

奥运期间北京地区卫星监测 NO_2 柱浓度的变化

余环^{①②}, 王普才^{①*}, 宗雪梅^①, 李昕^③, 吕达仁^①

① 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测实验室, 北京 100029;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 北京市环境保护局, 北京 100044

* 联系人, E-mail: pcwang@mail.iap.ac.cn

2008-12-29 收稿, 2009-01-15 接受

北京市科学技术委员会大气污染控制专项基金(批准号: Z005190042791)、国家自然科学基金(批准号: 40875084)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB403702)资助项目

摘要 利用美国 Aura 卫星装载的 OMI 仪器观测反演得到的对流层 NO_2 柱浓度资料, 通过与北京近年(2005~2007 年)同期及其与周边城市天津和唐山的综合比较, 评估了北京奥运空气质量保障措施的实施效果. 奥运会期间华北地区对流层 NO_2 柱浓度分布图像资料清楚地说明了北京市实施奥运空气质量保障方案的显著效果, 北京市 NO_2 柱浓度明显低于周边城市天津和唐山, 而 2005~2007 年同期三地具有大致相同的 NO_2 柱浓度. 进一步定量评估给出了保障措施关键时期 2008 年 7~8 月北京地区对流层 NO_2 柱浓度下降了约 40% 的结果.

关键词

北京奥运会
空气质量保障措施
效果评估
OMI
 NO_2

NO_2 是对流层大气中的一种重要痕量气体, 它和 NO (统称为 NO_x) 在对流层化学中起重要作用. NO_x 参与光化学催化臭氧产生, 导致光化学烟雾和对流层臭氧的增加, 由 NO_x 生成的硝酸会与其他物质一起形成酸雨, 对动植物和人类产生很大的危害.

NO_x 源主要来自化石燃料燃烧、土壤排放、生物体燃烧和闪电^[1], 人为排放源有很大的贡献^[2,3], 在人为源中, 主要来自交通运输工具的尾气排放, 其次是电厂和工业源^[1]. 在非取暖期, 机动车尾气排放对北京地区对流层 NO_2 浓度贡献可能高达 70%^[4]. 中国作为一个迅速发展的发展中国家, 车辆保有量激增, 因此 NO_x 的排放也迅速增长, 增速远远高于其他国家^[2,5~7].

1990 年代以来, 卫星环境遥感应用领域越来越广, 几乎覆盖了环境保护的各个方面. 与地面观测相比, 卫星观测具有覆盖范围广、实时、连续、分辨率高的优势, 可以获得常规观测手段无法获得的重要参数, 观测大气中微量气体的长期变化趋势. 对全球对流层 NO_2 的分布观测从 1996 年就开始通过不同卫星上的传感器测量得到了一系列的结果^[4,8,9].

北京作为全国政治、经济和文化的中心, 社会发

展迅速, 已经成为世界上快速发展的大都市之一, 然而, 城市发展所伴随是建设规模的不断扩大、人口密度的不断增加、机动车数量的快速增长等因素, 导致了污染物的大量排放, 造成了较为严重的大气环境污染. 北京市在申办 2008 年奥运会时提出了“绿色奥运、科技奥运和人文奥运”三大主题, “绿色奥运”摆在第一位. 为切实履行申办奥运会时的环保承诺, 进一步改善空气质量, 成功举办一届有特色、高水平的奥运会, 在 2008 年北京奥运会、残奥会期间(7 月 20 日至 9 月 20 日)实施了加强机动车管理、严格控制施工重点工序、重点污染企业减排等 6 大措施, 确保良好的空气质量. 其中对北京市机动车和外省区市进京车辆的交通管理措施从 7 月 1 日开始实施. 截止到北京奥运会举行时, 按照北京市环境保护局提供的官方数据, 北京市机动车保有量已经达到 340 万辆. 由于奥运交通管制措施和北京市空气质量保障措施的实施, 在奥运会举行期间, 约有 60%, 即约 200 万辆车辆停驶.

北京市奥运空气质量保障措施是分几个阶段逐步实施的. 从 6 月 23 日开始, 政府机关和企事业单位机动车自行停驶 50%, 7 月 1 日以后, 增加到 70%. 从

7月1日开始,高排放黄标车禁行,外地货运车辆禁止驶入北京界内,绕行河北.从7月20日起,实施机动车单双号分日行驶.7月1日以前,北京及周边地区的高排放工厂被要求达标排放,部分企业被要求减产、停产,以减少污染物排放.所有奥运空气质量保障措施到9月20日残奥会结束后停止.根据北京市环境保护局的监测结果及其委托北京工业大学和中国环境科学研究所做的调查结果:7月1日前,北京市属高排放工厂基本上按北京市政府要求做到了达标排放,而周边地区当时还没有做到达标排放,是在临近奥运的一段时间内逐步实现达标排放的.

