

卡木然·买买提艾力, 杨涵, 艾则买提江·麦麦提图尔荪. 2020年新疆NO₂浓度时空变化特征分析[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(8): 96–106. Kamuran Maimaitiaili, Yang Han, Aizemaitijiang Maimaitituersun. Characterization of spatial and temporal variations of NO₂ concentration in Xinjiang in 2020[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(8): 96–106.

2020年新疆NO₂浓度时空变化特征分析

卡木然·买买提艾力¹, 杨涵^{1,2*}, 艾则买提江·麦麦提图尔荪¹

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 二氧化氮(NO₂)作为大气中主要的污染气体, 对人体健康和大气环境有着严重的危害, 探究NO₂浓度时空变化特征及其驱动力, 可以更好地了解影响NO₂浓度变化的自然和人为因素。文章提取新疆2020年1–12月 Sentinel-5P 卫星所获取的NO₂浓度数据, 采用空间自相关模型和 Sen+Mann-Kendall 趋势分析法, 分析新疆NO₂浓度时空分布规律及变化, 并运用最优地理探测器模型定量分析人为因素及自然因素对于NO₂浓度变化的解释力。结果表明: (1) 2020年新疆地区NO₂浓度平均值最高是在7月, 最低是在2月, 从1–7月NO₂浓度先下降后上升, 从7月开始下降一直持续到11月。(2) NO₂浓度的 Moran' I 最大值为0.921, 最小值为0.784, 存在空间聚集性。NO₂浓度高-高聚集区主要分布于研究区中部的天山北麓城市集中分布区域, 低-低聚集区主要分布于北部的阿尔泰山脉及南部昆仑山脉附近。(3) 2020年新疆NO₂浓度约89.14%的区域呈基本不变, 8.31%的地区NO₂浓度轻微增加, 2.19%的地区NO₂浓度显著增加, 0.36%的区域轻微下降, 没有明显下降的区域。(4) NO₂浓度受多种影响因素共同作用, 其中GDP对NO₂浓度的解释力较大, 而地表温度对其的解释力最小, GDP与其他因子交互作用明显, 可见人为活动对于NO₂浓度变化的影响较大。

关键词: NO₂浓度; 趋势分析; 最优地理探测器; 新疆

中图分类号: X51 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.0424.24.338 **文章编号:** 1003-6504(2024)08-0096-11

Characterization of Spatial and Temporal Variations of NO₂ Concentration in Xinjiang in 2020

KAMURAN Maimaitiaili¹, YANG Han^{1,2*}, AIZEMAITIJANG Maimaitituersun¹

(1. School of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

Abstract: Nitrogen dioxide (NO₂), as a major atmospheric pollutant, poses a serious threat to human health and the atmospheric environment. Investigating the characteristics of the spatial and temporal variations of NO₂ concentration and its driving force can provide a better understanding of the natural and anthropogenic factors affecting the variation of NO₂ concentration. In this paper, the NO₂ concentration data were extracted and acquired by the Sentinel-5P satellite from January to December 2020, used the spatial autocorrelation model and Theil-Sen median trend analysis and the Mann-Kendall test to analyze the spatial and temporal distribution pattern of NO₂ concentration in Xinjiang and its evolutionary trend, and applied the optimal parameters-based geographical detector (OPGD) to quantify the explanatory power of anthropogenic and natural factors on the changes of NO₂ concentration. The explanatory power of anthropogenic and natural factors on the variation of NO₂ concentration was quantitatively analyzed by the OPGD model. The results showed that the highest mean value of NO₂ concentration in Xinjiang in 2020 was in July and the lowest in February, and the mean value showed an upward trend from the overall perspective. The maximum value of Moran' I for NO₂ concentration is 0.921. The minimum value is 0.784, with spatial clustering. The high-high clustering area of NO₂ concentration is mainly located in the central part of the study area in the northern foothills of the Tianshan Mountains. In contrast, the low-low clustering area is mainly located in the northern Altai Mountain Range and the southern part in the vicinity of the Kunlun Mountain Range. In 2020, about 89.14% of the NO₂ concentration in the whole territory is basically unchanged, 8.31% of the area has a slight increase in NO₂ concentration, 2.19% of the area has a significant increase in NO₂ concentration, 0.36% of the area has a slight decrease, and there is no area with a

