

# 基于 OMI 数据的成渝城市群 对流层 NO<sub>2</sub> 浓度遥感监测<sup>1</sup>

朱文东<sup>1,2,3</sup>, 周廷刚<sup>1,2\*</sup>, 李洪忠<sup>3</sup>, 许燕燕<sup>1,2,3</sup>, 张兰<sup>1,2</sup>

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室,  
重庆 400715;

3. 中国科学院深圳先进技术研究院数字所空间信息中心, 广东 深圳 518055)

**【摘要】:** 利用 Aura 卫星的 OMI (Ozone Monitoring Instrument) 传感器最新版对流层 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度数据产品, 结合线性拟合、趋势分析和空间自相关分析等方法, 系统分析了 2005–2017 年成渝城市群对流层 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度的时空特征及变化趋势。结果表明: OMI 对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度数据与成渝城市群 NO<sub>2</sub> 地面监测数据变化趋势基本一致, 且存在良好的相关性; 时间上, 2005~2012 年 NO<sub>2</sub> 年均柱浓度增加明显, 增幅达 52.38%, 2012 年后呈下降趋势。NO<sub>2</sub> 柱浓度季节变化明显, 浓度水平基本为: 冬季>秋季>春季>夏季。NO<sub>2</sub> 柱浓度月均值具有类似于正弦函数的周期性, 1 年一个周期, 低值出现在每年的 7、8 月, 高值出现在 11、12 和 1 月; 空间上, 经济较发达地区的 NO<sub>2</sub> 浓度大于经济欠发达地区。2005~2012 年 99.58% 的区域 NO<sub>2</sub> 浓度上升, 2012–2017 年 80.50% 的区域 NO<sub>2</sub> 下降, 但是成渝城市群边缘的山区度依然呈增长趋势。成都、重庆对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度具有明显的局部空间正相关特性。

**【关键词】:** OMI 数据; 对流层 NO<sub>2</sub> 浓度; 时空特征; 空间自相关; 成渝城市群

**【中图分类号】:** X511 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2019)09-2239-12

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201909022

NO<sub>2</sub> 是一种重要的大气痕量气体, 它不仅是臭氧的重要前体物, 也是形成硝酸性酸雨、酸雾和光化学烟雾的主要污染物之一<sup>[1]</sup>。中国的迅速发展, 能源需求量日益增加, 导致“三废”排放量明显加大, 其中就包括氮氧化物。中国已经成为全球大气 NO<sub>2</sub> 浓度最高的三大地区之一<sup>[2]</sup>。机动车污染已成为中国空气污染的重要来源, 近几年京津冀地区空气质量总体改善, 但是 NO<sub>2</sub> 气体平均浓度下降幅度远低于其他污染物。经过 40 年的改革开放, 我国社会经济得到了快速发展, 中国的城市群是伴随国家新型工业化和新型城镇化发展到较高阶段的必然产物<sup>[3]</sup>。成渝城市群作为西部地区经济发展好、人口集中的区域, 工业发达, 大气污染物的排放量较高。又由于该区域位于四川盆地, 所以污染物不易稀释扩散, 成为大气污染较为严重的地区<sup>[4]</sup>。前人的研究结果表

<sup>1</sup>收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-04-27

**基金项目:** 国务院三峡办三峡后续工作库区生态与生物多样性保护专项项目“重庆库区重要支流(涪陵-巫山段)水生生境状况调查与评估”(500000201BB5200002)

**作者简介:** 朱文东(1994~), 男, 硕士研究生, 主要从事生态环境与国土资源遥感监测. E-mail: 920867804@qq.com

\* 通讯作者 E-mail: zhoutg@163.com

明四川盆地 NO<sub>2</sub> 大气浓度在中国范围内属于较高值区域<sup>[5~11]</sup>。

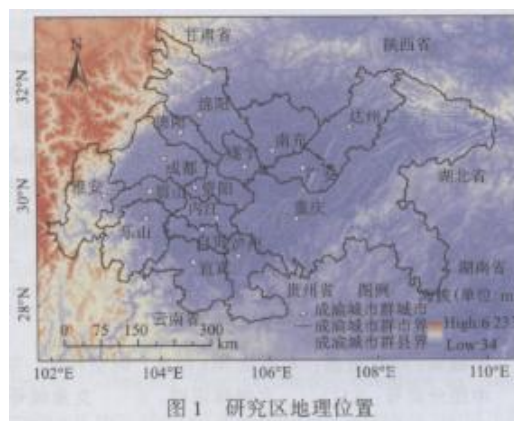
大气中 NO<sub>2</sub> 气体浓度的监测方式主要有地面站点观测和卫星遥感反演两种方法。地面监测 NO<sub>2</sub> 技术不断完善，站点数量不断增加，时空分辨率得到提高，但仍然难以获得大尺度的空间上连续的度观测数据。相对于地面监测方法，卫星遥感技术的应用弥补了这一局限性<sup>[12]</sup>。遥感数据不仅具有较高的时空分辨率，还具有大尺度、数据均一性好、成本低等优势，所以得到了国内外学者的广泛应用<sup>[13]</sup>。遥感监测大气 NO<sub>2</sub> 柱浓度始于欧美，其痕量气体传感器主要有 GOME (the Global Ozone Monitoring Experiment, 1996~2003 年)、SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography, 2002~2012 年)、OMI (Ozone Monitoring Instrument, 2004 年至今)、GOME-2 (METOP-A) (2007 年至今)、GOME-2 (METOP-B) (2013 年至今) 等。近年来，许多学者利用这些遥感数据对中国及局部区域大气 NO<sub>2</sub> 柱浓度进行了研究。如李莹等 (2006) 利用地基 DOAS 观测反演 NO<sub>2</sub> 总量，与 SCIAMACHY 传感器的 NO<sub>2</sub> 数据进行比较，进而利用卫星观测资料来研究全球-区域-城市尺度上 NO<sub>2</sub> 分布特征和变化趋势<sup>[14]</sup>，江文华等<sup>[15]</sup>利用 GOME 卫星数据分析 1996~2002 年北京市上空 NO<sub>2</sub> 对流层柱浓度特征，Richter 等<sup>[16]</sup>利用 GOME 和 SCIAMACHY 数据分析美欧日中等 7 个国家及地区的 NO<sub>2</sub> 浓度变化特征，发现美欧一些地区 NO<sub>2</sub> 浓度在下降，而中国区的 NO<sub>2</sub> 浓度在增加，Vander 等<sup>[17]</sup>研究了 1996~2005 年中国对流层 NO<sub>2</sub> 浓度变化和趋势，张兴赢等<sup>[6]</sup>分析了中国对流层 NO<sub>2</sub> 变化趋势和时空分布特征以及来源。此外，王跃启等<sup>[6]</sup>利用 OMI 数据研究了中国 8 个自然区对流层 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度分布变化特征，肖钟涌等<sup>[18]</sup>分析了四川盆地对流层 NO<sub>2</sub> 柱密度和总 NO<sub>2</sub> 柱密度的时空特征，程苗苗等<sup>[1]</sup>对浙江省不同土地类型上空对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度变化特征进行了研究，张杰等<sup>[19]</sup>分析了平原地区对流层柱浓度时空变化特征，刘显通等<sup>[13]</sup>、符传博等<sup>[20]</sup>、周春艳等<sup>[21~23]</sup>分别对中国不同区域对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度变化特征进行了分析，Chen 等<sup>[24]</sup>为了研究不同传感器的 NO<sub>2</sub> 数据产品在中国的差异，融合了 GOME、SCIAMACHY、OMI 传感器数据，牟福生等<sup>[25]</sup>、张莹等<sup>[26]</sup>对地基监测数据与 OMI 观测数据进行了验证，两者具有较好的一致性。

