

2005年—2014年京津冀对流层NO₂柱浓度时空变化及影响因素

周春艳, 厉青, 王中挺, 高彦华, 张丽娟, 陈辉, 马鹏飞, 檀畅

环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094

摘要: 基于臭氧监测仪OMI对流层NO₂柱浓度产品研究了京津冀城市群2005年—2014年NO₂时空变化及影响因素: (1)10年柱浓度年均增长率为3.35%,且年度波动较大。忽略2008年国家奥运会的环境治理所引起的变化, 2005年—2011年NO₂呈逐渐升高趋势; 2012年—2014年呈逐渐降低趋势, 以2014年下降最为显著。(2)呈西北低东南高的趋势。燕山-太行山山系以北的承德和张家口市浓度较低, 山系以南主要有北京-天津-唐山与石家庄-邢台-邯郸两个污染中心。(3)京津冀北部三面环山不利于NO₂的扩散, 夏季丰富的降水对NO₂具有显著湿沉降作用。(4)通过相关性分析、文献及国家政策印证等方法, 发现地区产业及能源结构很大程度上决定了地区的污染来源。北京市10年来第三产业一直处于主导且稳步提高, 煤炭消耗量低,但汽车保有量增加了1.5倍, 主要来源为机动车尾气排放; 天津市第二产业比第三产业比重略高, 煤炭消耗量是北京的两倍之余, 但汽车保有量仅是北京市的一半, 由此可知工业排放和机动车是共同来源; 河北省第二产业比重很高,燃煤量占京津冀地区的80.6%,河北省工业排放是NO₂的主要来源, 但近几年随着机动车保有量的剧增, 其尾气排放分担率不可小觑。

关键词: 对流层NO₂, OMI, 遥感监测, 时空变化, 影响因素, 京津冀

中图分类号: X87 **文献标志码:** A

引用格式: 周春艳, 厉青, 王中挺, 高彦华, 张丽娟, 陈辉, 马鹏飞, 檀畅. 2016. 2005年—2014年京津冀对流层NO₂柱浓度时空变化及影响因素. 遥感学报, 20(3): 468-480

Zhou C Y, Li Q, Wang Z T, Gao Y H, Zhang L J, Chen H, Ma P F, Tan C. 2016. Spatio-temporal trend and changing factors of tropospheric NO₂ column density in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2005 to 2014. Journal of remote Sensing, 20(3): 468-480 [DOI: 10.11834/jrs.20165087]

1 引言

NO₂是大气中一种重要的痕量气体, 在对流层和平流层大气化学中发挥重要的作用。NO_x与氨、水分和其他化合物发生反应形成二次颗粒物, 与挥发性有机化合物发生光化学反应生成臭氧。颗粒物与臭氧可以引起或加重呼吸系统疾病, 降低肺功能, 儿童、老年人、患有哮喘等肺部疾病的人及在户外工作或锻炼的人是不利影响的高风险人群。此外, NO_x会引起多种环境问题, 如酸雨、能见度下降、温室效应及水质恶化等。因此, 各国环保部门普遍重视NO₂的浓度水平。1971年美国环境空气质量标准(NAAQS)首次制定 NO₂环境空

气质量标准, 1985年欧盟环境空气质量标准将NO₂标准加入, 1979年中国环保法试行开始观测氮氧化物, 2000年修改环境空气质量标准, 取消了氮氧化物, 将NO₂作为空气质量监测指标之一。对NO₂浓度限制分1小时、24小时、1年3个不同时间段, 代表了暴露时间。2012年12月28日中国环境监测总站正式通过全国城市空气质量实时发布平台向社会公众发布空气质量六要素实时数据。截至2015年3月30日, 北京市有12个站点、天津市14个、河北省53个, 这些站点主要分布在市区, 不能全面反映NO₂在区域上的变化。但遥感技术能够弥补地面监测这一局限性, 提供空间宏观尺度

收稿日期: 2015-05-04; 修订日期: 2016-01-22; 优先数字出版日期: 2016-01-29

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(编号:05-Y20A16-9001-15/17); 环保公益性行业科研专项(编号:201309011); 国家高技术研究发展计划(863计划)(编号:2014AA06A508)

第一作者简介: 周春艳(1981—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气环境遥感研究。E-mail:mezhouchunyan@126.com

通信作者简介: 张丽娟(1984—), 女, 工程师, 主要研究方向为遥感应用。E-mail:zlj13021@126.com

上的变化。卫星观测NO₂柱浓度始于20世纪90年代, 欧洲与美国相继发射了一系列卫星, 搭载了痕量气体传感器, 主要有GOME (1996年—2003年)、SCIAMACHY (2002年—2012年)、OMI (2004年至今)、GOME-2 (METOP-A) (2007年至今)、GOME-2 (METOP-B) (2013年至今), 其中OMI空间分辨率最高, 为13 km×24 km, 能够实现每日全球覆盖。目前, 中国还没有此类气体传感器, 预计于2017年上天的GF-5号卫星上搭载了EMI传感器, 将有能力进行NO₂探测。

随着京津冀城市群经济快速发展和城市化进程的加快, 该地区空气质量问题受到人们的普遍关注。近年来随着酸雨、雾霾、光化学烟雾等区域性复合型大气污染现象频发, 给人们的生活和健康带来了极大的危害。环境问题已成为制约京津冀区域经济社会可持续发展的重要瓶颈, 解决区域发展与大气环境恶化之间的矛盾势在必行。目前, 利用遥感技术探讨京津冀城市群的大气环境问题已得到广泛应用, 主要体现在气溶胶、颗粒物、灰霾、痕量气体、沙尘及秸秆焚烧等几个方面。中国科研人员利用国外多种卫星数据分析全国尺度NO₂的时空格局已取得进展。张强等人(2012)利用GOME和SCIAMACHY 对流层NO₂柱浓度数据对1996年—2010年间中国氮氧化物排放的时空格局变化进行了分析。王跃启等人(2009)、陈姗姗等人(2010)和姚凌等人(2012)从不同自然地理分区、典型重点城市及地级市等多个角度对中国NO₂柱浓度的时空分布和变化趋势进行分析, 并简要分析了NO₂污染的影响因素。肖钟湧等人(2011)利用OMI的NO₂产品, 分析了2004年—2011年中国地区对流层NO₂柱浓度和总NO₂柱浓度的时空特征。利用对流层和总NO₂柱浓度的月变化和它们之间的比率形状, 判断不同地区的人为与自然影响模式。尉鹏等人(2011, 2013)利用OMI 卫星资料及多种地面环境及气象监测资料分析了中国NO₂浓度的月、季分布特征, 并从降水量、边界层气压场、污染源排放等几个方面分析了NO₂的时空分布影响因素。张兴赢等人(2007)、李龙等人(2013)利用不同数据分别分析了1997年—2006年、2005年—2010年中国地区的时空分布特征, 对比分析了中国东部西部时空变化差异, 分析了人类足迹、地区生产总值和中国汽车保有量与对流层NO₂间的相关性。京津冀区域尺度的研

究较少, 主要有如下几个研究工作:江文华等人(2006)、李令军和王英(2011)利用卫星遥感与地面监测分析了北京大气NO₂污染特征。辛名威(2013)利用OMI数据研究了2005年—2012年河北省大气NO₂垂直柱浓度的时空变化, 并分析了对流层NO₂柱浓度的影响因素。王英等人(2012)研究了京津冀与长三角区域大气NO₂污染特征, 分析了奥林匹克运动会及上海世界博览会等大型活动之前及期间大气的变化特征, 探讨了联防联控对区域空气质量改善的效果。针对京津冀城市群NO₂污染物的分布及变化特征及传输规律等的研究工作较少, 尤其是关于影响因素分析的工作还需要深入, 与环保措施结合分析的工作亟需开展。

本文采用对流层NO₂柱浓度遥感数据、地形数据、气象数据、秸秆焚烧火点个数及多种统计数据, 分析京津冀城市群近10年的对流层NO₂柱浓度的时空格局变化, 并深入挖掘环境变化背后的自然及人为影响因素。

2 研究区与数据

2.1 研究区介绍

京津冀城市群包括北京市、天津市和河北省, 位于华北平原北部, 北靠燕山山脉, 南面华北平原, 西倚太行山, 东临渤海湾。由西北向的燕山-太行山山系构造向东南逐步过渡为平原, 呈现出西北高东南低的地形特点。京津冀人口密度大, 土地面积21.7万km², 约占全国总面积的2.25%, 而常住人口达10440.5万人, 占全国常住人口总数的7.79%。京津冀位于环渤海经济圈的心脏地带, 北京市第三产业发达, 积极发展高新产业, 天津市重点发展先进制造业, 适当发展大运量的临港重化工业, 河北省是重化工基地和农业基地。京津冀是全国主要的高新技术和重工业基地, 地区生产总值占国民生产总值的9.7%, 在中国具有重要的战略地位。