《环境科学与技术》编辑部: (网址)http://jks.chinajournal.net.cn (电话)027-87643502 (电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2024-05-14; 修回 2024-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42061007, 42261058)

作者简介: 卡木然·买买提艾力(1999–), 男, 硕士研究生, 研究方向为资源与环境遥感, (电子信箱)kamranm@sina.com; *通讯作者, 女, 副教授, 博士, 主要从事干旱区环境遥感方面研究, (电子信箱)yanghanxjnu@xjnu.edu.cn。

significant decrease. NO₂ concentration is affected by a variety of influencing factors, among which GDP has a greater explanatory power for NO₂ concentration. In contrast, surface temperature has the least explanatory power for it, and GDP interacts significantly with other factors, which shows that anthropogenic activities have a greater influence on the change of NO₂ concentration.

Key words: NO₂ concentration; trend analysis; OPGD; Xinjiang

近年来,我国工业化和城市化带动经济快速增长的同时,也随之带来了雾霾等空气污染问题^[1]。过去10年,我国以年均3%的能源消费增速支撑了平均6.6%的经济增长^[2],2020年《中国生态环境状况公报》显示,在全国337个地级及以上城市中,空气质量达标城市仅占59.9%,PM_{2.5}、O₃、PM₁₀、NO₂和SO₂成为最重要的空气污染物类型^[3]。NO₂作为大气中能以比较稳定的状态存在的氮氧化物,是影响空气质量的重要大气污染物之一^[4],也是PM_{2.5}和O₃的前体物质之一^[5],其长期暴露会对人体健康产生较大的负面影响,如引起呼吸系统疾病,增加慢性肾脏病患病风险等^[6,7]。我国从“十二五”计划开始高度重视大气污染,制定并实施了一系列政策措施^[8]，“十四五”时期,NO₂浓度仍然是深入开展大气污染防治的大气质量约束性指标之一^[9]。因此,在大气污染治理的大背景下,揭示NO₂浓度的时空特征及其相关驱动因素对于解决大气污染问题、不断提升空气质量具有科学意义。

大气中NO₂浓度监测,主要有地面站点监测和遥感卫星反演2种方式。地面站点监测技术可以获得高精度的NO₂浓度信息,但是难以获得大尺度空间上连续的NO₂浓度数据^[10]。遥感卫星有分辨率高、覆盖面积广、数据一致性好、成本低等优势,可以弥补这一不足,实现了从站点数据向空间数据的扩展以及从小尺度空间到大尺度空间上的延伸,被很多学者广泛的应用^[11,12]。目前,探测NO₂浓度的传感器主要有全球臭氧监测仪(GOME^[13]、GOME-2^[14])、大气制图扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY^[15])、臭氧观测仪(OMI^[16])、搭载哨兵5号卫星的对流层监测仪(TROPOMI^[17])、搭载高分五号(GF-5)卫星的大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI^[18])以及韩国的环境监测传感器(GEMS^[19])等。相关学者对于不同地区OMI和TROPOMI监测的NO₂浓度数据与地面站点监测的NO₂浓度数据进行比较和验证,如姚尧等^[20]基于中国2004–2013年274个地级及以上城市的监测数据对NO₂时空分布格局进行研究,使用空间计量经济模型分析社会经济要素对城市NO₂污染的影响机制。Al Yammahi等^[21]利用小波分析研究了阿联酋上空NO₂的周期性。此外,有学者基于多源遥感数据揭示NO₂浓

度时空分布以及区域差异,如:武卫玲等^[22]通过分析OMI对流层NO₂垂直柱浓度数据变化趋势,评估“十二五”期间及“十三五”初期我国NO_x排放量的变化状况;Hou等^[23]使用OMI数据与地面站点数据进行相关性分析,对近10年来对流层柱二氧化氮的时空变化进行研究;章吴婷等^[24]基于多源卫星遥感探讨1996–2016年华北平原对流层NO₂浓度的时空变化特征等。相关研究均表明:卫星传感器对NO₂浓度的探测为研究大尺度地区NO₂浓度时空变化提供了可靠的数据来源。

