

“大气国十条”实施以来京津冀 PM_{2.5}控制效果评估报告*

文/ 中国科学院“大气灰霾追因与控制”专项总体组

(中国科学院 北京 100864)

【摘要】 2013年9月13日,国务院颁布了《大气污染防治行动计划》(简称“大气国十条”),提出了京津冀地区2017年PM_{2.5}浓度比2012年下降25%,北京市PM_{2.5}年均浓度控制在60 μg/m³左右的目标。“大气国十条”实施以来,北京、天津和河北相继出台了对应的行动计划,分别从“控煤”、“控车”、“控尘”、“控工业污染”和“控新建项目污染”等方面部署了防治措施。中科院“大气灰霾追因与控制”研究团队从观测和模拟的角度对该区域控制措施的实际效果开展了评估,以期后续防治措施的制定提供参考。与2013年相比,京津冀2014年SO₂和NO₂大气平均浓度下降约20%,PM_{2.5}大气平均浓度下降约10%;其中河北SO₂、NO₂和PM_{2.5}的下降幅度最显著。上述污染物浓度在冬季比夏季降低更显著。与2013年冬季相比,京津冀2014年冬季PM_{2.5}中硫酸盐的比例略有下降,硝酸盐的比例略有增加。模式模拟表明,2013年和2014年该区域气象场无明显变化,由于控制措施的实施导致污染物排放清单的变化,进而导致2014年冬季京津冀PM_{2.5}浓度下降,但对夏季PM_{2.5}浓度无有利影响,并存在臭氧污染的潜在风险,与观测结果吻合。在实施京津冀大气污染联防联控过程中,控制重点应向河北倾斜。

【关键词】 大气国十条报告,京津冀灰霾防治,效果评估,PM_{2.5},致霾污染物

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.05.012

1 “大气国十条”实施以来京津冀地区的减排措施

国家《大气污染防治行动计划》(以下简称“大气国十条”)发布后,为贯彻落实“大气国十条”具体要求,京津冀进一步实施了一系列污染控制措

施。

北京市制定实施了《北京市2013—2017年清洁空气行动计划》。2013年,北京市SO₂排放量削减0.68万吨,同比下降7.25%;NO_x(=NO+NO₂)排放量削减1.12万吨,同比下降6.29%;挥发性有机

* 基金项目:中科院战略性先导科技专项(XDB05000000)

执笔人:贺泓、谢品华、李国辉、刘建国、曹军骥、王跃思、陈良富、刘永春

修改稿收到日期:2015年7月31日

物排放量削减8 300吨。具体措施包括:严格产业环境准入、调整退出污染企业、消减水泥产能、控制炼油规模;发布《高污染燃料禁燃区划定方案(试行)》、控制煤炭消费总量、提高优质能源比例、推进锅炉天然气改造和居民采暖“煤改电”、建成西南、东南、西北燃气热电中心、关停北京科利源热电厂的燃煤机组;发展轨道交通、淘汰老旧车、全面实施轻型车“国五”排放标准和油品标准、严格限制机动车保有量、加强机动车执法检查、新增新能源车和清洁能源车;水泥窑新建脱硝和厂料库密闭化改造、电厂深度除尘治理、燕化公司推行“泄露检测与修复”技术和停烧重油、保证施工工地达标率和城市道路清扫保洁新工艺覆盖率;加强监管能力和监督考核、修订完善应急预案、成立京津冀及周边地区大气污染防治协作机制等。

2013年9月,天津市发布了《天津市清新空气行动方案》,在“控煤”、“控尘”、“控车”、“控工业污染”、“控新建项目污染”等方面确定了10条66项措施462项任务2 055个工程。2014年制定煤质管理地方标准,制定实施《天津煤炭消费总量削减和清洁能源替代实施方案》,完成了147座工业和供热燃煤锅炉的改燃或关停;强化施工工地围挡、苫盖、硬化、喷淋和车轮冲洗“五个百分之百”扬尘防治要求;采取区域限行、淘汰补贴、严格查处违法车辆等措施加快淘汰“黄标车”,启动“国五”汽柴油更换工作,加快新能源汽车产业发展,新投运清洁能源汽车、纯电动公交车532辆;推进火电、钢铁、水泥和玻璃等重点行业脱硫脱硝除尘治理,全市20万千瓦以上火电机组全部完成脱硝、脱硫和除尘治理并达标;完成钢铁烧结及球团工业脱硫及除尘治理和水泥行业脱硝改造,完成56家挥发性有机物排放企业治理或关停和247座加油站油气回收治理工程;严格

环境准入和环评审批,严控“两高”行业新增产能,加快淘汰落后产能,实施“万企转型升级行动计划”,加快污染企业搬迁,完成34家外环线周边有污染和危化企业搬迁或关停。2013年天津市全年排放SO₂ 21.68万吨、NO_x 31.17万吨、烟(粉尘)8.75万吨、工业废气8 080亿标立方米。

河北省制定了大气污染防治行动计划实施方案并细化了重点工作年度计划。开展工业大气污染综合治理,推进电力、钢铁、水泥等行业的脱硝、除尘建设,推进石化行业脱硫和VOCs治理;开展燃煤锅炉综合整治,淘汰老旧锅炉1 000台,脱硫除尘新建改造3 180蒸吨,划定高污染燃料禁燃区;开展机动车污染防治,淘汰黄标车及老旧车41万辆,汽油、柴油升级到国四标准,保证2014年汽车环保标志发放率达到70%以上;开展扬尘污染综合整治;优化调整产业结构,淘汰落后产能,搬迁重污染企业,2013年淘汰焦炭40万吨,“十二五”期间,淘汰了6 100万吨水泥产能、淘汰3 600万重量箱玻璃产能,到2017年压减钢铁产能6 000万吨;推进清洁生产技术应用,发展循环经济和节能环保产业;调整能源结构,削减煤炭消费总量,提高外输电比例,大力发展清洁能源,工业、集中供热锅炉、工业企业自备电厂煤改气,提高煤炭清洁高效利用和城市集中供热比例,到2017年,原煤入洗率达到70%以上,两年内开展建筑节能改造2 300万平方米以上。2013年,河北省全年排放SO₂ 128.47万吨、NO_x 165.24万吨、烟(粉尘) 131.33万吨。

