

引用格式:Zhou Chunyan, Li Qing, Zhang Lijuan, *et al.* Spatio-temporal Change and Influencing Factors of Tropospheric NO₂ Column Density of China during 2005~2015[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(6):1190-1200. [周春艳, 厉青, 张丽娟, 等. 遥感监测 2005~2015 年中国 NO₂ 时空特征及分析影响因素[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(6):1190-1200.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.6.1190

遥感监测 2005~2015 年中国 NO₂ 时空特征及 分析影响因素

周春艳, 厉青, 张丽娟, 马鹏飞, 陈辉, 王中挺
(环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要:基于 OMI 对流层 NO₂ 柱浓度产品研究了 2005~2015 年中国及各省(市、区)NO₂ 时空变化及影响因素:①中国对流层 NO₂ 柱浓度 2005~2009 年波动较小, 2010~2011 年升幅较大, 2012 年较 2011 年有所下降, 2013 年与 2012 年持平, 2014、2015 年持续大幅下降;②中国 NO₂ 高浓度分布面积 11 年来变化显著, 五级高浓度分布面积 2005~2011 年呈显著上升趋势, 2011 年面积最大为 37.2 万 km²; 2011~2013 年波动较小; 2014~2015 年呈直线下降趋势, 2015 年降低到 6.1 万 km²;③上海、天津两市对流层 NO₂ 柱浓度处于五级高浓度水平, 其中上海是中国浓度最高的城市, 山东是中国浓度最高的省;④对流层 NO₂ 柱浓度的变化与第二产业生产总值相关性很大, 需要调整优化产业结构降低第二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。

关键词:对流层 NO₂ 柱浓度; OMI; 遥感监测; 时空变化; 影响因素

中图分类号:X 87; TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)06-1190-11

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 年我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, 站点集中分布在中国中部、南部及东部, 西部及东北分布较为稀疏。站点观测数据时间连续但空间离散, 难以全面反映 NO₂ 在区域上的变化。遥感技术能够弥补地面监测这一局限性, 提供空间宏观尺度上的变化。卫星观测 NO₂ 柱浓度始于二十世纪九十年代, 欧洲与美国相

收稿日期:2016-02-23; 修订日期:2016-10-06

基金项目:高分辨率对地观测系统重大专项(05-Y20A16-9001-15/17), 国家 863 计划项目(2014AA06A508)。

作者简介:周春艳(1981-), 女, 山东临沂人, 博士, 高级工程师, 主要从事大气环境遥感研究。E-mail:mezhouchunyan@126.com。

通讯作者:张丽娟(1984-), 女, 四川绵阳人, 硕士, 工程师, 主要从事遥感应用方面的研究。E-mail:zlj13021@126.com。

继发射了一系列卫星,搭载了痕量气体传感器,主要有 GOME (1996~2003 年)、SCIAMACHY (2002~2012 年)、OMI (2004~现在)、GOME-2 (METOP-A) (2007~现在)、GOME-2 (METOP-B) (2013~现在),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,我国还没有此类气体传感器,预计于 2017 年上天的 GF-5 号卫星上搭载的 EMI 传感器,将有能力进行 NO₂ 探测。

改革开放 30 多年来经济的高速发展,城市化进程的不断加快,以资源消耗为主的粗放型经济增长方式带来的高强度污染排放,使我国各地区特别是东部经济发达地区各种环境问题集中爆发,大气污染呈现出煤烟型与机动车污染共存的新型大气复合污染,颗粒物为主要污染物,霾和光化学烟雾频繁、二氧化氮浓度居高不下,酸沉降转变为硫酸型和硝酸型的复合污染,区域性的二次性大气污染愈加明显^[1]。严重的大气污染对公众健康、生态环境和社会经济都会产生巨大的威胁与损害,解决区域发展与大气环境恶化之间的矛盾势在必行。目前,利用遥感技术探讨我国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、沙尘及秸秆焚烧等方面。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^[2]利用 GOME 和 SCIAMACHY 对流层 NO₂ 柱浓度数据对 1996~2010 年中国氮氧化物排放的时空格局变化进行了分析。王跃启等^[3]、陈姗姗等^[4]和姚凌等^[5]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我国 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^[6]利用 OMI 的 NO₂ 产品,分析了 2004~2011 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 柱浓度的月变化及其比率形状,判断不同地区的人为与自然影响模式。尉鹏等^[7-8]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^[9]、李龙等^[10]利用不同数据分别分析了 1997~2006 年、2005~2010 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、地区生产总值和全国汽车保有量与对流层 NO₂ 间的相关性。高晋徽等^[11]结合 REAS 东亚地区 NO_x 排放清单,ECMWF 地面 10 m 风场数据和中国经济统计年鉴中相关统计数据,研

究了 2005~2013 年中国地区对流层 NO₂ 柱浓度的空间分布和长期变化趋势。闫欢欢等^[12]分析了近 10 余年(2004~2014 年)全球和中国区域 NO₂ 空间分布特征、长时间序列变化和季节变化特征。Nickolay 等^[13]分析了 2005~2015 年全球 NO₂ 空间分布特征及变化,发现中国东部地区是全球 NO₂ 浓度最高的区域,特别针对华北平原、长三角、珠三角等高浓度区进行了变化分析。区域尺度的研究有如下方面的工作:江文华等^[14]、李令军等^[15]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^[16]、周春艳等^[17]利用 OMI 数据分别研究了河北省、山东省大气 NO₂ 垂直柱浓度的时空变化及影响因素。王英等^[18]、郑晓霞等^[19]、周春艳等^[20-22]基于 OMI 遥感反演数据,研究了京津冀、长三角 NO₂ 区域污染特征。针对我国及区域 NO₂ 污染物的分布、变化特征及传输规律等的研究工作已有不少,但定量估算 NO₂ 高浓度区面积的变化及与污染控制措施结合分析的研究较少。本文采用对流层 NO₂ 柱浓度遥感数据、氮氧化物排放量、国民生产总值、汽车保有量、秸秆焚烧火点个数等多种数据,分析中国及各省(市、区)2005~2015 年对流层 NO₂ 柱浓度的时空特征变化,定量分析高浓度区面积的年际变化,与地面排放数据进行了对比分析,并深入挖掘环境变化背后的影响因素。

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,轨道扫描幅为 2 600 km,天底空间分辨率是 13 km×24 km,一天覆盖全球一次,有 3 个通道,波长覆盖范围为 270~500 nm。