NO₂浓度的变化受到多种因素的影响,人类活动被认为是较为主要的因素^[25,26],此外降水等自然因素也对其浓度变化产生影响^[27]。因此本文研究降水、数字高程模型数据(DEM)等自然因素以及土地利用、地表温度、夜间灯光、人口、GDP等人为因素以及这些相互作用下对NO₂浓度的变化的影响。相关研究中,基于城镇化综合测度指标的空间计量法^[28]、相关性分析^[29]、地理加权回归模型^[30,31]等方法来揭示驱动因素。然而,这些方法涉及不同程度的不确定性,例如,自变量之间的相互作用可能导致多重共线性问题^[32]。地理探测器是一种检测空间差异及其背后驱动力的统计模型^[33],它可以定量检测各因素的贡献程度和相互作用程度,广泛应用于土地利用^[34]、气象^[35]、环境^[36,37]等领域;通过分析空间分层异质性,揭示驱动因子影响力,利用定量和定性数据,通过统计学的方法,对研究对象进行空间异质性监测^[38]。在地理探测器中,空间数据离散化和空间尺度的选择往往以经验而确定,缺乏准确的定量评估。而最优地理探测器(OPGD)是在其基础之上基于最优参数对各因子进行离散化,能够基于最优离散化方式评价NO₂浓度驱动因素以及各因素之间的相互作用程度^[39]。

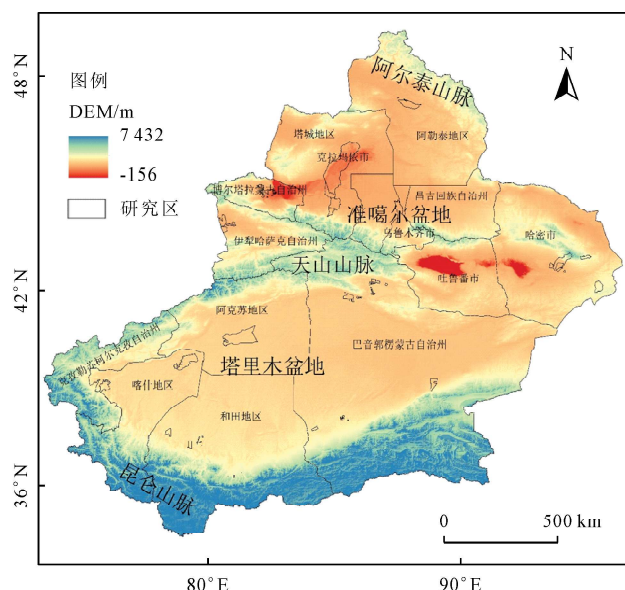
新疆是中国陆地面积最大、交界邻国最多、陆地边境线最长的省级行政区,也是我国最大的干旱区,生态环境脆弱,绿洲作为干旱区特有的人地关系地域系统,其特殊的分布及直接影响了城市和人口模式,进而影响NO₂浓度的时空分布。因此,将新疆地区作为研究区有利于评价干旱区NO₂浓度变化与人口、社会以及经济要素的空间分布关系。本研究提取Sentinel-5P卫星数据,采用空间自相关模型分析其空间聚集性及关联程度,结合Sen+Mann-Kendall趋势

分析法,探讨了新疆 NO_2 浓度2020年1–12月在时间序列上的变化趋势,选取土地利用、地表温度、夜间灯光、人口、GDP、降水、DEM等7个因子,并运用最优地理探测器模型定量分析了人为因素及自然因素对于 NO_2 浓度变化的解释力,以期干旱区绿洲城市污染治理决策提供更多的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区(图1)位于亚欧大陆中心、中国西北边陲,地处 $73^{\circ}45'\sim 96^{\circ}39'\text{E}$ 、 $34^{\circ}34'\sim 49^{\circ}17'\text{N}$,是典型的温带大陆性干旱气候,降水集中在山区,平原区降水少、蒸发量大,年均降水量177 mm。此外新疆10月–次年4月是采暖期^[40]。新疆现有14个地市(州),包括5个自治州、5个地区和乌鲁木齐市、克拉玛依、吐鲁番、哈密4个地级市,共有107个县(市、区)。2020年,第七次全国人口普查结果中全区常住人口2 585.23万人。2022年,新疆维吾尔自治区实现地区生产总值(GDP)17 741.34亿元。新疆矿产资源蕴藏丰富,包括石油、天然气、煤、金、铬、铜、镍、稀有金属等,因此形成了以矿产资源开发和农副产品深加工为主导力量的现代化工业体系,其中天山北坡经济带集中了全疆25.6%的人口、83%的重工业和62%的轻工业^[41],乌昌石地区工业较为集中,南疆地区工业园较少,多分布在库尔勒市、阿克苏市和田地区^[42]。《新疆维吾尔自治区2020年第二次全国污染源普查公报》显示,2017年全疆大气污染物中,排放的 SO_2 为26.884万t,氮氧化物(NO_x)为53.378万t,颗粒物为62.445万t^[43]。