有学者研究了四川盆地对流层 NO<sub>2</sub> 柱密度和总 NO<sub>2</sub> 柱密度的时空特征，以及成都<sup>[27]</sup>、重庆<sup>[28]</sup>等城市 NO<sub>2</sub> 浓度特征，但将成渝城市群作为一个整体来对其 NO<sub>2</sub> 污染及时空分布的系统研究严重不足。本文基于 OMI 传感器反演的大气对流层 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度数据，使用地面观测数据对最新的数据产品进行可靠性检验，对成渝城市群 2005~2017 年对流层 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度进行遥感监测，分析讨论成渝城市群对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度变化特征，为区域性大气污染治理提供一定的科学依据。

## 1 研究区域与研究数据

### 1.1 研究区概况

成渝城市群位于四川盆地，国家规定的范围包括四川省的成都、自贡、泸州、德阳、绵阳 (除北川县、平武县)、遂宁、内江、乐山、南充、眉山、宜宾、广安、达州 (除万源市)、雅安 (除天全县、宝兴县)、资阳等 15 个市，重庆市的渝中、万州、黔江、涪陵等 27 个区 (县) 以及开县、云阳的部分地区，总面积 18.5 万 km<sup>2</sup><sup>[32]</sup>。为了方便分析与统计，本文并未完全采用国家规定的成渝城市群的界线，而是采用完整的市级界线作为研究区范围 (图 1)。



## 1.2 数据来源

2004年7月15日,搭载在 Aura 卫星上的臭氧监测仪(Ozone Monitoring Instrument, OMI)发射升空。OMI 由荷兰、芬兰和 NASA 合作研制,主要用于对地球臭氧层、空气质量和气候变化的观测和研究。OMI 拥有3个探测通道,波长范围为270~500 nm,轨道扫描宽度为2 600 km,空间分辨率为13 km×24 km,过境时间为地方时13:45左右,每天围绕地球14~15圈,一天可覆盖全球一次<sup>[29]</sup>。OMI 对流层 NO<sub>2</sub>垂直柱浓度数据是基于405~465 nm 窗口探测信号,采用差分吸收光谱算法(DOAS)反演获取<sup>[30, 31]</sup>。

本文使用的最新版 OMI 对流层 NO<sub>2</sub>垂直柱浓度月均值产品数据,来源于荷兰皇家气象研究所的 TEMIS 网(<http://www.temis.nl>)。数据版本为 QA4ECV version1.1, ESRI grid 格式,空间分辨率 0.125°×0.125°,时间范围 2005~2017 年,单位 10<sup>15</sup> molec/cm<sup>2</sup>。16 个城市地面平均观测数据来源于中国环境监测总站全国城市空气质量实时发布平台,行政边界数据由国家基础地理信息系统网站提供。

## 2 研究方法

### 2.1 趋势分析

为了定量反映整个研究区对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度空间变化趋势,本文采用一元线性回归分析法来计算每个像元随时间变化的回归斜率,记为  $\theta_{slope}$ 。其具体公式如下<sup>[33]</sup>:

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n ix_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:  $n$  为监测的年数;  $x_i$  为第  $i$  年的 NO<sub>2</sub> 均值。回归斜率  $\theta_{slope} > 0$  表明此像元值在 13 年间呈现增加趋势,反之则呈现减少趋势。依据  $\theta_{slope}$  大小进行分级:明显减少 ( $\theta_{slope} < -0.1$ );轻度减少 ( $-0.1 < \theta_{slope} < -0.01$ );基本不变 ( $-0.01 < \theta_{slope} < 0.01$ );轻度增长 ( $0.01 < \theta_{slope} < 0.1$ );明显增长 ( $\theta_{slope} > 0.1$ ) 5 个等级,能够直观反映成渝城市群近 13 年 NO<sub>2</sub> 柱浓度的年际变化趋势。

### 2.2 空间自相关分析

本文使用全局 Moran 's I 指数检验对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度的全局空间自相关性,全局 Moran 's I 指数大于 0,表明研究对象呈现空间正相关,其值越大表明 NO<sub>2</sub> 浓度值的空间聚集性越强;全局 Moran 's I 指数小于 0,表明 NO<sub>2</sub> 浓度值呈现空间负相关,其值越小则表明观测值的空间离散性越强。其具体公式如下<sup>[34]</sup>:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}, \quad S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

式中:  $n$  为研究区的 1436 个像元;  $x_i, x_j$  分别是像元  $i, j$  的 NO<sub>2</sub> 年均浓度值;  $\bar{x}$  为所有像元的均值;  $W_{ij}$  为像元  $i$  和  $j$  之间的空间权重,临近取 1,非临近取 0。同时还需要对 Moran 's I 指数进行显著性检验,统计量公式为:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{V(I)}} \quad (3)$$

式中：Z(I)表示全局 Moran ' s I 指数的显著性水平；E(I)表示全局 Moran ' s I 指数的数学期望；V(I)表示全局 Moran ' s I 指数的方差。全局自相关分析只能了解总体空间自相关情况，会掩盖局部状态的不稳定性。因此，本文还使用局部自相关指数来探究研究区对流层 NO<sub>2</sub>浓度在局域地区的聚集和异质性。局部 Moran ' s I 指数计算公式如下：

$$I_i = \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) \quad (4)$$

式中：参数的含义同(2)式，局部 Moran ' s I 指数结合显著性水平 Z(I)，默认 P 值为 0.05，可以将像元划分为 4 种局域分布形式。若 I<sub>i</sub>显著为正且 Z(I) > 0，表示高值像元被同是高值的像元所包围（高-高分布）；若 I<sub>i</sub>显著为负且 Z(I) < 0，表示低值像元被高值像元包围（低-高分布）；若 I<sub>i</sub>显著为正且 Z(I) < 0，表示低值像元被同是低值像元所包围（低-低分布）；若 I<sub>i</sub>显著为负且 Z(I) > 0，表示高值像元被低值像元所包围（高-低分布）。

