

引用格式:Zhang Han,Yu Chao,Su Lin,*et al.*Analysis on Effectiveness of SO₂ and NO₂ Emission Reduction in North China Plain by OMI Data during the Military Parade 2015[J].Remote Sensing Technology and Application, 2017,32(4):734-742.[张晗,余超,苏林,等.基于 OMI 卫星遥感评估 2015 年阅兵期间华北地区 SO₂ 和 NO₂ 减排成效[J].遥感技术与应用,2017,32(4):734-742.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.4.0734

基于 OMI 卫星遥感评估 2015 年阅兵期间 华北地区 SO₂ 和 NO₂ 减排成效

张 晗^{1,3},余 超^{1,2},苏 林¹,王雅鹏^{1,3},陈良富¹

(1.中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室,北京 100101;
2.清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084;
3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:基于卫星观测具有实时大范围的优势,利用 OMI 传感器观测数据得到阅兵期间(8.1~9.20)华北地区边界层 SO₂ 柱浓度和对流层 NO₂ 垂直柱浓度,分析 2015 年减排前(8.1~8.19)、周边减排(8.20~8.27)、全面减排(8.28~9.3)、减排后(9.4~9.20)的 SO₂、NO₂ 浓度变化情况,以及相比于前 3 年同期分布的变化,评价了阅兵期间北京及周边 7 省区市联防联控减排措施的效果。研究发现:2015 年华北地区 SO₂、NO₂ 浓度均在全面减排期间达到最低值,与前三年同期相比,全面减排期间京津冀地区 SO₂ 浓度下降 46%,NO₂ 浓度下降 18%;外围地区 SO₂ 浓度下降 37%,NO₂ 浓度下降 10%。减排措施取消后,与前三年同期相比,京津冀地区 SO₂ 浓度回升到前三年的水平,NO₂ 浓度增加 19%,表明华北地区联动减排措施有效降低了 SO₂、NO₂ 的浓度。卫星凭借实时、大范围的优势,可有效监测污染物的时空分布,为减排措施的制定与评估提供有力的依据。

关 键 词:阅兵蓝;卫星遥感;区域大气污染;减排措施

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2017)04-0734-09

1 引 言

继“APEC 蓝”之后,2015 年 9 月 3 日北京再现“阅兵蓝”。为保障中国人民抗日战争暨世界反法西斯战争胜利 70 周年纪念活动的空气质量,2015 年 8 月 20 日北京及河北部分城市启动了机动车限行、企业停限产、工地停工等措施;8 月 28 日至 9 月 4 日,北京、天津、河北、山西、内蒙古、山东、河南 7 省区市联合实施六大临时强化减排措施,其中燃煤电厂和燃煤锅炉是重点控制对象,7 省区市共计将有 122 55 家燃煤锅炉等停限产。官方称移动源减排对氮氧化物削减的贡献率为 78.8% (<http://huanbao.bjx.com.cn/news/20150907/660351-2.shtml>),北京除全市实行单双号限行外,公务车 80%停驶,淘汰老旧机动车 17.8 万辆,升级改造了 8 800 辆柴油公交车。

随着我国经济的高速发展,人类不断地向大气中排放大量的 SO₂、NO_x、CO₂、CO、O₃ 等,SO₂、NO₂ 能氧化生成硫酸盐、硝酸盐气溶胶,构成当今雾霾的主要成分,严重影响了大气质量和生态环境,危害人体健康^[1-2]。近年来利用卫星遥感技术进行环境监测正逐渐受到更多的关注,与传统地面监测相比,卫星遥感具有覆盖范围广、实时、连续、分辨率高等优势^[3]。自上世纪 90 年代起,欧美国家陆续发射了一系列环境对地观测卫星,搭载了包括全球臭氧

收稿日期:2016-06-19;修订日期:2017-01-12
基金项目:高分辨率对地观测系统重大专项项目(05-Y20A16-9001-15/17-1),国家自然科学基金项目(41501476)。
作者简介:张 晗(1992—),女,山东泰安人,硕士研究生,主要从事大气遥感方面的研究。E-mail:zhanghan@radi.ac.cn。
通讯作者:余 超(1987—),男,河南信阳人,博士,助理研究员,主要从事大气遥感方面的研究。E-mail:yuchao@radi.ac.cn。

监测仪 (Global Ozone Monitoring Experiment, GOME)、扫描成像吸收光谱大气制图仪 (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography,SCIAMACHY)、臭氧监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI)、全球臭氧监测仪-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2, GOME-2)、臭氧成像探测仪 (Ozone Mapping and Profiler Suite, OMPS) 等传感器,这些传感器波段范围广、光谱分辨率高、探测结果可用于反演大气中的 SO₂、NO₂ 等痕量气体的含量^[4-9],其中 OMI 传感器具有迄今为止最高的空间分辨率(13 km×24 km),且每日覆盖全球 1 次。研究证明 OMI 能灵敏、实时、大范围地监测 SO₂、NO₂ 柱浓度的微量变化,与地面监测结果有良好的一致性^[10-11]。Li 等^[10]利用 OMI 数据监测到 2008 年内蒙古火电厂大量减排 SO₂ 的情况;Yan 等^[11]基于 OMI 数据发现亚运会期间珠三角地区近地面 SO₂ 浓度比往年同期要低;Huang 等^[12]监测到 2014 APEC 期间华北平原地区对流层 NO₂ 垂直柱浓度比前 3 年同期下降 47%。

