

气象和排放变化对 PM_{2.5} 污染的定量影响

许艳玲^{1,2}, 薛文博^{2*}, 雷宇² (1.北京工业大学,区域大气复合污染防治北京市重点实验室,北京 100124; 2.生态环境部环境规划院,区域空气质量模拟与管控研究中心,北京 100012)

摘要: 基于 WRF-CMAQ 模型系统定量分析了气象和排放因素对全国及重点区域 PM_{2.5} 污染影响程度.从年度特征来看,与 2015 年相比,2016 年、2017 年全国空气质量明显改善,PM_{2.5} 年均浓度分别下降 7%和 14%; 2016 年气象条件总体转好,气象因素和排放因素变化导致全国 PM_{2.5} 年均浓度下降幅度分别为 4%和 3%; 2017 年全国气象条件与 2015 年相比基本持平,大气污染物排放量下降是 PM_{2.5} 污染减轻的决定因素.除汾渭平原外,京津冀及周边地区“2+26”城市、长三角、成渝地区空气中的 PM_{2.5} 年均浓度持续下降; 珠三角气象条件变化对 PM_{2.5} 影响较大,2017 年导致 PM_{2.5} 浓度上升了 29%; 除汾渭平原外,其他 4 个重点地区的污染物排放变化导致 PM_{2.5} 年均浓度下降且 2017 年的下降幅度进一步加大,说明污染管控措施的环境效益明显.从季节特征来看,气象影响值的区域性差异明显.本文分析方法可用于制定空气质量目标或者评估污染控制方案的环境效果.

关键词: WRF-CMAQ 模型; PM_{2.5}; 气象; 排放; 定量影响

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2019)11-4546-06

Impact of meteorological conditions and emission change on PM_{2.5} pollution in China. XU Yan-ling^{1,2}, XUE Wen-bo^{2*}, LEI Yu² (1.Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2.Center for Regional Air Quality Simulation and Control, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2019,39(11): 4546~4551

Abstract: The WRF-CMAQ modeling system was employed to investigate the impact of meteorological conditions and emission reduction on PM_{2.5} pollution in China. The results indicate that the PM_{2.5} concentration observed in 2016 and 2017 decreased by 7% and 14%, respectively compared with that in 2015, indicating an evident improvement in air quality. In 2016, the decrease in PM_{2.5} concentration owing to meteorological factor and emission reduction were estimated to be 4% and 3%, respectively. The impact of meteorological factors in 2017 showed little difference compared with that in 2015, which implied that the decrease of emissions was the decisive factor to PM_{2.5} decline. In the key regions except for the Fenwei Plain, such as Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding region ('2+26' region), the Yangtze River Delta (YRD), the Pearl River Delta (PRD) region and the Chengdu-Chongqing (CYB) region, the observational concentration decreased steadily. In the PRD region, an increase of 29% in PM_{2.5} concentration in 2017 could be attributed to the variations of meteorological conditions. Except for the FenWei plain, the decrease of emissions contributed to a larger drop in PM_{2.5} concentration in 2017 in the other key regions. The results indicated that the emission cuts generally improved the air quality. The analytical methods presented in this paper could be referred when setting air quality goals or estimating environmental benefit of pollution control plans.

Key words: WRF-CMAQ model; PM_{2.5} pollution; meteorological; emission; quantitative impact

PM_{2.5} 浓度升高导致中国中东部地区雾霾问题比较严重,特别是在采暖季节北方地区重污染天气频发^[1-3],限制了经济可持续发展,并对人体健康产生严重危害,已经引起广泛关注^[4-6].空气中 PM_{2.5} 浓度的高低主要受污染源排放和气象条件共同决定^[7].在中国北方地区,大气污染物排放总量大且集中,是空气中 PM_{2.5} 浓度高的主要原因,而不利气象条件使得 PM_{2.5} 污染更加严重^[8-9].气象因子可以影响大气污染物的稀释扩散、积聚清除,在大气流场作用下导致区域间污染物的传输,在高湿、静稳天气形势下快速形成以高浓度 PM_{2.5} 为特征的大气污染过程.一些

