

北京地区气象条件与区域传输对 PM_{2.5} 浓度影响研究

刘瑞琪^{1,2}, 贾海鹰^{1,2,3*}

(1. 湖南省气象服务中心, 湖南 长沙 410118; 2. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410118; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:通过采用 KZ(Kolmogorov-Zurbenko)滤波统计方法,结合 WRF/CMAQ 数值模型情景分析技术,定量分析气象条件和区域传输对北京市 PM_{2.5} 浓度的影响。结果显示:2018年7月—2019年6月,北京市 PM_{2.5} 平均质量浓度为 46.0 μg/m³,气象条件同比偏差 6.9%,外来传输平均为 43.7%。从日变化上看,外来传输在早晚高峰期间明显下降,体现出本地机动车排放贡献明显上升的特点,气象条件对 PM_{2.5} 浓度的影响主要表现为白天整体有利于污染物扩散,夜间气象条件转为偏不利的特征。2018年10月—2019年3月秋冬季期间,气象条件同比偏差 3.3%,在气象条件较为不利和区域同比反弹的情况下,北京市 PM_{2.5} 浓度持续走低,主要为源减排的效益。

关键词: PM_{2.5}; 区域输送; 气象条件; KZ 滤波方法; 北京

中图分类号: X513

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2021)05-0016-05

The Effects of Meteorological Condition and Regional Transport on PM_{2.5} Concentration in Beijing

LIU Rui-qi^{1,2}, JIA Hai-ying^{1,2,3*}

(1. Hunan Meteorological Service Center, Changsha, Hunan 410118, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction in Hunan, Changsha, Hunan 410118, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In this study, KZ (Kolmogorov-Zurbenko) filtering statistical method and numerical model scenario analysis technology (WRF/CMAQ) were used to quantitatively analyze the impacts of meteorological condition and regional transport on PM_{2.5} concentration in Beijing. The results showed that the average concentration of PM_{2.5} was 46.0 μg/m³ in Beijing from July 2018 to June 2019, it increased year-on-year by 6.9% due to the meteorological conditions, and 43.7% of which came from external transport. In terms of daily variation, the proportion of PM_{2.5} from external transport decreased significantly in the morning and evening rush hours, reflecting a obvious rising emissions from local motor vehicle. The impact of meteorological conditions on the concentration of PM_{2.5} was that the pollutants dispersed well during the day, but it was not conducive to diffusion at night. The concentration of PM_{2.5} increased year-on-year by 3.3% from October 2018 to March 2019 due to the meteorological conditions. In case of adverse meteorological conditions and regional rebound year-on-year, the concentration of PM_{2.5} in Beijing continued to fall for the benefit of source emission reduction measures.

Key words: PM_{2.5}; Regional transport; Meteorological condition; Kolmogorov-Zurbenko; Beijing

大气污染物观测浓度时间序列主要受排放源、气象条件和污染传输三重影响,包含了污染源信息和气象信息^[1-2]。当前,针对我国 PM_{2.5} 区域传输的研究主要集中在污染较重的京津冀、长三角、珠

收稿日期:2020-08-21;修订日期:2021-07-20

基金项目:国家重点研发计划大气专项课题基金资助项目(2016YFC0208900);湖南省气象局重点科研课题基金资助项目(XQKJ19A001)

