

何玉洁, 安静宇, 程真, 等. 上海市一次PM_{2.5}重污染事件的管控效果评估[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(7): 172-182. He Yujie, An Jingyu, Cheng Zhen, et al. Evaluation of PM_{2.5} control effect during a heavy air pollution episode in Shanghai[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(7): 172-182.

上海市一次PM_{2.5}重污染事件的管控效果评估

何玉洁¹, 安静宇^{2,3}, 程真^{1*}, 罗李娜¹, 黄成²

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233;
3. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘要: 该研究根据上海市《空气重污染专项应急预案》和《环境保护与生态建设“十三五”规划》的减排措施细则对主要大气污染物的减排量进行了测算, 利用WRF-CMAQ空气质量模式系统对2015年1月7-12日的一次典型PM_{2.5}重污染过程进行了管控效果的模拟研究, 在此基础上, 基于观测数据对模拟结果进行了修正。模拟结果显示, 应急情景和“十三五”情景下, PM_{2.5}的削减率分别为6%和14%, 其中有机颗粒物的削减率最大为8%和23%, 元素碳的削减率次之分别为5%和23%, 硫酸根的削减率分别为4%和8%, 硝酸根分别为2%和8%, 铵根分别为0%和4%。污染物的区域传输削弱了上海市重污染的改善效果, 开展大气污染区域联防联控是进一步重污染削减的重点。修正结果显示, 应急措施下, 污染预警从橙色降至黄色。在“十三五”措施下, 污染预警从橙色降至蓝色。该研究通过典型案例分析了典型城市群局地排放管控对重污染的改善效果, 基于观测的修正方法有望推广于其他区域的管控措施评估工作中。

关键词: 空气重污染; PM_{2.5}; WRF-CMAQ; 应急预案; “十三五”环境规划

中图分类号: X513 文献标志码: A doi: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.07.029 文章编号: 1003-6504(2018)07-0172-11

Evaluation of PM_{2.5} Control Effect during a Heavy Air Pollution Episode in Shanghai

HE Yujie¹, AN Jingyu^{2,3}, CHENG Zhen^{1*}, LUO Lina¹, HUANG Cheng²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Academy of Environmental Science, Shanghai 200233, China;
3. School of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The amount of emission reduction was estimated according to Shanghai Air Pollution Emergency Plan and the 13th five-year Plan of Environmental Protection and Ecological Construction. The WRF-CMAQ modeling system was used to simulate a heavy air pollution episode and its control scenarios from January 7th to 12th, 2015. The observation data were used to revise the simulation results. The simulation results indicate that under Emergency Plan and 13th five-year plan, PM_{2.5} would be reduced by 6% and 14% respectively. For specific PM_{2.5} compositions, organic matter gets the maximum reduction ratios 8% and 23% respectively, followed by elemental carbon 5% and 23%, sulfate with 4% and 8%, 2% and 8% for nitrate, 0% and 4% for ammonium. Pollutant transport might weaken the improvement of PM_{2.5} pollution in Shanghai, inter-regional control is the key to further control PM_{2.5} pollution. The revising results indicate that under the Emergency Plan, the pollution warning level would decline from orange to yellow. Under the 13th five-year plan, the pollution warning level would decline from orange to blue. In this study, the effect under local emission control during heavy pollution episode was analyzed for a typical city, the revising method based on observation data sets is expected to be applied in other studies.

Key words: heavy air pollution; PM_{2.5}; WRF-CMAQ; emergency plan; 13th five-year plan

近年来,我国空气污染问题十分严峻,以细颗粒物PM_{2.5}污染为主要特征的区域性大气复合污染突出,是造成我国城市空气质量超标的主要原因^[1-4]。上海市是我国经济活动总量最大的城市^[5],巨大的能源消

耗量和高密度的污染排放使上海市秋冬季PM_{2.5}重污染频繁发生^[6,7]。为控制PM_{2.5}重污染,上海市在2014年发布了《空气重污染专项应急预案》,以期在短时间内降低PM_{2.5}重污染的危害,同时在2016年出台了《上

《环境科学与技术》编辑部: (网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2018-01-05; 修回 2018-02-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208700)

作者简介: 何玉洁(1992-),女,硕士研究生,主要从事细颗粒物污染控制研究,(电子信箱)heyujie416@gmail.com; *通讯作者,(电子信箱)chengz88@sjtu.edu.cn。

海市环境保护与生态建设“十三五”规划》,围绕能源、产业、交通、建设等重点领域进一步深化强化防控措施,加快改善空气质量。开展污染控制措施的效果评估工作能够定量分析此类短期与长期措施对PM_{2.5}的削减程度,对评估各种措施的科学有效性,指导未来污染治理方案的制定和实施具有重要意义^[8]。

目前,减排效果评估研究工作主要基于观测和模型这2种方法。观测法使用观测数据进行措施效果评估,多用于重大赛事空气质量保障措施的评估^[9-11],但存在着较多的缺陷,如数据时空分辨率低,无法对未实施或未完成的措施进行预测评估,无法排除减排措施实施前后的气象条件、污染物本底浓度等要素的变化对评估结果产生的误差。第三代空气质量模型基于“一个大气”理论^[12],以污染物排放量、气象因素等数据作为输入参数,将天气系统中、小尺度气象过程对污染物的输送、扩散、转化和迁移过程的影响融为一体考虑^[13,14],能够得到高时空分辨率的污染物数据,同时兼具预测预报和控制变量等优势,在评估工作中得到广泛应用,如王凌慧等^[15]利用嵌套网格空气质量预报模式系统(NQAPMS)评估了《北京市空气重污染应急预案》预警一级的实施对重污染过程中PM_{2.5}的削减效果,结果表明仅靠北京本地限排限产并不能有效降低PM_{2.5}浓度。李莉等^[16]采用WRF(天气预报模式)-CMAQ(多尺度空气质量模式系统)对长三角地区清洁空气行动计划(2013-2017年)实施后区域PM_{2.5}的改善效果进行了模拟评估,在弱、中、强3种减排方案下,长三角地区PM_{2.5}年均浓度分别下降了8.7%、15.9%、24.3%。上述研究主要针对PM_{2.5}总体改善效果进行分析,而较少关注PM_{2.5}各组分的削减情况,另外尽管空气质量模式对污染物时空分布及变化趋势具有较好的预报能力^[17],但普遍存在结果偏差及峰值模拟差的问题^[18],以往研究直接基于模型模拟结果对污染物的浓度水平进行分析会有较大误差,针对模拟结果的修正研究主要有两大方向,其一是从模型内部出发完善气象、清单、化学机制等模块,提高模拟结果的准确性^[19]。其二是从模型外部出发,采用观测数据对模型模拟结果进行修正^[20,21]。

本研究将以WRF-CMAQ模式系统为基础,选取2015年1月7-12日的一次典型重污染过程,以《上海市空气重污染专项应急预案》中的重污染I级应急响应措施为区域短期空气污染减排措施,《上海市环境保护与生态建设“十三五”规划(2016-2020)》中的大气污染物控制措施为区域长期空气污染减排措施,分别开展PM_{2.5}及其组分的削减效果模拟评估工作,并以城市中心上海市环科院超级站为分析案例,利用模拟值

