DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2018.05.007

邱培培[1]　唐晓[2]　卢苗苗[2]　黄宇[1]　周君蕊[1]

武汉市大气污染变化趋势预测

摘要

以2014年武汉市大气污染源排放清单为基准,结合《武汉市城市空气质量达标规划(2013—2027年)》研究工作,预测了其实施后在控制"两高"行业新增产能、污染源综合治理、淘汰落后产能、控制机动车保有量等方面对武汉市SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$的减排量.利用嵌套网格空气质量预报模式系统(NAQPMS),模拟分析了《达标规划》大气污染治理重点工程实施的空气质量改善效果.结果表明:《达标规划》实施后,2020年武汉市SO_2、NO_2、PM_{10}和$PM_{2.5}$排放量将分别比2014年削减22%~66%、6%~37%、14%~40%和17%~46%;武汉市空气质量有所改善,但NO_2和颗粒物年均浓度仍不能达到环境空气质量二级标准.

关键词

武汉;预测;嵌套网格空气质量预报模型系统;空气质量

中图分类号 X511

文献标志码 A

收稿日期 2018-08-07

资助项目 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";武汉市科技局应用基础前沿专项(2018060401011310)

作者简介

邱培培,女,博士,助理研究员,主要研究方向为空气质量模型和排放清单.qpp040821@163.com

周君蕊(通信作者),女,硕士,主要研究方向为大气污染控制.whzhoujunrui@163.com

1 武汉市环境保护科学研究院,武汉,430015

2 中国科学院大气物理研究所 大气边界层物理与大气化学国家重点实验室,北京 100029

0 引言

随着我国经济的快速发展和城镇化的深入推进,以及以重工业为主的产业结构、煤炭为主的能源结构和机动车的快速增长,我国大气污染日益严重,以可吸入颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($PM_{2.5}$)为特征的区域性污染问题日益突出,严重损害了人民群众的身体健康.据统计,2017年全国338个地级及以上城市中,有239个城市环境空气质量超标,占70.7%,武汉市就是超标的城市之一[1].武汉市近年来经济发展迅速,区域影响力不断增强,但空气污染问题较为突出,灰霾污染频繁发生[2-3].2017年武汉市城区环境空气质量优良天数为255 d,在全年110个污染日中,以$PM_{2.5}$和O_3为首要污染物的天数分别为68和25 d,分别占61.8%和22.8%[4].可见,武汉市的复合型污染问题非常严重,掌握和分析未来武汉市大气污染变化趋势,对管理部门制定合理的措施和对策极为重要.

目前针对武汉市大气污染的研究主要是分析PM及其二次气溶胶的组分和离子组分特征[5-12],利用PMF方法解析武汉市城区$PM_{2.5}$的主要来源以及利用模型分析武汉地区大气污染物的时空分布和区域来源[13-15].然而,仅分析武汉市大气污染的现状特征和污染来源无疑是不够的,还需深入分析环境管理部门制定的大气污染控制措施带来的空气质量改善效果.因此,本文将基于《武汉市城市空气质量达标规划(2013—2027年)》(以下简称《达标规划》)提出的各项大气污染重点控制工程,利用嵌套网格空气质量预报模式系统(NAQPMS),评估武汉市空气质量改善效果,旨在为管理部门调整大气污染防治措施提供决策参考.

1 研究方法

基于2014年武汉市大气污染源排放清单和《达标规划》提出的大气污染重点控制工程,预测各项措施实施后2020年在多种情景下主要大气污染物排放削减量;利用嵌套网格空气质量预报模式(NAQPMS)搭建武汉市大气污染过程数值模拟,定量分析2020年不同减排情景下武汉市大气污染变化趋势.

1.1 模式介绍和参数设置

本文采用的嵌套网格空气质量预报模式系统(NAQPMS)是由中

国科学院大气物理研究所自主开发的多尺度、多物种的第三代空气质量模式[16].NAQPMS 能够模拟平流、湍流、对流、干湿沉降和气液相化学等过程对污染物分布的影响,再现不同尺度不同物种大气污染物的时空演变特征.其中气相化学使用 CBM-Z 机制,液相化学采用改进的 RADM2 机制,无机气溶胶采用 ISORROPIA 机制,二次有机气溶胶基于 Odum 等[17]的计算方案.沙尘和海盐的产生可在线计算,分别采用罗淦等[18]和 Athanasopoulou 等[19]发展的方案.模式中也考虑了气溶胶表面的非均相化学过程,包含了 28 个化学反应[20].