### 3 结果与分析

#### 3.1 OMI 对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度数据适用性分析

OMI 传感器过境时间为地方时 13 : 45 左右。为保证验证的可靠性，从全国城市空气质量实时发布平台，获取 2015 年 1 月 ~2017 年 12 月成渝城市群 16 个城市以每小时为单位的 NO<sub>2</sub>地面平均观测数据，选取 14 : 00 的平均观测值统计为月尺度数据，选取对应城市矢量行政边界来提取各城市的 OMI 传感器 NO<sub>2</sub>月均柱浓度。

成渝城市群 16 个城市对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度值和 OMI 对流层 NO<sub>2</sub>浓度值的线性拟合结果见表 1。研究区两大主要城市成都和重庆主城的相关性最好，R<sup>2</sup>均大于 0.70，相关系数 R 大于 0.85，泸州、内江、宜宾、广安、绵阳、乐山、德阳、眉山次之，相关系数 R 在 0.75-0.80 之间。相关性稍低的是雅安，相关系数 R 为 0.517，所有城市均呈现中高度相关且通过了显著性检验，表明 OMI 对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度数据与地面实测数据存在着良好的相关性。图 2 成都市 2015~2017 年地面监测值和 O1MI 数据值对比情况表明二者变化趋势基本一致，NO<sub>2</sub>浓度峰值出现在冬季，而在夏季浓度值较低。由此可见，本文中使用的最新 OMI 对流层 NO<sub>2</sub>数据（版本号：QA4ECVVersion1.1）能够反映成渝城市群大气中 NO<sub>2</sub>浓度的分布及变化特征。此外，二者拟合结果，可能与数据本身特点和研究区气象条件有关。林伟立等<sup>[35]</sup>研究表明 NO<sub>2</sub>浓度越低测量的相对误差数据达到 0.88，而有云时两者的相关性下降差较大；牟福生等<sup>[25]</sup>研究合肥大气 NO<sub>2</sub>时发现卫星观测受云量影响较大，无云情况下地面观测数据达到 0.88，而有云时两者的相关性下降了 9%。

表 1 成渝城市群 16 个城市地面 NO<sub>2</sub>浓度和 OMI 对流层 NO<sub>2</sub>浓度线性拟合

城市	拟合度 R <sup>2</sup>	相关系数 R	显著性 P	城市	拟合度 R <sup>2</sup>	相关系数 R	显著性 P
成都	0.789	0.888	0.0000	德阳	0.595	0.772	0.0000
重庆主城	0.744	0.863	0.0000	眉山	0.566	0.752	0.0000
泸州	0.649	0.806	0.0000	自贡	0.522	0.722	0.0000
内江	0.639	0.800	0.0000	达州	0.501	0.708	0.0000
宜宾	0.636	0.798	0.0000	资阳	0.405	0.636	0.0000
广安	0.608	0.780	0.0000	遂宁	0.341	0.584	0.0001

绵阳	0.606	0.778	0.0000	南充	0.331	0.575	0.0002
乐山	0.605	0.778	0.0000	雅安	0.267	0.517	0.0012

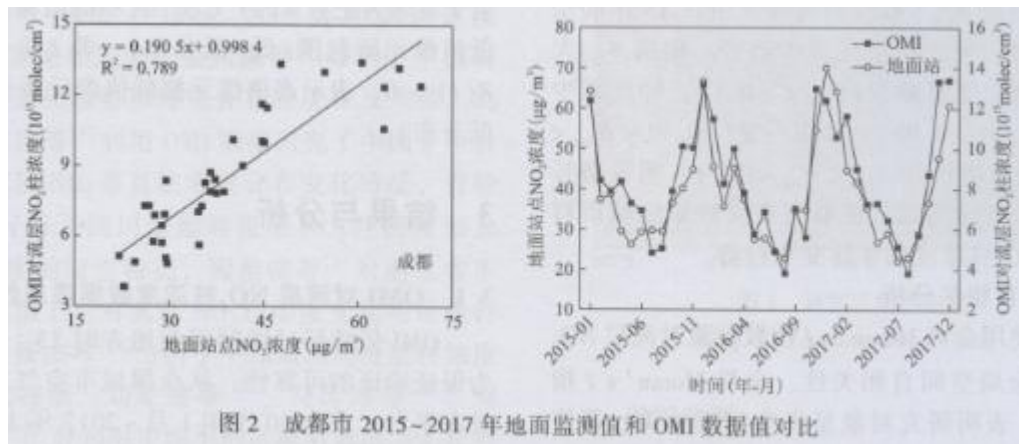
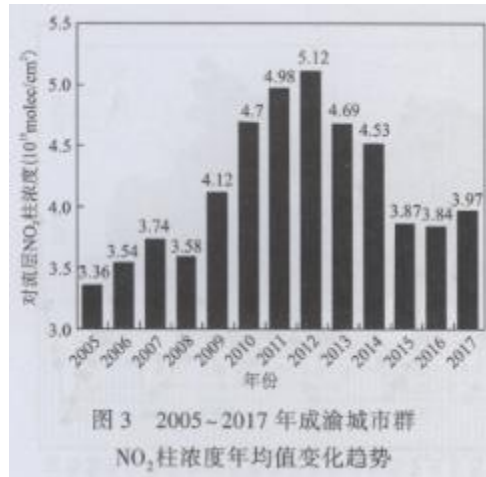


图2 成都市 2015-2017 年地面监测值和 OMI 数据值对比

### 3.2 成渝城市群对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度的时间变化

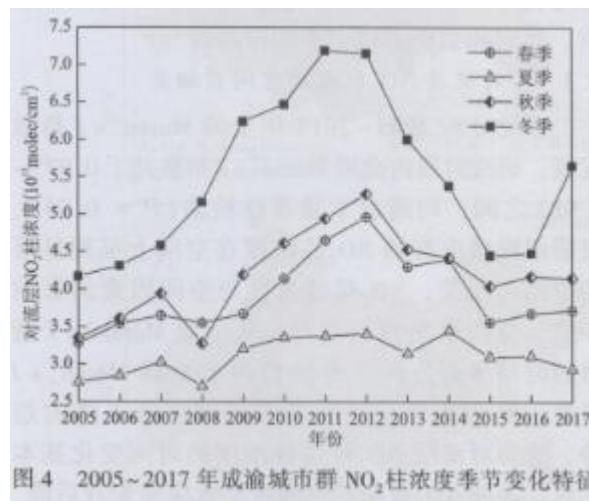
#### 3.2.1 对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度的年变化

