

文章编号: 2096-1618(2016)06-0656-09

成都地区 2005 ~ 2015 年对流层 NO₂ 柱浓度趋势与时空分布

张潇¹, 艾洁¹, 蒋婉婷¹, 谭玉龙¹, 廖婷婷¹, 孙扬²

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境国家重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要:根据臭氧观测仪数据,分析成都地区 2005 年 1 ~ 12 月 NO₂ 对流层柱浓度时空分布特征。结果表明,研究期间对流层 NO₂ 柱浓度年均值为 $10.31 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$, 总体呈波动上升趋势, 年上升率为 $0.42 \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 主城区西北部的上升趋势最明显。NO₂ 柱浓度时间分布特征呈现: 11 月和 12 月最高, 7 月和 8 月最低。空间分布上, NO₂ 柱浓度高值区中心位于城区及偏北区域; 山区最低; 农业地区可能受季节性的秸秆燃烧影响较大。

关键词:大气化学; 卫星遥感; 二氧化氮对流层柱浓度; 成都地区; 时空分布

中图分类号: X511

文献标志码: A

0 引言

随着经济高速发展,人类对生活品质的需求急剧提高,对大气污染的关注度也日益提高。氮氧化物(NO_x)是一种重要的大气痕量气体^[1-2],其主要存在形式为一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO₂)^[3-4]。最初燃烧排放的 NO_x 中 NO 占绝大部分,但是 NO 极易被氧化为 NO₂。据 S. Beirle 等估算,对流层 NO₂ 保留时间随季节不同有所变化,夏季约为 6 小时,冬季则为 18 ~ 24 小时^[5]。研究表明环境中高浓度 NO₂ 会引起支气管炎、肺炎、肺气肿等疾病^[6-7]。NO₂ 参与光化学反应,是对流层臭氧、硝酸盐气溶胶和氢氧自由基等大气氧化剂的前体物^[8-10]。最新研究显示,氮氧化物向硝酸盐的转化过程在城市大气水平消光和重度雾霾的形成过程中扮演极其重要的角色^[11]。因此,NO₂ 时空分布及其影响因子的研究对应气候变化和制定空气质量改善策略有重要意义。

目前,对大气 NO₂ 浓度的长期连续的观测主要包括地面观测和卫星遥感观测两种方式。地面观测 NO₂ 主要通过光化学发光原理的仪器进行高精度在线分析,但是该方法须借助地面站点,在空间覆盖上有一定的局限性^[12]; 卫星遥感观测利用搭载于地球同步卫星上的 NO₂ 传感器,获取全球绝大部分区域 NO₂ 柱浓度,

弥补了地面观测空间覆盖不足的缺陷^[13],为研究 NO₂ 浓度变化趋势和高精度的空间分布提供可靠的数据支撑。目前全球先后发射与 NO₂ 柱浓度相关的气象观测卫星包括: 1995 ~ 2002 年全球臭氧探测仪卫星(GOME)^[14-15]、2002 年至今的大气制图扫描成像吸收光谱仪卫星(SCIAMACHY)^[16-17]、2004 年至今的臭氧监测仪(OMI)^[18-19]和 2007 年至今的全球臭氧探测仪 2 号(GOME2)^[20-21]。中国作为全世界人口最密集的地区之一,其人为排放 NO_x 也居于世界前列^[22]。国内外许多研究者使用上述气象卫星资料研究中国对流层 NO₂ 柱浓度的时空分布。

Richter 等^[23]使用 SCIAMACHY 卫星资料分析全球 NO₂ 柱浓度变化特征,发现中国东部区域增长率全球最高;张鹏等^[24-25]通过 SCIAMACHY 与 GOME 卫星资料分析 1997 ~ 2006 年中国 NO₂ 变化特征及来源,发现 10 年间 NO₂ 浓度增长趋势显著,柱浓度高值区主要集中在人口密度大和工业相对发达的京津冀、长江三角洲、珠江三角洲以及四川盆地等地区。郑晓霞等^[26]分析得出 2005 ~ 2011 年京津冀地区大气 NO₂ 对流层柱浓度逐年上升的趋势,2008 年受到奥运会的保障措施影响,浓度下降明显;高诚等^[27]研究 2005 ~ 2011 年长三角地区对流层 NO₂ 柱浓度连续增长,2011 ~ 2013 年则开始回落,并分析发现 NO₂ 柱浓度变化趋势与地区经济发展状况十分契合;刘显通等^[28]统计分析广东省对流层 NO₂ 的时空分布,发现珠三角是 NO₂ 浓度高

值区,但 2005~2013 年呈现下降趋势。四川盆地是中国和世界上人口最为密集的地区之一,其中以成都和重庆人口密度最高,成都地区机动车保有量 2009 年以来以平均每年 32.12 万辆的速度激增。此外,四川盆地地形封闭、静风频率高、逆温频率高等气象条件均不利于污染物的扩散、输送与清除,导致大气污染物易积聚^[29-30]。肖钟湧等^[31]使用卫星遥感数据分析四川盆地 NO₂ 对流层和总柱浓度的时空变化,发现 2004~2010 年均呈上升趋势,而成都和重庆地区由于人口密度大、人为排放源较强,成为四川盆地 NO₂ 对流层柱浓度的高值区域。

成都市作为中国西南地区最重要的典型的特大城市之一,近年来制造业和信息产业等高速发展,机动车保有量仅次于北京和重庆,而成都地区近 10 年 NO₂ 柱浓度的变化情况和及其在不同功能区的分布尚无清晰的研究结论。利用成都地区 2005~2015 年 OMI 卫星遥感资料,深入探究对流层 NO₂ 柱浓度变化趋势与时空分布特征及其与机动车、工业布局的关系,分析 NO₂ 对流层柱浓度时空变化规律和影响因子,以期为 NO₂ 减排和区域空气质量改善提供理论参考。

