

胡柯¹ 魏巍² 钟章雄¹ 张稳定² 唐经礼¹

武汉市冬季典型重污染过程的污染特征和来源解析

摘要

2018年1月我国中部及东部地区多个省份出现持续多天的重污染天气.本研究综合分析了2018年1月18—22日武汉市发生的一次重污染过程的气象条件、污染特征及成因.监测数据显示,在此次PM_{2.5}重污染过程中,武汉市城区PM_{2.5}小时均值超过150 μg/m³.污染期间PM_{2.5}以0.5 μm以下粒子变化为主,除了不利的天气形势外,机动车、燃煤是造成重污染的重要原因,北部的河南省、东北部的安徽省以及湖北省黄冈市等省市的污染输送加重了武汉的污染程度.

关键词

重污染;特征;来源;武汉

中图分类号 X823

文献标志码 A

收稿日期 2018-08-10

资助项目 国家重点研发计划(2017YFC0212600);武汉市2013年重大科技攻关专项“武汉市大气灰霾成因与来源研究”;湖北省环保专项(2014HB06)

作者简介

胡柯,男,高级工程师,大气污染控制方向.24444916@qq.com

0 引言

大气污染防治是一项十分复杂的系统工作,特别是近年来随着经济社会的快速发展,气态前体物排放量居高不下,大气氧化性不断增强,对大气颗粒物有重要贡献的源类不断增多,给有效防控带来极大困难,严重影响了公共安全、农业生产、大气能见度和人体健康^[1].大气污染的特征已从单一的煤炭型污染特征转换为大气复合污染特征,在污染本质上表现为气象条件与污染排放之间的相互关系^[2-3].研究重污染期间污染物浓度分布特征、大气污染输送及污染源识别,对城市污染成因诊断及防治对策的制定具有重要意义^[4].目前我国大范围的区域重污染天气频发,主要研究集中在北方如京津冀地区^[5-8],包括对重污染天气下PM_{2.5}的天气特征^[9]、水溶性无机离子^[10]以及污染来源的分析等.孔君等^[11]研究了气象条件对天津一次大气重污染过程的影响,在污染源没有显著变化的情况下,气象条件是影响污染过程的关键因素;洪纲^[12]研究了石家庄市2016年秋季连续重污染过程,发现机动车直接排放的细粒子和地面扬尘是PM_{2.5}的重要来源.另外,南方如长三角^[13]和珠三角地区^[14-15]的重污染天气也有相关的研究,而对于中部地区相关研究较少,数据资料十分匮乏.

武汉地处我国中部,三面环山、一面毗邻平原,阻隔和削弱了冷空气对污染物的稀释,容易形成气流停滞区,秋冬季节易处于弱气压场控制之下,污染物和水汽容易聚集,静稳天气频繁,有利于污染物的积聚.作为经济高速发展的中部典型城市,环境问题较为突出,对此武汉市开展了一系列的空气污染的研究^[16-17]和防治工作,各项污染物浓度逐年下降,但颗粒物、二氧化氮、臭氧距离达标还有很大距离,2017年在全国74个重点城市中排第48名,排名较为靠后.随着武汉市空气质量改善工作的推进,政府部门需要为空气质量达标和精准治霾持续提供更加全面深入的技术支撑.本文将武汉市大气复合污染实验室作为观测点,着重研究了2018年1月武汉市冬季重污染过程期间污染物的变化特征,初步探讨了大气污染输送规律,识别了污染的主要传输路径和来源,希望能为武汉市改善空气质量和应对重污染天气提供重要的参考依据.

1 武汉市环境监测中心,武汉,430022

2 中科三清科技有限公司,北京,100029

1 资料来源与方法

1.1 资料来源

1) 本文所使用的颗粒物粒径分布、 $PM_{2.5}$ 组分分析以及在线源解析数据来自武汉市大气复合污染实验室(114°16'E, 30°36'N). 该站点地处汉口中心城区, 为二类功能区, 观测点距地面约 25 m, 周围为居民区, 无建筑物遮挡, 视线较为开阔, 无明显工业污染源, 监测数据一定程度上可以代表武汉城市中心城区大气污染状况水平. 观测时间为 2018 年 1 月 17—22 日, 采用小时值和日均值进行分析. 使用的仪器为国产 TH-2000 颗粒物在线分析设备、美国 Met One 公司的 BAM-1020 颗粒物监测仪以及 $PM_{2.5}$ 组分监测仪器, 包括 MARGA 在线气体及气溶胶成分监测系统(瑞士万通)、气溶胶在线质量浓度分析仪(德国 GRIMM180)、有机碳/元素碳分析仪(美国 Sunset RT-4)以及大气细颗粒物($PM_{2.5}$)在线源解析采用的单颗粒气溶胶质谱仪(广州和信 SPAM05). 实验前对所有在线设备进行流量、内外标、空白及标准膜片校准, 并定期维护. 颗粒物监测仪参照《环境空气质量自动监测技术规范》^[18]和仪器使用说明采取质量保证措施. 数据的统计处理与解释、样本异常值的判断和处理采用标准方法^[19].