NAQPMS 主要由 3 部分组成:气象场模拟模块、排放源处理模块、空气质量模拟模块.气象场模拟模块采用 WRF 模式,负责模拟大气动力热力要素的演变规律,提供小时的动力和热力要素模拟结果,作为大气污染模拟的动力和热力驱动因子.排放源处理模块采用美国 MCNC 环境模式中心专门为空气质量模拟系统提供排放源处理而开发的 SMOKE 模型,负责将统计得到的表层源排放清单和数据转化为空气质量模拟所需的网格化排放数据,提供污染物模拟的排放源驱动.空气质量模拟模块负责模拟大气污染物在初边界条件、排放源驱动和气象场驱动下的扩散、输送、转化以及沉降等演变规律.

模拟范围:图 1 为本文模式区域设置,采用 3 层嵌套网格,网格水平分辨率分别为 27 km×27 km,9 km×9 km,3 km×3 km;采用的网格数分别是 95×95,120×120 和 120×120.第一模拟区域覆盖中国中东部及西部大部地区,第二区域主要包含河南省、安徽省、江西省、湖南省大部地区和湖北省等,第三区域主要涵盖武汉市及其毗邻城市等.

气象数据:WRF 模式模拟垂直层数为 27 层,最高层为 50 hPa.气象场采用 NCEP(the National Center for Environment Prediction)的 FNL 再分析资料为 WRF 提供初边界条件,分辨率为 1°×1°.

边界条件:NAQPMS 模拟的第一区域的边界条件采用全球化学传输模式 MOZART-v2 模拟的月均浓度,第二、第三模拟区域的边界数据基于双向嵌套方法由其上一层区域的数据传输而获取.

1.2 排放清单

1.2.1 基准年排放清单

本文采用的排放源清单来自亚洲自下而上区域排放清单 REAS(Regional Emission inventory in ASia)2.1 版本[21-22],基准年份是 2000—2008 年.包含的物种有 SO_2、NO_x、NH_3、CO、$PM_{2.5}$、PM_{10}、BC、OC、NMVOC、CH_4、N_2O、CO_2 等.排放清单的行业来源包括电厂、化工厂、运输等部门的燃料燃烧以及工业过程、农业活动(施用化肥和畜牧业)和其他领域(如无组织排放、溶剂使用等).时间分辨率是月均数据,空间分辨率是 0.25°×0.25°(在中国中东部大约 30 km×25 km).本文采用的 NAQPMS 在垂直方向上模拟层数为 20 层,排放清单不同行业按一定比例在不同高度上进行分配,面源的分配比例为 0.6∶0.2∶0.1∶0.1,点源的分配比例为 0∶0.4∶0.6∶0,而道路源和生物燃烧源主要分配在近地面.

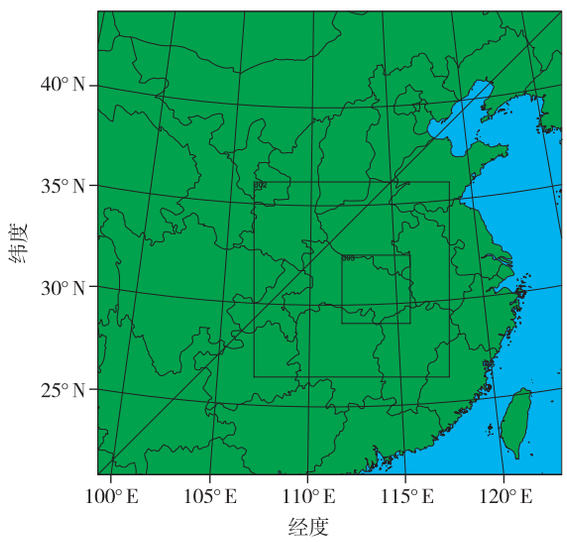


图 1 武汉模拟系统的区域位置和网格设置

Fig. 1 The domain of the simulation and nest setup in Wuhan

武汉本地源清单采用 2014 年武汉市大气污染源排放清单,涉及的行业包括固定源、茶炉、餐饮、生活源、工业面源、道路移动源、非道路移动源、生物质、扬尘源、化石燃料、溶剂使用和其他等,污染物种类包括 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_x、CO 和 NMVOC 等.