与观测值的相关性从模型外部出发对模型模拟结果进行修正,将修正结果运用于评估方法中,以期客观地分析评价PM_{2.5}重污染的改善情况。

1 研究方法

1.1 模式及参数设置

本研究采用中尺度天气数值预报系统WRFv3.7.0进行气象场的模拟,采用第三代多尺度欧拉空气质量模型Models-3/CMAQv5.0.2进行空气质量的模拟。CMAQ模型的气象化学模块采用CB05_tucl1机制,气溶胶模块选择AERO6机制,热力学模块为ISORROPIA II,云雾模块选用ACM_AE6机制。WRF-CMAQ模式采用三层网格嵌套方式:最外层模拟区域分辨率为36 km×36 km,覆盖我国全境及日本、韩国等东亚地区;第二层区域分辨率为12 km×12 km,覆盖我国东部区域;最内层为研究区域如图1所示,分辨率为4 km×4 km,覆盖江苏省、上海市、浙江省全境,安徽省大部分,江西省东南部,图中红色标记处为上海市环科院超级观测站位置。模拟区域垂直方向采用sigma坐标系,CMAQ模式从地面到高空不均等划分为14层,最顶层压强为5 000 Pa。



图1 CMAQ模拟研究区域示意图

Fig.1 Domain for CMAQ simulation and research

1.2 PM_{2.5}重污染模拟情景设置

2015年1月上海市空气污染严重,其中9-11日PM_{2.5}日均浓度分别为151.4、174.8、193.3 μg/m³,对应的空气质量指数AQI分别为201、225、243,达到重污染天气标准(AQI>200),属于上海市重污染预警中的橙色预警。本研究选取2015年1月7-12日的重污染生消过程开展研究,该过程下PM_{2.5}及其组分浓度观测值如图2所示,重污染时段污染物浓度相较于清洁时段显著增大,通过对整个污染时段浓度进行积分计算

可得,未鉴别成分占PM_{2.5}比例较大为35%,其次是有机物(OM)(1.4×OC)^[22]占24%,硝酸根(NO₃⁻)占17%,铵根(NH₄⁺)占11%,硫酸根(SO₄²⁻)占10%,元素碳(EC)占3%。本研究总共设置3种模拟情景,分别为基础情景,上海市重污染I级应急减排情景和上海市“十三五”环境规划减排情景,这3种模拟情景采用同一气象条件,即2015年1月7-12日PM_{2.5}重污染发生时的实际气象条件,基础情景为重污染期间上海市的实际排放情况。本研究所使用的排放清单由上海市环境科学研究院提供,基准年份为2014年。减排情景主要涉及排放清单中的6类排放源:移动源、生活源、扬尘源、农业源、工业源、电厂源。移动源主要包括汽油车尾气、柴油车尾气、船舶飞机尾气排放;生活源为民用燃烧排放;扬尘源为道路扬尘、建筑扬尘、堆场扬尘等;农业源包括畜禽养殖、化肥施用、生物质燃烧排放等;工业源包含钢铁、焦化、水泥生产、石化和化工等行业污染排放;电厂源主要指电厂污染物的排放。减排情景分别针对上述6类源的主要污染物二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、挥发性有机化合物(VOCs)、氨气(NH₃)和一次PM_{2.5}进行削减。

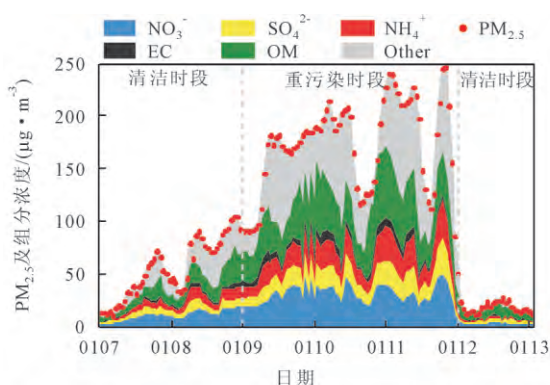


图2 上海市2015年1月7-12日PM_{2.5}及其组分浓度观测值
Fig.2 Observations of PM_{2.5} and its compositions from Jan. 7th to 12th, 2015 in Shanghai

1.3 PM_{2.5}及其组分模拟结果修正方法

由于模型模拟误差的存在,以往的研究在对PM_{2.5}削减效果进行评估时,往往难以准确分析减排后污染物的实际浓度水平,而以模拟数据计算得到的削减率作为评估措施效果的主要依据^[15,16],即用污染物浓度模拟数据的降低程度代表污染物浓度的真实降低程度进行评估,该依据可以用式(1)来表示:

$$\frac{C_{\text{obs}}(A) - C_{\text{obs}}(B)}{C_{\text{obs}}(A)} = \frac{C_{\text{sim}}(A) - C_{\text{sim}}(B)}{C_{\text{sim}}(A)} \quad (1)$$

式(1)中,A代表基础情景,B代表减排情景。左式为使用污染物浓度观测数据计算削减率的算式,右式为使用污染物模拟数据计算削减率的算式。该式进行转化后等同于更为简洁的式(2):

$$\frac{C_{\text{obs}}(B)}{C_{\text{obs}}(A)} = \frac{C_{\text{sim}}(B)}{C_{\text{sim}}(A)} \quad (2)$$

依据式(2)给出的关系式,可由基础情景下污染物浓度的观测数据 $C_{\text{obs}}(A)$ 和模拟数据 $C_{\text{sim}}(A)$ 及减排情景下污染物浓度的模拟数据 $C_{\text{sim}}(B)$,计算得到减排情景下污染物浓度的近似观测值 $C_{\text{obs}}(B)$,本研究将以此近似值作为污染物浓度模拟值的修正值,并用此修正结果来评估措施实施后污染物的浓度水平。考虑到PM_{2.5}及其组分模拟效果的差异性,为提高修正结果的准确性,先对PM_{2.5}各组分进行单独修正,以观测数据中的元素碳(EC)、硫酸根(SO₄²⁻)、硝酸根(NO₃⁻)、铵根(NH₄⁺)、有机物(OM)和未鉴别组分(Other)的观测值分别对应模拟值中的相应组分,按修正关系式使用同一时刻下的基础情景的组分观测值与模拟值分别对重污染I级应急情景和“十三五”环境规划情景的PM_{2.5}组分模拟数据进行修正,再将修正后的组分浓度加和得到PM_{2.5}总量的小时浓度修正结果。

2 结果与分析

2.1 上海市重污染I级应急情景和“十三五”环境规划情景主要污染物减排方案

基础情景(BAU)的污染物排放量,上海市重污染I级应急减排情景(case1)和上海市“十三五”环境规划减排情景(case2)的污染物削减量及削减百分比比例见表1。上海市2014年细颗粒物气态前体物二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、挥发性有机化合物(VOCs)、氨气(NH₃)的年排放量分别为102.0、244.8、515.9、59.5 kt,一次PM_{2.5}排放量为116.5 kt。

根据《上海市空气重污染专项应急预案》I级应急措施细则,上海市I级应急措施主要涉及能源、工业、交通、建筑等领域。针对电厂污染物的排放,主要采取组织应急天然气资源,协调应急用气供应,所有并网燃煤机组选用优质煤发电等措施,经测算对SO₂和NO_x的削减量分别为2.2和1.7 kt,削减比例为12%和5%。工业部门是应急预案重点管控领域,对于石化、钢铁、化工、水泥等涉及大气污染排放的重点企业要求合理安排生产计划,采取限产或停产等措施并确保污染治理设施高效运行,对于大气污染物排放量较大的企业采取阶段性停产措施,涉及企业数量超过500家,经测算对SO₂、NO_x、VOCs、一次PM_{2.5}的削减量分别为7.0、4.0、105.1、3.4 kt,削减比例分别为11%、4%、25%、7%。交通领域采取禁止工程渣土、混凝土搅拌、散装建筑材料车辆上路行驶,停驶50%公务用车,强化非道路移动机械管控力度,增加国三重型柴油车管控要求等措施,经测算对移动源的NO_x、VOCs、一

表1 PM_{2.5}重污染基础情景污染物排放量及减排情景污染物削减量和削减百分比
Table 1 Base scenario's emissions and case scenarios' emission reductions and reduction percentages