2.2 数据及方法

2004年7月15日美国国家航空航天局发射的Aura地球观测系统卫星上搭载了臭氧监测仪OMI。此传感器由荷兰、芬兰与NASA合作制造, 是继GOME和SCIAMACHY后的新一代大气成分探测传感器, 轨道扫描刈幅为2600 km, 天底空间分辨率

是13 km×24 km, 一天覆盖全球一次, 3个通道, 波长覆盖范围为270—500 nm (OMI Team, 2012)。

所用数据为2005年—2014年DOMINO version 2.0 OMI对流层NO₂垂直柱浓度产品, 此产品是荷兰皇家气象研究所反演结果, 由TEMIS发布, 空间分辨率为0.125°×0.125°。针对OMI对流层NO₂垂直柱浓度产品已经开展了很多验证评价工作, Wenig等人(2008)在美国马里兰州(38.98°N, 76.83°W), 以地基站点为中心15 km与50 km范围的对流层柱浓度空间平均值与12:15-14:15时间段的地基Brewer MK3分光计数据均值进行对比分析, 相关系数分别为0.88和0.9; Boersma等人(2009)在以色列城区取以地基站点为中心8 km的OMI 对流层NO₂柱浓度平均值与13:30—14:00时间内的地基数据均值比较, 发现对流层NO₂与边界层NO₂柱浓度RMA拟合系数为: $r=0.63$, $slope=0.93$ 。卫星遥感产品与地基观测数据的对比分析工作, 评价了产品的精度, 一定程度上保证了产品的可靠性。但据Ma等人(2013)在北京验证发现, 卫星观测对流层VCD在北京地区低估了大概26%—38%, 这是由于气溶胶的强屏蔽效应。

目前卫星遥感监测对流层NO₂柱浓度的主流方法是差分吸收光谱算法(DOAS)(Platt等, 1979; Burrows等, 1999)。该算法利用425—450 nm窗口通道的探测信号, 首先, 去除地表反射及气溶胶的散射影响、大气分子拉曼散射所引起Ring效应的填补作用、窗口内其他所有气体的吸收影响, 获得地面到传感器的整个光路的NO₂整层斜柱浓度;

然后, 基于辐射传输模型计算得到大气质量因子, 将NO₂斜柱浓度转化为垂直柱浓度; 最后, 利用大气模式或其他方式获得平流层NO₂柱浓度, 从整层柱浓度中去除, 便获得对流层NO₂柱浓度(陶金花等, 2009)。

京津冀的人口、面积、地区生产总值、煤炭消耗量、汽车保有量等统计数据来源于国家统计局数据库(<http://data.stats.gov.cn/>)及北京、天津和河北统计局, 降水量数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.gov.cn/>)。

3 结果与分析

为了分析京津冀城市群及其两个直辖市和11个地级市的NO₂月、季、年时空分布及变化情况, 本文对2005年—2014年对流层NO₂垂直柱浓度进行了如下分级: 1级(<500)、2级(500—1000)、3级(1000—1500)、4级(1500—2000)和5级(>2000), 单位为10¹³ mole/cm²。

3.1 京津冀对流层NO₂柱浓度的月变化

图1给出了2005年—2014年京津冀的对流层NO₂柱浓度月均变化: 对流层NO₂柱浓度月均值呈显著周期性变化, 以年为周期, 每个周期出现一个波峰和一个波谷。一年中NO₂最低值一般出现在夏季的7、8月, 2008年8月达到最小值为463.4×10¹³ mole/cm²; 最高值一般出现在1、11、12月, 2013年1月达到最大值为3078.41×10¹³ mole/cm², 这是因为当月京津冀地区发生了多次强雾霾污染事件, 平均雾霾

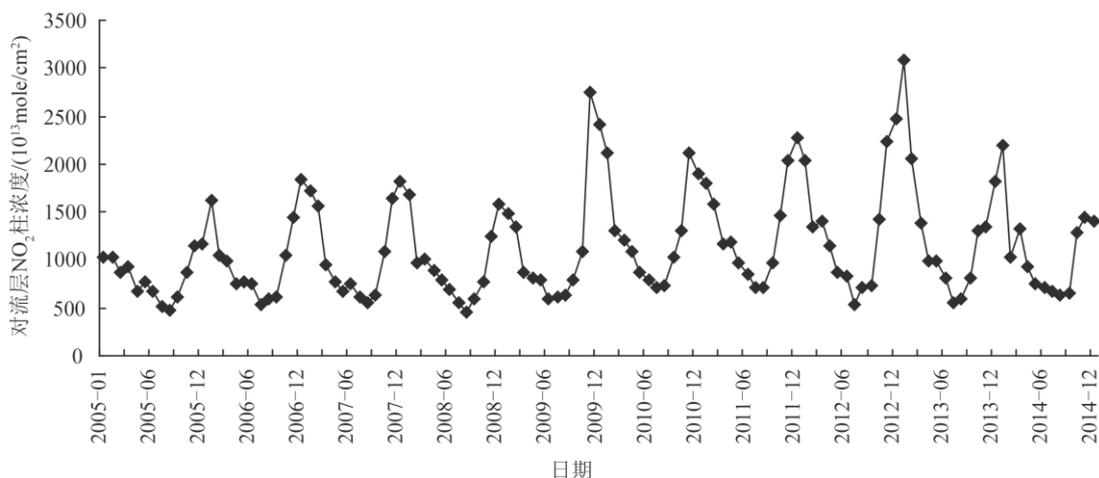


图1 2005年—2014年京津冀NO₂柱浓度月均值变化趋势

Fig. 1 Monthly average NO₂ column density change of Beijing-Tianjin-Hebei region during 2005 to 2014

天数发生21.7 d, NO₂浓度严重超标, 月均浓度为0.087 mg/m³, 与前5年同期相比升高100%(孟晓艳等, 2014)。2008年月均浓度与前后年份相比变化显著, 这种突变与京津冀为迎接奥运盛事实施的治理及减排措施有关。2009年11月突然升高至 2751.16×10^{13} mole/cm²。2014年下降显著, 这与2013年国务院发布“大气污染防治行动计划”十条措施力促空气质量改善相吻合, 详见本文4.6节。

3.2 京津冀对流层 NO₂柱浓度的季变化

图2给出了京津冀4个季节(冬季: 12、1、2月; 春季: 3、4、5月; 夏季: 6、7、8月; 秋季: 9、10、11月)的10年变化趋势。四季对流层NO₂浓度水平为: 冬季>秋季>春季>夏季。冬季NO₂浓度波动异常剧烈, 2008年下降显著, 2009年—2012年呈线性显著增长, 2013年大幅提高并达到峰值, 2014年有大幅下降趋势。秋季, 2008年下降非常显著, 2009年大幅上升; 春、夏波动较小。2008年的拐点变化与上文所提到的国家治理及限排政策有关。

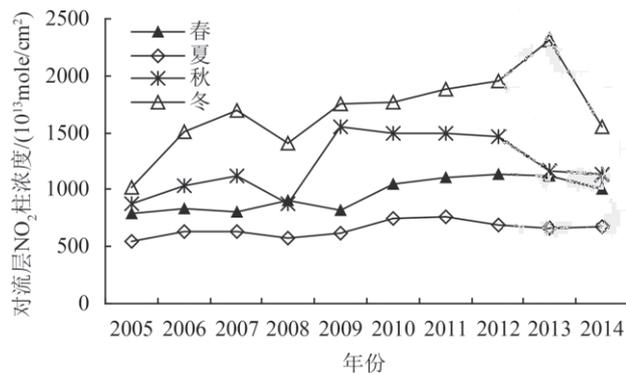


图2 2005年—2014年京津冀对流层 NO₂季节变化特征

Fig. 2 Seasonal average NO₂ density change of provinces of Beijing-Tianjin-Hebei region during 2005 to 2014

3.3 京津冀对流层 NO₂柱浓度的年变化

由京津冀对流层NO₂柱浓度10年年均变化(图3)可知: 对流层NO₂柱浓度波动较大, 10年柱浓度年均增长率为3.35%。2005年浓度最低, 为 807.75×10^{13} mole/cm²; 2011年最高, 为 1303.36×10^{13} mole/cm²。纵观10年来NO₂的变化, 发现2008年京津冀地区NO₂浓度与前后的变化较大, 这是与国家重大奥运事件的污染防控有关; 忽略2008年的变化, 2005年—2011年NO₂呈逐渐升高