2) 使用的空气质量监测数据来自于中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台每小时更新的空气质量监测数据. 其中, 污染物浓度数据由武

汉市环境空气质量国控站点均值计算得到, 并以此计算城市空气质量指数 AQI.

3) 天气图分析使用的是韩国气象厅的实况天气图. 气象要素资料(包括相对湿度、降水量、气压、能见度及风速等)由武汉中心气象台提供.

1.2 研究方法

本文综合天气形势与气象要素分析了本次武汉市重污染过程的气象条件特征, 实地监测并分析了颗粒物粒径分布、 $PM_{2.5}$ 组分以及在线源解析数据, 使用国际上广泛使用的拉格朗日混合单粒子轨道模型(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, HYSPLIT)进行后向轨迹模拟, 并采用嵌套网格空气质量预报模式系统(NAQPMS)分析此次污染过程的区域传输特征. 通过对 2018 年 1 月 18—22 日发生于武汉市的重污染个例进行细致全面的诊断分析, 以期对武汉市空气质量预报预警工作提供科学借鉴. 关于 HYSPLIT 模式、NAQPMS 模式的原理和使用方法参见文献[20-21].

2 结果与讨论

2.1 气象条件分析

1) 天气形势分析

2018 年 1 月 17—20 日, 武汉市高空 500 hPa 为平直的西风气流, 气流辐合, 地面受高压控制, 气压梯度小, 风速小(图 1), 有利于污染物的积聚和累积. 从探空图(图 1)上可见, 18 日中层湿度较大, 近地层

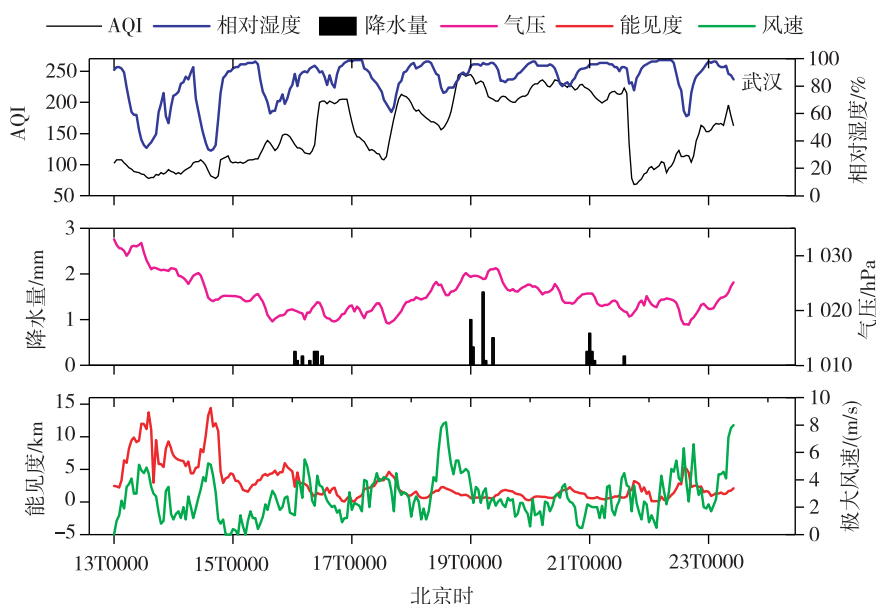


图 1 1 月 13—23 日武汉 AQI 与基本气象要素随时间的变化

Fig. 1 Variations of AQI and meteorological information during January 13th to 23rd in Wuhan

偏北风力增强,有利于北路污染物的输送及积聚.19日中层仍维持较大湿度,低层以偏东风为主,边界层湿度较大且有弱的逆温,有利于污染物的维持.20日之后受弱冷空气的影响,低层风力略增强,以东北偏东气流为主,中层湿度较大,利于污染的维持.在这种微风、高湿度、低层辐合以及较厚逆温层结的共同作用下,大气处于强静稳状态,污染物浓度逐渐升高,武汉市在20日污染物浓度达到了比较高的水平.20日夜间至21日白天,有弱冷空气自华北南下影响湖北省,在700 hPa高空图上,21日上午武汉市位于高空槽前,受西南气流影响;下午到晚上随着高空槽过境,空中逐渐转为受强冷平流影响,850和925 hPa均存在温度槽,干冷空气输入导致湿度下降,天气逐渐转晴,边界层升高,垂直扩散条件明显好转,空气质量迅速改善.