注:该图基于审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作,底图无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源

研究中使用的数据主要包括 NO_2 浓度数据、LST地表温度数据、人口数据、土地利用数据、夜间灯光数据、GDP数据、降水和DEM数据,其中 NO_2 浓度数据使用的是Sentinel-5P TROPOMI L3_ NO_2 OFFL数据集,下载时选用 NO_2 总垂直柱浓度。Sentinel-5P卫星由欧洲航天局于2017年10月13日发射,用于空气质量、臭氧、紫外线辐射以及气候监测和预测。卫星搭载的对流层观测仪(TROPOMI)覆盖紫外、可见、短波红外谱段,能够在较高时间分辨率和空间分辨率情况下监测大气污染情况,跟踪二氧化氮、臭氧。对于甲醛、二氧化硫、甲烷、一氧化碳等气体的浓度^[17],该数据集可实现对全球地区的每日全覆盖,成像分辨率为 $7\text{ km}\times 3.5\text{ km}$,并且该数据可以通过质量控制参数QA(quality assurance)来筛选,例如 $\text{QA}<0.5$ 可以剔除异常值,而 $\text{QA}<0.75$ 不仅可以剔除错误和有问题的像元,同时也可剔除被云、部分雪冰覆盖的像元。在本文中为获取更真实的 NO_2 浓度,选取 $\text{QA}>0.75$ 条件下的像元,并且2020年新疆 NO_2 总垂直柱浓度进行月平均计算用于后续的研究中。由于数据本身存在缺失,因此个别月份数据未能覆盖到整个研究区,部分区域存在空白值。LST地表温度数据使用MODIS全球地表温度和发射率8天合成产品(MOD11A2 V6),空间分辨率为1 km。土地利用数据、夜间灯光数据^[44]和GDP数据^[45]来源于资源环境科学数据注册与出版系统。中国多时期土地利用遥感监测数据集(CN-LUCC)分辨率为1 km^[46],数据采用二级分类系统,因此在使用数据时,将数据重分类为一级类型,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地6类。人口数据使用WorldPop人口数据集,该数据包含2个数据集,分辨率分别是1 km和100 m,本文选用2020年一期分辨率为1 km的数据。降水数据是由国家青藏高原科学数据中心提供的中国逐月降水量数据集^[47],数字高程模型数据(DEM)使用先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(advanced space-borne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model, ASTER GDEM),其空间分辨率为30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析

空间自相关分析分为全局空间自相关和局部自相关,一般通过莫兰指数(Moran's I)来进行研究。为了找出 NO_2 浓度是否对邻近地区有影响及空间聚集特征,其中全局莫兰指数用于衡量新疆 NO_2 浓度的全局空间自相关模式,指数越大关联性越强,其在空间上更聚集。计算全局莫兰指数的公式表示如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} \quad (2)$$

式中, n 表示研究区(本研究以建立的网格为单位)的数量, y_i 和 y_j 分别表示研究区 i 和研究区 j 的 NO₂ 浓度平均值, W_{ij} 表示空间权重矩阵, $\bar{y}$ 表示所有研究区的 NO₂ 浓度平均值, S^2 表示所有空间权重的聚合。

通常 Moran's I 的值在 $-1 \sim 1$ 之间, 当 I 为正值时, 表示区域 NO₂ 浓度之间存在正相关; 当 I 为负值时, 表示区域 NO₂ 浓度之间存在负相关; 当 I 为 0 时, 不存在相关性。计算标准化统计量 Z 来检验 Moran's I 的结果, 以检验区域之间是否存在空间自相关。