行业源类	情景设置	SO ₂ /kt	NO _x /kt	VOCs/kt	NH ₃ /kt	一次PM _{2.5} /kt
电厂	BAU排放量	18.3	33.9	1.2	0.6	2.5
	case1 削减量	2.2 (12%)	1.7 (5%)	-	-	-
	case2 削减量	6.6(36%)	9.2(27%)	-	-	0.7 (26%)
工业源	BAU排放量	63.5	99.4	420.4	6.5	48.6
	case1 削减量	7.0(11%)	4.0 (4%)	105.1 (25%)	-	3.4 (7%)
	case2 削减量	29.2 (46%)	39.8 (40%)	214.4 (51%)	0.8 (12%)	15.6 (32%)
移动源	BAU排放量	9.0	106.1	63.5	2.4	10.7
	case1 削减量	-	13.8 (13%)	2.5 (4%)	-	0.4 (4%)
	case2 削减量	4.6 (51%)	15.9 (15%)	13.9 (22%)	-	4.5 (42%)
扬尘源	BAU排放量	/	/	/	/	41.6
	case1 削减量	-	-	-	-	11.6 (28%)
	case2 削减量	-	-	-	-	4.6 (11%)
生活源	BAU排放量	11.3	0.54	14.1	2.7	5.9
	case1 削减量	-	-	-	-	-
	case2 削减量	-	-	4.4 (31%)	-	3.9 (66%)
农业源	BAU排放量	/	/	8.3	35.3	0.2
	case1 削减量	-	-	-	-	-
	case2 削减量	-	-	-	18.4 (52%)	-

注:/为未排放;-为未削减;case1为上海市I级重污染应急情景;case2为上海市“十三五”环境规划情景。括号内数值为削减百分比。

次PM_{2.5}的削减量分别为13.8、2.5、0.4 kt, 削减比例分别为13%、4%、4%。对于扬尘源的控制, 主要措施有停止所有建筑施工、房屋拆迁、市政和道路施工及喷涂等室外作业, 做好物料码头和道路的洒水降尘工作等, 经测算对一次PM_{2.5}的削减量为11.6 kt, 削减比例为28%。重污染I级应急情景各主要污染物SO₂、NO_x、VOCs、NH₃和一次PM_{2.5}的总减排量分别为9.2、19.5、107.6、0、15.5 kt, 占总排放量的比例分别为9%、8%、21%、0%、13%。

《上海市环境保护和生态建设“十三五”规划》要求全面落实清洁空气行动计划要求, 在2016-2020年这5年内围绕能源、产业、交通、建设等重点领域, 深化强化防控措施, 污染物削减力度相对于应急预案显著提高。在电厂方面强化总量控制和结构优化, 实施全市能源消耗和煤炭消耗双总量控制, 完成全市所有30万kW以上公用燃煤机组超低排放改造, 推进企业自备电厂燃煤机组清洁化改造, 全面取消分散燃煤, 到2020年, 全市能源消耗总量控制在1.25亿t标准煤以内, 天然气占一次能源比重提高12%, 非化石能源占一次能源比例达13%左右, 市外来电占总用电比重保持在40%左右, 经测算对SO₂、NO_x、一次PM_{2.5}的削减量分别为6.6、9.2、0.7 kt, 削减比例分别为36%、27%和26%。工业领域的主要任务是全面推进石化、化工、涂料、涂装、印刷等重点行业VOCs的综合治理, 落实泄漏检测与修复和开停工检修期间的VOCs控制措施, 推进汽车涂装、船舶涂装、油墨生产等行业的废气达

标排放治理, 实施重点行业VOCs排污收费试点, 同时深化大气污染物协同控制, 实施污染物排放总量和排放浓度控制相结合的管理制度, 推进燃气(油)锅炉低氮改造, 经测算到2020年, SO₂、NO_x、VOCs、NH₃、一次PM_{2.5}将分别下降29.2、39.8、214.4、0.8、15.6 kt, 削减比例分别为46%、40%、51%、12%和32%。上海市“十三五”环境规划要求加强移动源污染治理, 实施小客车总量控制, 提前实施新车国六排放标准, 推进国三排放公交、运输车等老旧车辆改装或更换尾气后处理装置等, 同时推进绿色交通体系建设, 坚持公交优先发展战略, 推广使用清洁能源和新能源汽车, 到2020年全市新能源公交车达到50%以上, 公共充电桩超过2.8万个, 以上举措经测算对SO₂、NO_x、VOCs、一次PM_{2.5}的削减量分别为4.6、15.9、13.9、4.5 kt, 削减比例分别为51%、15%、22%、42%。扬尘源削减主要是对施工扬尘、堆场扬尘、道路扬尘等进行控制, 经测算对一次PM_{2.5}的削减量为4.6 kt, 削减率为11%。生活领域主要针对废水、固废处理过程、存储运输、餐饮油烟、汽修行业等方面进行整治, 经测算对VOCs和一次PM_{2.5}的削减量分别为4.4、3.9 kt, 削减比例为31%和66%。农业领域主要针对畜禽养殖、肥料施用、秸秆燃烧等方面进行控制, 经测算对NH₃的削减量为18.4 kt, 削减比例为52%。上海市“十三五”环境规划情景各主要污染物SO₂、NO_x、VOCs、NH₃和一次PM_{2.5}的5类源总减排量分别为40.4、64.8、232.7、19.1、29.2 kt, 占总排放量的比例分别为40%、26%、45%、32%、25%。

2.2 基础情景模拟结果验证

上海市环境科学研究院超级观测站位于上海市中心徐汇区,本文选取该站点2015年1月7-12日PM_{2.5}及其组分的小时浓度观测数据进行基础情景模式模拟结果验证,小时浓度对比如图3所示。由图3可见,CMAQ模型能较好地再现元素碳(EC)、有机物(OM)、铵根(NH₄⁺)、硝酸根(NO₃⁻)、硫酸根(SO₄²⁻)和PM_{2.5}的污染水平和变化趋势,其中组分元素碳(EC)、有机物(OM)、铵根(NH₄⁺)和硫酸根(SO₄²⁻)的模拟结果较好,但模拟值总体偏低,而硝酸根(NO₃⁻)的模拟值则大幅高于观测值,最终造成PM_{2.5}的模拟值偏高,其原因

因可能是上海市排放清单中NO_x排放量存在高估或时空分配处理上存在一定的误差。

表2为PM_{2.5}及其组分的模拟效果基于各项评价指标的计算结果,分别给出了MB(平均偏差)、ME(平均误差)、NMB(标准平均偏差)、NME(标准平均误差)、MFB(平均分数偏差)、MFE(平均分数误差)、RMSE(均方根误差)、IOA(一致性指标)和R(相关系数)。各要素的一致性指标IOA数值均>0.6,其中元素碳(EC)、有机物(OM)、硫酸根(SO₄²⁻)和PM_{2.5}的IOA数值均在0.9左右,可见模型整体表现良好,CMAQ模拟性能在可接受范围内。