2) 气象要素分析

1月16日凌晨、19日凌晨和21日白天有弱降水,其中19日凌晨降水略大,整体降雨量在0~3 mm之间,降雨增加了近地层的相对湿度,促使污染期间均有大雾和霾的交替出现.18—19日地面气压迅速升高,地面风速明显增强,最高达到8.0 m/s,区域污染传输至武汉,导致武汉PM_{2.5}浓度的急剧上升.冷

空气持续时间较短,输入作用大于风的稀释清除,冷锋过后浓度略有降低.高压控制下武汉市以下沉气流为主,不利于污染扩散.重污染时段的风速相对较小,是本地源和输送源共同作用最强的时段,能见度维持低值,起伏变化较小.21日午后武汉AQI迅速下降,从地面气象要素来看,极大风速在16时有一个短时增大,且相对湿度下降,可能相对湿度下降配合极大风速是AQI下降的原因(图1).

2.2 空气质量演变分析

此次重污染过程是由于高浓度的PM_{2.5}污染导致,由于区域大范围长时间维持静稳天气,大气扩散条件持续不利,我国中部及东部地区多个省份出现持续多天的重污染天气.1月17日,我国中东部地区的河南、山东以及江苏等地空气质量为重度污染级别,此时,湖北省和安徽省大部分地区空气质量为轻度污染水平,武汉市为附近区域污染最严重的城市,空气质量达到了中度污染,PM_{2.5}质量浓度达到了118 μg/m³.18—20日,地面由高压后部影响转为均压场控制,在偏北风或东北风作用下,将河南安徽等地污染物向湖北等地传输,地面气压梯度小,污染在此累积(图2);另外,18日晚间开始,武汉市出现了