本文所用数据为 2005~2015 年 DOMINO Version 2.0 OMI 对流层 NO₂ 垂直柱浓度产品,此产品由荷兰皇家气象研究所反演,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^[23]在美国马里兰州(38.98°N,76.83°W)取以地基站点为中心 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^[24]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: $r=0.63$, $slope=0.93$ 。Ma 等^[25]在北京利用 MAX-DOAS 观测数据对 OMI 产品进行验证,发现卫星观测对流层 VCD 在北京地区低估了大概 26%~38%。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。

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)^[26-27]。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^[28]。

中国的人口、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/>)。

3 结果与分析

为了分析中国及其 34 个省(市、区)的 NO₂ 月、季、年时空分布及变化情况,本文对 2005~2015 年对流层 NO₂ 垂直柱浓度进行了如下分级:一级(<200)、二级(200~500)、三级(500~1 000)、四级(1 000~1 500)和五级(>1 500),单位为 10^{13} mole/cm²。

3.1 中国对流层 NO₂ 柱浓度的年际时空变化

由中国对流层 NO₂ 柱浓度年均变化(如图 1)可知:对流层 NO₂ 柱浓度波动较大,2005 年浓度最低,为 184.5×10^{13} mole/cm²;2011 年最高,为 280.8×10^{13} mole/cm²。2005~2009 年浓度波动较小,缓慢升高;2010~2011 年升幅较大;2012 年较 2011 年有所下降;2013 年与 2012 年持平;2014~2015 年持续大幅下降,降幅分别为 10.5%、15.3%。“十一五”规划对氮氧化物没有约束性规定,2010 年较 2005 年上升 31%;“十二五”规划的约束性减排指标为下降 10%,2015 年较 2010 年下降 17.4%。本文统计所得的年均值,与 2006~2014 年我国环境统计数据所提供的废气中氮氧化物排放量(表 1)具有很好的一致性,相关性高达 0.97。

我国对流层 NO₂ 较高柱浓度面积十年来变化显著(图 2),五级高浓度分布面积 2005~2011 年呈

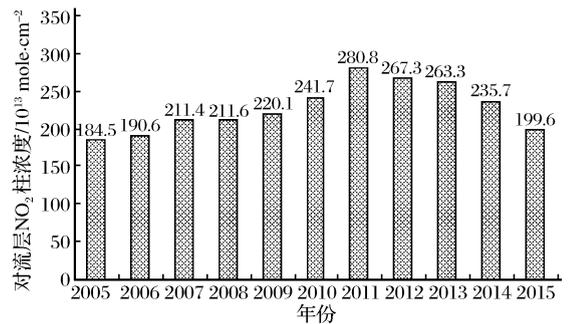


图 1 2005~2015 年中国对流层 NO₂ 柱浓度年均值变化趋势

Fig.1 Annual average tropospheric NO₂ column density change of China during 2005~2015

表 1 2006~2014 年中国氮氧化物排放量统计(单位:10⁴ t)

Table 1 NO_x emissions statistics of China during 2006~2014(Unit:10⁴ t)

年份	工业源	生活源	机动车	集中式	合计
2006	1 136.0	387.8	—	—	1 523.8
2007	1 261.3	382.0	—	—	1 643.4
2008	1 250.5	374.0	—	—	1 624.5
2009	1 284.8	407.9	—	—	1 692.7
2010	1 465.6	386.8	—	—	1 852.4
2011	1 729.7	36.6	637.6	0.35	2 404.3
2012	1 658.1	39.3	640.0	0.37	2 337.8
2013	1 545.6	40.7	640.6	0.44	2 227.4
2014	1 404.8	45.1	627.8	0.33	2 078.0

注:氮氧化物排放量统计数据来源于中华人民共和国环境保护部环境统计年报。我国从 2006 年开始统计氮氧化物排放量,生活排放量中含交通源排放的氮氧化物。自 2011 年起机动车排气污染物排放情况与生活源分开单独统计,分为工业氮氧化物排放量、城镇生活氮氧化物排放量、机动车氮氧化物排放量、集中式污染治理设施氮氧化物排放量

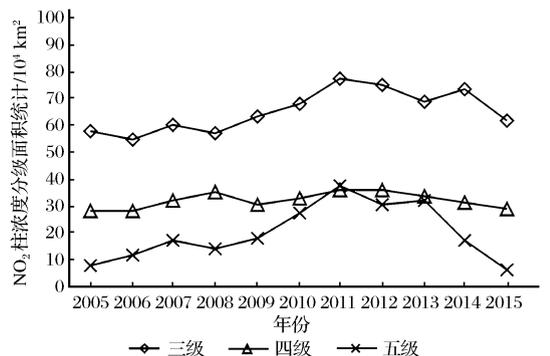


图 2 2005~2015 年对流层 NO₂ 柱浓度面积统计(单位:10⁴ km²)

Fig.2 Area statistics of tropospheric NO₂ column density during 2005~2015(Unit:10⁴ km²)

显著上升趋势,由 2005 年的 7.6 万 km² 扩展到 37.2 万 km²,2011~2013 年波动较小,2014~2015 年呈直线下降趋势,2015 年降低到 6.1 万 km²;四级高浓度

