

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0292

崔远政, 姜磊, 张为师, 等. 2019. 中国西部人为源 NO₂ 污染的时空分布及影响因素研究[J]. 环境科学学报, 39(12): 4152-4161

Cui Y Z, Jiang L, Zhang W S, et al. 2019. Spatio-temporal variations and influential factors of anthropogenic NO₂ pollution over Western China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 39(12): 4152-4161

中国西部人为源 NO₂ 污染的时空分布及影响因素研究

崔远政^{1,2}, 姜磊³, 张为师⁴, 冯晓飞⁵, 黄波^{2,*}

1. 浙江财经大学, 土地与城乡发展研究院, 杭州 310018
2. 香港中文大学, 地理与资源管理系, 香港 999077
3. 浙江财经大学, 经济学院, 杭州 310018
4. 天津师范大学, 地理与环境科学学院, 天津 300387
5. 浙江省环境保护科学设计研究院, 杭州 310007

摘要: 利用臭氧监测仪卫星遥感反演获得对流层 NO₂ 柱浓度数据, 分析了 2005—2016 年中国西部地区 NO₂ 污染的时空演变特征及影响因素。首先, 根据 NO₂ 污染的季节特性, 剔除了自然源 NO₂ 后得到人为源 NO₂ 柱浓度信息; 然后, 利用小波变换分解方法对西部地区 NO₂ 柱浓度的长期趋势和季节特性进行提取, 并对比了东西部的 NO₂ 增长情况; 最后, 结合经济社会数据分析了西部各省 NO₂ 污染的主要驱动因素。结果发现, 西部地区的 NO₂ 浓度在 2005—2012 年期间呈快速增长趋势, 西北各省份的增速均超过了 10% a⁻¹。然而, 2012 年之后, 西部各省的 NO₂ 浓度开始下降。结合“十二五”计划中的各省氮氧化物减排目标, 发现大多数西部省份都较好地完成了减排任务。此外, 煤炭消费是西部各省 NO₂ 污染的最主要因素。然而, 对于云南和四川而言, 虽然水电发展替代了部分火电, 使得煤炭消费增速减缓, 但交通排放成为这两个省份 NO₂ 污染的最主要驱动因素。西部地区是国家“一带一路”新战略的重要区域, 本研究结果将为政府制定有效的控制排放政策, 以及促进西部区域可持续发展提供重要的科学参考。

关键词: NO₂ 柱浓度; 卫星遥感; 中国西部; 时空分析

文章编号: 0253-2468(2019)12-4152-10 中图分类号: X511 文献标识码: A

Spatio-temporal variations and influential factors of anthropogenic NO₂ pollution over Western China

CUI Yuanzheng^{1,2}, JIANG Lei³, ZHANG Weishi⁴, FENG Xiaofei⁵, HUANG Bo^{2,*}

1. Institute of Land and Urban-rural Development, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou 310018
2. Department of Geography and Resource Management, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077
3. School of Economics, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou 310018
4. School of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387
5. Environmental Science Research and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007

Abstract: Using the tropospheric NO₂ columns observed by the satellite-based Ozone Monitoring Instrument (OMI), we analyzed the spatio-temporal variations and influential factors of NO₂ pollution over Western China from 2005 to 2016. First, the anthropogenic NO₂ columns were estimated dependent on the seasonal characteristics of NO₂ pollution, excluding the source of natural NO₂. The long-term trend and seasonal characteristics of NO₂ columns over Western China were then extracted by the wavelet transform method. We compared the changes of NO₂ columns over Western China and Eastern China. Finally, combined with economic and social data, the main drivers of NO₂ pollution over Western China were analyzed. The results showed that the NO₂ columns over Western China showed a rapidly increasing trend from 2005 to 2012. Specifically, the growth rate of northwestern provinces exceeded 10% a⁻¹. After 2012, the NO₂ columns over Western China began to decrease. We observed that most western provinces had completed the emission reduction targets of the “12th Five-Year Plan”. In addition, coal consumption is the most important factor of NO₂ pollution. Although part of thermal power in Yunnan and Sichuan Provinces has been replaced with hydropower and the growth rate of coal consumption has slowed down, traffic emissions have already

收稿日期: 2019-05-12 修回日期: 2019-07-19 录用日期: 2019-07-21

基金项目: 浙江省哲学社会科学规划课题 (No.20NDQN303YB); 国家重点研发计划项目 (No.2017YFB0503902); 浙江省自然科学基金项目 (No. LQ19D050001, LY19G030013); 教育部人文社会科学研究青年基金项目 (No.17YJC790061)

作者简介: 崔远政 (1989—), 男, 博士, E-mail: cuiyuanzheng@163.com; * 责任作者, E-mail: bohuang@cuhk.edu.hk

become the main source of local NO₂ pollution in the two provinces. As one of the key regions of the national “One Belt, One Road Initiative” new strategy, the results of this study will provide an important scientific basis for the Chinese government to formulate effective emission control policies and promote regional balance and sustainable development.

Keywords: NO₂ columns; satellite remote sensing; Western China; spatio-temporal analysis

1 引言 (Introduction)

近 40 年,中国经历了快速的城市化和大规模的工业化发展,消耗了大量的化石燃料,导致大气中的二氧化氮 (NO₂) 浓度迅速增加 (Richter *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2012). 中国不仅成为世界第二大经济体,并且是全球 NO₂ 污染最为严重的地区之一. NO₂ 是大气污染事件发生的重要污染物,在对流层大气化学变化中发挥着重要作用,能够生成臭氧 (O₃)、硝酸盐颗粒物及酸雨等 (van der *et al.*, 2006; Lin *et al.*, 2011). 并且, NO₂ 作为重要的氧化剂还参与夜间大气化学反应,能直接或间接地导致辐射强迫,从而对全球气候变化产生重要影响 (Zhang *et al.*, 2007). 此外,高浓度的 NO₂ 污染会直接伤害人体健康,容易引发呼吸系统疾病. 同时,也会影响植被生长,破坏当地的生态环境 (Qin *et al.*, 2017). 由此可见, NO₂ 污染对人体健康和生态环境具有很大的危害性.

