。首先模式准确反映了 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间差异,即钢铁工业区宝山最高、中心城区徐家汇次之、郊区金山最低的特征,这和局地排放的类型、强度有关。WRF-Chem 对宝山和徐家汇的模拟结果平均偏高了 $8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $9.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对金山站的模拟结果偏低 $21.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。可能是由于模式的分辨率(6 km)要高于排放清单的分辨率(0.25°),排放清单本身以及空间分配都存在误差。总体上 WRF-Chem 模拟的 3 个站 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的均方根偏差约为 $25 \sim 40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,与 Zhang 等^[17]和 Tie 等^[20]研究中使用 WRF-Chem 的模拟精度相近。其次模式也基本模拟出了 $\text{PM}_{2.5}$ 在第一阶段上升、维持,第二阶段污染输送的变化特征,其中第二阶段,宝山、徐家汇、金山自北向南 3 个站的峰值浓度分别出现在 13:00 ($280.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、14:00 ($298.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、16:00 ($296.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),反映了冷空气自北向南扩散形成输送的过程,而且模式也较好模拟了 3 个峰值过程,但是量值要比实况偏低,可能和区域排放源误差有关。模式模拟的宝山、金山和徐家汇三站 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关系数分别为 0.81、0.61 和 0.54,略好于 Tie

表 2 上海宝山、金山、徐家汇测站 1 月 23 日 14:00 ~ 24 日 18:00 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟结果的统计评估

Table 2 Statistical evaluation of $\text{PM}_{2.5}$ simulation results of Baoshan, Jinshan and Xujiahui station

站点	模拟平均/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	观测平均/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	相关系数	均方根偏差/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
宝山	204.0	196	0.81	25.7
金山	141.7	163.9	0.61	40
徐家汇	190.7	180.9	0.54	36.7

为模拟区域主要覆盖我国华东地区,模式侧边界的影响可能导致对冷空气强度的模拟偏差;另外夜间稳定边界层的模拟也是目前中尺度模式参数化方案的难点^[25]。由图 1 可见模式较好模拟了水平风向的变化,特别是 1 月 24 日早晨受冷空气前锋影响地面转为西向风、下午转为西北风风速明显增大的过程,说明比较准确地模拟了弱冷空气的扩散过程,为下文输送计算奠定了基础。另外模拟时段的降水量不到 0.1 mm,也与观测事实相符(图略)。



1 月 23 日 14:00 ~ 1 月 24 日 18:00

图 2 模拟和观测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对比

Fig. 2 Statistical evaluation of $\text{PM}_{2.5}$ simulation results in the period from 14:00 on January 23 to 18:00 on January 24 at Baoshan, Jinshan and Xujiahui stations

等^[16]对上海浦东、东滩站的模拟结果。

2.2 污染发生天气背景特征分析

2013 年 1 月 23 ~ 24 日,我国东部受一股弱冷空气活动过程影响,期间出现了两种典型的污染天气形势——“弱气压场(静稳形势)”和“弱冷空气扩散(输送形势)”,为当地持续性重污染的发生提供了不同的“有利条件”。1 月 23 日 14:00 冷空气前锋位于我国河套、华北、东北一线,长三角地区受

高压控制, 气压梯度小, 是典型的静稳形势场[图 3(a)]. 上海近地面为偏西风, 风速较小. 1月23日20:00冷空气向偏东方向扩散[图3(b)], 冷锋位于渤海湾至山东北部, 长三角地面气压进一步减弱, 上海位于弱高压中心附近, 地面风速很小, 水平扩散条件继续变差, 有利于本地污染物的累积. 同时1月23日20:00宝山的 TLOGP 图表明上海近地层存在明显的逆温层, 厚度约为 180 m, 低层逆温的存在进一步增强了大气层结稳定(图略). 1月24日08:00冷锋位于朝鲜至山东南部一线[图3(c)], 长三角地区受冷空气边缘影响, 地面转为北-西北风, 和前两个时刻相比冷锋附近的气压梯度明显减小, 说明冷空气强度已经显著减弱. 上海地面为西北风, 但