作者简介:刘瑞琪(1983—),男,湖南邵阳人,工程师,硕士,主要从事环境气象研究。

*通信作者:贾海鹰 E-mail: 2106658210@qq.com

三角地区,研究时段多集中在2013年以后^[3]。Wang等^[4]用NAQPMS模型模拟研究了2013年1月我国中东部强霾污染过程,京津冀地区PM_{2.5}跨界输送贡献为20%~35%;安俊岭等^[5]利用CAMx模型模拟计算出河北省对北京市PM_{2.5}跨界输送通量为816 t/d~2 152 t/d;薛文博等^[6]用CAMx模型模拟计算出京津冀、长三角、珠三角城市群PM_{2.5}年均浓度受外省市的贡献分别为22%、37%、18%;赵晴等^[7]采用源受体分析发现近年来北京8月份PM_{2.5}区域源贡献率总体呈现上升趋势;王晓琦等^[8]采用WRF-CAMx模型发现京津冀区域PM_{2.5}和二次无机气溶胶组分外来源贡献分别为23.4%和45.5%;王燕丽等^[9]建立了京津冀13个城市的PM_{2.5}传输矩阵,京津冀区域PM_{2.5}以本地污染源贡献为主(21.49%~68.74%)。针对我国PM_{2.5}浓度气象条件影响评估研究主要集中在2013—2017年空气质量改善分析上。薛文博等^[10]分析发现气象条件变化对京津冀及周边地区PM_{2.5}年均浓度影响了-5%~5%;张小曳等^[11]发现2017年冬季京津冀和长三角区域的气象条件相较2013年分别转好约20%和30%;Zhang等^[12]指出减排是中国近年来空气质量改善的主导因素,而年际间气象条件变化影响较小。

为进一步厘清气象条件和区域传输对北京市PM_{2.5}浓度的影响,今综合采用统计学与数值模型相结合的分析方法,采用WRF/CMAQ数值情景模拟分析和KZ(Kolmogorov-Zurbenko)滤波分析的方法定量评估分析气象条件和区域污染传输与PM_{2.5}浓度改善的定量关系,以期为合理控制研究区域空气污染提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市位于我国华北平原北端,总面积16 410.54 km²,平均海拔高度43.5 m,平均气温12℃,月均气温变化范围为-4℃(1月)~26℃(7月);年累计降水量580 mm左右;平均风速为2.1 m/s,并呈现每年以-0.02 m/s速度缓慢减小的趋势;年平均日照时数在2 000 h~2 800 h之间^[13]。

1.2 数据来源

2018—2019年北京市大气污染物监测数据来

自空气质量发布平台(<http://zx.bjmemc.com.cn/>)和中国空气质量历史数据库(<https://quotsoft.net/air/>)。地面气象资料来自中国气象局数据共享服务网站(<http://data.cma.cn/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 KZ滤波统计方法

为滤除气象条件影响,需要对大气污染物浓度观测序列进行重建。Rao等^[14]于1994年提出了一种KZ(Kolmogorov-Zurbenko)滤波统计方法,KZ滤波器基于迭代移动平均,去除数据中的高频变化,最初主要应用在近地层臭氧长时间序列分析研究上。Zurbenko等^[15]于1996年调整了滑动窗口 m 的宽度。国内应用此方法评估污染趋势变化比较少,少数文献仅集中在北京、天津等臭氧研究方面^[16]。研究首先将污染物原始时间序列数据 $X(t)$ 分解为长期分量、季节分量、短期分量,以长期分量与季节分量之和 $X_b(t)$ 为基线分量。然后,将污染物长时间序列的短期分量和基线分量分别与相关性强的气象因子建立多元线性关系,计算短期分量的回归残差和基线分量的回归残差。进而将残差和进行KZ滤波,得到残差长期分量与污染物序列数据的长期分量,然后对两者进行加和处理,最终对滤除气象条件后的数据重建序列。需要说明的是,文中气象条件影响主要指气象条件同比影响,非气象条件贡献。

1.3.2 数值情景模拟分析

采用WRF-CMAQ综合空气质量模型(<http://www.cmascenter.org/>)进行评估模拟分析。CMAQ模式中心网格点坐标为E110°,N35°;模拟区域为北京及周边地区;网格分辨率为12 km;单层模拟;时间为2018—2019年。研究主要采用2017年北京市本地污染源排放清单和周边区域MEIC排放清单(<http://www.meimodel.org/>),天然源为依据气溶胶排放模型MEGAN测算结果。采用ISAM(The Integrated Source Apportionment Method)模块计算模拟网格内各区域污染物排放的源解析结果。