13 年间, 对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度变化较大。年均浓度最低值出现在 2005 年, 为  $3.36 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$ , 最高值出现在 2012 年 (京津冀、长三角、山东省年均浓度最高值出现在 2011 年), 为  $5.12 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$  (图 3)。参考相关文献发现 2008 年中国大部分地区对流层 NO<sub>2</sub> 呈现下降趋势, 这与 2008 年北京奥运会污染防控有关。因此, 除 2008 年外, 2005-2012 年均呈现上升趋势, 且增幅达到 52.38%, 这主要与成渝城市群内经济增长和各种能源消耗增加导致 NO<sub>2</sub> 排放量增加有密切关系。2013-2016 年呈现逐渐降低的趋势, 其中 2014~2015 年对流层 NO<sub>2</sub> 浓度急剧下降, 相比于 2012 年降幅达到 24.41%。2017 年小幅度上升, 相较于 2016 年增幅为 3.39%, 这可能与 2017 年 12~次年 1 月超过 10 天的大范围区域性污染有关。2012 年 9 月 27 日国务院批复了《重点区域大气污染防治“十二五”规划》, 成渝城市群成为重点防治区域之一, 2013 年 9 月 10 日国务院又印发并执行大气污染防治行动计划 (简称《大气十条》), 川渝地区机动车限制排放办法的出台与实施等是研究区对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度下降的关键因素, 也表明成渝城市群较好的响应了国家大气污染防治政策。通过统计数据发现 2005~2013 年川渝地区 GDP 增速变化与成渝城市群对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度变化趋势相近, 此外产业结构进一步优化, 2012 年第三产业增速超过第一、二产业且在 2015 年第三产业 GDP 总量超过了第二产业。煤炭消耗量从 2013 年开始持续先降, 化肥使用量从 2012 年开始出现下降趋势。2005~2017 年均降雨量、气温与成渝城市群对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度的变化没有显著相关性, 因此研究区内的 NO<sub>2</sub> 浓度下降的主要原因是政策和产业结构调整, 能源消费结构调整等社会经济因素。



### 3. 2. 2 对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度的季节变化

本文根据气象划分法划分四季，3~5 月为春季，6~8 月为夏季，9~11 月为秋季，12~次年 2 月为冬季。图 4 表明：NO<sub>2</sub> 季节变化明显，且变化趋势与年均值变化趋势基本一致。



NO<sub>2</sub> 浓度水平基本为：冬季>秋季>春季>夏季，其中，冬季浓度水平明显高于其他三个季节(图 4)。2011、2012 年的冬季对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度值较高，分别为  $7.19 \times 10^{15}$  和  $7.15 \times 10^{15}$  molec/cm<sup>2</sup>。2017 年冬季 NO<sub>2</sub> 明显增加，为  $5.65 \times 10^{15}$  molec/cm<sup>2</sup>，相比 2016 年冬季增幅达到 26.17%，这也能解释为何 2017 年 NO<sub>2</sub> 年均值呈现增加趋势。除了冬季外，春季，夏季和秋季在 2008 年均呈现下降趋势，其中秋季下降最为明显且低于春季。春季与秋季的变化特征浓度水平相差较小，秋季略高于春季。夏季浓度值最低且变化较小。此结果与前人研究中国其他区域结果基本相同。但是也与一些学者的研究结果并不一致。肖钟涌等<sup>[18]</sup>研究 2004~2010 年四川盆地大气 NO<sub>2</sub> 时认为四川盆地对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度水平最大值出现在春季，最小值出现在冬季。He 等<sup>[36]</sup>指出中国东部对流层 NO<sub>2</sub> 最大值出现在冬季，而西部最大值出现在夏季。Yienger 等<sup>[37]</sup>认为边远地区农业排放贡献了 50%的氮氧化物，而且和气温、降水有密切联系，夏季高温导致更多氮氧化物排放。成渝城市群夏季高温多雨，降水量约占全年的 44%，春季约占 24%，秋季约占 27%，冬季占 5%。降水能够起到对污染物的清除和冲刷作用，降低污染物浓度<sup>[21]</sup>。成渝城市群内风速水平为：春季>夏季>秋季>冬季<sup>[4]</sup>，且风速主要在 0~3m/s，整体平均风速约 1.3m/s，成渝城市群静风和小风天气多发，占比达到 87.3%，这是导致该地区大气污染较为严重的主要因素之一<sup>[38]</sup>。因此，成渝城市群的气象条件是造成该地区对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度季节特征的主要因素之一。

### 3. 2. 3 对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度的月变化

对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度月均值具有类似于正弦函数的周期性，1 年一个周期，低值出现在每年的 7、8 月，高值出现在每年的 11、12 和 1 月（图 5）。位于四川盆地内的成渝城市群，每年的 7、8 月，太阳辐射较强，高温多雨，降低了大气中的湿度；每年的 11 月末~次年 2 月初，气温低，大气层稳定，时常出现逆温，太阳辐射较弱，大气 NO<sub>2</sub>不易扩散稀释，长时间存留在大气中，极易导致 NO<sub>2</sub>高值出现。极小值出现在 2005 年 8 月，为  $2.44 \times 10^{15}$  molec/cm<sup>2</sup>，2011 年 12 月达到 13 年中的极大值，为  $9.05 \times 10^{15}$  molec/cm<sup>2</sup>。此外，13 年间对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度变化中呈现出许多小的波峰和波谷。周春艳等<sup>[22]</sup>认为每年 2、3 月出现的小波峰和波谷的变化与中国农历新年期间工厂排放减少有关。肖钟涌等<sup>[18]</sup>认为 4 月大气中 NO<sub>2</sub>出现小峰值可能是由于农业生产的影响。大气 NO<sub>2</sub>浓度变化是多种因素相互作用的结果，以人为排放为主导的成渝城市群，大气 NO<sub>2</sub>浓度与人类活动强弱有密切联系。

### 3. 3 成渝城市群对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度的空间变化

#### 3. 3. 1 对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度最大值分布

成渝城市群对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度在 2010、2011 和 2012 年出现最大值的范围较大，分别占 11.77%、30.71%和 36.91%，其中 2012 年范围最大（图 6）。其余年份均没有超过 6.5%。2005 年至 2009 年的 5 年的栅格数仅为 0.7%，范围最小。2010 年出现最大值的区域分布在成渝城市群的北部，例如遂宁市大部分地区、德阳市的中江县以及绵阳、南充，和达州下辖的一些区县。2011 年 NO<sub>2</sub>最大值区域主要分布在重庆市。2012 年 NO<sub>2</sub>最大值范围覆盖了成渝城市群大部分城市。2013~2017 年的 5 年间，NO<sub>2</sub>最大值区域基本分布在成渝城市群的边缘山区地带，这可能与山区经济发展、人类活动强度增加有关。冬季最大值覆盖了成渝城市群的大部分区域，而春季、夏季与秋季最大值均位于城市群边缘地区。这种分布特征可能与当地污染源、地形和气象条件等自然因素有关。