局部空间自相关是计算分析区域内各个空间对象与其邻域对象间的空间相关程度^[48]。其局部空间关联(local indicators of spatial association, LISA)图能更好地反映局部区域内 NO₂ 浓度的空间异质性与区域集聚特征。表示如下:

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

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

式中, I_L 为局部自相关指数; $Z(I)$ 为显著性; $E(I)$ 为指数的期望值; $V(I)$ 为指数的方差。

1.3.2 Sen+Mann-Kendall 趋势分析

由于常用的线性回归法要求时间序列数据符合正态分布, 且易受噪声干扰, 而 Sen 趋势度可以很好地减少噪声的干扰, 但该方法本身无法对数据进行序列趋势显著性判断^[49], 而 Mann-Kendall 方法对数据本身序列无要求并且对异常值不敏感^[50]。因此运用 Sen 趋势度和 Mann-Kendall 检验可以分析新疆 2020 年 NO₂ 浓度变化。Sen 趋势度计算公式如下:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad \forall j > i \quad (5)$$

式中, β 表示趋势度, $\beta > 0$ 时说明 NO₂ 浓度有上升的趋势, $\beta < 0$ 时说明 NO₂ 浓度有下降的趋势。

Mann-Kendall 趋势检验公式如下:

设定 $\{x_i\}, i = 1, 2, 3, 4, \dots, 12$

$$\text{定义 } Z \text{ 统计量为: } Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{s(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{s(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

$$s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{12} \quad (7)$$

式中, x_i 和 x_j 分别表示像元 i 月和 j 月的 NO₂ 浓度, n 表示时间序列的长度; 统计量 Z 的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$ 。在给定显著性水平 α 下, 当 $|Z| > u_{1-\alpha/2}$ 时, 表示研究序列在 α 水平上存在显著的变化。

1.3.3 最优参数地理探测器模型

传统的地理探测器模型需要对连续变量进行主观离散化处理, 具有一定的局限性, 而 OPGD 具备了空间数据最优离散化功能。最优地理探测器模型包含因子探测、参数优化、交互作用探测、风险区探测和生态探测 5 个部分^[39], 本文使用因子探测、参数优化、交互作用探测 3 个模块。对于空间数据而言, 空间尺度的确定是自变量和因变量之间的数学关系。因此, 利用最优地理探测器模型因子探测以 40、30、20 km 长度网格为空间单元的 q 值来确定最优空间尺度。

因子探测用于探测因变量的分异性, 以及探测自变量对因变量空间分异的解释力, 用 q 值来度量, 取值范围为 $[0, 1]$ 。公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (8)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad \text{SST} = N \sigma^2 \quad (9)$$

式中, $h = 1, \dots, L$, 为 NO₂ 或各因子的分层, 即分区或分类; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的因变量的方差; SSW 和 SST 分别为层内方差和全区总方差。

交互作用探测一般用于识别不同自变量之间的交互作用, 即评估 X_1 和 X_2 共同作用时对因变量 Y 的解释力会增加还是减弱。其评估方法是先计算 2 种自变量 X_1 和 X_2 对因变量 Y 的 q 值: $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$, 以及 2 种自变量交互作用时的 q 值: $q(X_1 \cap X_2)$, 并且对 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 、 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较, 其 2 个因子之间的关系可划分为以下不同交互作用类型(表 1)。

表 1 交互作用类型及判断准则

Table 1 Types of interactions and judgment criteria	
交互作用类型	判断准则
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$
单因子非线性减弱	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

注: $\min(q(X_1), q(X_2))$ 为 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 两者取最小; $\max(q(X_1), q(X_2))$ 为 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 两者取最大; $q(X_1) + q(X_2)$ 为 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 两者求和。

2 结果与分析

2.1 NO₂浓度年内时空变化

从图2可以看出,2020年NO₂浓度平均值最高是在7月,最低是在2月,2-7月NO₂浓度上升,7-11月有所下降。从图3中可以看出5-11月NO₂浓度较高的区域主要与每一个城市或城市群的地理位置相对应,1月、2月、12月NO₂浓度较高的区域主要分布在乌鲁木齐、昌吉等地区,NO₂浓度最高的值出现在12月,其次为1月,NO₂浓度最高值从1月持续下降一直到8月,从9月开始呈上升趋势,持续至12月。