趋势; 2012年—2014年呈逐渐降低趋势, 以2014年下降最为显著。

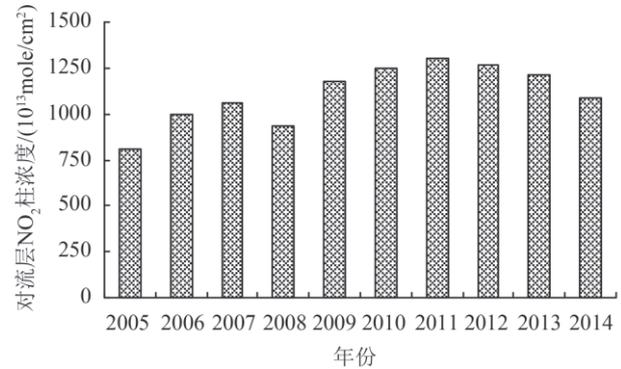


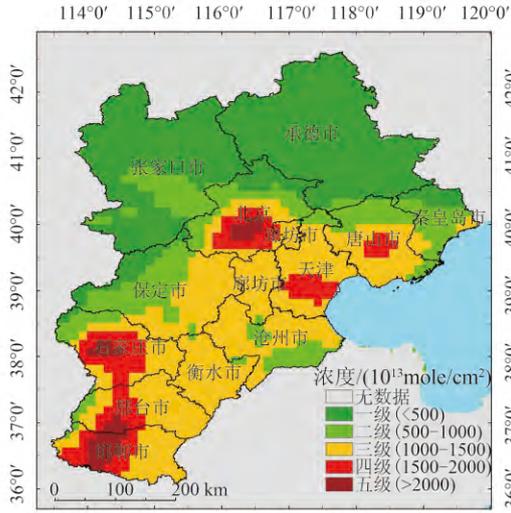
图3 2005年—2014年京津冀NO₂柱浓度年均值变化趋势

Fig. 3 Annual average NO₂ column density change of Beijing-Tianjin-Hebei region during 2005 to 2014

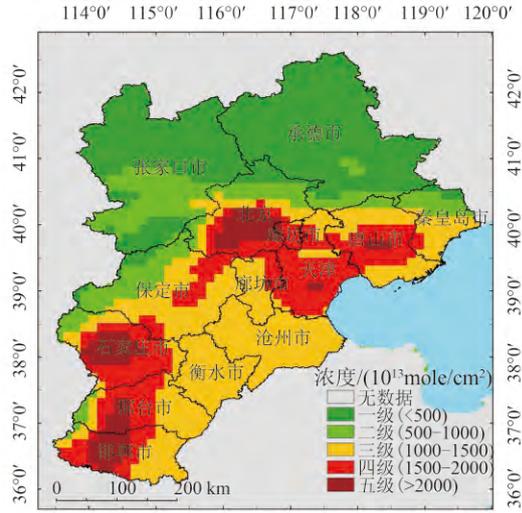
由京津冀对流层NO₂柱浓度10年时空变化(图4)可知:(1)京津冀NO₂分布呈西北低东南高的趋势。燕山-太行山以北的承德和张家口市均处于一、二级较低浓度水平, 北京、天津、唐山、石家庄、邢台和邯郸等发达和重工业城市为中心的区域是NO₂四、五级高浓度中心;(2)10年来NO₂高浓度区范围变化显著。2005年NO₂高浓度分布范围较小且集中在市区位置, 相互独立;2006年—2007年高浓度区范围不断扩大且值逐渐升高, 北京、天津、唐山污染区连接在一起, 覆盖了廊坊大部, 石家庄、邢台、邯郸等高浓度中心连接成片;2008年高浓度污染范围显著缩小, 成片趋势得到遏制, 尤以北京-天津-唐山污染带变化最为显著; 2009年—2011年NO₂高浓度区呈显著扩张态势, 北京-天津-唐山污染带与石家庄-邢台-邯郸污染带逐渐连接成片, 2011年燕山-太行山以南的区域完全均处于高浓度状态;2012年—2013年, 燕山-太行山以南大部分区域仍处于四、五级高浓度水平, 仅沧州、衡水小范围区域浓度降至三级水平; 2014年高浓度范围大幅缩小, 南北两个污染带已经分开, 石家庄-邢台-邯郸污染带缩小显著且浓度值降低, 北京、天津浓度也有显著变化, 唐山高浓度区范围不减反增。

3.4 京津冀直辖市及地级市对流层NO₂柱浓度的统计分析

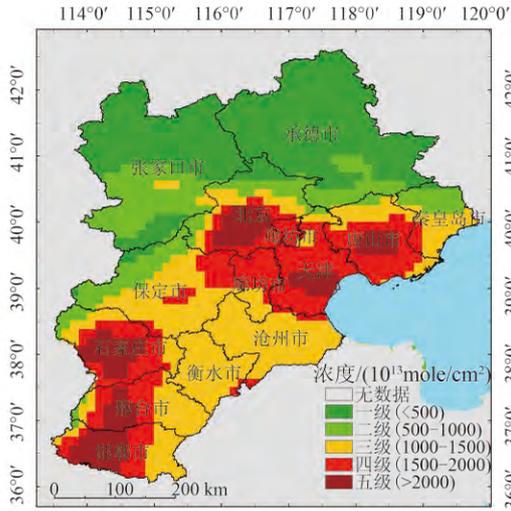
统计京津冀13个直辖市和地级市的10年年均值(表1)发现: 承德和张家口对流层NO₂柱浓度处于一级水平, 其中承德一直是京津冀浓度最低的城