地球观测系统(EOS)的 Aura 卫星上的臭氧监测仪(OMI)观测资料是获得 NO_2 柱浓度区域分布的重要资料.这里利用 OMI 资料,通过北京奥运期间与2005~2007年近年同期资料以及相邻城市天津与唐山的比较,分析了北京市空气质量发生的变化及其与周边城市的差别,以评估奥运空气质量保障措施对于北京市空气质量改善的效果.

1 OMI 卫星仪器与 NO_2 柱浓度反演方法

OMI是一台由荷兰皇家气象学会和芬兰气象学会共同研制,用于天底扫描的紫外-可见光波段成像光谱仪,可以观测直接太阳辐射和地球反射的太阳辐射,搭载在NASA地球观测系统系列卫星的Aura卫星上,2004年7月15日发射升空.这是一颗太阳同步轨道的极轨卫星,轨道高度约705 km,过境时间一般在当地时13:40~13:50.观测光谱范围270~500 nm,扫描宽度约为2600 km,每天完成一次全球扫描.OMI的空间分辨率在天底位置约为24 km×13 km,到扫描边缘分辨率降低很多,达到128 km×13 km^[10,11].

OMI仪器对 NO_2 柱浓度的近实时反演算法是荷兰皇家气象研究所(KNMI)发展的以反演-同化-模式(RAM)方法为基础的算法^[10].斜柱浓度是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,即差分光学吸收方法(DOAS)得到的,拟合波长取(405 nm, 465 nm),考虑了 O_3 和旋转拉曼散射造成的Ring效应,采用的是非线性拟合.平流层的 NO_2 柱浓度和平流层 NO_2 浓度垂直分布是利用ECMWF预报的气象场和卫星观测的 NO_2 柱浓度输入化学传输模式TM4得到的.对流层空气质量因子(AMF)是通过把模式输出的 NO_2 的廓线以及云量、云顶高度、地表反照率、观测几何角度输入大气辐射传输模式计算出来

的.与NASA提供标准的 NO_2 算法^[12]相比,它具有处理数据快(从卫星数据观测,经过数据传输,数据处理,到生成产品,画图约需要3小时40分钟,而标准算法需要1 d),反演误差较小的特点^[10].

单个 NO_2 柱浓度中的反演中,斜柱浓度的反演误差为 $\pm 0.5 \times 10^{15} \sim \pm 1.5 \times 10^{15}$ 分子·cm⁻²,AMF的计算的不确定性在10%~40%^[10,13].

OMI仪器观测的对流层 NO_2 柱浓度已经被广泛应用于监测全球范围内不同地区的 NO_2 柱浓度的年变化趋势、全球分布特征、重要大气环境事件的监测及影响评估^[4,6,7].

2 奥运期间北京地区 NO_2 柱浓度相对于近年同期和周边地区的变化

为了定量评估北京奥运期间所采取的系列空气质量保障措施对削减氮氧化物排放的效果,首先获得了从OMI观测数据反演的华北地区2005~2007年夏季(6~8月) NO_2 柱浓度的平均分布,如图1.然后把2008年奥运期间及其之前的北京 NO_2 柱浓度与2005~2007年同期进行了比较,并且还类似工业区域天津和唐山的情况做了比较,得出了奥运期间北京 NO_2 柱浓度相对于近年同期及其污染情况类似的天津和唐山发生的变化或差别.

图1给出了从OMI数据反演并经过统计计算得到的2005~2007年夏季(6~8月) NO_2 柱浓度的平均分布图.有效云量大于50%的数据没有进入统计样本,是为了保证好的数据质量.有效样本数占统计区间日数的40%左右.图中的一个显著特点是存在以北京、天津、唐山为中心的3个高 NO_2 浓度分布区,分布面积大致相当.这3个区域都是人口较多或者工业比较发达的区域,其他区域浓度较小,这主要是由于 NO_2 的寿命比较短,特别是夏季,其寿命只有几个小时,使得污染物不可能长距离输送.选取以(116.38°E, 39.94°N), (117.38°E, 39.06°N), (118.38°E, 39.81°N)为中心,0.75°(经度)×0.5°(纬度)范围的区域代表北京、天津、唐山3个污染区域,来分析污染区域的 NO_2 浓度变化.对北京来说,这个区域大致相当于六环路围成的区域,约2000 km².这个分辨率既能够很好表现 NO_2 的高浓度区域,又包含足够的卫星观测像元,可以减少单个像元的反演产生的误差.