1.2.2 排放预测

以 2014 年为基准年,根据武汉市“十三五”国民经济发展规划、能源发展规划、产业发展规划和交通发展规划等,结合大气污染物排放标准、产业环保技术政策与污染治理技术要求等文件,预测 2020 年武汉市国民经济生产总值、人口数、机动车保有量、能源消费量、工业产品产量等社会经济发展指标,进而采用情景分析法,结合《达标规划》中的各项措施,综合考虑重点源控制目标和技术进步等因素,预测 2020 年不同情景下的主要大气污染物排放量.

《达标规划》中提出武汉市将严控“两高”行业新增产能,对电力、钢铁、水泥等重点行业开展进一步的脱硫、脱硝、除尘治理,对燃煤锅炉安装脱硫设施,工业窑炉除尘设施进行升级改造,对机动车保有量实施总量控制,淘汰黄标车等.基于上述情景,为研究武汉市《达标规划》实施后武汉市空气质量的变化趋势,以2014年为基准年,设置多种控制情景,预测不同情景下的大气污染物减排量.详细设置如表1所示.

2 结果与讨论

2.1 NAQPMS模型验证

为了验证NAQPMS模型结果的可靠性,选取武汉10个监测站点的观测数据进行筛选整理,去除异常观测数值,将NAQPMS模拟的$PM_{2.5}$小时平均质量浓度与观测值进行对比校验,如图2和图3所示.

由图2可以看出,$PM_{2.5}$观测值和模拟值的相关系数达到0.5,这表明模式对于细颗粒物的直接排放和二次生成均有较好的模拟性能.

表1 武汉市大气污染减排情景设置

Table 1 The setup of air pollution emission reduction scenarios in Wuhan

情景编号	情景设置
基准情景(S1)	以《达标规划》为基准,提出对污染企业的控制措施,包括控制钢铁行业、水泥行业和乙烯生产行业新增产能;全面淘汰落后产能;控制平板玻璃行业产能缓慢增长,新增产能采用最严格控制技术;控制机动车保有量年均增长率,淘汰黄标车;电力、钢铁、水泥等重点行业开展进一步的脱硫、脱硝、除尘治理;燃煤锅炉安装脱硫设施;工业窑炉现有除尘设施实施升级改造
控制情景(S2)	在基准情景(S1)的基础上,对污染控制技术的选择、去除效率和运行率方面提出控制要求
强化控制情景(S3)	在控制情景(S2)的基本上加强了对污染控制技术的选择、去除效率和运行率方面提出更高的控制要求
最强化情景(S4)	在强化控制情景(S3)的基础上考虑能源结构、产业结构的调整

