

近10年长江三角洲对流层NO₂柱浓度时空变化及影响因素

周春艳,王 桥*,厉 青,刘思含,陈 辉,马鹏飞,王中挺,檀 畅 (环境保护部卫星环境应用中心,北京100094)

摘要: 利用臭氧监测仪(OMI)卫星遥感数据,分析了2005~2014 10年间长江三角洲对流层NO₂柱浓度时空变化格局,从地形、气象、经济、农业、生活、国家重大环保措施及规划等多个方面分析了NO₂变化的影响因素,结果表明:(1)长江三角洲对流层NO₂柱浓度十年年均增长率为1.04%,2011年最高,为 1184.07×10^{13} mole/cm².2010年较2005年上升20.75%;2014年较2010年下降9.10%;(2)长江三角洲对流层NO₂柱浓度呈中间高、北部次之、南部低的趋势.长江三角洲中部的上海、苏州、无锡、常州、镇江和南京等城市为中心的条带状区域是四、五级高浓度中心,浙江大部份一直处于一、二级较低浓度水平;(3)长江三角洲夏季降水量大,与NO₂浓度负相关系数高达0.84,对NO₂具有湿沉降的作用.长江三角洲北风的主导风向及北平南高的地势特点决定了其中部高污染区对浙江中南部影响较小;(4)对流层NO₂浓度与第二产业产值相关系数高达0.83,与汽车保有量相关系数为0.74.对流层NO₂浓度与煤炭消费量及汽车保有量紧密相关,此外,农业秸秆焚烧也释放大量的氮氧化物.“十二五”期间实施的燃煤量控制和脱硝等一系列氮氧化物排放控制措施等使得2012~2014年NO₂浓度降低.

关键词: 对流层NO₂; 臭氧监测仪(OMI); 遥感监测; 时空变化; 影响因素; 长江三角洲

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2016)07-1921-10

Spatio-temporal change and influencing factors of tropospheric NO₂ column density of Yangtze River Delta in the decade. ZHOU Chun-yan, WANG Qiao*, LI Qing, LIU Si-han, CHEN Hui, MA Peng-fei, WANG Zhong-ting, Tan Chang (Satellite Environmental Center, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Beijing 100094, China). *China Environmental Science*, 2016,36(7): 1921~1930

Abstract: The characteristics of spatial and temporal distribution of tropospheric NO₂ column density over Yangtze River Delta for 2005~2014 were analysed based on satellite derived NO₂ column data from OMI. On this basis, influencing factors of NO₂ changes were analysed from terrain, meteorology, economy, agriculture, life, national major environmental planning, and other aspects. Results demonstrate: a) Tropospheric NO₂ column density increased at the annual rate of 1.04%, with the highest column density 1184.07×10^{13} mole/cm² in 2011; it raised 20.7% compared with 2005 in 2010 and declined 9.1% compared with 2010 in 2014; b) The spatial distribution of tropospheric NO₂ column density had significant change, high in the middle, low in northern and lower in southern of Yangtze River Delta. c) Precipitation had a highly negative correlation with NO₂ concentrations for the reason of atmospheric wet deposition. The terrain of Yangtze River delta weakened the unfavorable impact of the high polluted area under the effect of the dominant north wind. d) Tropospheric NO₂ concentration had a correlation coefficient of 0.83 with the second industry output value, and a correlation coefficient of 0.74 with car ownership. Tropospheric NO₂ concentration was closely related to coal consumption and car ownership; in addition, the agricultural straw burning also released a large amount of nitrogen oxides. Series of NO_x emission control measures such as controlling amount of coal and denitration applied during the "twelfth five-year" lowered the NO₂ concentration in 2012~2014.

Key words: tropospheric NO₂ column density; ozone monitoring instrument (OMI); satellite remote sensing monitoring; spatial-temporal change; impact factors; Yangtze River Delta

对流层是各层大气中与人类活动联系最为密切的一层.对流层大气最显著的特点是化学性质活泼,而NO_x-有机物体系是造成对流层大气这种活泼氧化性的主要原因^[1].NO_x与氨、水分和其它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

收稿日期: 2015-11-30

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(05-Y20A16-9001-15/17);国家高技术研究发展计划(863计划)(2014AA06A508)