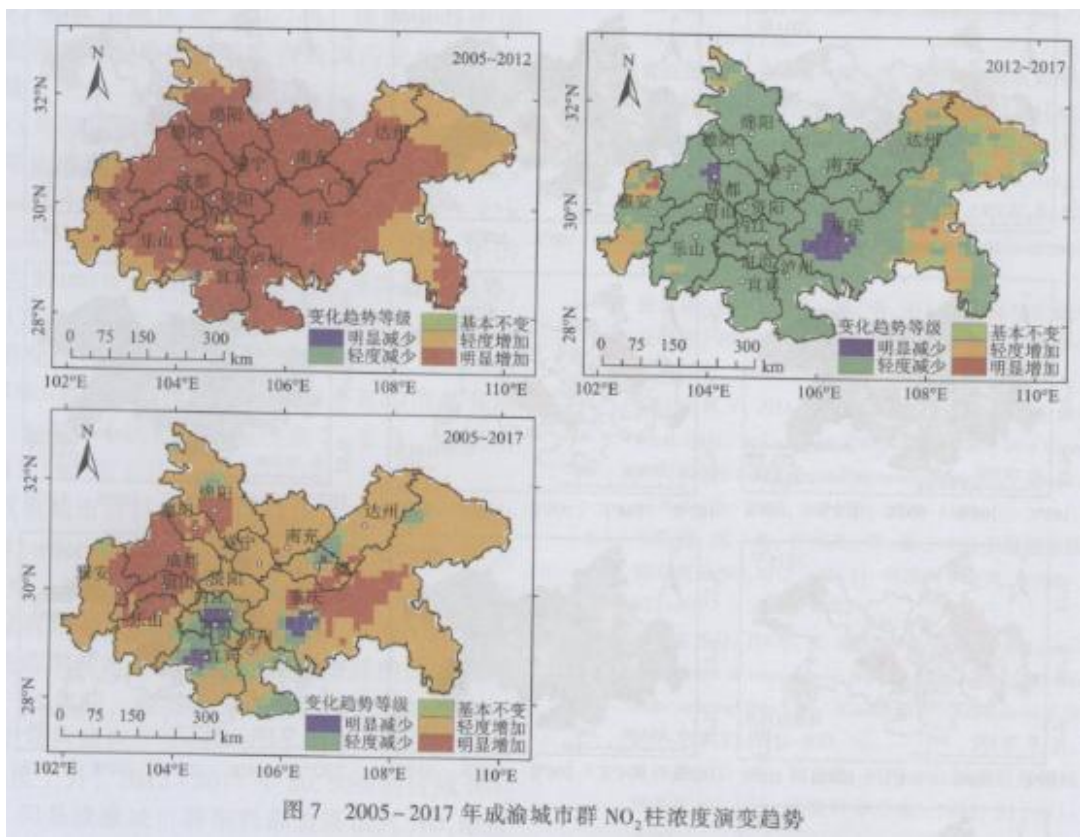
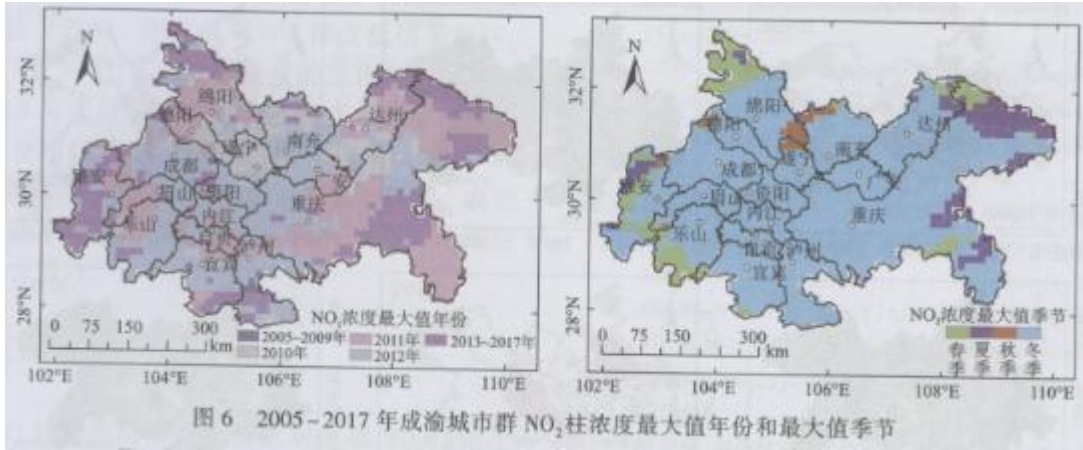
#### 3. 3. 2 对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度变化趋势

成渝城市群近 13 年来 NO<sub>2</sub>变化趋势存在明显的空间差异性（图 7）。2005~2012 年 99.58%的栅格像元呈现出增长趋势，明显增加栅格分布在成渝城市群的核心区域以及渝东南。2012~2017 年，由于出台相应的大气防控措施，以及产业结构调整，能源消费结构优化等，成都主城区，重庆主城区中部和西南部地区呈现明显减少趋势，其余大部分地区呈现轻度减少。但城市群西部，东部边缘地区呈现增加趋势。就整体而言，成渝城市群大部分地区的 NO<sub>2</sub>浓度值在 2005~2017 年间依然呈现增加趋势，其中以成都、德阳、眉山以及重庆主城区西北部等地区 NO<sub>2</sub>浓度值呈明显增加趋势，栅格占比为 17.48%。NO<sub>2</sub>柱浓度基本不变区域较少，栅格占比仅为 5.43%。减少区域总的栅格占比为 8.57%，主要分布在内江、自贡、宜宾和重庆主城中部和西南部。