1 资料处理及方法

1.1 研究区域的选取

成都位于成都平原腹地、四川盆地西部岷江中游地段。典型的亚热带湿润季风气候,降雨充足、四季分明,年均温度 15.2℃~16.6℃,无霜期大于 300 天。降水集中在 6~9 月,占年降水量 73% 左右。7、8 月降水量最大,达到 400 mm,约占年降水量 47%^[32]。成都地形类似于“马蹄形”,其人口密度大、汽车尾气排放与工业燃煤排放强、静风频率高、大气稳定度高,对污染物扩散与输送有抑制作用,导致观测到对流层 NO₂ 柱浓度值较高。成都是四川省人口最多的城市,截至 2015 年常住人口达到 1465.80 万人,机动车拥有量达 385.70 万辆,排名全国第三。综上,选成都地区为研究区域,可以代表西南地区典型的特大城市 NO₂ 垂直柱浓度分布情况。选取研究区域为成都 7 区 12 县(7 区:武侯、锦江、青羊、成华、金牛、龙泉驿、青白江;12 县:新都、温江、郫县、彭州、都江堰、双流、新津、大邑、金堂、邛崃、蒲江、崇州。简称成都地区,如图 1 所

示),拟通过研究其 NO₂ 对流层柱浓度时空分布特征进而了解四川盆地对流层 NO₂ 柱浓度空间分布特征及近 11 年变化趋势。

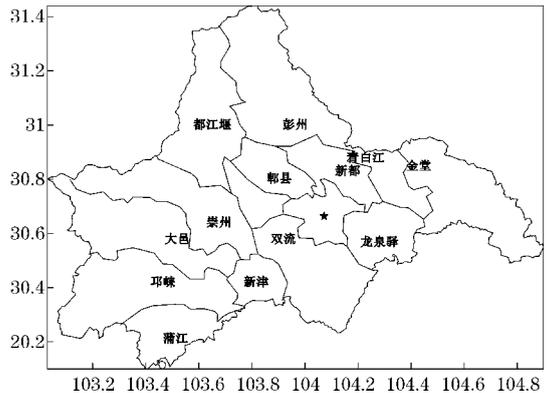


图 1 成都地区行政区划图

(黑色五角星为天府广场位置,位于成都市中心)

1.2 资料来源与处理

从大气污染监测网(<http://www.temis.nl/airpollution/no2.html>)获取 2005 年 1~12 月全球 NO₂ 对流层柱浓度月平均值。利用 Matlab 编程,读取成都地区 39 个经纬度坐标点数据。成都地区人口、车辆及地理位置等资料来源于 2010~2015《成都统计年鉴》(区市县、综合)与 2005~2015 年《成都市国民经济和社会发展统计公报》等公开权威的统计资料。利用 Surfer 软件自带克里格差值方法^[33-34](空间差值法:在有限区域内对区域化变量进行无偏、最优估计的一种方法)绘制出成都地区 NO₂ 对流层柱浓度趋势图。

2 成都地区对流层 NO₂ 柱浓度时空变化趋势分析

2.1 对流层 NO₂ 柱浓度时间变化特征

2.1.1 浓度水平及其变化趋势

Peters 等^[35]研究显示,NO₂ 对流层柱浓度的空间分布与人口密度和能源消耗分布密切相关。利用 SCIAMACHY 卫星反演数据测算中国 2004 年 NO₂ 对流柱浓度分布,发现京津冀、长江三角洲呈高浓度、连片高值区域,其次珠江三角洲;西部地区中四川盆地属于较高浓度区域,其高值中心为成都和重庆。近 10 年,随着中国经济高速发展,大量相关研究表明大部分区域 NO₂ 柱浓度呈现上升趋势^[24-27,35-36]。

表1 中国部分地区 NO₂柱浓度年均值

时间	地区	NO ₂ 年平均值	年平均增长率	区域分布特征	数据来源
2005~2014年	北京	13.08	0.11		周春艳等 ^[36]
2005~2014年	天津	17.83	0.54		周春艳等 ^[36]
2005~2014年	石家庄	18.58	0.61		周春艳等 ^[36]
2005~2014年	山东省	13.34	0.58		周春艳等 ^[37]
2005~2013年	长江三角洲	9.72	0.48	苏南(17.27)>苏北(10.87)>浙东北(9.95)>浙西南(3.72)	高诚等 ^[27]
2005~2013年	珠江三角洲	7.40	-0.02	粤北(2.8)>粤东=粤西(2.5)	刘显通等 ^[28]
2004~2014年	乌鲁木齐	5.20			张兴赢等 ^[24]
2005~2015年	成都	10.31	0.42		本研究

注:以上数据均为 OMI 卫星数据,NO₂对流层柱浓度年均值单位为 $1 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$,年平均增长率单位为 $1 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。

2005~2015年成都地区 NO₂对流层柱浓度均值为 $10.31 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$,经计算其年平均增长率为 $0.42 \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。结合其他区域 NO₂对流层柱浓度的长期统计数据(表1),成都地区 NO₂对流层柱浓度水平明显低于京津冀、山东与长江三角洲中的苏南地区,但是高于乌鲁木齐和珠江三角洲地区。相比于京津冀和山东省等东部地区,成都地区地处西部,工业发展程度和密集程度较低。但是,成都地区地处中国西部人口最为集中、经济相对发达的四川盆地腹地,NO₂浓度在西部地区中处于偏高的水平。从年平均增长率来看,河北、天津和山东省增长较快,成都地区与长江三角洲持平。