2 “大气国十条”实施一周年减排效果评估

2.1 常规污染物质量浓度变化

据环境监测总站公布的污染物小时浓度数据,计算得到2013年和2014年北京、天



中国科学院

津和石家庄主要大气污染物地表日均浓度的季节性变化(图1, 附后)。颗粒物(PM_{2.5}和PM₁₀)和一次排放的气态污染物(SO₂、NO₂和CO)的浓度都具有10月至次年4月份高、5—9月份低的特点,而臭氧的地表大气浓度具有相反的季节变化规律。

图2(附后)分别对比了3个城市2013年和2014年PM_{2.5}地表日均浓度的累计概率分布。北京市2013年和2014年PM_{2.5}的地表日均浓度具有基本相同的概率分布。天津2014年PM_{2.5}的地表

日均浓度概率分布曲线微弱降低,石家庄显著下降。北京市2013年和2014年有58%的天数达到75 mg·m⁻³的国家空气质量二级标准;天津分别为55%和47%,石家庄分别为38%和29%。

表1为2013年和2014年3个城市主要大气污染物年均浓度在95%置信度下的统计分析结果。北京市PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、SO₂、NO₂和CO, 2013年的年均浓度分别为86.8±69.9 mg·m⁻³、113.0±74.2 mg·m⁻³、52.8±37.3 mg·m⁻³、25.4±26.3 mg·m⁻³、

表1 北京、天津和石家庄主要大气污染物浓度年际变化在95%置信度下的统计分析

区域	污染物	2013		2014		统计检验结果			降幅(%)	
		平均值 (mg m ⁻³)	标准 偏差 (mg m ⁻³)	平均值 (mg m ⁻³)	标准 偏差 (mg m ⁻³)	F	P	显著性	本报 告	其他 报告*
北 京	PM _{2.5}	86.8	69.9	85.4	69.4	0.1	0.794	不显著	1.6	4.0
	PM ₁₀	113.0	74.2	123.3	79.0	3.1	0.080	不显著	-9.1	-7.1
	O ₃	52.8	37.3	63.5	49.2	9.4	0.002	显著	-20.3	
	SO ₂	25.4	26.3	20.7	23.2	6.1	0.014	显著	18.5	17.7
	NO ₂	53.8	25.9	53.7	24.8	0.002	0.961	不显著	0.2	-1.3
	CO/1000	1.4	1.1	1.2	0.8	6.7	0.01	显著	14.3	
天 津	PM _{2.5}	93.2	56.2	85.1	53.3	3.8	0.052	不显著	8.8	13.5
	PM ₁₀	155.8	81.2	136.0	68.7	11.9	0.001	显著	12.7	11.3
	O ₃	49.3	29.0	50.6	33.0	0.3	0.597	不显著	-2.6	
	SO ₂	51.5	47.2	47.5	40.0	1.4	0.237	不显著	7.7	16.9
	NO ₂	54.2	21.3	51.0	20.5	4.0	0.047	显著	5.9	
	CO/1000	1.9	0.9	1.6	0.7	23.8	0.000	显著	15.3	21.6
石 家 庄	PM _{2.5}	147.5	120.8	125.9	100.4	6.4	0.012	显著	14.6	12
	PM ₁₀	302.2	159.8	217.5	147.9	50.3	0.000	显著	28.0	13.2
	O ₃	48.0	35.3	46.8	31.4	0.2	0.655	不显著	2.4	13.7
	SO ₂	92.6	74.4	63.9	57.0	31.8	0.000	显著	31.0	25.7
	NO ₂	67.4	28.4	53.9	29.6	36.4	0.000	显著	20.1	5.9
	CO/1000	1.9	1.6	1.5	1.2	14.1	0.000	显著	21.2	16.7

注:本报告未剔除环境监测总站公布数据的异常数据。其他报告,北京来源于http://news.xinhuanet.com/local/2015-01/04/c_1113867637.htm;天津来源于http://www.tj.xinhuanet.com/jz/2015-01/22/c_1114094774.htm;河北来源于<http://news.yuanlin.com/detail/2015210/208658.htm>

53.8±25.9 mg·m⁻³和1.4±1.1 mg·m⁻³;2014年对应的浓度为85.4±69.4 mg·m⁻³、123.3±79.0 mg·m⁻³、63.5±49.2 mg·m⁻³、20.7±23.2 mg·m⁻³、53.7±24.8 mg·m⁻³和1.2±0.8 mg·m⁻³。与2013年相比,北京市PM_{2.5}和NO₂的地表浓度分别下降1.6%和0.2%,但在95%置信水平下不具有统计学意义;SO₂和CO浓度显著下降18.5%和14.3%;O₃浓度显著增加20.2%;PM₁₀增加9.1%(不具有统计学意义)。

天津市PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂和CO的地表浓度,2014年比2013年分别下降8.8%、12.7%、7.7%、5.9%和15.3%,O₃的地表浓度增加了2.6%。其中PM₁₀、NO₂和CO的浓度在95%置信水平下降显著,而PM_{2.5}、SO₂和O₃的浓度变化不显著。在95%置信度下,石家庄PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂和CO的地表浓度,2014年比2013年显著降低,降幅分别为14.6%、28.0%、31.0%、20.1%和21.2%;O₃浓度降低2.4%,但降幅不显著。上述结果与环境质量公报基本一致。