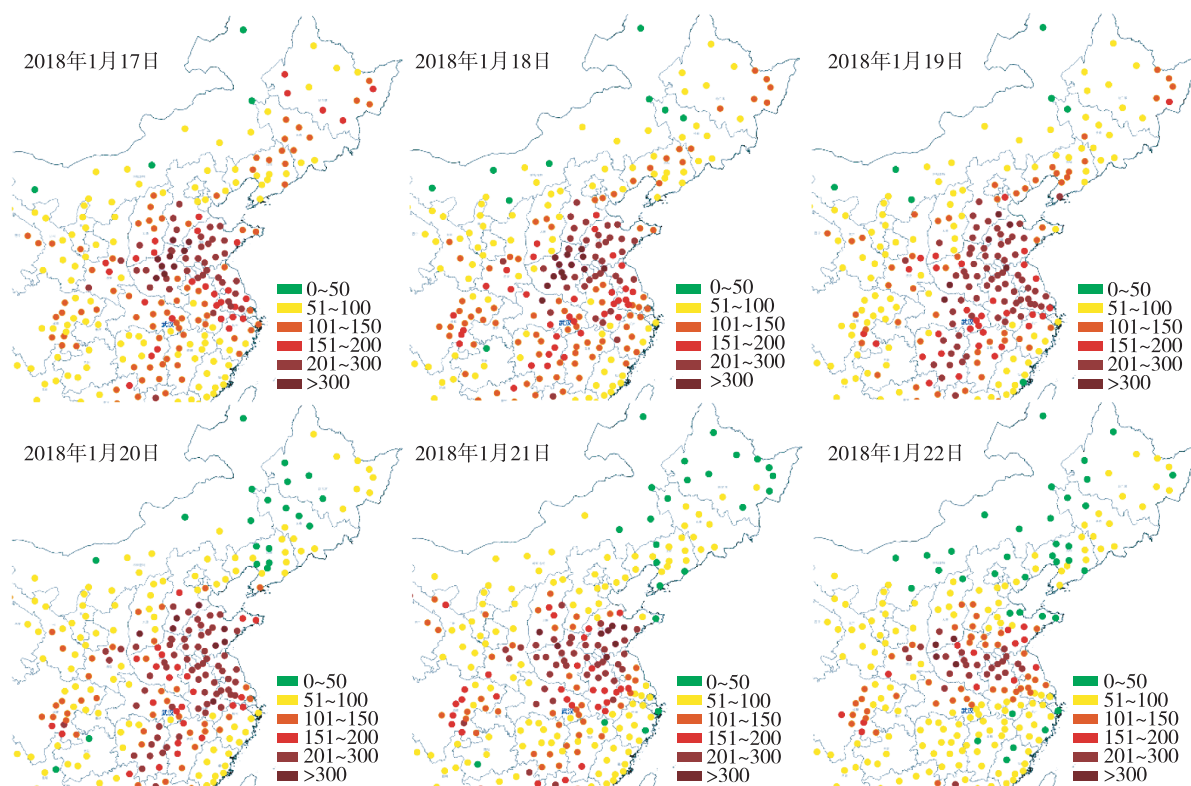


图2 2018年1月17—22日AQI空间分布情况

Fig. 2 The space distribution of AQI during January 17th to 22nd, 2018

零星降水天气,湿度增大,有利于颗粒物的二次转化.至19日,湖北省中部地区均达到了重度及以上污染水平,武汉市为重度污染($PM_{2.5}$ 质量浓度达到 $159 \mu\text{g}/\text{m}^3$),20日上午,受弱冷空气影响,河南中南部城市以及湖北中部城市如宜昌、荆门、随州等地空气质量变好,但由于地面随后一直为弱压场控制,风速较小,武汉市空气质量一直维持在重度污染水平.21日,高空槽过境,冷空气南下,区域内产生降水天气,湖北省东南部包括武汉市在内以及湖南等地重污染过程结束(图2).

本次武汉的污染过程可分为3个阶段.18日0—20时为波动上升阶段,此阶段,逆温、高湿度以及低层辐合有利于污染物的积累,18日夜间地面风速明显增强,将附近区域污染物传输至武汉市,导致武汉市 $PM_{2.5}$ 浓度急剧升高,空气质量等级达到重度污染.期间 CO 、 NO_2 浓度呈现出同步上升.18日20时—21日15时为污染持续阶段,高压控制下武汉市盛行下沉气流,地面风速小且近地面有逆温层结存在,扩散条件较差, $PM_{2.5}$ 浓度比较稳定,城区 $PM_{2.5}$ 小时均值超过 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$.21日15—22时为迅速下降阶段,随着高空槽过境,空中逐渐转为受强冷平流影响,干冷空气输入导致湿度下降,天气逐渐转晴,垂直扩散条件明显好转,空气质量迅速改善(图3).

传输期间 $PM_{2.5}$ 中碳质组分和无机盐类的占比未发生明显变化,区域传输的污染来源与本地污染来源较为接近(图4).另外,根据对 $PM_{2.5}$ 的粒径监测结果表明, $PM_{2.5}$ 与小粒径通道粒子数变化趋势一致,以 $0.5 \mu\text{m}$ 以下粒子为主,细颗粒物的浓度变化主要是由于 $PM_{2.5}$ 中细小粒子的数量变化导致.

2.3 污染来源及传输轨迹

1) 行业来源分析

污染期间武汉市 $PM_{2.5}$ 主要来源为机动车、燃煤,分别占比39.45%、31.82%.工业工艺源、二次无机源、扬尘源占比依次为11.53%、10.54%和5.65%,生物质燃烧源和其他类占比不足1%(图5).18日0时—22日9时各污染源占比随 $PM_{2.5}$ 质量浓度有一定波动,但整体波动变化幅度在1%~2%,说明此次经过长时间、长距离的区域污染传输过程,区域传输 $PM_{2.5}$ 来源与本地 $PM_{2.5}$ 来源较为一致(图6).

