

基于卫星高光谱遥感的2007年—2017年新疆地区 大气NO₂时空变化趋势分析

苏锦涛¹, 张成歆^{2*}, 胡启后³, 刘浩然⁴, 刘建国³

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026
2. 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026
3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031
4. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601

摘要 自2013年国务院颁布《大气污染防治行动计划》等大气综合治理政策以来,我国东部地区大气颗粒物等重要污染物得到了有效控制。伴随着我国能源政策的变化,西北地区在加大能源开发力度的同时,大气污染亦呈现加剧趋势,但在之前的研究中未得到重视。卫星遥感的监测手段较地面观测具有不受地域限制,观测时间长,观测污染物种类多等优势。其中,星载紫外-可见高光谱仪OMI自2005年在轨运行,在大气污染的时空变化趋势探测、排放源估计以及模式的同化和验证等科学应用中得到广泛应用。中国科学技术大学的卫星对流层NO₂柱浓度产品,通过对OMI原始测量光谱的二次标定和气体反演算法的关键优化,在与地基观测的结果对比验证中呈现良好的相关性,适合用于我国高气溶胶背景下的大气污染分析。结合中国科学技术大学OMI NO₂数据产品,我国新疆地区大气NO₂污染的时空分布特征得以表征。在2007年—2017年期间,新疆地区的NO₂污染集中分布于北疆,其中“乌鲁木齐—昌吉—石河子”城市群(乌昌石地区)与新疆总体NO₂水平月变化相关性很强(相关性系数 $r=0.942$, $p\text{-value}<0.01$)。新疆NO₂年际变化存在明显阶段性特征,与相关政策以及能源行业排放变化相符:2007年—2010年变化趋势不明显,2014年较2010年总体年平均浓度增长18.5%,其中乌昌石地区增长41.3%;2017年较2014年总体平均浓度下降26.4%,乌昌石地区下降42.8%。乌昌石地区由于石油化工企业,经济开发区等分布密集,成为NO₂污染的聚集区,与乌鲁木齐市,昌吉市NO₂变化具有强相关性($r=0.982$, $p\text{-value}<0.01$; $r=0.951$, $p\text{-value}<0.01$)。受采暖时期排放以及特殊气象条件控制,乌昌石地区NO₂污染峰值为12月,冬季污染尤其显著;在2007年—2016年采暖期间(每年10月—次年4月初),乌昌石地区NO₂水平有显著上升趋势(显著性水平 $\alpha=0.01$),在未来大气治理中需要格外关注。

关键词 卫星光谱遥感; 新疆; NO₂ 污染; 乌昌石地区

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)05-1631-08

引言

氮氧化物NO_x(包括NO₂和NO)在大气中是重要的反

应性痕量气体,是大气排放管控中需要重点关注的污染物。在对流层中,NO_x是臭氧以及二次气溶胶的重要前体物^[1],还会导致酸雨的形成^[2];在平流层中,NO_x通过 $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$, $\text{NO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2$ 的循环反应能催化臭氧分解,

收稿日期: 2020-05-20, **修订日期:** 2020-09-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0210002, 2018YFC0213104, 2016YFC0200404, 2016YFC0203302, 2017YFC0212800, 2019YFC0214702和2018YFC0213201),安徽省科技重大专项(18030801111),国家自然科学基金项目(41720501, 51778596, 41977184和41775025),美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23020301),国家大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0102和DQGG0205),国家高分辨率对地观测重大科技专项项目“环境保护遥感动态监测信息服务系统”(二期,05-Y30B01-9001-19/20-3)资助

作者简介: 苏锦涛,1999年生,中国科学技术大学地球和空间科学学院本科生 e-mail: ca40@mail.ustc.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: zcx2011@mail.ustc.edu.cn

同时通过 $\text{ClO} + \text{NO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{ClNO}_2 + \text{M}$ 等的反应抑制卤素导致的臭氧分解^[3]。氮氧化物通过呼吸作用会影响人体肺部功能,进而引发呼吸道等相关疾病危害健康^[4]。大气中 NO_x 来源分为自然与人为源:自然源主要包括生物质燃烧等,人为排放主要包括交通源,工业源,尤其是能源行业^[5]。

从 2011 年开始,我国开始淘汰落后产能,大力推广脱硫脱硝设备以及车辆尾气处理装置。2013 年《大气污染防治行动计划》(以下简称大气十条)出台后, NO_x 等一次污染物得到有效的控制,全国整体 NO_2 呈现下降趋势。在之前的研究中,已经有学者对中国 2005 年—2017 年的 NO_2 变化进行分析,发现东部地区,尤其是长三角等发达地区 NO_2 水平出现明显下降趋势,其中 2017 年京津冀、长三角、四川盆地分别相对 2012 年下降了 74.1%, 45.1%, 33.2%^[6-7]。伴随着我国“西电东送”、“西气东输”的能源政策实施以及相关能源基地的建设,新疆等地在加快能源开采加工的同时大气污染也逐渐加剧。