选取2018年我国东部6个主要城市PM_{2.5}观测数据,将模式输出结果与观测值作比较(见表1)。由表1可知,PM_{2.5}的模拟值与观测值的时间序列变化较为一致,PM_{2.5}模拟结果略微被低估。PM_{2.5}预测值与观测值的相关系数(R)在0.59~0.74之间,标准化平均偏差(NMB)在-18%~-10%之间,标准化平均误差(NME)在20%~

41%之间,平均相对偏差(MFB)在-26%~-17%之间,平均相对误差(MFE)在15%~30%之间。验证结果与USEPA预测颗粒物结果较好的标准($-60\% \leq \text{MFB} \leq 60\%$ 和 $\text{MFE} \leq 75\%$)^[17]较一致。

表1 PM_{2.5}模拟值与观测值的比较Table 1 Comparison of PM_{2.5} between simulation value and the measured value

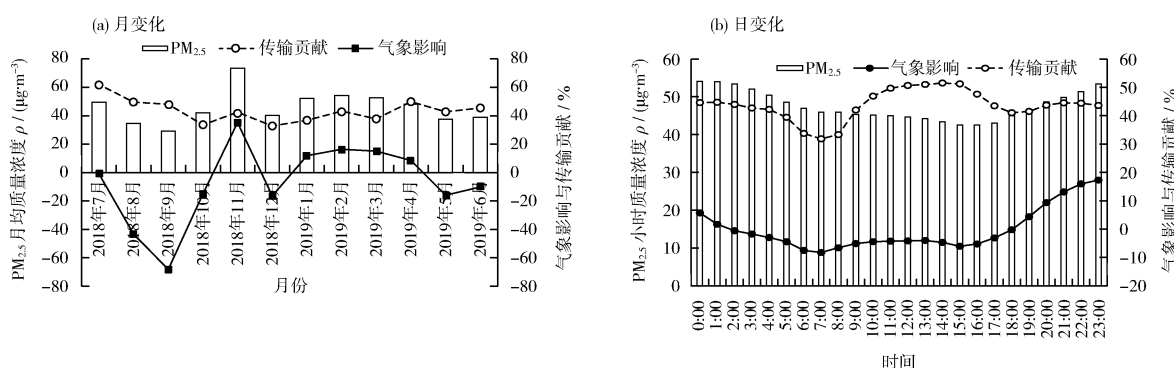
城市	观测值 $\rho/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	模拟值 $\rho/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	R	NMB /%	NME /%	MFB /%	MFE /%
北京	50.6	49.3	0.74	-16	20	-18	15
天津	51.5	51.1	0.72	-11	27	-21	26
石家庄	72.4	62.9	0.69	-17	23	-17	27
济南	53.4	49.7	0.64	-18	40	-23	28
太原	58.0	48.6	0.68	-15	38	-26	25
郑州	65.3	60.1	0.59	-10	41	-19	30

2 结果与讨论

2.1 气象条件影响与外来传输贡献时间分布特征

图1(a)(b)分别为监测期间(2018年7月—2019年6月)北京市PM_{2.5}质量浓度、气象条件影响、外来传输贡献的月变化和日变化。由图1可见,监测期间北京市PM_{2.5}平均质量浓度为46.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,气象条件同比偏差6.9%,外来传输

贡献平均为43.7%。从月变化上看,PM_{2.5}月均质量浓度在29.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~73.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,标准偏差为11.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;2018年9月PM_{2.5}月均质量浓度最低,2018年11月最高,总体呈现秋冬季高于春夏季的季节分布规律。外来传输贡献月均值在32.9%~62.1%之间,标准偏差为8.2%;外来传输贡献呈现“冬小夏大”的特征,2018年12月外来传输贡献月均值最小,2018年7月最大。其中,2018年7月,北京市空气质量相对较好,未出现重污染过程,可受夏季风影响,南部输送通道贡献较大;2018年12月,扩散条件一般,PM_{2.5}平均质量浓度为40.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,主要受到来自西南输送通道传输影响,传输贡献在33%左右,这种“冬小夏大”的外来传输贡献分布规律与Zhang等^[18]研究结果基本一致。气象条件同比变化在-68.2%~35.3%之间,呈现出“夏季有利,秋冬季偏不利”的变化趋势。夏季边界层高度较高,降水较多,垂直对流较强,整体有利于污染物的扩散;而秋冬季边界层高度较低,逆温较强,在不利的扩散条件下污染物易积累。如2018年11月,气象条件明显不利于污染物扩散,全月先后受3次不利扩散的天气过程影响,地面处于弱气压场或低压辐合系统控制中,气象条件同比恶化35.3%。