目前已有利用地基数据进行 2015 年阅兵期间减排措施评估的研究^[13],但地基站点有限,很难有效覆盖整个研究区域,卫星能实时大范围的获取整个研究区域污染物的分布。基于此本文利用 OMI 边界层 SO₂ 柱浓度、对流层 NO₂ 垂直柱浓度数据,对比 2015 年阅兵期间与阅兵前后、以及 2015 年与 2012~2014 年同期污染气体浓度的变化,评估阅兵

期间联动减排措施的效果。

2 数据与方法

本文利用美国航天局戈达德地球科学数据和信息服务中心提供的 OMIL2SO₂ 边界层(PBL)柱浓度数据和 L2NO₂ 对流层柱浓度数据,这些数据均可从 NASA 网站(<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>)上下载。SO₂ 反演算法采用主成分分析算法(PCA)^[14],算法原理为:在无明显 SO₂ 区域应用主成分分析技术,提取表征非 SO₂ 的主成分,利用提取的主成分和 VLIDORT 辐射传输模型计算的 SO₂ 权重函数通过最小二乘拟合得到 SO₂ 垂直柱浓度。该算法避免计算大气质量因子 AMF,降低了反演误差,减少了对特定仪器采用特定背景校正的需求,能更好地适应于其他测量仪器,可提供长时间序列的 SO₂ 记录。较 BRD 算法而言(标准差约 1.0 DU,1 DU=2.69×10¹⁶ molec·cm⁻²),PCA 算法(标准差约 0.5 DU)降低了一半的噪声^[15]。

NO₂ 的反演算法选用 DOAS 算法^[16],算法原理为:选取最佳 NO₂ 吸收谱段(405~465 nm),用观测的直接太阳辐射光谱和地球反射光谱进行光谱拟合,获取斜柱浓度,借助大气化学模式分离平流层 NO₂ 斜柱浓度,通过大气质量因子 AMF 将斜柱浓度转化为对流层垂直柱浓度^[17-18]。在 OMI 出现行异常前,斜柱浓度的反演误差为 0.3×10¹⁵~1×10¹⁵ molec·cm⁻²。

表 1 研究数据介绍
Table 1 Introduction of data

传感器名称	水平分辨率	气体	研究使用数据	栅格空间分辨率	数据日期(2015)
OMI	13 km×24 km	SO ₂	OMSO2	0.25°×0.25°	8月1日~9月20日
		NO ₂	OMNO2	0.125°×0.125°	8月1日~9月20日

研究所用卫星数据如表 1 所示,数据使用前需要进行相应的处理,其中针对 OMIL2 SO₂ PBL 柱浓度数据的处理方法如下:

首先,利用 IDL 读取 HDF-EOS5 数据,获取边界层 SO₂ 柱浓度(Column Amount SO₂_PBL)、云量(Radiative Cloud Fraction)、太阳天顶角(Sloar Zenith Angle)和经纬度信息。按照 OMI 用户说明排除云量大于 0.2、太阳天顶角大于 50°及轨道边缘的像元,通过判别行异常标识去掉受行异常影响的像元,将 SO₂ 总量值大于 0 的数据投影到等经纬度的格网,处理成 ArcGIS 能读写的栅格文件。

然后,计算时间和空间上的平均值。时间上,分

别计算 2015 年减排前(8 月 10 日~8 月 19 日)、周边减排(8 月 20 日~8 月 27 日)、全面减排(8 月 28 日~9 月 3 日)及减排后(9 月 4 日~9 月 20 日)各时间段的平均值,以及 2012~2014 年各时间段的 3 年平均值,分析减排的力度及减排前后的变化特征。空间上,将京津冀地区作为核心区域,山东、河南北部、山西、内蒙古东南部作为外围区域,分别计算北京、核心区域、外围区域的平均值,分析污染的分布特征。

最后,制作华北平原地区(110°~122.4°E,34°~43°N) SO₂ 浓度卫星遥感监测空间分布图,如图 1(a)所示。

针对 OMIL2 NO₂ 对流层垂直柱浓度数据处理

方法与 SO₂ 数据相同。

3 结果与分析

3.1 星—地相关性分析

为验证卫星反映地面污染排放的能力,研究采

用北京市环境保护监测中心获取的北京市 2015 年近地面 SO₂、NO₂ 质量浓度与对应的卫星反演结果进行相关性对比,北京市共有 35 个地面监测站点,其分布如图 1(b)所示。