* 责任作者, 研究员, wangqiao@mep.gov.cn

臭氧可以引起或加重呼吸系统疾病,降低肺功能。此外,NO_x 会引起多种环境问题,如酸雨、灰霾、光化学污染和水体富营养化等。

长江三角洲是我国经济最具活力的地区,随着人口数量持续增长,工业化、城镇化快速推进,能源消费总量不断上升,大量排放的NO_x 远远超过环境承载能力,成为影响我国经济发展的重要制约因素。在当前这样的社会现实下,大气环境的监测及治理工作得到前所未有的重视。目前,我国科研人员利用国外多种卫星数据分析区域NO₂ 的时空格局已有一些工作:分析了我国氮氧化物排放的时空格局变化^[2],从不同自然地理分区、典型重点城市及地级市等多个角度^[3-6]对我国NO₂ 柱浓度的时空分布和变化趋势进行分析,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^[7-8]。典型区域的研究工作较少,针对三大城市群的NO₂ 污染特征进行了探讨^[9-12]。长江三角洲城市群在我国经济发展及文化建设方面具有重要的战略地位,但针对长江三角洲城市群NO₂ 污染物的分布、变化特征、传输规律及影响因素等的研究工作较少,与环保措施结合分析的工作亟需开展。该文采用对流层NO₂ 柱浓度、地形、气象、秸秆焚烧火点个数及多种统计数据,并与国家实施的环保措施及规划结合,分析了长江三角洲城市群近10年的对流层NO₂ 柱浓度的时空格局变化,及环境变化背后的自然及人为影响因素。

1 研究区与数据

1.1 研究区介绍

长江三角洲城市群位于中国大陆东部沿海,是长江入海之前形成的冲积平原。根据国务院2010年批准的《长江三角洲地区区域规划》,长江三角洲包括上海市、江苏省和浙江省,共辖1个直辖市和24个地级市,区域面积21.07万km²,占国土总面积的2.2%。人口密度大,国家统计局2013年统计显示常住人口达15852万人,约占全国常住人口总数的11.7%。长江三角洲是中国对外开放的最大地区,该地区工业基础雄厚、商品经济发达,水陆交通方便,是中国最大的外贸出口

基地,2013年生产总值约占全国的18.8%。

1.2 数据及方法

该文所用NO₂ 数据为2005~2014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^[13]发布,空间分辨率为0.125°×0.125°。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,轨道扫描幅宽为2600km,天底空间分辨率是13km×24km,一天覆盖全球一次,有3个通道,波长覆盖范围为270~500nm^[14]。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4月20日,长江三角洲城市群共有128个地面站点,其中上海10个、江苏71个、浙江47个。遥感技术大尺度宏观性的特点,能够弥补地面监测手段空间上的局限,有力地服务于区域联防联控政策。

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)^[15]。该算法利用425~450nm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^[16]。

长江三角洲城市群的人口、面积、地区生产总值、煤炭消耗量和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/>)及上海市、江苏省和浙江省统计局,风速、风向、降水量等气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.gov.cn/>)。

2 结果与分析

为了分析长江三角洲城市群及其直辖市和

地级市的NO₂年、季、月时空分布及变化情况,该文对2005~2014年对流层NO₂垂直柱浓度进行了如下分级:一级(<500)、二级(500~1000)、三级(1000~1500)、四级(1500~2000)和五级(>2000),单位为10¹³mole/cm².

2.1 长江三角洲对流层NO₂柱浓度的年变化

由长江三角洲对流层NO₂柱浓度10年年均变化(图1)可知:对流层NO₂柱浓度波动较大,10年柱浓度年均增长率为1.04%.2006年浓度最低,为839.98×10¹³mole/cm²;2011年最高,为1184.07×10¹³mole/cm².纵观10年来NO₂的变化,波动较小,2011年NO₂呈显著升高趋势,2014年下降显著.“十一五”规划对氮氧化物没有约束性规定,2010年较2005年上升20.75%;“十二五”规划的约束性减排指标为下降10%,2014年较2010年已下降9.10%.

由长江三角洲各省(市)对流层NO₂柱浓度及氮氧化物排放量变化(表2)可知:长江三角洲城市群中江苏省氮氧化物排放量最高,浙江其次,上海最低;对流层NO₂柱浓度上海最高,江苏次之,浙江最低.对流层NO₂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;对流层NO₂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NO₂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,其中也有个别年份有较大差异,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;2011~2014年对流层NO₂柱浓度年均值与氮氧化物排放量具有很好相关性,浙江为0.89,上海为0.81,江苏为0.75,长江三角洲城市群为0.86.

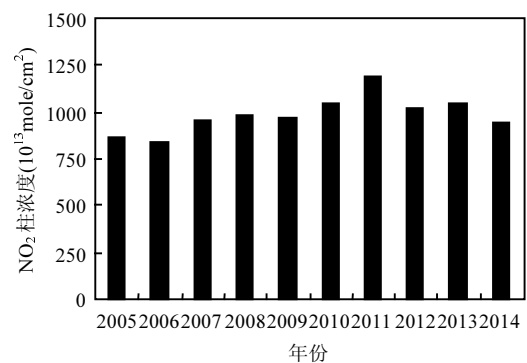


图1 2005~2014年长江三角洲NO₂柱浓度年均值变化趋势

Fig.1 Annual average NO₂ column density change of Yangtze River Delta during 2005~2014