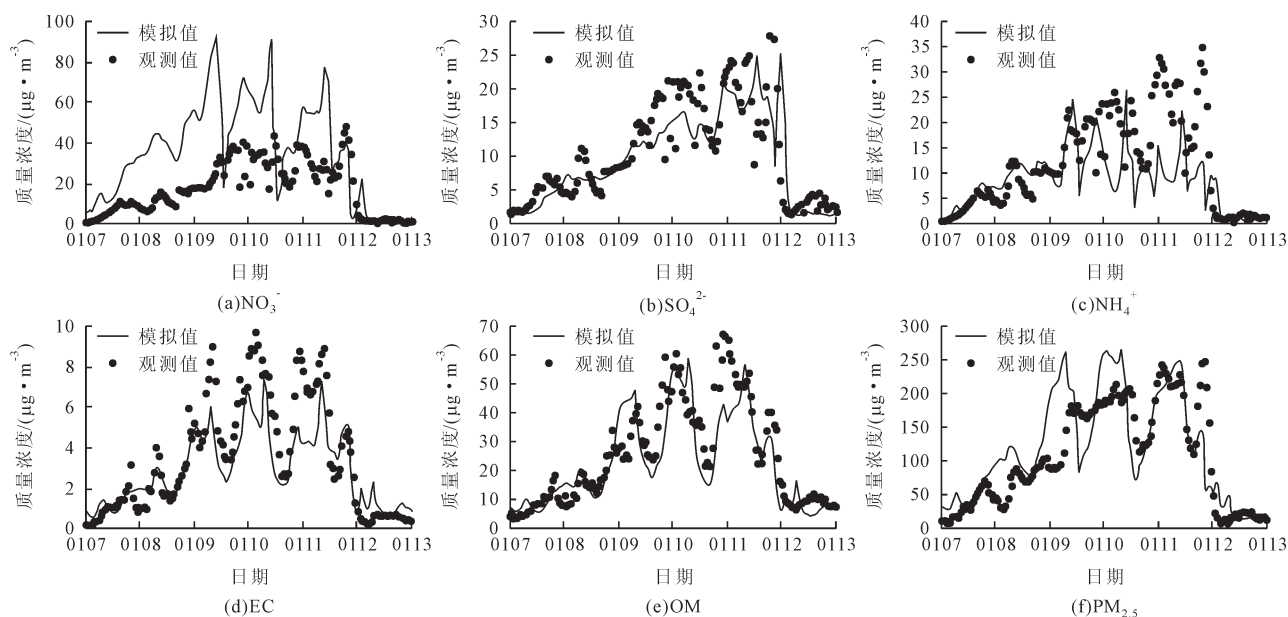


图3 2015年1月7-12日上海市PM_{2.5}及其组分模拟值与观测值小时浓度对比

Fig.3 Comparison of observations and simulations of PM_{2.5} and its compositions from Jan. 7th to 12th, 2015 in Shanghai

表2 PM_{2.5}及其组分模拟效果评价指标统计

Table 2 Statistics of hourly concentrations of PM_{2.5} and its compositions

要素	MB	ME	NMB	NME	MFB	MFE	RMSE	IOA	R
EC	-0.65	1.10	-0.18	0.31	0.05	0.28	1.52	0.89	0.92
NH ₄ ⁺	-2.92	5.16	-0.24	0.43	-0.11	0.34	7.77	0.73	0.63
NO ₃ ⁻	18.52	19.89	1.03	1.11	0.50	0.57	25.67	0.60	0.69
SO ₄ ²⁻	-1.03	3.26	-0.10	0.30	-0.08	0.25	4.72	0.88	0.79
OM	-2.98	7.03	-0.12	0.28	-0.06	0.22	9.83	0.91	0.85
PM _{2.5}	14.11	35.53	0.13	0.32	0.15	0.27	49.62	0.89	0.82

2.3 PM_{2.5}及其组分削减效果的模拟结果分析

本研究首先通过对比基础情景和重污染I级应急减排情景及“十三五”环境规划减排情景下上海市PM_{2.5}及其组分的模拟值,分析细颗粒物的削减量(图4);其次对两减排情景下PM_{2.5}及其组分的削减率进行分析(图5);然后对应急情景(图6(a))和“十三五”情景(图6(b))下PM_{2.5}各组分削减量堆积图进行整个模拟时段的积分计算,分析各组分对

PM_{2.5}削减量的贡献比例;最后对应急情景(图7(a))和“十三五”情景(图7(b))下PM_{2.5}及其组分的重污染过程(7-12日)平均削减率在整个长三角区域的分布进行分析。

硝酸根的主要前体物NO_x在重污染I级应急情景和“十三五”环境规划情景下的排放量削减比例分别为8%和26%。模拟值时间序列图(图4)显示,两情景下,重污染时段9-11日NO₃⁻日均浓度分别下降了2.0、

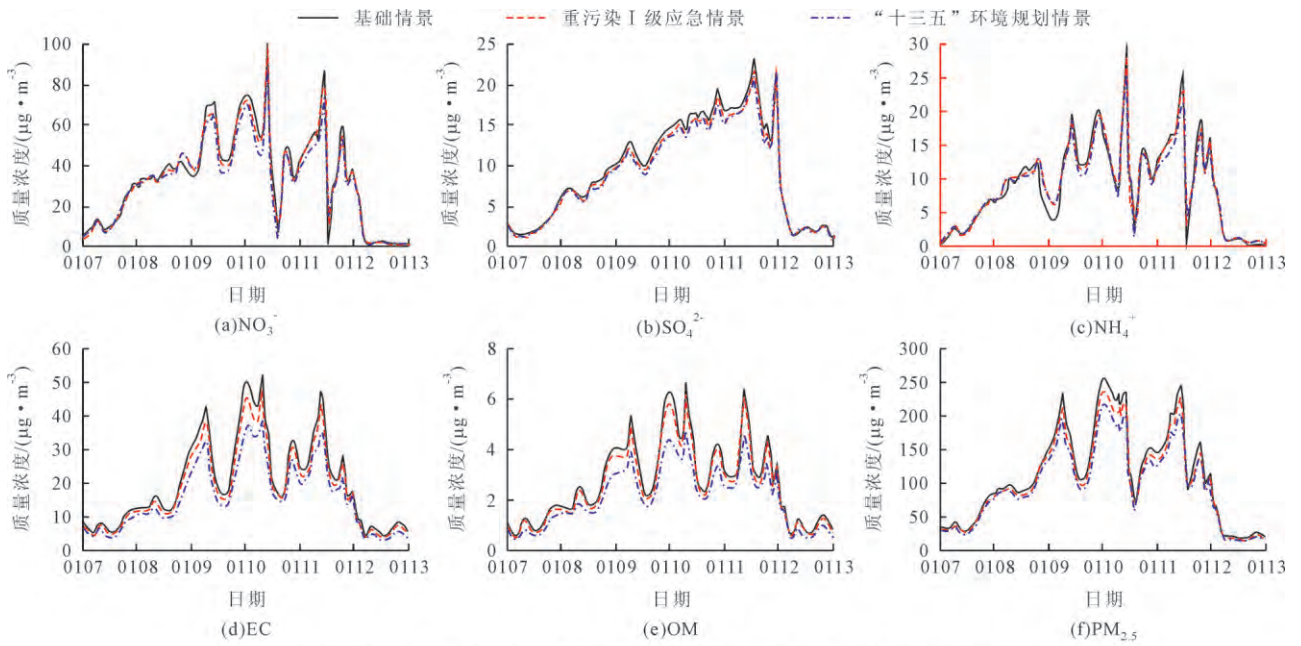


图4 上海市2015年1月7-12日减排情景下PM_{2.5}及其组分小时模拟值时间序列
 Fig.4 Hourly concentration of PM_{2.5} and its compositions in each scenario from Jan. 7th to 12th, 2015