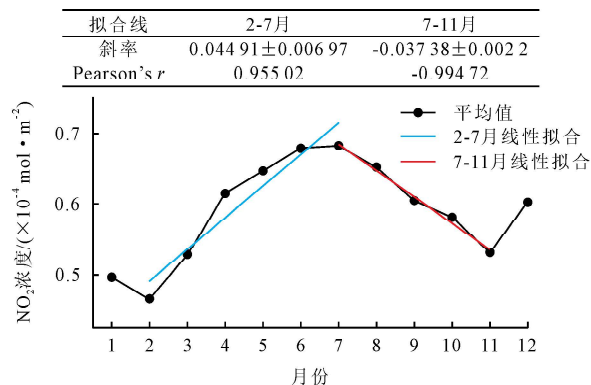
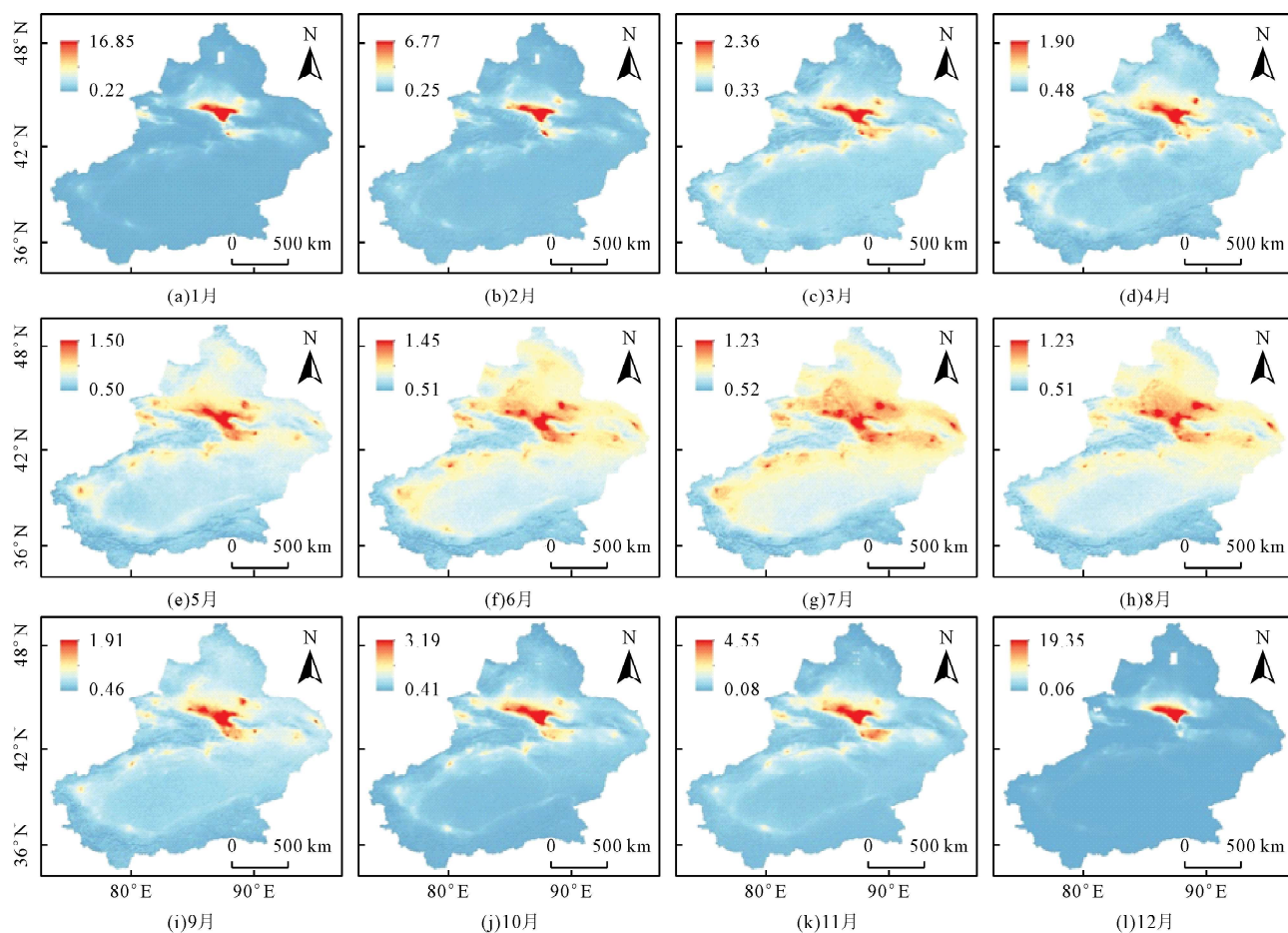