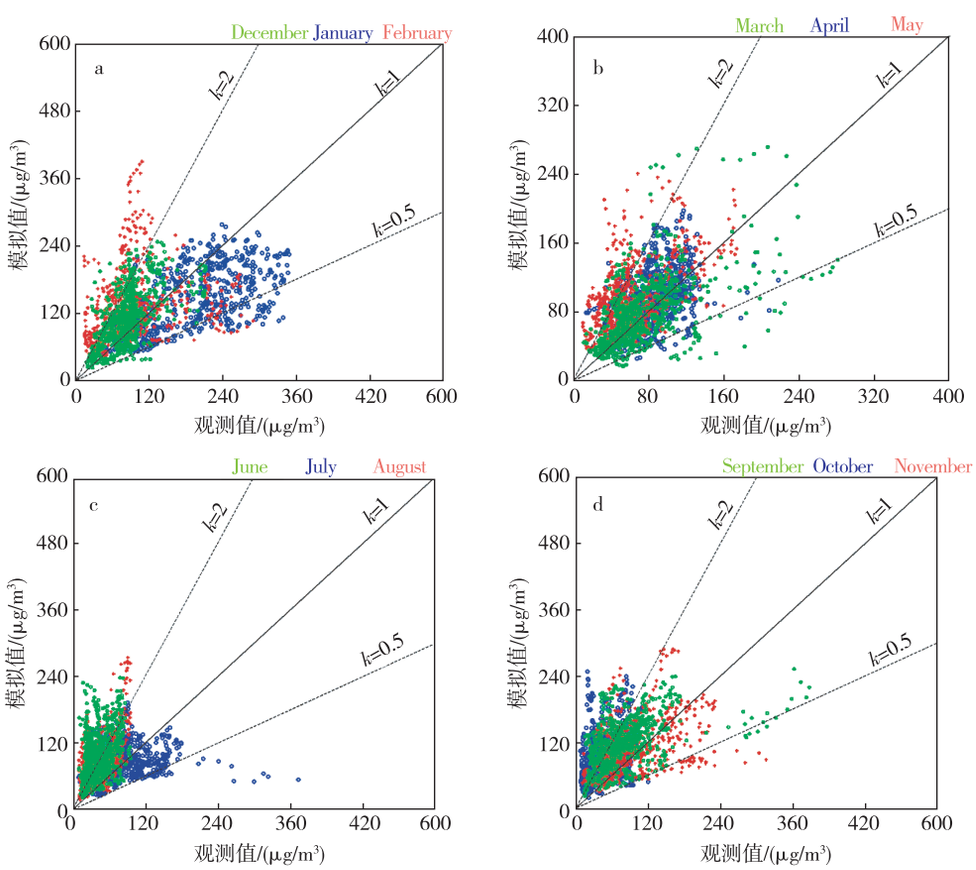


图2 2014年$PM_{2.5}$小时平均质量浓度散点图

Fig. 2 The scatter diagram for $PM_{2.5}$ hourly concentration in 2014

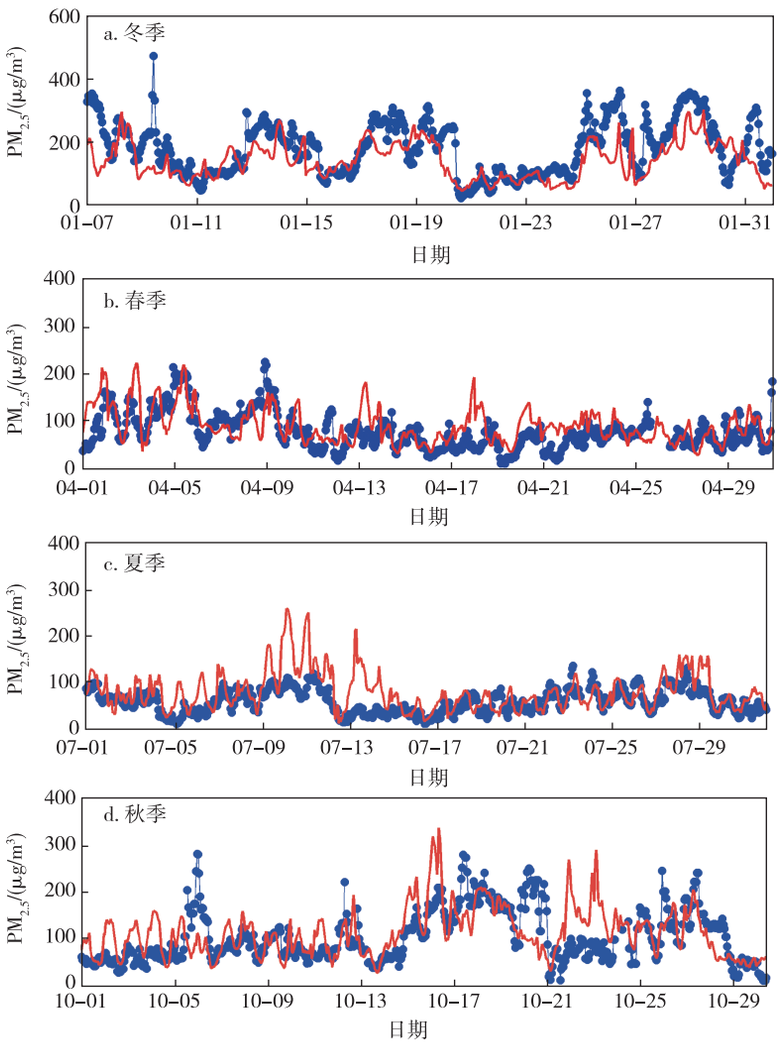


图 3　2014 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度观测与模拟小时值时间序列(点线代表观测值;曲线代表模拟值)