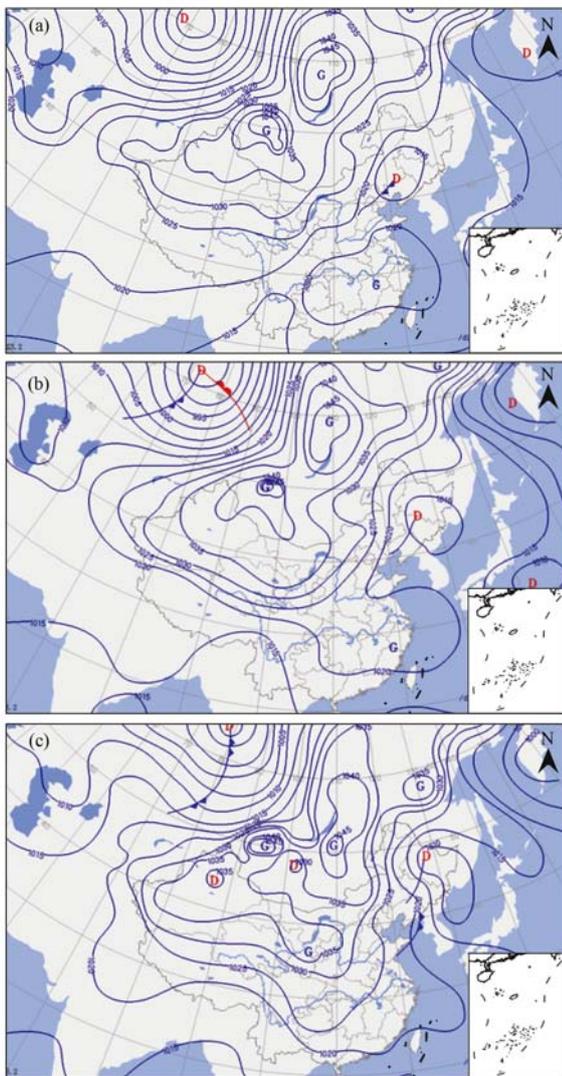
是并没有出现大风天气.

2.3 污染物与气象要素变化特征

图4显示了2013年1月23~24日上海宝山站逐小时的 $PM_{2.5}$ 质量浓度和气象要素变化. 从中可见, $PM_{2.5}$ 质量浓度的变化和地面风速风向的关系最为密切, 呈现“静稳累积”(1月23日12:00~24日05:00)和“冷空气输送”(1月24日06:00~18:00)两个阶段变化特征. 第一阶段, 从1月23日12:00开始至21:00上海的地面风速持续下降, 从 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降至静风, 对应 $PM_{2.5}$ 质量浓度快速上升, 10 h 内从 $97.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 $207.6\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 之后至1月24日05:00地面静风持续了约8 h, 平均风速仅为 $0.56\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对应 $PM_{2.5}$ 始终维持高值, 平均质量浓度为 $216\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 因此该阶段 $PM_{2.5}$ 迅速上升的主要原因是长三角地区静稳天气的维持和加强导致大气扩散能力变差, 边界层动力、热力条件都有利于 $PM_{2.5}$ 的累积. 第二阶段从1月24日06:00开始, 地面风速开始增大并转为西北风, $PM_{2.5}$ 质量浓度开始不断升高, 13:00达到峰值为 $280.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 之后逐渐下降到18:00为 $170\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 整个污染过程持续了31 h, 期间 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度为 $190\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 水平能见度基本低于2 km, 相对湿度普遍高于75%, 最低温度为 -1°C , 出现在1月24日凌晨. 可见, 西北气流将上游的污染物不断输送到上海, 是第二阶段 $PM_{2.5}$ 质量浓度升高的主要原因, 将在数值模拟部分进一步证实.