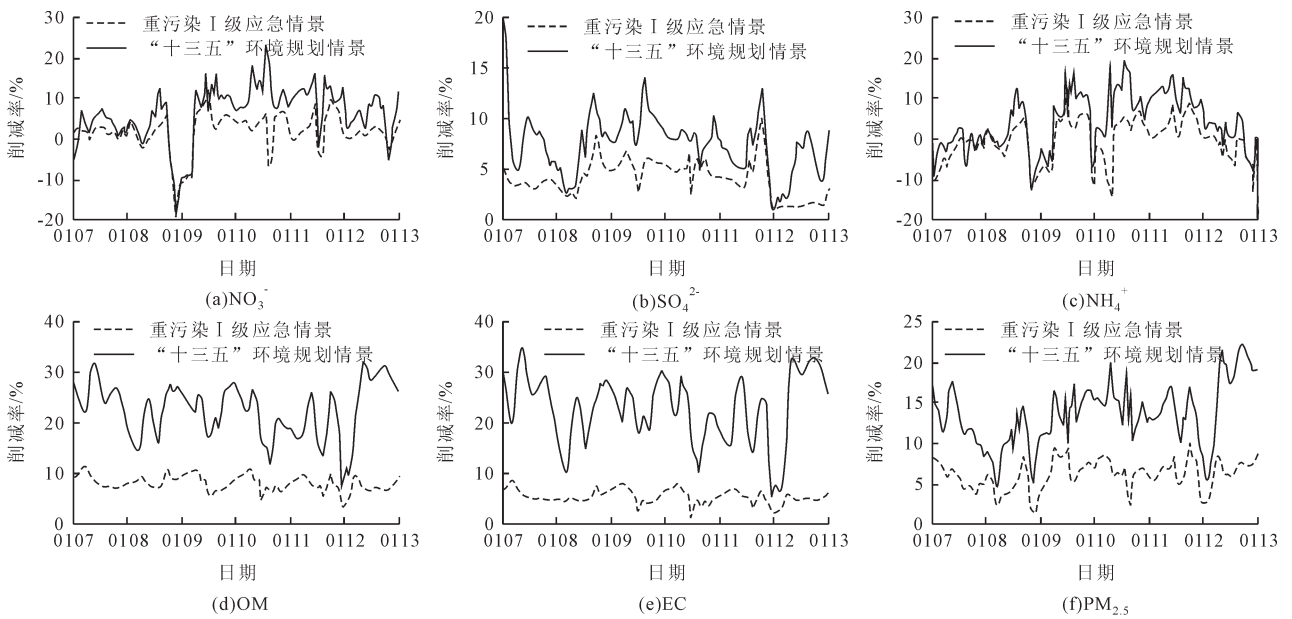


图5 上海市2015年1月7-12日减排情景下PM_{2.5}及其组分割减率时间序列
 Fig.5 Reduction ratio of PM_{2.5} and its compositions in each case scenario from Jan. 7th to 12th, 2015

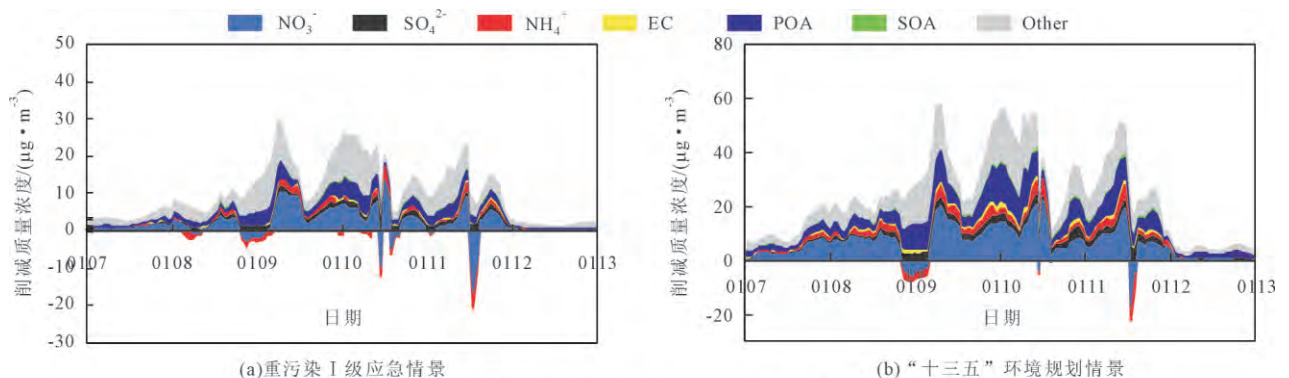


图6 上海市2015年1月7-12日减排情景下各组分对PM_{2.5}削减量的贡献面积图
 Fig.6 The stack area graph of the contribution of each PM_{2.5} composition to PM_{2.5} reduction under each case scenario from Jan. 7th to 12th, 2015

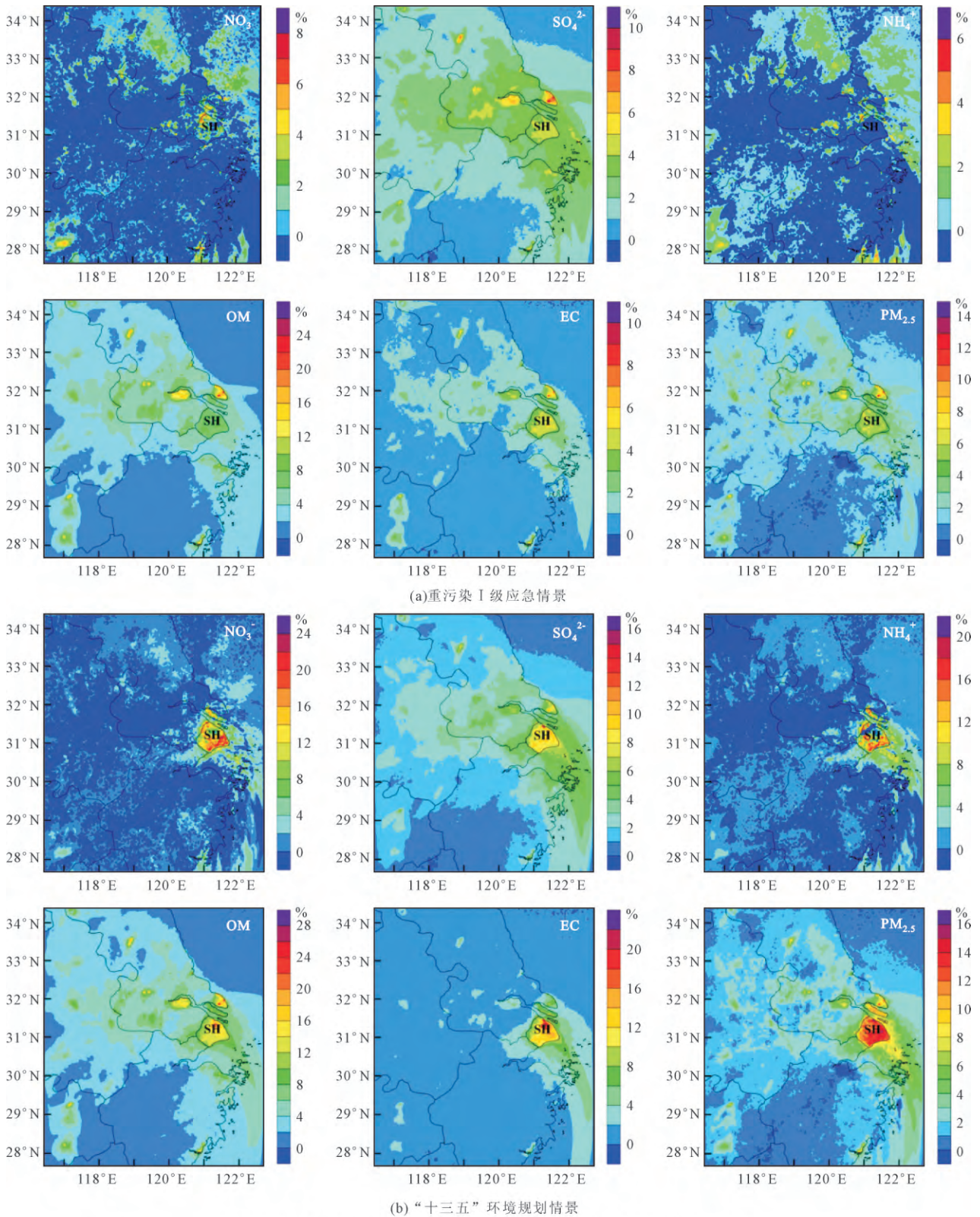


图7 减排情景下PM_{2.5}及其组分重污染时段平均削减率空间分布图
Fig.7 Spatial distribution of average reduction ratio of PM_{2.5} and its compositions in each case scenario