分布面积十年来波动较小;三级分布面积趋势与五级有大致相似的趋势,2011 年达到最高值为 77.2 万 km²。

由中国对流层 NO₂ 柱浓度十年时空变化(如

图 3)可知:①对流层 NO₂ 柱浓度高值区主要分布在京津冀中南部、山东大部、河南北部、山西和陕西中部条带状区域、长三角中部及珠三角等地,此外湖

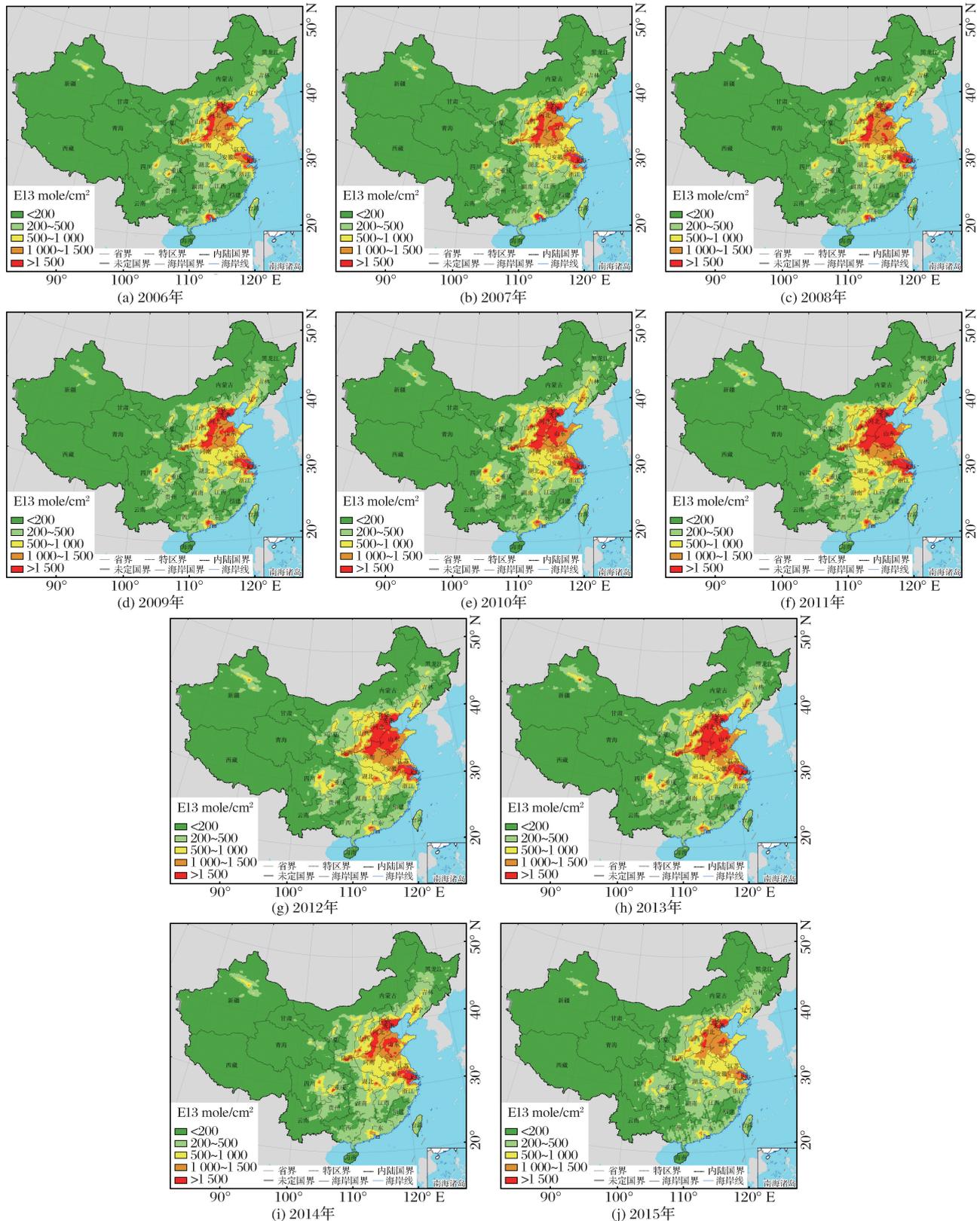


图 3 2006~2015 年中国对流层 NO₂ 柱浓度年均变化

Fig.3 Annual average tropospheric NO₂ column density distribution during 2006~2015 of China

北东部、四川中部、重庆西部、新疆北部、辽宁中部等地有小范围的高浓度区；②十年来 NO_2 高浓度区范围变化显著，2010~2013年较前几年高浓度区在山东中西部、河北南部、河南北部及长三角中部等地得到显著扩张；2014年高浓度范围大幅缩小，京津冀南部、河南北部和山东连接成片的五级高浓度区已分开，江苏、安徽北部也由四级降至三级水平；2015年京津冀、山东及长三角中部的大范围五级高浓度降至四级水平，五级高浓度范围显著缩小。

3.2 中国对流层 NO_2 柱浓度的月际时间变化

图4给出了2005~2015年中国对流层 NO_2 柱

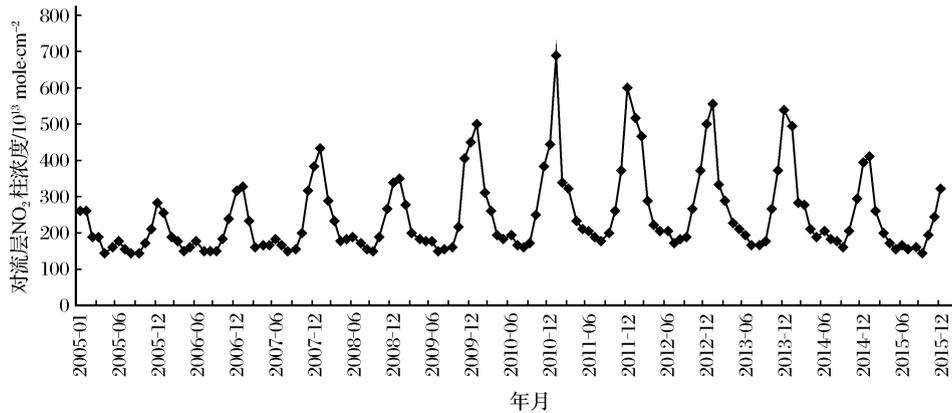


图4 2005~2015年中国对流层 NO_2 柱浓度月均值变化趋势(单位: $10^{13} \text{ mole/cm}^2$)

Fig.4 Monthly average tropospheric NO_2 column density change of China during 2005~2015(Unit: $10^{13} \text{ mole/cm}^2$)

3.3 中国省(市、区)对流层 NO_2 柱浓度的变化

11年间中国34个省(市、区)的 NO_2 柱浓度(表2)的波动与当地经济的发展、国家重大事件及减排政策息息相关：①经济不发达或欠发达的西部、南部、北部省(市、区)，对流层 NO_2 柱浓度较低，年际间的波动也较小。青海、西藏、新疆、甘肃、内蒙古、云南、海南、黑龙江、广西、四川、福建等11个省(区)对流层 NO_2 柱浓度处于一级水平，其中青海一直是中国浓度最低的省；②经济发达、人口密集的中东部、长三角及珠三角等地，对流层 NO_2 柱浓度很高。上海、天津两个市对流层 NO_2 柱浓度处于五级高浓度水平，山东、北京、香港、江苏、澳门、河北等省(市、区)处于四级高浓度水平。上海对流层 NO_2 柱浓度十一年均值为 $1\ 857.7 \times 10^{13} \text{ mole/cm}^2$ ，是中国浓度最高的城市；山东对流层 NO_2 柱浓度十一年均值为 $1\ 310.6 \times 10^{13} \text{ mole/cm}^2$ ，是中国浓度最高的省，与发达城市处于同一污染水平，其污染程度尤为严峻；③高浓度区受国家事件及政策影响显著，年际间波动剧烈。2008年因北京举办奥运会，相关减排措施的实施，导致北京对流层 NO_2 柱浓度降低最大，天津、河北次之，其他