图1 监测期间北京市PM_{2.5}质量浓度、气象条件影响、外来传输贡献的月变化和日变化Fig. 1 Monthly and diurnal variation of PM_{2.5} concentration, impacts of meteorological condition and external transport in Beijing during the monitoring period

从日变化上看,外来传输贡献在31.8%~51.5%之间,中午最高,早晨时段最低。早晚高峰期间外来传输贡献明显下降,体现出本地机动车排放贡献明显上升的特点。午后外来传输贡献达到高值,一方面午后边界层高度明显增大,受区域传

输影响残留在边界层之上的污染物通过对流混合,增大了外来传输的贡献;另一方面,午后温度较高,有利于外来传输的污染物在本地进行二次转化,也提高了外来传输的比例。气象条件同比变化在-8.3%~17.3%之间,气象条件对PM_{2.5}浓度的影

响主要表现为白天整体有利于污染物扩散,夜间气象条件转为偏不利的特征。这主要由于白天特别是中午时段为一天中气温最高、相对湿度最小的时段,同时大气垂直对流得到发展,逆温层底逐渐抬升,有利于大气污染物扩散;夜间地面辐射降温迅速明显,逆温层形成,且多为贴地逆温,易造成污染物在近地层累积^[19]。

从污染过程上看,2018年7月—2019年6月期间,共发生13次轻度及以上污染过程,外来传输贡献在24.9%~65.6%之间,气象条件同比影响在25.5%~179.2%之间,且随着PM_{2.5}浓度的增大,外来传输贡献明显增大,气象条件也趋于不利。以2019年1月上旬一次区域污染过程为例,研究重污染过程期间区域传输和气象条件对北京市PM_{2.5}浓度的影响。从气象条件变化上看,1月9日起,华北地区地面高压系统逐渐减弱,区域以均压场为主,扩散条件趋于不利;11日—12日,高湿静稳,区域污染不断积累加重;13日凌晨,受西北部高压增强影响,北京市转西北风,扩散条件有所好转,由于该高压影响范围小且强度弱,区域中南部扩散条件改善十分有限;14日下午,受强西北高压作用,北京市地面偏北风风速超过10 m/s,扩散条件彻底改善。从区域传输变化上看,此次北京市PM_{2.5}污染过程可以分为3个阶段(见图2)。第一阶段为1月10日—12日中午,由于山风和边界层日变化的作用,PM_{2.5}浓度出现凌晨—中午下降、午后—子夜升高的多次反复现象,此期间主要传输贡献地区为河北保定。第二阶段为12日下午—13日上午,在区域输送推动下,北京市PM_{2.5}浓度陡然上升。第三阶段为13日下午—14日傍晚,由于上阶段弱冷空气未能有效清除河北保定等中南部区域的污染,伴随下午区域偏南风的转变,河北保定地区的输送增加,北京市PM_{2.5}浓度又有所上升;14日傍晚,伴随冷空气的降临,PM_{2.5}浓度迅速降低,转为本地贡献为主。整体而言,在1月10日8:00—1月14日19:00期间,北京本地源贡献约为34%,河北保定贡献约为33%,其他区域贡献约为33%。

2.2 秋冬季气象与减排定量识别

2018年10月—2019年3月秋冬季期间,北京市PM_{2.5}平均质量浓度为52 μg/m³,同比下降1.9%;PM_{2.5}值在“2+26”城市中最低;期间PM_{2.5}月均质量浓度分别为44 μg/m³、74 μg/m³、