利用OMI level2数据获得NO₂、SO₂柱浓度空间分布(分辨率0.1°×0.1°),进一步从遥感数据的角度说明京津冀各省市为落实“大气国十条”采取措施的效果。图3(附后)中a、b分别为华北平原2013年、2014年NO₂空间分布特征。华北平原NO₂高值主要集中在6个重点区域:北京、唐山、天津、石家庄、邯郸-邢台、淄博。图3c(附后)为华北平原NO₂柱浓度2014年相对于2013年,华北大部分地区NO₂柱浓度整体呈现下降趋势,但山东中部淄博周边地区上升明显。

图4(附后)为2013年、2014年四个季度NO₂空间分布情况。从季度平均分布图可以看出:NO₂柱浓度2014年相对2013年总体降低,第一、四季度变化最为明显,说明冬季减排效果最有效。

上述区域中除淄博2014年NO₂柱浓度相对2013年增加(2.86%)外,华北其他重点城市NO₂柱浓度2014年相对2013年都存在不同程度的降低。如图5(附后)所示,各城市降低百分比分别是北京19.13%,天津18.17%,石家庄23.27%,邯郸-邢台22.02%,其中河北省西部的石家庄、邯郸、邢台下降最为明显。OMI的数据也显示,NO₂柱浓度在河北西南部和河南北部都有相当幅度的下降(图6,附后)。

如图7(附后)所示,地面观测表面的数据基本和卫星遥感数据一致,从全国分布图可知,中国中东部的工业区NO₂浓度下降幅度较大,但是在城市中心区域,特别是上海和北京这种工业较少的城市,NO₂浓度升高。另外,河北东部唐山地区和天津的滨海新区这些新兴工业区成为NO₂新的增长点。观测数据同时显示,京津冀地区2013年SO₂浓度年均值分别为47.2 ppbv;2014年降为37.7 ppbv,降幅20%,与卫星遥感数据一致(图8,附后)。这表明随着“大气国十条”及相关措施的落实,京津冀地区的空气质量整体有所改善。河北省改善较为显著,北京和天津市改善程度较小,在大气污染物浓度标准偏差很大的背景下改善效果需要进一步确认。

2.2 大气颗粒物组成及来源变化

如表2所示,华北地区PM_{2.5}中硫酸盐和铵盐浓度有微弱下降,但是硝酸盐浓度升高。前面提到,虽然NO₂柱浓度在河北西南部和河南北部有相当幅度的下降,但是,近地面NO_x浓度在京津冀地区变化不显著,唐山和天津的滨海新区NO_x柱浓度升高较多。这与在河北西南部和河南北部高架点源的排放得到了较好的控制,河北东部和天津沿海的新工业区成为新的增长点排放增加的工业布局变化是一致的。虽然近地面



中国科学院

NO_x浓度变化不显著,但是近地面面源和线源对近地面氮氧化物贡献比例升高,导致硝酸盐的比例也相应升高。

根据中科院大气物理所王跃思研究员的观测数据,2014年和2009—2011年北京市PM_{2.5}源解析的结果如图9(附后)所示。2014年,燃煤、机动车、扬尘、工业源、生物质燃烧和农业源,依次贡献了北京市PM_{2.5}的37.5%、29.8%、16.6%、7.8%、4.7%和3.6%。与2009—2011年相比,2014年PM_{2.5}的来源构成变化并不十分明显。考虑到北京城区能源结构调整基本完成,燃煤贡献可能主要来自城乡结合部和周边农村散烧煤。北京市应进一步加强机动车排放、扬尘和农村面源污染控制。

2.3 控制效果模拟评估

基于空气质量模型开展了京津冀地区减排效果的模拟评估。为了使现有模式适应于我国大气污染的区域特征,我们首先对美国国家大气科学中心(NCAR)和美国国家海洋及大气管理局(NOAA)联合开发的全耦合化学输送模式WRF-CHEM(Weather Research and Forecast model with Chemistry)进行了改进。发展了可使用不同的化学机制(CBIV、RAMD2及SAPRC)的气相光化学模式,同时引入美国环保局发展的CMAQ气溶胶模式和非传统的VBS(Volatility Basis Set)方法,体现了乙二醛(glyoxal)和甲基乙二醛(methylglyoxal)对二次有机气溶胶的贡献。我们还利用ISORROPIA Version 1.7和西安10年观测的PM_{2.5}组份资料和多个城市的观测资料,发展了一个SO₂非均相反应的参数化模块和HONO参数化方案。

改进后的WRF-CHEM模式成功模拟了臭氧、无机气溶胶、有机气溶胶、气溶胶的光学厚度和单次散射反照率,气溶胶作用下云的形成和发展等。

模式模拟区域见图10(附后),中心点是117°E,39°N,模拟区域面积为900 km × 900 km,水平分辨率6 km。在京津冀地区国控站分布在13个城市(图10,附后),并且绝大部分集中在城市中,分布比较集中。模式模拟共选择了2013年和2014年冬、夏共4个个例,每个个例运行两次,分别使用2013年和2014年的排放,来排除气象场变化的影响以确定在京津冀地区减排的效果,模拟试验设置见表3。其中基准试验(表3中以B开头的模拟试验)的模拟结果与观测进行比较。

模式模拟采用SAPRC99化学机制。排放清单由清华大学张强教授提供,包括5个部分:农业、工业、能源生产、居民生活及交通运输排放。图11(附后)为模拟区域氮氧化物(NO_x),挥发性有机物(VOC_s),二氧化硫(SO₂)和有机碳(OC)排在2013年1月份的分布。在城市及其周边地区排放相当高,有利于污染的产生。