常用的大气污染监测手段有大气监测站的化学原位测量、基于光学遥感的地面雷达和光谱仪监测等。地面监测方法虽然在空气质量常规监测中具有重要作用,但由于空间覆盖有限,实时性不足,在较大空间尺度以及长时间范围的研究中存在不足。近十多年来逐步发展起来的卫星遥感观测手段具有不受地域限制,观测时间长,观测污染物种类多等优势,在最近的研究中已经得到广泛的使用^[8-10],在 NO_2 , SO_2 , O_3 , HCHO 等一次和二次大气污染物的观测中起到重要作用。近年以来,我国空气质量研究主要关注于我国京津冀、长三角、珠三角等东部热点污染区域,对于油气资源丰富而生态环境脆弱的西北地区关注较少。卫星 NO_2 遥感可以有效弥补这一短板,用于缺少长时间地面空气质量监测的新疆地区。

OMI 臭氧探测仪 (ozone monitoring instrument) 自 2005

年开始在轨运行,具有较高的探测信噪比和空间分辨率^[11] ($13 \times 24 \text{ km}^2$),已经被广泛用于大气污染的时空变化趋势探测、排放源估计以及模式的同化和验证等科学应用^[12-14]。基于 OMI 卫星原始光谱数据的中国科大 OMI NO_2 数据产品,在光谱和仪器函数定标、先验大气参数廓线输入等方面做了许多优化,在地基验证中取得了优于官方产品的一致性对比结果,因此更适合于中国地区 NO_2 污染趋势分析^[10, 15]。选取 2007 年—2017 年新疆地区的 OMI 观测对流层 NO_2 柱浓度数据,重点分析乌鲁木齐地区大气 NO_2 变化以及发展趋势,为国家能源战略调整以及新疆发展背景下的大气环境治理提供参考。

1 实验部分

1.1 卫星高光谱反演大气污染物原理

在卫星监测手段中,大气中的污染物成分可以简单通过朗伯比尔定律求解获取。但是通常因为测量光谱存在的波长偏移、拉伸和仪器函数变化等定标问题,以及大气辐射传输中的转动拉曼散射(Ring)等非线性效应的影响,需要对测量的大气天顶反照率光谱进行修正^[16]。图 1(a—j)给出了基于卫星测量的地球辐亮度和太阳辐照度光谱,以及实验室测得的痕量气体特征吸收谱线,在 405~460 nm 波段对大气中 NO_2 的差分光学吸收厚度进行非线性拟合的一个典型示例。在具体污染物反演中,由于测量出的大气光学吸收厚度不仅取决于痕量吸收气体的浓度,还与大气中的光子传输路径有关,所以需要利用大气辐射传输模式(RTM)计算有效光子路径与垂直路径的比值,即大气质量因子(AMF);然后通过 AMF 可以将测量光谱反演得到的气体 SCD(斜柱浓度)转化为 VCD(垂直柱浓度)。

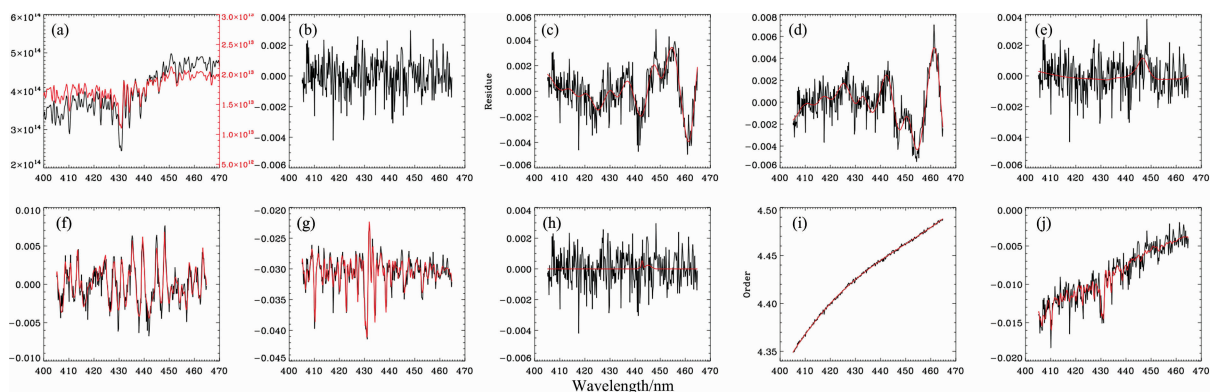


图 1 卫星 NO_2 光谱反演示例

(a): 原始光谱(黑)与参考光谱(红); (b): 残差; (c): O_2 ; (d): O_3 ; (e): O_4 ; (f): NO_2 ;
(g): Ring 效应; (h): H_2O 的测量与拟合曲线(黑与红); (i): 拟合多项式曲线; (j): 偏差曲线

Fig. 1 An example of NO_2 spectral retrieval from satellite

(a): The original spectrum (black), reference spectrum (red), measurement and fitting curve of (b): residual; (c): O_2 ;
(d): O_3 ; (e): O_4 ; (f): NO_2 ; (g): Ring effect; (h): H_2O (black and red); (i): Fitting polynomial; (j): Line offset