卫星遥感观测数据的高空间、高时间分辨率特性使得评估大区域 NO₂ 的污染变化具有可行性 (Richter *et al.*, 2005). 这主要是由于大气中的 NO₂ 寿命很短 (夏季 2~6 h, 冬季 10~24 h), 使得从卫星观测到的 NO₂ 柱浓度变化能够与地面排放引起的 NO₂ 污染变化建立直接的联系 (Zhang *et al.*, 2012). 因此,很多学者通过长时间序列卫星数据研究中国各区域对流层 NO₂ 柱浓度的时空变化特征,包括其年际变化、空间分布及季节周期变化 (Zhang *et al.*, 2007; van der *et al.*, 2008; 肖钟湧等, 2011; 高晋徽等, 2015; Yu *et al.*, 2017). Zhang 等 (2012) 发现中国地区 NO₂ 柱浓度呈现不均衡分布,高污染 NO₂ 主要分布在人口密集的城市群区域,且存在强烈的季节性特性. 也有不少研究分析了影响区域性 NO₂ 柱浓度变化的驱动因素,包括经济增长、机动车数量、人口密度及能源消耗等,研究结果指出各地区 NO₂ 浓度的增长主要由人为活动导致地面排放增加所造成 (Gu *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2013; 周春艳等, 2016). 上述研究结论不仅揭示了 NO₂ 污染的时空特征,并且也深入地剖析了 NO₂ 污染的驱动因素,为制定有效的减排政策提供了理论依据.

由于 NO₂ 污染存在较大的危害性,因此,中央政府在“五年计划”中制定了明确的氮氧化物减排目标,并且将总体减排计划分解到各个省份. 在“十三五”计划中,要求氮氧化物排放量较之于“十二五”期间下降 15%. 为了客观评价政府制定的减排政策的实施效果,一些学者结合减排措施通过卫星监测发现,在“十二五”期间,东部多数地区的 NO₂ 排放及 NO₂ 柱浓度均呈下降趋势 (de Foy *et al.*, 2016; Krotkov *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016; Xia *et al.*, 2016). 然而,目前大多数研究集中关注中国东部的 NO₂ 污染情况,对西部其余各省份的研究较少,仅 Shen 等 (2016) 利用卫星数据研究了 2005—2014 年宁夏重工业地区的 NO₂ 污染情况,对于中国整个西部地区的 NO₂ 污染的研究更是较为匮乏.

国家自 1999 年就启动了“西部大开发”战略. 在过去的 20 年间,西部的工业化和城市化发展速度甚至超过了部分东部较发达地区 (Bai *et al.*, 2014). 西部地区的各级政府鼓励发展资源依赖性产业,积极主动地承接东部地区的高污染重工业转移. 虽然在短时间内拉动了西部地区的经济发展,但过度的资源消耗及生产过程中排放的各类污染物也对当地环境造成了巨大破坏,使得西部地区氮氧化物排放的时空格局也发生了显著变化. 另外,西部地区地广人稀,环保部门布置的国控地面监测站多数分布于中东部区域,而受制于自然条件,西部地区监测站点设置数量很少,这也极大地限制了对西部地区 NO₂ 污染的深入研究. 鉴于西部地区缺乏长时间高空间分辨率的观测数据,未能及时有效地监测当地的 NO₂ 污染问题. 因此,本研究将利用长时间序列的卫星观测数据对西部地区 NO₂ 污染时空分布和影响因素进行分析. 此外,西部地区多数无人区域的自然源 (闪电、明火、土壤等) 排放强度大于人为源 (火力发电厂、交通运输、工业、居民等部门) 排放强度. 因此,本研究剔除了自然源排放的 NO₂ 污染,从而得到人为源 NO₂ 污染,有助于研究西部地区的社会经济因素对当地 NO₂ 污染的影响.

本研究根据臭氧监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI) 观测的对流层 NO₂ 柱浓度数据,研究 2005—2016 年期间中国西部地区 NO₂ 污染的时

空变化及相关的影 响因素.根据 NO_2 污染的季节特性,估算得到人为源 NO_2 柱浓度信息,并利用小波变换分解方法对中国西部地区 NO_2 柱浓度的长期趋势和季节特性进行提取.同时,对比了西部地区和东部及西北和西南地区的 NO_2 增长情况.最后,针对西部地区的 NO_2 污染的成因解析,本研究将卫星资料获取的结果与社会经济数据相结合,进一步探索人为源 NO_2 变化的主要驱动因素.西部地区作为国家“一带一路”新战略的重要区域,本研究结果将为政府制定有效的控制排放政策,以及促进区域均衡发展提供重要的科学参考.

2 资料与方法 (Materials and methods)

2.1 数据来源与处理

本研究使用基于 EOS-Aura 卫星上搭载的 OMI 传感器观测的 2004 年 10 月—2016 年 12 月的对流层 NO_2 垂直柱浓度数据. Aura 是近极地、太阳同步轨道卫星,围绕地球一圈约为 100 min 左右,重复观测周期为 16 d (Levelt *et al.*, 2006),卫星过境时间为当地时间 13:45,其观测数据的星下点象元空间分辨率为 $13 \text{ km} \times 24 \text{ km}$. 本研究采用由荷兰皇家气象研究中心 (Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI) 开发的 DOMINO v2 二级幅带产品进一步提取了中国地区对流层 NO_2 柱浓度数据 ([\[emis.nl/airpollution/NO2.html\]\(http://emis.nl/airpollution/NO2.html\)\). 针对基于 OMI 对流层 \$\text{NO}_2\$ 柱浓度的反演算法和精度的详细描述,参照 Boersma 等 \(2005; 2011\) 的研究,本文采用的 \$\text{NO}_2\$ 柱浓度数据的相对误差约为 30%,绝对误差为 \$0.7 \times 10^{15} \text{ molecules} \cdot \text{cm}^{-2}\$ \(Boersma *et al.*, 2011\). 本研究将二级幅带数据按照 area-weighted average 方法处理成 \$0.125^\circ \times 0.125^\circ\$ 网格数据集,并将日均数据转换得到月均数据.在数据处理过程中去除了云辐射大于 20% 和轨道异常的像素数据,以提高观测数据的可靠性.对于传感器每次扫描得到的 60 个像素,本研究仅选取位于轨道中间的 30 个像素作为有效的 \$\text{NO}_2\$ 数据.此外,本文中涉及的社会经济等统计数据来源于国家统计局 \(<http://data.stats.gov.cn/>\).](http://www.</p>
</div>
<div data-bbox=)

图 1 为本文的研究区域,根据中国行政区域划分提取了各省、市、自治区的 NO_2 柱浓度数据. 本文将西部划分为西北和西南两部分研究区域,其中,西北地区包括 6 个省份 (自治区),即甘肃、内蒙古、宁夏、青海、陕西和新疆,西南地区包括 5 个省份 (自治区、直辖市),即重庆、广西、贵州、四川和云南. 由于缺乏社会经济数据,本研究不包括西藏.此外,本研究还选择了中国东部地区的 3 个重点城市群与西部地区进行比较:即京津冀地区 (包括北京、天津和河北)、长三角地区 (包括上海、江苏和浙江) 和珠三角地区 (包括广东南部).