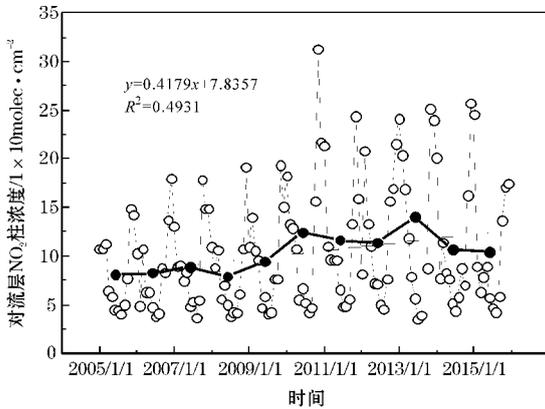


图2 成都地区 2005~2015 年对流层 NO₂柱浓度月平均值变化 (空心点为月均值,实心点为年均值)

从图2线性拟合趋势线可以看出,2005~2015年成都地区 NO₂对流层柱年平均浓度呈总体逐年上升的趋势。其中,2005~2013年波动上升的趋势明显,增长较快的年份为2008~2010年,2010年后增长较为平稳,2013年达到最高值后明显回落,与高诚等^[27]统计发现长三角浙北地区2011年达到峰值相比,回落时间较晚,体现了西部城市对经济发展趋势响应的滞后。除2010年11月 NO₂对流层柱浓度达到观测期间月平均极大值($31.28 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$)之外,2013年的月变化具有较大的振幅。分析发现,2013年3~5月成都地区 NO₂柱浓度($12.23 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$)明显

高于其他年份平均水平($8.63 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$),而2013年6月和7月 NO₂柱浓度锐减,其中7月达到研究期间的最低值($3.52 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$)。根据廖婷婷等^[38]分析,由于2013年6月全球财富论坛在成都举行。为保障该论坛的正常举行,论坛开幕前数月成都集中城市交通基础设施建设,导致市区中较多路段处于维修整治状态,特别是二环高架的修建,使全市路况长期拥堵,尾气排放量较大,因此从卫星遥感数据观测3~5月 NO₂柱浓度偏高。2013年6月,财富论坛举办期间,实施了市区停止施工、主要道路交通管制周边污染企业减产、停产等大气质量保障举措,并且二环高架开始通车,大大提高了城区通行效率,缓解交通压力,从而短期改善空气质量,NO₂随之降低。2008年北京奥运会期间,余环等^[39]和陈姗姗等^[40]发现北京地区 NO₂柱浓度显著低于其他年份同期以及京津冀周边城市天津和唐山。此外,气象因素也会明显影响 NO₂的柱浓度。尉鹏等^[41]统计分析全国各地降水量与地面 NO₂浓度相关性,发现由于降水对近地面 NO₂有清除作用,二者存在负相关关系。2013年7月,成都温江站记录降水量达到525.5 mm,为观测期间同月最高值,而 NO₂柱浓度下降至观测期间最低值。由此可见,短期内的人为排放量变化和气象因子变化会显著影响污染物浓度。

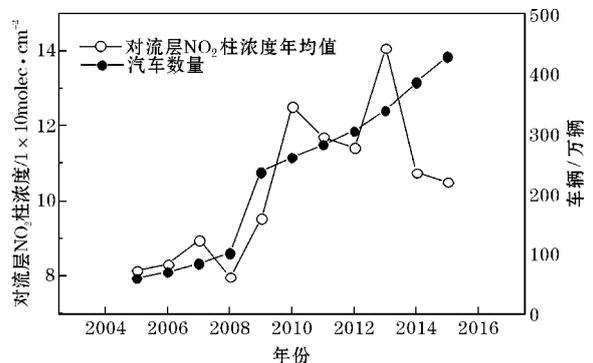


图3 成都地区 2005~2015 年 NO₂对流层柱浓度与机动车保有量相关性图

成都市是机动车人均拥有量较高的城市,其机动车保有量在副省级城市中排名第一。机动车尾气是城市中 NO₂ 排放的主要源之一,因此较多研究发现城市机动车保有量与 NO₂ 柱浓度正相关^[25-26,42]。成都地区人口与机动车保有量均逐年增加,汽车保有量在 2005 年为 59.50 万辆,于 2010 年增长到 259.90 万辆,于 2015 年已经增长到 428.60 万辆。如图 3 所示,成都地区机动车保有量 11 年来出现持续稳定增长,而在 2008~2009 年从 101.1 万辆上升至 235.9 万辆,增幅达到 133%;一方面机动车快速增加带来尾气的大量排放,一方面地区的交通道路建设无法容纳急速增长的机动车总量,特别是成都城区交通通行效率低下,尾气污染严重,因此在 2008~2010 年交通最为密集的城区北部 NO₂ 对流层柱浓度也大幅上升。随着城市基础设施建设进步,特别是立体交通的发展,NO₂ 柱浓度不再随机动车保有量增加而稳定上升。总体看来,汽车保有量与 NO₂ 对流层柱浓度相关性较好 ($R = 0.73$),与北京^[40]、西安^[40]、河北省^[43]等地一致。NO₂ 通过化学转化形成硝酸盐对城市雾霾的形成和能见度降低起到相当重要的作用,因此通过改善油品和发动机效率、完善公共交通等手段控制来自机动车尾气排放的 NO₂ 是改善城市空气质量的重要途径。