1.2 中国科大 OMI NO₂ 数据产品

OMI 是搭载在 NASA 地球观测系统 Aura 卫星上的四个探测器之一, 每天过境我国时间约为 13:30, 可以提供地球辐亮度和太阳辐照度的光谱测量^[11]。其中, OMI 搭载的二维 CCD(电荷耦合元件)可以分别记录入射光的光谱与空间信息, 光谱覆盖波段为 270~500 nm, 光谱分辨率约为 0.6 nm, 星下点的空间分辨率能达到 13×24 km²。本研究使用的 NO₂ 数据来源于中国科学技术大学基于 OMI 卫星原始光谱开发的、考虑中国高气溶胶背景的优化数据产品^[17-18]。前期的地基验证和对比实验研究表明, 中国科大的 OMI NO₂ 数据产品有着更高的精度, 适用于中国区域的大气污染物成分分析^[19-21]。

NO₂ 反演方法主要包括以下步骤: (1) 首先基于 OMILEvel1 原始光谱数据, 利用非线性最小二乘拟合的方法^[22] 获取 NO₂ 的 SCD(斜柱浓度); (2) 根据大气中平流层 NO₂ 柱浓度随经度变化梯度小, 以及在太平洋等背景区域的对流层 NO₂ 贡献可以忽略不计, 开发算法对整层柱浓度进行估计并扣除平流层贡献; (3) 使用辐射传输模式计算 NO₂ 的 AMF, 将 SCD 转化为 VCD(垂直柱浓度)。在将轨道数据网格化的过程中, 使用了 P 样条插值技术, 并过滤了云辐射量大于 0.6 或光谱反演残差较大的像元, 最终得到中国地区(70°—130°E, 15°—50°N) 每日 0.1°×0.1°分辨率的 NO₂ VCD 产品^[18]。

1.3 MEIC 人为排放源模型数据

MEIC(中国多尺度排放清单模型, <http://www.meicmodel.org>)是一套由清华大学维护的中国大气污染物和温室气体排放清单模型, 提供自 1990 年至今的相关污染物以及温室气体数据。通过整合亚洲排放清单^[23], 同时建立电厂排放数据库^[24], 提高机动车污染排放表征分辨率^[25], 模型可以提供高精度的人为排放数据。

本研究选择新疆地区 2008 年, 2010 年, 2012 年, 2014 年, 2016 年的网格化人为源 NO_x 年均数据(MEIC v. 1.3), 精度 0.25°×0.25°。通过对新疆总体地区进行人为源数据提取, 用于分析 NO₂ 变化成因, 其中由于 NO_x 的农业污染源在新疆影响甚微, 只考虑工业源, 交通源, 生活排放源以及能源排放源。

1.4 研究区域介绍

新疆维吾尔自治区(以下简称“新疆”)位于我国西北地区(73°40′—96°23′E, 34°22′—49°10′N), 矿产资源丰富, 其中石油预测资源量占全国陆上资源量的 30%, 天然气占 34%, 煤炭占 40%(图 2)。1997 年—2015 年期间, 新疆火电, 焦炭以及石油产量在全国产量的比重逐渐上升; 同时 2011 年—2016 年期间, 其 NO_x 和 SO₂ 在全国排放量的比重也呈现上升趋势。

“乌鲁木齐—昌吉—石河子”地区(以下称“乌昌石地区”)是 2013 年国家公布重点培育的城市群区域; 2012 年, “乌昌石”三市经济生产总值之和占新疆总产值的 33% 以上; 2006 年—2017 年期间, 新疆各经济开发区在乌鲁木齐市及周边聚集分布。乌昌石地区工业园区分布集中, 其中火力发电行业集中于昌吉市, 玛纳斯县与石河子市, 石油, 煤炭等开采加工行业集中于乌鲁木齐市, 昌吉市, 呼图壁县和沙湾县。

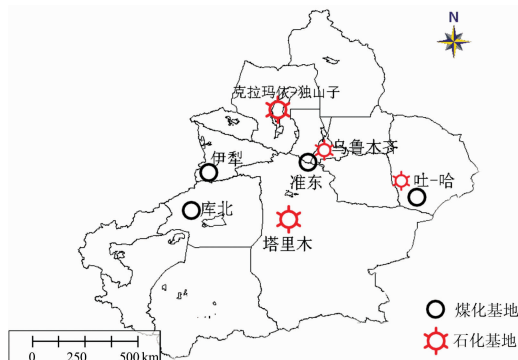


图 2 新疆维吾尔自治区主要煤化, 石化工业基地分布

Fig. 2 Distribution of major coal and petrochemical industrial bases in Xinjiang Uygur Autonomous Region

2 结果与讨论

2.1 空间分布

结合 NO₂ 数据, 绘制污染水平的空间分布图以及年均变化率[图 3(a-e)], 污染水平(0.00~2.00×10¹⁶ molecules·cm⁻²), 年均变化率[d: 0~10.0×10¹⁴ molecules·cm⁻²·yr⁻¹, e: 0~(-15.0×10¹⁴) molecules·cm⁻²·yr⁻¹]。总体来看: 2007 年—2017 年期间, 新疆 NO₂ 污染集中分布于北疆地区, 大部分南疆地区维持较低排放水平; 污染区域呈现以乌鲁木齐市为中心块状分布(乌鲁木齐市新市区和米东区最严重), 其他污染区点状分布的特点; NO₂ 污染水平年均变化率较大的地区明显集中: 在 2007 年—2013 年期间, 大部分北疆地区污染有显著的增长趋势, 且增长最快的区域位于乌鲁木齐市及周围地区(乌昌石地区, p -value<0.05); 在 2014 年—2017 年期间有明显的下降趋势, 降幅最大的地区为乌昌石地区以及克拉玛依—独山子区(p -value<0.10)。