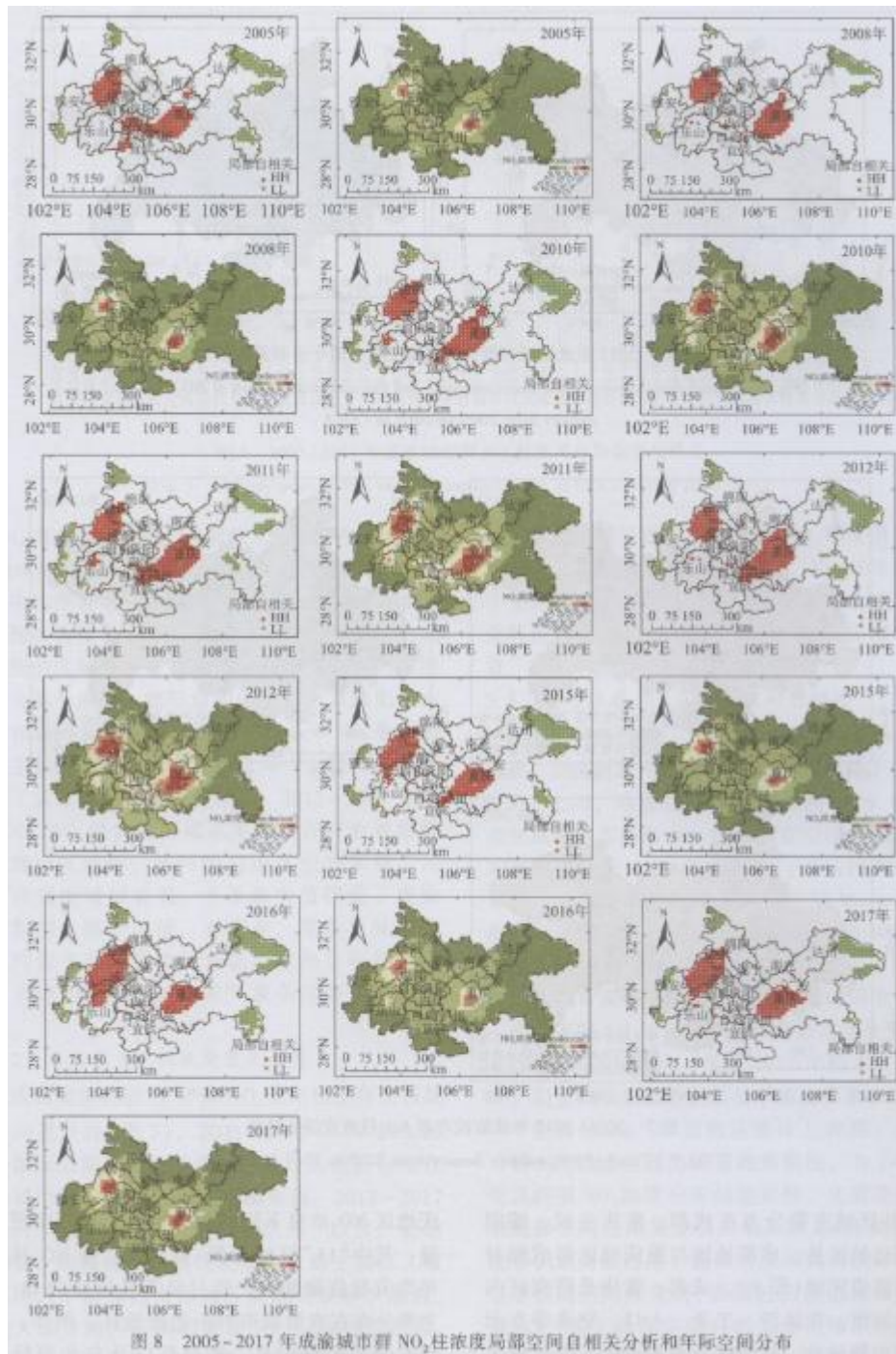
#### 3. 3. 3 对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度空间自相关

系统分析 2005~2017 年全局 Moran's I 指数发现：研究时段内全局 Moran's I 指数处于 0.975~0.982 之间，均通过了显著性检验（P = 0.05），表明成渝城市群的 NO<sub>2</sub>柱浓度在空间上呈现显著的空间正相关，NO<sub>2</sub>排放浓度与空间因素的影响一致，空间聚集特征明显。从全局 Moran's I 指数的时间序列分析得出 2012 年的全局 Moran's I 指数达到极大值，随后基本呈现逐年下降的趋势，这与对流层 NO<sub>2</sub>年均柱浓度的时间变化基本一致，表明度的空间聚集效应呈先升后降，在 2012 年达到峰值。虽然 2012 年后 NO<sub>2</sub>浓度下降，但空间聚集效应仍然处于高度集聚状态。

全局 Moran's I 指数从整体上表明了成渝城市群 NO<sub>2</sub>浓度呈现出显著的集聚性。为了获得研究区内部度分布的差异性，还需要空间化的局部空间自相关分析。Anselin Local Moran's I 能够识别高值密度、低值密度和具有统计学上的显著性的空间异常值（高值包围低值或低值包围高值）。基于局部空间自相关分析结果，将呈现显著局部自相关的像元划分为四种局域分布形式。其中“HH”区域为高-高区域，即 NO<sub>2</sub>柱浓度年均值高值聚集区。



HH 区域主要分布在成都、重庆主城、德阳及其周边的区县，成都地区与重庆地区形成相对独立的高值区域（图 8）。成都、重庆是研究区内的特大城市，在经济、工业、人口、交通等方面占据着主导地位，排放了大量的 NO<sub>2</sub>，因此成为 NO<sub>2</sub> 浓度高度聚集区域。在 2015 年成都地区 HH 区域范围大于了重庆地区 HH 区域范围，表明重庆地区 NO<sub>2</sub> 浓度下降的效果较之于成都市更为明显；其中“LL”区域为低-低区域，即 NO<sub>2</sub> 柱浓度年均值低值聚集区。通过显著性检验的 LL 区域主要分布在成渝城市群的边缘地区，例如：重庆市东南部的酉阳县、秀山县以及东北部的城口县、巫山县、巫溪县，绵阳市的平武县，雅安市的宝兴县、石棉县等。这些地区属于远离城市的农村和山区，污染源以自然或农业排放为主且 NO<sub>2</sub> 排放量较小，因此成为 NO<sub>2</sub> 浓度低值聚集区。此外，HH 与 LL 区域像元数量的变化趋势基本相同。图 8 局部自相关中的空白区域为未呈现显著的局部空间自相关区域。在 13 年内未出现高-低 (HL) 或低-高 (LH) 分布特征的异常像元，表明成渝城市群对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度具有强烈的局部空间正相关特性。



## 4 结论

OMI 传感器反演的最新版对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度逐月产品数据 (QA4ECV version1. 1) 对高值区域的 NO<sub>2</sub>柱浓度反演效果较好, 其中成都 R<sup>2</sup> 为 0. 789, 重庆主城区 R<sup>2</sup> 为 0. 744。该数据与中国环境监测总站的地面实时监测数据的变化趋势基本一致。

13 年间成渝城市群对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度变化较大。年均浓度最低值出现在 2005 年, 为  $3. 36 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$ , 最高值出现在 2012 年, 为  $5. 12 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$ , 除 2008 年外, 2005 ~2012 年的增幅达 52. 38%, 2012 年后呈现逐渐降低的趋势, 但 2017 年相比于 2016 年增加 3. 39%。NO<sub>2</sub>柱浓度季节变化明显, NO<sub>2</sub>浓度水平基本为: 冬季>秋季>春季>夏季。对流层 NO<sub>2</sub>柱浓度月均值具