地区也有小幅度的下降；香港、澳门及上海却有大幅上升；2009年，因奥运之后呈反弹式上升且升幅较大，北京增量最大，其次是天津和河北，香港、澳门及上海却有较大幅度的下降；2010~2011年，绝大多数地区呈上升趋势，2011年达到一个峰值，其中2010年香港大幅下降，2011年北京大幅下降，上海也有下降；2012年绝大部分地区有不同程度的降低，北京不降反增；2013年大部分地区有降低或变化不大，北京降幅较大，上海升幅较大；2014年大部分地区有不同程度下降，尤以人口密集的中东部地区最为显著，但天津却有较大幅度上升；2015年，全国除了香港有小幅上升之外其他地区都有不同程度的降低。这些结论与上文年度分布图中所示相吻合；④对流层 NO_2 柱浓度是行政区划范围内的平均值，而氮氧化物排放量却是行政区划范围内的累计值，两者不能一一对应。但对流层 NO_2 柱浓度年际变化可以参考氮氧化物排放量的变化。经比较发现对流层 NO_2 柱浓度受氮氧化物排放量的影响是直接的，增减趋势具有一致性，其中也有个别省市有较大差异，需要考虑气象条件引起的区域传输及其他多种因素的影响。

表 2 中国各省(市、区)对流层 NO₂ 柱浓度及氮氧化物排放量变化Table 2 The change of annual tropospheric NO₂ column density and NO_x emissions statistics for each provinces of China

年份	对流层 NO ₂ 柱浓度/ 10^{13} mole · cm ⁻²												氮氧化物排放量/万吨			
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	平均	2011	2012	2013	2014
青海	46.5	39.3	44.1	54.7	55.9	52.3	60.0	67.5	66.1	68.4	59.1	55.8	12.4	12.6	13.2	13.5
西藏	48.3	44.7	47.9	62.7	60.7	58.8	67.6	72.2	71.2	70.3	63.2	60.7	4.1	4.4	4.4	4.8
新疆	57.4	56.0	61.8	66.5	67.3	74.2	84.3	91.4	96.7	85.0	63.9	73.1	75.5	81.9	88.7	86.3
甘肃	82.2	75.6	77.2	82.5	85.2	93.5	112.0	115.3	112.9	104.6	90.3	93.8	48.1	47.3	44.3	41.8
内蒙古	67.6	79.3	85.8	85.0	93.9	97.8	124.4	131.8	108.8	99.9	92.9	97.0	142.2	141.9	137.8	125.8
云南	98.7	97.0	96.6	103.9	105.6	101.2	112.2	117.9	125.1	116.2	105.3	107.2	54.9	54.4	52.4	49.9
海南	117.5	95.2	121.1	107.9	100.5	99.9	129.0	111.7	128.5	123.6	101.7	112.4	9.5	10.3	10.0	9.5
黑龙江	91.7	112.4	102.2	119.6	106.1	113.5	137.2	127.0	130.0	120.6	113.0	115.8	78.4	78.1	75.2	73.1
广西	166.9	167.4	181.5	185.8	177.1	186.6	227.2	213.3	200.7	198.5	181.3	189.7	49.4	49.8	50.4	44.2
四川	164.6	155.6	161.8	177.5	189.0	213.8	210.8	230.0	238.9	222.6	193.1	196.2	67.5	65.9	62.4	58.5
福建	180.2	169.0	191.6	182.7	179.0	180.2	229.8	221.8	208.6	224.2	198.0	196.8	49.5	46.7	43.8	41.2
贵州	172.1	184.9	185.0	180.2	200.3	211.7	246.6	238.2	245.7	208.3	165.1	203.5	55.3	56.4	55.7	49.1
吉林	161.9	193.3	193.4	203.2	221.1	242.7	237.6	199.5	217.0	231.2	206.8	209.8	60.5	57.6	56.1	54.9
宁夏	180.2	181.4	201.6	192.5	214.4	230.9	333.7	326.0	286.6	248.2	187.0	234.8	45.8	45.6	43.7	40.4
江西	244.4	226.2	260.6	251.6	257.0	277.0	372.8	337.2	299.6	312.8	253.9	281.2	61.2	57.7	57.0	54.0
湖南	238.7	224.3	264.2	273.1	278.7	291.5	520.2	322.1	315.0	299.9	267.3	299.5	66.6	60.7	58.8	55.3
重庆	269.5	280.1	255.8	269.2	287.8	336.7	371.7	351.5	358.5	355.2	265.0	309.2	40.3	38.3	36.2	35.5
台湾	382.5	353.9	354.6	343.8	328.5	327.5	338.9	322.3	297.9	319.8	294.2	333.1	—	—	—	—
陕西	260.4	260.9	294.0	292.1	308.5	358.7	435.1	421.7	403.6	364.3	303.6	336.6	83.2	80.8	75.9	70.6
广东	410.7	393.8	437.1	393.3	373.2	393.3	429.5	394.1	385.1	357.2	320.9	389.8	138.8	130.3	120.4	112.2
湖北	341.6	311.2	370.3	368.0	369.3	443.6	583.8	504.5	469.3	444.4	358.5	414.9	67.0	64.0	61.2	58.0
辽宁	355.3	443.9	481.1	482.9	536.9	613.7	562.5	568.4	611.0	586.7	491.8	521.3	106.3	103.6	95.5	90.2
浙江	608.8	573.9	646.1	603.9	623.8	670.9	841.0	697.3	658.3	635.8	498.0	641.6	85.9	80.9	75.3	68.8
山西	572.3	614.8	713.4	661.5	647.6	763.8	936.3	883.7	877.8	700.4	611.7	725.7	128.6	124.4	115.8	107.0
安徽	657.5	608.5	751.0	747.4	715.3	808.8	992.0	1 006.1	942.8	776.5	635.6	785.6	95.9	92.1	86.4	80.7
河南	808.4	751.0	991.4	936.3	947.0	1 070.9	1 227.6	1 157.7	1 180.8	883.6	713.7	969.9	166.5	162.6	156.6	142.2
河北	753.9	930.1	993.0	889.6	1 051.1	1 180.2	1 259.1	1 211.6	1 168.4	1 026.9	890.1	1 037.1	180.1	176.1	165.2	151.2
澳门	1 229.0	1 176.0	1 071.0	1 270.0	1 107.0	1 071.0	1 216.0	894.0	936.0	864.0	541.0	1 034.1	—	—	—	—
江苏	1 050.9	1 036.8	1 191.9	1 285.7	1 243.9	1 345.8	1 477.4	1 299.0	1 371.6	1 211.0	955.9	1 224.5	153.6	148.0	133.8	123.3
香港	1 421.0	1 522.8	1 345.8	1 545.8	1 259.5	1 100.0	1 377.3	1 073.0	1 098.0	1 067.5	1 074.3	1 262.3	—	—	—	—
北京	1 079.8	1 358.3	1 375.1	1 075.2	1 512.2	1 494.7	1 275.4	1 429.0	1 309.3	1 226.5	1 108.9	1 294.9	18.8	17.8	16.6	15.1
山东	1 005.5	1 096.2	1 213.9	1 177.1	1 222.5	1 462.3	1 732.7	1 553.3	1 572.7	1 292.3	1 087.8	1 310.6	179.0	173.9	165.1	159.3
天津	1 312.8	1 626.9	1 763.4	1 509.9	1 862.3	2 061.3	2 065.8	1 896.6	1 808.4	1 877.3	1 542.1	1 757.0	35.9	33.4	31.2	28.2
上海	1 836.9	1 833.0	1 922.5	2 116.9	1 991.7	2 011.8	1 910.1	1 775.6	1 891.7	1 640.3	1 504.0	1 857.7	43.5	40.2	38.0	33.3