表1 长江三角洲各省(市)对流层NO₂柱浓度及氮氧化物排放量变化^[17-19]

Table 1 The change of annual column NO₂ density and NO_x emissions statistics for each cities of Yangtze River Delta^[17-19]

地区	对流层NO ₂ 柱浓度(10 ¹³ mole/cm ²)										氮氧化物排放量(万t)			
	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2011年	2012年	2013年	2014年
江苏	1050.9	1036.8	1191.9	1285.7	1243.9	1345.8	1477.4	1299	1371.6	1211	153.6	148	133.8	123.3
浙江	608.8	573.9	646.1	603.9	623.8	670.9	841	697.3	658.3	635.8	85.9	80.9	75.3	68.8
上海	1836.9	1833	1922.5	2116.9	1991.7	2011.8	1910.1	1775.6	1891.7	1640.3	43.5	40.2	38	33.3
长江三角洲	862.87	838.98	951.88	984.14	969.26	1041.88	1184.07	1024.13	1044.86	947.09	283	269.1	247.1	225.4

由长江三角洲对流层NO₂柱浓度10年时空变化(图2)可知:长江三角洲NO₂分布呈中间高、北部次之、南部低的趋势.长江三角洲中部的上海、苏州、无锡、常州、镇江和南京等城市为中心的条带状区域是四、五级高浓度中心,与王艳^[20]研究中所示的2004年长江三角洲电厂装机容量空间分布具有较高的一致性;浙江大部份地区一直处于一、二级较低浓度水平;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上海、苏州、无锡、常州北部及南京小范围的区域;2006~2011年高浓度区范围不断扩大且值逐渐升高,上海、苏州、无锡、常州、镇江、南京、嘉兴等连接成片,北部徐州也处于高浓度状态下;2012~2013年高浓度范围缩小且值降低;2014年高浓度区范围进一步缩小,且浓度值有降低趋势.