由于 Aura 卫星过境时刻为下午 1:30,地基 SO₂、

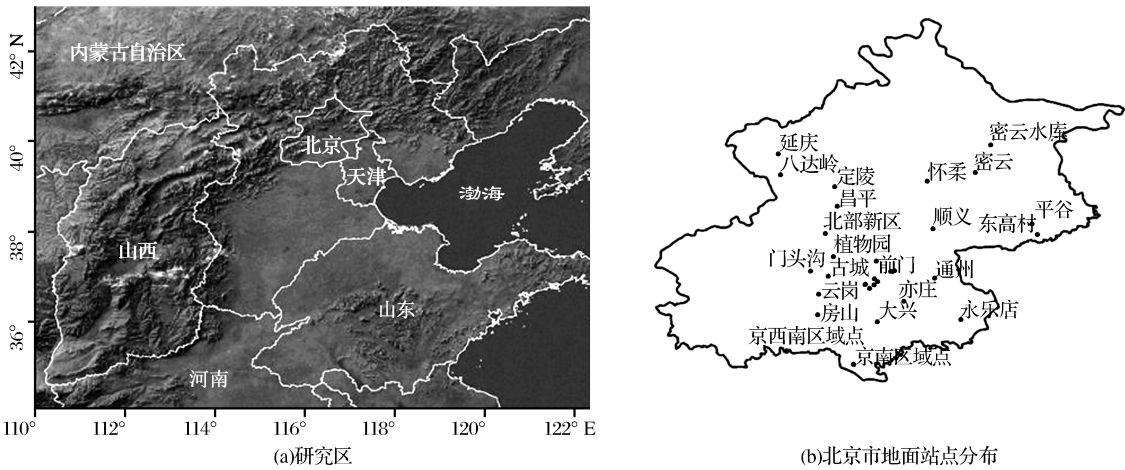


图 1 研究区域及北京市地面站点分布

Fig.1 The map of study area and the spatial distribution of surface monitoring stations located in Beijing

NO₂ 质量浓度观测数据均采用整个研究时间段内 13:00~15:00 的小时平均值,卫星反演结果采用过

境时刻数据。将星—地反演结果作比较,结果如图 2 所示。

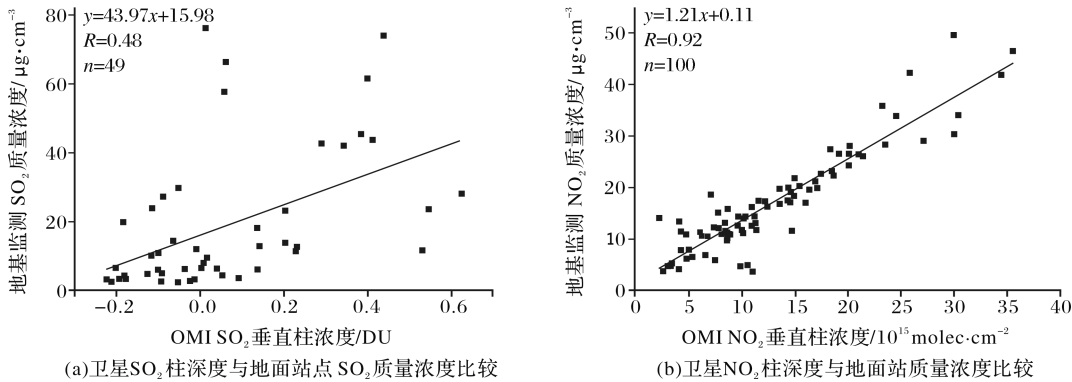


图 2 卫星 SO₂ 和 NO₂ 柱浓度与地面站点 SO₂ 和 NO₂ 质量浓度比较

Fig.2 Scatter plot of sulfur dioxide and nitrogen dioxide column density and mass concentration

由于太阳辐射少、云量覆盖大、臭氧干扰影响大、仪器本身的问题等原因,OMI 反演的 SO₂ 柱浓度存在一些负值,这些负值可代表低 SO₂ 排放。由图 2(a)可看出,星—地测得的 SO₂ 浓度相关系数为 0.48,相关性较差,主要由以下 3 个方面造成的:①测得的物理量不同。卫星反演的是边界层 SO₂ 柱浓度,地面站点测得的是近地面 SO₂ 质量浓度,二者的相关性会受到 SO₂ 垂直廓线的影响;②测量原理不同。卫星是利用气体的吸收作用会导致光强

的衰减,通过分析卫星接收到的光谱与太阳参考光谱的差别,结合 SO₂ 的光谱特性,反演 SO₂ 浓度,具体反演原理详见数据与方法部分。地面监测站采用美国 TE-43C 型分析仪,仪器基于 SO₂ 吸收紫外线后能被一定波长的紫外线激发,当其返回到基态时释放波峰为 330 nm 的特征荧光,光强与 SO₂ 浓度呈线性正相关,检测光强即可测定 SO₂ 浓度;③OMI SO₂ 产品精度尚需提高。SO₂ 的吸收作用只是卫星探测信号中的弱信号,受大气气溶胶、云、

臭氧的吸收等噪声干扰大。综上,目前卫星反演的 SO₂ 产品还不能直接反映北京市地面 SO₂ 的排放能力,然而相关研究表明卫星反演结果能够体现区域 SO₂ 柱浓度的变化,Jiang 等^[19] 分析了 2005~2008 年中国地区边界层 SO₂ 柱浓度的时空变化趋势,发现 SO₂ 高值区主要分布在中国的中东部,其中有 23 个省区 SO₂ 呈上升趋势;Krotkov 等^[20] 分析了 2005~2015 年全球重污染区 SO₂ 柱浓度的变化,发现美国东部下降 80%,中国华北平原地区下降 50%,印度燃煤电厂排放的 SO₂ 增加 100%。