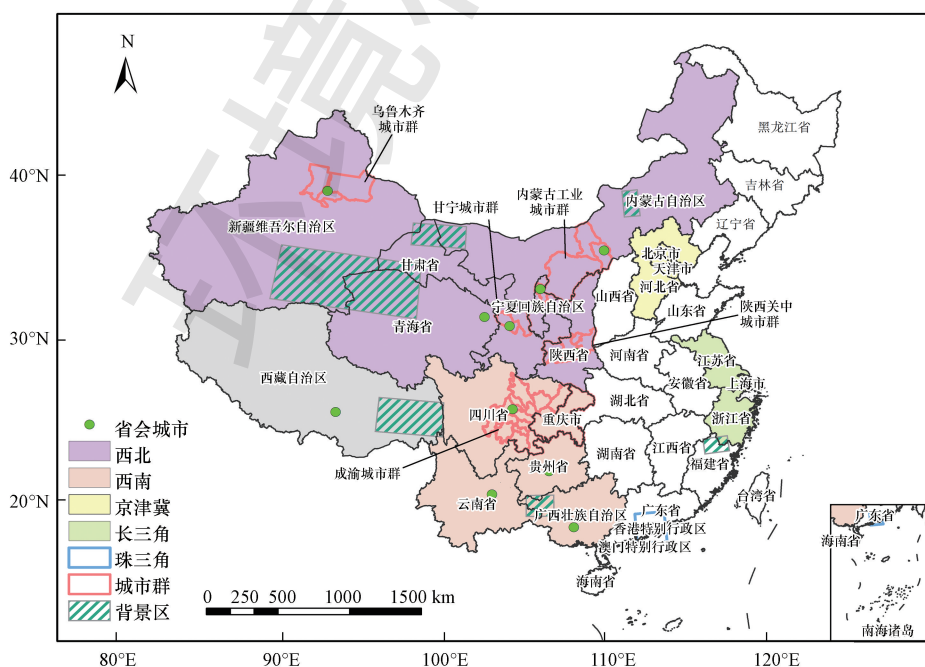


图 1 研究区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

2.2 人为 NO₂ 浓度的提取

由于冬季氮氧化物的寿命比夏季长几倍,因此,对于 NO₂人为来源排放为主的地区来说,其柱浓度夏季最低,冬季最高;相反的季节特性则发生在以自然排放为主的地区.根据 Cui 等(2016)的研究,西部地区的格点年均值大于 1.0×10^{15} molecules·cm⁻²,具有月均值夏季浓度低、冬季浓度高的季节特性.在本研究中,选取了年均值大于 1.0×10^{15} molecules·cm⁻²的格点作为人为源排放主导的区域.

由于西部地区部分区域的人为源 NO₂浓度并没有远大于自然源 NO₂浓度,因此,本研究通过剔除自然排放为主导区域的 NO₂柱浓度作为背景值,进一步获得人为源 NO₂柱浓度值.具体来说,在计算所选人类活动主导区域的格点 NO₂的趋势时,本研究将选取与其格点距离最近的自然源背景值(即年均值小于 1.0×10^{15} molecules·cm⁻²,且具有月均最大值出现在夏季的特点).本研究依据 Russell 等(2012)所使用的方法,他们采用这种方法对美国自然源 NO₂排放区域进行了识别.通过表 1 可以发现,这些位于西部地区的自然源地区的 NO₂柱浓度在 2005 年仅约为 $0.4 \times 10^{15} \sim 0.5 \times 10^{15}$ molecules·cm⁻²,大约是其相近的人为源污染区域浓度的 1/5~1/2.而东部地区(如京津冀、长三角和珠三角)的自然源背景值较高(2005 年为 $0.7 \times 10^{15} \sim 1.2 \times 10^{15}$ molecules·cm⁻²),其浓度值大约是其周围地区的 1/6~1/13.因此,所选取的自然源背景值可能无法完全描述对人为源为主导区域的实际自然源排放的贡献.例如,各地区的温度、辐射、土地覆盖和土地利用类型,以及其他气候因素的不同,会使得 NO₂浓度存在一定的差异.此外,由于大气传输的原因,其自然源背景区域不可能完全不受附近人为源排放的影响,故而未来的工作需要更加关注如何进一步提高估算人为源 NO₂污染的精度.

2.3 小波分析

对流层 NO₂柱浓度对不同时间尺度(从长期趋势到短期扰动)的排放变化反应迅速,如农历新年假期、经济衰退及政府的减排政策实施期间.此外,基于卫星观测的数据在反演过程中所产生的不确定性和采样偏差可能会在月均 NO₂浓度时间序列数据中引入额外的噪声,短期事件的突变或噪声将会影响线性趋势的计算结果.本研究将利用离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)以区分多尺度下 NO₂的时间变异性(Daubechies, 1992).小波变

换是诊断有限空间和时间段内多尺度和非平稳过程的有效工具,因此,适用于长时间序列数据的 NO₂趋势和季节特性的分析.

本研究将选择 Discrete Meyer Wavelet (dmey)小波作为小波函数.dmey 小波是双正交紧支撑小波,能够同时在时域和频域进行局部分析.目前,dmey 小波函数已广泛用于研究臭氧、植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和土地覆盖变化等(Echer, 2004; Freitas *et al.*, 2008; Martínez *et al.*, 2009).利用小波分析对信号进行分解的实质是将信号通过低通滤波器和高通滤波器,进而输出对应于信号的低频成分和高频成分,再对低频成分继续分解,从而得到次低频成分和次高频成分,依次类推,每一次分解过程就是将低频信号分解为一个新的低频成分和高频成分.因此,这样的多尺度分解能够将时间序列 $f(t)$ 分解为 n 层分量:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n D_i(t) + A_n(t) \quad (1)$$

式中, $D_i(t)$ 是不同分辨率下的细节信号(高频分量), $A_n(t)$ 是第 n 层的近似信号(低频分量).针对本研究的时间序列数据,对不同的分解层数进行试验,选择分解层数的原则是当分解后的最高层的近似分量周期长于数据集的长度,则停止分解.经过试验,本研究选择 5 层为分解的层数.