以2013年1月重污染过程为例,图12(附后)给出的是WRF-CHEM模式模拟及“国控站”观测的PM_{2.5}在00:00和12:00 BJT(北京时间)的空间分布。总体来看,WRF-CHEM模式可以合理地模拟京津冀地区PM_{2.5}的质量浓度的分布。造成京津冀地区气溶胶污染的天气形势通常是北方或西北方冷空气活动较弱,在华北平原盛行弱的南风或偏南风。由于地形的影响,造成污染物在该地区积累。并且来自南方的暖湿空气有利于SO₂的非

表2 2013年和2014年京津冀PM_{2.5}中硫酸盐、硝酸盐和铵盐浓度

化学组分	2013		2014	
	浓度(μg/m ³)	比例(%)	浓度(μg/m ³)	比例(%)
硫酸盐	15.9	19.9	12.3	15.7
硝酸盐	12	15	16	20.5
铵盐	11.2	14	9.9	12.7

表3 WRF-CHEM模式模拟的个例

	模拟时间	排放清单	
		2013	2014
2013年冬季	2013年1月 9—16日	B-win2013	S-win2013
2013年夏季	2013年8月 9—11日	B-sum2013	S-sum2013
2014年冬季	2014年1月 13—20日	S-win2014	B-win2014
2014年夏季	2014年7月 3—9日	S-sum2014	B-sum2014

注:以B开头的模拟试验定义为基准试验,模拟结果与观测进行比较。以S开头的模拟试验为敏感性试验,用于与基准试验做对比,评估减排效果

均相氧化,造成大量硫酸盐的形成。当北方或西北方冷空气活动较强时,京津冀地区的空气质量将会非常明显改善。在夏天,造成京津冀地区气溶胶污染的天气形势也是类似的。

在冬季,由于太阳辐射的减弱,模拟和观测的O₃都比较低。在夏季,随着太阳辐射的增强,京津冀地区在下午不利的天气条件下,会发生O₃污染。图13(附后)是模式模拟及“国控站”观测的近地面臭氧(O₃)在00:00和14:00 BJT的空间分布。WRF-CHEM模式基本上可以模拟出O₃质量浓度的空间分布变化。2014年7月的基准试验的模拟结果表明:京津冀的平原地区O₃的质量浓度可以超过160 μg·m⁻³;在城市地区(如北京),O₃质量浓度可以超过250 μg·m⁻³。而在夏季夜晚,由于大量氮氧化物的排放,造成O₃质量浓度的降低;在白天平原地区形成的高浓度O₃也可能向西北的山区输送。

在冬季的两个基准试验中,有机气溶胶是PM_{2.5}最主要的成份,大约占PM_{2.5}的40%左右,与最近发表的研究成果比较一致。图14(附后)是模式模拟的气溶胶各组份在

PM_{2.5}中所占比例。在2013年冬季的基准试验中,硫酸盐所占比重接近30%。在夏季的两个例子中,有机气溶胶所占PM_{2.5}比例有所降低,大约占PM_{2.5}的30%左右;硫酸盐的贡献接近有机气溶胶,这主要是由于在夏季潮湿的环境有利于SO₂的非均相转化以及硫酸盐的相对稳定。硝酸盐PM_{2.5}的比重,除2013年1月外,大约为13%左右。黑炭气溶胶的贡献一般很小,不超过PM_{2.5}的4%。

为排除气象场变化对京津冀地区减排效果评估的影响,用WRF-CHEM模式共做了4个敏感性试验,对2013年和2014年冬、夏共4个个例分别用2014年和2013年的排放进行模拟,将敏感性试验与基准试验进行对比,结果见表4。在冬季,减排效果比较显著,PM_{2.5}的质量浓度大约减少12%左右。而PM_{2.5}质量浓度的减少主要来自有机气溶胶和硫酸盐的减少。而在夏季,减排效果并不理想。这可能是由于模拟方法的不确定性,或由于特殊的减排比例造成大气氧化性增强,从而加快了气态污染物向颗粒态污染物的转化。这提醒我们大气化学的复杂性也会造成减排效果的非线性风险。

基于模式对2013年和2014年冬夏4个



个例的模拟,当北方或西北方冷空气活动较弱,在华北平原盛行弱的南风或偏南风时,由于地形的影响,造成污染物在京津冀地区积累和雾霾的产生。有机气溶胶和硫酸盐是PM_{2.5}的主要成份。另外在夏季,也可能发生O₃污染。“大气国十条”实施后,在冬季,减排效果比较显著,PM_{2.5}的质量浓度大约减少12%左右;而在夏季,减排效果并未实现,PM_{2.5}质量浓度比2013—2014年大约增加10%。由于模式、气象场及排放源的不确定性,这一数据可能存在偏差。但该结果与地面观测中,观测到2014年冬季石家庄PM_{2.5}浓度显著下降,夏季变化不显著的结果是一致的。

3 结论与建议

(1)“大气国十条”实施以来,京津冀区域大气环境质量整体有一定程度的改善,与2013年相比,京津冀2014年SO₂和NO₂大气平均浓度下降约20%,PM_{2.5}大气平均浓度下降约10%;其中河北SO₂、NO₂和PM_{2.5}的下降幅度最显著。

(2)尽管北京在落实“大气国十条”方面做了

很大努力,但总体污染控制效果较小,仍需进一步加大节能减排的力度,特别是加大对机动车尾气排放、散烧煤和扬尘的控制。京津冀大气环境质量改善的重点在河北。从区域角度,实施京津冀大气污染联防联控过程中,控制重点应该向河北倾斜。

(3)在排除气象因素的影响下,理论模拟表明,现有控制措施对冬季PM_{2.5}削减效果显著,而对夏季PM_{2.5}的削减效果不理想,并存在臭氧污染潜在的风险。有必要加强灰霾成因研究,指导科学减排,以最小的代价换取最大的空气质量改善效益。

致谢 本文是在“大气灰霾追因与控制”专项领导小组与项目成员的大力支持下完成的,论文撰写过程中得到了中国环境监测总站魏复盛院士、中科院丁仲礼副院长、冯仁国副局长、张鸿翔处长和段晓男副处的大量帮助和指导,马庆鑫、马金珠、楚碧武、李昂、鲍晓磊博士在数据分析和整理过程中做了大量工作,在此表示衷心感谢!