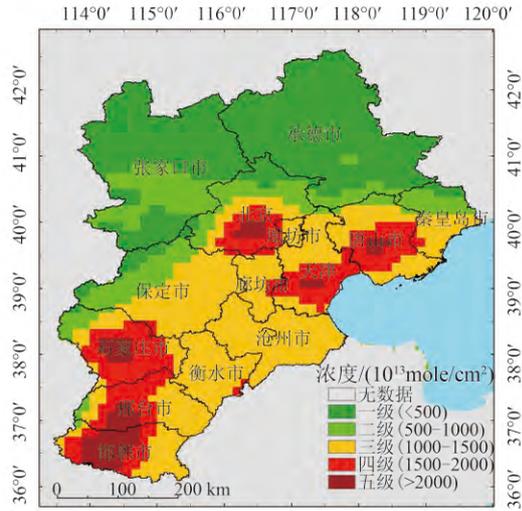
(a) 2005年
(a) 2005



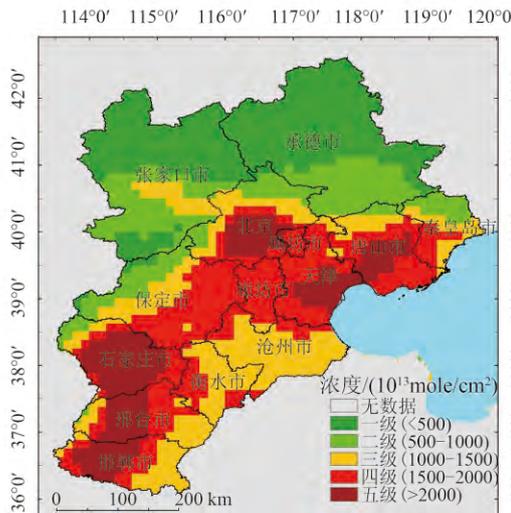
(b) 2006年
(b) 2006



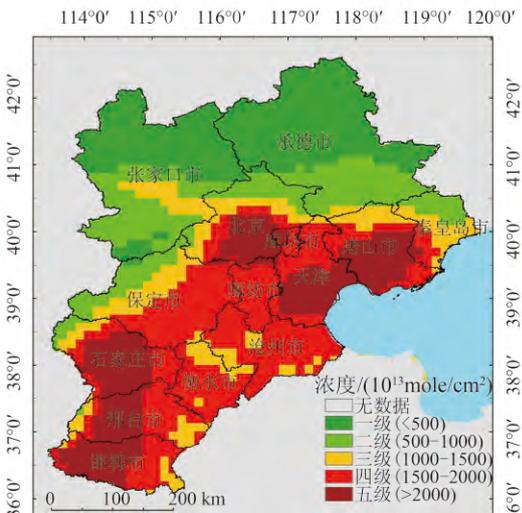
(c) 2007年
(c) 2007



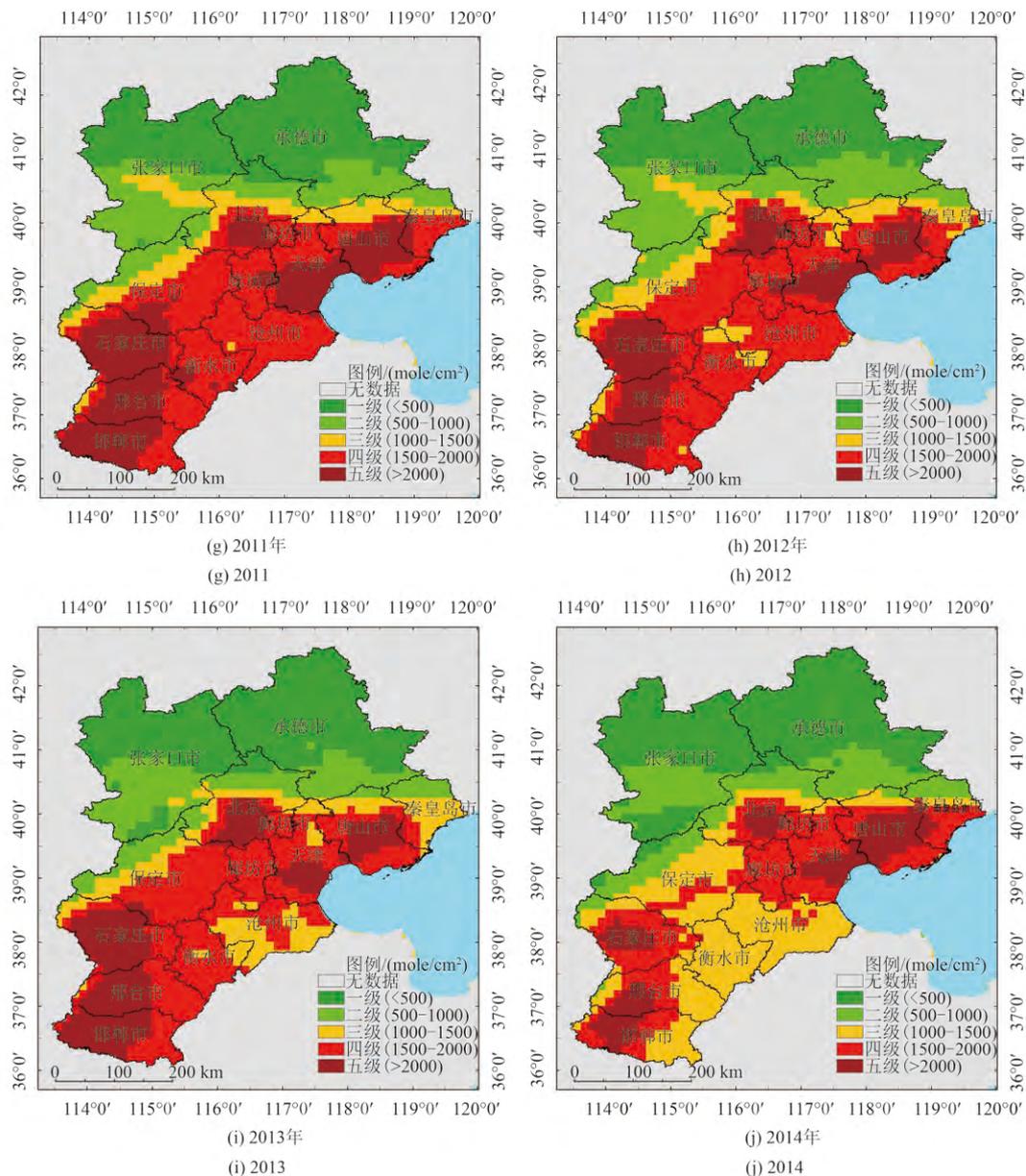
(d) 2008年
(d) 2008



(e) 2009年
(e) 2009



(f) 2010年
(f) 2010

图4 2005年—2014年京津冀对流层NO₂柱浓度年均变化Fig. 4 Annual average NO₂ column density distribution during 2005 to 2014 of Beijing-Tianjin-Hebei region

市；邯郸、石家庄、天津、邢台、唐山、廊坊等重工业城市处于五级高浓度水平，其中邯郸10年对流层NO₂柱浓度均值为 1959.80×10^{13} mole/cm²，是京津冀浓度最高的城市；北京市10年对流层NO₂柱浓度均值为 1307.65×10^{13} mole/cm²，仅高于承德、张家口、秦皇岛和保定。

10年间京津冀城市群中承德和张家口市的波动较小，一直处于较低水平；其他直辖市和地级市NO₂柱浓度变化显著：2005年—2007年，各地均有不同程度的上升趋势；2008年因国家举办奥运会，京津冀各市NO₂均值均有下降，以北京、天津

下降最为显著；2009年奥运之后，整体呈反弹式上升且升幅较大，石家庄、北京尤为显著；2010年—2011年，整体呈上升趋势，2011年达到一个峰值，其中2010年石家庄有下降趋势，北京2011年有大幅下降；2012年大都有不同程度的降低，石家庄和邯郸下降幅度很大，北京不降反增；2013年大部分城市有降低或变化不大，石家庄、邢台、邯郸呈反弹式上升，幅度较大；2014年大部分城市大幅下降，尤以石家庄、邢台、邯郸最为显著，但秦皇岛和唐山却大幅上升，这些结论与上文年度分布图中所示相吻合(表1)。

表1 2005—2014年京津冀各市对流层NO₂柱浓度变化Table 1 Change of annual column NO₂ density for each cities of Beijing-Tianjin-Hebei region during 2005 to 2014 $((10^{13} \text{ mole/cm}^2))$

	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	均值
承德	166.10	236.71	261.93	241.90	359.26	363.44	308.02	386.44	294.45	309.81	292.81
张家口	298.14	363.69	387.65	341.02	477.95	500.07	493.49	519.98	391.68	374.77	414.84
秦皇岛	720.08	982.67	1087.31	958.94	1202.10	1246.17	1419.46	1325.12	1190.46	1401.19	1153.35
保定	859.41	1156.18	1178.42	1030.61	1284.84	1379.68	1469.91	1413.95	1440.14	1152.68	1236.58
北京	1073.78	1350.58	1368.07	1069.80	1508.05	1490.61	1269.02	1422.86	1300.92	1222.75	1307.64
沧州	1037.84	1287.86	1380.62	1160.40	1416.26	1588.86	1703.87	1681.90	1499.56	1390.34	1414.75
衡水	1098.56	1276.96	1348.58	1274.02	1478.47	1550.98	1817.18	1660.46	1597.89	1340.86	1444.40
廊坊	1251.25	1487.32	1571.14	1370.64	1718.86	1810.68	1851.86	1880.41	1728.05	1675.07	1634.53
唐山	1123.84	1475.92	1634.67	1462.61	1732.85	1929.68	1956.73	1865.20	1774.14	1962.78	1691.84
邢台	1339.17	1541.19	1618.36	1526.55	1830.15	1964.18	2160.76	2000.06	2114.03	1661.49	1775.59
天津	1317.23	1630.95	1765.48	1513.96	1868.67	2066.64	2069.32	1900.79	1812.41	1882.07	1782.75
石家庄	1363.40	1687.28	1729.29	1527.29	2072.38	1986.39	2306.54	2046.15	2195.71	1669.17	1858.36
邯郸	1552.71	1662.09	1879.58	1748.48	1835.46	2186.82	2425.84	2175.23	2389.71	1742.06	1959.80

4 影响因素

大气污染物浓度分布特征除了与污染源分布及源强有直接关系外,还与地形、气象条件密切相关(李宗恺等,1985年)。从自然和人为等6个方面分析京津冀对流层NO₂垂直柱浓度的污染成因。

4.1 地形条件

京津冀北靠燕山山脉、西邻太行山脉,这一山系高程达1000 m之上(图5),对北部来的冷空气活动起到了阻挡和削弱作用,导致山前高程小于150 m的平原地区空气流动性较小形成气流停滞区、污染物和水汽容易聚集从而有利于霾和雾的形成(吴兑等,2014)。吴兑等人(2014)发现由于受太行山的阻挡和背风坡气流下沉作用的影响,使得沿北京、保定、石家庄、邢台和邯郸一线的污染物不易扩散,形成一条西南-东北走向的高污染带。上文对流层NO₂柱浓度空间分布中所描述的北京-天津-唐山和石家庄-邢台-邯郸两个高浓度区的形成正是与京津冀的这一地形条件有关。