3 结果(Results)

3.1 西部和中东部地区对流层 NO₂ 污染的空间分布

图 2 显示了 2005—2016 年中国年均 NO₂污染的空间格局状况.可以发现,NO₂柱浓度值超过 7×10^{15} molecules·cm⁻²的格点主要集中在东部经济发达地区,即京津冀、长三角、珠三角地区及重点城市群,如山东半岛城市群、辽东半岛城市群、长江中游城市群、中原城市群、成渝城市群、乌鲁木齐城市群、关中城市群.

通过比较图 2 中的 a、b、c 子图,可以观察到中东部的大部分地区 NO₂柱浓度在 2005—2012 年期间呈上升趋势,特别是鲁西地区,污染最为严重的冀南及豫北地区的 NO₂柱浓度甚至超过了 20×10^{15} molecules·cm⁻².此外,多数区域在 2013—2016 年期间 NO₂污染水平大幅下降,例如,珠三角地区在整个样本期内 NO₂柱浓度一直保持下降趋势.然而,对于整个中国的 NO₂污染区域面积(浓度 $5 \times 10^{15} \sim 10 \times$

$10^{15} \text{ molecules} \cdot \text{cm}^{-2}$)来说,在2013—2016年期间并没有表现出显著的减少趋势.这表明在“十二五”计划收官阶段,中国多数重污染区域的 NO_2 浓度有所下降,但之前属于中度污染的区域并没有将 NO_2 浓度降低到轻微污染的程度.反观西部地区,自2005年以来,成渝城市群、乌鲁木齐城市群、陕西关中城市群、甘肃-宁夏城市群和内蒙古工业城市群,这些

“热点”区域(图1红色框所示)的 NO_2 污染皆呈加剧态势.尽管其绝对增幅低于中东部地区,然而从总体来看,2005—2012年间西部地区的年均 NO_2 柱浓度增长比例较中东部地区的增长比例高出了54%.因此,需要进一步详细探析西部地区各省份的 NO_2 水平变化情况.

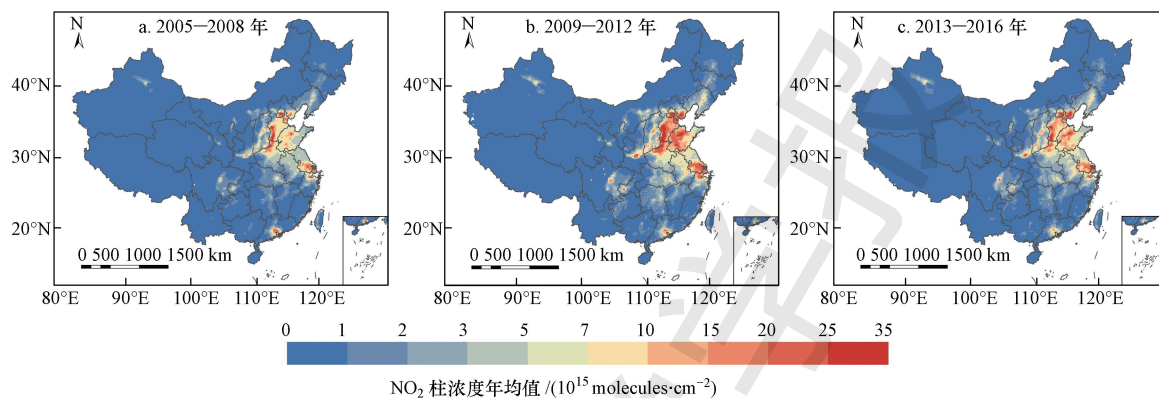


图2 中国对流层 NO_2 柱浓度年均值(a.2005—2008年,b.2009—2012年,c.2013—2016年)

Fig.2 Annual mean of tropospheric NO_2 columns in 2005—2008 (a), 2009—2012 (b), and 2013—2016 (c)

3.2 西部地区对流层 NO_2 长期趋势分析

基于2004年10月—2016年12月的人为源 NO_2 月度平均数据,本研究通过小波变换分析方法提取了西部地区各省份的 NO_2 柱浓度时间序列数据的长期变化趋势,并除以2010年的年均值得到长期趋势相对变化.根据图3显示,西部地区各省份的人为源 NO_2 柱浓度在2005—2012年期间均呈现出较快的增速,特别是在2010—2012期间,其增速远高于2005—2009年期间.然而,云南和广西的 NO_2 长期趋势的增速比其他西部省份要缓.另外,新疆的 NO_2 污染达峰时间比其他西部省份达峰时间(即2013年)要迟1~2年,而东部的京津冀、长三角区域较西部各省份更早达峰.珠三角地区在整个研究样本期内呈现出持续下降的趋势.

为了更好地研究西部各省份 NO_2 污染的演变趋势,表1分别展示了2005—2012年和2012—2016年不同时期的人为源 NO_2 柱浓度增幅相对变化.表1显示,在2005—2012年期间,西北各省份的增速均分别超过了 $10\% \text{ a}^{-1}$,其中,宁夏、陕西和新疆的人为源 NO_2 污染趋势增长最快,增速达到了 17.1% 、 14.2% 和 $14.1\% \text{ a}^{-1}$.西南各省份的人为源 NO_2 变化趋势与西北地区相比增长较缓,除重庆外,其他各省份的增速均小于 $10\% \text{ a}^{-1}$.在2012—2016年期间,

表1 中国东西部地区 NO_2 柱浓度增幅相对变化

Table 1 Relative annual changes of NO_2 columns over Eastern China and Western China