相比于 SO₂ 而言,2015 年北京市 NO₂ 的地基观测与卫星反演结果的相关性好,相关系数为 0.92,如图 2(b)所示,说明 OMI 反演 NO₂ 柱浓度结果能有效地反映该地区地面 NO₂ 的排放能力。

3.2 华北平原地区 SO₂ 浓度变化分析

二氧化硫(SO₂)是大气中一种重要污染物,是评价城市空气质量的一项重要指标。SO₂ 主要来自于含硫化石燃料的燃烧、火山喷发和微生物的分解^[21]。图 3 是由 OMI 产品获取的华北平原地区 SO₂ 柱浓度分布图,其中图 3(a)至图 3(d)为 2015 年 4 个时期华北平原地区 SO₂ 柱浓度的分布图,图 3(e)至图 3(h)是对应 4 个时期 2012~2014 年 3 年平均值,用每个时期的 2015 年结果减去前 3 年平均值得到 2015 年较前三年的变化情况,即图 3(i)至图 3(l)。由图 3(e)至图 3(h)可以看出:在排放源不变的情况下,减排前 SO₂ 浓度明显低于其他 3 个时期。考虑到污染物在大气中的浓度不仅与排放源有关,还受到气象要素的影响:通常污染物在大气中的浓度与平均风速成反比^[22],降水对污染物具有湿清除的作用。本文利用中国气象科学数据共享服务网站上的地面气象资料对研究区的气象条件进行了分析,按照定义的时间段将近 4 年的各气象要素进行平均,结果如表 2 所示。

如表 2 所示,各地区在 8 月 1 日~8 月 19 日相对湿度均大于其他 3 个时期,降水和风速均大于周边减排期,即减排前的扩散条件远好于开始减排及减排措施取消之后,故在排放源不变的前提下,8 月 1 日~8 月 19 日期间卫星监测到的污染气体的浓度应小于其余时间段。

对比 2015 年 4 个时期发现,较减排前,周边减排期间天津、河北唐山、秦皇岛等地 SO₂ 浓度降低,京津冀地区其余城市 SO₂ 浓度变化不大,外围地区部分城市有一定幅度上升。因天津从 8 月 23 日起全市煤电机组除已达到燃气排放标准的,在确保稳

定达标的基础上全部限产限排 30%,否则一律停产。北京市虽从 8 月 20 日起开启了空气质量保障措施,但该阶段北京风速小、降水少,不适于 SO₂ 的扩散或沉降,故较减排前 SO₂ 浓度变化不大。外围地区因未减排,故在较差的气象条件下,SO₂ 浓度有一定幅度上升。全面减排期间,北京、天津、河北南部、山东、河南北部地区 SO₂ 柱浓度有明显降低,归

表 2 华北平原地区近 4 年主要气象参数均值
Table2 Mean values of major meteorological parameters
in North China Plain during the study period
in each year during 2012~2015

地区	日期	温度 /℃	相对湿度 /%	降水 /mm	风速 /m·s ⁻¹
北京	8 月 1 日~8 月 19 日	25.8	75.2	3.6	1.5
	8 月 20 日~8 月 27 日	23.9	67.0	0.4	1.5
	8 月 28 日~9 月 3 日	23.0	68.2	6.3	1.6
	9 月 4 日~9 月 20 日	19.7	70.9	1.4	1.5
天津	8 月 1 日~8 月 19 日	26.7	76.7	6.0	1.8
	8 月 20 日~8 月 27 日	25.4	68.0	0.9	1.7
	8 月 28 日~9 月 3 日	24.5	68.3	6.5	2.2
	9 月 4 日~9 月 20 日	21.3	71.7	2.8	1.7
河北	8 月 1 日~8 月 19 日	24.9	77.1	6.8	1.8
	8 月 20 日~8 月 27 日	23.1	67.8	1.1	1.8
	8 月 28 日~9 月 3 日	22.0	69.9	4.1	1.9
	9 月 4 日~9 月 20 日	19.0	71.4	2.3	1.7
山东	8 月 1 日~8 月 19 日	26.9	82.5	5.2	2.5
	8 月 20 日~8 月 27 日	24.7	75.0	2.1	2.0
	8 月 28 日~9 月 3 日	24.0	75.1	3.5	2.5
	9 月 4 日~9 月 20 日	21.6	73.4	0.9	2.1
山西	8 月 1 日~8 月 19 日	23.3	73.9	2.9	1.7
	8 月 20 日~8 月 27 日	20.7	68.8	1.0	1.6
	8 月 28 日~9 月 3 日	19.2	68.5	4.5	1.8
	9 月 4 日~9 月 20 日	17.3	68.8	1.7	1.7

因于 7 省区已全部实施减排措施,其中河北省将控制区分为重点和一般控制区,如图 4(a),要求重点控制区未完成超低排放改造的燃煤电厂减少排放污染物 50%以上;一般控制区域内减少排放污染物 30%以上。山西西南部临汾和运城污染严重,主要由于该地区 SO₂ 排放严重,且盛行的偏西风将陕西渭南市的污染传输到此地,加上盆地地形导致污染物不易扩散导致污染加重。减排措施取消后,华北平原大部分地区 SO₂ 明显增多,一是由于该时期降水减少、风速降低,沉降或扩散条件变差;二是减排措施取消后,人为排放的 SO₂ 增加。