表4 2013—2014年京津冀地区减排效果

	PM _{2.5}	有机	硫酸盐	硝酸盐	铵盐	黑碳	其他
B-win2013	279.4	110.2	80.3	18.3	30.6	6.9	33.2
S-win2013	248.9	101.0	61.3	20.7	28.1	6.5	31.4
Change (%)	-10.9	-8.3	-23.6	13.0	-8.3	-5.8	-5.5
B-sum2013	105.7	28.8	29.3	14.6	15.6	3.9	13.5
S-sum2013	115.9	33.9	27.8	17.0	15.9	4.6	16.8
Change (%)	9.7	17.7	-5.2	16.7	1.8	16.3	24.6
B-win2014	197.3	86.8	24.6	27.2	20.6	6.1	31.9
S-win2014	223.0	96.8	32.2	28.1	23.9	6.7	35.4
Change (%)	13.1	11.6	30.8	3.2	15.9	8.5	10.8
B-sum2014	113.1	35.9	28.6	14.4	15.2	3.7	15.4
S-sum2014	102.1	29.8	30.3	11.7	15.0	3.1	12.2
Change (%)	-9.8	-17.0	5.9	-18.3	-1.6	-16.1	-20.6

注:变化百分比的计算:(敏感性试验-基准试验)/基准式样。PM_{2.5}及气溶胶组份的单位是μg·m⁻³

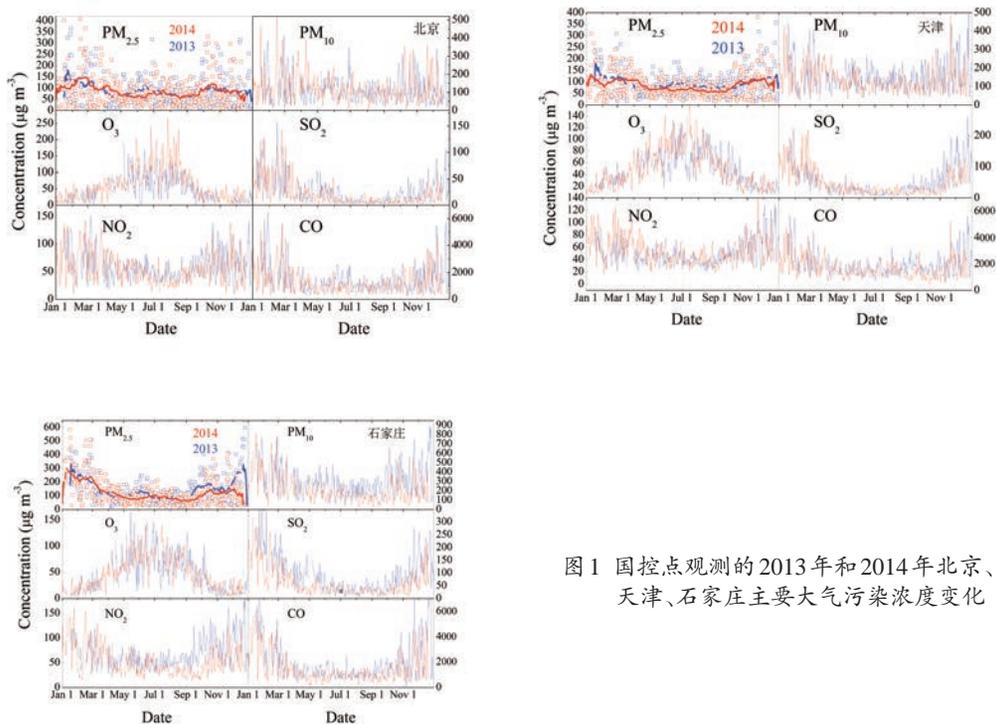


图1 国控点观测的2013年和2014年北京、天津、石家庄主要大气污染浓度变化

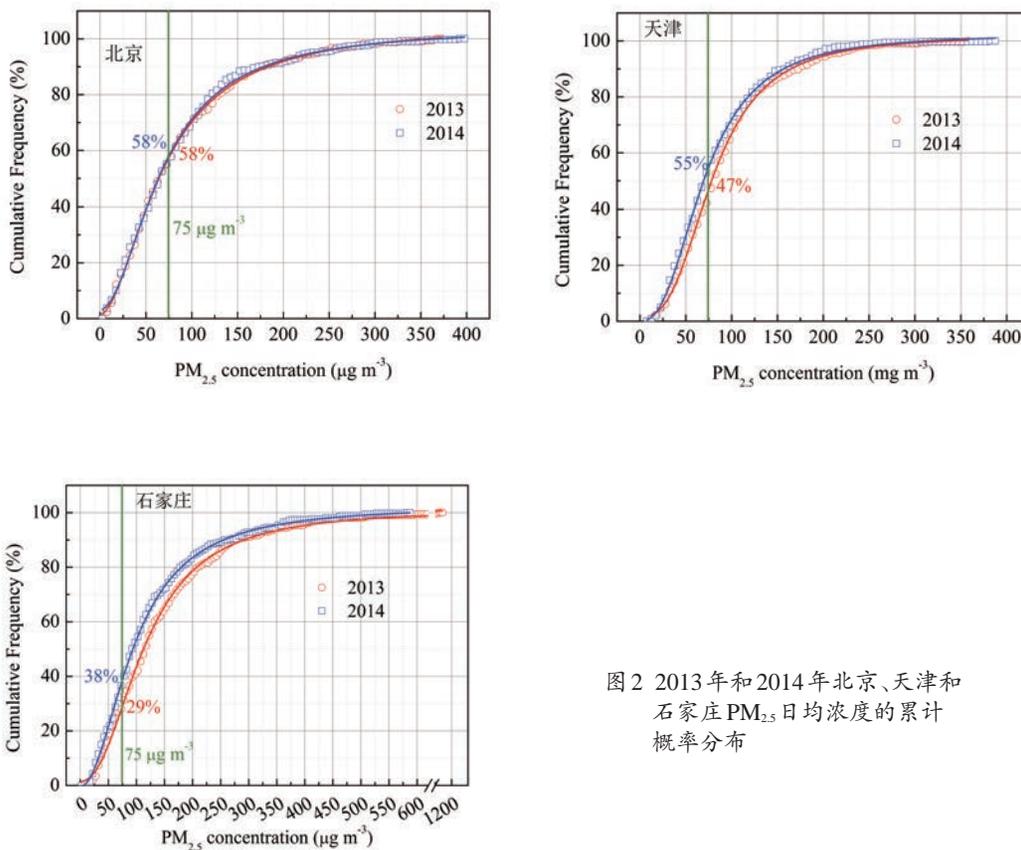


图2 2013年和2014年北京、天津和石家庄PM_{2.5}日均浓度的累计概率分布



中国科学院

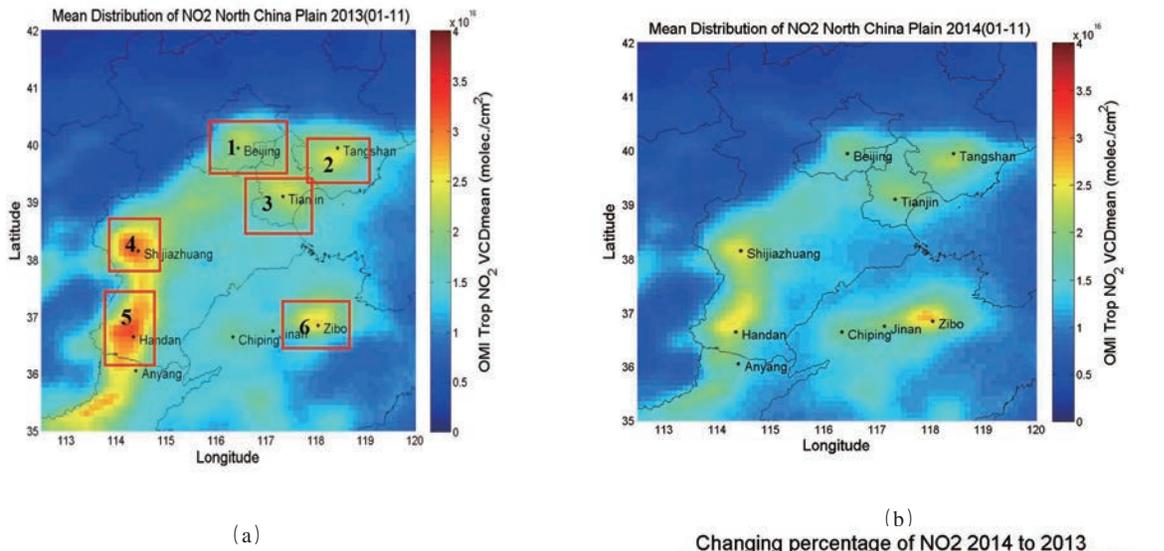


图3 华北平原NO₂柱浓度空间分布
(a)2013年1—11月分布;
(b)2014年1—11月分布;
(c)2014年相对2013年柱浓度下降百分比分布

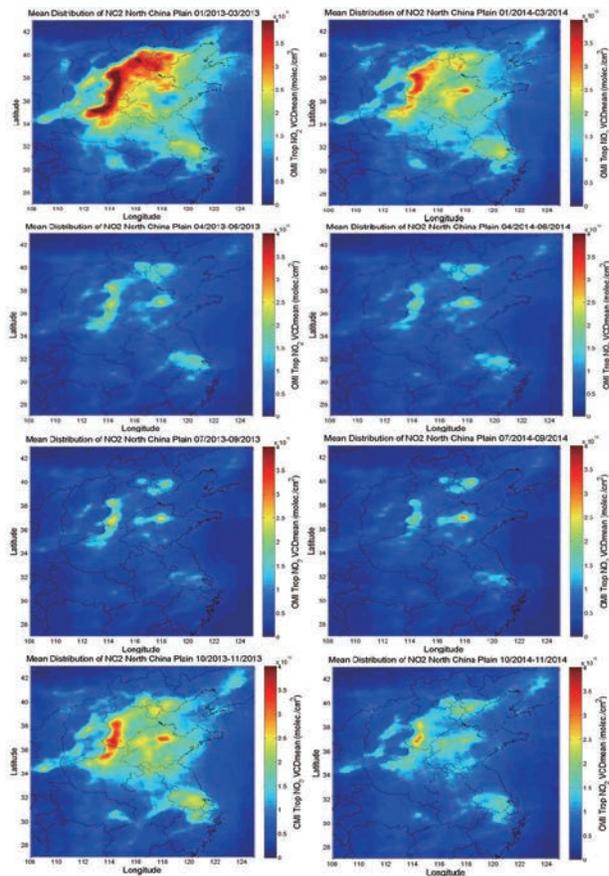


图4 华北平原NO₂柱浓度各季度平均值空间分布

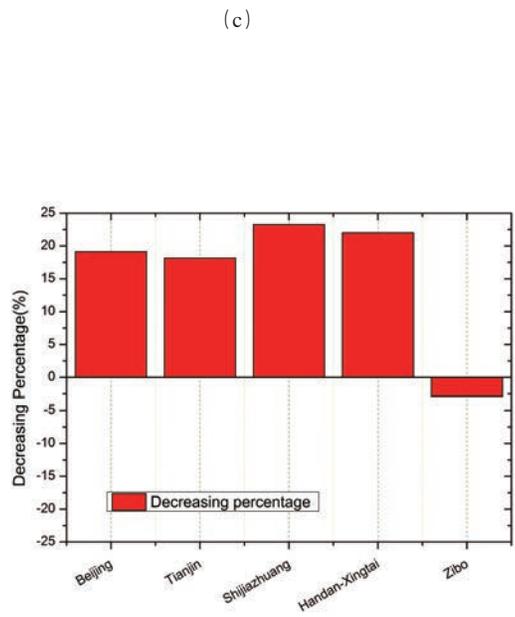
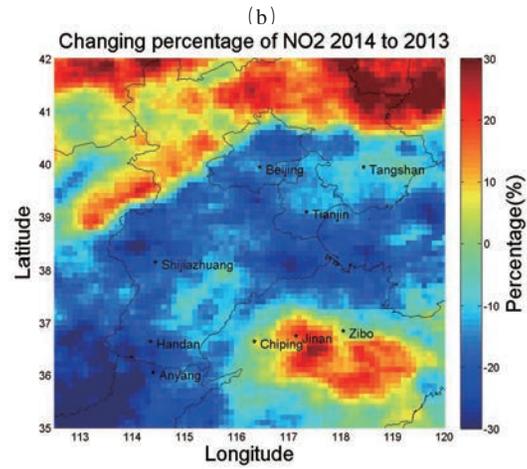


图5 华北平原重点城市NO₂柱浓度变化百分比
(正值为下降)

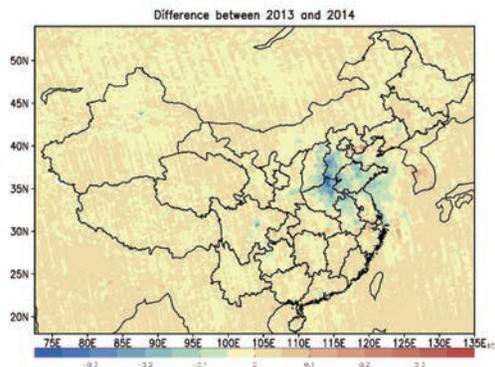


图6 OMI卫星NO₂柱浓度2013年和2014年的差异(×100DU)