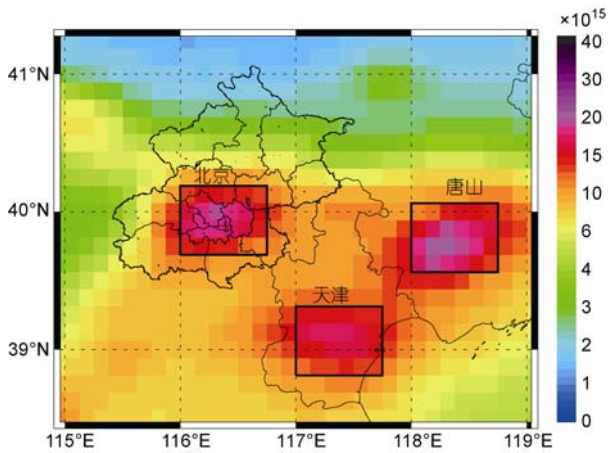


图1 2005~2007年夏季(6~8月)京津唐地区 NO_2 垂直柱浓度平均分布

单位是分子 $\cdot\text{cm}^{-2}$, OMI的像素分辨率是 $0.125^\circ\times 0.125^\circ$. 图中黑框标示的3个区域是以 $(116.38^\circ\text{E}, 39.94^\circ\text{N})$, $(117.38^\circ\text{E}, 39.06^\circ\text{N})$, $(118.38^\circ\text{E}, 39.81^\circ\text{N})$ 为中心, $0.75^\circ\times 0.5^\circ$ 范围的区域, 分别用来代表北京、天津、唐山3个污染区域. 这3个区域的 NO_2 污染物平均柱浓度大致相当, 约为 15×10^{15} 分子 $\cdot\text{cm}^{-2}$

对于北京奥运会期间及其前后的 NO_2 浓度分布及其变化, 我们密切关注, 尽最大可能获得了相关数据, 以评估奥运空气质量保障措施的实施效果. 图2显示的是北京地区2008年6~8月 NO_2 浓度的逐日变化. 可以看出, 6月北京 NO_2 的柱浓度比较大, 其变化也比较大, 经常有 20×10^{15} 分子 $\cdot\text{cm}^{-2}$ 的高值, 特别是6月5日和12日柱浓度分别高达 47×10^{15} 和 36×10^{15} 分子 $\cdot\text{cm}^{-2}$. 6月下旬, 由于连日的阴雨天气, 数据基本缺失. 7月以后, 北京的 NO_2 柱浓度一直维持较低

的浓度, 一般都在 $5\times 10^{15}\sim 15\times 10^{15}$ 分子 $\cdot\text{cm}^{-2}$ 范围内变化. 相比北京, 临近的天津和唐山地区 NO_2 浓度一直变化较大, 7月以后, 天津和唐山的 NO_2 柱浓度一般都高于北京的值, 而6月, 北京的 NO_2 柱浓度经常高于天津和唐山的值. 夏季 NO_2 的生命时间比较短, 一般只有数小时, 不可能长距离输送, 所以 NO_2 的浓度分布主要是与排放源和天气系统有关. 由于北京市政府对机动车采取了限行措施以及对北京及周边的高排放工厂实行了停产、限产、达标排放等控制措施, 使得7月以来的北京地区 NO_2 柱浓度远远低于临近的天津和唐山地区, 同时也低于北京6月的值, 可以认为这是奥运会空气质量保障措施实施带来的效果.