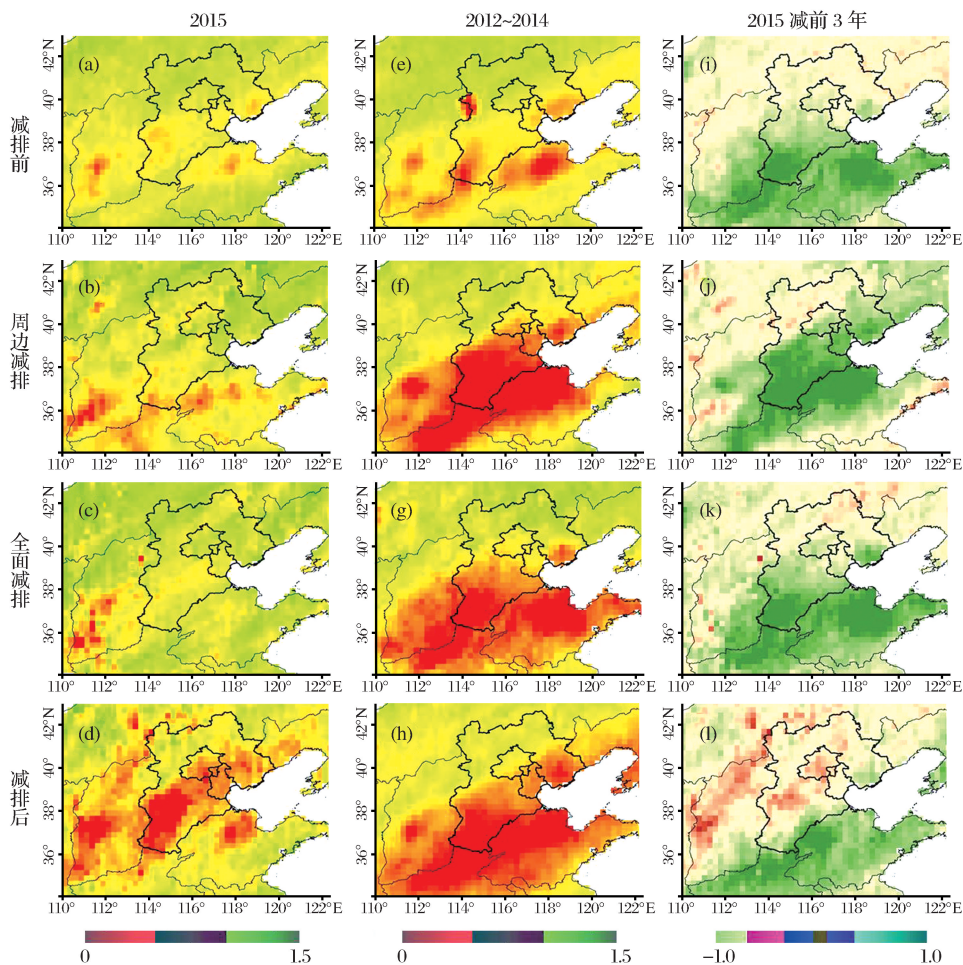


图 3 由 OMI 数据产品获取的华北平原地区边界层 SO₂ 垂直柱浓度的分布图(单位:DU)

Fig.3 The spatial distribution of planetary boundary layer SO₂ column densities retrieved from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) in North China Plain (Unit:DU)

从图 3(i)至图 3(l)发现山东在 2015 年 SO₂ 浓度明显低于前 3 年,降低近 1 DU。据报道,2015 年以来山东对 423 万 kW 燃煤机组实施了脱硫改造,1 941 万 kW 燃煤机组建成了脱硝设施。为保障阅兵期间空气质量,该省划分了重点和一般控制区域,如图 4(b),确保在 8 月底前淘汰 3 183 台燃煤小锅炉,阅兵期间暂停运行城市建成区内 10 t/h 及以下

燃煤锅炉。从山东减排成效看出,严格的减排措施可有效保障地区空气质量。

为定量评估核心地区和外围地区 SO₂ 的污染程度,本文计算了各地区在不同时期 SO₂ 浓度的平均值及 2015 年比 2012~2014 年同期的增长百分比,如表 3 所示。

对上表及图 3(i)至图 3(l)进行分析:与前 3 年

表 3 华北平原地区边界层 SO₂ 柱浓度 2015 及 2012~2014 年平均值

Table3Mean values of planetary boundary layerSO₂ column densities in 2015 and 2012~2014

时间段	北京市			京津冀地区			外围地区		
	2012~2014 年		2015 年	2012~2014 年		2015 年	2012~2014 年		2015 年
	平均值	平均值	差值	平均值	平均值	差值	平均值	平均值	差值
	/DU	/DU	/%	/DU	/DU	/%	/DU	/DU	/%
减排前	0.57	0.59	4	0.74	0.64	−16	0.72	0.61	−15
周边减排	0.89	0.61	−31	1.11	0.6	−46	0.98	0.67	−32
全面减排	0.76	0.47	−38	0.92	0.59	−36	0.94	0.59	−37
减排后	0.76	0.99	30	1.01	1.02	1	1.02	0.81	−21