2.4 边界层风场分析

根据上海市气象局 MPL-4 脉冲激光雷达的观测(图略), 1月23~24日上海边界层最高为1 km, 可见此次污染发生在较为稳定的大气垂直层结背景下. 图5显示了风廓线雷达观测的本次污染过程(1月23日12:00~24日18:00)边界层内的风场演变. 由图5可见1月23日12:00~20:00, 受弱气压场控制, 上海500 m以下为弱的偏西-西北风, 风速小于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 并且呈现随时间减弱的趋势, 静稳形势非常明显有利于污染物累积. 1月23日夜间至1月24日凌晨, 随着高压逐渐南落, 低层风场逐渐转为西南风, 但低层风速依然较小, 说明静稳天气始终维持. 1月24日06:00, 高层800 m以上的西北气流明显增强, 冷空气已经影响上海, 低层也逐渐转为西北风但风速较小, 扩散条件没有明显好转, 但输送已经由西北风产生, 因此图4中 $PM_{2.5}$ 质量浓度开始上升. 低层风速在10:00以后明显增强, 输送效应和随之明显增强对应图4中 $PM_{2.5}$ 质量浓度迅速上



(a) 1月23日14:00; (b) 1月23日20:00;
(c) 1月24日08:00; 等值线间隔 2.5 hPa
图3 污染发生不同阶段海平面气压场

Fig. 3 Surface weather pattern at different stages of the pollution event

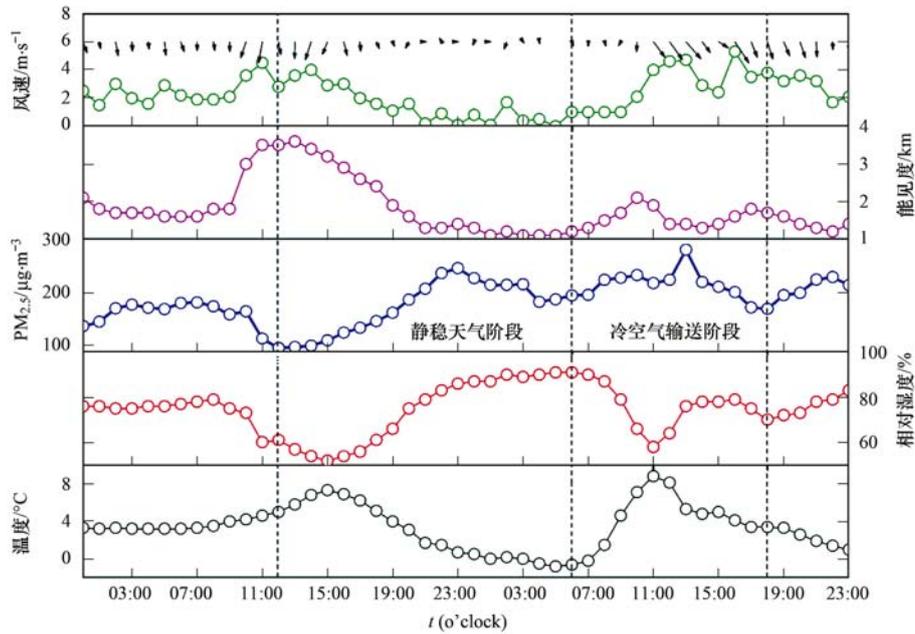


图4 上海宝山测站1月23日~24日污染期间地面气象要素

Fig. 4 Surface meteorological factors at Baoshan Station in Shanghai during 23-24 January 2013