为了尽可能剔除天气系统的影响, 并与2005~2007年同期的数据进行比较, 图3把观测的 NO_2 柱浓度做了10 d(旬)平均. 6月(除了下旬)的 NO_2 柱浓度北京要高于天津、唐山, 而7月主要空气质量保障措施实施以后, 北京的 NO_2 柱浓度就开始走低, 明显低于天津和唐山, 差别在 $5\times 10^{15}\sim 10\times 10^{15}$ 分子 $\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间. 2005~2007年同期并不完全相同, 6月唐山的浓度要略高于北京和天津, 7月以后3个区域浓度相差不大, 唐山浓度略高, 说明在不采取污染控制措施的时期, 北京与天津、唐山污染情形相似, 污染程度相当. 图中显示的7月初开始出现的 NO_2 浓度的大幅度下降, 与7月1日实施的黄标车禁行的时间一致. 这说明黄标车禁行对于大幅度削减污染物的排放非常有效. 目前北京市在用黄标车数目有30多万辆,

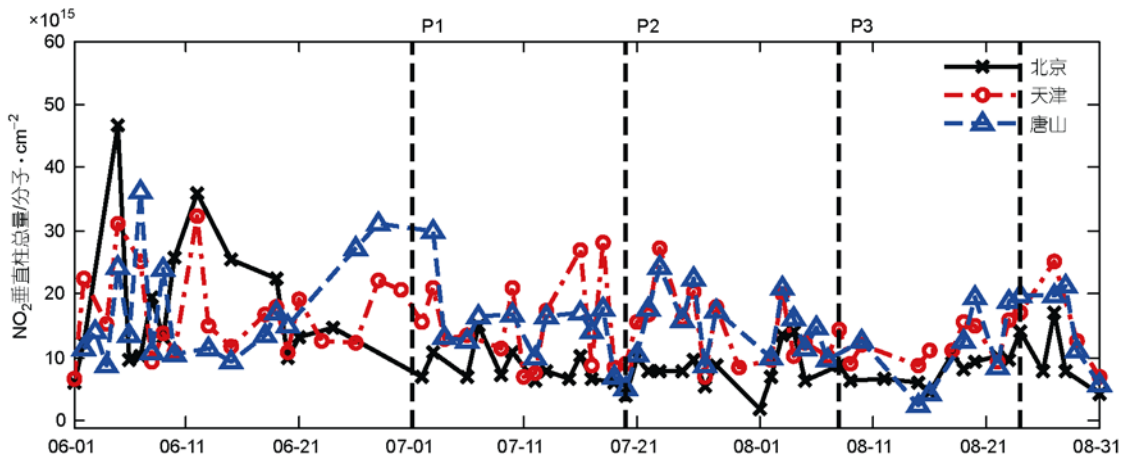


图2 北京地区2008年6~8月 NO_2 柱浓度的逐日变化

黑色叉形符号表示北京的浓度, 红色圆形符号表示天津的浓度, 蓝色三角形符号表示唐山的浓度. P1, 7月1日, 开始黄标车禁行; P2, 7月20日, 开始机动车单双号分日行驶; P3, 8月8~24日, 奥运会期间. 全部奥运空气质量保障措施到9月20日残奥会结束后停止

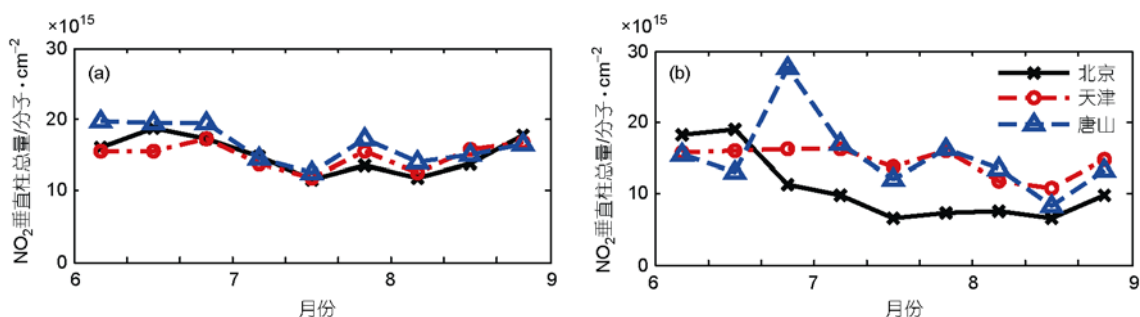


图 3

(a) 2008 年 6~8 月北京地区 10 d 平均的 NO_2 柱浓度变化图; (b) 2005~2007 年同期 NO_2 的平均浓度变化. 黑色叉形符号表示北京的浓度, 红色圆形符号表示天津的浓度, 蓝色三角形符号表示唐山的浓度

由于一辆黄标车的污染物排放是达标车排放的若干倍, 它们在所有机动车排放总量中的分担率很大, 但准确的分担率还需要专门研究才能给出. 而比较 7 月 1~20 日与 7 月 20 日~8 月 31 日两个时期北京地区的 NO_2 浓度变化, 后一时期小于前一时期. 说明低排放机动车的限行不如高排放黄标车禁行有效.