新疆各研究区域 NO₂ 污染存在显著相关性。通过对各地区 2007 年—2017 年月平均 NO₂ 数据进行 Pearson 相关性分析发现: 新疆总体与乌昌石地区 NO₂ 污染有很强的相关性($r=0.942$, p -value<0.01), 而乌昌石地区与主要城市昌吉市, 乌鲁木齐市也存在强相关性($r=0.982$, p -value<0.01; $r=0.951$, p -value<0.01)。

2.2 时间变化

通过上述 NO₂ 污染空间分布分析, 得出新疆 NO₂ 的浓度水平与变化分布特征, 以及需要重点关注的区域。以下列举出 2007 年—2017 年期间, 各研究地区年平均以及乌昌石地区主要研究时期的 NO₂ 数据变化, 并进行时间尺度的变化趋势分析。

2.2.1 新疆地区年均变化(2007 年—2017 年)

利用新疆各地区年平均 NO₂ 浓度数据见表 1, 绘制 2007 年—2017 年新疆总体, 乌昌石地区, 克拉玛依—独山子区, 乌鲁木齐市, 昌吉市, 石河子市, 五家渠市的年均浓度变化图像, 即为图 4(a); 同时以 2007 年作为基底, 得到新疆总体, 乌昌石地区的相对变化, NO₂ 数据见表 2。以 2008 年为基底, 得到新疆主要人为排放源(发电站, 生活源, 工业源, 交通源)相对变化, 即为图 4(b)。

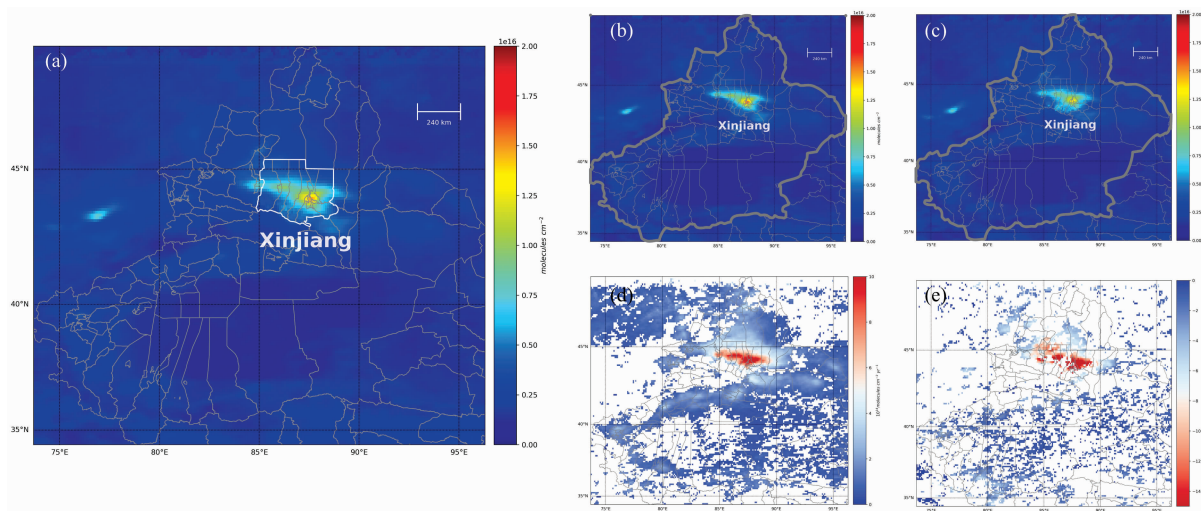


图 3 NO₂ 浓度水平空间分布

(a): 新疆 NO₂ 污染 2007 年—2017 年平均分布(白色框为乌昌石地区); (b, d): 2007 年—2013 年平均浓度以及年均变化率 (p -value<0.05); (c, e): 2014 年—2017 年平均浓度以及年均变化率 (p -value<0.10)

Fig. 3 Spatial distribution of NO₂ concentration

(a): The average distribution of NO₂ pollution in Xinjiang from 2007 to 2017 (White box shows Wuchangshi Area); (b, d): average concentration and relative change rate from 2007 to 2013 (p -value<0.05); (c, e): 2014 to 2017 Average concentration and relative change rate (p -value<0.10)

表 1 新疆各地区 2007 年—2017 年平均 NO₂ 浓度数据(单位: 10¹⁵ molecules · cm⁻²)

Table 1 Average NO₂ concentration data of various regions in Xinjiang from 2007 to 2017 (unit: 10¹⁵ molecules · cm⁻²)