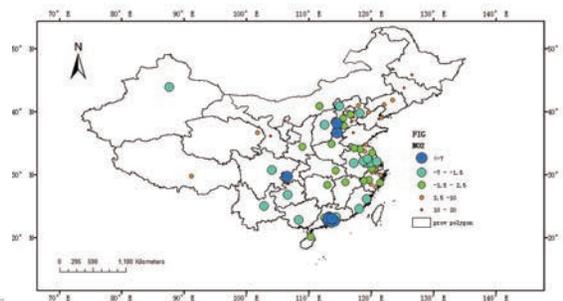


图7 2013年和2014年我国不同区域NO₂浓度变化图

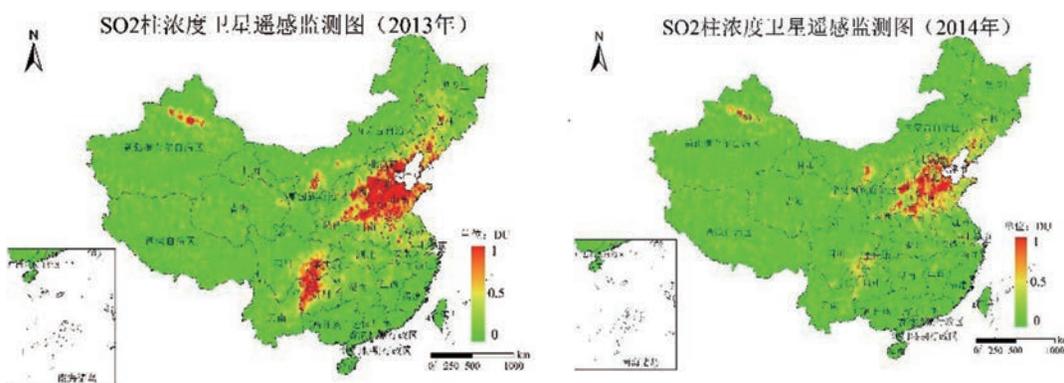


图8 2013年和2014年我国不同区域卫星SO₂柱浓度

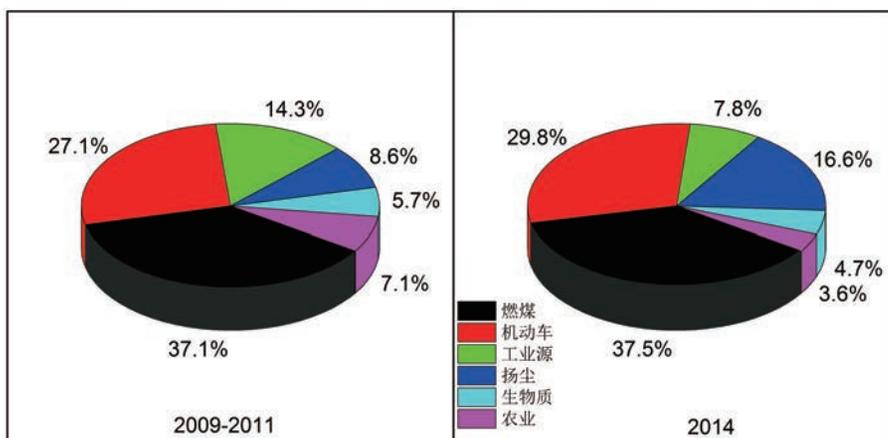


图9 2014和2009—2011年北京市PM_{2.5}源解析对比



中国科学院

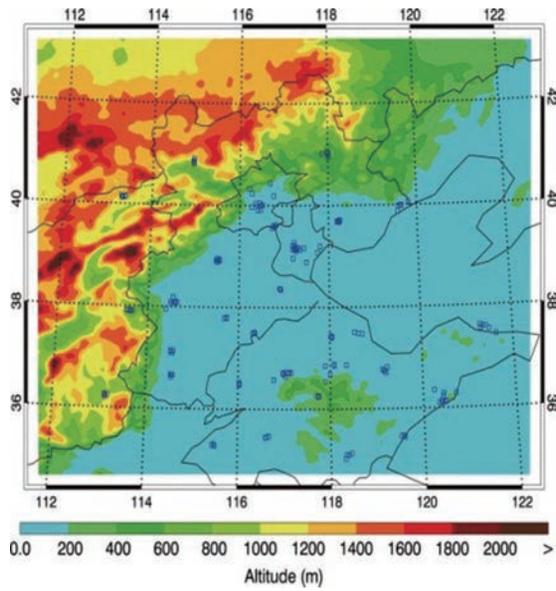


图10 WRF-CHEM 模式模拟区域及观测站点(蓝色方框)

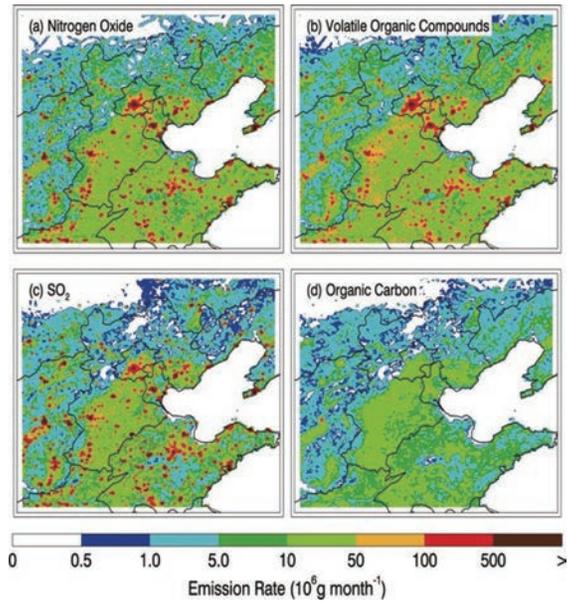


图11 模拟区域排放分布
(a)氮氧化物(NO_x);(b)挥发性有机物(VOCs);