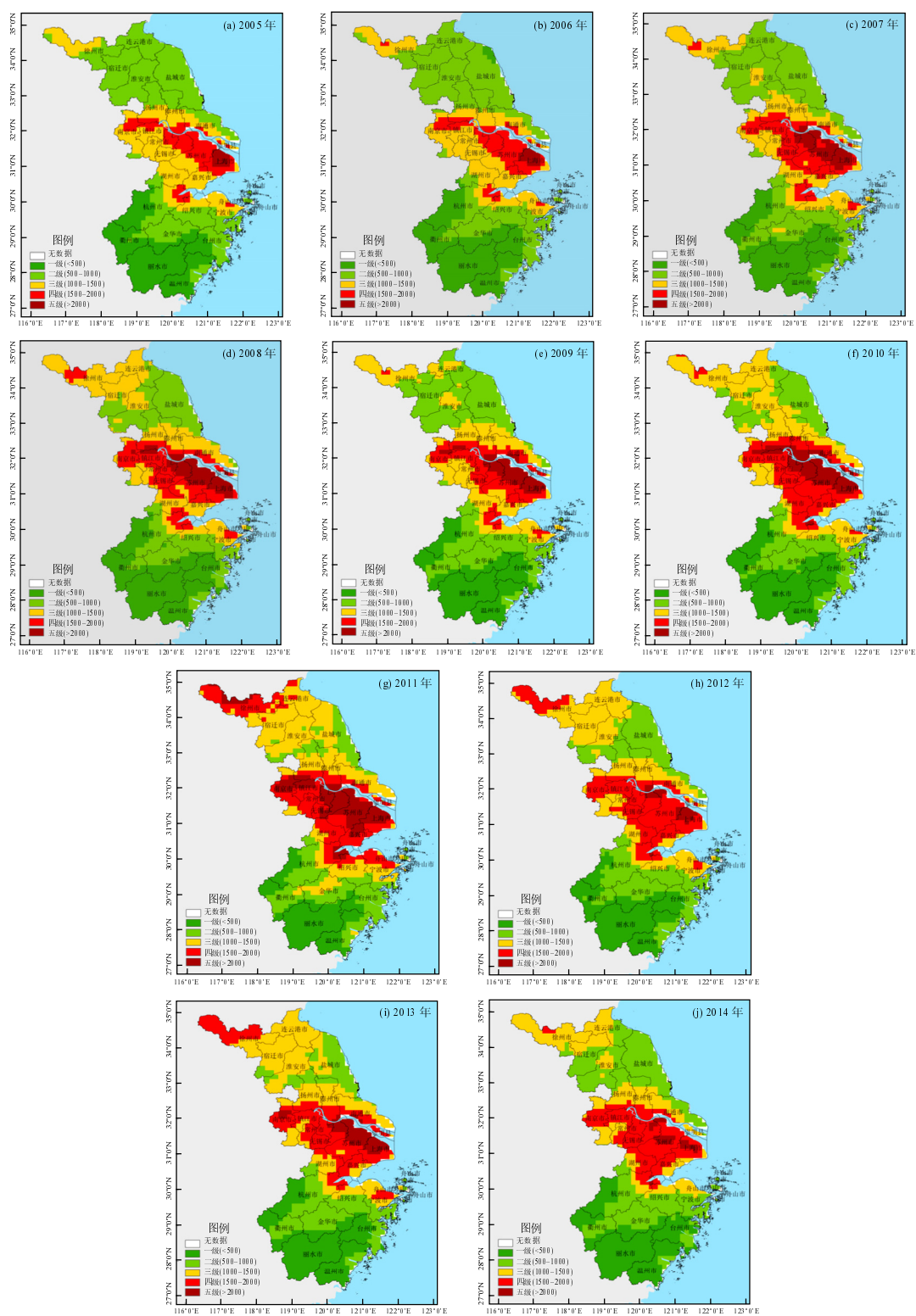


图2 2005~2014年长江三角洲对流层NO₂柱浓度($\times 10^{13}$ mole/cm²)年均变化

Fig.2 Annual average NO₂ column density ($\times 10^{13}$ mole/cm²) distribution during 2005~2014 of Yangtze River Delta

2.2 长江三角洲对流层NO₂柱浓度的季变化

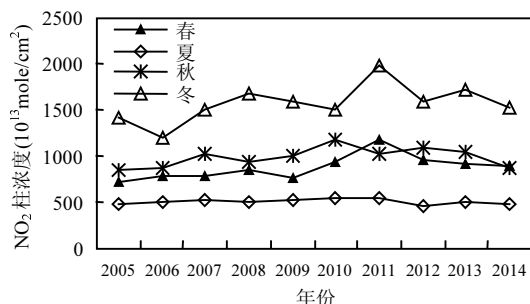


图3 2005~2014年长江三角洲对流层NO₂季节变化特征
Fig.3 Seasonal average NO₂ density change of Yangtze River Delta during 2005~2014

图3给出了长江三角洲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浓度水平基本为:冬季>秋季>春季>夏季.冬季NO₂浓度波

动剧烈,2006年下降显著,2011年达到峰值.秋季波动较小;春季稍有波动,2011年上升显著达到峰值;夏季浓度较低且平稳.

2.3 长江三角洲对流层NO₂柱浓度的月变化

图4给出了2005~2014年长江三角洲的对流层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,每个周期出现一个大波峰和一个小波谷.一年中NO₂最低值一般出现在夏季的7、8月,2012年7月达到最小值为 $398.77 \times 10^{13} \text{ mole/cm}^2$;最高值一般出现在1、11、12月,2011年12月达到最大值为 $2452.96 \times 10^{13} \text{ mole/cm}^2$.2008年12月浓度为10年来同期最低值,为 $1513.33 \times 10^{13} \text{ mole/cm}^2$,这种突变与长江三角洲为迎接奥运盛事实施的治理及减排措施有关.每年2、3月份出现小波峰和小波谷,这种变化与中国农历新年期间工厂停工排放减少有关.

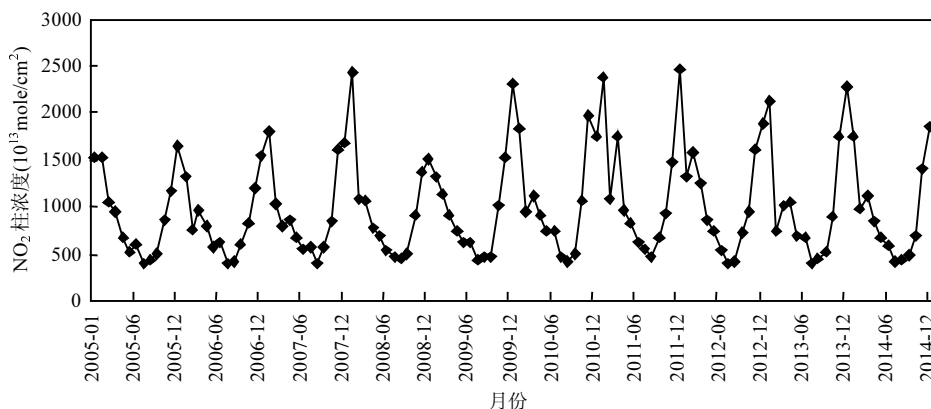


图4 2005~2014年长江三角洲NO₂柱浓度月均值变化趋势
Fig.4 Monthly average NO₂ column density change of Yangtze River Delta during 2005~2014

3 影响因素分析

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^[21].从自然和人为等4个方面分析长江三角洲对流层NO₂垂直柱浓度的污染成因.

3.1 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,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.该文主要从风向和降水两个方面进行探讨.