Fig. 3　Temporal variations of hourly observed and simulated $PM_{2.5}$ concentrations in 2014 (The black spots mark out the observed data and the curve lines represent the simulated data)

由图 3 可以看出,NAQPMS 模型总体能较好地反映武汉各站点不同季节 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化情况,模拟浓度有所高估,4 个季节中冬季和春季模拟效果最好.

2.2　目标年排放清单

图 4 所示为 2020 年不同情景下武汉市 SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放分布特征.由图 4 可知,SO_2 主要来源于电厂煤炭和钢铁行业烧结工序以及未纳入统计的工业面源燃烧排放;在不同情景下不断提高电厂和烧结机综合脱硫效率的措施下,电厂和钢铁行业的 SO_2 排放对排放总量的贡献逐渐降低;提高工业锅炉烟气脱硫装置的安装率和投运率,是减少 SO_2 排放的主要措施之一.预测 2020 年 SO_2 排放量比 2014 年减少 2.3~6.8 万 t,降低 22%~66%.NO_x 排放主要来源于道路移动源和非道路移动源的排放,且随着机动车保有量的快速增加,道路移动源对 NO_x 的排放贡献有增长趋势.预测 2020 年 NO_x 排放量比 2014 年减少 1.1~6.3 万 t,降低 6%~37%.PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放主要来源于扬尘源和钢铁行业的排放,且随着房地产开发和轨道交通的快速发展,扬尘对颗粒物的排放有增长趋势,在未来几年内应加以重点控制.预测 2020 年 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放量比 2014 年分别减少 2.2~6.5 万 t 和 1.2~3.3 万 t,降低 14%~40%和 17%~46%.

2.3　空气质量变化预测

根据模型模拟结果,在 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 排

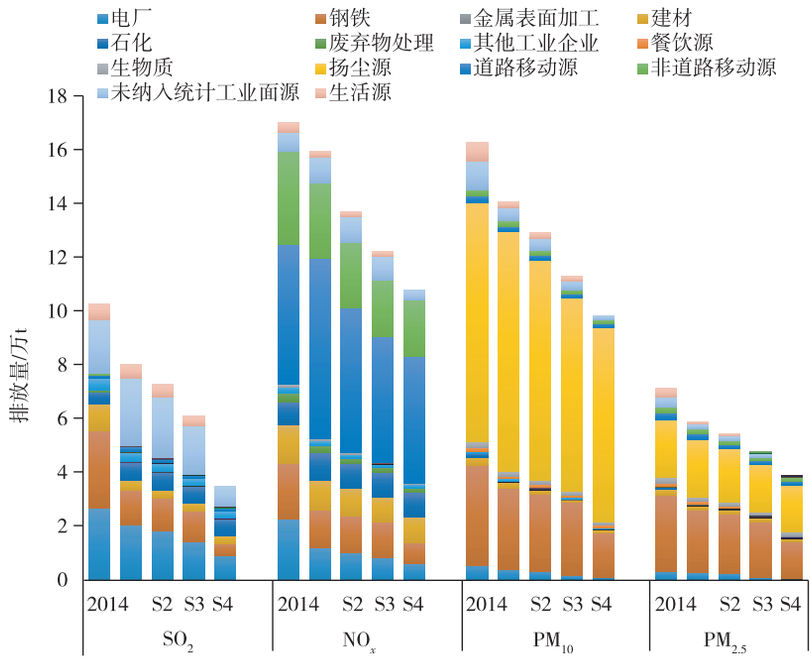


图 4　2020 年不同控制情景下主要大气污染物排放贡献

Fig. 4　Emission contribution of major air pollutants under different control scenarios in 2020