图2 新疆NO₂浓度月平均值变化
Fig.2 Changes in monthly average NO₂ concentration in Xinjiang



注: NO₂浓度单位为10⁻⁴mol · m⁻²。

图3 2020年新疆NO₂浓度分布
Fig.3 Distribution of NO₂ concentration in Xinjiang in 2020

2.2 NO₂空间自相关分析

如表2所示,2020年1-12月NO₂浓度的全局空间自相关Moran's *I*均为正,且*P*值<0.001,表明在研究区内NO₂浓度之间存在空间聚集性。NO₂浓度值高的区域倾向于聚集在其他高值区域附近,而低值也倾向于聚集在其他低值区域附近。1-12月的Moran's *I*最小值为0.784;最大值为0.921,出现在7、8月,说明7、8月的空间聚集特征最为明显。

由图4可知,1-12月NO₂浓度的高-高聚集区主要分布于研究区中部的天山北麓附近,且5-8月高-高聚集区分布范围连片增加,3-7月以及9-11月在研究区西部的伊犁河谷及南疆绿洲城市也有分布,NO₂浓度的高-高聚集区主要分布在绿洲城市所在区域。1-12月NO₂浓度低-低聚集区主要分布在研究区北部的阿尔泰山脉及南部昆仑山脉附近,9-12月研究区南部低-低聚集区分布面积逐渐减少,而研究

表2 全局自相关显著性检验
Table 2 Global autocorrelation significance test

月份	Moran's I	Z值	P值	月份	Moran's I	Z值	P值
1月	0.801	50.753	<0.001	7月	0.921	56.108	<0.001
2月	0.784	49.713	<0.001	8月	0.921	56.121	<0.001
3月	0.845	52.112	<0.001	9月	0.881	54.176	<0.001
4月	0.878	53.837	<0.001	10月	0.873	53.772	<0.001
5月	0.889	54.367	<0.001	11月	0.868	53.502	<0.001
6月	0.903	55.091	<0.001	12月	0.844	52.735	<0.001