年份	新疆总体	乌昌石地区	乌鲁木齐市	昌吉市	石河子市	五家渠市	克拉玛依—独山子区
2007	1.714 1	4.020 4	5.748 6	4.633 6	7.443 7	3.264 2	5.124 4
2008	1.681 9	4.162 3	5.909 3	5.299 0	7.352 7	3.072 7	5.555 7
2009	1.925 8	4.672 6	6.120 4	5.511 7	8.661 4	3.710 8	5.915 2
2010	1.825 2	4.465 7	6.161 9	5.371 7	7.547 2	3.429 4	5.979 1
2011	2.005 5	5.307 4	7.189 8	6.730 6	8.974 2	4.432 9	7.739 2
2012	2.267 6	6.050 6	7.706 3	7.312 6	11.747 0	4.835 9	10.058 1
2013	2.250 5	6.707 3	8.482 8	8.171 3	12.539 0	5.408 2	11.103 2
2014	2.282 1	6.601 5	7.968 4	8.170 5	12.339 5	5.618 9	10.578 6
2015	2.102 9	5.353 6	6.409 5	6.268 9	7.930 5	4.685 3	7.070 7
2016	2.131 1	5.274 5	7.002 2	6.481 4	7.507 2	4.093 7	6.788 3
2017	1.679 0	3.778 5	4.600 3	5.006 1	6.250 9	2.799 8	5.351 0

表 2 乌昌石地区 2007 年—2017 主要研究时期 NO₂ 数据(单位: 10¹⁵ molecules · cm⁻²)

Table 2 NO₂ data in the main research period of 2007—2017 in “Wuchangshi” area (unit: 10¹⁵ molecules · cm⁻²)

年份	春季	夏季	秋季	冬季	采暖期	非采暖期
2007	2.923 1	2.660 9	4.916 1	6.070 5	5.448 8	2.777 6
2008	3.166 7	2.869 4	4.721 7	5.728 7	5.468 7	2.988 7
2009	3.456 5	2.740 0	5.282 6	7.749 4	6.524 3	2.870 0
2010	3.212 8	2.682 7	5.312 2	7.392 7	6.646 1	2.993 3
2011	3.900 1	2.979 6	6.446 9	7.746 4	7.340 8	3.301 4
2012	4.405 0	3.401 0	7.771 7	10.251 6	9.132 5	3.682 2
2013	4.745 9	3.311 7	8.423 1	11.102 8	9.965 5	4.004 8
2014	5.228 7	3.606 4	6.407 5	8.851 6	7.388 3	4.109 8
2015	3.092 2	2.831 9	6.363 2	8.374 3	7.273 4	3.084 5
2016	3.164 7	2.630 4	5.858 1	8.854 5	7.636 0	2.951 9
2017	3.387 9	2.345 3	4.563 5			2.494 6

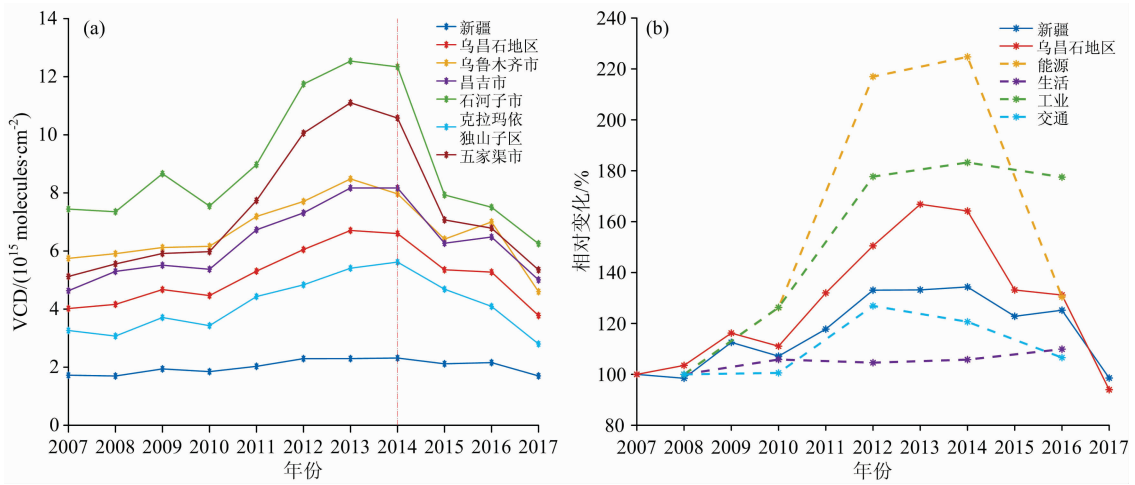


图 4 NO_2 浓度水平年际变化

(a): 新疆各地区 NO_2 年变化; (b): 新疆, 乌昌石地区 NO_2 年相对变化(相对于 2007 年), 新疆人为源排放 NO_x 相对变化(相对于 2008 年)

Fig. 4 Annual change of NO_2 concentration

(a): Annual changes of NO_2 in various regions of Xinjiang; (b): Annual relative changes of NO_2 in Xinjiang and “Wuchangshi” area (relative to 2007), and relative changes of anthropogenic NO_2 emissions in Xinjiang (relative to 2008)