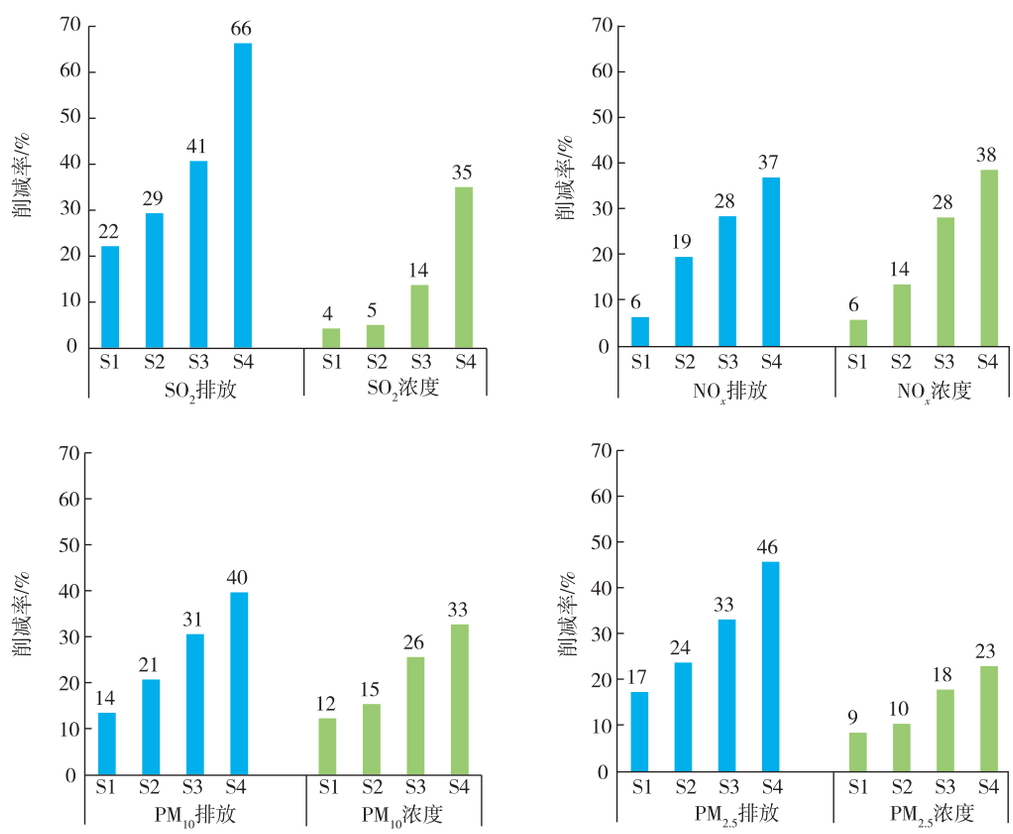


图 5　2020 年主要大气污染物排放量和年均浓度削减比例

Fig. 5　The reduction ratio of the emission and annual average concentration of major air pollutants in 2020

放量分在4种不同控制情景下,武汉市2020年SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$年均浓度相比基准年分别有一定程度的削减,如图5所示.根据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)评价,届时武汉市SO_2年均浓度均能达标,年均浓度比2014年下降4%~35%,且在最强控制情景(S4)下,SO_2年均浓度可达到环境空气质量一级标准.

由于机动车排放贡献增加,导致NO_2年均浓度略有上升,在强化控制情景(S3)和最强控制情景(S4)下,NO_2年均浓度可达到环境空气质量一级标准.2020年NO_x排放削减6%~37%时,NO_2年均浓度可降低6%~38%.

2020年PM_{10}排放量比2014年削减14%~40%时,可实现年均浓度降低12%~33%.在最强控制情景(S4)下PM_{10}年均质量浓度约为72 μg/m^3,不能达到环境空气质量二级标准.

2020年$PM_{2.5}$排放量比2014年削减18%~46%,可实现年均浓度降低9%~23%.在最强控制情景(S4)下$PM_{2.5}$年均质量浓度约为58 μg/m^3,不能达到环境空气质量二级标准.