2.1.2 季节变化趋势

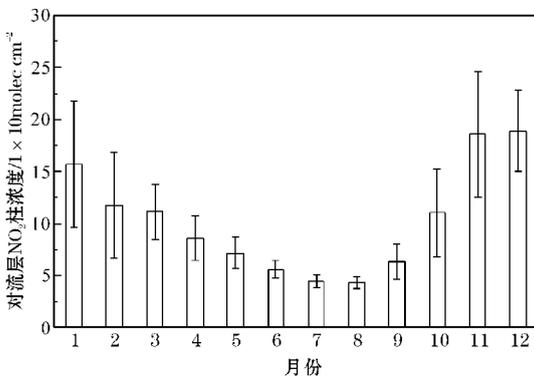


图 4 2005~2015 年对流层 NO₂ 柱浓度平均月变化趋势

如图 4 所示,成都地区 NO₂ 柱浓度通常在 11 月和 12 月达到峰值,在 7 和 8 月达到最低值,与京津冀^[26]、长江三角洲^[27]和珠江三角洲^[44]等地统计结果一致。已有研究表明,化石燃料燃烧以及机动车排放是 NO₂ 的两大污染源^[40],在冬季成都地区不存在燃煤取暖,因此 NO₂ 源很可能不存在显著的季节变化。但是,冬季气温低、降水少和太阳辐射小等气象因子导致 NO₂ 冬季保留时间比夏天长^[5]。此外,冬季容易形成逆温等不利于扩散的气象条件使污染物累积,而夏季的降水多对 NO₂ 的清除作用明显,因此成都地区冬季 NO₂ 柱浓度远高于夏季。

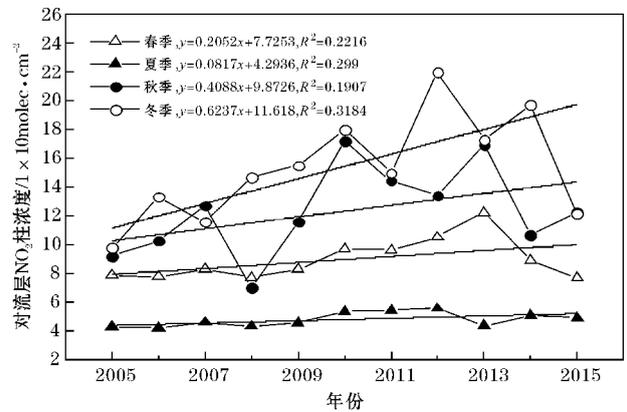


图 5 成都地区 2005~2015 年对流层 NO₂ 柱浓度季节性变化趋势

从季节变化趋势(图 5)可看出冬季 NO₂ 对流层柱浓度和增长率最高 ($15.36 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$, 年增长率为 $0.62 \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$), 秋季次之 ($12.33 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$, 年增长率为 $0.41 \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$), 春季 ($8.96 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$, 年增长率为 $0.21 \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$) 弱于秋季, 夏季最低 ($4.78 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$, 年增长率为 $0.08 \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$)。冬季 NO₂ 对流层柱浓度波动上升趋势显著, 在 2012 年达到对流层柱浓度最高值 $22.00 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。夏季上升趋势平缓, 在 2013 年出现最低值 $4.36 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

2.2 对流层 NO₂ 柱浓度空间分布特征

2.2.1 总体空间分布特征

成都地区是四川盆地对流层 NO₂ 柱浓度的高值区^[31]。成都地区工业占四川省 31.1%, 具有武侯科技园、郫县工业发展集中区、青羊工业集中区等近 20 个工业园区, 囊括冶金、机械、发电、药品等诸多不同类型工厂, 能耗巨大。其中消耗能源又以煤炭为主, 占了总消耗能源一半左右^[45], 所以对 NO₂ 排放有很大贡献, 导致成都地区对流层 NO₂ 柱浓度值偏高。从图 6 可以看到, 成都地区 2005~2015 年 NO₂ 柱浓度空间分布总体特征为城区北部及其西北部的新都、彭州和郫县最高, 并向四周辐射降低, 东西方向比南北方向递减率更高。城区北部为金牛区, 具有辐射整个西南地区的小商品贸易集散地(荷花池小商品市场), 也是全国性的交通枢纽(成都火车北站、城北客运站等), 同时也往来绵阳和德阳两个四川盆地相对发达的地级市的必经之地, 人流量和车流量巨大, 是该区域 NO₂ 浓度较大的主要原因。新都工业开发区在 1992 年创立, 而且是四川省政府批准成立的省级重点开发区, 从图 6 还能看出其污染一直颇为严重, 位于中心区域。对比 2014 年与 2015 年 NO₂ 对流层柱浓度空间分布图能明显看出彭州有明显上升, 这与 2014 年投产的彭州石化