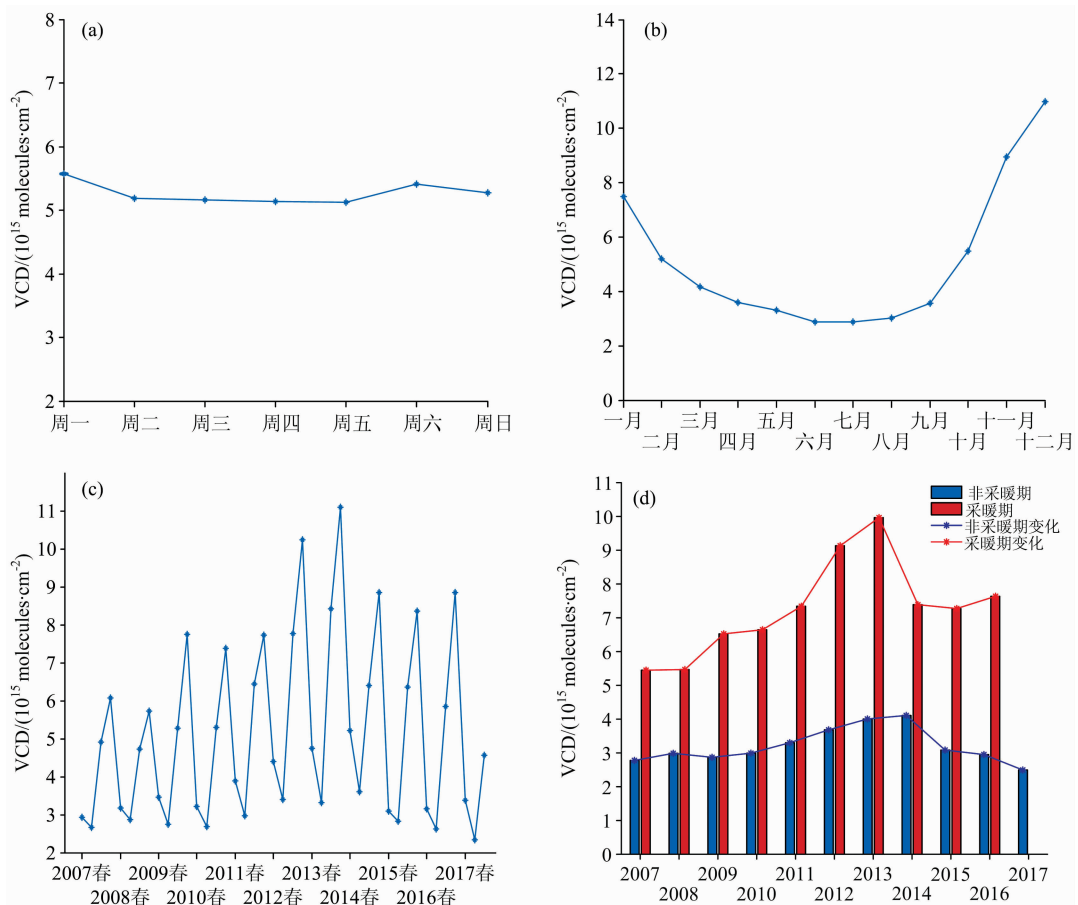


图 5 乌昌石地区 NO_2

(a): 周变化; (b): 月变化; (c): 季节变化; (d): 非采暖期—采暖期变化

Fig. 5 NO_2 in the “Wuchangshi” area

(a): Weekly change; (b): Monthly change; (c): Seasonal change; (d): Non-heating period-heating period change

从新疆各地区 NO_2 年平均变化来看, 呈现出 2010 尤其 2011 年后污染明显上升, 2013 年开始尤其 2014 年后明显下降的一致趋势。通过结合 MEIC 提供的网格化人为源排放数据分析[图 4(b)]可见: 在 2008 年—2014 年间新疆总体工业排放, 尤其是能源发电排放迅速增长(相对于 2008 年), 这与卫星观测得到的新疆 NO_2 年际变化一致(相对于 2007 年); 在 2014 年后, 工业排放尤其是能源发电排放下降明显, 能源发电行业 2016 年排放较 2014 年降低 41.95%, 与新疆总体 NO_2 变化以及乌昌石地区变化趋势一致。

2.2.2 乌昌石地区污染变化

由 2.1 可知, 新疆总体 NO_2 污染与乌昌石地区存在强相关性, 以下对乌昌石地区进行着重分析。通过提取乌昌石地区 NO_2 月平均数据, 对周变化, 月变化, 不同季节变化(春: 3 月—5 月, 夏: 6 月—8 月, 秋: 9 月—11 月, 冬: 12 月—次年 2 月)以及采暖期和非采暖期变化(乌昌石地区采暖期为 10 月—次年 4 月初)进行分析, 相关的数据见表 2。

从乌昌石地区污染变化曲线可见[图 5(a—d)]: 周末相对于周中污染水平更高; NO_2 污染峰值为每年的冬季(12 月份最为严重), 此时处于采暖期; 对 2007 年—2016 年各季度污染水平作 Mann-Kendall 检验和 Sen's Slope 趋势分析(Z , β 分别为相应构造的统计量)得出见表 3: 冬季污染有显著上升趋势(查表 $p=0.00047 < \alpha$, $\beta > 0$, $\alpha=0.01$), 其他季节均无显著变化趋势; 采暖期与非采暖期污染水平存在显著性差异($\alpha=0.01$, $p\text{-value} < 0.01$), 且采暖期在 2007 年—2016 年有显著上升趋势(查表 $p=0.0046 < \alpha$, $\beta > 0$, $\alpha=0.01$), 非采暖期则无显著变化趋势。