2.4 不确定性分析

对于未来污染物的浓度预测,存在诸多不确定性因素.首先,由于基准和预测情景排放清单的不确定性,会给浓度预测结果引入误差;其次,众多研究发现,气象条件对污染物浓度起关键作用,气象要素有效的清除作用甚至可能超过减排措施的作用,而基准年和未来年份气象条件不一致,特别是在发生气候异常的年份,差异性将更大,因此气象条件带来的不确定性也会导致预测结果产生误差;再者,由于在现有的模拟框架中,未考虑氨排放对大气$PM_{2.5}$的影响,而欧美的经验表明,当SO_2和NO_x减排深入到一定阶段后,NH_3的排放将在二次无机气溶胶的形成过程中起决定性的作用,因此,必须在对SO_2、NO_x、一次PM、VOCs进行持续深入减排的同时,尽快把对氨的排放控制提上日程,才有可能在2020年使武汉市的PM_{10}和$PM_{2.5}$年均浓度达到国家环境空气质量标准.

3 结论

1)NAQPMS模型对武汉市大气环境中污染物的形成与输送过程具有较强的模拟能力.

2)《达标规划》大气污染治理措施全部实施后,SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$预计将分别减少2.3~6.8、1.1~6.3、2.2~6.5、1.2~3.3万t,比2014年分别下降22%~66%、6%~37%、14%~40%和17%~46%.

3)排放清单和空气质量模型自身的不确定性,可能会使模拟结果产生一定误差.

4)《达标规划》大气污染治理措施全部实施后,武汉市空气质量将有所改善,但二氧化氮和颗粒物浓度仍不能达到环境空气质量二级标准.燃煤消耗量和机动车保有量的增长,将抵消治理带来的空气质量改善效果,甚至可能引起环境空气质量持续恶化.因此建议,除了严格落实各项减排政策以外,还需进一步加强区域联防联控.

参考文献

References

[1] 中华人民共和国生态环境部.2017年中国生态环境状况公报[EB/OL].[2018-05-31].http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China's ecological environment bulletin in 2017[EB/OL].[2018-05-31].http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/

[2] 张帆.武汉大气$PM_{2.5}$的化学特性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

[3] 陈楠,全继宏,田一平,等.灰霾期间武汉城市区域大气污染物的理化特征[J].中国环境监测,2016,32(2):20-25
CHEN Nan, QUAN Jihong, TIAN Yiping, et al. The physical and chemical properties of atmospheric pollutant in Wuhan urban area during the haze[J].Environmental Monitoring in China,2016,32(2):20-25

[4] 武汉市环境保护局.2017年武汉市环境质量状况公报[EB/OL].[2018-05-30].http://hbj.wuhan.gov.cn/hbHjzkgb/29772.jhtml
Wuhan Environmental Protection Bureau.Wuhan environmental quality bulletin in 2017[EB/OL].[2018-05-30].http://hbj.wuhan.gov.cn/hbHjzkgb/29772.jhtml

[5] 张帆,成海容,王祖武,等.武汉秋季灰霾和非灰霾天气细颗粒物$PM_{2.5}$中水溶性离子的特征[J].中国粉体技术,2013,19(5):31-33
ZHANG Fan,CHENG Hairong,WANG Zuwu,et al.Characteristics of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ during haze and non-haze periods in autumn in Wuhan[J].China Power Science and Technology,2013,19(5):31-33

[6] Cheng H R,Gong W,Wang Z W,et al.Ionic composition of submicron particles ($PM_{1.0}$) during the long-lasting haze period in January 2013 in Wuhan, central China [J].Journal of Environmental Sciences,2014,26(4):810-817

[7] Zhong Z,Hu K,Huang Z,et al.Characteristic analysis of OC and EC in $PM_{2.5}$ of typical haze weather in Wuhan