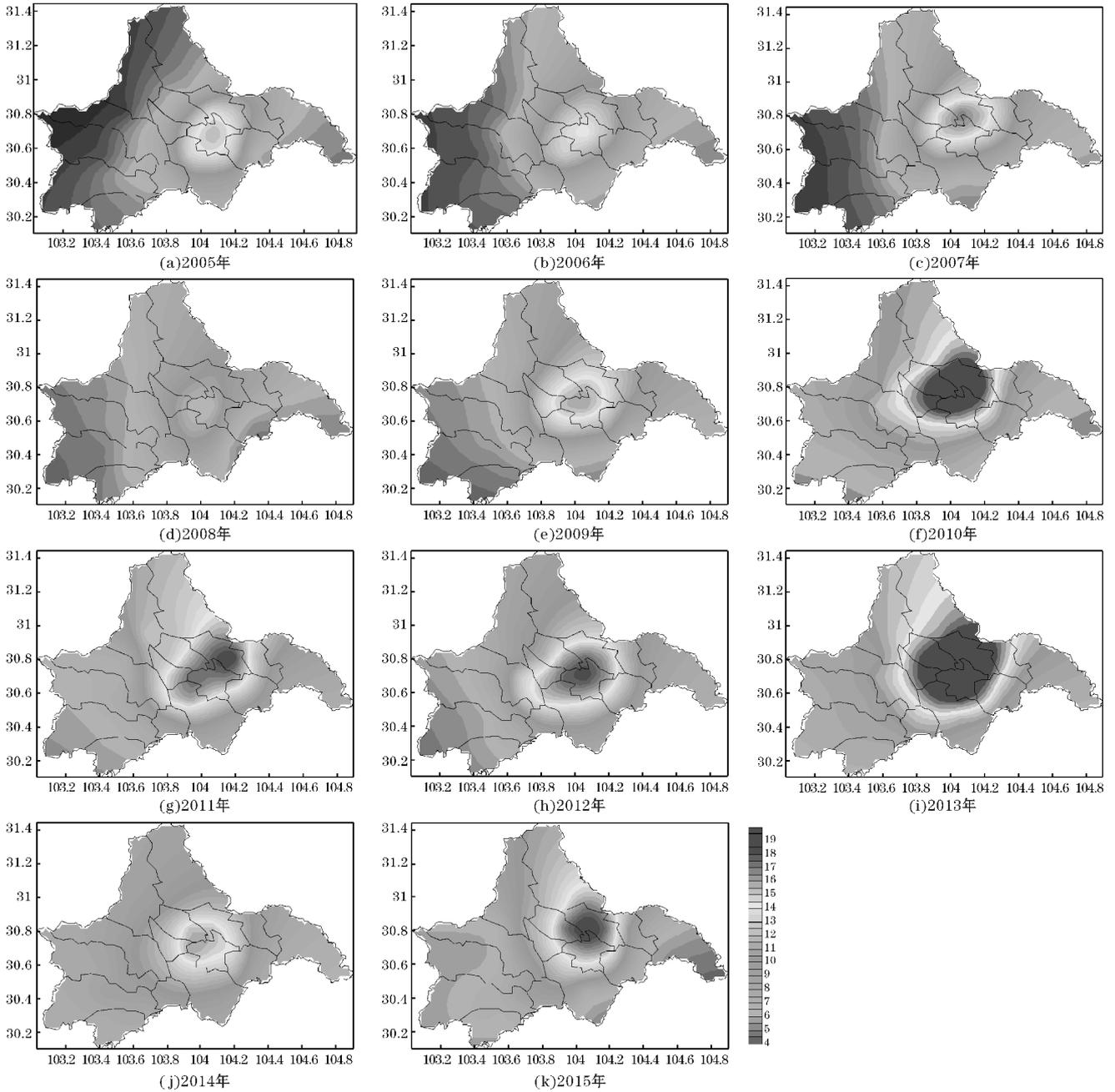


图6 成都地区 2005 ~ 2015 年对流层 NO₂ 柱浓度空间分布图

可能有一定关联。双流、龙泉驿、青白江区、温江为对流层 NO₂ 柱浓度较高,除来自城区的传输之外,与各建立卫星城、工业园区的建立和投产以及农业排放有关。如温江海峡工业园区内包含近 220 家企业,包括食品、建材、电子机械、生物医药等诸多产业,污染也颇为严重。都江堰、新津为中高值区域,植被良好、工业分布较少的邛崃、蒲江、大邑、崇州、金堂东部为浓度最低。

2.2.2 不同下垫面 NO₂ 柱浓度变化特征

城市中 NO₂ 的源主要包括汽车尾气排放和工业燃煤,因此城市中 NO₂ 源强度没有显著的季节变化;而在人口和工业较稀疏的农业区域,NO₂ 的来源主要来自土壤微生物排放和生物质燃烧^[46],而这两种源通常

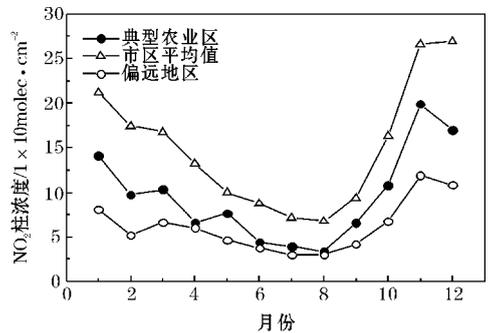


图7 2005 ~ 2015 年成都地区不同下垫面对流层 NO₂ 柱浓度月平均值

受到氮肥施用和水稻、油菜秸秆燃烧的影响而具有一定的季节性;在人类活动干扰较小的偏远地区,对流层

的 NO₂ 通常来自自然源和周边区域的输送,若以自然源排放为主导,NO₂ 浓度一般在夏季出现最大值^[26]。因此不同的下垫面,NO₂ 的月变化趋势可能存在差异。研究选取成都地区不同典型区域代表点(包括典型的城区、农业区和自然植被良好的偏远山区)进行对比,进一步分析不同下垫面的 NO₂ 分布特征。如图 7 所示,市区 NO₂ 浓度值高于典型农业区,而偏远地区对流层 NO₂ 柱浓度值最低。郑晓霞等^[26] 对京津冀平原地区和山地的 NO₂ 柱浓度进行对比,发现平原地区远高于山地,且由于山地的 NO₂ 自然源排放较大,山地 NO₂ 浓度季节变化特征与平原不同,即表现为四季差异比平原小。研究中偏远地区位于植被茂密人为活动较少的都江堰山区,春季和夏季柱浓度与典型农业区接近,冬季柱浓度最高但是远小于另外两类地区。总体来看,月变化的幅度明显小于市区和农业区,体现为受到自然源和人为源传输的共同影响。成都地区大面积农田试行油菜—水稻轮作制,每年 5 月和 10 月收割播种季节,产生大量秸秆。据统计,在秸秆资源化政策实施之前,成都地区秸秆常年产量 470 万吨,相当于 230 万吨标煤^[47]。大量的秸秆集中燃烧,产生大量烟尘和 NO₂ 等污染物,同时可能通过热岛效应烟卤效应向城市地区传输,影响城区空气质量。从图 7 可以看出,典型农业区在 3 月和 5 月出现小峰值,其中 5 月的小峰较为突出,且另外两种区域均没有出现该峰值。说明该月的排放峰值很可能是农业秸秆的燃烧引起的,而 5 月降多、空气扩散条件良好,因此秸秆燃烧影响的范围集中在局地,偏远地区和市区受影响不明显。10 月为油菜的收割季节,进入秋天之后,逆温天气频率增加,秸秆燃烧产生的污染物在上升过程中受到逆温层阻挡作用,扩散到市区和偏远地区,因此 3 种典型下垫面均出现 9、10 月 NO₂ 柱浓度快速攀升的现象。