3.1.1 风向 风向是影响对流层大气NO₂扩散的气象因子,主导着大气NO₂扩散的方向.根据中国气象数据网所提供的《中国地面气候资料月值数据集》长江三角洲32个站点(上海1个、江苏13个、浙江18个)十年累计月风向频次数据(图5)可知,长江三角洲春季西北、北、东北北、东

东北等风向频次较高,南向风频次较低;夏季主导风向为东东北向,其他风向频次差不多;秋季主导北东北方向,北向其他风向频次也较高,南向风几乎没有;冬季主导西北风,其他北向风频次也较高,南向风几乎没有。

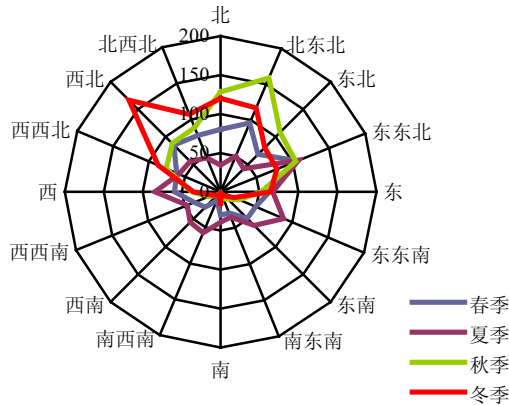


图5 2005~2014年长江三角洲四季风向频率
Fig.5 2005~2014 frequency diagram of wind direction for seasons of Yangtze River Delta

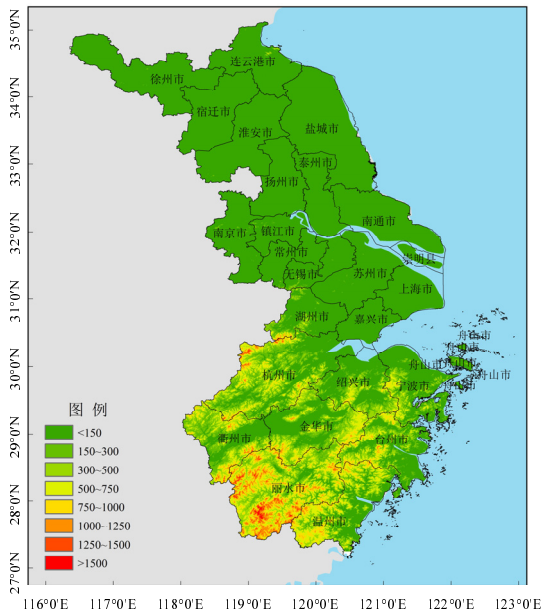


图6 长江三角洲城市群高程(m)
Fig.6 DEM of Yangtze River Delta (m)

长江三角洲城市群中北部是平原,海拔处于150m以下;南部的浙江山地和丘陵约占70.4%,

海拔较高,丽水市有高海拔山脉(图6)。长江三角洲的地形及风向条件决定了其污染扩散情况:浙江高海拔的地形条件减弱了长江三角洲中部高污染区在主导北向风作用下向南部的扩散;而长江三角洲北部徐州高污染区在主导北向风作用下影响了下游宿迁、淮安、连云港等市。

3.1.2 降水 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^[22-24]。根据中国气象数据网所提供的《中国地面气候资料月值数据集》长江三角洲32个站点(上海1个、江苏13个、浙江18个)10年累计月降水量(图7)可知:长江三角洲四季降水量分布相对均衡,夏季高温多雨,降水量约占全年的43%;春季约占24%;冬季约占13%;秋季约占20%。统计分析了2005~2014年长江三角洲月降水量与月对流层NO₂柱浓度的相关性,发现两者的负相关系数高达0.84。

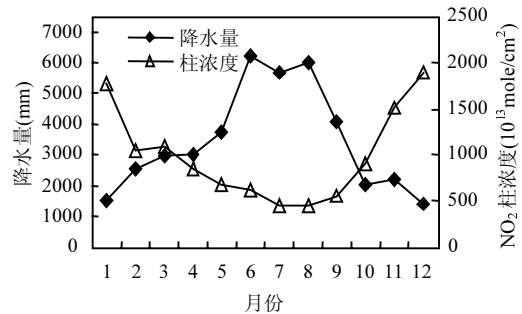


图7 2005~2014年长江三角洲累计月降水量与NO₂柱浓度变化

Fig.7 The changes of monthly precipitation and column NO₂ density of Yangtze River Delta during 2005~2014

3.2 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,也决定了污染源及治理的方向。国家统计局所提供的长江三角洲生产总值数据统计表明:2005~2013年上海市一直呈“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;江苏和浙江两省产业结构类似,同为“二二一”结构,十年来第二产业比重逐渐降低,第三产业比重逐渐升高,第一产业占有一定比重,2013年3个地市的三次产业结构如图

8 所示.我国能源结构的特点是富煤、贫油、少气,分别占 91%、5%和 4%.这种能源结构特点决定了能源生产以煤为主的格局.三次产业中,第一和第三产业消耗能源、资源较少,对环境的影响相对较小;第二产业能源消耗能力强,同时大量的资源废弃物也在工业生产过程中产生,对环境污染影响最重.煤炭消耗主要来源于第二产业,据统计两者有高达 0.99 的相关性.