注:中国各省(市、区)氮氧化物排放量数据来源于中华人民共和国环境保护部 2011~2014 年度全国主要污染物总量减排考核公告

4 影响因素

4.1 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。国家统计局提供的中国生产总值数据统计发现(图 5),中国产业结构长期呈“二一三”结构,自 2012 年后,呈“三二一”的产业格局,2014 年第一、二、三产业比重分别

约为 9.2%、42.7%、48.1%。欧美发达国家和地区的产业结构大约保持在 1:2:7 的结构,中国与国际水平差距甚远,优化产业结构,降低高耗能、高污染的第二产业比重,是解决我国环境问题的根本。十年来,随着我国经济的快速发展,第二、三产业生产总值直线上升,尤其是第二产业的成倍上升,导致污染物成倍的排放,大气污染是必然的结果。我国富煤、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,据国家统计局数据显示 2013 年我国能源消费结构为煤炭 66.0%、石油 18.4%、天然气 5.8%、水电核电风电 9.8%。我国的煤炭资源质量不高,对环境明显不利,污染较大。表 3 给出了十年来我国能源消费的情况及结构:十年来我国煤炭消耗量剧增,2014 年我国煤炭消耗占世界总消耗量的 50.3%,是世界上最大的煤炭消费国。煤炭作为污染排放多的一种能源,给环境造成了很大的压力。随着工业的发展,工业生产总产值急剧上升,煤炭的消耗量在剧增,污染物排放量便增加了,这从统计数据中也得到很好的印证。将 2005~2014 年我国燃煤量与对流层 NO₂ 柱浓度年均值进行相关性分析,相关系数高达 0.91,这有力佐证了工业排放对对流层 NO₂ 柱浓度的贡献。

我国目前的产业结构决定了第二产业在我国经济中的重要地位,而第二产业是高能源消耗的产业,这决定了我国的能源消耗量是巨大的。我国能源结构现状决定了我国只能是以煤作为主要能源,而煤

炭的污染排放又是所有能源里边最高的,这直接决定了我国污染物排放水平,进而决定了大气环境质量。改善大气环境,降低大气中氮氧化物水平,降低对流层 NO₂ 浓度,优化我国以重工业为主的产业结构是根本,激励能源技术的进步,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,控制煤炭消费总量,从而实现能源结构的优化^[29]。

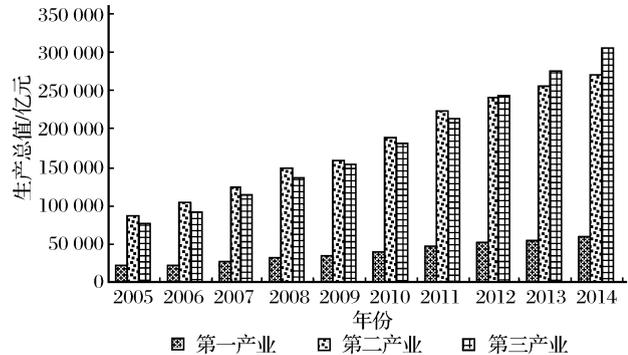


图 5 2005~2014 年中国各产业生产总值趋势图

Fig.5 Various industries statistics of China during 2005~2014

表 3 2005~2014 年中国能源消费总量及构成(单位:万吨标准煤)

Table 3 Coal consumption of China during 2005~2014 (Unit: ten thousand tons of standard coal)

指标	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
煤炭	189 231	207 402	225 795	229 237	240 666	249 568	271 704	275 465	280 999	281 160
石油	46 524	50 132	52 945	53 542	55 125	62 753	65 023	68 363	71 292	72 846
天然气	6 273	7 735	9 343	10 901	11 764	14 426	17 804	19 303	22 096	24 282
水电、核电、风电	19 341	21 199	23 358	26 931	28 571	33 901	32 512	39 007	42 525	47 712
消费总量	261 369	286 467	311 442	32 0611	336 126	360 648	387 043	402 138	416 913	426 000

4.2 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、一氧化碳和细微颗粒物,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发。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^[30]。

随着我国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,我国城市空气开始呈现出煤烟和机动车尾气复合污染的特点,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。据测算,未来五年我国还将新增机动车 1 亿辆以上,新增车用汽柴油消耗 1 亿至 1.5 亿 t,由此带来的大气环境压力巨大。不同车型、不同燃料、不同排放标准的车辆污染