2) 地区来源分析

基于NAQPMS源解析结果(表1),17日,武汉本地的 $PM_{2.5}$ 占比最大,达38.39%,外来源中,黄冈市的贡献最大,贡献率达19.81%.随着污染的累积,外来源中河南地区贡献占比增大显著,18日到19日,贡献率

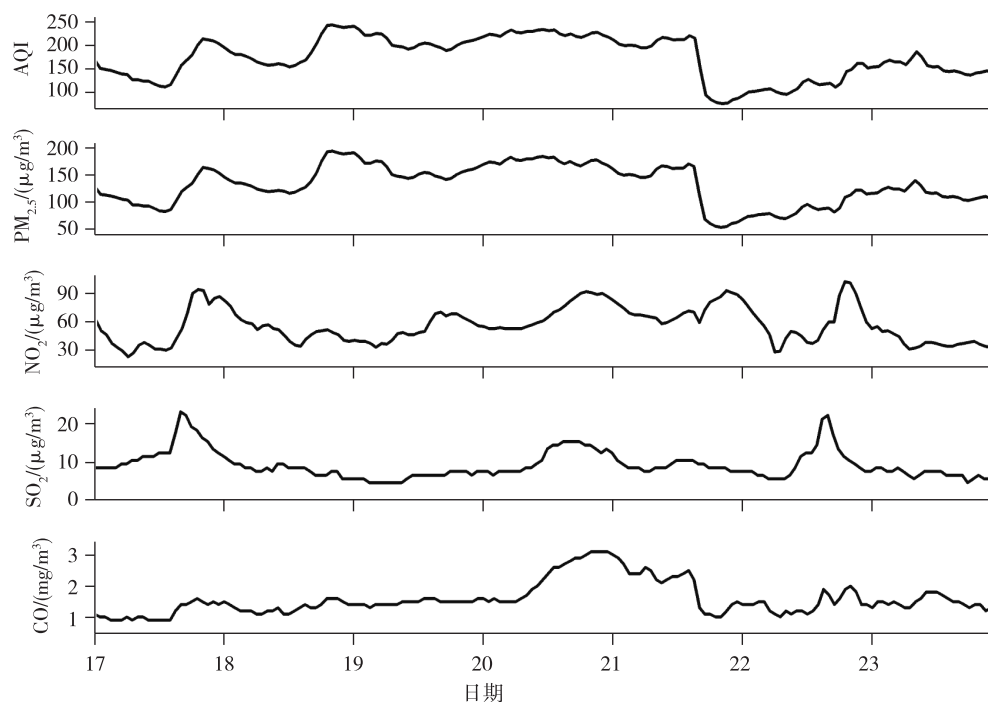


图3 2018年1月17—23日武汉市AQI及各项污染物质量浓度小时变化曲线

Fig. 3 Hourly variations of AQI and the concentration of air pollutants during January 17th to 23rd in Wuhan

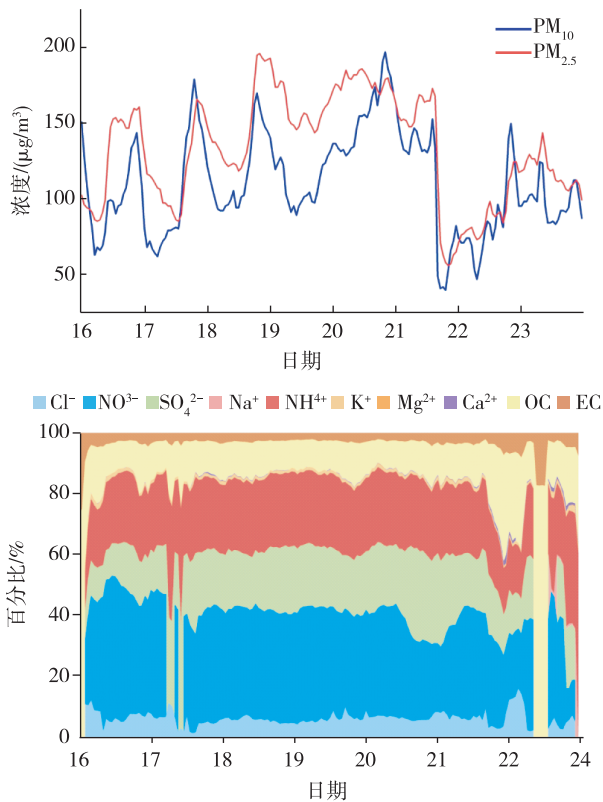


图4 武汉市城区PM₁₀与PM_{2.5}小时浓度变化曲线以及阴阳离子与OC/EC占比堆积图

Fig.4 Hourly variations of PM₁₀ with PM_{2.5} and stacking diagram of the ratio of zwitterion to OC/EC in Wuhan