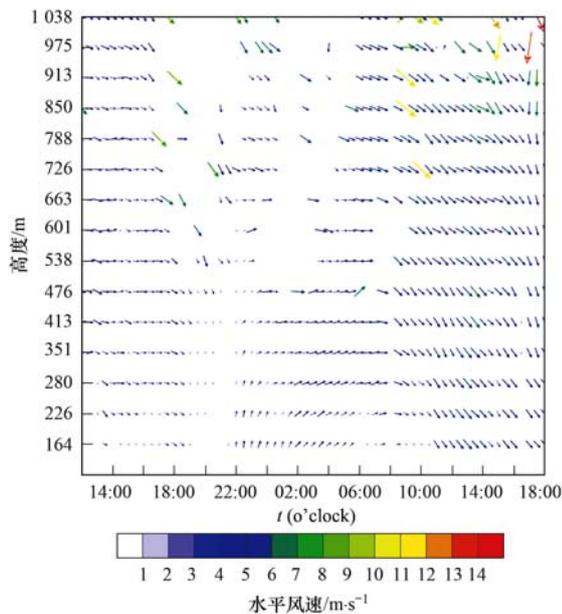


图5 上海1月23~24日内当地风廓线变化特征

Fig. 5 Wind profile variation during January 23-24 in Shanghai

升达到峰值.