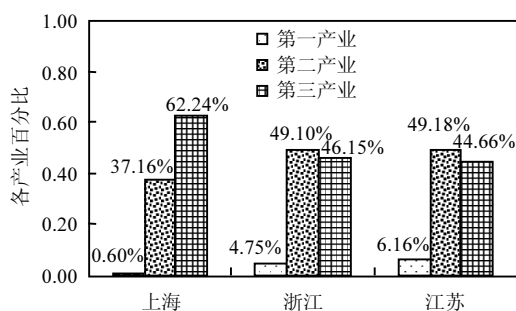


图 8 2013 年长江三角洲城市群三次产业百分比

Fig.8 Various industries statistics of Yangtze River Delta in 2013

随着近十年长江三角洲经济飞速发展,产业总值翻翻约 1.8 倍,江苏省的产业总值远远高于上海和浙江,约占长江三角洲总值的一半,增幅约为 2.2 倍(图 9).在这样的经济增长的形势下,能源结构又比较单一,以燃煤为主.我国的煤炭资源质量不高,对环境明显不利,污染较大^[25].表 2 所示:2012 年,长江三角洲地区煤炭消耗量约占全国消耗总量的 10.9%;江苏省是全国排名第五燃煤大省,消耗了长江三角洲总量的 58%;浙江省约为 30%.长期依赖高能耗、高污染、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,导致江苏和浙江两省燃煤量十年来逐年升高.随着长江三角洲第二产业增值飙升,NO₂ 浓度也基本呈直线上升,但这种趋势自 2011 年后发生了改变(图 10).这是因为“十一五”规划没有对氮氧化物提出约束性要求,而“十二五”规划主要指标中提出氮氧化物排放总量 2015 年比 2010 年降低 10%,并提出了强有力的措施.2011 年 NO₂ 浓度剧增,是因为作为“十二五”的开局之年,工业企业处于松懈状态,2011 年煤炭消费总量剧增;脱硝工程刚刚上马,脱硝电价政策未出台,运行脱硝设施的技术人员短缺,效益还没有发挥^[26].2012~2014 年,电力行业脱硫脱硝、钢铁烧结机脱硫脱硝、水泥行业与工业锅炉脱硝等大气污染物减排工程相继开展,对 NO₂ 减排效果明显^[26-27].将 2005~2013 年长江三角洲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 0.83,这有力佐证了工业排放对对流层 NO₂ 柱浓度的贡献.

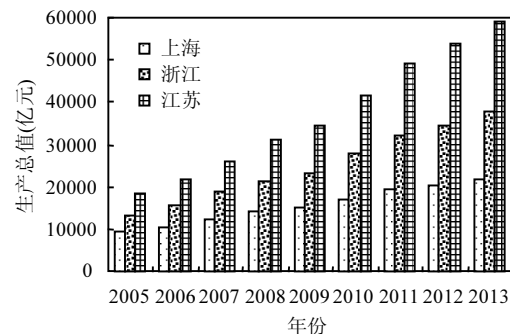


图 9 2005~2013 年长江三角洲地区生产总值趋势

Fig.9 GDP of Yangtze River Delta during 2005~2013

表 2 2004~2012 年长江三角洲煤炭消耗量(万 t)

Table 2 Coal consumption of Yangtze River Delta during 2004~2012 ($\times 10^4$ t)

地区	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年
上海	5144.32	5324.52	5143.09	5259.53	5463.91	5305.17	5875.52	6142.00	5703.00
浙江	8361.83	9680.80	11334.43	13024.12	13040.94	13276.16	13949.86	14776.00	14374.00
江苏	13272.08	16778.57	18427.68	19951.80	20736.71	21003.02	23100.48	27364.00	27762.00
长江三角洲	26778.23	31783.89	34905.20	38235.45	39241.56	39584.35	42925.86	48282.00	47839.00
全国	224926.02	263864.85	291869.73	319156.12	334806.44	351182.33	381413.30	429000.00	436454.00

3.3 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^[28-30],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^[31].