有周期性, 1年一个周期, 低值出现7、8月, 高值出现在11、12和1月。

成渝城市群对流层NO<sub>2</sub>柱浓度在2010、2011和2012年出现最大值的范围较大, 分别占11.77%、30.71%和36.91%, 其余年份最大值范围均没有超过6.5%。2013–2017年NO<sub>2</sub>柱浓度最大值范围基本上分布在成渝城市群的边缘山区地带。13年间, 经济较发达地区的NO<sub>2</sub>浓度大于经济欠发达地区。2005–2012年99.58%的区域NO<sub>2</sub>浓度上升, 2012~2017年80.50%的区域NO<sub>2</sub>下降, 但是成渝城市群西部边缘山区NO<sub>2</sub>浓度依然呈增长趋势。全局Moran's I指数表明对流层NO<sub>2</sub>柱浓度具有明显的空间集聚特征, 局部空间自相关分析表明HH区域主要分布在成都、重庆主城及其周边的区县, LL区域主要分布在成渝城市群的边缘山区。

#### 参考文献:

[1]程苗苗, 江洪, 陈健, 等. 2005–2009年浙江省不同土地类型上空对流层NO<sub>2</sub>变化特征[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1249–1259. CHENG M M, JIANG H, CHEN J, et al. Characters of the OMI NO<sub>2</sub> column densities over different ecosystems in Zhejiang Province during 2003–2009[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(5): 1249–1259.

[2]章吴婷, 张秀英, 刘磊, 等. 多源卫星遥感的华北平原大气度时空变化[J]. 遥感学报, 2018, 22(2): 335–346. ZHANG W T, ZHANG X Y, LIU L, et al. Spatial variations in NO<sub>2</sub> trend in north China plain based on multi-source satellite remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(2): 335–346.

[3]方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1130–1144. FANG C L. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China Acta Geographica sinica, 2014, 69(8): 1130–1144.

[4]曹庭伟, 吴锴, 康平, 等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1275–1284. CAO T W, WU K, KANG P, et al. Study on ozone pollution characteristics and meteorological cause of Chengdu–Chongqing urban agglomeration [J] Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(4): 1275–1284.

[5]张兴赢, 张鹏, 张艳, 等. 近10a中国对流层NO<sub>2</sub>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. ZHANG X Y, ZHANG P, ZHANG Y, et al. The trend, sea-seasonal cycle, and sources of tropospheric NO<sub>2</sub> over China during 1997–2006 based on satellite measurement[J]. Science in China Series D, 2007, 50(12): 1877–1884.

[6]王跃启, 江洪, 张秀英, 等. 基于OMI卫星遥感数据的中国对流层NO<sub>2</sub>时空分布[J]. 环境科学研究, 2009, 22(8): 932–937. WANG Y Q, JIANG H, ZHANG X Y, et al. Temporal-spatial distribution of tropospheric NO<sub>2</sub> in China using OMI satellite remote sensing data [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(8): 932–937.

[7]肖钟涌, 江洪, 程苗苗. 利用OMI遥感数据研究中国区域大气NO<sub>2</sub>[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2080–2090. XIAO Z Y, JIANG H, CHENG M M. Characteristics of atmospheric NO<sub>2</sub> over China using OMI remote sensing data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(10): 2080–2090.

[8]张强, 耿冠楠, 王斯文, 等. 卫星遥感观测中国1996年–2010年氮氧化物排放变化[J]. 科学通报, 2012, 57(16): 1446–1453. ZHANG Q, GENG G N, WANG S W, et al. Satellite remote sensing of changes in NO<sub>x</sub> emissions over China: 1996–2010[J]. Science in China, 2012, 57(16): 1446–1453.

- 
- [9]李龙, 施润和, 陈圆圆, 等. 基于 OMI 数据的中国 NO<sub>2</sub>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. LI L, SHI R H, CHEN Y Y, et al. Spatio-temporal characteristics of NO<sub>2</sub> in China and the anthropogenic influences analysis based on OMI data[J]. Journal of Geo-information science, 2013, 15(5) : 688-694.
- [10]高晋徽, 朱彬, 王言哲, 等. 2005-2013 年中国地区对流层二氧化碳分布及变化趋势[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8) : 2307-2318. GAO J H, ZHU B, WANG Y Z, et al. Distribution and long-term variation of tropospheric NO<sub>2</sub> over China during 2005 to 2013 [J]. China Environmental Science, 2015, 35(8) : 2307-2318.
- [11]姚尧, 李江风, 胡涛, 等. 中国城市度的时空分布及社会经济驱动力[J]. 资源科学, 2017, 39(7): 1383-1393. YAO Y, LI J F, HUT, et al. Spatio-temporal variation in NO<sub>2</sub> concentrations and socioeconomic driving forces in Chinese cities[J]. Resources Science, 2017, 39(7) : 1383-1393.
- [12]周春艳, 厉青, 王中挺, 等. 2005 年-2014 年京津冀对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度时空变化及影响因素[J]. 遥感学报, 2016, 20(3) : 468-480. ZHOU C Y, LI Q, WANG Z T, et al. Spatio-temporal trend and changing factors of tropospheric NO<sub>2</sub> column density in Bei-jing-Tianjin -Hebei region from 2005 to 2014[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(3) : 468-480.
- [13]刘显通, 郑腾飞, 万齐林, 等. OMI 遥感珠三角城市群 NO<sub>2</sub> 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. LIU X T, ZHENG T F, WAN Q L, et al. Spatio-temporal characteristics of NO<sub>2</sub> in concentrated PRD urban districts and analysis of anthropogenic influences based on OMI remote sensing data [ J]. Journal of Tropical Meteorology, 2013, 31(2): 193-201.
- [14]李莹. 地基 DOAS 观测反演的 NO<sub>2</sub> 柱总量与 SCIAMACHY 卫星 NO<sub>2</sub> 数据的比较及 NO<sub>2</sub> 时空分布研究[D]. 北京: 北京大学, 2006. LI Y. Study of distribution property of NO<sub>2</sub> from SCIAMACHY and comparison between satellite and ground based NO<sub>2</sub> column by DOAS observation [D]. Beijing : Peking University, 2006.
- [15]江文华, 马建中, 颜鹏, 等. 利用 GOME 卫星资料分析北京大气 NO<sub>2</sub> 污染变化[J]. 应用气象学报, 2006, 17(1): 67-72. JIANG W H, MA J Z, YAN P, et al. Characterization of NO<sub>2</sub> pollution changes in Beijing using GOME satellite data [ J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(1) : 67-72.
- [16]RICHTER A, BURROWS J P, NUSZ H, et al. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space[J]. Nature, 2005, 437(7055) : 129-132.
- [17]VANDER A R J, PETERS D H M U, ESKEES H, et al. Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO<sub>2</sub> over China[J]. Geophys Res, 2006, 111: D12317.
- [18]肖钟涌, 江洪. 四川盆地大气 NO<sub>2</sub> 特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(11) : 1782-1788. XIAO Z Y, JIANG H. Characteristics of atmospheric NO<sub>2</sub> over Sichuan basin [J]. China Environmental Science, 2011, 31(11) : 1782-1788.
- [19]张杰, 李昂, 谢品华, 等. 基于 OMI 数据的中国中部平原地区 NO<sub>2</sub> 对流层柱浓度 2007-2014 年时空变化特征分析[J]. 大气与环境光学学报, 2016, 11(4): 288-298. ZHANG J, LI A, XIE P H, et al. Spatiotemporal variation characteristics of NO<sub>2</sub> tropospheric column concentration over Chinese central region based on OMI data during 2007 - 2014[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2016, 11(4) : 288-298.