学者针对短时间段的 PM_{2.5} 重污染事件,开展了关于气象要素、大气环流等对大气中 PM_{2.5} 作用研究,集中在污染过程的发生、发展机制及化学过程分析^[10-12].此外一些学者基于统计学方法分析了 PM_{2.5} 浓度变化特征及其与气象因子之间的关系^[13-14].以上方法可以用于分析 PM_{2.5} 污染成因,但是均仅限于定性分析.气象条件变化对 PM_{2.5} 污染定量影响研究可以借助空气质量模型模拟法来实现.由于影响

收稿日期: 2019-04-29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0207502,2016YFC0208805)

* 责任作者, 副研究员, xuewb@caep.org.cn

PM_{2.5} 污染程度的是排放和气象两个因素,因此根据 PM_{2.5} 监测浓度和气象对 PM_{2.5} 污染定量影响值这两个参数,可以分析大气污染物排放量变化对 PM_{2.5} 影响。Liu 等^[15]将 2014 年 12 月和 2015 年 12 月作为研究时段,采用模型模拟法定量分析了气象因素对京津冀地区 PM_{2.5} 污染的影响。目前,该类研究主要集中在重污染时段的单个城市或者经济比较发达的城市群,但针对多年的全国大尺度研究相对不足。因此,按照国务院发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》中关于 PM_{2.5} 和空气质量的考核指标要求,本文以 2015 年为基准年,基于 WRF-CMAQ 模型系统,采用情景分析法,定量分析了 2016、2017 年气象和排放变化对全国及重点区域 PM_{2.5} 污染影响程度。

1 数据和方法

1.1 研究范围

研究范围涵盖整个中国大陆(暂时不包括香港、澳门、台湾),共包括 31 个省份(直辖市、自治区),共计 338 个主要城市。重点区域包括京津冀及周边地区“2+26”城市、长三角、珠三角、成渝、汾渭平原等 5 个地区。

1.2 数据来源

1.2.1 排放清单 CMAQ 模型所需排放清单的化学物种主要包括 SO₂、NO_x、颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5} 及其组分)、NH₃ 和 VOCs(含多种化学组分)等多种污染物。SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、NH₃、VOCs(含主要组分)等人为源排放数据均采用 2013 年 MEIC 排放清单^[16](中国多尺度排放清单, <http://www.meicmodel.org>)。MEIC 是一套基于云计算平台开发的中国大气污染物和温室气体人为源排放清单模型,可提供规范、准确、更新及时的高分辨率的自下而上的排放清单数据产品。生物源 VOCs 排放清单利用 MEGAN 天然源排放清单模型计算^[17]。以上排放清单已经在科学研究、政策评估和空气质量管理等方面得到广泛应用。

1.2.2 空气质量监测数据 空气质量监测数据来自中华人民共和国生态环境部数据中心,包括全国 338 个重点城市 2013 年、2015 年、2016 年、2017 年实际观测 PM_{2.5} 日均浓度。

1.3 模型设置

1.3.1 模拟时段 模拟时段为 2013 年、2015 年、

2016、2017 年,共计 48 个月,结果输出时间间隔为 1h。

1.3.2 模拟区域 CMAQ 模型采用 Lambert 投影坐标系,中心点经度为 102°E,中心纬度为 36°N,两条平行纬度分别为 24°N、46°N。水平模拟范围为 X 方向(-2524.5~2524.5km)、Y 方向(-2119.5~2119.5km),网格间距 27km,共将全国划分为 187×157 个网格。垂直方向共设置 14 个气压层,层间距自下而上逐渐增大。

1.3.3 气象模拟 CMAQ 模型所需要的气象场由中尺度气象模型 WRF 提供,WRF 模型与 CMAQ 模型采用相同的模拟时段和空间投影坐标系,垂直方向共设置 35 个气压层,层间距自下而上逐渐增大。WRF 模型的初始场与边界场数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 6h 1 次、1°分辨率的 FNL 全球分析资料^[18],每日对初始场进行初始化,每次模拟时长为 30h,Spin-up 时间设置为 6h,并利用 NCEP ADP 观测资料^[19]进行客观分析与资料同化。