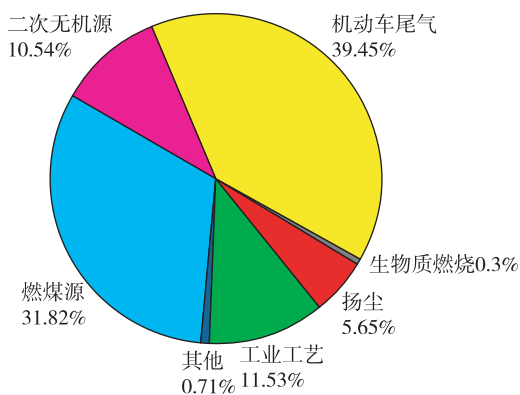


图5 2018年1月18—22日PM_{2.5}的平均来源贡献
Fig.5 Average source contribution of PM_{2.5} during January 18th to 22nd,2018

由25%上升到32%,安徽地区的贡献比例也有一定程度的增大,由17日的2%左右上升至17%左右;而武汉本地贡献有所下降,分别为21%(18日)和24%(19日)。20日,武汉本地PM_{2.5}贡献比例最大,达到35%,途经河南和安徽地区的贡献比例降低明显。整体来看,

此次武汉地区重污染主要是由于途经河南安徽等地的传输以及武汉本地排放共同作用导致。

表1 2018年1月17—20日武汉PM_{2.5}各区域占比

Table 1 Sources of PM_{2.5} concentration in Wuhan from January 17th to 20th, 2018 %

区域	1月17日	1月18日	1月19日	1月20日
武汉	38.39	20.74	24.10	34.75
孝感	6.29	4.96	4.90	10.44
黄冈	19.81	23.88	13.41	14.90
鄂州	7.29	4.37	2.86	6.60
黄石	3.11	0.75	0.19	3.97
咸宁	7.24	0.17	0.16	1.26
荆州	2.72	0.40	0.06	3.31
仙桃-潜江-天门	1.31	0.43	0.08	4.91
湖北省其他城市	0.71	0.56	0.57	0.94
河南省	9.16	24.67	32.23	9.35
安徽省	2.38	17.45	17.69	7.28
江西省	0.05	0.02	0.00	0.02
湖南省	0.37	0.13	0.01	0.19
其他地区	1.17	1.47	3.74	2.08

3) 污染传输后向轨迹

利用后向轨迹模式 HYSPLIT4, 分别计算了 17 日 18 时、18 日 18 时和 19 日 18 时武汉市上空气流的 72 h 后向输送轨迹。从图 7 气流的后向输送轨迹可以确定污染过程前期以及污染持续阶段气流的来源: 污染过程前期(图 7a), 地面和高空均受到来自河南中部郑州、开封等城市的气流影响, 在西北气流影响下(风速在 4 m/s 以上), 经许昌、漯河、驻马店、信阳市一线后, 高空地面风速均降低至较低水平, 黄冈武汉地区受到来自上游地区的传输以及本地不利气象条件的影响, 污染开始累积; 18—19 日(图 7b 和图 7c), 高空转为东北气流, 但地面始终受到来自河南南部城市的气团传输影响, 且风力加大, 在东北风影响下, 将河南等地的污染物向武汉及周边地区传输, 武汉地区地面和高空风速均较低, 污染程度加重。外来传输以及本地的污染累积, 导致了此次污染的发生。

3 结论

结合气象条件变化特征, 分析了 2018 年 1 月 18—22 日武汉市一次重污染过程的空气质量变化情况, 并通过使用在线源解析、空气质量预报来源解析以及轨迹分析等方法, 分析了此次污染过程武汉市 PM_{2.5} 的污染来源情况, 结果表明: 此次污染过程与气