现在京津冀地区达 46%，北京市也有大幅下降，降幅为 31%。外围地区虽未开始实施减排，但山东的严格减排为外围地区 SO₂ 浓度降低 32% 做出巨大贡献。全面减排阶段，北京当地减排降低了人为源的排放，周边 6 省区联动减排减少了区域传输对北京的影响，故在此阶段北京达到最高降幅(38%)。京津冀和外围地区的减排效果同样明显，降幅分别为 36% 和 37%。减排措施取消后北京市 SO₂ 浓度迅速回升，比前 3 年同期增长 30%，河北和山西的 SO₂ 浓度同样出现明显回升，说明 3 个地区减排力度较大。由于半年来山东省减排力度较大，所以外围地区 SO₂ 浓度总体比前 3 年同期要低，但降幅由 37% 降至 21%。减排后整个华北地区的空气质量发生反弹，说明短期的联控减排措施有效保障了活动期间的空气质量。

3.3 华北平原地区 NO₂ 浓度变化分析

氮氧化物(NO 和 NO₂)主要来自化石燃料燃烧、生物质燃烧、土壤排放和闪电^[23]，其中人为源的贡献大约为 50%^[24]，而人为源中在非取暖期间机动车尾气排放对北京市对流层 NO₂ 浓度贡献可能高达 70%^[25]。NO₂ 在大气中的寿命较短，故可作为人为源排放强度的指示因子。图 5 为从 OMI 产品获取的华北平原地区对流层 NO₂ 垂直柱浓度的分布，与图 3 展示方式相同。

由图 5(e)至图 5(h)看出，在排放源不变的情况

下，图 5(f)的污染要重于图 5(e)。整个研究区 NO₂ 浓度的平均值由 $13.01 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增加至 $13.53 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，这与分析气象要素得到的结论相一致。从图 5(a)至图 5(d)发现，较减排前而言，周边减排期间北京、河北保定、石家庄、唐山、秦皇岛等地 NO₂ 浓度明显减少，归功于严格的交通管制。天津自 9 月 1 日起才执行单双号限行，故在较差的气象条件下，天津 NO₂ 浓度由 $14.20 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增加至 $15.85 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。周边地区因未实施减排，NO₂ 浓度有所增加。全面减排期间，七省区统一实施临时强化减排措施，京津冀地区 NO₂ 浓度由周边减排期间的 $12.84 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 降至 $11.54 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，外围地区 NO₂ 浓度由 $12.21 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 降至 $11.81 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。减排措施取消后，华北平原大部分地区 NO₂ 浓度普遍升高，整体增多 $1 \sim 2 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。一是由于该时期近地面多偏南风、风速变小、降水减少，扩散条件较差，二是减排措施取消后人为排放的 NO₂ 增多。

类比于 SO₂，计算了华北平原地区 NO₂ 柱浓度 2015 及 2012~2014 年平均值，如表 4 所示。2013 年国务院部署防治大气污染“国十条”，为此京津冀地区积极开展协同治污，已初显成效。2015 年减排前，华北平原地区 NO₂ 浓度整体比前 3 年下降约 5%，减排期间 NO₂ 浓度降幅最大出现在北京，高达

表 4 华北平原地区对流层 NO₂ 柱浓度 2015 及 2012~2014 年平均值(单位:10¹⁵ molec·cm⁻²)

Table 4 Mean values of tropospheric NO₂ vertical column densities in 2015 and 2012~2014(unit:10¹⁵ molec·cm⁻²)

时间段	北京市			京津冀地区			外围地区		
	2012~2014 年	2015 年	差值 /%	2012~2014 年	2015 年	差值 /%	2012~2014 年	2015 年	差值 /%
	平均值	平均值		平均值	平均值		平均值	平均值	
减排前	13.58	13.42	-1	13.81	13.1	-5	12.77	11.94	-6
周边减排	14.83	11.96	-19	14.58	12.84	-12	13.13	12.21	-7
全面减排	13.74	11.21	-18	14.06	11.54	-18	13.16	11.81	-10
减排后	15.26	15.31	0.3	14.89	17.65	19	13.10	12.74	-3

19%，归功于严格的交通管制。官方称直接反映机动车尾气排放的 NO，在交通污染高峰时段，峰值浓度降幅超过 50% (<http://www.7158chat.com/dongtai/125470.html>)。在 2014 年 APEC 会议和 2008 年奥运会期间同样进行了严格的交通管制，均取得显著成效，APEC 期间北京 NO₂ 浓度比前三年同期下降 47%^[12]，奥运会期间减少 46%^[26]。

京津冀地区在整个减排期间 NO₂ 浓度一直呈

下降趋势，当减排措施实施的范围从北京扩展到京津冀地区时，NO₂ 浓度的降幅从 12% 升至 18%。截止到 8 月 28 日外围地区还未进行全面减排，故山东东南部、河南东部和南部、山西西部等地 NO₂ 浓度有所增加。减排后只在山西运城显示明显增多，与 SO₂ 趋势相同。减排措施取消后，北京、天津、河北唐山反弹明显，京津冀地区比前 3 年增长 19%。此前，奥运会、APEC 会议后期也出现过相似的情