物排放的贡献不同,从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)污染总量的主要贡献者,其中 2014 年全国机动车氮氧化物排放量为 627.8 万 t,其中汽车排放 578.9 万 t,占 92.2%。国家统计局数据显示(表 4):2005~2014 年我国汽车保有量由 3 088.04 万辆增加到 14 452.17 万辆,增加了 368%。其中,山东省增幅最大为 1 104.35 万辆,广东省增幅为 959.71 万辆,江苏省为 900.32 万辆。此外,我国汽车排放标准及油品远远落后于欧洲标准,其 NO_x 的排放浓度也远高于欧洲水平^[31-32]。将 2005~2014 年将我国汽车保有量与对流层 NO₂ 柱浓度年均值进行相关性分析,相关系数高达 0.77,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 4 2005~2014 年中国及部分省(市、区)汽车保有量(单位:万辆)

Table 4 Car ownership of China during 2005~2014 (Unit: ten thousand)

地区	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
山东	239.29	290.02	347.99	412.07	548.71	700.54	845.13	1020.77	1193.07	1 343.64
广东	366.28	421.37	496.36	563.57	653.62	776.83	905.27	1031.46	1171.28	1 325.99
江苏	187.98	235.63	289.48	341.57	431.81	545.28	668.98	795.56	937.32	1 088.30
浙江	199.41	244.21	296.74	347.31	428.12	538.12	652.58	769.1	897.36	1 007.55
河北	190.84	219.91	260.38	299.91	390.43	486.86	600.56	721.55	810.25	924.10
河南	148.05	173.17	203.54	239.56	313.02	395.65	496.55	577.1	695.62	915.71
四川	136.52	155.47	181.5	216.39	282.08	352.05	418.97	489.85	569.49	663.35
北京	206.04	235.25	269.19	309.15	363.74	445.13	465.65	488.56	511.85	525.83
辽宁	132.01	154.65	166.59	188.88	239.2	293.09	353.01	410.85	453.43	516.56
湖南	77.43	90.19	107.11	130.22	166.18	209.45	256.36	306.16	364.71	432.06
中国	3 088.04	3 605.91	4 250.01	4 964.98	6 213.69	7 721.68	9 266.35	10 837.74	12 572.38	14 452.17

4.3 农业秸秆焚烧排放

随着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量烟雾、烟尘、一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物等气态污染物,给环境空气造成很大污染^[33]。我国可耕地面积达 112 738.2 千 hm²,我国庞大的人口决定了农业的重要地位。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 5):2013 年夏季中国秸秆焚烧火点个数为 4 800 个,2014 年为 2 119,2015 年为 1 158 个。2015 年较 2014 年同比减少 961 个,减幅为 45.35%。河北、黑龙江、内蒙古、山西等 4 省份火点数较 2014 年同比有所增加,特别是黑龙江省增幅明显;其余 6 省份较 2014 年同比均有所减少,尤其是安徽、湖北、河南等 3 省火点数大幅减少^[34]。秸秆焚烧是中国对流层 NO₂ 浓度较高的一个重要人为源。

表 5 2013~2015 年夏季中国秸秆焚烧火点数、火点强度及增减幅度

Table 5 Straw burning fire, fire intensity and change of China during 2013~2015

地区	火点数/个			与 2014 年同期 相比/%	耕地面积 /10 ³ hm ²	火点强度 /个·10 ⁻³ hm ²
	2015 年夏季	2014 年夏季	2013 年夏季			
河南	512	815	1 322	-37.18	10 209.8	0.05
河北	196	106	202	84.91	6 332	0.031
山东	185	230	588	-19.57	7 440	0.025
黑龙江	33	1	30	3 200.00	11 696.4	0.003
安徽	32	644	1 773	-95.03	6 628.9	0.005
四川	29	34	42	-14.71	6 467.4	0.004
山西	28	25	19	12.00	3 286.4	0.009
陕西	23	31	17	-25.81	3 076.5	0.007
内蒙古	21	16	20	31.25	5 651	0.004
全国	1 158	2 119	4 800	-	112 738.2	0.01

5 结 语

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,有助于了解我国十一年来

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,详细分析了近十一年间中国对流层 NO₂ 柱浓度时空变化格局,在此基础上,从经济、机动车、秸秆焚烧及环保措施等多个方面分析了 NO₂ 变化的影响因素,结论如下:

(1) 近 11 年中国对流层 NO₂ 柱浓度时间变化特征为:2005 年浓度最低,2011 年最高。2005~2009 年浓度波动较小且缓慢升高,2010、2011 年升幅较大,2012 年较 2011 年有所下降,2013 年与 2012 年持平,2014、2015 年持续大幅下降。“十一五”规划对氮氧化物没有约束性规定,2010 年较 2005 年上升 31.0%;“十二五”规划的约束性减排指标为下降 10%,2015 年较 2010 年下降 17.4%。

(2) 近 11 年中国对流层 NO₂ 柱浓度空间变化特征为:对流层 NO₂ 柱浓度高值区主要分布在京津冀中南部、山东大部、河南北部、山西和陕西中部条带状区域、长三角中部及珠三角等地,此外湖北东部、四川中部、重庆西部、新疆北部、辽宁中部等地有小范围的高浓度区。我国 NO₂ 柱浓度较高等级面积 11 年来变化显著,五级高浓度分布面积 2005~2011 年呈显著上升趋势,2011 年面积最大为 37.2 万 km²,2011~2013 年波动较小,2014~2015 年呈直线下降趋势,2015 年降低到 6.1 万 km²;四级高浓度分布面积十年来波动较小;三级分布面积趋势与五级大致相似。

(3) 青海、西藏、新疆、甘肃、内蒙古、云南、海南、黑龙江、广西、四川、福建等 11 个省(区)对流层 NO₂ 柱浓度处于一级水平,其中青海一直是中国浓度最低的省;上海、天津两个城市对流层 NO₂ 柱浓度处于五级高浓度水平,山东、北京、香港、江苏、澳门、河北等省(市、区)处于四级高浓度水平,其中上海对流层 NO₂ 柱浓度近 11 年均值为 $1\ 857.7 \times 10^{13}$ mole/cm²,是中国浓度最高的城市,山东对流层 NO₂ 柱浓度近 11 年均值为 $1\ 310.6 \times 10^{13}$ mole/cm²,是中国浓度最高的省,与发达城市处于同一污染水平,其污染程度尤为严峻。

(4) 通过相关性分析、文献及国家政策印证等分析,发现 NO₂ 的变化与第二产业生产总值相关性很大,需要调整优化产业结构降低第二产业比重才能降低氮氧化物的排放量;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。

参考文献 (References):

[1] Hao Jiming, Cheng Zhen, Wang Shuxiao. Study on the Situation, Prevention and Control Measures of Air Pollution in China[J]. Environment Protection, 2012, (9): 17-20. [郝吉明,

程真,王书肖.我国大气环境污染现状及防治措施研究[J].环境保护,2012,(9):17-20.]