地区	省份 (自治区、 直辖市)	2005年 NO_2 柱浓度均值/ (10^{15} $\text{molecules} \cdot \text{cm}^{-2}$)	NO_2 柱浓度年均变化趋势/ a^{-1}	
			2005—2012年	2012—2016年
西北	甘肃	0.9(0.4)	$10.0\% \pm 1.3\%$	$-8.4\% \pm 0.1\%$
	内蒙古	1.1(0.4)	$13.6\% \pm 0.7\%$	$-11.5\% \pm 0.1\%$
	宁夏	1.4(0.4)	$17.1\% \pm 4.4\%$	$-13.7\% \pm 0.3\%$
	青海	1.0(0.5)	$12.1\% \pm 1.3\%$	$-5.9\% \pm 0.1\%$
	陕西	2.3(0.5)	$14.2\% \pm 0.1\%$	$-11.1\% \pm 0.1\%$
	新疆	1.0(0.5)	$14.1\% \pm 2.2\%$	$-12.3\% \pm 1.7\%$
西南	重庆	2.2(0.5)	$12.2\% \pm 1.6\%$	$-8.5\% \pm 0.2\%$
	广西	1.2(0.5)	$3.9\% \pm 0.2\%$	$-4.7\% \pm 0.1\%$
	贵州	1.3(0.5)	$7.1\% \pm 0.6\%$	$-10.5\% \pm 0.4\%$
	四川	1.7(0.5)	$8.6\% \pm 0.8\%$	$-5.7\% \pm 0.1\%$
全国	云南	0.7(0.5)	$4.7\% \pm 0.1\%$	$-1.8\% \pm 0.1\%$
	西部	1.3(0.5)	$10.7\% \pm 1.0\%$	$-9.4\% \pm 0.2\%$
	西北	1.2(0.5)	$13.4\% \pm 1.5\%$	$-11.3\% \pm 0.3\%$
东部	西南	1.4(0.5)	$7.4\% \pm 0.5\%$	$-6.2\% \pm 0.1\%$
	京津冀	9.2(0.7)	$9.1\% \pm 2.8\%$	$-7.4\% \pm 1.2\%$
	长三角	7.2(1.2)	$7.8\% \pm 0.6\%$	$-10.1\% \pm 0.5\%$
	珠三角	8.0(1.2)	$-2.7\% \pm 0.1\%$	$-5.2\% \pm 0.1\%$

注:括号内为各地区对应的2005年背景区 NO_2 柱浓度均值.

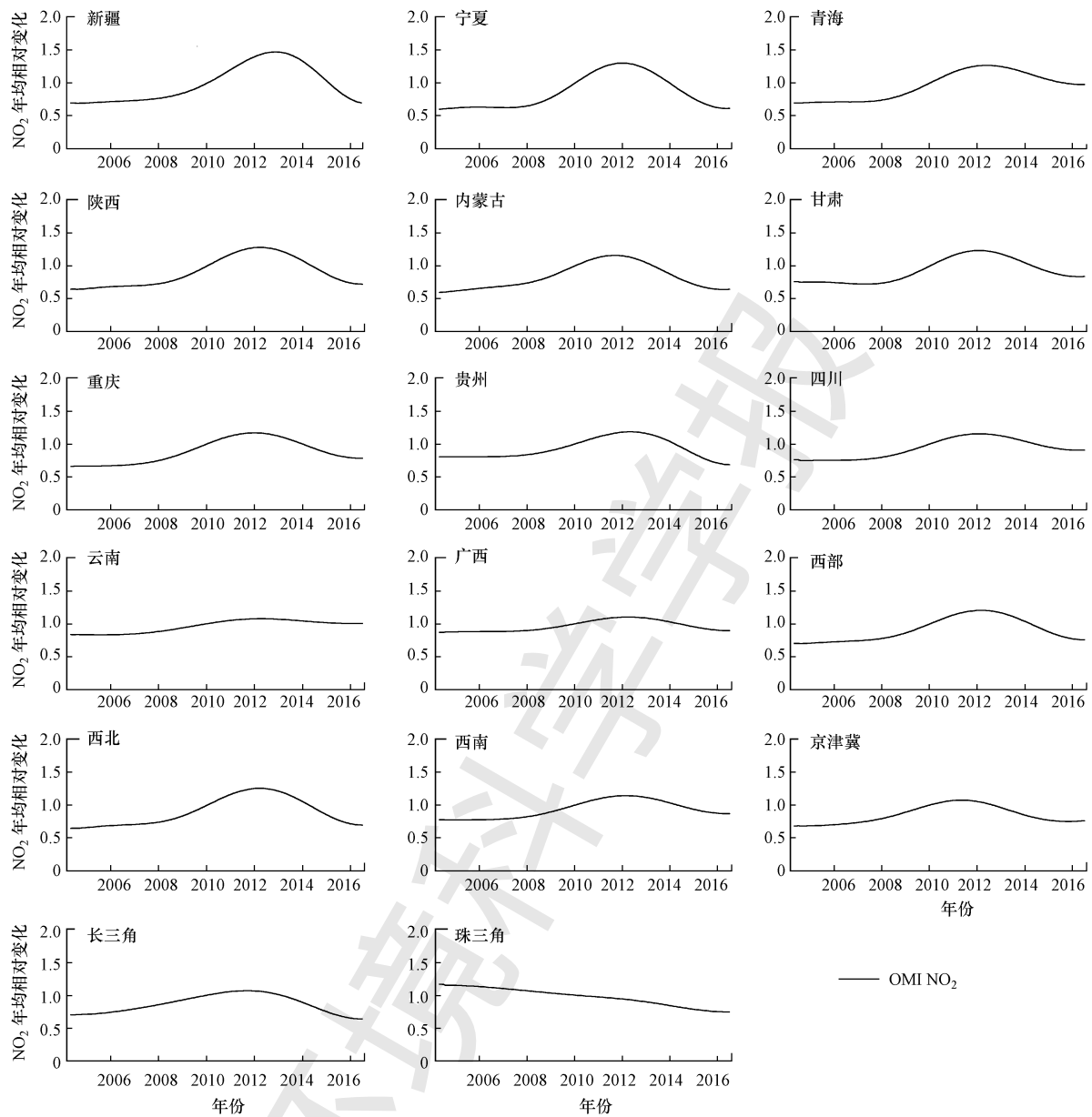


图3 2005—2016年中国东西部NO₂柱浓度长期趋势(参考年份:2010年)

Fig.3 Long-term trend of NO₂ columns over Eastern China and Western China during 2005—2016

所有地区的NO₂污染水平都呈下降趋势.由于各省份在2012年的NO₂浓度不同,因此可以看出有的省份下降幅度很大,如宁夏、新疆和内蒙古,而有的省份下降幅度很小,如广西、云南等.