况, Ma 等^[27] 利用 MAX-DOAS 在北京进行了长期观测, 发现 2008 年 8 月北京地区对流层 NO₂ 垂直柱浓度比 2009~2011 年同期低 39%~54%。以上重大事件具有共同特征: 减排措施取消后, NO₂ 浓度会出现回升, 这说明减排措施有效且力度大。

4 结 语

利用 OMI 传感器 SO₂、NO₂ 数据, 分析华北平原地区 2015 年减排前、周边减排、全面减排及减排后 SO₂、NO₂ 柱浓度变化, 通过与前 3 年同期相比, 得到以下结论:

(1) OMI 反演 NO₂ 柱浓度结果能有效地反映北京市地面 NO₂ 的排放能力, 星一地结果的相关系数达 0.92; OMI 反演的 SO₂ 柱浓度结果与地面监测站测得的 SO₂ 质量浓度相关性较差, 相关系数为 0.48, 目前 OMI SO₂ 产品还不能直接反映北京市近地面的 SO₂ 排放情况。

(2) 2015 年阅兵期间的减排措施有效得控制了大气中 SO₂ 的浓度。在 2015 年 4 个研究阶段中, 全面减排期间减排范围最广、力度最大, 该阶段 SO₂ 柱浓度达到最低。与前 3 年相比, SO₂ 浓度有明显下降, 在气象条件不适于扩散的周边减排期间, 京津冀地区的降幅依然达到 46%, 外围地区下降 32%; 全面减排期间, 北京降幅最大为 38%, 京津冀和外围地区分别下降 36%和 37%, 说明严格的联防联控减排措施有力的降低了华北地区 SO₂ 的柱浓度。

(3) 阅兵期间华北平原地区 NO₂ 柱浓度普遍降低。与 SO₂ 相似, 在全面减排期间 NO₂ 柱浓度降至最低。与前 3 年相比, 周边减排期间京津冀和外围地区分别下降 12%、7%, 此阶段北京市降幅较大, 达 19%; 全面减排期间, 京津冀和外围地区降幅变大, 分别为 18%、10%; 减排措施取消后, 各地有不同程度的回升, 2008 年奥运会、2010 年上海世博会、2014 年 APEC 会议等重大事件都具有这一现象, 说明北京及周边六省区采取的联动减排措施有效。

参考文献 (References):

[1] Benkovitz C M, Schwartz S E, Jensen M P, *et al.* Attribution of Modeled Atmospheric Sulfate and SO₂ in the Northern Hemisphere for June-July 1997[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, (6): 4723-4738.

[2] Jernelov A. Acid-Rain and Sulfur-dioxide Emissions in China [J]. *Ambio*, 1983, 12(6): 362-362.

[3] Yu Huan, Wang Pucai, Zong Xuemei, *et al.* Changes of-

NO₂ Column Concentration during the Olympic Games in Beijing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(3): 299-304. [余环, 王普才, 宗雪梅, 等. 奥运会期间北京地区卫星监测 NO₂ 柱浓度的变化[J]. *科学通报*, 2009, 54(3): 299-304.]

[4] Eisinger M, Burrows J P. Tropospheric Sulfur Dioxide Observed by the ERS-2 GOME Instrument[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(22): 4177-4180.

[5] Krotkov N A, Carn S A, Krueger A J, *et al.* Band Residual Difference Algorithm for Retrieval of SO₂ from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI) [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1259-1266.

[6] Lee C, Richter A, Weber M, *et al.* SO₂ Retrieval from SCIAMACHY Using the Weighting Function DOAS (WFOAS) Technique: Comparison with Standard DOAS Retrieval[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(20): 6137-6145.

[7] Martin R V, Chance K, Jacob D J, *et al.* An Improved Retrieval of Tropospheric Nitrogen Dioxide from GOME[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, 107 (D20): 4437. doi: 10.1029/2001JD001027.

[8] Yang K, Krotkov N A, Krueger A J, *et al.* Improving Retrieval of Volcanic Sulfur Dioxide from Backscattered UV Satellite Observation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L03102. doi: 10.1029/2008GL036036.

[9] Yang K, Carn S A, *et al.* Advancing Measurements of Tropospheric NO₂ from Space: New Algorithm and First Global Results from OMPS[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41 (13): 4777-4786.

[10] Li C, Zhang Q, Krotkov N A, *et al.* Recent Large Reduction in Sulfur Dioxide Emissions from Chinese Power Plants Observed by the Ozone Monitoring Instrument[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L08807. doi: 10.1029/2010GL042594.

[11] Yan H H, Chen L F, Tao J H, *et al.* SO₂ Long-term Monitoring by Satellite in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(2): 390-404.

[12] Huang K, Zhang X Y, Lin Y F. The “APEC Blue” Phenomenon: Regional Emission Control Effects Observed from Space [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 164: 65-75.