City[J]. Meteorological and Environmental Research, 2014 5(4):19-22
[8] Zhang F, Wang Z W, Cheng H R, et al. Seasonal variations and chemical characteristics of $PM_{2.5}$, in Wuhan, central China[J]. Science of the Total Environment, 2015,518/519:97-105
[9] Gong W, Zhang T, Zhu Z, et al. Characteristics of $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, and PM_{10}, and their relation to black carbon in Wuhan, central China[J]. Atmosphere, 2015, 6(9): 1377-1387
[10] Lyu X, Chen N, Guo H, et al. Chemical characteristics and causes of airborne particulate pollution in warm seasons in Wuhan, central China[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2016, 16(16):1-35
[11] 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
[12] 黄超,赵锦慧,何超,等.2015 年秋冬季武汉城区黑碳气溶胶的分布及源区分析[J].生态环境学报,2018,27(3):542-549
HUANG Chao, ZHAO Jinhui, HE Chao, et al. The analysis of distribution and source area of black carbon aerosol in Wuhan city in autumn and winter of 2015[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(3): 542-549
[13] 成海容,王祖武,冯家良,等.武汉市城区大气 $PM_{2.5}$ 的碳组分与源解析[J].生态环境学报,2012,21(9):1574-1579
CHENG Hairong, WANG Zuwu, FENG Jialiang, et al. Carbonaceous species composition and source apportionment of $PM_{2.5}$ in urban atmosphere of Wuhan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9):1574-1579
[14] 卢苗苗,唐晓,王自发,等.武汉地区 2014 年 $PM_{2.5}$ 时空分布与来源贡献的数值模拟研究[J].环境科学学报,2017,37(11):4227-4240
LU Miaomiao, TANG Xiao, WANG Zifa, et al. Investigating the spatial-temporal distribution of the $PM_{2.5}$ over Wuhan in 2014 and quantifying the contributions from different source regions with both observation and model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(11):4227-4240
[15] 高正旭,王晓玲,向华,等.武汉市 2014—2017 年大气污染物分布特征及其潜在来源分析[J].环境科学学报,DOI:10.13671/j.hjkxxb.2018.0276
GAO Zhengxu, WANG Xiaoling, XIANG Hua, et al. Variation characteristics and potential sources of air pollutants during 2014 - 2017 in Wuhan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0276
[16] 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, WNAG Xiquan, et al. Development and application of nested air quality prediction modeling system[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5):778-790
[17] Odum J R, Jungkamp T P W, Griffin R J, et al. The atmospheric aerosol-forming potential of whole gasoline vapor[J]. Science, 1997, 276(5309):96-99
[18] 罗淦,王自发.全球环境大气输送模式(GEATM)的建立及其验证[J].大气科学,2006,30(3):504-518
LUO Gan, WANG Zifa. A global environmental atmospheric transport model (GEATM): model description and validation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(3):504-518
[19] Athanasopoulou E, Tombrou M, Pandis S N, et al. The role of sea-salt emissions and heterogeneous chemistry in the air quality of polluted coastal areas[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(19):5755-5769
[20] Li J, Wang Z F, Huang H L, et al. Assessing the effects of transboundary aerosol transport between various city clusters on regional haze episodes in spring over East China[J]. Tellus B, 2013, 65(1):60-73
[21] Kurokawa J, Ohara T, Morikawa T, et al. Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000 - 2008: regional emission inventory in asia (REAS) version 2[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2013, 13(21):11019-11058
[22] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980 - 2020[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2007, 7(16):6843-6902

Forecast of changing air pollution trends in Wuhan city

QIU Peipei[1] TANG Xiao[2] LU Miaomiao[2] HUANG Yu[1] ZHOU Junrui[1]
1 Wuhan Institute of Environmental Protection Science, Wuhan 430015
2 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on the emission inventory of air pollution sources in Wuhan in 2014, and information from Planning of Urban Air Quality Compliance in Wuhan (2013-2027), SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ emissions can be reduced by controlling the establishment of 'two high' industries, managing pollution sources, eliminating backward

productivity, and controlling the motor vehicle population. An environmental effect simulation was conducted by applying the Nested Air Quality Prediction Modeling System (NAQPMS). The results indicated that if the Compliance Plan was implemented as intended, the SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ emissions in Wuhan in 2020 will decline by 22%-66%, 6%-37%, 14%-40%, and 17%-46%, respectively, as compared to 2014. Thus, air quality in Wuhan will improve. However, the annual concentrations of NO_2, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ will still not comply with the Grade II Ambient Air Quality Standard.

Key words Wuhan; forecast; nested air quality prediction modeling system (NAQPMS); air quality