(c)二氧化硫(SO_2);(d)有机碳(OC)

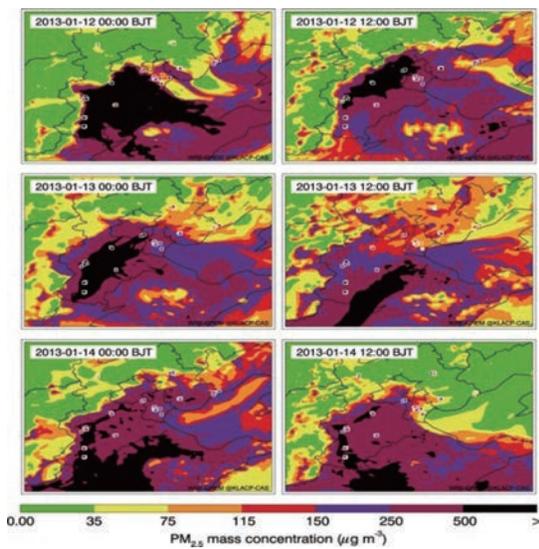


图12 2013年1月12—14日在00:00 BJT (Beijing Time, 北京时间)和12:00 BJT 模拟(彩色阴影)和观测(彩色方块)的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分布

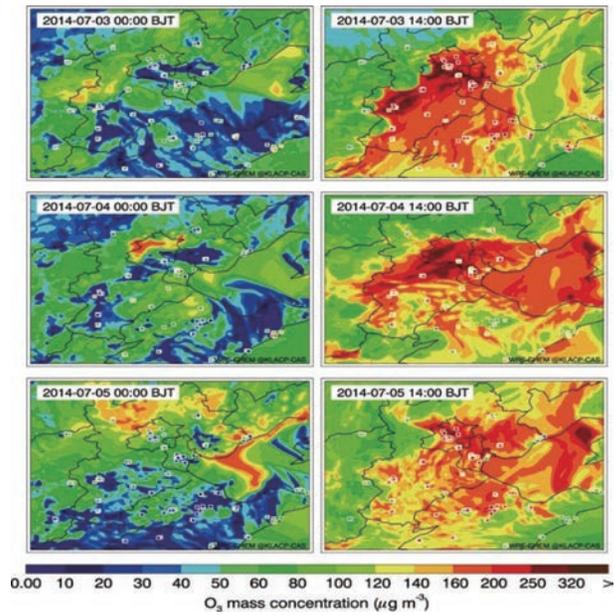


图13 2014年7月3—5日在00:00和14:00 BJT 模拟(彩色阴影)和观测(彩色方块)的 O_3 质量浓度分布

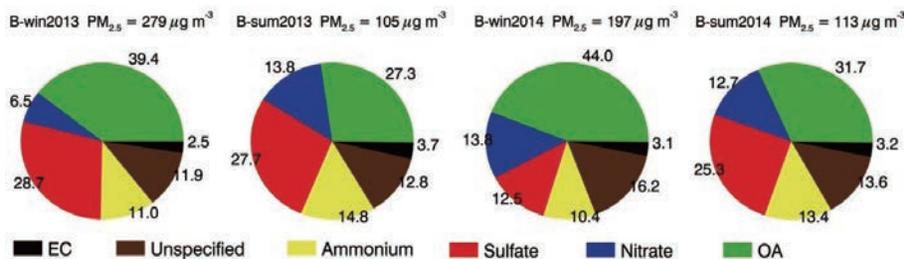


图14 模拟的气溶胶各组分在 $\text{PM}_{2.5}$ 中所占比例