图 4(a)给出了奥运期间及其前后北京、天津、唐山 7~8 月 NO_2 柱浓度的平均分布状况, 与 2005~2007 年同期的情况(图 1)比较, 可以直观地看出奥运期间北京与周边大城市的显著差别, 而在近年同期这 3 个城市污染状况具有很好的相似性. 2008 年 7~8 月, 北京城区的高值要明显低于天津、唐山的高值, 北京城区 NO_2 柱浓度都在 10×10^{15} 分子 $\cdot \text{cm}^{-2}$ 以下, 而天津、唐山市区值在 $15 \times 10^{15} \sim 20 \times 10^{15}$ 分子 $\cdot \text{cm}^{-2}$ 之间, 而 2005~2007 年同期, 北京、天津、唐山市区浓度都在 15×10^{15} 分子 $\cdot \text{cm}^{-2}$ 以上. 整体上, 无论是天津还是唐山, 2008 年的 NO_2 柱浓度都要低于 2005~2007

年平均浓度, 这说明周边省份一些高排放企业的停产、限产等奥运空气质量保障措施对降低大气污染物的浓度也产生了一定的效果, 事实上, 天津还在奥运期间在环路以内实施了单双号分日行驶的交通管制措施. 只是天津、唐山的减排效果远没有北京那样明显, 当然那里的空气质量保障措施也远没有北京那样力度大、时间长、范围广、执行严.

3 奥运期间空气质量保障措施降低 NO_2 柱浓度的定量效果评估

表 1 给出了 2008 年和 2005~2007 年 6, 7~8 月北京、天津和唐山的平均 NO_2 柱浓度. 可以看出, 由于北京、天津和唐山三地的大气污染形势的相似性, 没有采取空气污染控制措施的时段, 包括 2005~2007 年 7~8 月和 2008 年 6 月, 北京与天津和唐山的 NO_2 柱浓度差别很小, 在 $16.2 \times 10^{15} \sim 18.7 \times 10^{15}$ 分子 $\cdot \text{cm}^{-2}$ 之间, 尤其是北京和天津, NO_2 柱浓度平均

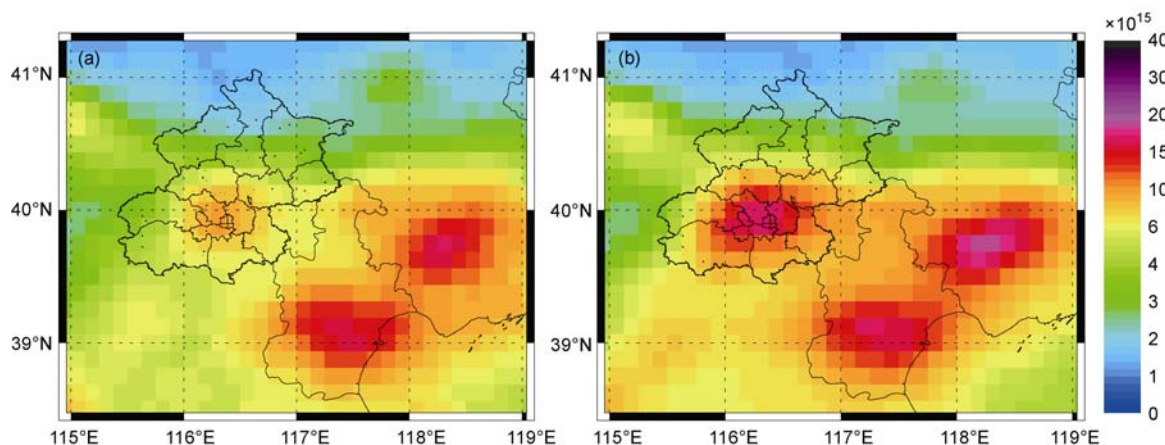


图 4 北京地区 7~8 月 NO_2 柱浓度平均分布图

(a) 2008 年平均; (b) 2005~2007 年平均, 单位为分子 $\cdot \text{cm}^{-2}$

表 1 北京地区夏季对流层 NO₂ 浓度(单位: 10¹⁵ 分子·cm⁻²)