西北地区的NO₂平均增长率在2005—2012年为 $(13.4\% \pm 1.5\%) a^{-1}$,远大于西南地区的平均增长率 $(7.4\% \pm 0.5\%) a^{-1}$.西北和西南地区NO₂增长率的差异反映了不同的社会经济发展模式及产业结构的差异状况.根据全国污染源普查数据显示,西北地区每单位国内生产总值产生的氮氧化物排放量

(2007年为 $1.194 t \cdot 亿元^{-1}$)远高于西南地区($0.698 t \cdot 亿元^{-1}$)(第一次全国污染源普查资料编纂委员会,2011).

3.3 西部地区对流层NO₂的季节特征

图4描述了西部各省份NO₂污染的季节变化特征.由图可以看出,各省份NO₂柱浓度的季节分布规律通常为冬季最大、夏季最小.其中,陕西省的NO₂污染表现出最强的季节性,而云南省的NO₂污染季节性最弱.在2005—2007年期间,云南省的NO₂柱浓度高值出现在夏季,低值出现在冬季,其主要原

因为本研究采用的自然排放扣除方法对计算如云南这样的低污染省份的人为源 NO_2 柱浓度时具有一定的局限性,进而对所分析的 2005—2007 年时间序列数据具有一定的影响.但在 2007 年以后,其季节

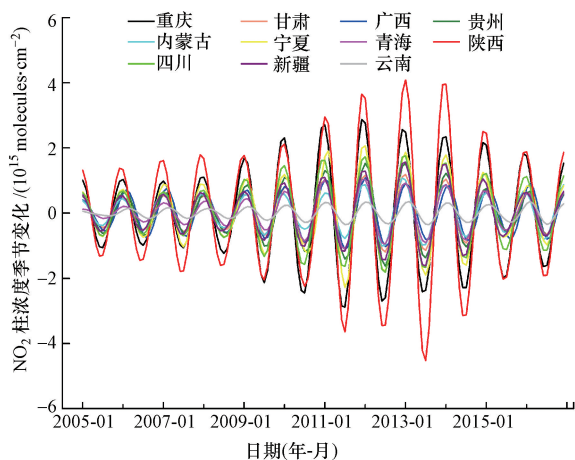


图 4 2005—2016 年中国西部各省份 NO_2 柱浓度季节变化

Fig.4 The seasonal changes of NO_2 columns over Western China during 2005—2016

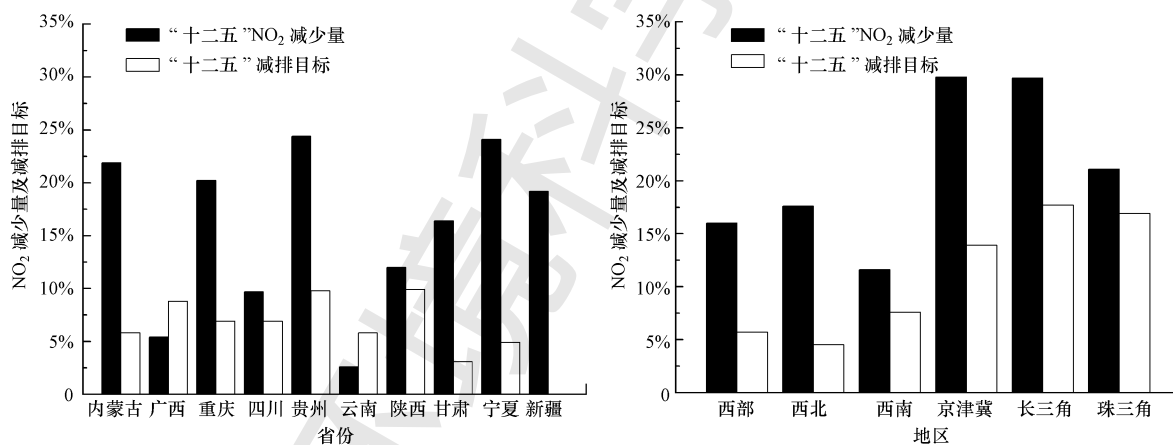


图 5 NO_2 柱浓度降幅与“十二五”规划减排目标

Fig.5 The decrease of NO_2 columns and the emission reduction target of the “12th Five-Year Plan”

NO_2 浓度的变化可以在一定程度上反映“十二五”期间氮氧化物污染物的减排情况.通过图 5 可以看出,除广西和云南的 NO_2 浓度减少量小于减排目标外,其余西部省份及东部三大城市群的 NO_2 浓度减少量均大于“十二五”计划的减排量.由此可见,整体上绝大部分西部省份较好地完成了“十二五”计划中的减排目标.

根据中国多尺度排放清单研究结果显示,对于全国而言,2010 年电厂排放、交通运输排放、工业排放及居民排放的氮氧化物分别占总氮氧化物排放

性发生了转变,说明人为排放强度不断增强,并逐渐超过了自然排放.结合图 3 和图 4 可以发现,各省份的 NO_2 污染的季节性随着长期趋势变化而变化,即在 2005—2012 年期间季节性不断增强,随后开始减弱.因此,季节性的变化揭示了人为活动影响对于 NO_2 污染作用的增强.此外,若在冬季里大幅增加 NO_x 排放量会显著提高 NO_x 的时间寿命,进一步提升大气中的 NO_2 浓度.

4 影响因素分析 (Analysis of influencing factors)

在“十二五”规划纲要(2011—2015)中,氮氧化物已被明确地列为重点减排的污染物之一,即在“十二五”末实现全国氮氧化物排放量相对于 2010 年减少 10%.如图 5 所示,东部三大城市群 2015 年的氮氧化物目标减排量相对于 2010 年为 13.9%~17.7%,相比西部规定的 5.7% 目标更为严格.然而,与其他省份受制于减排目标不同的是,青海省的“十二五”规划中允许氮氧化物排放量增加在 15.3% 以内,实际情况为 NO_2 浓度仅增长了 0.8%.

的 32%、25%、39% 及 4% (Krotkov *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016).由此可见,电厂排放、工业生产排放、交通运输排放是 NO_2 污染的三大主要来源.本文主要从这 3 个方面来分析“十二五”之后 NO_2 污染下降的主要原因.

