

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.06.005

# 基于 OMI 的陕甘宁地区 NO<sub>2</sub> 时空分布及影响因素分析

吴雅睿\*, 王虎, 王美景

(西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为获取 NO<sub>2</sub> 时空分布特征并探究 NO<sub>2</sub> 污染状况, 利用臭氧观测仪 (OMI) 反演的对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度数据, 并结合气象、能源及交通排放等统计数据, 通过地理空间分析、线性拟合、相关性分析等手段, 分析了 2005–2019 年陕甘宁地区 NO<sub>2</sub> 柱浓度的时间变化趋势、空间分布特征及其影响因素。结果表明: 近 15 年 NO<sub>2</sub> 柱浓度总体呈先上升后下降的趋势; 季节上呈现为冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季, 其中夏季变化平稳, 冬季波动剧烈。从空间分布来看, NO<sub>2</sub> 柱浓度较高区域分布在省会及附近区域, 以西安城市群集聚现象最为明显。进一步影响因素分析表明, 地形与风向对 NO<sub>2</sub> 空间分布有一定的综合影响力; 气温、降雨量与 NO<sub>2</sub> 柱浓度均呈现出明显的负相关, 说明高温、降雨对 NO<sub>2</sub> 浓度具有削减作用; 煤炭消耗量、工业产值、机动车保有量均与 NO<sub>2</sub> 柱浓度呈正相关, 说明化石能源燃烧、机动车尾气排放是该地区 NO<sub>2</sub> 的重要来源; 而 2012 年后的 NO<sub>2</sub> 柱浓度持续下降, 主要与国家及地方相关政策的强力实施有关。

**关键词:** 对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度; 臭氧观测仪; 陕甘宁地区; 时空特征

中图分类号: X511

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)06-553-016

## Spatio-temporal variation and impact factors of tropospheric NO<sub>2</sub> column density in Shaanxi-Gansu-Ningxia region based on OMI satellite data

WU Yarui\*, WANG Hu, WANG Meijing

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to obtain the spatial and temporal distribution characteristics of NO<sub>2</sub> and explore its pollution status, based on the tropospheric NO<sub>2</sub> column concentration data from the Ozone Observation Instrument (OMI), and the corresponding meteorology, energy, traffic emissions and other statistical data, the temporal trends, spatial distribution characteristics and influencing factors of NO<sub>2</sub> column concentrations in Shaanxi-Gansu-Ningxia region, China, from 2005 to 2019 were analyzed through geospatial analysis, linear fitting, correlation analysis and so on. The results show that the NO<sub>2</sub> column concentrations in the past 15 years show a general trend of first rising and then falling. Seasonally, the variation of NO<sub>2</sub> column concentrations presents as winter > autumn > spring > summer, with stable

基金项目: 陕西省教育厅自然科学基金项目 (17JK0494)

作者简介: 吴雅睿 (1984-), 女, 河北廊坊人, 博士, 副教授, 主要从事环境监测与治理的研究。E-mail: wuyarui@xust.edu.cn

收稿日期: 2022-02-22; 修改日期: 2022-04-05

\*通信作者。

changes in summer and intense fluctuations in winter. In terms of spatial distribution, the high  $\text{NO}_2$  column concentration areas are distributed in the provincial capital and nearby regions, with the Xi'an urban agglomeration being the most obvious. Further analysis of influencing factors shows that topography and wind direction have a certain comprehensive influence on the spatial distribution of  $\text{NO}_2$ . There is a significant negative correlation between temperature, rainfall and  $\text{NO}_2$  column concentration, indicating that high temperature and rainfall have a reducing effect on  $\text{NO}_2$  concentration. While coal consumption, industrial output value and motor vehicle ownership all show a positive correlation with  $\text{NO}_2$  column concentration, indicating that fossil energy combustion and motor vehicle exhaust emissions are important sources of  $\text{NO}_2$  in the region. The continuous decrease in  $\text{NO}_2$  column concentration after 2012 is deduced to be mainly related to the strong implementation of relevant national and local policies.

**Key words:** tropospheric  $\text{NO}_2$  column concentration; ozone monitoring instrument; Shaanxi-Gansu-Ningxia region; spatio-temporal distribution characteristics

## 0 引言

大气污染对空气质量和气候变化产生的影响日益凸显,已经成为当今社会高度关注和亟待解决的环境污染问题<sup>[1]</sup>。 $\text{NO}_2$ 作为一种大气痕量气体,来源包括自然源和人为源,其中自然源主要是土壤排放、闪电、植被火灾等,人为源主要来自化石燃料燃烧、机动车尾气排放、生物质燃烧<sup>[2,3]</sup>。 $\text{NO}_2$ 是形成酸雨、酸雾、光化学烟雾的主要污染物,也是二次气溶胶的重要前体物,还能够与其他气态物质发生化学反应产生臭氧<sup>[4,5]</sup>。 $\text{NO}_x$ (氮氧化物,主要包括 $\text{NO}$ 和 $\text{NO}_2$ )会在大气中通过物化反应转变为 $\text{PM}_{2.5}$ 中的二次颗粒物,引发雾霾问题<sup>[6]</sup>。高浓度的 $\text{NO}_2$ 会直接伤害人体健康,被吸入肺部后引起肺部疾病,并导致呼吸问题,还能够与血红蛋白结合并加以破坏,造成机体缺氧<sup>[7,8]</sup>。 $\text{NO}_2$ 还会间接地破坏臭氧层,影响生态环境,危害性极大<sup>[9,10]</sup>。因此及时监测 $\text{NO}_2$ 时空分布特征、全面掌握 $\text{NO}_2$ 的污染状况意义重大。

中国经济的快速发展使得能源消耗持续增长、空气污染日益严重,现已成为全球大气 $\text{NO}_2$ 浓度最高的三大地区之一<sup>[11]</sup>。长期以来,我国京津冀、长三角、珠三角等东部发达地区的大气污染状况备受关注<sup>[12-17]</sup>,然而受限于自然条件及地面站点数量等问题,对于西部地区大气污染状况的研究相对匮乏<sup>[18,19]</sup>。从三种能源产量(焦炭产量、原油产量、火力发电量)及“十三五”能源发展规划来看,国家能源开发重点在逐渐向西部转移,导致西部地区大气污染物排放量占全国总排放量的比重逐年增加,西北地区更为显著<sup>[20]</sup>。其中,陕甘宁地区,即陕西省、甘肃省和宁夏回族自治区,是新丝绸之路经济带向西推进的前沿,也是“一带一路”倡议中的黄金要地<sup>[21,22]</sup>,因此及时监测该地区的 $\text{NO}_2$ 时空分布特征并分析其影响因素,全面掌握 $\text{NO}_2$ 的污染状况意义重大。

鉴于以上原因,本文利用臭氧监测仪(OMI)传感器反演的 $\text{NO}_2$ 柱浓度数据,探讨了2005—2019年陕甘宁地区对流层 $\text{NO}_2$ 柱浓度时空变化特征及影响因素,以期能够为该区域大气污染问题的科学防治提供理论依据。

## 1 研究区域数据

### 1.1 研究区概况

如图1所示,陕甘宁地区位于我国西北内陆地区,地势西高东低,东西狭长,属于第一、二阶梯,主要地形包括山地、盆地、荒漠、戈壁等,冬春二季受季风影响多风沙,生态环境脆弱。区域内具有丰富的石油、煤炭和天然气资源,是我国罕见的能源资源富集区<sup>[23]</sup>。大部分区域属于大陆性气候,冬季严寒而干燥,夏季高温,降水稀少,年均降水量仅为100~500 mm,年均气温为8~12 °C,昼夜温差大,光照充足且时间长。根据统计年鉴数据,陕甘宁地区共计地级市29个,区域总面积72.97万km<sup>2</sup>。截至2018年底,陕甘宁地区的人口数量、生产总值分别占全国的5.15%和3.98%。