[13] Li Haiyan, Zhang Qiang, Duan Fengkui, *et al.* The “Parade Blue”: Effects of Short-term Emission Control on Aerosol Chemistry[J]. *Faraday Discussions*, 2016, 189: 317-335.

[14] Li C, Joiner J, Krotkov N A, *et al.* A Fast and Sensitive New Satellite SO₂ Retrieval Algorithm based on Principal Component Analysis: Application to the Ozone Monitoring Instrument[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(23): 6314-6318.

[15] Fioletov V E, McLinden C A, Krotkov N, *et al.* Life Times and Emissions of SO₂ from Point Sources Estimated from OMI [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(6): 1969-1976.

[16] Perner D, Platt U. Detection of Nitrous-acid in the Atmosphere by Differential Optical-Absorption[J]. *Geophysical Research Letters*, 1979, 6(12): 917-920.

[17] Richter A, Burrows J P. Tropospheric NO₂ from GOME Measurements [J]. *Advances in Space Research*, 2002, 29

- (11):1673-1683.
- [18] Boersma K F, Eskes H J, Veefkind J P, *et al.* Near-real Time Retrieval of Tropospheric NO₂ from OMI[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(8): 2103-2118.
- [19] Jiang J, Zha Y, Gao J, *et al.* Monitoring of SO₂ Column Concentration Change over China from Aura OMI data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(6): 1934-1942.
- [20] Krotkov N A, McLinden C A, Li C, *et al.* Aura OMI Observations of Regional SO₂ and NO₂ Pollution Changes from 2005 to 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(7): 4605-4629.
- [21] Reddy M S, Venkataraman C. Inventory of Aerosol and Sulfur Dioxide Emissions from India: I-Fossil Fuel Combustion[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(4): 677-697.
- [22] Xue Jianping. The Influence of Main Meteorological Factors on Air Pollution[J]. *Journal of Inner Mongolia Radio & TV University*, 2005, 5: 38-39. [薛建平. 浅论主要气象要素对大气污染的影响[J]. 内蒙古电大学刊, 2005, 5: 38-39.]
- [23] Lin J T. Satellite Constraint for Emissions of Nitrogen Oxides from Anthropogenic, Lightning and Soil Sources over East China on a High-resolution Grid[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(6): 2881-2898.
- [24] Beirle S, Platt U, Wenig M, *et al.* Weekly Cycle of NO₂ by GOME Measurements: A Signature of Anthropogenic sources [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2003, (3): 2225-2232.
- [25] Wang Y, McElroy M B, Boersma K F, *et al.* Traffic Restrictions Associated with the Sino-African Summit: Reductions of NO_x detected from Space[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(8): L08814. doi:10.1029/2007GL029326.
- [26] Wang S X, Zhao M, Xing J, *et al.* Quantifying the Air Pollutants Emission Reduction during the 2008 Olympic Games in Beijing[J]. *Environment Science Technology*, 2010, 44(7): 2490-2496.
- [27] Ma J Z, Beirle S, Jin J L, *et al.* Tropospheric NO₂ Vertical Column Densities over Beijing: Results of the first Three Years of Ground-based MAX-DOAS Measurements (2008~2011) and Satellite Validation[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(3): 1547-1567.

Analysis on Effectiveness of SO₂ and NO₂ Emission Reduction in North China Plain by OMI Data during the Military Parade 2015

Zhang Han^{1,3}, Yu Chao^{1,2}, Su Lin¹, Wang Yapeng^{1,3}, Cheng Liangfu¹

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Beijing 100084, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: During the military parade 2015 (September 3rd), emission control measures were implemented in Beijing and surrounding areas. To evaluate the effect of these measures, we use the planetary boundary layer SO₂ column densities and tropospheric NO₂ column densities observed from the satellite instruments OMI in this study. We preprocessed satellite data and calculated the average of time and space from August 1 to September 20 in Beijing, Jing-Jin-Ji region and surrounding regions (Shandong, Henan, Shanxi and Inner Mongolia). Finally, we plotted SO₂ and NO₂ space distributions of Beijing and North China Plain. We analyzed the space distribution of North China Plain SO₂ and NO₂ concentration during the period of the military parade 2015. It shows that both SO₂ column densities and NO₂ column densities reach the minimum during the period of the across-the-board emission reductions. Compared to the past three years (2012-2014), NO₂ and SO₂ column densities were found to manifest significant reductions over North China Plain. During the period of emission reductions (Aug. 20-Sep. 3), the study showed about 18% and 46% reduction of NO₂ and SO₂ concentration in the Jing-Jin-Ji region and decrease of NO₂ by 10% and SO₂ by 37% in the surrounding regions. However, air quality plummeted after the lifting of local and regional joint emission source control measures. Compared to the past three years, it showed increase of NO₂ by 19% and SO₂ by 1% in the Jing-Jin-Ji region. SO₂ concentration increased by 30% over Beijing especially. It suggests the effectiveness of regional joint emission source control measures. Our study indicates that the emission source control measures were effective in Beijing and surrounding provinces during the military parade. With the advantage of real-time and large-scale, observation from space could be applied to atmospheric pollution monitoring and assessment of emission control measures.

Key words: Parade blue; Remote sensing; Regional atmosphere pollutants; Emission control