4.2 气象条件

以往有较多工作讨论了大气污染物浓度与气象条件的关系(李丹,2011;卓嘎等,2009;刘彩霞等,2007;隋珂珂等,2007;袁杨森等,2007),发现风向、风速、降水等气象要素对大气污染物有

一定制约关系,但并非简单的线性关系。本文主要从降水方面进行探讨。

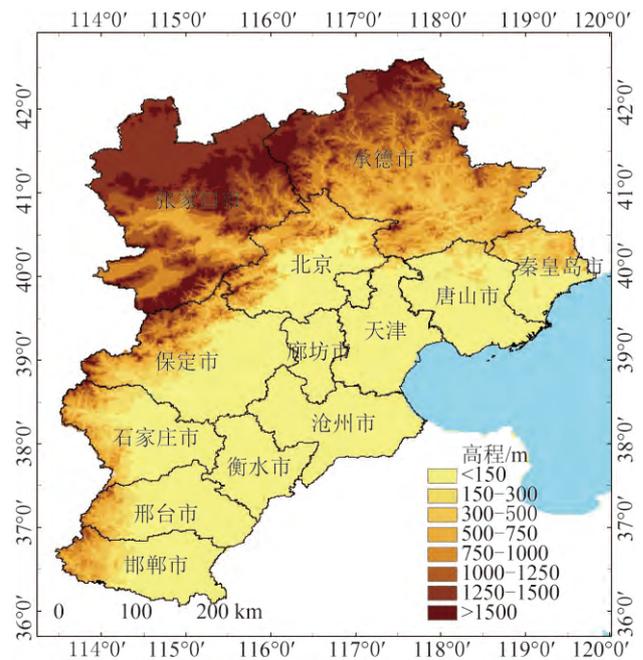


图5 京津冀城市群高程图

Fig. 5 DEM of Beijing-Tianjin-Hebei region

降水对空气质量的影响,主要体现在对污染物的清除和冲刷作用(蒋维楣,2003)。根据中国气象科学数据共享服务网所提供的京津冀25个站点2005年—2013年累年月降水量(图6)可知:京津冀四

季降水量分布极为不均衡,夏季高温多雨,降水量约占全年的66%;冬季寒冷干燥,降水量极少,约占全年降水量的2%。统计分析了2005年—2013年京津冀月降水量与月对流层NO₂柱浓度的相关性,发现两者之间有较高的负相关关系,最高为2005年达到-0.81,最低为2009年,为-0.61。由此可以看出降水量对NO₂浓度具有一定的负影响,所以京津冀一年中NO₂最低值出现在多雨的夏季。

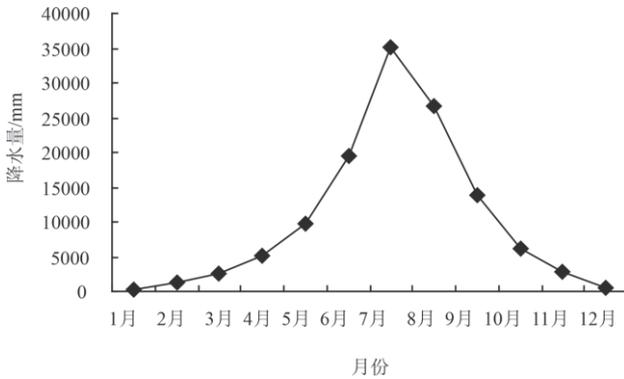


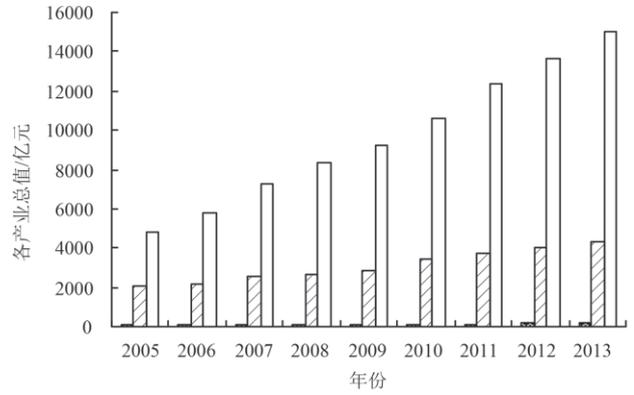
图6 2005年—2013年京津冀累年月降水量统计

Fig. 6 Monthly precipitation statistics of Beijing-Tianjin-Hebei region during 2005 to 2013

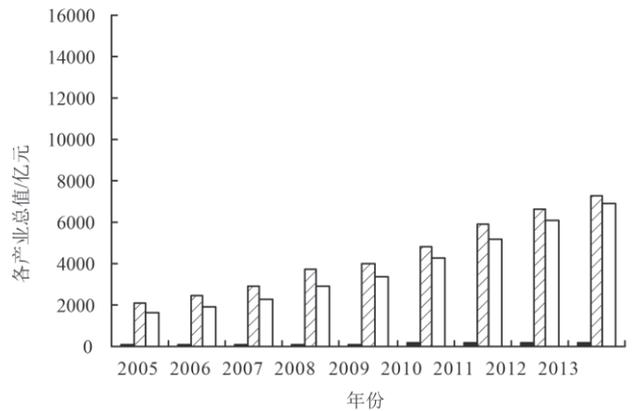
4.3 经济发展及能源产业结构

能源产业结构是影响一个地区环境的重要因素,也决定了污染来源及治理的方向。国家统计局所提供的京津冀生产总值数据统计发现京津冀三个省市的产业结构有着显著的差别:2005年—2013年北京市一直呈“三二一”的产业格局,且第三产业一直处于主导地位且比重稳步提高,第二产业比重逐渐降低;天津产业结构为“二三一”结构,第二产业比第三产业比重略高;河北产业结构为“二三一”结构,第二产业相当长的一段时期内在国民经济中占据主导地位,第一产业产值占据相当比重(图7)。中国富煤、贫油、少气的能源结构特点决定了能源生产以煤为主的格局。中国的煤炭资源质量不高,对环境明显不利,污染较大(邹璇,2010)。三次产业中,第二产业能源消耗能力最强。2012年,京津冀地区煤炭消耗量占全国消耗总量的8.9%,而河北省消耗了京津冀总量的80.6%。河北省经济长期依赖高能耗、污染、高排放的第二产业,能源供应以大量消耗煤炭的火力发电为主,这是河北能源消耗量居高不下的原

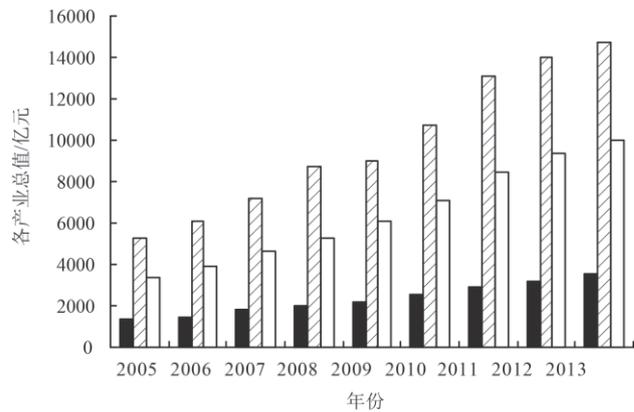
因;十年来北京地区生产总值不断升高(图8),但燃煤量却在降低(表2)。将2005年—2013年京津冀第二产业生产总值与对流层NO₂柱浓度年均值进行相关性分析,相关系数高达84%,这有力佐证了工业排放对对流层NO₂柱浓度的贡献。



(a) 北京
(a) Beijing



(b) 天津
(b) Tianjin



(c) 河北
(c) Hebei Province

■ 第一产业 □ 第二产业 □ 第三产业

图7 2005年—2013年京津冀三次产业生产总值趋势图

Fig. 7 Various industries statistics of Beijing-Tianjin-Hebei region during 2005 to 2013

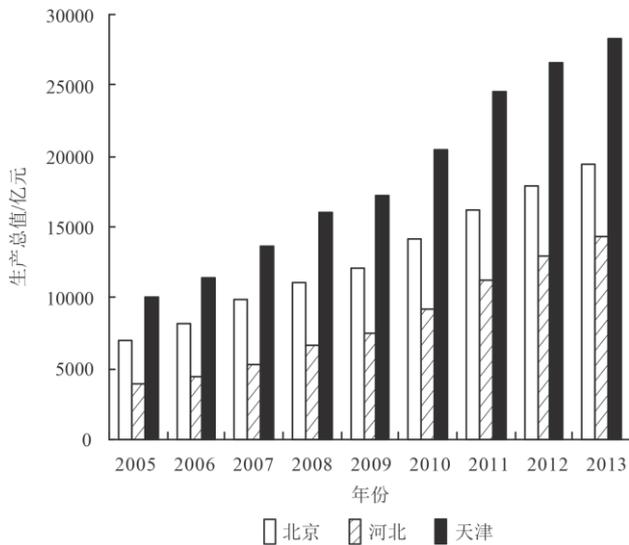


图 8 2005年—2013年京津冀地区生产总值趋势图

Fig. 8 Various industries statistics of Beijing-Tianjin-Hebei region during 2005 to 2013