2.2、1.3 μg/m³和3.9、5.9、5.1 μg/m³。削减率时间序列图(图5)显示,NO₃⁻在两情景下的小时浓度削减率分别为-19%~13%和-18%~23%,时段平均削减率分别为2%和8%;两情景下NO₃⁻对PM_{2.5}削减量的贡献比分别为12%和18%(图6)。空间上,应急情景下(图7(a)),上海

市NO₃⁻的时段平均削减率最小值在0以下,最大值为8%,从整个模拟区域来看,上海市的削减效应扩散到了整个长三角区域,上海市及江苏省部分沿海及海面区域NO₃⁻浓度下降,其他区域NO₃⁻有所上升;“十三五”情景下(图7(b)),上海市NO₃⁻的时段平均削减率在

8%~24%之间,上海市及其周围小部分沿海地区NO₃⁻浓度下降,长三角其他大部分区域NO₃浓度有所上升。

硫酸根的主要前体物SO₂在重污染I级应急情景和“十三五”环境规划情景下的排放量削减比例分别为9%和40%。时间序列图显示,两情景下,重污染时段9-11日SO₄²⁻日均浓度分别下降了0.7、0.8、0.8 μg/m³和1.2、1.3、1.2 μg/m³。SO₄²⁻在两情景下的小时浓度削减率分别为1%~10%和1%~20%,时段平均削减率分别为4%和8%;两情景下SO₄²⁻对PM_{2.5}削减量的贡献比分别为7%和5%。空间上,两情景下上海市SO₄²⁻的时段平均削减率分别为3%~4%和6%~16%,从整个模拟区域来看,两情景下污染物的削减效应的扩散范围基本相同,除浙江省西北部以外,长三角其他大部分区域SO₄²⁻均有下降。

铵根的主要前体物NH₃在重污染I级应急情景和“十三五”环境规划情景下的排放量削减比例分别为0%和32%。时间序列图显示,两情景下,重污染时段9-11日NH₄⁺日均浓度分别下降了0、0、0.4 μg/m³和0.5、1.1、1.5 μg/m³。NH₄⁺在两情景下的小时浓度削减率分别为-14%~13%和-13%~19%,时段平均削减率分别为0%和4%;两情景下NH₄⁺对PM_{2.5}削减量的贡献比分别为-1%和3%。空间上,由于应急情景对NH₃没有削减,NH₄⁺的浓度分布仅受区域传输作用影响,东部海面 and 江苏省南部地区,NH₄⁺浓度下降,其他大部分区域浓度有所上升;“十三五”情景下,上海市NH₄⁺平均削减率最小值在0以下,最大值为20%,除上海市东部海面和江苏省北部等区域外,长三角大部区域NH₄⁺削减率<0。

有机物的主要来源于VOCs和一次PM_{2.5},其中一次有机物(POA)主要来源于一次PM_{2.5},二次有机物(SOA)主要由VOCs转化生成。VOCs和一次PM_{2.5}在重污染I级应急情景和“十三五”环境规划情景下的排放量削减比例分别为21%、13%和45%、25%。时间序列图显示,两情景下,重污染时段9-11日OM日均浓度分别下降了2.6、2.8、2.2 μg/m³和7.2、7.3、5.6 μg/m³。OM在两情景下的小时浓度削减率分别为3%~12%和1%~32%,时段平均削减率分别为8%和23%;重污染情景下,OM对PM_{2.5}削减量的贡献比为25%,其中POA占24%,SOA仅占1%。“十三五”情景下,OM对PM_{2.5}削减量的贡献比为30%,其中POA占29%,SOA仅占1%,该结果表明由于CMAQ的二次有机物生成机制十分不完善导致SOA的模拟出现非常大的误差^[23,24]。空间上,两情景下上海市OM的时段平均削减率分别为7%~9%和10%~24%,从整个模拟区域来看,“十三五”情景下污染物削减效应的扩散范围较应

急情景稍大,除浙江省西北部以外,两情景下长三角其他大部分区域OM均有下降。

元素碳的主要前体物一次PM_{2.5}在重污染I级应急情景和“十三五”环境规划情景下的排放量削减比例分别为13%和25%。时间序列图显示,两情景下,重污染时段9-11日EC日均浓度分别下降了0.2、0.2、0.2 μg/m³和1.0、0.9、0.8 μg/m³。EC在两情景下的小时浓度削减率分别为1%~9%和5%~35%,时段平均削减率分别为5%和23%;两情景下EC对PM_{2.5}削减量的贡献比分别为2%和4%。空间上,两情景下上海市EC的时段平均削减率分别为4%~5%和8%~24%,从整个模拟区域来看,应急情景下浙江省东部海面及江苏省北部地区EC浓度均有下降,“十三五”情景下污染物削减效应的扩散范围比应急情景小,只有浙江省东部海面受到影响。

时间序列图显示,两情景下,重污染时段9-11日PM_{2.5}日均浓度分别下降了12.2、12.0、9.3 μg/m³和24.4、25.6、20.8 μg/m³。PM_{2.5}在两情景下的小时浓度削减率分别为1%~10%和4%~22%,时段平均削减率分别为6%和14%。空间上,两情景下上海市PM_{2.5}的时段平均削减率分别为4%~7%和10%~16%,从整个模拟区域来看,“十三五”情景下污染物削减效应的扩散范围较应急情景稍大,除浙江省西北部以外,两情景下长三角其他大部分区域PM_{2.5}均有一定程度下降。

上述分析结果表明,相较于重污染情景,各组分在“十三五”情景下削减率均有上升,除硫酸根以外,各组分的对PM_{2.5}削减量的贡献均有上升,即未鉴别组分对PM_{2.5}削减量的贡献率有所降低。2种情景下,各组分削减率的大小顺序相同,均为OM>EC>SO₄²⁻>NO₃⁻>NH₄⁺,各组分对PM_{2.5}削减量的贡献大小顺序相同,均为OM>NO₃⁻>SO₄²⁻>EC>NH₄⁺。从时段平均削减率长三角区域分布图可以看到硝酸根和铵根削减率在整个模拟范围内同时出现了正负值,可能原因是污染物的区域传输导致各组分浓度区域分布产生变化,除此以外,细颗粒污染物的形成是一个十分复杂的过程,各前体物不仅有各自的反应过程且彼此之间相互影响,各组分的浓度与各自前体物的浓度之间是复杂的非线性关系。本研究仅对上海市进行了污染物的削减,而削减效应扩散到了长三角大部分区域,且不同组分因其化学性质、所占比重等不同,扩散区域和范围都不尽相同,这在一定程度上削弱了上海地区PM_{2.5}的削减率,使得2种情景下PM_{2.5}的削减率仅为6%和14%,因此有必要开展大气污染区域联防联控,以进一步推动空气质量的改善。

2.4 PM_{2.5}削减效果的修正结果分析

PM_{2.5}及其组分的修正结果如图8所示。从图中可以看到,修正后的组分浓度时间序列数据变化趋势相对于修正前的曲线更加接近观测数据的变化趋势,在基础情景模拟中浓度相对于观测值偏低的元素碳、有机物、硫酸根、铵根这4个组分经过修正后,浓度均有所上升,而浓度模拟值出现大幅度偏高情况的硝酸根在修正后,浓度曲线大幅下降。分别将重污染 I 级应急减排情景和“十三五”规划减排情景的PM_{2.5}组分浓度修正值加和得到2种情景下PM_{2.5}浓度的修正值,可以看出修正方法改善了PM_{2.5}模拟值偏高的情况,修正后PM_{2.5}浓度的变化趋势更加接近观测数据。综合上述分析可以认为,本研究所提出的模拟值修正方法能够降低模拟误差,缩小模拟值与观测值之间的差距,使修