“十一五”规划以来(2006—2010 年),中央政府提出在电厂和其他工业部门中使用脱硝系统.截止到 2010 年,火电厂的脱硝系统中约有 57% 安装在东部三大城市群,故而这些地区的 NO_2 污染下降很快(Cui *et al.*, 2016).随后,2012 年又进一步明确指

出了各部门行业(包括电力行业、钢铁烧结机、水泥行业、工业锅炉等)的氮氧化物在“十二五”期间的具体减排目标.这些减排装置在“十二五”期间逐渐向西部各省份普及,因而西部地区的 NO₂ 污染在“十二五”期间也有了大幅度的降低.说明环保政策及先进脱硝设备对于减少 NO₂ 污染发挥着重要作用.

此外,煤炭燃烧是我国 NO₂ 污染加剧的最大原因,而煤炭是我国最主要的能源,占全国能源消耗的 70% 以上.图 6a 展示了 2005—2016 年期间西部各省份的煤炭消费量,可以看出,西部多数省份的煤炭消费量呈上升趋势,因此,这些地区的 NO₂ 污染也在加剧.四川的煤炭消费量先增后减,这是因为四川的水电在此期间得以大力发展,从而代替了部分原先的火力发电.到 2016 年底,四川省水电发电量为 2989 亿 kWh, 占全省发电量的 88.6%, 占全国

水电发电量的 25.4%; 云南省水电发电量为 2268 亿 kWh, 占全省发电量的 84.2%, 占全国水电发电量的 19.3% (《中国电力年鉴》编辑委员会, 2017). 内蒙古、陕西和新疆的煤炭消费增速最快, 且煤炭消费的总量远高于其他省份, 因此, 这些省份的 NO₂ 污染相对于西部其他省份要更为严重. 进一步地, 图 6b 描述了 NO₂ 与煤炭消费量的相对比值变化. 可以看出, 除四川和云南外, 其余各省的 NO₂ 污染与煤炭消费量的比值呈逐年下降趋势, 这些省份的 NO₂ 浓度在 2013 年以后开始骤降, 但煤炭消费量一直保持增长, 说明脱硝技术在此期间得到了广泛的使用. 具体来说, 我国火电厂所使用的选择性催化还原烟气脱硝技术在“十二五”期间的普及率从 18% 猛增到 86% (de Foy *et al.*, 2016), 这其中最主要的增长动力来自于西北地区新建火电厂脱硝技术的普及.

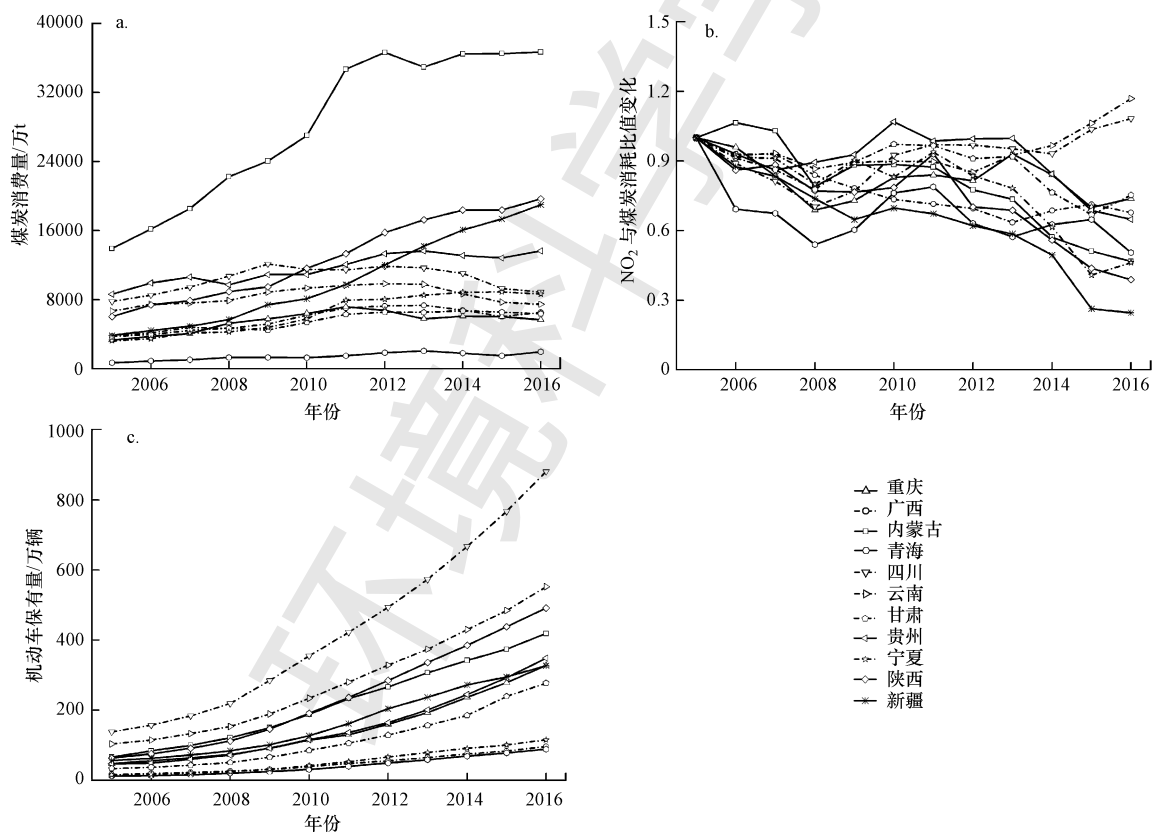


图 6 2005—2016 年煤炭消费量(a)、NO₂与煤炭消费量的相对比值变化(b)及各省机动车保有量(c)

Fig.6 Coal consumption (a), ratio changes of NO₂ to coal consumption (b), and vehicle stock (c)

交通排放是 NO₂ 污染的另一主要来源.图 6c 显示了 2005—2016 年期间各省汽车保有量情况,可以看出,各省份的汽车保有量一直保持快速增长的态势.其中,最为典型的是四川和云南,这两个两省份

的汽车保有量增量最大,是导致当地 NO₂ 污染加剧的重要原因.结合图 6a 和 6b 可以看出,虽然四川和云南两省的煤炭消费总量有所降低,但 NO₂ 与煤炭消耗比例却在上升,说明煤炭消费对这两个省份的

NO₂污染贡献较低,而机动车保有量急剧上升才是这两个省份 NO₂污染加剧的主要原因.这也说明虽然四川和云南的水电替代了部分火电,对缓解当地 NO₂污染有积极作用,但其他因素,如交通排放过快增长又成为 NO₂污染加剧的主要驱动因素.整体而言,较之西北地区,西南地区省份的人为源 NO₂污染主要来源于交通排放.