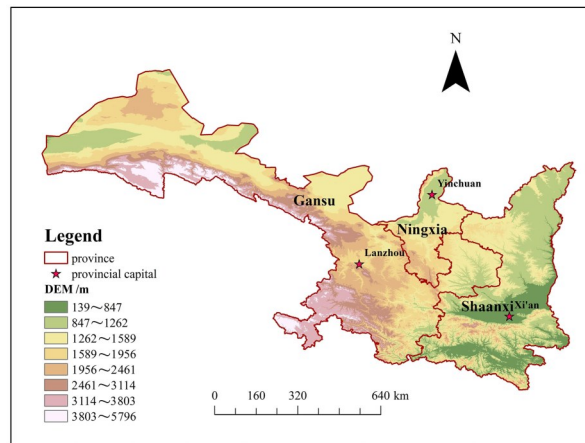


图1 研究区

Fig. 1 Study area

### 1.2 数据与方法

目前,NO<sub>2</sub>浓度的监测方式主要是地面监测和遥感监测。地面监测NO<sub>2</sub>技术逐渐成熟,监测点数量不断增加,时间分辨率也不断提高,但仍无法获得空间连续和长时间的NO<sub>2</sub>浓度变化趋势<sup>[24]</sup>。而遥感监测因实时性、大范围、成本低、分辨率高等优势被广泛应用<sup>[25]</sup>。20世纪90年代以来,相继有GOME、SCIAMACHY、OMI、GOME-2 (METOP-A)、GOME-2 (METOP-B)等传感器投入使用<sup>[26,27]</sup>。国内外学者基于以上卫星传感器对大气痕量气体浓度的提取进行了深入的验证性和应用性研究<sup>[28-33]</sup>。其中OMI传感器于2004年搭载在Aura卫星上发射升空,空间分辨率最高,为13 km × 24 km,全球覆盖仅需一天,视场角为114°,幅宽2600 km,拥有三个光谱通道,波长范围为270~500 nm。本研究中的遥感数据选用荷兰皇家气象研究所(KNMI)反演的OMI对流层NO<sub>2</sub>柱浓度月均值产品,由TEMIS发布(<http://www.temis.nl>),版本为QA4ECV version 1.1, ESRI grid格式,格点大小为0.125° × 0.125°,时间跨度为2005年1月—2020年2月,单位为10<sup>13</sup> molec/cm<sup>2</sup>,共计182幅。产品反演算法使用差分吸收光谱法DOAS<sup>[34,35]</sup>,该反演算法包括以下几个步骤:1)利用光谱差分技术,结合气体光谱特征,选择NO<sub>2</sub>最佳吸收谱段(405~465 nm),获取NO<sub>2</sub>总斜柱浓度;2)减去平流层NO<sub>2</sub>斜柱浓度得到对流层NO<sub>2</sub>斜柱浓度,通过辐射传输模型或经验公式计算出大气质量因子(AMF);3)经过AMF校正将对流层NO<sub>2</sub>斜柱浓度转化为垂直柱浓度<sup>[36,37]</sup>。目前国内学者<sup>[38-41]</sup>已经广泛使用

OMI数据从不同范围尺度对对流层NO<sub>2</sub>柱浓度的时空变化特征及影响因素进行了分析,结果表明OMI遥感数据能够很好地反映地表NO<sub>2</sub>浓度的分布情况。

陕甘宁地区煤炭消耗量、工业产值、机动车保有量、氮氧化物排放量等统计数据来自国家统计局、各省统计年鉴(2005—2019年)、各省环境状况公报(2005—2019年)。降雨量、气温、风向等气象数据(2005—2019年)来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),其中,降雨量数据为各站点的月降水总量,气温数据为各站点的月平均气温,风向数据为各站点的月最大风速的频次。NO<sub>2</sub>月均浓度值的地面监测数据来自中国空气质量监测平台(<https://www.aqistudy.cn/>)。行政区划等矢量图层来自国家基础地理信息共享库(<https://www.ngcc.cn/ngcc/>),用于栅格数据的提取。数字高程模型(DEM)数据下载于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)。运用地理空间分析功能对OMI数据的处理,主要包括利用掩膜提取研究区范围内的栅格影像,运用属性提取把原数据中栅格像元不存在或不合格的剔除,将月均值数据通过像元统计加权计算获取研究区的季平均数据、年平均数据。这其中,为了方便统计和出图工作,将像元值均进行了取整处理。在影响因素分析部分,使用了相关性分析和线性趋势法来判断与分析相关系数和变化特征,这方便从分析结果中直观地看到各影响因素与NO<sub>2</sub>排放的相关程度。

## 2 结果与讨论

为方便分析陕甘宁地区月、季、年NO<sub>2</sub>柱浓度的时空变化特征,根据NO<sub>2</sub>柱浓度值进行了适当分级:低值区(<200)、中低区(200—500)、中值区(500—1000)、中高区(1000—1500)、高值区(>1500),单位取10<sup>13</sup> molec/cm<sup>2</sup>。季节分析中按照春季:3、4、5月,夏季:6、7、8月,秋季:9、10、11月,冬季:12月、次年1月、2月进行划分。

### 2.1 卫星反演NO<sub>2</sub>浓度和地面实测值的相关检验

为了验证陕甘宁地区OMI反演数据的适用性,选取研究区的西安、兰州、银川3个重点城市作为验证对象,将2014年1月到2019年12月的NO<sub>2</sub>地面实测月数据与对应时间卫星反演的月均值数据进行线性拟合,结果如图2所示。由图可知,3个城市(西安、兰州、银川)的数据点均匀分布在拟合线两侧,相关性检验的相关系数 $r$ 分别为0.676、0.629、0.729,在0.01级别上相关性显著,这说明选用的OMI对流层NO<sub>2</sub>柱浓度数据具有较高的可靠性,可以用于该地区NO<sub>2</sub>时空变化特征的研究。

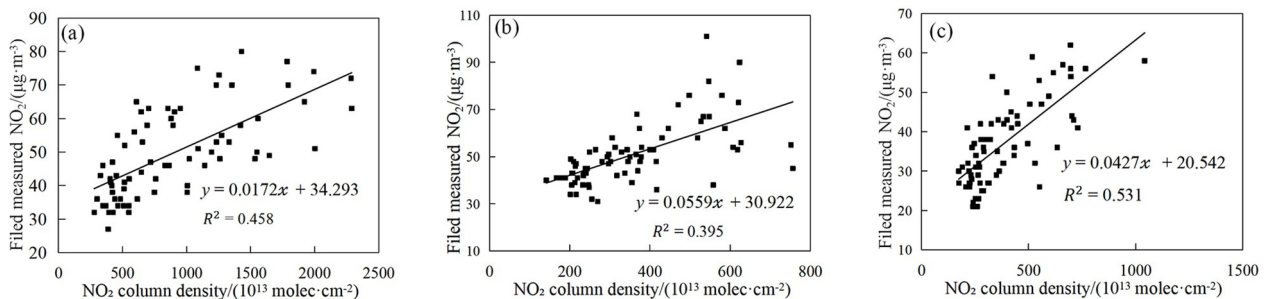


图2 陕甘宁地区主要城市2014—2019年卫星反演NO<sub>2</sub>柱浓度与地面实测值线性拟合。(a) 西安;(b) 兰州;(c) 银川

Fig. 2 Linear fitting between ground measured NO<sub>2</sub> and OMI NO<sub>2</sub> in major cities of Shaanxi-Gansu-Ningxia region from 2014 to 2019. (a) Xi'an; (b) Lanzhou; (c) Yinchuan

## 2.2 陕甘宁地区对流层NO<sub>2</sub>柱浓度的月变化

陕甘宁地区近15年NO<sub>2</sub>柱浓度月均值呈现波浪形的周期规律(图3),最大值一般出现在每年的1月或12月,最小值出现在5—8月。2011年12月NO<sub>2</sub>柱浓度出现最大值,达 $478.1 \times 10^{13}$  molec/cm<sup>2</sup>;最小值是在2005年的8月,为 $123.3 \times 10^{13}$  molec/cm<sup>2</sup>。除2008年外,2005—2011年NO<sub>2</sub>最大月均值浓度均在上升,推测与2008年我国为举办奥运会执行严格减排措施有关;2012—2019年NO<sub>2</sub>最大月均值浓度整体呈逐渐下降趋势。