- 
- [20]符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 基于卫星遥感的海南地区对流层  $\text{NO}_2$  长期变化及成因分析 [I]. 环境科学学报, 2016, 36(4) : 1402-1410. FU C B, TANG J X, DAN L, et al. Satellite-based long-term trends analysis in tropospheric  $\text{NO}_2$  over Hainan Island and its possible reason [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36 (4): 1402-1410.
- [21]周春艳, 厉青, 何颖霞, 等. 山东省近 10 年对流层  $\text{NO}_2$  柱浓度时空变化及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2281-2290. ZHOU C Y, LI Q, HE Y X, et al. Spatial-temporal change of tropospheric  $\text{NO}_2$  column density and its impact factors over Shandong province during 2005 ~ 2014 [J]. China Environmental Science, 2015, 35(8) : 2281-2290.
- [22]周春艳, 王桥, 厉青, 等. 近 10 年长江三角洲对流层  $\text{NO}_2$  柱浓度时空变化及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(7) : 1921-1930. ZHOU C Y, WANG Q, LI Q, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of tropospheric  $\text{NO}_2$  column density of Yangtze River Delta in the decade [J]. China Environmental Science, 2016, 36(7) : 1921-1930.
- [23]周春艳, 厉青, 张丽娟, 等. 遥感监测 2005-2015 年中国  $\text{NO}_2$  时空特征及分析影响因素 [J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(6) : 1190-1200. ZHOU C Y, LI Q, ZHANG L J, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of tropospheric  $\text{NO}_2$  column density of China during 2005-2015 [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(6) : 1190-1200.
- [24]CHEN D, FENG Y, ZHANG X. Comparison of variability and change rate in tropospheric  $\text{NO}_2$  column obtained from satellite products across China during 1997 - 2015 [J]. International Journal of Digital Earth, 2017, 10: 1-15.
- [25]牟福生, 李昂, 谢品华, 等. 合肥 2013 年 8 月-2014 年 7 月  $\text{NO}_2$  对流层柱浓度分析及与卫星对比 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(4) : 1042-1047. MOU F S, LI A, XIE P H, et al. Study of tropospheric  $\text{NO}_2$  VCD from August 2013 to July 2014 with Ground-Based MAX-DOAS in Hefei and comparison with OMI observation [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(4) : 1042-1047.
- [26]张莹, 袁金国, 王莹莹, 等. 基于 OMI 数据的京津冀地区对流层  $\text{NO}_2$  浓度遥感监测 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2) : 443-452. ZHANG Y, YUAN J G, WANG Y Y, et al. Remote sensing monitoring of tropospheric  $\text{NO}_2$  density in Beijing-Tianjin-He-bei region based on OMI data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(2) : 443-452.
- [27]张潇, 艾洁, 蒋婉婷, 等. 成都地区 2005-2015 年对流层  $\text{NO}_2$  柱浓度趋势与时空分布 [J]. 成都信息工程大学学报, 2016, 31(6) : 656-664. ZHANG X, AI J, JIANG W T, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of troposphere  $\text{NO}_2$  columns in Chengdu region during 2005 - 2015 [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2016, 31(6) : 656-664.
- [28]王妮. 重庆主城区大气污染物时空变化及影响因素分析 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017. WANG N. Temporal and spatial variations of atmospheric pollutants and its influencing factors in Chongqing urban areas [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2017.
- [29]LEVELT P F, VAN DEN OORD G H J, DOBBER M R, et al. The ozone monitoring instrument [J]. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(5) : 1093-1101.
- [30]BOERSMA K F, ESKES H J, VEEFKIND J P, et al. Near-real time retrieval of tropospheric  $\text{NO}_2$  from OMI [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2007, 7: 2103-2118.

---

[31]陈良富, 顾坚斌, 王甜甜, 等. 近地面 NO<sub>2</sub>浓度卫星遥感估算问题[J]. 环境监控与预警, 2016, 8(3) : 1-5. CHEN L F, GU J B, WANG T T, et al. Scientific problems for ground NO<sub>2</sub> concentration estimation using DOAS method from satellite observation [J]. Environmental Monitoring and Fore-warning, 2016, 8(3): 1-5.

[32]国务院关于成渝城市群发展规划的批复[R]. 中华人民共和国国务院公报, 2016, 12: 27-28. The State council approved on the Chengyu urban agglomeration development planning [R]. The Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2016, 12: 27-28.

[33]张静怡, 卢晓宁, 洪佳, 等. 2000-2014 年四川省气溶胶时空格局及其驱动因子定量研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9) : 1514-1525. ZHANG J Y, LU X N, HONG J, et al. Quantitative study on temporal and spatial patterns of aerosol optical depth and its driving forces in Sichuan province during 2000-2014 [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(9) : 1514-1525.

[34]周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011 年中国 PM<sub>2.5</sub> 时空演变特征及驱动因素解析[J]. 地理学报, 2017, 72(11) : 2079-2092. ZHOU L, ZHOU C H, YANG F, et al. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM<sub>2.5</sub> in China between 2000 and 2011 [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(11) : 2079-2092.

[35]林立伟, 徐晓斌. 卫星遥感 NO<sub>2</sub>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): 571-574. LIN W L, XU X B. The demands on atmosphere background observations in China to meet the validations of NO<sub>2</sub> satellite remote sensing data[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(5): 571-574.

[36]HE Y J, Uno I, Wang Z F, et al. Variations of the increasing trend of tropospheric NO<sub>2</sub> over central east China during the past decade[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 4865-4876.

[37]YIENGER J J, LEVY II H. Empirical model of global soil-bio-genic NO<sub>2</sub> emissions [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(6D) : 11447-11464.

[38]曾胜兰, 王雅芳. 成都地区污染天气分型及其污染气象特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(Z1): 59-67. ZENG S L, WANG Y F. Researches of weather pattern and pollution meteorological characteristics in Chengdu area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(Z1) : 59-67.