1.3.4 模型参数 参数设置见以前研究成果^[20-21]。

1.4 模型验证

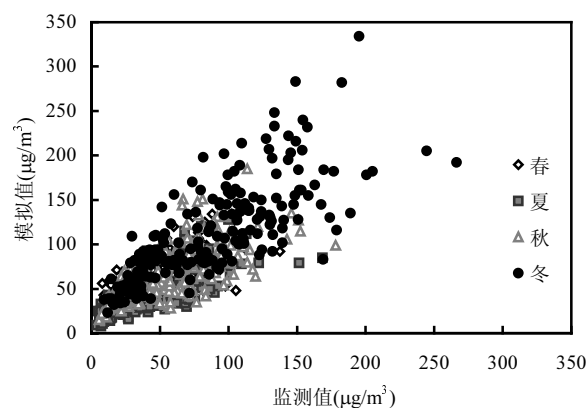


图1 PM_{2.5} 模拟浓度与监测浓度相关性

Fig.1 Correlation between the PM_{2.5} modeling and monitoring data

本文输入空气质量模型的排放数据是 2013 年 MEIC 排放清单,因此选取中国首批开展 PM_{2.5} 监测的 74 个城市 2013 年实际观测数据与模拟结果进行比对,来验证模型模拟结果的合理性,结果表明:模拟值与观测值具有较好的相关性,NMB 和 NME 等参数符合美国环保署推荐的模型性能标准要求。相关系数 r 、标准化平均偏差 NMB、标准化平均误差 NME 等参数的计算结果如表 1 所示。由于新疆沙尘天气较多,而现有 CMAQ 模型对沙尘过程模拟效果

较差,因此该地区监测值和模拟值的吻合度较低.总体上,本文选取的模型系统可较好模拟我国 PM_{2.5} 浓度特征.

表 1 PM_{2.5} 模拟数据验证结果
Table 1 Performance of statistical parameters for PM_{2.5} concentration simulations

统计参数	春季	夏季	秋季	冬季
<i>r</i>	0.71	0.72	0.68	0.77
NMB	-24	0	-15	-23
NME	31	33	32	31

1.5 分析方法

1.5.1 气象条件变化对 PM_{2.5} 污染影响 基于 2015~2017 年模型模拟结果,以 2015 年为基准年,建立气象条件变化对 PM_{2.5} 污染定量影响的评估方法,具体方法如下:

$$M_{ijk}=C_{ijk}-C_{2015jk}$$
 (1)

$$Me_{ijk}=\frac{M_{ijk}}{C_{2015jk}}\times 100$$
 (2)

式中: C_{2015jk} 为 2015 年第 j 月(季节)第 k 个地区的 PM_{2.5} 模拟浓度,μg/m³; C_{ijk} 为第 i 年 j 月(季节)第 k 个地区的 PM_{2.5} 模拟浓度,μg/m³; M_{ijk} 为第 i 年 j 月(季节)第 k 个地区的气象条件变化对 PM_{2.5} 污染的影响,μg/m³; Me_{ijk} 为第 i 年 j 月(季节)第 k 个地区的气象条件变化对 PM_{2.5} 污染的影响程度,%.对于 M_{ijk} 或者 Me_{ijk} ,正值代表气象条件转差,负值代表气象条件转好.