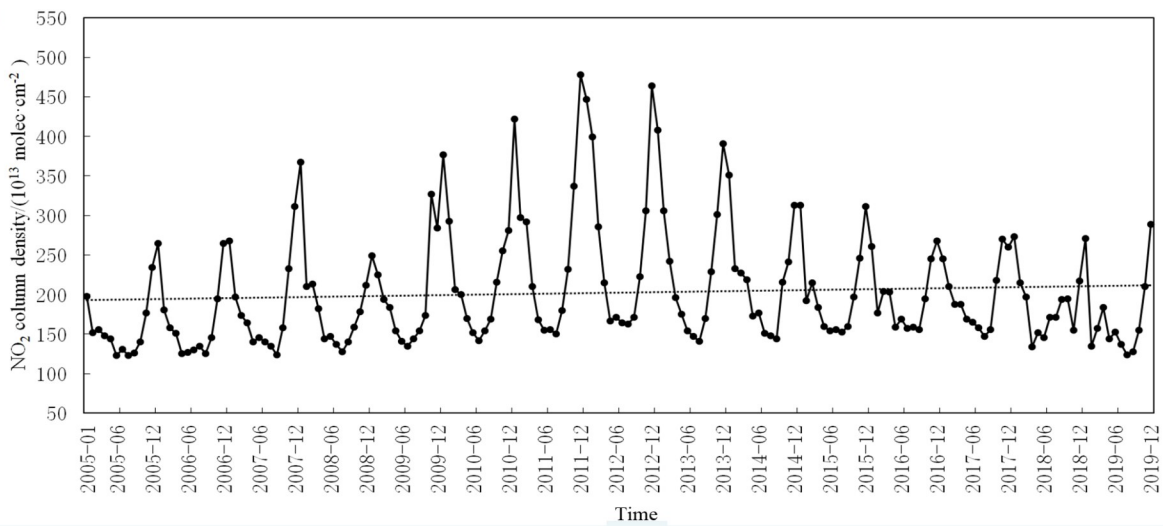


图3 2005—2019年陕甘宁地区NO<sub>2</sub>柱浓度月均值变化趋势图

Fig. 3 Monthly average value of NO<sub>2</sub> column density in Shaanxi-Gansu-Ningxia region from 2005 to 2019

## 2.3 陕甘宁地区对流层NO<sub>2</sub>柱浓度的季节变化

图4给出了陕甘宁地区2005—2019年NO<sub>2</sub>柱浓度的四季变化趋势。由图可以看出,陕甘宁地区NO<sub>2</sub>柱浓度季节性变化明显,近15年间按照季节均值排序基本呈现冬季( $275 \times 10^{13}$  molec/cm<sup>2</sup>) > 秋季( $196 \times 10^{13}$  molec/cm<sup>2</sup>) > 春季( $182 \times 10^{13}$  molec/cm<sup>2</sup>) > 夏季( $148 \times 10^{13}$  molec/cm<sup>2</sup>)的趋势。2008年秋冬季NO<sub>2</sub>柱浓度有明显下降,这是因为北京奥运会期间的减排措施得到了有效执行<sup>[42]</sup>。除2008年外,2005—2011年四个季度的NO<sub>2</sub>柱浓度基本呈逐年上升的趋势,2011年冬季峰值达 $430 \times 10^{13}$  molec/cm<sup>2</sup>;随后,2012—2019年逐年下降,2019年冬季NO<sub>2</sub>柱浓度降至 $161 \times 10^{13}$  molec/cm<sup>2</sup>,这与2020年初疫情期间的停工停产有直接关系<sup>[43,44]</sup>。夏、冬两季变化趋势差别显著,夏季平缓,冬季则波动剧烈,春、秋两季波动幅度居中,除2008年、2014年外,近15年间秋季NO<sub>2</sub>柱浓度均略高于春季。以上结论与自然状态下NO<sub>2</sub>浓度冬低夏高的季节性规律明显不符<sup>[45,46]</sup>,说明该地区NO<sub>2</sub>浓度的变化主要是人为活动引起的。

根据季节均值空间分布图(图5)显示,春季,西安市部分城区的NO<sub>2</sub>柱浓度处于中高区,西安周围区域、榆林东北部处于中值区,兰州、银川、石嘴山中值区呈点状分布,其他区域均处于低值区和中低区;夏季,整个地区NO<sub>2</sub>柱浓度普遍较低,低值区范围明显扩大,中低区范围有所减小,仅西安及附近区域、渭南市东北部处于中值区;秋季,分布特点与春季类似,但中值区、中高区范围有所扩大,西安及周边城市出现高值区;冬季,高值区、中高区、中值区范围继续扩大,榆林、兰州、银川、石嘴山均出现小部分中高区,陕西基本被中低区及以上级别覆盖,西安城市群NO<sub>2</sub>柱浓度连片分布且污染状况最为严重。根据年均值变化趋

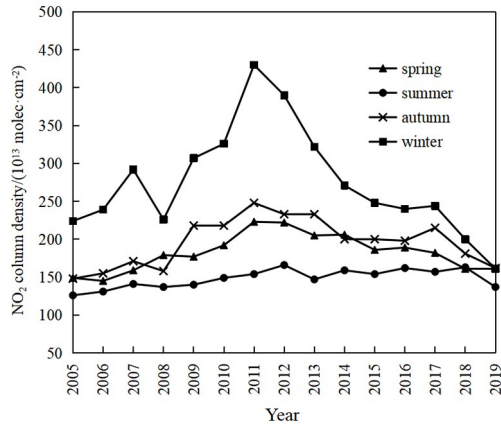


图4 2005—2019年陕甘宁地区NO<sub>2</sub>柱浓度季节均值变化趋势图

Fig. 4 Seasonal variation of NO<sub>2</sub> column density in Shaanxi-Gansu-Ningxia region from 2005 to 2019

势图(图6)可以看出,该地区NO<sub>2</sub>柱浓度呈现先上升再下降的趋势。上升阶段为2005—2012年,年均增长率为10%。其中2011年上升幅度最大,为18%;2012年NO<sub>2</sub>柱浓度年均值达最大值,为 $261 \times 10^{13} \text{ molec/cm}^2$ 。2012—2019年为下降阶段,年均增长率为-5.1%,2014年下降幅度最大,为9.7%。从最大值折线看,NO<sub>2</sub>柱浓度峰值出现在2011年,为 $2840 \times 10^{13} \text{ molec/cm}^2$ ,最小值为2018年的 $1296 \times 10^{13} \text{ molec/cm}^2$ 。统计所得的陕甘宁地区NO<sub>2</sub>柱浓度年均值与2010—2018年陕甘宁地区的氮氧化物排放量(表1)具有很好的一致性。