表 3 乌昌石地区 2007 年—2017 年主要研究时期变化趋势检验

Table 3 Changes in the main research period of "Wuchangshi" area from 2007 to 2017

时期	春季	夏季	秋季	冬季	采暖期	非采暖期
Z	1.089	0.000	0.623	查表**	查表**	0.779
β	0.096	-0.003	0.132	0.3684**	0.271**	0.0358

注: ** 已通过 0.01 显著性检验, β 标准统一为 10^{15} 量级

2007 年—2017 年期间, 新疆地区 NO_2 污染变化呈现出分阶段的特征, 其中 2007 年—2010 年总体及各地区差异不大, 而进入“十二五”时期(2011—2015)之后, 开始出现污染快速增长的趋势: 与 2010 年相比, 2014 年新疆总体 NO_2 平均水平增长了 18.5%, 主要污染区域乌昌石地区增长了 41.3%; 从人为排放 NO_x 变化[图 4(b)]可见: 能源行业, 工业排放均有显著增长(相对于 2010 年增长 78.0%, 45.1%), 而交通源排在 2012 年后出现下降趋势, 与汽车尾气处理以及高排放车辆报废的政策有关。按照我国能源发展“十二五”规划, 新疆成为国家五大综合能源基地之一, 2014 年成为我国第 14 个大型煤炭基地, 这与能源工业排放增加导致

的 NO_2 浓度增长有着密切关系; 由于乌昌石地区处于天山北坡经济带的核心, 2009 年乌鲁木齐米东区成立“国家级石油化工产业基地和煤电煤化工特色产业基地”, 2012 年五家渠市成立国家级经济技术开发区, 开发区密集, 重化工业发展迅速, 污染集中且严重; 乌鲁木齐市米东区与新市区 NO_2 浓度最高, 与能源加工行业聚集以及石化基地的建设有关。克拉玛依—独山子地区由于“十二五”期间加速建成国家大型石油化工基地, 同时污染水平也迅速上升。

经历了“十二五”前期 NO_2 浓度迅速增长的时期, 在 2014 年后新疆各地区出现下降趋势。伴随着 2013 年“大气十条”的出台, 2014 年后新疆各研究地区 NO_2 出现显著下降, 至 2017 年总体平均浓度下降 26.4%, 乌昌石地区下降 42.8%(相对于 2014 年); 从人为排放 NO_x 数据来看, 新疆地区能源行业排放显著下降(2016 年相对于 2014 年下降 42.0%), 可见发电站脱硝装置的推行起到了重要作用。

乌昌石地区与新疆总体 NO_2 浓度变化有很强的相关性, 在污染治理中需要重点关注。由于乌昌石地区处于内陆且采暖周期长, 能源结构以煤炭为主, 且冬季经常有逆温等现象出现, NO_2 污染难以扩散降解。2007 年—2016 年期间, 乌昌石地区采暖期 NO_2 水平有显著的上升趋势($\alpha=0.01$), 2016 年冬季乌昌石地区出现了长达 18 天的重污染天气, 表现出气象因素以及污染排放同时控制的污染类型。乌昌石地区 NO_2 浓度周变化呈现出周末高于周中的现象, 说明周末的出行量相对较大; 月变化的峰值为 12 月份, 季节变化中冬季污染最为严重, 与采暖期排放以及气候因素有着密切关系。

基于新疆 NO_2 污染时空变化的特点, 在“十三五”发展规划的背景下, 新疆能源产业将进一步得到发展, 在治理空气污染时, 需要重点关注乌昌石地区, 且在采暖期更需加强气象监测以减少重污染事件的发生, 进而提升整体大气环境质量。

3 结 论

(1) 通过卫星高光谱遥感分析发现, 2007 年—2017 年期间, 新疆地区 NO_2 含量变化存在明显分阶段特征: 2007 年—2010 年期间变化不明显, 2011 年—2014 年为上升阶段, 2014 年—2017 年为下降阶段, 与国家能源政策的变化以及大气十条的实施符合良好, 与人为排放 NO_x 变化亦相吻合;

(2) 新疆地区与乌昌石地区 NO_2 水平存在强相关性, 而乌昌石地区与乌鲁木齐市, 昌吉市也存在良好的相关性, 污染分布与能源基地, 工业园区等分布密切关系;

(3) 乌昌石地区 NO_2 周变化存在周末高于周中的现象, 月变化和季节变化受采暖时期排放以及气象因素影响较大; 2007 年—2016 年期间, 采暖期的 NO_2 水平存在显著的上升趋势, 在未来大气污染防治中需要重点关注。