	2008 年		2005~2007 年	
	6 月	7~8 月	6 月	7~8 月
北京	16.2	7.9	17.4	13.9
天津	16	13.8	16.1	14.4
唐山	18.7	13.4	19.6	15.0

值基本一样,而在 2008 年 7~8 月实施奥运空气质量保障措施期间,北京 NO₂ 柱浓度降低到 7.6×10¹⁵ 分子·cm⁻²,只有 2005~2007 年的一半左右,而天津、唐山两地变化不大,2008 年浓度略低.这说明奥运空气质量保障措施的实施显著地改善了北京市奥运期间的空气质量,有力地保障了北京奥运会在良好的空气质量情况下举行.

表 2 给出了 2008 年和 2005~2007 年同期,北京、天津、唐山 3 地 NO₂ 柱浓度的比较结果.这里做了 3 种比较.第一,把 2008 年 7~8 月与 2005~2007 年同期比较,北京、天津、唐山浓度都有所下降,天津、唐山下降幅度比较小,只有 4.2%和 10.7%,而北京高达 43.2%;第二,把 2008 年 7~8 月的浓度与同年 6 月相比,发现北京也有很大的降幅,达到 51.2%,明显高于天津、唐山的 13.8%和 28.3%;第三,为了考察北京奥运会空气质量保障措施实施与 NO₂ 柱浓度下降的关系,还比较了 2005~2007 年 7~8 月和 6 月的 NO₂ 柱浓度,发现下降幅度对于北京也仅为 20.1%,而天津、唐山分别为 10.6%和 23.5%,降幅比 2008 年略低.

我们知道,决定 NO₂ 柱浓度的因素主要有 3 个: NO_x 的排放源, NO_x 的寿命和 NO_x 的区域输送.根据我们多年来对夏季的天气记录,华北地区天气过程的周期一般是 5~7 d,因此我们采用了 10 d 的平均浓度,以最大可能去除天气过程的影响,得出 NO₂ 柱浓度与空气质量保障措施的关系.为了得出奥运空气质量保障措施的准确减排效果,我们还考察了 NO_x 排放量的逐年变化率.我们以 1~6 月的 NO₂ 平均浓度来研究源排放强度的变化,因为无论是 2005~2007 年还是 2008 年,都是没有受到空气质量保障措施的

影响.以 1~6 月作为统计区间,2008 年和 2005~2007 年北京市的 NO₂ 平均柱浓度分别为 24.9×10¹⁵ 和 24.8×10¹⁵ 分子·cm⁻²,差别很小,可以认为北京市的平均源排放强度没有发生变化,因此得出,7 月以来北京市空气质量保障方案实施以来,NO₂ 柱浓度下降了 43.2%.这是通过 2008 年 7~8 月和 2005~2007 年同期比较获得的北京市 NO₂ 柱浓度变化的结果,这个结果可以看作是由于北京市奥运空气质量保障措施实施带来的减排效果.而用相同的方法,得到包括奥运会的 2008 年 7~8 月天津、唐山分别下降了 18.1%和 19.6%.

另外一种评估奥运空气质量保障措施的减排效果的方法是,把实施保障措施的 2008 年 7~8 月和没有实施的 6 月比较,这样不需要考虑排放源强度的逐年变化,只需要考虑 NO₂ 季节变化的影响,以 2005~2007 年 NO₂ 的月平均变化作为基准,来计算如果不实施奥运空气质量保障措施 2008 年 7~8 月应该出现的 NO₂ 柱浓度,计算公式如下:

$$NO_2^*[\text{Jul} \sim \text{Aug}, 2008] = NO_2[\text{Jun}, 2008] \cdot \frac{NO_2[\text{Jul} \sim \text{Aug}, 2005 \sim 2007]}{NO_2[\text{Jun}, 2005 \sim 2007]}.$$

然后比较实施保障措施后实际观测的 NO₂ 柱浓度和如果不实施保障措施应该出现的柱浓度,得到北京、天津、唐山 2008 年 7~8 月 NO₂ 柱浓度分别下降了 38.9%, 3.6%, 6.3%.后一种评估方法由于不需要考虑排放源强度的年变化影响,其结果应具有更高的可信度.

4 结论

利用 OMI 对流层 NO₂ 柱浓度数据,通过对北京奥运期间与近年同期数据及污染程度类似的邻近城市天津和唐山的比较,分析了奥运期间北京地区实施空气质量保障方案以来 NO₂ 对流层柱浓度变化和时空分布特征,得到以下结果.