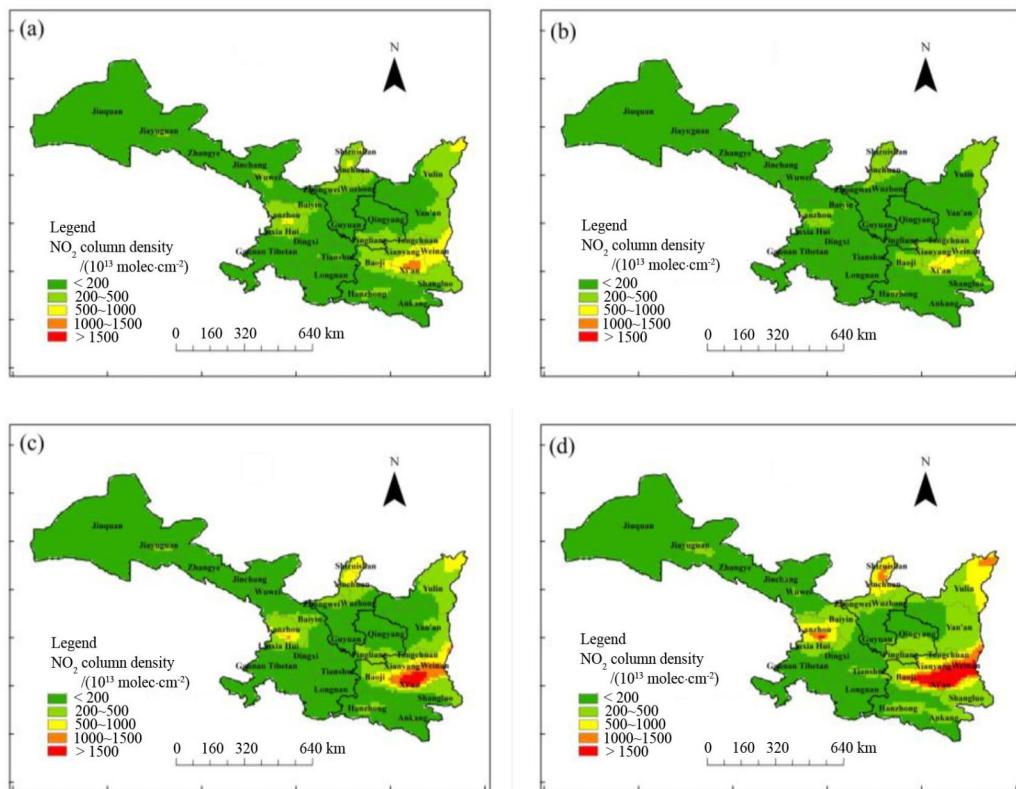


图5 2005—2019年陕甘宁地区NO<sub>2</sub>柱浓度季节均值空间分布图。(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季

Fig. 5 Seasonal average NO<sub>2</sub> column density of Shaanxi-Gansu-Ningxia region during 2005 to 2019.

(a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

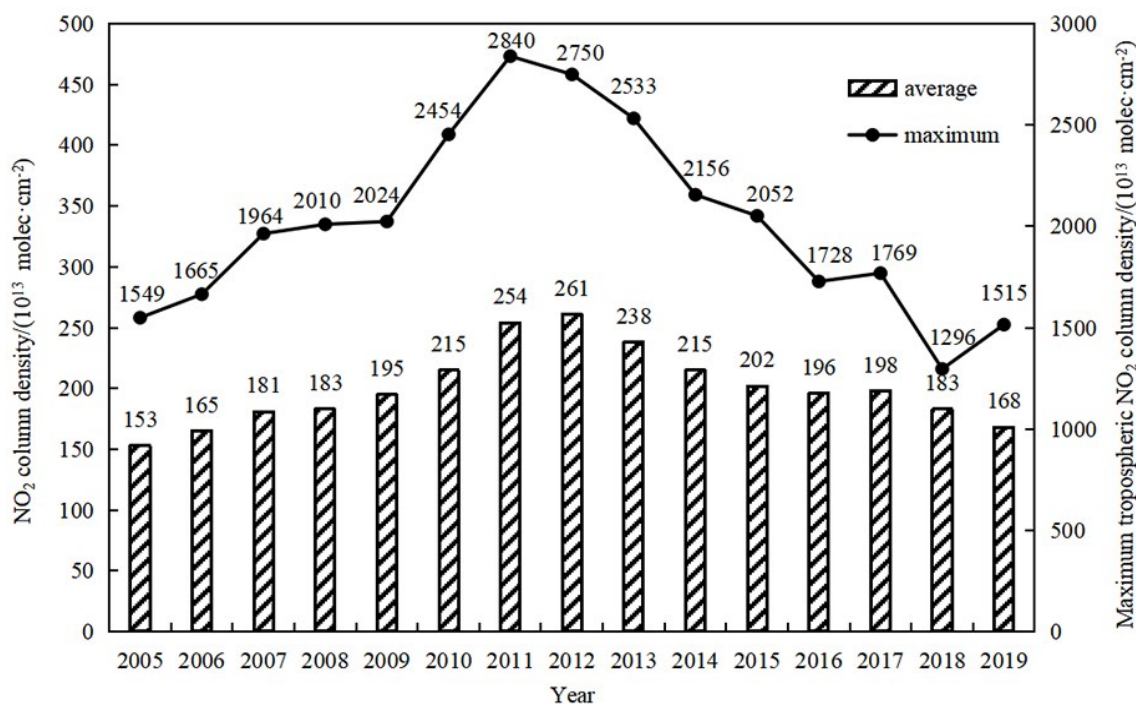


图 6 2005—2019 年陕甘宁地区 NO<sub>2</sub> 柱浓度年均值变化趋势图

Fig. 6 Annual variation trend of NO<sub>2</sub> column density in Shaanxi-Gansu-Ningxia region from 2005 to 2019

表 1 陕甘宁地区氮氧化物排放量统计表

Table 1 NO<sub>x</sub> emissions statistics of Shaanxi-Gansu-Ningxia region

Year	NO <sub>x</sub> emissions/(10 <sup>7</sup> kg)			
	Shaanxi	Gansu	Ningxia	Total
2010	—	—	41.80	—
2011	83.19	48.09	45.80	177.08
2012	80.82	47.34	45.50	173.66
2013	75.89	44.29	43.70	163.88
2014	70.58	41.84	40.40	152.82
2015	62.74	38.72	36.80	138.26
2016	38.03	25.80	19.80	83.63
2017	33.98	21.25	16.20	71.43
2018	—	21.47	14.50	—

根据陕甘宁地区 2005—2019 年 NO<sub>2</sub> 柱浓度年均值空间分布图 (图 7) 可知, 陕甘宁地区 NO<sub>2</sub> 浓度变化趋势整体由西北向东南方向逐步递增, 具体以省会为中心随距离增加 NO<sub>2</sub> 浓度逐渐降低。局部来看, 陕西省 NO<sub>2</sub> 空间分布呈中部高、四周低的特点, 高值区、中高区、中值区的范围变化以 2012 年为拐点, 呈先扩大后缩小的特点, 以西安为核心的城市群是陕甘宁地区 NO<sub>2</sub> 污染最为严重的区域。这是因为陕中地区属于汾渭平原, 人口密集, 是社会经济活动频繁地带, 陕南陕北因有山岭、高原存在, 人类活动相对较少。榆林因处于能源三角区, 工业污染较严重, 其东北部常年处于中值区。2005—2012 年, 兰州、银川及附近区域的中值区范围逐步扩大, 2011—2012 年, 两城市群的中低区连接成片。2008—2013 年兰州出现小部分中高区, 自 2013 年后, 中值区、中低区范围逐步缩小, 2018—2019 年中值区消失。宁夏北部 NO<sub>2</sub> 柱浓度明显高于南部,

这可能是由于宁东化工基地的工业排放加重了该地区NO<sub>2</sub>的污染状况<sup>[21]</sup>。近15年,甘肃的大部分区域、宁夏南部属于低值区级别,NO<sub>2</sub>浓度较低,大气环境较为稳定。