2.5 污染过程输送通量和周边区域排放源对当地污染的贡献

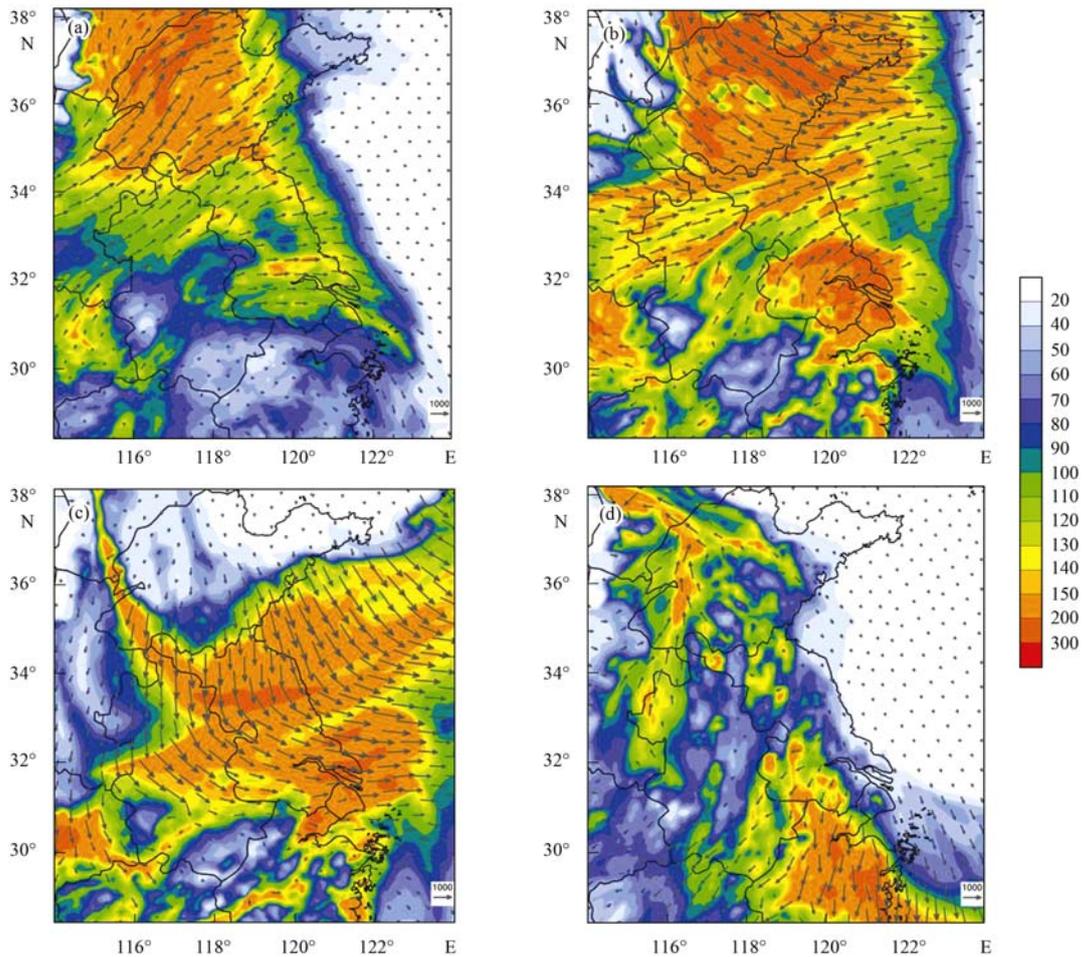
2.5.1 污染过程水平输送通量结果分析

为了分析本次污染过程的变化特征,图6给出了WRF-Chem模拟的 $PM_{2.5}$ 浓度与输送通量的空间分布特征. 1月23日14:00,长三角地区的 $PM_{2.5}$ 浓度值相对较低约为 $100 \mu g \cdot m^{-3}$,上海近地面为偏西

风,水平输送通量较低约为 $500 \sim 600 \mu g \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ [图6(a)]. 1月24日00:00,长三角地区的 $PM_{2.5}$ 浓度显著升高,上海地区超过 $200 \mu g \cdot m^{-3}$ 且高于周边,和图6(a)相比影响上海的水平输送通量依然保持低值,说明1月23日上海的水平扩散条件很差, $PM_{2.5}$ 浓度升高主要是本地累积的结果. 此时山东以北地区受冷空气影响已经转为西北风,水平输送通量明显高于长三角以南地区达到 $1500 \mu g \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$,表明来自北方的污染物随冷空气扩散输送到山东和苏北一带. 1月24日08:00,冷空气开始影响长三角地区,近地面转为西北风,上海、江苏和安徽的污染水平输送通量较1月23日明显增强,超过 $1000 \mu g \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$,可见,虽然风速增大、水平扩散条件转好,但 $PM_{2.5}$ 浓度依然维持高值约为 $200 \mu g \cdot m^{-3}$,进一步说明周边区域输送是1月24日上海维持重度污染的主要原因.

2.5.2 污染过程垂直输送通量结果分析

图7为上海地区1月23日14:00~24日18:00逐小时垂直输送通量,正值表示垂直方向有净输入通量,负值表示净输出通量. 可见,第一阶段受静稳天气控制从1月23日下午开始垂直输送通量大小迅速减小,特别是在1月23日夜间至1月24日凌晨由于静风维持,大气层结十分稳定,垂直方向的输送通量大小近乎为0,污染物没有明显的垂直方向的传输,此时上海地区 $PM_{2.5}$ 浓度超过 $200 \mu g \cdot m^{-3}$,进一步说明 $PM_{2.5}$ 浓度升高主要是本地累积的结果.



(a)1月23日14:00; (b)1月24日00:00; (c)1月24日08:00; (d)1月25日00:00;
 PM_{2.5}浓度单位(色块): $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 平均输送通量单位(箭头大小): $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$

图6 模拟所得近地面 PM_{2.5} 浓度与边界层内平均水平输送通量的分布特征

Fig. 6 Simulated surface PM_{2.5} concentrations and distribution characteristics of average horizontal transport flux within the boundary layer

第二阶段由于冷空气扩散,临近1月24日中午上海污染物出现了净输入通量(正值),下午随着冷空气的继续扩散垂直净输入通量达到最大值,且 PM_{2.5} 浓度依然维持高值约为 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明周边区域输送是1月24日上海维持重度污染的主要原因.

2.5.3 周边区域排放源对当地污染的贡献

在区域性大气污染背景下,城市间的大气污染存在相互输送效应.本地源和周边源的相对贡献随天气过程具有较大差异^[5,7].前文的观测分析和数值诊断已经表明本次上海的污染过程主要受前期区域性静稳天气、后期冷空气扩散的影响,因此本地和周边源的贡献在两个阶段必然对污染过程产生不同的贡献.图8为1月23日14:00~24日18:00逐小时敏感性试验和控制试验的比值,表示周边污染物输送对上海 PM_{2.5} 浓度的贡献比率.从中可见,第一阶段受静稳天气控制从1月23日下午开始输送