中国能源结构现状决定了中国以煤为主的能源消费结构在将来很长时间内不会改变。在这样的现状之下,积极调整优化能源及产业结构,提高洁净煤技术,多元化发展其他能源,开发替代能源,实现传统能源之间、传统能源和新能源之间的替代,从而实现能源结构的优化(邹璇, 2010),从而实现大气环境质量的改善。

4.4 机动车污染物排放

机动车尾气排放的主要污染物包括碳氢化合物、氮氧化物、一氧化碳和细颗粒物(中华人民共和国环境保护部, 2011),已成为我国空气污染的主要来源,造成灰霾、酸雨和光化学烟雾等区域性大气污染问题频繁发生。由于机动车大多行驶在人口密集区域,这些污染物对人体的呼吸系统和眼睛带来直接危害,长期暴露会严重影响人们

的身体健康。

随着京津冀经济快速发展和城市化规模迅速扩大,机动车保有量呈快速增长态势,机动车尾气污染在环境空气中的分担率不断提升,成为影响城市大气环境的重要因素。不同车型、不同标准车辆对污染物排放贡献不同,根据中国机动车污染防治年报获知:汽车成为机动车(包括汽车、摩托车及其他类型的车辆)污染总量主要贡献者,其中2012年全国机动车氮氧化物排放量为640.0万吨,其中汽车排放占91.1%(2012年中国机动车污染防治年报, 2012; 2013年中国机动车污染防治年报, 2013)。国家统计局数据(表3)显示:2005年—2013年京津冀地区汽车保有量由463.11万辆增加到1582万辆,保有量增加了241.6%。其中,河北增幅最大为619.41万辆,北京增幅为305.81万辆,天津为193.67万辆。2009年、2010年是京津冀地区汽车保有量增加最快的两年,北京市自2011年施行小客车指标调控管理政策之后,汽车保有量增加的趋势得到遏制,增幅保持在5%以下,而天津和河北仍处于较高的增幅状态下。据环境统计年报得知:2013年京津冀地区机动车氮氧化物排放量65.6万t,占京津冀氮氧化物排放量的30%左右。由这些统计数据可知,机动车污染物排放是对流层NO₂的重要人为源。

实施机动车氮氧化物总量控制,进一步强化机动车生产、使用全过程的环境监管;同时与有关部门密切协助,从行业发展规划、城市公共交通、清洁燃油供应等方面采取综合措施,协调推进“车、油、路”同步升级,淘汰高污染黄标车是机动车污染防治的重点,缓解机动车尾气排放对大气环境的影响。

表 2 2004年—2012年京津冀煤炭消耗量

Table 2 Coal consumption of Beijing-Tianjin-Hebei region during 2004 to 2012

地区	年份									
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
北京	2939.41	3068.97	3055.67	2984.67	2747.73	2664.70	2634.62	2366	2270	
天津	3508.57	3801.45	3809.31	3926.70	3972.77	4119.65	4806.79	5262	5298	
河北	17073.96	20542.39	21345.42	24548.51	24418.62	26515.81	27464.72	30792	31359	
京津冀	23521.94	27412.81	28210.40	31459.88	31139.12	33300.16	34906.13	38420	38927	
全国	224926.00	263864.85	291869.73	319156.12	334806.44	351182.33	381413.30	429000	436454	

/万t

表3 2005年—2013年京津冀汽车保有量

Table 3 Car ownership of Beijing-Tianjin-Hebei region during 2005 to 2013

/万辆

地区	年份								
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
北京	206.04	235.25	269.19	309.15	363.74	445.13	465.65	488.56	511.85
天津	66.23	77.64	91.40	106.39	128.66	156.79	189.19	219.49	259.90
河北	190.84	219.91	260.38	299.91	390.43	486.86	600.56	721.55	810.25
京津冀	463.11	532.80	620.97	715.45	882.83	1088.78	1255.40	1429.60	1582.00

4.5 农业秸秆焚烧排放

京津冀地区中,河北省的农业比重最大,北京天津农业比重很小。河北省是全国粮油集中产区之一,可耕地面积达 $6317.3 \times 10^3 \text{ hm}^2$,居全国第4位。由于地区条件的气候差异,农作物种类较多。河北的粮食产量较高,粮食作物种植分夏、秋两季。近十年来,人们生活水平普遍提高,燃气和煤炭取代秸秆成为人们生活烹调 and 取暖的燃料。目前,秸秆处理成本较高,综合利用渠道较少,效果不显著。夏秋两季农作物收割时,秸秆

焚烧向空气中释放大气态污染物,给环境空气造成很大污染(张鹤丰,2009)。环境保护部据卫星遥感监测数据统计和各地报告的现场巡查检查结果显示(表4):2013年京津冀秸秆焚烧火点个数为210个,主要出现在河北,为202个;2014年为108个,河北出现106个。京津冀地区火点个数2014年较2013年同期减幅为47.57%(环境保护部办公厅,2014)。故认为秸秆焚烧是京津冀对流层NO₂浓度较高的一个重要人为源,秸秆禁烧工作力度加大是2014年NO₂柱浓度降低的一个因素。

表4 2013年—2014年京津冀秸秆焚烧火点数、火点强度及增减幅度

Table 4 Straw burning fire, fire intensity and change of Beijing-Tianjin-Hebei region during 2013 to 2014

地区	火点数/个		与2013年同期相比	耕地面积 /hm ²	火点强度 /(个/hm ²)
	2014年夏季	2013年夏季			
河北	106	202	-47.52%	6317.3×10^3	0.017×10^3
天津	2	8	-75.00%	441.1×10^3	0.005×10^3
北京	0	0	-	231.7×10^3	0×10^3
京津冀	108	210	-48.57%	6990.1×10^3	0.007×10^3
全国	2119	4800	-55.85%	121354.3×10^3	0.017×10^3

4.6 国家重大事件及环境规划

近10年京津冀地区举办了很多国际活动,也有很多环境的相关规划。根据上文的对流层NO₂的月、季和年变化情况,本文重点分析如下两个典型的事件和规划对大气环境质量的影响。

(1)2008年北京奥林匹克运动会

2001年北京申办奥林匹克运动会时,将“绿色奥运”作为2008年北京奥运会的三大理念之首。北京市在申办、筹办、举办2008年北京奥运会的过程中加大了环保投入、制定了改善空气质量相关法规、标准57部。在制定的57部相关法规标准

中,有21部涉及能源结构改善,42部涉及机动车污染治理,22部涉及工业大气污染治理,17部涉及扬尘污染治理,其重工业大气污染治理主要措施包括关停、外迁、改造污染工业企业,从而减少大气污染物的排放,持续改善了北京的空气质量(马宁等,2010)。这从上文对NO₂浓度时空分布的分析中能得出相同的结论。北京周边为保证奥运工作开展的联防联控措施也发挥了重要作用。

(2)大气污染防治行动计划

2013年9月,国家发布了《大气污染防治行动计划》(国发〔2013〕37号),简称大气十条。大气

十条确定了减少污染物排放、调整优化产业结构、加快企业技术改造、加快调整能源结构、建立区域协作机制等10个方面的举措,力争改善中国空气质量。大气十条发布后的一年里,2014年74个城市PM_{2.5}的年均浓度有所下降,平均下降11.1%。其中京津冀下降了12.3%。对流层NO₂柱浓度的分析,同样得到显著下降的结论。

5 结论

对流层NO₂柱浓度对人类健康、自然环境等有很大影响,研究对流层NO₂柱浓度的特征及影响因素具有重要的现实意义,有助于摸清京津冀城市群10年来NO₂的变化情况,为氮氧化物减排提供重要决策依据。本文充分利用卫星遥感宏观的优势,详细分析了近10年间京津冀对流层NO₂柱浓度时空变化格局,在此基础上,从地形、气象、经济、农业、生活、国家重大事件及环境规划等多个方面分析了NO₂变化的影响因素,结论如下:

(1)近10年京津冀对流层NO₂柱浓度时间变化特征为:10年柱浓度年均增长率为3.35%,且年度波动较大。2005年浓度最低,2011年最高。纵观10年来NO₂的变化,发现2008年京津冀地区NO₂浓度与前后年份的变化较大,这与国家重大奥运事件的污染防控有关;忽略2008年的变化,2005年—2011年NO₂呈逐渐升高趋势;2012年—2014年呈逐渐降低趋势,以2014年下降最为显著。

(2)近10年京津冀对流层NO₂柱浓度空间变化特征为:呈西北低东南高的趋势。燕山-太行山山系以北的承德和张家口市浓度较低,山系以南主要有北京-天津-唐山与石家庄-邢台-邯郸两个污染中心,这两个污染中心主要为发达和重工业城市,浓度水平很高。高浓度范围十年来扩大缩小变化显著,2011年燕山-太行山以南的区域完全均处于高浓度状态。

(3)京津冀北部三面环山不利于NO₂的扩散,导致北京-天津-唐山与石家庄-邢台-邯郸两个污染中心污染物聚集,使得颗粒物浓度升高,雾霾频发。此外,京津冀夏季降水量大,其湿沉降对NO₂的浓度降低作用显著,与NO₂浓度负相关度较高。

(4)通过相关性分析、文献及国家政策印证等分析,发现NO₂的变化与第2产业生产总值相关性很大,需要调整优化产业结构降低第2产业比重才能得到改善;长期依赖燃煤高污染的能源结构也

是导致NO₂浓度居高不下的一个重要原因,亟需开发新能源以替代煤燃料等各种办法;机动车保有量的快速增加,汽车标准及油品跟不上国际发展水平,导致NO₂排放量大增。通过分析发现,一个地区的污染来源取决于这个地区的经济及发展程度,北京主要来源于机动车尾气排放,天津来自工业排放和机动车,河北工业排放是NO₂的主要来源,但近几年随着机动车保有量的剧增,其尾气排放分担率不可小觑。

参考文献(References)

- Boersma K F, Jacob D J, Trainic M, Rudich Y, DeSmedt I, Dirksen R and Eskes H J. 2009. Validation of urban NO₂ concentrations and their diurnal and seasonal variations observed from the SCIAMACHY and OMI sensors using in situ surface measurements in Israeli cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9: 3867 – 3879 [DOI: 10.5194/acp-9 – 3867-2009]
- Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, Rozanov V, Ladstätter-Weißmayer A, Richter A, DeBeek R, Hoogen R, Bramstedt K, Eichmann K U, Eisinger M and Perner D. 1999. The global ozone monitoring experiment (GOME): mission concept and first scientific results. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(2): 151 – 175 [DOI: 10.1175/1520 – 0469(1999)056<0151:TGOMEG> 2.0.CO;2]
- Chen S S, Shu J and Xu J Z. 2010. Tropospheric NO₂ pollution analysis of some typical cities in China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 19(12): 1484 – 1490 (陈姗姗, 束炯, 徐建中. 2010. 中国若干典型城市对流层NO₂时空分布特征. *长江流域资源与环境*, 19(12): 1484 – 1490)
- China Vehicle Emission Control Annual Report of 2011. 2011. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (2011年中国机动车污染防治年报. 2011. 北京: 中华人民共和国环境保护部)
- China Vehicle Emission Control Annual Report of 2012. 2012. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (2012年中国机动车污染防治年报. 2012. 北京: 中华人民共和国环境保护部)
- China Vehicle Emission Control Annual Report of 2013. 2013. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (2013年中国机动车污染防治年报. 2013. 北京: 中华人民共和国环境保护部)
- General Office of Ministry of Environmental Protection. 2014. Notification about the Stalk Burning Working Condition in Summer of 2014. 1170. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (环境保护部办公厅. 2014. 关于2014年夏季秸秆禁烧工作情况的通报. 1170. 北京: 中华人民共和国环境保护部)
- Jiang W M. 2003. *Air Pollution Meteorology*. Nanjing: Nanjing University Press: 170 (蒋维楣. 2003. 空气污染气象学. 南京: 南京大学出版社: 170)

- Jiang W H, Ma J Z, Yan P, Richter A, Burrows J P and Nüß H. 2006. Characterization of NO₂ pollution changes in Beijing using GOME satellite data. *Journal of Applied Meteorological Science*, 17(1): 67 – 72 (江文华, 马建中, 颜鹏, Richter A, Burrows J P, Nüß H. 2006. 利用GOME卫星资料分析北京大气NO₂污染变化. *应用气象学报*, 17(1): 67 – 72)
- Li D. 2011. Analysis of the variation and affecting factor of air quality in Dalian ambience from 2006 to 2010. *Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition)*, 34(4): 524 – 527 (李丹. 2011. 2006–2010年大连市空气质量变化原因分析. *辽宁师范大学学报(自然科学版)*, 34(4): 524 – 527)
- Li L J and Wang Y. 2011. The characterization of NO₂ pollution in Beijing based on satellite and conventional observation data. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 31(12): 2762 – 2768 (李令军, 王英. 2011. 基于卫星遥感与地面监测分析北京大气NO₂污染特征. *环境科学学报*, 31(12): 2762 – 2768)
- Li L, Shi R H, Chen Y Y, Xu Y M, Bai K X and Zhang J. 2013. Spatio-temporal characteristics of NO₂ in China and the anthropogenic influences analysis based on OMI data. *Journal of Geo-Information Science*, 15(5): 688 – 694 (李龙, 施润和, 陈圆圆, 徐永明, 白开旭, 张颖. 2013. 基于OMI数据的中国NO₂时空分布与人类影响分析. *地球信息科学学报*, 15(5): 688 – 694) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00688]
- Li Z K, Pan Y X and Sun L Q. 1985. *Theory on Air Pollution Meteorology and Application*. Beijing: Meteorology Press: 557 – 569 (李宗恺, 潘云仙, 孙澜桥. 1985. *空气污染气象学原理及应用*. 北京: 气象出版社: 557 – 569)
- Liu C X and Bian W L. 2007. The correlation of air quality and meteorologic factors in Tianjin. *Environmental Monitoring in China*, 23(5): 63 – 65 (刘彩霞, 边玮砾. 2007. 天津市空气质量与气象因子相关分析. *中国环境监测*, 23(5): 63 – 65)
- Ma J Z, Beirle S, Jin J L, Shaiganfar R, Yan P and Wagner T. 2013. Tropospheric NO₂ vertical column densities over Beijing: results of the first three years of ground-based MAX-DOAS measurements (2008 – 2011) and satellite validation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13: 1547 – 1567 [DOI: 10.5194/acp-13 – 1547-2013]
- Ma N, Liu M and Liang W N. 2010. Impact of Beijing 2008 Olympic Games on its air quality. *Capital Journal of Public Health*, 4(3): 103 – 110 (马宁, 刘民, 梁万年. 2010. 2008年北京奥运会对北京空气质量的影响. *首都公共卫生*, 4(3): 103 – 110)
- Meng X Y, Yu Y, Zhang Z F, Li G, Wang S and Du L. 2014. Preliminary study of the dense fog and haze events' formation over Beijing-Tianjin-and-Hebei Region in January of 2013. *Environmental Science & Technology*, 37(1): 190 – 194 (孟晓艳, 余予, 张志富, 李钢, 王帅, 杜丽. 2014. 2013年1月京津冀地区强雾霾频发成因初探. *环境科学与技术*, 37(1): 190 – 194)
- OMI Team. 2012. *Ozone Monitoring Instrument (OMI) Data User's Guide (OMI-DUG-5. 0)*.
- Platt U, Perner D and Pätz H. 1979. Simultaneous measurement of atmospheric CH₂O, O₃, and NO₂ by differential optical absorption. *Journal of Geophysical Research*, 84(C10): 6329 – 6335 [DOI: 10.1029/JC084iC10p06329]
- Sui K K, Wang Z F, Yang J, Xie F Y and Zhao Y. 2007. Beijing persistent PM₁₀ pollution and its relationship with general meteorological features. *Research of Environmental Sciences*, 20(6): 77 – 82 (隋珂珂, 王自发, 杨军, 谢付莹, 赵越. 2007. 北京PM₁₀持续污染及与常规气象要素的关系. *环境科学研究*, 20(6): 77 – 82) [DOI: 10.13198/j.res.2007.06.80.suikk.009]
- Tao J H, Wang Z F, Han D, Li S S, Su L and Chen L F. 2009. Analysis of crop residue burning and tropospheric NO₂ vertical column density retrieved from satellite remote sensing in North China. *China Environmental Science*, 29(10): 1016 – 1020 (陶金花, 王子峰, 韩冬, 李莘莘, 苏林, 陈良富. 2009. 华北地区秸秆禁烧前后的NO₂卫星遥感监测分析. *中国环境科学*, 29(10): 1016 – 1020)
- Wang Y, Li L J and Liu Y. 2012. Characteristics of atmospheric NO₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta analyzed by satellite and ground observations. *Environmental Science*, 33(11): 3685 – 3692 (王英, 李令军, 刘阳. 2012. 京津冀与长三角区域大气NO₂污染特征. *环境科学*, 33(11): 3685 – 3692)
- Wang Y Q, Jiang H, Zhang X Y, Zhou G M, Yu S Q and Xiao Z Y. 2009. Temporal-spatial distribution of tropospheric NO₂ in China using OMI satellite remote sensing data. *Research of Environmental Sciences*, 22(8): 932 – 937 (王跃启, 江洪, 张秀英, 周国模, 余树全, 肖钟. 2009. 基于OMI卫星遥感数据的中国对流层NO₂时空分布. *环境科学研究*, 22(8): 932 – 937)
- Wei P, Ren Z H, Su F Q, Cheng S Y, Zhang P and Gao Q X. 2011. Seasonal distribution and cause analysis of NO₂ in China. *Research of Environmental Sciences*, 24(2): 155 – 161 (尉鹏, 任阵海, 苏福庆, 程水源, 张鹏, 高庆先. 2011. 中国NO₂的季节分布及成因分析. *环境科学研究*, 24(2): 155 – 161)
- Wei P, Wang W J, Wu H, Wu C S, Wang Z S, Gao Q X, Su F Q and Ren Z H. 2013. Analysis of monthly variability and polluting sources of NO₂ in China based on satellite remote sensing. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 3(4): 331 – 336 (尉鹏, 王文杰, 吴昊, 吴春生, 王宗爽, 高庆先, 苏福庆, 任阵海. 2013. 基于卫星遥感的中国NO₂月际演变及污染源分析. *环境工程技术学报*, 3(4): 331 – 336)
- Wenig M O, Cede A M, Bucsela E J, Celarier E A, Boersma K F, Veefkind J P, Brinksma E J, Gleason J F and Herman J R. 2008. Validation of OMI tropospheric NO₂ column densities using direct-sun mode Brewer measurements at NASA Goddard Space Flight Center. *Journal of Geophysical Research*, 113(D16) [DOI: 10.1029/2007JD008988]
- Wu D, Liao B T, Wu M, Chen H Z, Wang Y C, Liao X N, Gu Y, Zhang X L, Zhao X J, Quan J N, Liu W D, Meng J P and Sun D. 2014. The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34(1): 1 – 11 (吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 陈慧忠, 王迎春, 廖晓农, 古月, 张小玲, 赵秀娟, 权建农, 刘伟东, 孟金平, 孙丹. 2014. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件. *环境科学学报*, 34(1): 1 – 11)
- Xiao Z Y, Jiang H and Cheng M M. 2011. Characteristics of atmospheric NO₂ over China using OMI remote sensing data. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 31(10): 2080 – 2090 (肖钟湧, 江洪, 程苗苗. 2011. 利用OMI遥感数据研究中国区域大气NO₂. *环境科学学报*, 31(10): 2080 – 2090)
- Xin M W. 2013. Study on Spatial and Temporal Change of Tropospheric NO₂ Vertical Column Densities in Hebei Province Using