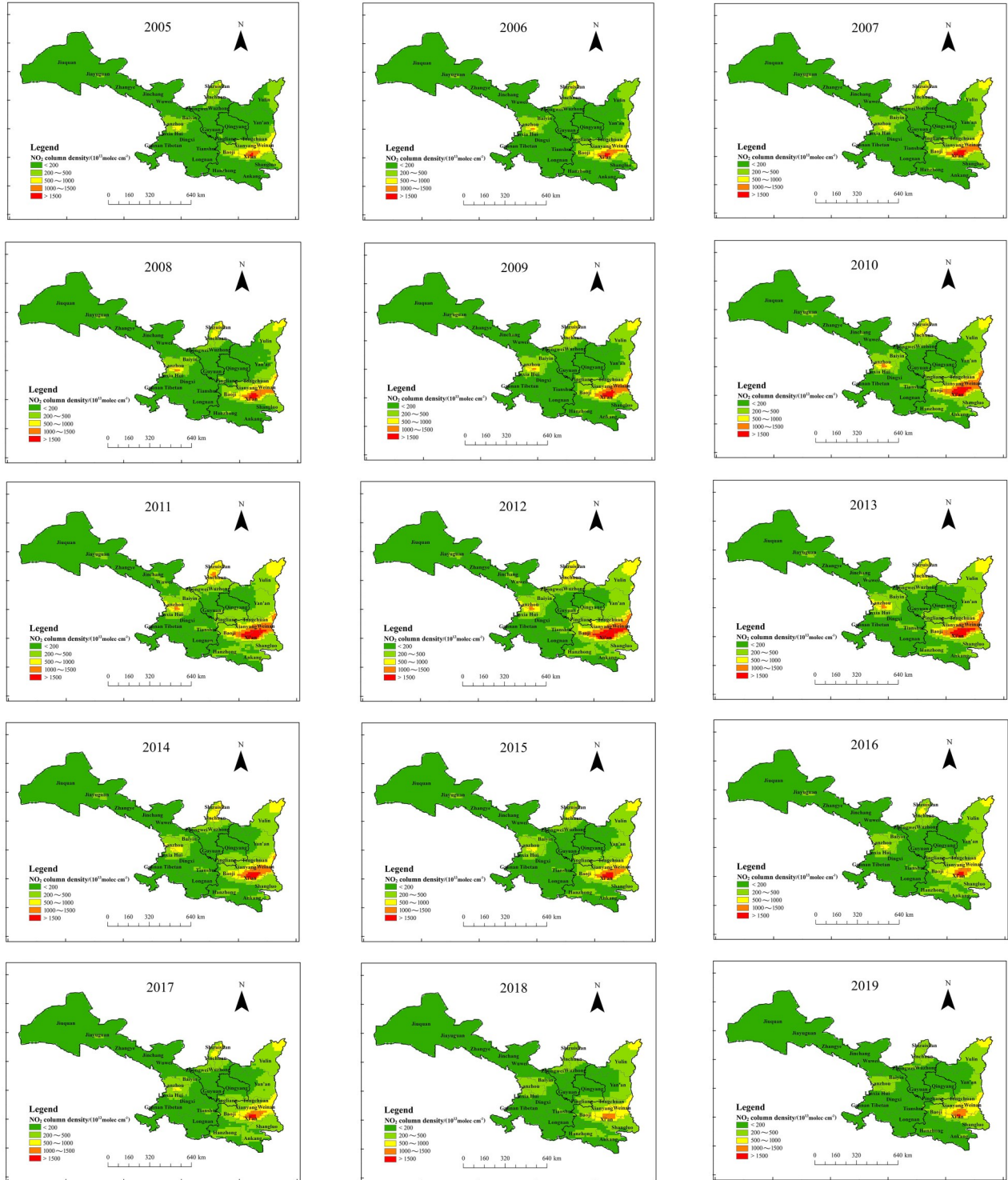


图7 2005—2019年陕甘宁地区NO<sub>2</sub>柱浓度年均值空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of annual mean concentration of NO<sub>2</sub> column density in Shaanxi-Gansu-Ningxia region from 2005 to 2019



### 3 影响因素分析

#### 3.1 自然因素

风向对大气污染物的扩散速度和方向具有直接的影响<sup>[47]</sup>。分别统计了 2005—2019 年三省份共计 56 个气象站点的风向频次, 如图 8 所示。由图可知, 三省份四季中频次最高的风向均为西北风, 从整体上来看, 陕甘宁地区的东部 NO<sub>2</sub> 浓度较高, 陕西冬季的东北风、东南风使得 NO<sub>2</sub> 向西扩散, 宁夏的南风有助于 NO<sub>2</sub> 向北扩散。从地形上来看, 陕甘宁地区处于青藏高原和黄土高原的过渡带, 陕南地区秦岭山脉绵延, 宁夏平原、汾渭平原分布其中, 整体地势起伏变化大。地形对 NO<sub>2</sub> 浓度变化的影响主要体现在两个方面: 一是平原区人口密度大, 人类活动产生的 NO<sub>2</sub> 较多, 高原区则相反; 二是山地具有阻断大气污染物传输的作用, 这使得平原区人为产生的大量 NO<sub>2</sub> 无法有效地向四周扩散。因此, 受到地形与风向的综合影响, 陕甘宁地区的 NO<sub>2</sub> 主要分布在人类活动频繁的低海拔区和平原。

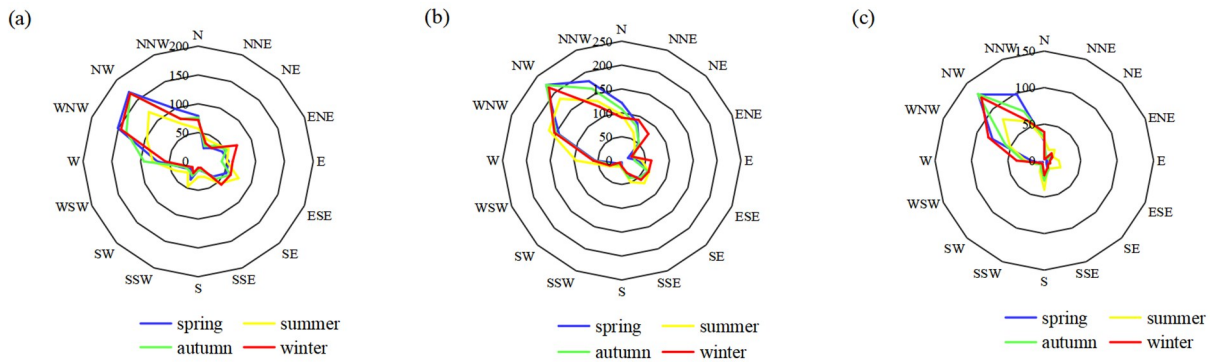


图 8 陕西 (a)、甘肃 (b)、宁夏 (c) 四季风向风频图

Fig. 8 Seasonal wind direction and frequency maps of Shaanxi (a), Gansu (b) and Ningxia (c)

气温也是影响大气污染物浓度的一个潜在的自然因子, 图 9 显示, 陕甘宁地区近 15 年的月均气温

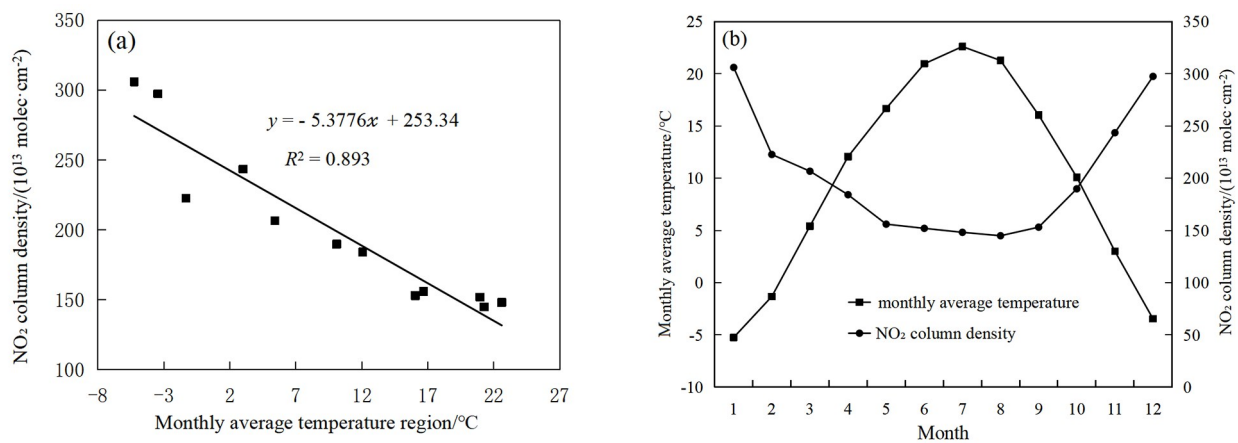


图 9 2005—2019 年陕甘宁地区月均气温与 NO<sub>2</sub> 柱浓度关系图。(a) 散点图; (b) 趋势图

Fig. 9 Relationship between monthly average temperature and NO<sub>2</sub> column density in Shaanxi-Gansu-Ningxia region from 2005 to 2019. (a) Scatter diagram; (b) trend graph