(i) 卫星监测结果显示,通常情况下,在北京

表 2 北京地区夏季对流层 NO₂ 浓度变化比较

	2008 年 7~8 月	2008 年 7~8 月	2005~2007 年 7~8 月
	相对 2005~2007 年 7~8 月变化	相对 2008 年 6 月变化	相对 2005~2007 年 6 月变化
北京	-43.2%	-51.2%	-20.1%
天津	-4.2%	-13.8%	-10.6%
唐山	-10.7%	-28.3%	-23.5%

及其 200 km 以内的周边地区存在 3 个 NO₂ 高值区, 分别以北京市、天津市、唐山市为中心. 7~8 月 3 个中心区的对流层 NO₂ 柱浓度平均值大致相同, 在 $14 \times 10^{15} \sim 15 \times 10^{15}$ 分子·cm⁻² 之间.

(ii) 奥运会期间, 北京市由于实施了严格的空气质量保障方案, 北京市的 NO₂ 柱浓度明显低于周边的天津和唐山的, 而近年同期三地具有大致相同

的 NO₂ 柱浓度.

(iii) 通过 2008 年 7~8 月北京对流层 NO₂ 柱浓度分别和 2005~2007 年同期以及 2008 年 6 月的浓度的比较, 在尽量去除天气过程和源强度变化的影响之后, 采用两种评估方法得到北京市 NO₂ 柱浓度分别下降 43.2% 和 38.9%, 或者说北京奥运空气质量保障措施的实施使北京市 NO₂ 柱浓度下降了 40% 左右.

致谢 感谢 TEMIS 网站 www.temis.nl 提供的由荷兰皇家气象研究会(KNMI)反演的 OMI 的 NO₂ 数据, 感谢审稿专家提出的建设性意见.

参考文献

- 1 Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric Chemistry and Physics(From Air Pollution to Climate Change). San Francisco: A Wiley-Interscience Publication, 1998. 70
- 2 Beirle S, Platt U, Wenig M, et al. Weekly cycle of NO₂ by GOME measurements: A signature of anthropogenic sources. Atmos Chem Phys, 2003, 3: 2225—2232
- 3 van der A R J, Eskes H J, Boersma K F, et al. Trends, seasonal variability and dominant NO_x source derived from a ten year record of NO₂ measured from space. J Geophys Res, 2008, 113: D04302, doi: 10.1029/2007JD009021
- 4 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. Geophys Res Lett, 2007, 34: L08814, doi: 10.1029/2007GL029326
- 5 Richter A, Burrows J P, Nüß H, et al. Increase in tropospheric nitrogen oxide over China observed from space. Nature, 2005, 437: 129—132[doi]
- 6 van der A R J, Peters D H M U, Eskes H, et al. Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China. J Geophys Res, 2006, 111: D12317, doi: 10.1029/2005JD006594
- 7 张兴赢, 张鹏, 张艳, 等. 近 10 a 中国对流层 NO₂ 的变化趋势、时空分布特征及其来源解析, 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(10): 1409—1416
- 8 Richter A, Burrows J. Retrieval of Tropospheric NO₂ from GOME Measurements. Adv Space Res, 2002, 29(11): 1673—1683[doi]
- 9 Sioris C E, Kurosu T P, Martin R V, et al. Stratospheric and tropospheric NO₂ observed by SCIAMACHY: First results. Adv Space Res, 2004, 34: 780—785[doi]
- 10 Boersma K F, Eskes H J, Veefkind J P, et al. Near-real time retrieval of tropospheric NO₂ from OMI. Atmos Chem Phys, 2007, 7: 2108—2118
- 11 Levelt P F, van den Oord G H J, Dobber M R, et al. The Ozone Monitoring Instrument. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2006, 44(5): 1093—1101, doi: 10.1109/TGRS.2006.872333
- 12 Bucsla E J, Celarier E A, Wenig M O, et al. Algorithm for NO₂ vertical column retrieval from the Ozone Monitoring Instrument. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2006, 44: 1245—1258, doi: 10.1109/TGRS.2005.863715
- 13 Boersma K F, Eskes H J, Brinksma E J. Error analysis for tropospheric NO₂ retrieval from space. J Geophys Res, 2004, 109: D04311, doi: 10.1029/2003JD003962