致谢: 感谢清华大学 MEIC 模型提供的人为排放数据, 感谢 NASA 提供的 OMI 原始卫星光谱数据。感谢赵剑军, 周金翼对本工作的建议意见。

References

- [1] Jacob D J, Heikes E G, Fan S M, et al. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D19): 24235.
- [2] Duan L, Yu Q, Zhang Q, et al. *Atmospheric Environment*, 2016, 146: 55.
- [3] Jacob D J. *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton University Press, 1999. 164.
- [4] Boningari T, Smirniotis P G. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2016, 13: 133.
- [5] Zhao B, Wang S X, Liu H, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(19): 9869.
- [6] Ma Z, Deng J, Li Z, et al. *Atmospheric Environment*, 2016, 131(4): 164.
- [7] Zhang Q, Geng G, Wang S, et al. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2857.
- [8] Liu F, Beirle S, Zhang Q, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2015, 15(17): 24179.
- [9] Ling Z, Huang T, Zhao Y, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(14): 9115.
- [10] Zhang C, Liu C, Hu Q, et al. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 100.
- [11] Dobber M, Dirksen R, Levelt P, et al. *The International Society for Optical Engineering*, 2006, 6296: 59621L-12.
- [12] Miyazaki K, Eskes H J, Sudo K. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2011, 11(12): 31523.
- [13] Levelt P, Joanna J, Tamminen J, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(8): 5699.
- [14] Krotkov N A, McLinden C A, Li C, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(7): 4605.
- [15] Liu H, Liu C, Xie Z, et al. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34408.
- [16] Platt U, Stutz J. *Differential Optical Absorption Spectroscopy*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. 135.
- [17] Zhang C, Liu C, Wang Y, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(6): 3323.
- [18] Zhang C, Liu C, Chan K L, et al. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 66.
- [19] Xing C, Liu C, Wang S, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(23): 14275.
- [20] Tan W, Liu C, Wang S, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(20): 15387.
- [21] Tan W, Zhao S, Liu C, et al. *Atmospheric Environment*, 2019, 200: 228.
- [22] Chance K. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(17): 3335.
- [23] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(14): 5131.
- [24] Li M, Zhang Q, Streets D G, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(11): 5617.
- [25] Zheng B, Huo H, Zhang Q, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(18): 9787.

Analysis of Spatial and Temporal Change Trend of Xinjiang NO₂ in 2007—2017 Based on Satellite Hyperspectral Remote Sensing

SU Jin-tao¹, ZHANG Cheng-xin^{2*}, HU Qi-hou³, LIU Hao-ran⁴, LIU Jian-guo³

1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3. Key Lab of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

4. Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China

Abstract Since the State Council promulgated the “Atmospheric Pollution Prevention Action Plan” and other comprehensive atmospheric control policies in 2013, the concentration of atmospheric pollutants and other important pollutants in eastern China has been effectively controlled. Along with the changes in China’s energy policy and increasing energy development in the northwest region, air pollution also shows an increasing trend, but it has not been paid attention to in previous studies. Compared with ground observation, the monitoring method of satellite remote sensing has the advantages of not being restricted by area, lasting long observation time and monitoring many types of pollutants simultaneously. The spaceborne ultraviolet-visible hyperspectrometer OMI has been in orbit since 2005 and has been widely used in scientific applications such as the detection of the temporal and spatial changes of atmospheric pollution, the estimation of emission sources, and the assimilation and verification of models. USTC’s tropospheric NO₂ column concentration product, through the secondary calibration of the OMI original measurement spectrum and the key optimization of the gas inversion algorithm, shows a good correlation in the comparison and verification with the results of ground-based observations. Analysis of air pollution in the background of sol. Combined with

USTC's OMI NO₂ data product, the spatial and temporal distribution characteristics of atmospheric NO₂ pollution in Xinjiang, China, can be characterized. From 2007 to 2017, NO₂ pollution in Xinjiang was concentrated in northern Xinjiang. Among them, the "Urumqi-Changi-Shihezi" urban agglomeration ("Wuchangshi" area) had a strong correlation with the monthly change of the overall NO₂ level in Xinjiang (correlation coefficient $R=0.942$, $p\text{-value}<0.01$). The inter-annual change of NO₂ in Xinjiang has obvious phase characteristics, which is consistent with the changes in relevant policies and energy industry emissions; the changing trend is not obvious from 2007 to 2010, the overall average concentration in 2014 increased by 18.5% compared with 2010, and the "Wuchangshi" area increased by 41.3%, in 2017, the overall average concentration of NO₂ decreased by 26.4% compared with 2014, and "Wuchangshi" decreased by 42.8%. Due to the dense distribution of petrochemical enterprises and economic development zones in the "Wuchangshi" area, it has become a NO₂ pollution gathering area, which has a strong correlation with Urumqi and Changi NO₂ changes ($R=0.982$, $p\text{-value}<0.01$; $R=0.951$, $p\text{-value}<0.01$). Controlled by the heating period's emissions and the special meteorological conditions, the peak of NO₂ change in the "Wuchangshi" area in December, and the winter pollution is particularly significant. The heating period (from October to early April each year) has a significant upward trend from 2007 to 2016 (Significance level $\alpha=0.01$), which requires special attention in future atmospheric governance.

Keywords Satellite spectrum remote sensing; Xinjiang Uygur autonomous region; NO₂ pollution; "Wuchangshi" area

(Received May 20, 2020; accepted Sep. 28, 2020)

* Corresponding author