与NO<sub>2</sub>柱浓度月均值的拟合度较好,  $R^2$ 为0.893。对12组均值数据进行相关性分析, 相关系数 $r$ 达-0.945, 满足0.01显著性水平检验, 这说明气温是影响该地区NO<sub>2</sub>浓度的重要自然因素。有研究<sup>[48]</sup>指出, 气温的季节性变化会在一定程度上对NO<sub>2</sub>浓度变化产生间接影响: 夏季的强辐射光会使NO<sub>2</sub>发生一系列光化学反应, 最终转化为HNO<sub>3</sub>并通过干湿沉降作用从大气中消除; 冬季由于辐射减弱对NO<sub>2</sub>的消除作用则不明显。此外, 由于冬季温度较低, 采暖期燃料的使用会大幅增加, 这也会导致氮氧化物排放量相应增加, 加重了NO<sub>2</sub>的污染程度。

相关研究表明, 降雨对空气污染物具有清除和冲刷作用<sup>[49]</sup>。由图10(a)可知: 陕甘宁地区近15年月均降雨量与NO<sub>2</sub>柱浓度的 $R^2$ 为0.720, 具有良好的一致性。对12组均值数据进行相关性检验, 相关系数 $r$ 为-0.848, 具有显著负相关性。图10(b)显示陕甘宁地区降雨量呈现冬季少夏季多的特点, 夏季降雨量约占全年降雨量的50.6%, 冬季仅占2.8%, 季节分布极不均衡, NO<sub>2</sub>柱浓度季节性特点与之相反。可见降雨对NO<sub>2</sub>浓度的变化具有一定的影响, 降雨量的增加可以有效降低该地区的NO<sub>2</sub>浓度。

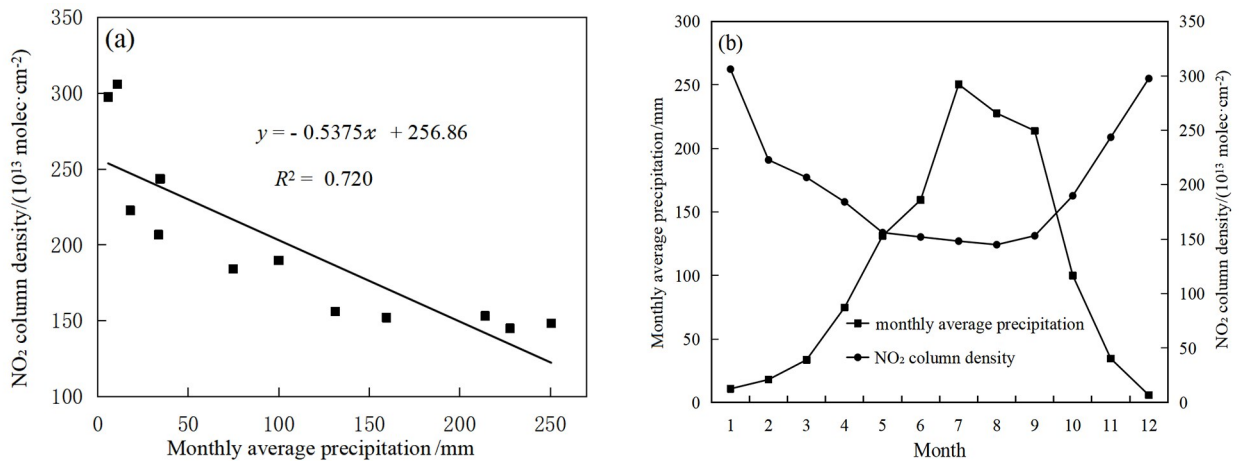


图10 2005—2019年陕甘宁地区月均降雨量与NO<sub>2</sub>柱浓度关系图。(a) 散点图; (b) 趋势图

Fig. 10 Relationship between monthly average precipitation and NO<sub>2</sub> column density in Shaanxi-Gansu-Ningxia region from 2005 to 2019. (a) Scatter diagram; (b) trend graph

### 3.2 人为因素

以2005年为基准, 分析了煤炭消耗量、工业产值、机动车保有量的逐年相对变化趋势(图11)。陕甘宁地区的NO<sub>2</sub>柱浓度年均值变化从2012年以后进入转折期, 按2005—2011年、2005—2012年、2005—2013年、2005—2017年和2005—2018年五个时间段分析该地区的人为因素的影响强度, 将人为影响因子与NO<sub>2</sub>柱浓度进行相关性分析(表2)。

#### 3.2.1 煤炭消耗量

陕甘宁地区化石能源以煤炭消耗为主, 每年的煤炭消耗量占能源消耗总量的70%以上。如图11所示, 陕甘宁地区的煤炭消耗量连年增长, 年均增长率8.6%, 到2017年底翻了一倍。由表2可以看到, 煤炭消耗量和NO<sub>2</sub>柱浓度在2005—2012年相关系数达到0.988, 说明煤炭消耗量对NO<sub>2</sub>浓度的贡献作用显著; 随后相关性下降, 2005—2017年相关系数为0.509, 这是因为在2010年以前, 关于氮氧化物排放量的约束性规定和管理工作还未陆续开展<sup>[50]</sup>, 自“十二五”“十三五”规划以来, 环境综合治理力度加大, 火电厂、锅炉等燃煤企业的脱硝改造减排工程持续推动, 以及以汾渭平原为代表的秋冬季大气污染综合治理攻坚行动也得到了

表2 各时间段对流层NO<sub>2</sub>柱浓度与人为影响因子的相关系数Table 2 Correlation coefficient between NO<sub>2</sub> column density and anthropogenic factors in various years

Year	Correlation coefficient		
	Coal consumption	Industrial output value	Motor vehicle population
2005—2011	0.981**	0.989**	0.976**
2005—2012	0.988**	0.992**	0.984**
2005—2013	0.948**	0.955**	0.933**
2005—2017	0.509	0.669*	0.399
2005—2018	—	0.533*	0.255

注: \*\*表示在0.01水平上显著相关, \*表示在0.05水平上显著相关

深入实施。

### 3.2.2 工业产值

工业产值一定程度上反映了工业生产的NO<sub>2</sub>排放情况。如图11所示,除2015年工业产值有小幅下降外,陕甘宁地区工业产值以年均38.1%的速度逐步增加,到2018年底已经扩增至2005年的4.95倍。工业产值和NO<sub>2</sub>柱浓度的各时间段相关系数均表现为显著正相关,但相关性有所降低。这说明工业生产对NO<sub>2</sub>浓度变化具有重要影响,而能源、产业结构的调整同样削弱了这种影响效应。事实上,该地区工业发展所需的能源供应主要以煤炭消耗的火力发电为主。2013年以来,重工业行业安装脱硝设备的进程加快。随后陕西省制定和发布了高于国家污染物排放标准的《大气污染防治条例》,防治措施得到深入实施。因此从2013年开始,NO<sub>2</sub>浓度呈显著下降。