1.5.2 排放因素对 PM_{2.5} 污染影响 根据 PM_{2.5} 监测浓度和基于模型模拟的气象对 PM_{2.5} 污染影响这两个参数,可以计算扣除气象影响后污染物排放量

变化对 PM_{2.5} 的影响.

$$Pm_{ijk}=\frac{(Cm_{ijk}-Cm_{2015jk})}{Cm_{2015jk}}\times 100$$
 (3)

$$Em_{ijk}=Pm_{ijk}-Me_{ijk}$$
 (4)

式中: Cm_{2015jk} 为 2015 年第 j 月(季节)第 k 个地区的 PM_{2.5} 监测浓度,μg/m³; Cm_{ijk} 为第 i 年 j 月(季节)第 k 个地区的 PM_{2.5} 监测浓度,μg/m³; Pm_{ijk} 为第 i 年 j 月(季节)第 k 个地区的 PM_{2.5} 监测浓度的变化率,%; Em_{ijk} 为第 i 年 j 月(季节)第 k 个地区的排放变化对 PM_{2.5} 污染的影响程度,%.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 浓度分布特征

PM_{2.5} 包括直接排放的一次颗粒物以及由 SO₂、NO_x、VOCs、NH₃ 等间接转化生成的二次颗粒物.我国 PM_{2.5} 污染呈现显著的空间差异性,高值区主要集中在在胡焕庸线以东地区,特别是人口、工业、农畜业等相对集中的河北、河南、山西、山东等地区,这些地区大都地处中国的北方,冬季的气温较低,采暖导致锅炉耗煤和散煤的消费量大,此外还容易受到小风、逆温等不利气象条件影响,PM_{2.5} 浓度高于其他季节,高污染给居民的身体健康带来威胁.近年来,我国加大了污染控制力度,污染治理设施安装率和污染物去除效率显著提升,空气中 PM_{2.5} 浓度呈现下降趋势.与 2015 年相比,2016 年、2017 年全国 PM_{2.5} 年均浓度分别下降了 7%和 14%.2017 年,全国 PM_{2.5} 年均浓度达到 43μg/m³,PM_{2.5} 年均浓度下降幅度高于 40%的城市数量超过 40 个.相比 2015 年,PM_{2.5} 年均监测浓度变化情况如图 2 和表 2.

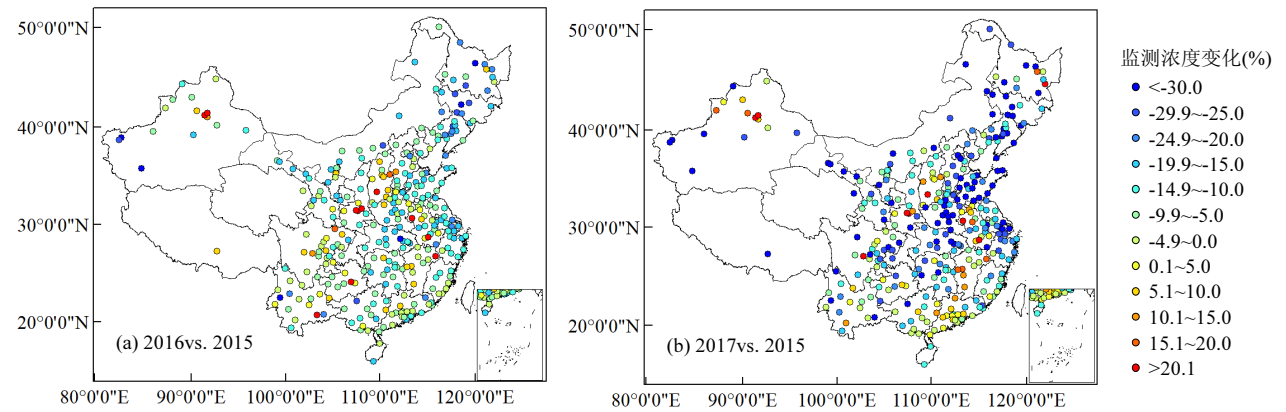


图 2 PM_{2.5} 年均监测浓度变化
Fig.2 Variation of annual PM_{2.5} monitoring concentration

表 2 气象和排放变化对重点地区 PM_{2.5} 浓度影响(%)
Table 2 Contributions of meteorological and emission variation on PM_{2.5} concentration (%)