正后的PM_{2.5}组分浓度模拟结果更能反映真实情况。

对比图8(a)中PM_{2.5}及其组分的基础情景观测值和重污染 I 级应急情景修正值可以看到,重污染时段9-11日,硝酸根日均浓度分别从27.3、30.3、29.6 μg/m³变化为26.2、29.3、32.8 μg/m³;硫酸根日均浓度分别从14.0、17.4、19.4 μg/m³降至13.2、16.5、18.4 μg/m³;铵根日均浓度分别从16.4、19.2、23.2 μg/m³变化为16.9、19.5、25.3 μg/m³;有机物日均浓度分别从34.7、44.2、40.7 μg/m³降至31.8、40.6、37.4 μg/m³;元素碳日均浓度分别从5.6、6.4、5.4 μg/m³分别降至5.2、6.1、5.1 μg/m³;PM_{2.5}日均浓度分别从151.4、174.8、193.3 μg/m³降至140.8、162.8、181.4 μg/m³,对应的空气质量指数(AQI)分别从201、225、243分别下降至187、213、231,

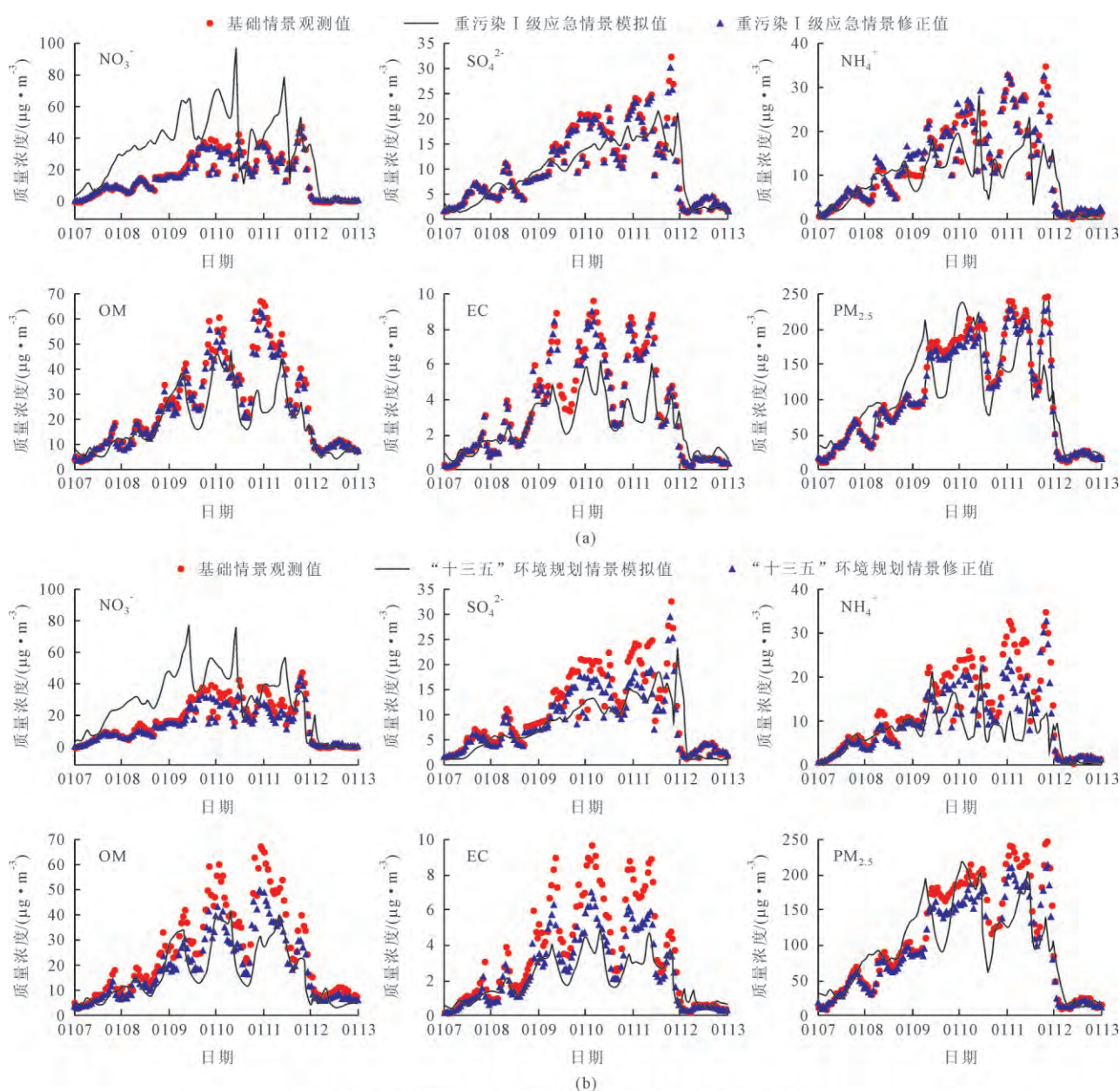


图8 减排情景下PM_{2.5}及其组分模拟值修正前后对比图
Fig.8 Comparison of PM_{2.5} composition's concentration before and after revision under each case scenario

重污染(AQI>200)天数从3 d降至2 d,按照上海市空气重污染专项应急预案规定,污染预警从橙色预警下降到了黄色预警,但PM_{2.5}重污染并没有得到有效控制,依然较为严重。

对比图8(b)中PM_{2.5}及其组分基础情景观测值和“十三五”环境规划情景修正值可以看到,重污染时段9-11日,硝酸根日均浓度分别从27.3、30.3、29.6 μg/m³变化为25.2、26.2、32.0 μg/m³;硫酸根日均浓度分别从14.0、17.4、19.4 μg/m³降至12.6、16.0、18.0 μg/m³;铵根日均浓度分别从16.4、19.2、23.2 μg/m³变化为16.3、17.5、24.4 μg/m³;有机物日均浓度分别从34.7、44.2、40.7 μg/m³降至26.4、34.8、32.7 μg/m³;元素碳日均浓度分别从5.6、6.4、5.4 μg/m³分别降至4.2、5.0、4.3 μg/m³;PM_{2.5}日均浓度分别从151.4、174.8、193.3 μg/m³降至130.0、149.0、167.4 μg/m³,对应的空气质量指数(AQI)分别从201、225、243分别下降至171、199、217,重污染天数从3 d降为1 d,按照上海市空气重污染专项应急预案规定,污染预警从橙色预警下降到了蓝色预警,污染预警虽然降低了2个等级,PM_{2.5}重污染得到了一定的控制,但从PM_{2.5}浓度及AQI数值来看,重污染仍然没有得到十分有效的控制。这说明仅对上海市进行了大力度的减排工作对于PM_{2.5}重污染的改善效果并不明显,开展污染物的区域联防联控十分必要。

3 结论

本研究以上海市2015年1月7-12日的重污染过程为研究对象,利用WRF-CMAQ模式系统对上海市重污染I级应急情景和上海市“十三五”环境规划情景的管控效果进行了模拟研究,并利用观测数据对模拟结果进行修正,得到以下结论。

(1)重污染I级应急措施对各主要污染物SO₂、NO_x、VOCs、NH₃和一次PM_{2.5}的总削减量分别为9.2、19.5、107.6、0、15.5 kt,占总排放量的比例分别为9%、8%、21%、0%、13%。上海市“十三五”环境规划大气污染控制措施对各主要污染物SO₂、NO_x、VOCs、NH₃和一次PM_{2.5}的总削减量分别为40.4、64.8、232.7、19.1、29.2 kt,占总排放量的比例分别为40%、26%、45%、32%、25%。