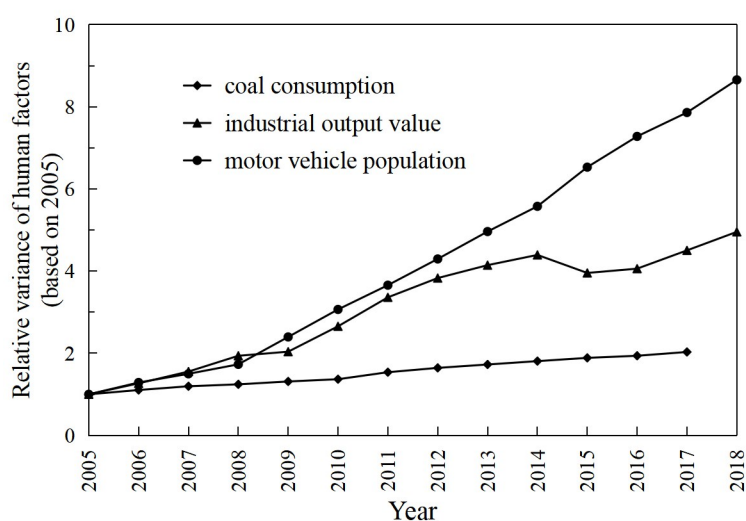


图11 2005—2018年陕甘宁地区部分经济指标相对变化趋势

Fig. 11 Variation tendency of economic indicators in Shaanxi-Gansu-Ningxia region from 2005 to 2018

### 3.2.3 机动车保有量

从图11中还可以看出,截至2018年底,陕甘宁地区机动车保有量激增为2005年的8.66倍,年均增长率高达66.6%。机动车保有量和NO<sub>2</sub>柱浓度的相关性变化显著,2005—2012年相关系数为0.984,这说明机动车尾气排放是导致大气中NO<sub>2</sub>浓度升高的另一重要原因;2005—2018年相关系数下降至0.255,这主要与近

几年的机动车尾气减排措施有关。“十二五”“十三五”规划中关于机动车的管理措施有：加快淘汰黄标车和老旧车辆、实施国IV排放标准和相应油品标准。2015年，全国开始实施柴油车IV排放标准。在《三年行动方案(2018—2020)》中提出了推进清洁运输、优先发展公共交通等运输结构调整的计划。这些措施均有效控制了汽车尾气中的氮氧化物含量，使得NO<sub>2</sub>的浓度有效降低。

## 4 结 论

使用OMI遥感反演数据分析研究了陕甘宁地区的NO<sub>2</sub>浓度的时空分布特征和影响因素，主要结论如下：

1) 近15年陕甘宁地区对流层NO<sub>2</sub>柱浓度月均值呈周期性变化，最小值出现在5—8月，最高值在1月、12月，其中2005年8月出现最小值，2011年12月出现最大值；季节上总体呈现冬季>秋季>春季>夏季的趋势，夏季变化平缓，冬季波动剧烈。而近15年陕甘宁地区对流层NO<sub>2</sub>柱浓度的年变化特征以2012年为拐点，呈先上升后下降的趋势，总体变化平稳，年平均值为 $200 \times 10^{13} \text{ molec/cm}^2$ 。

2) 近15年陕甘宁地区对流层NO<sub>2</sub>柱浓度的空间变化特征总体呈现由西北向东南方向递增的趋势，各省会及附近区域的NO<sub>2</sub>柱浓度相对较高。因能源化工基地的影响，银川及周边城市和榆林东北部的NO<sub>2</sub>柱浓度常年属于中值区及以上级别。从2013年开始，关于氮氧化物排放规定的实施逐渐成效，中高区、高值区的范围缩减明显。

3) 陕甘宁地区地形与风向对NO<sub>2</sub>的空间分布具有一定影响，高温可以抑制NO<sub>2</sub>柱浓度的升高，降雨可以有效削减NO<sub>2</sub>浓度；煤炭消耗量、工业产值、机动车保有量等人为因素加重该地区NO<sub>2</sub>污染的重要原因。该地区一系列脱硝改造工程、机动车尾气管控措施相继开展，废气治理费用投入持续加大，能源、产业、运输结构继续优化使得NO<sub>2</sub>污染问题已经得到了明显改善，减排治污工作已见成效。因此，强有力的防治措施能够使NO<sub>2</sub>浓度得到有效的控制。

## 参考文献:

- [1] Gu J B. *Retrieval of Ground-Level NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> Concentrations from Satellite Observations* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese, 2017.  
顾坚斌. 近地面二氧化氮与二氧化硫卫星遥感反演研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [2] Wang C J, Wang T, Wang P C, *et al.* Comparison and validation of TROPOMI and OMI NO<sub>2</sub> observations over China [J]. *Atmosphere*, 2020, 11(6): 636.
- [3] Xin M W, Yuan J G, Ma J J. Spatiotemporal changes of tropospheric NO<sub>2</sub> vertical column densities in Hebei Province based on data of OMI satellite [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(10): 2290-2295.  
辛名威, 袁金国, 马晶晶. 基于OMI卫星数据的河北省对流层NO<sub>2</sub>垂直柱浓度时空变化研究 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53(10): 2290-2295.
- [4] Ramanathan V, Feng Y. Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives [J]. *Atmospheric*

*Environment*, 2009, 43(1): 37-50.

- [5] 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 2005—2009 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1249-1259.  
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.
- [6] Li H L. *Study on Estimation for Anthropogenic PM<sub>2.5</sub> and Secondary Fine Particles Precursors Emissions in China* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.  
李宏亮. 我国人为源PM<sub>2.5</sub>及二次前体物的估算研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [7] Xiong W L, Huang W, Zhang G B. Damage caused by the NO<sub>x</sub> generated by thermal power plants and its prevention and treatment [J]. *Hunan Electric Power*, 2002, 22(1): 61-62.  
熊蔚立, 黄伟, 张国斌. 火电厂氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的危害和防治 [J]. *湖南电力*, 2002, 22(1): 61-62.
- [8] 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.  
周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000—2011年中国PM<sub>2.5</sub>时空演化特征及驱动因素解析 [J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2079-2092.
- [9] Jia L, Ge M F, Xu Y F, *et al.* Advances in atmospheric ozone chemistry [J]. *Progress in Chemistry*, 2006, 18(11): 1565-1574.  
贾龙, 葛茂发, 徐永福, 等. 大气臭氧化学研究进展 [J]. *化学进展*, 2006, 18(11): 1565-1574.
- [10] Wang G L, Lü D R, Yang P C. On the effect of atmospheric ozone by the human activities [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(3): 331-337.  
王革丽, 吕达仁, 杨培才. 人类活动对大气臭氧层的影响 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(3): 331-337.
- [11] Chan C K, Yao Y H. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(1): 1-42.
- [12] Zheng X X, Li L J, Zhao W J, *et al.* Spatial and temporal characteristics of atmospheric NO<sub>2</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, 23(12): 1938-1945.  
郑晓霞, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀地区大气NO<sub>2</sub>污染特征研究 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(12): 1938-1945.
- [13] Zhou C Y, Gao Y H, Chen H, *et al.* Spatio-temporal change and comparison of tropospheric NO<sub>2</sub> column density over the three urban agglomerations during the period of "twelfth five-year" [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 41(3): 65-69.  
周春艳, 高彦华, 陈辉, 等. "十二五"期间三大城市群对流层NO<sub>2</sub>柱浓度时空变化及对比 [J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(3): 65-69.
- [14] 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*, 2015, 31(2): 193-201.  
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.
- [15] Wu W L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Sensitivity analysis of ozone in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area using OMI satellite remote sensing data [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(4): 1201-1208.  
武卫玲, 薛文博, 雷宇, 等. 基于OMI数据的京津冀及周边地区O<sub>3</sub>生成敏感性 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(4): 1201-1208.
- [16] Gao C, Zhang C, Yu S Q. Temporal and spatial variation for vertical column density of tropospheric NO<sub>2</sub> over the Yangtze River Delta from 2005 to 2013 [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2015, 32(5): 691-700.  
高诚, 张超, 余树全. 2005—2013年长江三角洲地区对流层二氧化氮时空变化特征 [J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(5): 691-700.
- [17] Song J Y, Liu M X, Sun R D, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of atmospheric ozone concentration in Southeast Coast based on OMI data [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2): 438-449.  
宋佳颖, 刘旻霞, 孙瑞弟, 等. 基于OMI数据的东南沿海大气臭氧浓度时空分布特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2):