2016vs.2015							2017vs.2015				
	地区	春	夏	秋	冬	年	春	夏	秋	冬	年
PM _{2.5} 监测浓度 变化	2+26 城市	-7	-21	0	-8	-8	-19	-21	-20	-16	-19
	长三角	3	-21	-17	-7	-9	-5	-18	-14	-7	-10
	珠三角	15	0	-10	-19	-6	23	-20	-6	2	0
	成渝	2	-13	14	-6	-1	-15	-26	-16	-1	-12
	汾渭平原	8	-16	16	11	6	0	-9	11	18	5
	全国	-2	-16	-6	-8	-7	-15	-24	-15	-8	-14
气象条件变化对 PM _{2.5} 影响	2+26 城市	0	-10	-1	-8	-5	-2	8	4	-3	2
	长三角	3	-6	-3	-5	-3	5	5	-4	-3	0
	珠三角	20	20	-4	-2	5	53	16	39	16	29
	成渝	-2	-15	12	0	-1	1	-8	7	0	0
	汾渭平原	3	-14	-1	-3	-4	-4	-4	-6	0	-3
	全国	1	-7	0	-7	-4	4	-1	1	-2	0
排放量变化对 PM _{2.5} 影响	2+26 城市	-7	-11	1	0	-3	-17	-29	-24	-13	-21
	长三角	0	-15	-14	-2	-6	-10	-23	-10	-4	-10
	珠三角	-5	-20	-6	-17	-11	-30	-36	-45	-14	-29
	成渝	4	2	2	-6	0	-16	-18	-23	-1	-12
	汾渭平原	5	-2	17	14	10	4	-5	17	18	8
	全国	-3	-9	-6	-1	-3	-19	-23	-16	-6	-14

从重点地区来看,与 2015 年相比,2017 年汾渭平原 PM_{2.5} 年均浓度上升,珠三角地区基本持平,京津冀及周边地区“2+26”城市、长三角、成渝 3 个地区的下降比例均超过 10%.PM_{2.5} 污染最严重的是京津

冀及周边地区“2+26”城市,也是 PM_{2.5} 污染改善明显的地区之一,2017 年 PM_{2.5} 年均浓度达到 68μg/m³,3a 内的下降比例高达 19%.

2.2 气象条件变化对 PM_{2.5} 浓度影响

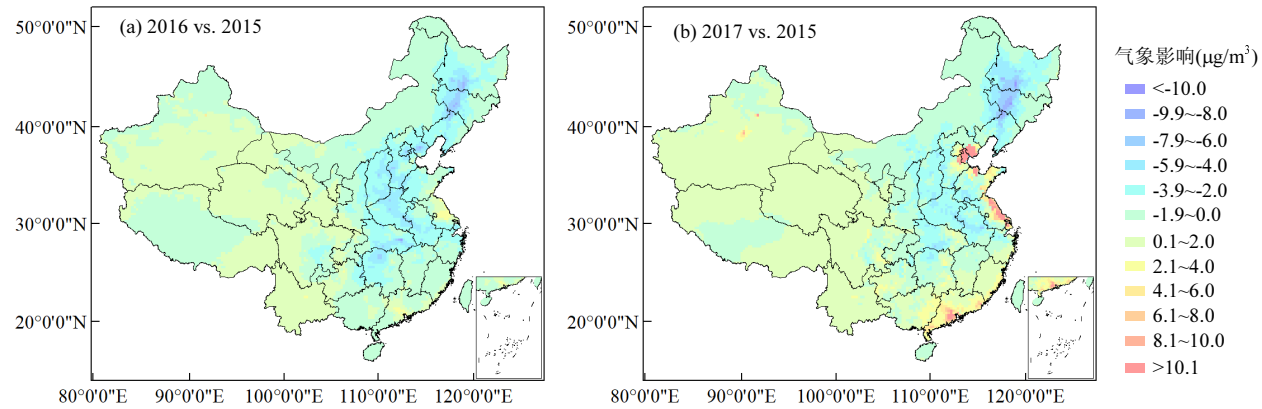


图 3 单纯气象条件变化对 PM_{2.5} 年均浓度影响
Fig.3 Contributions of meteorological factors on annual PM_{2.5} concentration