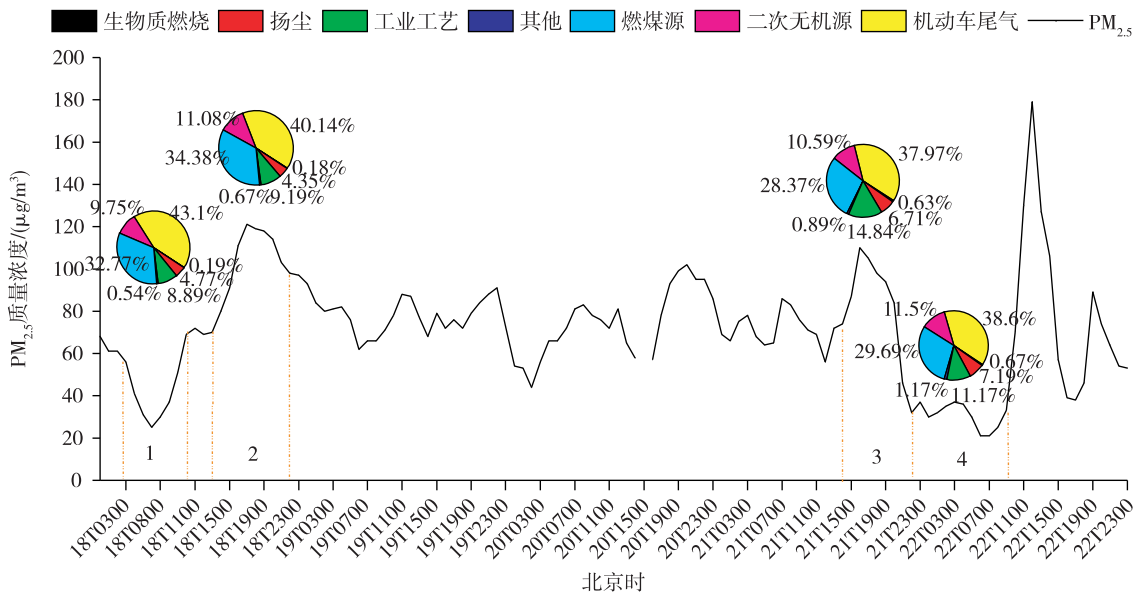


图6 PM_{2.5}质量浓度及来源随时间变化趋势

Fig. 6 The time series of the concentration and the source of PM_{2.5}



图7 2018年1月17—19日18时武汉地区后向轨迹模拟

Fig. 7 Back trajectories at 18:00 during January 17th to 19th, 2018 in Wuhan

象因素有较好的对应关系.高压控制配合逆温层结有利于本地污染物的积聚,大风加强区域间的污染物传输,两者共同造成了污染物的大量聚集,形成本次武汉地区的PM_{2.5}浓度峰值.污染期间,武汉市PM_{2.5}粒径以0.5 µm 以下为主.PM_{2.5}主要行业来源为机动车、燃煤,北部的河南省、东北部的安徽省以及湖北省黄冈市的污染传输加重了本地的污染程度.

参考文献

References

[1] Li W J, Zhang D Z, Shao L Y, et al. 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 & Physics, 2011, 11(22): 22385-22415
 [2] Chan C, Yao X. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42
 [3] Gu J, Bai Z, Li W, et al. Chemical composition of PM during winter in Tianjin, China [J]. Particuology, 2011, 9(3): 215-221
 [4] Guo S, Hu M, Zamora M L, et al. Elucidating severe urban haze formation in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(49): 17373
 [5] 刘海猛,方创琳,黄解军,等.京津冀城市群大气污染