39 μg/m³、52 μg/m³、53 μg/m³、52 μg/m³,变化幅度及波动范围较小。从同比变化情况来看,2018—2019年秋冬季,在“2+26”城市PM_{2.5}浓度同比反弹6.5%的情况下,北京市同比下降1.9%。

从模拟测算的2018年10月—2019年3月秋冬季北京市PM_{2.5}源减排与气象影响归因分析结果上看(见图3),2018年10月—2019年3月秋冬季与2017—2018年秋冬季相比,气象条件偏差3.3%,源减排同比下降5.2%,两者综合导致实测PM_{2.5}浓度同比下降1.9%。即在气象条件较为不利和区域同比反弹的情况下,北京市PM_{2.5}浓度持续走低,主要原因为源减排效果大于气象条件偏差所带来的影响。其中,各月短期气象条件同比震荡较大,而源减排波动较小,综合导致PM_{2.5}月均浓度总体波动明显。

2.3 区域输送与气象影响概念模型

大气污染物观测浓度时间序列变化是非稳态的时间变化,其主要受排放源和气象条件的双重影响,同时叠加了外来传输贡献。研究基于数值模拟情景分析方法获得逐日的区域传输贡献,基于KZ滤波统计分析方法获得逐日的气象条件影响贡献,结合PM_{2.5}日均值,建立北京市气象条件影响、外来传输贡献与PM_{2.5}质量浓度关系概念图(见图4)。在气象条件有利于污染物扩散时,外来传输贡献对PM_{2.5}浓度影响较小,即较大的外来传输贡献和较小的外来传输贡献对应的PM_{2.5}浓度差异和变化梯度较小。在气象条件不利于污染物扩散时,外来传输贡献越大,PM_{2.5}浓度呈现显著增大的趋势,特别是当气象条件影响大于60%时,外来传输贡献对PM_{2.5}浓度影响变得不敏感,PM_{2.5}浓度变化梯度有减小的趋势。综合可见,气象条件是制约PM_{2.5}浓度变化的主导因子,气象条件对污染过程的发生、发展、持续及结束都有着重要的影响,区域传输则起恶化或加剧污染的作用。

清华大学的评估结果显示,2017年与2013年相比,北京市PM_{2.5}年均质量浓度从89.5 μg/m³下降到58 μg/m³,在下降的近32 μg/m³中本地减排、周边减排、气象变化分别贡献了21 μg/m³、7 μg/m³和4 μg/m³,占比为66%、22%和12%^[20]。王燕丽等^[9]建立了京津冀13个城市的PM_{2.5}传输矩阵,在年均尺度上京津冀区域PM_{2.5}以本地污染源贡献为主(21.49%~68.74%),传输贡献为辅,其中区域内传输贡献约为13.31%~54.62%,区

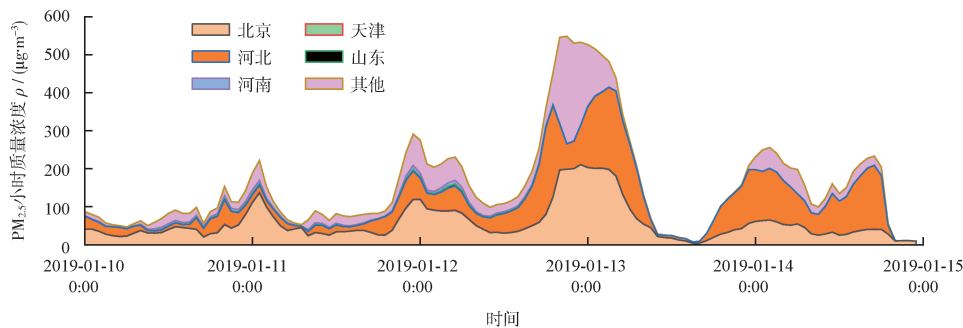


图 2 2019 年 1 月 10 日—14 日北京地区 PM_{2.5} 质量浓度地区来源追踪

Fig. 2 Source apportionment of PM_{2.5} concentration in Beijing from Jan 10th to 14th, 2019