图 3 为单纯气象条件变化对 PM_{2.5} 年均浓度影响的空间分布图.结果表明:与 2015 年相比,2016 年我国气象条件总体好转,气象因素变化导致全国 PM_{2.5} 年均浓度下降幅度约为 4%; 2017 年全国气象条件与 2015 年基本持平.胡焕庸线以东的大部分地区 PM_{2.5} 年均浓度均上升 2μg/m³ 以上.污染较重的京津冀、东北地区(辽宁、吉林)、两湖平原地区(湖

北、湖南)、山西、河南等地区的气象条件均明显转好,有助于减轻 PM_{2.5} 污染.但是 2017 年北京、天津以及江苏东部沿海城市气象条件明显转差.从重点区域来看,2016 年珠三角的气象条件转差 5%,成渝地区气象条件基本持平,京津冀及周边“2+26”城市、长三角、汾渭平原等地区气象条件略有利,转好幅度约 3%~5%.2017 年珠三角的气象条件明显

不利,转差幅度高达 29%,不利气象条件一定程度上抵消了污染减排的环境效果;其他 4 个地区气象条件基本持平,气象场变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响很小,但是“2+26”城市、长三角这 2 个地区的东、西部分布的差异较大。

从 4 个季节来看,2016 年夏季、冬季全国气象条件总体转好,而春季、秋季与 2015 年基本持平;2017 年春季略有转差,而夏季、秋季、冬季气象条件与 2015 年基本持平。相比 2015 年,气象条件变化对全国及重点地区 $\text{PM}_{2.5}$ 影响程度分布规律如图 3 和表 2。

2.3 排放量变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响

根据 $\text{PM}_{2.5}$ 监测浓度和气象条件变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响 2 个参数,基于式 4 进行演算,可以得到大气污染物排放量变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的定量影响。与

2015 年相比,2016 年、2017 年因大气污染物排放量变化而导致 $\text{PM}_{2.5}$ 年均下降的城市数量增加了 40 多个。排放变化导致全国 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的下降幅度由 2016 年的 3% 上升到 2017 年的 14%,特别是京津冀、珠三角、两湖平原、河南、山东等地区,2016 年、2017 年下降比例均达到 20% 左右。从重点地区来看,除汾渭平原的排放变化导致 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度上升外,其他 4 个重点地区均出现不同程度的下降并且 2017 年的下降幅度高于 2016 年。从季节规律来看,总体上呈现出冬季变化幅度较小、夏季变化幅度较大的趋势,其中 2017 年夏季、冬季因污染减排导致全国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降比例分别为 23% 和 6%。相比 2015 年,排放变化对全国及重点地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响程度分布规律如图 4 和表 2。