(2)应急情景和“十三五”情景下,PM_{2.5}的削减率分别为6%和14%,其中有机颗粒物的削减率最大为8%和23%,元素碳的削减率次之分别为5%和23%,硫酸根的削减率分别为4%和8%,硝酸根分别为2%和8%,铵根的削减率分别为0%和4%。两情景下,有机颗粒物对PM_{2.5}削减量的贡献比例最大为25%和30%,

硝酸根次之分别为12%和18%,硫酸根的贡献比例分别为7%和5%,元素碳的贡献比例为2%和4%,铵根的贡献比例为-1%和3%。重污染过程中区域的污染物传输可能削弱了上海市重污染的改善效果,开展大气污染区域联防联控是进一步重污染削峰的重点。

(3)PM_{2.5}组分修正方法能够有效降低模拟误差并使得组分浓度变化趋势与观测值更加接近。PM_{2.5}削减的修正结果显示,重污染I级应急措施下,重污染时段9-11日的日均浓度分别从151.4、174.8、193.3 μg/m³降至140.8、162.8、181.4 μg/m³,污染预警从橙色预警下降到了黄色预警,PM_{2.5}重污染没有得到有效控制。在“十三五”环境规划减排措施下,重污染时段9-10日的日均浓度分别从151.4、174.8、193.3 μg/m³降至130.0、149.0、167.4 μg/m³,污染预警从橙色预警下降到了蓝色预警,PM_{2.5}重污染得到了一定的控制。

[参考文献]

- [1] 安静宇,李莉,黄成,等. 2013年1月中国东部地区重污染过程中上海市细颗粒物的来源追踪模拟研究[J]. 环境科学学报, 2014,34(10):2635-2644.
An Jingyu, Li Li, Huang Cheng, et al. Source apportionment of the fine particulate matter in Shanghai during the heavy haze episode in eastern China in January 2013[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014,34(10):2635-2644.
- [2] Du H, Kong L, Cheng T, et al. Insights into summertime haze pollution events over Shanghai based on online water-soluble ionic composition of aerosols[J]. Atmospheric Environment, 2011,45(29):5131-5137.
- [3] Wang S X, Zhao B, Cai S Y, et al. Emission trends and mitigation options for air pollutants in East Asia[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2014,14(13):2601-2674.
- [4] Zhao M, Xiu G, Qiao T, et al. Characteristics of PM_{2.5} haze pollution episodes and analysis of a typical winter haze process in Shanghai[J]. Aerosol & Air Quality Research, 2016, 16(7):1625-1637.
- [5] Zhuang X, Wang Y, He H, et al. Haze insights and mitigation in China: an overview[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014,26(1):2-12.
- [6] 上海市环保局. 2015年上海市环境状况公报[R]. 2016.
Shanghai Environmental Protection Bureau. Shanghai Environmental Status Bulletin in 2015[R]. 2016.
- [7] 周敏,陈长虹,乔利平,等. 2013年1月中国中东部大气重污染期间上海颗粒物的污染特征[J]. 环境科学学报, 2013,33(11):3118-3126.
Zhou Min, Chen Changhong, Qiao Liping, et al. The chemical characteristics of particulate matters in Shanghai during heavy air pollution episode in central and eastern China in January 2013[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33

- (11):3118-3126.
- [8] Wang S, Xing J, Zhao B, et al. Effectiveness of national air pollution control policies on the air quality in metropolitan areas of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 26(1):13-22.
- [9] 王浩,李轶,高健,等. APEC会议期间石家庄市大气污染特征及空气质量保障措施效果评估[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(2):164-174.
- Wang Hao, Li Yi, Gao Jian, et al. Characteristics of air pollution and evaluation of the effects of air quality assurance measures in Shijiazhuang City during the 2014 APEC Conference[J]. *Research of Environmental Science*, 2014, 26(1): 13-22.
- [10] Liu H, Wang X, Zhang J, et al. Emission controls and changes in air quality in Guangzhou during the Asian Games[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 47(5):81-93.
- [11] 汪伟峰,王迎红,王莉莉,等. 北京奥运会期间奥运村站空气质量的观测与研究[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(1):48-54.
- Wang Weifeng, Wang Yinghong, Wang Lili, et al. Observation and study on the air quality at Olympic Village station during the Beijing Olympic Games[J]. *Research of Environmental Science*, 2010, 23(1):48-54.
- [12] 王占山,李晓倩,王宗爽,等. 空气质量模型CMAQ的国内外研究现状[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(1):386-391.
- Wang Zhanshan, Li Xiaoqian, Wang Zongshuang, et al. Application status of Models-3/CMAQ in environmental management[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(1):386-391.
- [13] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:268-269.
- Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, Shao Min. *Atmospheric Environmental Chemistry*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:268-269.
- [14] Hu J, Chen J, Ying Q, et al. One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, 16(16):10333-10350.
- [15] 王凌慧,曾凡刚,向伟玲,等. 空气重污染应急措施对北京市PM_{2.5}的削减效果评估[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(8):2546-2553.
- Wang Linghui, Zeng Fangang, Xiang Weiling, et al. A model evaluation of the implementing heavy air pollution emergency plan to PM_{2.5} reduction in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(8):2546-2553.
- [16] 李莉,安静宇,卢清. 清洁空气行动计划实施对长三角地区PM_{2.5}污染改善效果模拟评估[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(11):1653-1661.
- Li Li, An Jingyu, Lu Qing. Modeling assessment of PM_{2.5} concentration under implementation of Clean Air Action Plan in Yangtze River Delta region[J]. *Research of Environmental Science*, 2015, 28(11):1653-1661.
- [17] 王茜. 上海市秋季典型PM_{2.5}污染过程数值预报分析[J]. *中国环境监测*, 2014, 30(2):7-13.
- Wang Qian. Numerical forecast analysis of typical PM_{2.5} pollution episode over Shanghai in autumn[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(2):7-13.
- [18] Xing J, Zhang Y, Wang S, et al. Modeling study on the air quality impacts from emission reductions and a typical meteorological condition during the 2008 Beijing Olympics[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(10):1786-1798.
- [19] 苏继峰,朱彬,康汉青,等. 长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用[J]. *环境科学*, 2012, 33(5):1418-1424.
- Su Jifeng, Zhu Bin, Kang Hanqing, et al. Application of pollutants released from crop residues at open burning in Yangtze River Delta region in air quality model[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(5):1418-1424.
- [20] 许建明,徐祥德,刘煜,等. CMAQ-MOS区域空气质量统计修正模型预报途径研究[J]. *中国科学*, 2005, 35(S1):131-144.
- Xu Jianming, Xu Xiangde, Liu Yu, et al. The forecasting method research of regional air quality statistics model CMAQ-MOS[J]. *Science in China*, 2005, 35(S1):131-144.
- [21] 谢敏,钟流举,陈焕盛,等. CMAQ模式及其修正预报在珠三角区域的应用检验[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(2):102-107.
- Xie Min, Zhong Liuju, Chen Huansheng, et al. Application and verification of CMAQ model and revision forecast in Pearl River Delta region[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(2):102-107.
- [22] 刘保献,杨懂艳,张大伟,等. 北京城区大气PM_{2.5}主要化学组分构成研究[J]. *环境科学*, 2015(7):2346-2352.
- Liu Baoxian, Yang Dongyan, Zhang Dawei, et al. Chemical species of PM_{2.5} in urban area of Beijing[J]. 2015(7):2346-2352.
- [23] Hu J, Chen J, Ying Q, et al. One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, 16(16):10333-10350.
- [24] 吴剑斌,王茜,伏晴艳. 2013年12月上海市PM_{2.5}重污染过程数值模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(6):2152-2159.
- Wu Jianbin, Wang Qian, Fu Qingyan. Numerical simulation and process study of PM_{2.5} pollution episode over Shanghai in December 2013[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(6):2152-2159.