- 438-449.
- [18] Wang J, Ju T Z, Xie S T, *et al.* Spatiotemporal distribution of NO<sub>2</sub> column concentration in Western China—A case study of Tianshui city [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2018, 25(1): 51-57.  
王菁, 巨天珍, 谢顺涛, 等. 利用OMI数据对我国西部城市NO<sub>2</sub>柱浓度的时空分布特征研究: 以天水市为例 [J]. 安全与环境工程, 2018, 25(1): 51-57.
- [19] Cui Y Z, Jiang L, Zhang W S, *et al.* Spatio-temporal variations and influential factors of anthropogenic NO<sub>2</sub> pollution over Western China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(12): 4152-4161.  
崔远政, 姜磊, 张为师, 等. 中国西部人为源NO<sub>2</sub>污染的时空分布及影响因素研究 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4152-4161.
- [20] Wang J X. *Impact of Emission from Typical Energy Industry Base on Local Air Quality in Northwest China* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.  
王金相. 西北地区典型能源工业基地排放对局地环境空气质量的影响 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [21] Zhang L J. *Evaluation and Spatial-temporal Analysis of Healthy Cities in Shaanxi-Gansu-Ningxia* [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019.  
张丽娟. 陕甘宁健康城市评价与时空格局研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- [22] Han L. *Analysis of the Shanxi Gansu Ningxia Provinces County Economy Based on Network* [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016.  
韩磊. 基于陕甘宁三省区县域经济网络分析 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- [23] Shen Y J. *A Primary Study for Air Quality of the Energy Golden Triangle, Northwest China Based on the Data of Satellite Remote Sensing* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.  
沈艳洁. 基于OMI卫星遥感数据的能源金三角空气质量初探 [D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [24] 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.  
章吴婷, 张秀英, 刘磊, 等. 多源卫星遥感的华北平原大气NO<sub>2</sub>浓度时空变化 [J]. 遥感学报, 2018, 22(2): 335-346.
- [25] Zhang X Y, Zhang P, Fang Z Y, *et al.* The progress in trace gas remote sensing study based on the satellite monitoring [J]. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(7): 3-14.  
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): 3-14.
- [26] Bucsele E J, Celarier E A, Wenig M O, *et al.* Algorithm for NO<sub>2</sub> vertical column retrieval from the ozone monitoring instrument [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1245-1258.
- [27] Yan H H, Chen L H, Tao J H, *et al.* SO<sub>2</sub> long-term monitoring by satellite in the Pearl River Delta [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(2): 390-404.
- [28] Uno I, He Y, Ohara T, *et al.* Systematic analysis of interannual and seasonal variations of model-simulated tropospheric NO<sub>2</sub> in Asia and comparison with GOME-satellite data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(6): 1671-1681.
- [29] Zhang Q, Streets D G, He K B, *et al.* NO<sub>x</sub> emissions trends for China, 1995-2004: The view from the ground and the view from space [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D22306.
- [30] Ding Y Y, Peng L, Ran L, *et al.* A method of inferring ground level NO<sub>2</sub> using satellite-borne OMI observations [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(4): 671-676.  
丁宇宇, 彭丽, 冉靛, 等. 利用OMI卫星资料计算NO<sub>2</sub>地面浓度的方法研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2011, 47(4): 671-676.
- [31] Boersma K, Jacob D, Bucsele E, *et al.* Validation of OMI tropospheric NO<sub>2</sub> observations during INTEX-B and application to constrain NO<sub>x</sub> emissions over the eastern United States and Mexico [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(19): 4480-4497.
- [32] Krotkov N A, McLinden C A, Li C, *et al.* Aura OMI observations of regional SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> pollution changes from 2005 to

- 2014 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2015, 15(19): 26555-26607.
- [33] Burrows J P. The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, 56(414): 2340-52.
- [34] Veefkind J P, de Haan J F, Brinksma E J, et al. Total ozone from the ozone monitoring instrument (OMI) using the DOAS technique [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1239-1244.
- [35] Chen L F, Han D, Tao J H, et al. Overview of tropospheric NO<sub>2</sub> vertical column density retrieval from space measurement [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(3): 343-354.  
陈良富, 韩冬, 陶金花, 等. 对流层NO<sub>2</sub>柱浓度卫星遥感反演综述 [J]. 遥感学报, 2009, 13(3): 343-354.
- [36] Boersma K F, Eskes H J, Veefkind J P, et al. Near-real time retrieval of tropospheric NO<sub>2</sub> from OMI [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2012, 6(8): 2103-2118.
- [37] Richter A, Burrows J P. Tropospheric NO<sub>2</sub> from GOME measurements [J]. *Advances in Space Research*, 2002, 29(11): 1673-1683.
- [38] Yan H H, Zhang X Y, Wang W H. Spatiotemporal variations of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> over global region and China by OMI observations during 2004—2014 [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(17): 41-51.  
闫欢欢, 张兴赢, 王维和. 卫星遥感监测全球和中国区域污染气体NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>时空空变化 [J]. 科技导报, 2015, 33(17): 41-51.
- [39] 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.  
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.
- [40] Xiao Z Y, Xie X Q, Chen Y F, et al. Temporal and spatial characteristics and influencing factors of NO<sub>2</sub> pollution over Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(5): 2010-2017.  
肖钟湧, 谢先全, 陈颖锋, 等. 粤港澳大湾区NO<sub>2</sub>污染的时空特征及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2010-2017.
- [41] Zhang Y J, Niu Z, Wang L, et al. Study on tropospheric NO<sub>2</sub> change trend in cities using OMI satellite data [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2008, 24(3): 96-99.  
张彦军, 牛铮, 王力, 等. 基于OMI卫星数据的城市对流层NO<sub>2</sub>变化趋势研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2008, 24(3): 96-99.
- [42] Yu H, Wang P C, Zong X M, et al. Variation of NO<sub>2</sub> column concentration by satellite monitoring in Beijing area during the Olympic Games [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(3): 299-304.  
余环, 王普才, 宗雪梅, 等. 奥运期间北京地区卫星监测NO<sub>2</sub>柱浓度的变化 [J]. 科学通报, 2009, 54(3): 299-304.
- [43] Bauwens M, Compernelle S, Stavrakou T, et al. Impact of coronavirus outbreak on NO<sub>2</sub> pollution assessed using TROPOMI and OMI observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(11): e2020GL087978.
- [44] Cai X B, Ren Y P, Zhang Y, et al. The short-term impact estimate of COVID-19 epidemic on social-economic activity of China by using remotely sensed NO<sub>2</sub> observations [J]. *Journal of HuaZhong Normal University (Natural Sciences)*, 2020, 54(6): 1045-1050.  
蔡晓斌, 任永鹏, 张媛, 等. 利用卫星遥感NO<sub>2</sub>监测结果分析COVID-19疫情对我国社会经济活动的短期影响 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(6): 1045-1050.
- [45] van der A R J, Peters D H M U, Eskes H, et al. Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO<sub>2</sub> over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111: D12317.
- [46] 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.  
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.

- [47] Li F S, Ju T Z, Ma C, *et al.* Absorption aerosol in Gansu Province based on satellite remote sensing [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(10): 4082-4092.  
李逢帅, 巨天珍, 马超, 等. 基于卫星遥感的甘肃省吸收性气溶胶的研究 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4082-4092.
- [48] Yue J, Lin Y P, Deng Z Z, *et al.* Seasonal variations of tropospheric NO<sub>2</sub> over megalopolis in Eastern China using satellite remote-sensing data and chemistry-transport model [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(3): 431-438.  
岳捷, 林云萍, 邓兆泽, 等. 利用卫星数据和全球大气化学传输模式研究中国东部大城市对流层NO<sub>2</sub>季节变化原因 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2009, 45(3): 431-438.
- [49] Zhang Y. Dynamic effect analysis of meteorological conditions on air pollution: A case study from Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 684: 178-185.
- [50] Geng G N, Xiao Q Y, Zheng Y X, *et al.* Impact of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan on PM<sub>2.5</sub> chemical composition over eastern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(12): 1872-1884.