2.3 空间变化趋势

研究中成都地区 NO₂ 柱浓度多年平均值为 $10.31 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$,肖钟湧等统计了 2010 年四川盆地对流层 NO₂ 柱浓度年平均为 $5.77 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。根据以上数据并结合研究的柱浓度数据分布,设定对流层 NO₂ 柱浓度 $< 6 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 为低值区域, $6 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 至 $14 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 为中值区域, $14 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 及以上浓度为高值区域,以此计算 2005~2015 年高、中、低值在成都地区的分布百分比变化。从图 8 可以看出研究期间成都地区高值区域范围波动上升趋势明显,低值区域范围明显缩减,高、中、低值区域分布形势与成都地区 2005~2015 年对流层 NO₂

柱浓度增长趋势相符,即成都对流层 NO₂ 柱浓度排放整体为上升趋势。2008 年整体柱浓度偏低,无高值区;2010 年后除 2012 年外均无低值区域,其中 2010~2013 年高值区范围最大,2014 年和 2015 年范围缩小。

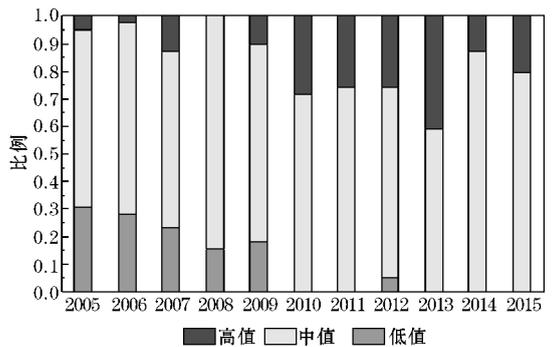
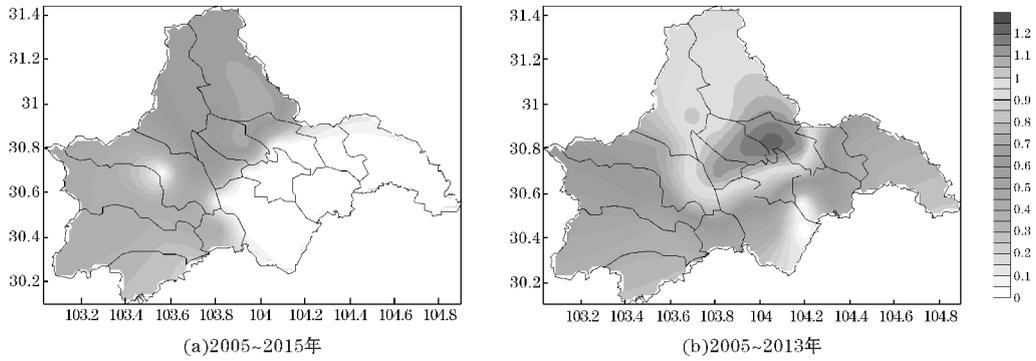


图 8 2005~2015 年成都地区 NO₂ 对流层柱浓度高、中、低值区域面积变化趋势

为进一步理清成都地区各行政区域的 NO₂ 浓度增长趋势,以便制定针对性的减排措施,将每个经纬度对应的 NO₂ 浓度与年际时间序列进行线性回归分析。研究 2.1.1 中得到结论,成都地区 NO₂ 对流层柱浓度与 2005~2013 年快速上升,2013~2015 有明显回落,因此将研究阶段划分为两段进行讨论。如图 9(a) 所示,从 2005~2015 年成都地区西部 NO₂ 柱浓度具有显著上升的趋势,而城区和东部区域未通过检验。时间范围缩小到 2005~2013 年快速上升期(图 9b),除少数格点未通过检验外,所有格点的 NO₂ 对流层均显著性增长,其中北部增长趋势明显强于南部,西部强于东部。增长率高值中心位于市区偏北。表 2 为通过显著性分析($P < 0.05$)的 OMI 对应格点对应的行政区。从表 2 中可以看出都江堰、郫县、彭州、新都、温江、邛崃、新津、蒲江、崇州、大邑等地,在 2005~2015 年拟合曲线的斜率均为正,其中以彭州和新都的增长率最大($0.71 \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$)。在柱浓度快速增长期(2005~2013 年),郫县、彭州、新都 and 温江的增长率均超过 $1 \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。综合来看,成都地区的 NO₂ 柱浓度高速增长区域均位于城区西北,因此高值区域向西北方向扩张。而 2013~2015 年各点呈下降趋势,只有少数点通过相关性显著性检验。由此可见,成都地区西北的行政区新都、彭州、郫县和温江是近 10 年来的 NO₂ 对流层柱浓度的高值区和增长率高值区。这与成都近年来在周边区县大力发展卫星城和大学城分不开,随着大量人口的迁入,带来巨大的能源消耗,此外以上区域均为农业发达的区域,季节性农田土壤微生物排放和秸秆燃烧带来 NO₂ 的集中排放,城市/工业和农业排放的叠加,使以上区域 NO₂ 柱浓度上升显著。

图9 成都地区2005~2015年和2005~2013年对流层NO₂柱浓度增长趋势图

(图中白色区域未通过显著性检验)