- [2] Zhang Qiang, Geng Guannan, Wang Siwen, *et al.* Satellite Remote Sensing of Changes in NO_x Emissions over China: 1996-2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(16): 1446-1453. [张强,耿冠楠,王斯文,等.卫星遥感观测中国 1996-2010 年氮氧化物排放变化[J].科学通报,2012,57(16):1446-1453.]
- [3] Wang Yueqi, Jiang Hong, Zhang Xiuying, *et al.* Temporal-spatial Distribution of Tropospheric NO₂ in China Using OMI Satellite Remote Sensing Data[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(8): 932-937. [王跃启,江洪,张秀英,等.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,2009,22(8):932-937.]
- [4] Chen Shanshan, Shu Jiong, Xu Jianzhong. Tropospheric NO₂ Pollution Analysis of Some Typical Cities in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(12): 1484-1490. [陈姗姗,束炯,徐建中.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,2010,19(12):1484-1490.]
- [5] Yao Ling, Lü Ning, Shi Huading. Study on Spatial-temporal Variations in Total NO₂ Column Amounts over China Using SCIAMACHY Data[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(4): 419-424. [姚凌,吕宁,师华定.利用 SCIAMACHY 遥感资料研究我国 NO₂ 柱浓度及其时空分布[J].环境科学研究,2012,25(4):419-424.]
- [6] Xiao Zhongyong, Jiang Hong, Cheng Miaomiao. Characteristics of Atmospheric NO₂ over China Using OMI Remote Sensing Data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(10): 2080-2090. [肖钟湧,江洪,程苗苗.利用 OMI 遥感数据研究中国区域大气 NO₂ [J].环境科学学报,2011,31(10):2080-2090.]
- [7] Wei Peng, Ren Zhenhai, Su Fuqing, *et al.* Seasonal Distribution and Cause Analysis of NO₂ in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(2): 155-161. [尉鹏,任阵海,苏福庆,等.中国 NO₂ 的季节分布及成因分析[J].环境科学研究,2011,24(2):155-161.]
- [8] Wei Peng, Wang Wenjie, Wu Hao, *et al.* Analysis of Monthly Variability and Polluting Sources of NO₂ in China based on Satellite Remote Sensing[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3(4): 331-336. [尉鹏,王文杰,吴昊,等.基于卫星遥感的中国 NO₂ 月际演变及污染源分析[J].环境工程技术学报,2013,3(4):331-336.]
- [9] Zhang Xingying, Zhang Peng, Zhang Yan, *et al.* The Trend, Seasonal Cycle, and Sources of Tropospheric NO₂ over China during 1997~2006 based on Satellite Measurement[J]. Science in China Series D, 2007, 37(10): 1409-1416. [张兴赢,张鹏,张艳,等.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[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(10):1409-1416.]
- [10] Li Long, Shi Runhe, Chen Yuanyuan, *et al.* Spatio-temporal Characteristics of NO₂ in China and the Anthropogenic Influences Analysis based on OMI Data[J]. Journal of Geo-Infor-