- 的时空特征与影响因素解析[J].地理学报,2018,73(1):177-190
LIU Haimeng, FANG Chuanglin, HUANG Jiejun, et al. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 177-190
- [6] 王冠岚,薛建军,张建忠.2014年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析[J].气象与环境科学,2016,39(1):34-42
WANG Guanlan, XUE Jianjun, ZHANG Jianzhong. Analysis of spatial-temporal distribution characteristics and main cause of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(1): 34-42
- [7] 高愈霄,霍晓芹,闫慧,等.京津冀区域大气重污染过程特征初步分析[J].中国环境监测,2016,32(6):26-35
GAO Yuxiao, HUO Xiaoqin, YAN Hui, et al. Preliminary analysis on the characteristics of heavy air pollution events in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Monitoring in China, 2016, 32(6): 26-35
- [8] 张晗宇,温维,程水源,等.京津冀区域典型重污染过程与反馈效应研究[J].中国环境科学,2018,38(4):1209-1220
ZHANG Hanyu, WEN Wei, CHENG Shuiyuan, et al. Study on typical heavy pollution process and feedback effect in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2018, 38(4): 1209-1220
- [9] 江磊,李珊珊,杨文静,等.2015年12月北京市一次重污染过程中PM_{2.5}特征分析[J].环境工程,2017,35(9):64-70
JIANG Lei, LI Shanshan, YANG Wenjing, et al. Analysis on the characteristics of PM_{2.5} in a heavy air pollution episode in Beijing in December 2015[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(9): 64-70
- [10] 李星,赵文吉,熊秋林,等.北京采暖季PM_{2.5}水溶性无机离子污染特征及其影响因素[J].生态环境学报,2018,27(1):93-100
LI Xing, ZHAO Wenji, XIONG Qiulin, et al. The pollution characteristics and influencing factors of PM_{2.5} inorganic water-soluble ions in Beijing during heating season[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(1): 93-100
- [11] 孔君,李源,杨宁,等.气象条件对天津一次大气重污染过程的影响研究[J].环境与可持续发展,2018(2):140-142
KONG Jun, LI Yuan, YANG Ning, et al. Impact analysis of meteorological conditions on atmosphere environment in a typical serious pollution process in Tianjin[J]. Environment and Sustainable Development, 2018(2): 140-142
- [12] 洪纲.基于单颗粒质谱技术的石家庄市2016年秋季空气重污染成因分析[J].科学技术与工程,2018,18(9):348-354
HONG Gang. Causes analysis of heavy pollution weather in autumn of Shijiazhuang in 2016 based on the single particle mass spectrometry[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(9): 348-354
- [13] 余倩楠,徐茜,周陶冶,等.长三角地区2015年大气重污染特征及其影响因素[J].环境科学学报,2018, DOI:10.13671/j.hjkxxb.2018.0112
SHE Qiannan, XU Qian, ZHOU Taoye, et al. Characteristics of heavy air pollution episode and its impacting factors in the Yangtze River Delta during 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0112
- [14] 李庆旭,朱娟,吴锋,等.珠三角地区典型城市重污染天气案例分析[J].环境与可持续发展,2016(6):174-181
LI Qingxu, ZHU Juan, WU Feng, et al. Analysis of heavy air pollution in typical cities over Pearl River Delta[J]. Environment and Sustainable Development, 2016(6): 174-181
- [15] 王文丁,陈焕盛,吴其重,等.珠三角冬季PM_{2.5}重污染区域输送特征数值模拟研究[J].环境科学学报,2016,36(8):2741-2751
WANG Wending, CHEN Huansheng, WU Qizhong, et al. Numerical study of PM_{2.5} regional transport over Pearl River Delta during a winter heavy haze event[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8): 2741-2751
- [16] 操文祥,陈楠,田一平,等.武汉地区秋冬季清洁与重污染过程的水溶性离子特征研究[J].环境科学学报,2017,37(1):82-88
CAO Wenxiang, CHEN Nan, TIAN Yiping, et al. Characteristic analysis of water-soluble ions during clean and heavy pollution processes in autumn and winter in Wuhan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(1): 82-88
- [17] 张帆.武汉大气PM_{2.5}的化学特征及其在典型灰霾过程中的污染特征[D].武汉:武汉大学,2014
ZHANG Fan. Chemical characteristics of PM_{2.5} and haze events in Wuhan, China [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014
- [18] 环境空气质量自动监测技术规范 HJ/T 193—2005 [S].2005
Automated methods for ambient air quality monitoring HJ/T 193—2005[S].2005
- [19] 数据的统计处理和解释正态样本离群值的判断和处理 GB/T 4883—2008 [S].2008
Statistical interpretation of data detection and treatment of outliers in the normal sample GB/T 4883 - 2008 [S].2008
- [20] Fairuzi F. Penggunaan Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) untuk simulasi sebaran polutan NO₂ dan SO₂ [J]. UT-Geophysics and Meteorology, 2012
- [21] 王自发,谢付莹,王喜全,等.嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用[J].大气科学,2006,30(5):778-790
WANG Zifa, XIE Fuying, WANG Xiquan, et al. Development and application of quality prediction modeling system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 778-790

Analysis of the characteristics and sources of a typical heavy air pollution process in winter in Wuhan

HU Ke¹ WEI Wei² ZHONG Zhangxiong¹ ZHANG Wending² TANG Jingli¹

1 Wuhan Municipal Environmental Monitoring Center, Wuhan 430022

2 3Clear Technology Co.Ltd, Beijing 100029

Abstract During January of 2018, heavy air pollution episodes occurred in central and eastern China. This study comprehensively analyzed the meteorological conditions, characteristics, and formation causes of a heavy air pollution episode during January 18–22, 2018. The results showed that the hourly averaged concentration of PM_{2.5} was greater than 150 μg/m³ in Wuhan. The main change in PM_{2.5} was for particles less than 0.5 μm during the pollution process, winds. In addition to adverse weather conditions, motor vehicle and coal emissions were the most important causes of heavy air pollution, and regional transport from Henan, Anhui, Huanggang, and other cities affected Wuhan significantly.

Key words heavy air pollution; characteristic; source; Wuhan