表2 2005~2015年不同时间段二氧化氮柱浓度线性拟合比较

地区	2005~2015年		2005~2013年		2013~2015年	
	$y=ax+b$	R^2	$y=ax+b$	R^2	$y=ax+b$	R^2
都江堰	$y=0.66x-1312.599$	0.625	$y=0.97x-1948.686$	0.790	$y=-1.09x+2197.062$	0.501
郫县	$y=0.66x-1316.556$	0.484	$y=1.05x-2103.561$	0.688	$y=-2.07x+4188.702$	0.516
彭州	$y=0.71x-1405.781$	0.551	$y=1.08x-2156.560$	0.757	$y=-1.20x+2426.385$	0.197
新都	$y=0.71x-1421.121$	0.416	$y=1.13x-2255.652$	0.639	$y=-1.18x+2391.661$	0.092
温江	$y=0.56x-1113.581$	0.377	$y=1.13x-2253.913$	0.834	$y=-2.89x+5833.878$	0.785
邛崃	$y=0.32x-643.010$	0.636	$y=0.40x-792.338$	0.668	$y=-0.77x+1558.288$	0.882
新津	$y=0.34x-684.960$	0.661	$y=0.50x-997.073$	0.823	$y=-1.06x+2142.155$	0.944
蒲江	$y=0.30x-600.924$	0.685	$y=0.36x-708.351$	0.701	$y=-0.67x+1346.935$	0.838
崇州	$y=0.49x-974.789$	0.505	$y=0.83x-1664.662$	0.841	$y=-1.82x+3667.624$	0.993
大邑	$y=0.38x-764.620$	0.477	$y=0.57x-1141.256$	0.669	$y=-1.32x+2661.490$	0.806

3 结论

(1) 成都地区对流层NO₂柱浓度年均值为 $10.31 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$, 年上升率为 $0.42 \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 峰值在11月和12月, 最低值在7月和8月; 由于降水、逆温和大气稳定度等原因, 成都地区冬季($15.36 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$) > 秋季($12.33 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$) > 春季($8.96 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$) > 夏季($4.78 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$); 2005~2015年成都地区对流层中NO₂柱浓度呈波动上升趋势, 2005~2013年上升趋势较大, 2013~2015年出现下降趋势。成都地区对流层NO₂柱浓度分布特征为成都城区北部为高值中心, 向周边递减; 高值中心柱浓度随年份波动, 中值和高值范围有逐年扩大趋势。

(2) 不同类型下垫面的月变化趋势不同, 农业地区受季节性的秸秆燃烧影响较大。受到工业布局调整、农业季节性排放和局地环流辐合区的综合影响, 新都及彭州市NO₂对流层柱浓度增长率最大, 都江堰、郫县增长趋势较为明显。机动车尾气排放是城市中NO₂排放的主要源之一。因此, 有关部门应该注意对增长快速的区域实施监控, 针对性地该区县工业排放源、生物质燃烧和机动车尾气排放进行治理, 以保证区域空气质量的改善。

(3) NO₂对流层柱浓度与气象条件有相关性, 但

是由于四川盆地地势复杂, 且受到局地环流的影响, 有待进一步研究。

致谢: 感谢成都信息工程大学人才引进科研启动项目(376309)和高原大气与环境四川省重点实验室开放课题(PAELK-2015-Y2)对本文的资助。

参考文献:

- [1] 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J]. 气象, 2007, 33(7): 4-7.
- [2] Andreas V, Hans-Werner P, Norbert H, et al. Inorganic trace gases and peroxy radicals during BERLIOZ at Pabstthum: An investigation of the photo-stationary state of NO_x and O₃[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(4).
- [3] Xue L K, Wang T, Gao J, et al. Ground-level ozone in four Chinese cities: precursors, regional transport and heterogeneous processes [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2014, 14(23): 13175-13176.
- [4] Stevenson D S, Dentener F J, Schultz M G, et al. Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D8): 263-269.
- [5] Beirle S, Platt U, Wenig M, et al. Weekly cycle of