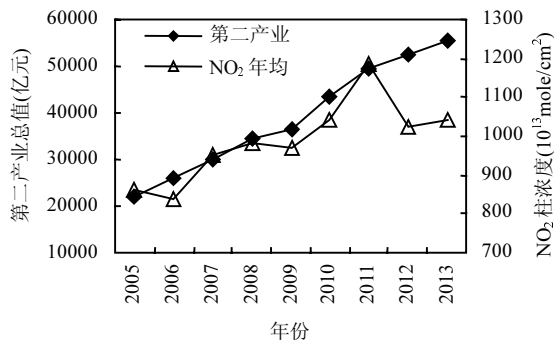


图10 2005~2013年长江三角洲第二产业总值与二氧化氮浓度变化关系

Fig.10 The changes of the secondary industry annual gross and column NO₂ density of Yangtze River Delta during 2005~2013

随着长江三角洲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t,其中汽车排放占91.1%.国家统计局数据显示(表3):2005~2013年长江三角洲地区汽车保有量由482.55万辆增长到2062.81万辆,保有量增长了327.5%.其中,江苏增幅最大为749.34,浙江增幅为697.95万辆,上海为132.97万辆.其中,2009~2011年是长江三角洲地区汽车保有量增加最快的几年.此外,长江三角洲汽车排放标准及油品远远落后于欧洲标准,NO_x的排放浓度也远高于欧洲水平^[32-34].将2005~2013年长江三角洲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0.74,这说明了机动车污染物排放是对流层NO₂的重要来源.

表3 2005~2013年长江三角洲汽车保有量(万辆)

Table 3 Car ownership of Yangtze River Delta during 2005~2013 (×10⁴t)

地区	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
上海	95.16	107.04	119.70	132.12	147.10	170.05	188.74	206.44	228.13
浙江	199.41	244.21	296.74	347.31	428.12	538.12	652.58	769.10	897.36
江苏	187.98	235.63	289.48	341.57	431.81	545.28	668.98	795.56	937.32
长江三角洲	482.55	586.88	705.92	821.00	1007.03	1253.45	1510.30	1771.10	2062.81

3.4 农业秸秆焚烧排放

表4 2013~2014年长江三角洲秸秆焚烧火点数、火点强度及增减幅度^[35]

Table 4 Straw burning fire、fire intensity and change of Yangtze River Delta during 2013~2014^[35]

地区	火点数(个)		与2013年同期相比 (%)	耕地面积 (km ²)	火点强度 (个/km ²)
	2014年夏季	2013年夏季			
	上海	0			
浙江	7	29	-75.86	1920.9	0.004
江苏	53	474	-88.82	4763.8	0.011
长江三角洲	60	505	-88.12	6928.7	0.005
全国	2119	4800	-55.85	121354.3	0.017

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和取暖的燃料.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^[36].长江三角洲地区中,江苏省农业比重较大,是全国粮油集中产区之一,可耕地面积达4763.8km²,居全国第四位.浙江地貌结构为“七山一水二分田”,耕地面积仅有1920.9 km².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:2013年长江三角

洲秸秆焚烧火点个数为505个,主要出现在江苏,为474个;2014年为60个,江苏出现53个。长江三角洲地区火点个数2014年较2013年同期减幅为88.12%(表4)。秸秆焚烧是长江三角洲对流层NO₂的一个重要人为源,秸秆禁烧工作力度加大是2014年NO₂柱浓度降低的一个重要因素。

4 结论

4.1 近10年长江三角洲对流层NO₂柱浓度时间变化特征为:10年柱浓度年均增长率为1.04%。2006年浓度最低,为 $839.98 \times 10^{13} \text{ mole/cm}^2$;2011年最高,为 $1184.07 \times 10^{13} \text{ mole/cm}^2$ 。十年来NO₂柱浓度的波动较小,2011年NO₂显著升高,2014年显著下降。“十一五”规划对氮氧化物没有约束性规定,2010年较2005年上升20.75%;“十二五”规划的约束性减排指标为下降10%,2014年较2010年下降9.10%。

4.2 近10年长江三角洲对流层NO₂柱浓度空间变化特征为:呈中间高、北部次之、南部低的趋势。长江三角洲中部的上海、苏州、无锡、常州、镇江和南京等城市为中心的条带状区域是四、五级高浓度中心,浙江大部份一直处于一、二级较低浓度水平。2005年NO₂高浓度分布范围较小且集中在上海、苏州、无锡、常州北部及南京小范围的区域;2006~2011年高浓度区范围不断扩大且值逐渐升高,上海、苏州、无锡、常州、镇江、南京、嘉兴等连接成片,北部徐州也处于高浓度状态下;2012~2013年高浓度范围缩小且值降低;2014年高浓度区范围进一步缩小,且浓度值有降低趋势。

4.3 长江三角洲夏季降水量大,与NO₂浓度负相关系数高达0.84,其湿沉降对NO₂的浓度降低作用显著。长江三角洲北风的主导风向及北平南高的地势特点决定了其中部高污染区对浙江中南部影响较小。