- OMI Remote Sensing Data. Shijiazhuang: Hebei Normal University (辛名威. 2013. 基于OMI遥感数据的河北省大气NO₂垂直柱浓度时空变化研究. 石家庄: 河北师范大学)
- Yao L, Lv N and Shi H D. 2012. Study on spatial-temporal variations in total NO₂ column amounts over China using SCIAMACHY data. *Research of Environmental Sciences*, 25(4): 419 – 424 (姚凌, 吕宁, 师华定. 2012. 利用SCIAMACHY遥感资料研究我国NO₂柱浓度及其时空分布. *环境科学研究*, 25(4): 419 – 424)
- Yuan Y S, Liu D M, Che R J and Dong X L. 2007. Research on the pollution situation of atmospheric particulates during Autumn in Beijing city. *Ecology and Environment*, 16(1): 18 – 25 (袁杨森, 刘大猛, 车瑞俊, 董雪玲. 2007. 北京市秋季大气颗粒物的污染特征研究. *生态环境*, 16(1): 18 – 25)
- Zhang H F. 2009. A Laboratory Study on Emission Characteristics of Gaseous and Particulate Pollutants Emitted from Agricultural Crop Residue Burning in China. Shanghai: Fudan University (张鹤丰. 2009. 中国农作物秸秆燃烧排放气态、颗粒态污染物排放特征的实验室模拟. 上海: 复旦大学)
- Zhang Q, Geng G N, Wang S W, Richter A and He K B. 2012. Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China during 1996 – 2010. *Chinese Science Bulletin*, 57(22): 2857 – 2864 (张强, 耿冠楠, 王斯文, Richter A, 贺克斌. 2012. 卫星遥感观测中国1996 – 2010年氮氧化物排放变化. *科学通报*, 57(16): 1446 – 1453)[DOI: 10.1007/s11434 – 012-5015 – 4]
- Zhang X Y, Zhang P, Zhang Y, Li X J and Qiu H. 2007. The trend, seasonal cycle, and sources of tropospheric NO₂ over China during 1997 – 2006 based on satellite measurement. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(12): 1877 – 1884 (张兴赢, 张鹏, 张艳, 李晓静, 邱红. 2007. 近10a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)*, 37(10): 1409 – 1416) [DOI: 10.1007/s11430 – 007-0141 – 6]
- Zhuo G, De Q Z G and Chen T. 2009. Study on the air pollution feature and its meteorological influencing factor in Lhasa. *Environmental Monitoring in China*, 25(1): 90 – 98 (卓嘎, 德庆卓嘎, 陈涛. 2009. 拉萨市大气污染分布特征及气象影响因子分析. *中国环境监测*, 25(1): 90 – 98)
- Zou X. 2010. The optimizing of energy structure and economic growth. *Inquiry into Economic Issues*, (7): 33 – 39 (邹璇. 2010. 能源结构优化与经济增长. *经济问题探索*, (7): 33 – 39) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-2912.2010.07.006]

Spatio-temporal trend and changing factors of tropospheric NO₂ column density in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2005 to 2014

ZHOU Chunyan, LI Qing, WANG Zhongting, GAO Yanhua, ZHANG Lijuan, CHEN Hui, MA Pengfei, TAN Chang

Satellite Environmental Center, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Beijing 100094, China

Abstract: Using satellite-derived NO₂ column data from Ozone Monitoring Instrument (OMI), we analyzed the characteristics and factors affecting the spatio-temporal distribution of tropospheric NO₂ column density in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2005 to 2014. Results demonstrated that (1) tropospheric NO₂ column density considerably fluctuated on the temporal scale and increased at an annual rate of 3.35%, with the highest column density in 2011; NO₂ level increased during 2005 to 2011, ignoring changes in 2008, and decreased from 2012 to 2014. (2) The spatial distribution of tropospheric NO₂ column density significantly changed, with the lowest distribution found in the northwest part and the highest in the southeast part. Tropospheric NO₂ column density was low in Zhangjiakou and Chengde in north Beijing-Tianjin-Hebei Region but high in Beijing-Tianjin-Tangshan and Shijiazhuang-Xingtai-Handan. (3) Beijing-Tianjin-Hebei is surrounded on three sides by mountains in north and is not conducive to NO₂ distribution. Precipitation exhibited a highly negative correlation with NO₂ concentration because of atmospheric wet deposition. (4) Pollution sources were highly determined by industrial and energy structures. The tertiary industry is dominant and increases steadily in Beijing, where coal consumption is low, but car ownership increases 1.5 times; as such, the main source of NO₂ in Beijing is motor vehicle exhaust emissions. The second industry of Tianjin is slightly higher than the third industry; in this area, coal consumption is twice higher than that in Beijing but car ownership is only half of that in Beijing; thus, industrial emissions and motor vehicles are a common source of NO₂ in Tianjin. A high proportion of secondary industry is found in Hebei, where coal accounted for 80.6% of that in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; hence, Hebei industrial emissions are the main source of NO₂, although vehicle emissions have increased with increased vehicle ownership in the recent years.

Key words: Tropospheric NO₂ column density, OMI, satellite remote sensing monitoring, spatial-temporal change, impact factors, Beijing-Tianjin-Hebei Region

Supported by Major Projects of High Resolution Earth Observation Systems of National Science and Technology (No.05-Y20A16-9001-15/17); Special Fund for Environmental Protection Research in the Public Interest (No. 201309011); National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2014AA06A508)