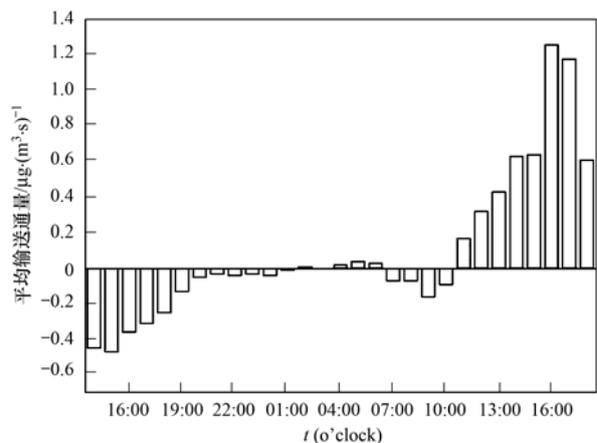


图7 此次污染过程(1月23日14:00~24日18:00)上海地区边界层内平均垂直输送通量特征

Fig. 7 Simulated average vertical transport flux within the boundary layer in Shanghai during the pollution event

的贡献迅速下降,特别是在1月23日夜間至1月24

日凌晨由于静风维持,周边污染物输送的贡献小于10%, $PM_{2.5}$ 浓度的升高主要是本地排放的污染物累积所致.第二阶段由于冷空气扩散,1月24日早晨上海近地面转为偏北风,输送贡献开始不断上升,中午已经达到25%~30%,下午随着冷空气的继续扩散14:00~15:00输送贡献达到峰值55%.整个污染过程周边区域排放源对当地污染的平均贡献约为25%,这与现有的研究结果有一定的差异但仍具有可比性(详见文献[15]的统计结果),大部分研究结果表明周边区域输送的贡献率在22%~70%之间,这种差异与排放源、城市地理位置等差异密切相关,特别需要指出的是天气形势的差异对周边区域的贡献率影响很大.如本研究中两个阶段输送的平均贡献分别为17.2%和32.2%,天气形势的差异导致输送的贡献相差了近一半.而且两个阶段的重污染时段(1月23日21:00~24日03:00,1月24日08:00~24日16:00)输送的贡献分别为11.7%和30%,进一步表明不同天气形势下污染成因的差异,由此可针对污染的不同阶段有效地设计应急减排措施.

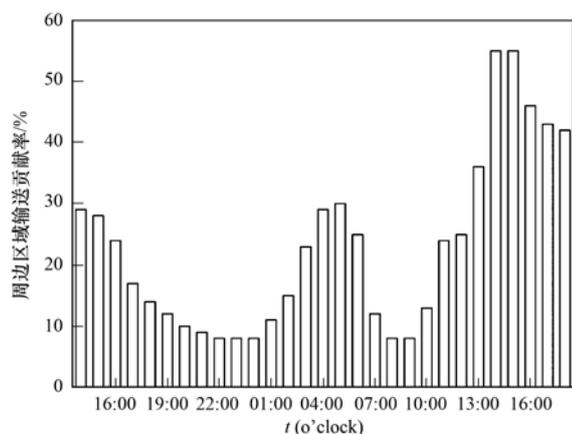


图8 此次污染过程(1月23日14:00~24日18:00)

周边源输送对当地 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献

Fig. 8 Contribution of surrounding transportation to the local $PM_{2.5}$ concentration during the pollution event

3 结论

(1)第一阶段:冷空气影响之前弱气压场控制(平均风速小于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)导致 $PM_{2.5}$ 质量浓度迅速上升,10 h后达到重度污染, $PM_{2.5}$ 质量浓度超过 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.夜间地面静风和低层逆温进一步降低扩散能力,使得重污染维持了7 h.