- NO₂ by GOME measurements: A signature of anthropogenic sources. *Atmos Chem Phys* [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2003, 3(6): 2225–2232.
- [6] 祁悦. 基于卫星和地基观测的中亚干旱区对流层 NO₂ 及水汽的时空分布研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 4–6.
- [7] Schwarzf J. Particular air pollution and chronic respiratory disease [J]. *Environment Research*, 1993, 62(1): 7–13.
- [8] Lee D S, Köhler I, Grobler E, et al. Estimations of global no_x emissions and their uncertainties [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(12): 1735–1749.
- [9] Bahm K, Khalil M A K. A new model of tropospheric hydroxyl radical concentrations [J]. *Chemosphere*, 2004, 54(2): 143–166.
- [10] Teklemariam T A, Sparks J P. Leaf fluxes of NO and NO₂ in four herbaceous plant species: The role of ascorbic acid [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(12): 2235–2244.
- [11] Pan, Wang. Redefining the importance of nitrate during haze pollution to help optimize an emission control strategy [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 141: 197–202.
- [12] 金敏, 安兴琴, 王郁. 基于 OMI 遥感数据估算全国各省 NO₂ 排放 [C]. 中国气象学会年会, 2012.
- [13] 林伟立, 徐晓斌. 卫星遥感 NO₂ 资料地面验证对中国大气本底观测的潜在需求 [J]. *气象*, 2011, 37(5): 571–575.
- [14] Weber M, Dhomse S, Wittrock F, et al. Dynamical Control of NH and SH Winter/Spring Total Ozone from GOME Observations in 1995–2002 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(11): 389–401.
- [15] Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, et al. The global ozone monitoring experiment: Mission concept and first scientific results [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1999, 56(2): 16–23.
- [16] Lee C, Richter A, Lee H, et al. Impact of transport of sulfur dioxide from the Asian continent on the air quality over Korea during May 2005 [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(7): 1461–1463.
- [17] Wuttke M W, Noel S, Skupin J, et al. SCIAMACHY on ENVISAT: instrument monitoring and calibration two years after launch [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2004: 5570.
- [18] Krotkov NA, McInden C A, Li C, et al. Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, 16(7): 4605–4629.
- [19] Hayer C S, Wadge G, Edmonds M, et al. Sensitivity of OMI SO₂ measurements to variable eruptive behaviour at Soufrière Hills Volcano, Montserrat [J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2016, 312: 1–10.
- [20] Anselmi M, Buonfrate D, Espinoza A G, et al. Overview of the O3M SAF GOME-2 operational atmospheric composition and UV radiation dataproducts and data availability [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2016, 9(2): 383–407.
- [21] Hao N, Valks P, Loyola D, et al. Operational O3M-SAF trace gas column products: GOME-2 ozone, NO₂, BrO, SO₂ and CH₂O [C]. 38th COSPAR Scientific Assembly. 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010: 14.
- [22] Zhang Q, Streets D G, He K, et al. NO_x emission trends for China, 1995–2004: The view from the ground and the view from space [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D22): 449–456.
- [23] Richter A, Burrows J P, Nüss H, et al. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space [J]. *Nature*, 2005, 437(7055): 129–132.
- [24] 张兴赢, 张鹏, 张艳, 等. 近 10 a 中国对流层 NO₂ 的变化趋势、时空分布特征及其来源解析 [J]. *中国科学*, 2007, 37(10): 1409–1416.
- [25] 高晋徽, 朱彬, 王言哲, 等. 2005~2013 年中国地区对流层 NO₂ 分布及变化趋势 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(8): 2307–2318.
- [26] 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, (12): 1938–1945.
- [27] 高诚, 张超, 余树全. 2005–2013 年长江三角洲地区对流层 NO₂ 时空变化特征 [J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(5): 691–700.
- [28] 刘显通, 郑腾飞, 万齐林, 等. OMI 遥感广东省对流层 NO₂ 的时空分布特征及人类活动影响分析 [C]. 中国气象学会年会 s6 大气成分与天气、气候变化, 2014.
- [29] Tao J, Zhang L, Engling G, et al. Chemical composition of PM_{2.5} in an urban environment in Chengdu, China: Importance of springtime dust storms and biomass burning [J]. *Atmospheric Re-*

- search, 2013, 122(3):270-283.
- [30] 柯伯俊. 四川省大气污染源排放清单研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
- [31] 肖钟湧, 江洪. 四川盆地大气 NO₂ 特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(11):1782-1788.
- [32] 李昕翼, 肖国杰, 白爱娟, 等. 成都地区降水时空分布变化[J]. 气象科技, 2011, 39(4):417-422.
- [33] 杨振放, 李金荣, 张骏, 等. 地下水位的两种估值方法比较[J]. 地球科学与环境学报, 2003, 25(3):76-80.
- [34] 王敏, 邹滨, 郭宇, 等. 基于 BP 人工神经网络的城市 PM_{2.5} 浓度空间预测[J]. 环境污染与防治, 2013, (9):63-64.
- [35] R J v d A, Peters D H M U, Eskes H, et al. Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D12):1-10.
- [36] 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, (3):474-475.
- [37] 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.
- [38] 廖婷婷, 王珊, 王莉莉, 等. 2013 年成都财富论坛期间空气质量状况分析研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1):271-278.
- [39] 余环, 王普才, 宗雪梅, 等. 奥运期间北京地区卫星监测 NO₂ 柱浓度的变化[J]. 科学通报, 2009, (3):299-304.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 辛名威, 袁金国, 马晶晶. 基于 OMI 卫星数据的河北省对流层 NO₂ 垂直柱浓度时空变化研究[J]. 湖北农业科学, 2014, (10):2290-2295.
- [44] 刘显通, 郑腾飞, 万齐林, 等. OMI 遥感珠三角城市群 NO₂ 的时空分布特征及人类活动影响分析[J]. 热带气象学报, 2015, 31(2):193-201.
- [45] 张志军, 周蓉生. 成都市工业区大气环境污染状况研究[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11(3):56-59.
- [46] Penner J E, Atherton C S, Dignon J, et al. Tropospheric nitrogen: A three-dimensional study of sources, distributions, and deposition[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1991, 96(D1):959-990.
- [47] 袁亚章, 沈超, 蔡良俊. 成都市农作物秸秆综合利用现状与途径分析[J]. 现代农业科技, 2015, (6):251-252.

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Troposphere NO₂ Columns in Chengdu Region during 2005-2015

ZHANG Xiao¹, AI Jie¹, JIANG Wan-ting¹, TAN Yu-long¹, LIAO Ting-ting¹, SUN Yang²

(1. Plateau Atmospheric and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (LAPC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: According to the remote sensing data obtained from Ozone Monitoring Instrumentsatellite, the study analyzed the spatiotemporal distribution of troposphere NO₂ column and its variation from January 2005 to December 2015 in Chengdu region. It shows that the annual average of tropospheric NO₂ column was 10.31×10^{15} molec · cm⁻² during study period. Its rising rate in average was 0.42 molec · cm⁻² · yr⁻¹, with the most significant trend in regions northwest of the urban area. It was observed that tropospheric nitrogen dioxide columns reached their maximum in November and December, and minimum in July and August. As for spatial distribution, the highest concentration of NO₂ column was observed in urban area and north of it and lowest in mountainous area, and the agriculture region was effected by biomass burning probably.

Key words: atmospheric chemistry; satellite remote sense; tropospheric NO₂ columns; Chengdu region; spatiotemporal distribution