5 结论(Conclusions)

研究发现,西部地区的 NO₂浓度在 2005—2012 年期间呈快速增长趋势($(10.7\% \pm 1.0\%) a^{-1}$),在 2012—2013 年之后,其浓度开始下降($(-9.4\% \pm 0.2\%) a^{-1}$).将各省份 2015 年 NO₂浓度相对于 2010 年的减少量与“十二五”规划对各省氮氧化物减排目标进行比较,可以发现大多数西部省份在“十二五”期间都较好地完成了氮氧化物污染物减排任务.此外,结合煤炭消费量和机动车保有量分析了西部各省份 NO₂污染的主要驱动因素,发现煤炭消费是导致西部各省份 NO₂污染的最主要因素.然而,对于西南地区而言,如云南和四川,虽然水电替代了部分火电,使得煤炭消费增速减缓,但交通排放又成为这两个省份 NO₂污染的主要驱动因素,这说明在经济发展和能源消费结构转型阶段,NO₂污染的主要驱动因素会发生变化.因此,当地需要控制机动车保有量、实施更高的机动车排放标准及鼓励采用公共交通和新能源汽车出行,从而限制交通排放源的 NO₂进一步增长.

参考文献(References):

- Bai X, Shi P, Liu Y. 2014. Realizing China's urban dream [J]. *Nature*, 509(7499):158-160
- Boersma K F. 2005. Satellite observations of tropospheric nitrogen dioxide: retrieval, interpretation, and modelling [D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven
- Boersma K F, Eskes H J, Dirksen R J, *et al.* 2011. An improved tropospheric NO₂ column retrieval algorithm for the Ozone Monitoring Instrument [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(9):1905-1928
- Cui Y, Lin J, Song C, *et al.* 2016. Rapid growth in nitrogen dioxide pollution over Western China, 2005—2013 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(10):6207-6221
- Daubechies I. 1992. Ten Lectures on Wavelets [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics
- de Foy B, Lu Z, Streets D G. 2016. Satellite NO₂ retrievals suggest China has exceeded its NO_x reduction goals from the twelfth Five-Year Plan [J]. *Scientific Reports*, 6:35912
- 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 2011. 第一次全国污染源普查资料文集[M]. 北京: 环境科学出版社. 31-32
- Echer E. 2004. Multi-resolution analysis of global total ozone column during 1979—1992 Nimbus-7 TOMS period [J]. *Annals of Geophysics*, 22(5):1487-1493
- Freitas R M, Shimabukuro Y E. 2008. Combining wavelets and linear spectral mixture model for MODIS satellite sensor time-series analysis [J]. *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences*, 1:33-38
- 高晋徽, 朱彬, 王言哲, 康汉青. 2015. 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*, 35(8):2307-2318
- Gu D, Wang Y, Smeltzer C, Liu Z. 2013. Reduction in NO_x Emission Trends over China: Regional and seasonal variations [J]. *Environmental Science & Technology*, 47(22):12912-12919
- Huang J, Zhou X, Lee Y, *et al.* 2013. The effects of rapid urbanization on the levels in tropospheric nitrogen dioxide and ozone over East China [J]. *Atmospheric Environment*, 77:558-567
- Krotkov N A, McLinden C A, Li C, *et al.* 2016. Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(7):4605-4629
- Levelt P F, van den Oord G H J, Dobber M R, *et al.* 2006. The ozone monitoring instrument [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5):1093-1101
- Lin J T, McElroy M B. 2011. Detection from space of a reduction in anthropogenic emissions of nitrogen oxides during the Chinese economic downturn [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(15):8171-8188
- Liu F, Zhang Q, van der A R J, *et al.* 2016. Recent reduction in NO_x emissions over China: Synthesis of satellite observations and emission inventories [J]. *Environmental Research Letters*, 11(11):114002
- Martínez B, Gilabert M A. 2009. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform [J]. *Remote Sensing of Environment*, 113(9):1823-1842
- Qin K, Rao L, Xu J, *et al.* 2017. Estimating ground level NO₂ concentrations over Central-Eastern China using a satellite-based geographically and temporally weighted regression model [J]. *Remote Sensing*, 9(9):950
- Richter A, Burrows J P, Nusz H, *et al.* 2005. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space [J]. *Nature*, 437(7055):129-132
- Russell A R, Valin L C, Cohen R C. 2012. Trends in OMI NO₂ observations over the United States: effects of emission control technology and the economic recession [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(24):12197-12209
- Shen Y, Zhang X, Brook J R, *et al.* 2016. Satellite remote sensing of air

- quality in the energy golden triangle in Northwest China [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 3(7):275-279
- van der A R J, Eskes H J, Boersma K F, *et al.* 2008. Trends, seasonal variability and dominant NO_x source derived from a ten year record of NO₂ measured from space [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D4):D04302
- van der A R J, Peters D H M U, Eskes H, *et al.* 2006. Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D12):D12317
- Xia Y, Zhao Y, Nielsen C P. 2016. Benefits of China's efforts in gaseous pollutant control indicated by the bottom-up emissions and satellite observations 2000—2014 [J]. *Atmospheric Environment*, 136:43-53
- 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 [J]. *环境科学学报*, 31(10):2080-2090
- Yu S, Yuan J, Liang X. 2017. Trends and spatiotemporal patterns of tropospheric NO₂ over China during 2005—2014 [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(11):447
- 周春艳, 厉青, 王中挺, 等. 2016. 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*, (3):468-480
- Zhang Q, Geng G, Wang S, *et al.* 2012. Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China during 1996—2010 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(22):2857-2864
- Zhang X Y, Zhang P, Zhang Y, *et al.* 2007. The trend, seasonal cycle, and sources of tropospheric NO₂ over China during 1997—2006 based on satellite measurement [J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 50(12):1877-1884
- 《中国电力年鉴》编辑委员会. 2017. 中国电力年鉴 [M]. 北京: 中国电力出版社. 716-717