(2)第二阶段:弱冷空气影响虽然改善了扩散条件但是产生明显的污染输送,使得 $PM_{2.5}$ 质量浓度

继续升高并达到峰值($280 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)继续加重污染水平.静稳阶段和输送阶段的时长分别为18h和13h, $PM_{2.5}$ 平均质量浓度分别为 $172.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $213.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

(3)WRF-Chem模式数值试验表明,本次污染过程周边污染源对上海 $PM_{2.5}$ 的平均贡献为23%,其中在静稳阶段的贡献为17.2%,在输送阶段的贡献为32.2%,最大达到了55%.可见在不同的污染天气形势下本地和周边污染源的相对贡献存在显著差异,因此可以根据对污染天气类型的预判制定应急减排方案.

参考文献:

- [1] 张人禾,李强,张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(1): 27-36.
- [2] 王自发,李杰,王哲,等. 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, 2014, 44(1): 3-14.
- [3] Xu J M, Yan F X, Xie Y, et al. Impact of meteorological conditions on a nine-day particulate matter pollution event observed in December 2013, Shanghai, China[J]. Particuology, 2015, 20: 69-79.
- [4] 蒋永成,赵天良,王宏,等. 福州市 $PM_{2.5}$ 污染过程中大气边界层和区域传输研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 347-355.
- [5] Li L, Chen C H, Fu J S, et al. Air quality and emissions in the Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(4): 1621-1639.
- [6] 李莉,蔡黎琳,周敏. 2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2327-2336.
- [7] Wu J B, Xu J M, Pagowshi M, et al. Modeling study of a severe aerosol pollution event in December 2013 over Shanghai China: an application of chemical data assimilation[J]. Particuology, 2015, 20: 41-51.
- [8] 王跃思,姚利,王莉莉,等. 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, 2014, 44(1): 15-26.
- [9] 穆穆,张人禾. 应对雾霾天气:气象科学与技术大有可为[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(1): 1-2.
- [10] 李莉,陈长虹,黄成,等. 长江三角洲地区大气 O_3 和 PM_{10} 的区域污染特征模拟[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 237-245.
- [11] 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [12] 邓利群,钱骏,廖瑞雪,等. 2009年8~9月成都市颗粒物污染及其与气象条件的关系[J]. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1433-1438.
- [13] 徐祥德,周丽,周秀骥,等. 城市环境大气重污染过程周边源影响域[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2004, 34(10):

- 958-966.
- [14] Wu D W, Fung J C H, Yao T, *et al.* A study of control policy in the Pearl River Delta region by using the particulate matter source apportionment method [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 147-161.
- [15] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (4): 1154-1163.
- [16] 中国气象局综合观测司. 中国气象局大气成分观测业务规范 (试行) [M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [17] Zhang L, Wang T, Lv M Y, *et al.* On the severe haze in Beijing during January 2013: Unraveling the effects of meteorological anomalies with WRF-Chem [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **104**: 11-21.
- [18] Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, *et al.* Fully coupled "online" chemistry within the WRF model [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39** (37): 6957-6975.
- [19] Tie X X, Madronich S, Li G H, *et al.* Characterizations of Chemical Oxidants in Mexico City: a regional chemical dynamical model (WRF-Chem) Study [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41** (9): 1989-2008.
- [20] Tie X, Geng F, Guenther A, *et al.* Megacity impacts on regional ozone formation: observations and WRF-Chem modeling for the MIRAGE-Shanghai field campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **13** (11): 5655-5669.
- [21] Tie X X, Zhang Qiang, He Hui, *et al.* A budget analysis of the formation of haze in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **100**: 25-36.
- [22] Zhou G, Yang F, Geng F, *et al.* Measuring and modeling aerosol: relationship with Haze Events in Shanghai, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14** (3): 783-792.
- [23] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9** (5131): 5131-5153.
- [24] Schell B, Ackermann I, Hass H, *et al.* Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106** (D22): 28275-28293.
- [25] Chen F, Miao S G, Tewari M, *et al.* A numerical study of interactions between surface forcing and sea breeze circulations and their effects on stagnation in the greater Houston area [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116** (D12): D12105.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行