- mation Science, 2013, 15(5): 688-694. [李龙, 施润和, 陈圆圆, 等. 基于 OMI 数据的中国 NO₂ 时空分布与人类影响分析[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5): 688-694.]
- [11] Gao Jinhui, Zhu Bin, Wang Yanzhe, *et al.* Distribution and Long-term Variation of Tropospheric NO₂ over China during 2005 to 2013[J]. China Environmental Science, 2015, 35(8): 2307-2318. [高晋徽, 朱彬, 王言哲, 等. 2005~2013 年中国地区对流层二氧化氮分布及变化趋势[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2307-2318.]
- [12] Yan Huanhuan, Zhang Xingying, Wang Weihe. Spatio-temporal Variations of NO₂ and SO₂ over Global Region and China by OMI Observations during 2004-2014[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(17): 41-51. [闫欢欢, 张兴赢, 王维和. 卫星遥感监测全球和中国区域污染气体 NO₂ 和 SO₂ 时空变化[J]. 科技导报, 2015, 33(17): 41-51.]
- [13] Nickolay A K, Chris A M, Can L, *et al.* Aura OMI Observations of Regional SO₂ and NO₂ Pollution Changes from 2005 to 2015[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16: 4605-4629.
- [14] Jiang Wenhua, Ma Jianzhong, Yan Peng, *et al.* Characterization of NO₂ Pollution Changes in Beijing Using GOME Satellite Data[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(1): 67-72. [江文华, 马建中, 颜鹏, 等. 利用 GOME 卫星资料分析北京大气 NO₂ 污染变化[J]. 应用气象学报, 2006, 17(1): 67-72.]
- [15] Li Lingjun, Wang Ying. The Characterization of NO₂ Pollution in Beijing based on Satellite and Conventional Observation Data[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(12): 2762-2768. [李令军, 王英. 基于卫星遥感与地面监测分析北京大气 NO₂ 污染特征[J]. 环境科学学报, 2011, 31(12): 2762-2768.]
- [16] Xin Mingwei. Study on Spatial and Temporal Change of Tropospheric NO₂ Vertical Column Densities in Hebei Province Using OMI Remote Sensing Data[D]. Shijiazhang: Hebei Normal University, 2013. [辛名威. 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[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2013.]
- [17] Zhou Chunyan, Li Qing, He Yingxia, *et al.* Spatial-temporal Change of Tropospheric NO₂ Column Density and Its Impact Factors over Shandong Province during 2005~2014[J]. China Environmental Science, 2015, 35(8): 2281-2290. [周春艳, 厉青, 何颖霞, 等. 山东省近 10 年对流层 NO₂ 柱浓度时空变化及影响因素[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2281-2290.]
- [18] Wang Ying, Li Lingjun, Liu Yang. Characteristics of Atmospheric NO₂ in the China and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations[J]. Environmental Science, 2012, 33(11): 3685-3692. [王英, 李令军, 刘阳. 中国与长三角区域大气 NO₂ 污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3685-3692.]
- [19] Zheng Xiaoxia, Li Linjun, Zhao Wenji, *et al.* Spatial and Temporal Characteristics of Atmospheric NO₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(12): 1938-1945. [郑晓霞, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀地区大气 NO₂ 污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1938-1945.]
- [20] Zhou Chunyan, Li Qing, Wang Zhongting, *et al.* Spatio-temporal Trend and Changing Factors of Tropospheric NO₂ Column Density in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2005 to 2014[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(3): 468-480. [周春艳, 厉青, 王中挺, 等. 2005~2014 年京津冀对流层 NO₂ 柱浓度时空变化及影响因素[J]. 遥感学报, 2016, 20(3): 468-480.]
- [21] Zhou Chunyan, Wang Qiao, Li Qing, *et al.* Spatio-temporal Change and Influencing Factors of Tropospheric NO₂ Column Density of Yangtze River Delta in the Decade[J]. China Environmental Science, 2016, (7): 1921-1930. [周春艳, 王桥, 厉青, 等. 近 10 年长江三角洲对流层 NO₂ 柱浓度时空变化及影响因素[J]. 中国环境科学, 2016, (7): 1921-1930.]
- [22] Zhou Chunyan, Gao Yanhua, Chen Hui, *et al.* Spatio-temporal Change and Comparison of Tropospheric NO₂ Column Density over the Three Urban Agglomerations during the Period of "Twelfth Five-year"[J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(3): 65-69. [周春艳, 高彦华, 陈辉, 等. "十二五"期间三大城市群对流层 NO₂ 柱浓度时空变化及对比[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(3): 65-69.]
- [23] Wenig M O, Cede A M, Bucsela E J, *et al.* Validation of OMI Tropospheric NO₂ Column Densities Using Direct-sun Mode Brewer Measurements at NASA Goddard Space Flight Center[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113. doi: 10.1029/2007JD008988.
- [24] Boersma K F, Jacob D J, Trainic M, *et al.* Validation of Urban NO₂ Concentrations and Their Diurnal and Seasonal Variations Observed from Space (SCIAMACHY and OMI Sensors) Using in Situ Measurements in Israeli Cities[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9: 3867-3879.
- [25] 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: 1547-1567.
- [26] Burrows J P, Mark W, Michael B, *et al.* The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission Concept and First Scientific Results[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56: 151-175.
- [27] Platt U, Perner D, Paetz H. Simultaneous Measurement of Atmospheric CH₂O, O₃ and NO₂ by Differential Optical Absorption[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(10): 6329-6335.
- [28] Tao Jinhua, Wang Zifeng, Han Dong, *et al.* Analysis of Crop Residue Burning and Tropospheric NO₂ Vertical Column Density Retrieved from Satellite Remote Sensing in North China[J]. China Environmental Science, 2009, 29(10): 1016-1020. [陶金花, 王子峰, 韩冬, 等. 华北地区秸秆焚烧前后的 NO₂ 卫星遥感监测分析[J]. 中国环境科学, 2009, 29(10): 1016-1020.]
- [29] Zou Xuan. The Optimizing of Energy Structure and Economic

- Growth[J]. *Inquiry into Economic Issues*, 2010, (7): 33-39. [邹璇. 能源结构优化与经济增长[J]. *经济问题探索*, 2010, (7): 33-39.]
- [30] Wang Lili. Analysis of Influence of Exhaust Gas Discharged by Motor Vehicle on Atmospheric Environment and Research on Control of Exhaust Gas Discharged by Motor Vehicle in Lanzhou[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013. [王莉莉. 兰州市机动车尾气排放对大气环境影响分析及对策研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.]
- [31] The State Council. The Air Pollution Control Action Plan [EB/OL]. (2013-9-10) [2016-02-22]. http://www.gov.cn/zwgk/2013-09/12/content_2486773.htm. [国务院. 大气污染防治行动计划[EB/OL]. (2013-9-10) [2016-02-22]. http://www.gov.cn/zwgk/2013-09/12/content_2486773.htm.]
- [32] DIESELNET. European Union Emission Regulations [EB/OL]. DieselNet, 2015 [2015-11-16]. <http://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>.
- [33] Zhang Hefeng. A Laboratory Study on Emission Characteristics of Gaseous and Particulate Pollutants Emitted from Agricultural Crop Residue Burning in China[D]. Shanghai: Fudan University, 2009. [张鹤丰. 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[D]. 上海: 复旦大学, 2009.]
- [34] General Office of Ministry of Environmental Protection. Notification about the Stalk Burning Working Condition in Summer of 2015[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2015. [环境保护部办公厅. 关于 2015 年夏季秸秆焚烧污染防治工作情况的通报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2015.]

Spatio-temporal Change and Influencing Factors of Tropospheric NO₂ Column Density of China during 2005~2015

Zhou Chunyan, Li Qing, Zhang Lijuan, Ma Pengfei, Chen Hui, Wang Zhongting

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

Abstract: Based on satellite derived NO₂ column data from OMI, the characteristics of spatial and temporal distribution of tropospheric NO₂ column density and its impact factors over China during 2005~2015 is analysed. Results demonstrate: ① Tropospheric NO₂ column density had a small fluctuation during 2005-2009, and had a larger increase during 2010~2011, and declined in 2012, and had a sharp drop during 2014~2015. ② The area of the high tropospheric NO₂ column density changed significantly during 2005~2015, the area of the highest level had been on the rise during 2005-2011, and reached a peak with 37.2 million square kilometres in 2011, and kept stable during 2011~2013, and dropped sharply during 2014~2015, and shrunk to 6.1 million square kilometres in 2015. ③ Tropospheric NO₂ column density over Shanghai and Tianjin was highest and in the fifth level. Shanghai is the city with the highest NO₂ concentration of China, and Shandong is the province with the highest concentration of China. ④ Pollution sources are determined by the industrial and energy structure to a large extent. Atmospheric environment should be improved by optimizing industrial structure to reduce the proportion of secondary industry. It is an important reason for high NO₂ concentration that is long-term dependence on the energy structure of coal high pollution, and is urgent to develop new energy to replace coal fuel. Other reasons for NO₂ emissions increase are the rapid increase of the number of vehicles, and vehicle standards and oil dropping behind the international development level.

Key words: Tropospheric NO₂ column density; OMI; Satellite remote sensing monitoring; Spatial-temporal change; Impact factors