4.4 通过相关性分析、文献及国家政策印证等分析,发现对流层NO₂浓度与煤炭消费量及汽车保有量紧密相关,与第二产业产值相关系数高达0.83,与汽车保有量相关系数为0.74。随着近10年

长江三角洲经济的崛起,产业总值翻番约1.8倍,燃煤为主的能源结构,使得工业排放氮氧化物剧增;机动车保有量的快速增加,汽车排放标准及油品跟不上国际发展水平,是NO₂排放量增加的一个重要因素。此外,农业秸秆焚烧也释放大量氮氧化物。“十二五”期间实施的燃煤量控制和脱硝等一系列氮氧化物排放控制措施使得2012~2014年NO₂浓度降低。

参考文献:

- [1] 唐孝炎,张远航,邵敏.大气环境化学[M].2版.北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 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] 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[J].环境科学研究,2009,22(8):932-937.
- [4] 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[J].长江流域资源与环境,2010,19(12):1484-1490.
- [5] 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] 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] 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.
- [8] 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.
- [9] 王英,李令军,刘阳.京津冀与长江三角洲区域大气NO₂污染特征[J].环境科学,2012,33(11):3685-3692.
- [10] 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.
- [11] 周春艳,厉青,王中挺,等.2005年—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.
- [12] 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.
- [13] KNMI. Tropospheric NO₂ from satellites[DB/OL]. The Netherlands: KNMI, 2015[2015-11-16]. <http://www.temis.nl/airpollution/NO2.html>.
- [14] OMI TEAM. Ozone Monitoring Instrument (OMI) data user's guide (OMI-DUG-5.0)[R]. USA: NASA, 2012:8.
- [15] BURROWS J P, WEBER M, BUCHWITZ W, et al. The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first

- scientific results [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1999,56:151-175.
- [16] 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.
- [17] 中华人民共和国环境保护部.2012 年度全国主要污染物总量减排情况考核结果 [DB/OL].(2013-8-29)[2016-02-22]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201308/t20130829_259033.htm.
- [18] 中华人民共和国环境保护部.2013 年度全国主要污染物总量减排考核公告 [DB/OL].(2014-8-28)[2016-02-22]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201408/t20140828_288398.htm.
- [19] 中华人民共和国环境保护部.2014 年度全国主要污染物总量减排考核公告 [DB/OL].(2015-7-22)[2016-02-22]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201507/t20150722_307020.htm.
- [20] 王艳.长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征研究 [D]. 济南:山东师范大学, 2007:31-32.
- [21] 李宗恺,潘云仙,孙澜桥.空气污染气象学原理及应用 [M]. 北京:气象出版社, 1985:557-569.
- [22] 蒋维楣.空气污染气象学 [M]. 南京:南京大学出版社, 2003:170.
- [23] 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.
- [24] 金维明.降水量变化对大气污染物浓度影响分析 [J]. *环境保护科学*, 2012,38(2):23-26,52.
- [25] 邹璇.能源结构优化与经济增长 [J]. *经济问题探索*, 2010, (7):33-39.
- [26] 孙秀艳.氮氧化物减排为何滞后 [N]. *人民日报*, 2014-3-1.
- [27] 刘炳江.“十二五”主要大气污染物总量减排对策措施 [J]. *环境与可持续发展*, 2012,(4):5-10.
- [28] 中华人民共和国环境保护部.2011 年中国机动车污染防治年报 [R]. 北京:中华人民共和国环境保护部, 2011.
- [29] 中华人民共和国环境保护部.2012 年中国机动车污染防治年报 [R]. 北京:中华人民共和国环境保护部, 2012.
- [30] 中华人民共和国环境保护部.2013 年中国机动车污染防治年报 [R]. 北京:中华人民共和国环境保护部, 2013.
- [31] 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.
- [32] 国务院.大气污染防治行动计划[EB/OL]. 北京:国务院, 2013[2015-11-16]. http://www.gov.cn/zwggk/2013-09/12/content_2486773.htm.
- [33] DIESELNET. European Union emission regulations [EB/OL]. DieselNet, 2015[2015-11-16]. <http://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>.
- [34] 上海市环境保护局.市环保局关于本市实施国五机动车排放标准的新闻通气稿[EB/OL].上海:上海市环境保护局, 2014[2015-11-16].<http://www.sepb.gov.cn/fa/cms/shhj//shhj2098/shhj2100/2014/04/85962.htm>.
- [35] 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.
- [36] 环境保护部办公厅.关于2014年夏季秸秆焚烧工作情况的通报环办函[2014]1170号[EB/OL]. 北京:中华人民共和国环境保护部,(2014-9-15)[2014-10-30]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201409/t20140918_289253.htm.

作者简介: 周春艳(1981-),女,山东临沂人,高工,博士,主要从事大气环境遥感研究.发表论文 10 余篇.