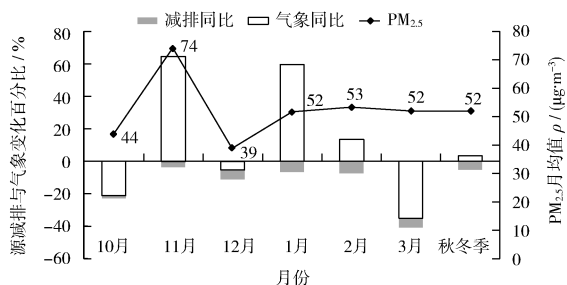


图 3 2018 年 10 月—2019 年 3 月北京市 PM_{2.5} 月均值、源减排和气象同比影响

Fig. 3 Monthly average concentration of PM_{2.5}, year-on-year impacts of source emission reduction and meteorological condition in Beijing from October 2018 to March 2019

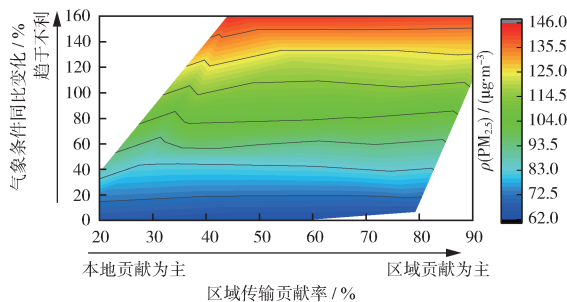


图 4 北京市气象条件影响、外来传输贡献与 PM_{2.5} 质量浓度变化关系

Fig. 4 Relations of PM_{2.5} concentration variation with the impacts of meteorological condition and external transport in Beijing

域外贡献约为 13.32% ~ 45.02%。原环境保护部环境规划院模拟应用数值模拟技术,分析发现气象条件变化对京津冀及周边地区 PM_{2.5} 年均浓度影响了 -5% ~ 5%^[10]。Chang 等^[21] 基于 CMAQ-ISAM 模拟的 2014 年北京市本地贡献率在 32.7% ~ 69.3% 之间;Lang 等^[22] 基于“置零法”(或称“直接

法”)模拟的 2010 年北京市本地贡献率在 30.7% ~ 70.8% 之间。本研究对北京地区大气污染输送与气象影响定量识别结果与其他学者基本一致。北京市 PM_{2.5} 浓度受污染传输和气象条件影响较大,为进一步改善空气质量,建议:①采取坚决措施应对秋冬季重污染问题,促进空气质量持续改善。②重视源减排、气象条件与污染物浓度变化关系的定量研究。针对不利的气象条件,进一步采用大数据研究其精细化演变特征及影响因素^[23]。③加强空气污染成本效益分析研究。基于多尺度大气污染防治情景,解析不同大气污染防治情景对应的行业治理措施成本。

3 结论

(1) 2018 年 7 月—2019 年 6 月,北京市 PM_{2.5} 平均质量浓度为 46.0 μg/m³,气象条件同比偏差 6.9%,外来传输贡献平均为 43.7%。

(2) 日变化上,外来传输在早晚高峰期间明显下降,体现出本地机动车排放贡献明显上升的特点,气象条件对 PM_{2.5} 浓度的影响主要表现为白天整体有利于污染物扩散,夜间气象条件转为偏不利的特征。

(3) 2018 年 10 月—2019 年 3 月秋冬季与 2017—2018 年秋冬季相比,气象条件偏差 3.3%,实测 PM_{2.5} 浓度同比下降 1.9%,源减排同比下降 5.2%,在气象条件较为不利和区域同比反弹的情况下,北京市 PM_{2.5} 浓度持续走低,主要为源减排的效益。

[参考文献]

[1] CHAN C K, YAO X H. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42.

(下转第 25 页)