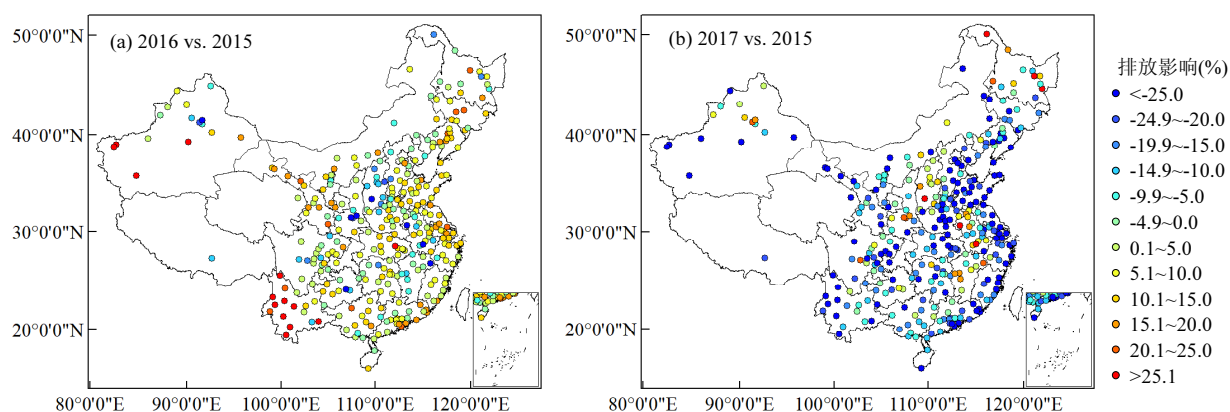


图 4 大气污染物排放量变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度影响

Fig.4 Contributions of emission variation on annual $\text{PM}_{2.5}$ concentration

2.4 不确定性分析

本文的不确定性主要来源于排放清单和空气质量模型等。第一,活动水平调研、排放因子本地化等存在难度,MEIC 排放清单中一些部门的排放量不确定性较大。特别是扬尘排放难以被直接测量和无法获得准确的地理信息,导致排放及其时空分布特征存在较大误差。第二,CMAQ 模型对沙尘过程模拟效果较差,因此沙尘天气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在较大误差。第三,由于 PSO_4 、 PNO_3 和 PNH_4 在重污染过程具有爆发式增长效应,但相关化学反应机制还处于研究阶段,因此 CMAQ 模拟结果会对重污染季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有所低估,特别是 $\text{PM}_{2.5}$ 中 PSO_4 、 PNO_3 和 PNH_4 等均明显低估^[22-23]。

根据式(1)~(4)可知,WRF-CMAQ 模型模拟结果

误差会向下传导, $\text{PM}_{2.5}$ 模拟浓度传递至排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响值。为此,本文在结果分析时多采用“相对变化量”的方式,一定程度上可以减少模型模拟不确定性带来的影响,但仍然不能完全消除误差。总体来说,本文结果可较好反映气象和排放变化对全国及重点区域 $\text{PM}_{2.5}$ 影响的趋势特征,但是尚不能应用于对数据准确度要求较高的环保考核。

3 结论

3.1 近几年我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染明显减轻。与 2015 年相比,2017 年全国空气质量明显改善, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度下降 14%;从重点地区来看,汾渭平原 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度上升 5%,珠三角地区基本持平,京津冀及周边地区“2+26”城市、长三角、成渝 3 个地区的下降比例

均超过 10%。

3.2 与 2015 年相比,2016 气象条件总体转好,气象因素和排放因素变化导致全国 PM_{2.5} 年均浓度下降幅度分别为 4%和 3%;2017 年全国气象条件与 2015 年相比基本持平,大气污染物排放量下降是 PM_{2.5} 污染减轻的决定因素。位于东南沿海的珠三角地区,大气运动比较活跃,气象条件变化导致 PM_{2.5} 浓度的波动较大。除汾渭平原外,其他 4 个重点地区的污染物排放变化导致 PM_{2.5} 年均浓度下降,污染减排成效显著。总体来看,2016 年、2017 年空气中 PM_{2.5} 年均浓度的降低主要得益于污染控制。

参考文献:

- [1] Qiu Y L, Liao H, Zhang R J, et al. Simulated impacts of direct radiative effects of scattering and absorbing aerosols on surface layer aerosol concentrations in China during a heavily polluted event in February 2014 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017,122(11): 5955–5975.
- [2] Han X, Liu Y Q, Gao H, et al. Forecasting PM_{2.5} induced male lung cancer morbidity in China using satellite retrieved PM_{2.5} and spatial analysis [J]. *Science of The Total Environment*, 2017,607–608:1009–1017.
- [3] Liao Z, Gao M, Sun J, et al. The impact of synoptic circulation on air quality and pollution-related human health in the Yangtze River Delta region [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,607–608:838–846.
- [4] Tie X X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009,43(14):2375–2377.
- [5] Cao J J, Xu H M, Xu Q, et al. Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily polluted Chinese city [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012,120(3):373–378.
- [6] Guo J P, He J, Liu H L, et al. Impact of various emission control schemes on air quality using WRF-Chem during APEC China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014,140:311–319.
- [7] Zhang J P, Zhu T, Zhang Q H, et al. The impact of circulation patterns on regional transport pathways and air quality over Beijing and its surroundings [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012,11(12): 33465–33509.
- [8] 吕梦瑶,张恒德,王继康,等.2015 年冬季京津冀两次重污染天气过程气象成因 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(7):2748–2757.
LÜ M Y, Zhang H D, Wang J K, et al. Analysis of meteorological causes of two heavily polluted weather processes in Beijing-Tianjin-Hebei Region in winter of 2015 [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(7):2748–2757.
- [9] 林廷坤,洪礼楠,黄争超,等.北京市秋冬季大气环流型下的气象和污染特征 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(5):1813–1822.
Lin T K, Hong L N, Huang Z C, et al. Meteorological and pollution characteristics under atmospheric circulation types in autumn and winter in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(5):1813–1822.
- [10] Gao Y, Zhang M G. Numerical simulation of a heavy fog-haze episode over the North China Plain in January 2013 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014,19(2):140–152.
- [11] 孙兆彬,李梓铭,廖晓农,等.北京大气热力和动力结构对污染物输送和扩散条件的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(5):1693–1705.
Sun Z B, Li Z M, Liao X N, et al. Influence of Beijing atmospheric thermal and dynamics structure on pollutants transport and diffusion conditions [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(5):1693–1705.
- [12] Wang H, Xu J Y, Zhang M, et al. A study of the meteorological causes of a prolonged and severe haze episode in January 2013 over central-eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014,98(98):146–157.
- [13] Chen Z, Cai J, Gao B, et al. Detecting the causality influence of individual meteorological factors on local PM_{2.5} concentration in the Jing-Jin-Ji region [J]. *Scientific Reports*, 2017,doi:10.1038/srep40735.
- [14] Liang P F, Zhu T, Fang Y H, et al. The role of meteorological conditions and pollution control strategies in reducing air pollution in Beijing during APEC 2014 and Parade 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017,doi:10.5194/acp-2017-456.
- [15] Liu T, Gong S, He J, et al. Attributions of meteorological and emission factors to the 2015 winter severe haze pollution episodes in China's Jing-Jin-Ji area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017,17: 2971–2980.
- [16] Multi-resolution emission inventory for China [Z/OL]. <http://www.meicmodel.org/>.
- [17] Guenther A, Karl T, Harley P, et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(11):3181–3210.
- [18] National Center for Atmospheric Research. CISEL Research Data Archive [EB/OL]. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>.
- [19] National Center for Atmospheric Research. CISEL Research Data Archive [EB/OL]. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds461.0>.
- [20] 薛文博,付飞,王金南,等.基于全国城市 PM_{2.5} 达标约束的大气环境容量模拟 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(10):2490–2496.
Xue W B, Fu F, Wang J N, et al. Modeling study on atmospheric environmental capacity of major pollutants constrained by PM_{2.5} compliance of Chinese cities [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(10):2490–2496.
- [21] 许艳玲,薛文博,雷宇,等.中国氨减排对控制 PM_{2.5} 污染的敏感性研究 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(7):2482–2491.
Xu Y L, Xue W B, Lei Y, et al. Sensitivity analysis of PM_{2.5} pollution to ammonia emission control in China [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(7):2482–2491.
- [22] Zheng B, Zhang Q, Zhang Y, et al. Heterogeneous chemistry: a mechanism missing in current models to explain secondary inorganic aerosol formation during the January 2013 haze episode in North China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015,15:2031–2049.
- [23] Cheng Y F, Zheng G J, Wei C, et al. Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China [J]. *Science Advances*, 2016,doi:10.1126/sciadv.1601530.

作者简介:许艳玲(1980–),女,河北玉田人,副研究员,北京工业大学博士研究生,主要从事空气质量模型、大气污染控制对策等方面研究.发表论文 10 余篇。