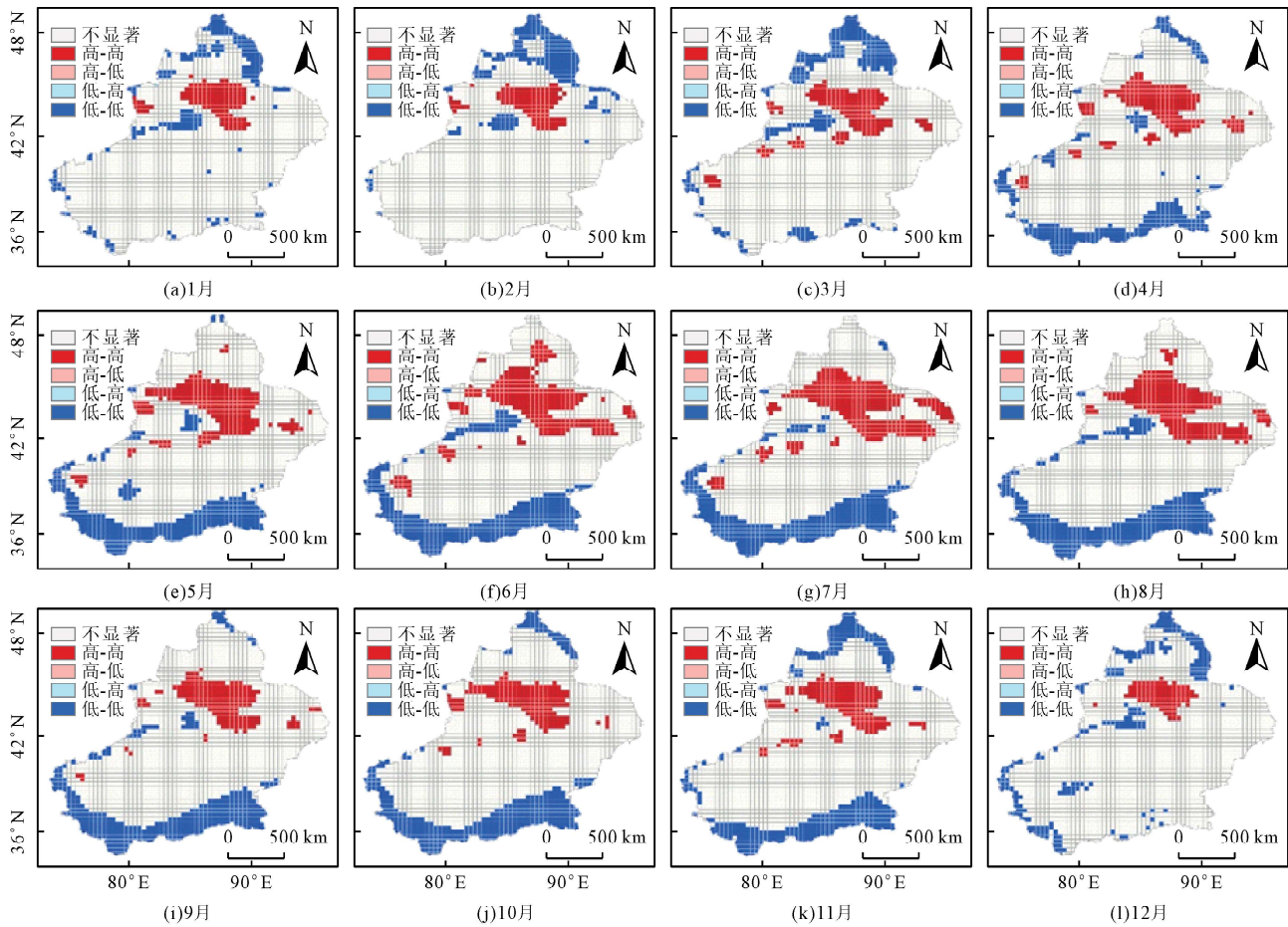


图4 2020年新疆NO₂浓度局部自相关LISA图
Fig.4 Local autocorrelation LISA map of NO₂ concentration in Xinjiang in 2020

区北部其分布面积在1-9月逐渐减少,在10月和11月逐渐增加。在3-11月研究区南部低-低聚集区分布范围逐渐增加并在5-9月呈现较为稳定的分布。

2.3 NO₂浓度变化分析

从表3可以看出,2020年1-12月整个研究区的NO₂浓度变化较为明显,由于基本不存在NO₂浓度变化严格意义上等于0的区域,因此在研究中根据实际情况,将NO₂变化趋势介于 -1×10^{-6} 和 1×10^{-6} 的划分为基本不变的区域, $\geq 1\times10^{-6}$ 的划分为浓度增加的区域。从表3中可以看出2020年全疆NO₂浓度变化整体基本不变,但是部分地区也存在着增加和下降,约

89.14%的区域NO₂浓度基本不变,8.31%的地区NO₂浓度轻微增加,2.19%的地区NO₂浓度显著增加,NO₂浓度变化存在增加的区域共计10.5%。0.36%的区域呈轻微下降,没有明显下降的区域。由此可以看出除去基本不变的区域外,其他区域的NO₂浓度有所增加。

表3 NO₂浓度变化统计
Table 3 NO₂ trend change statistics

显著性水平	Z值	NO ₂ 浓度变化	面积百分比/%
$\geq 1\times10^{-6}$	≥ 1.96	显著增加	2.19
$\geq 1\times10^{-6}$	-1.96~1.96	轻微增加	8.31
$-1\times10^{-6}\sim 1\times10^{-6}$	-1.96~1.96	基本不变	89.14
$< -1\times10^{-6}$	-1.96~1.96	轻微下降	0.36
$< -1\times10^{-6}$	< 1.96	显著下降	0.00

新疆 NO_2 浓度变化如图 5 所示, NO_2 浓度增加和下降的区域具有显著的空间特征。可以看出, 全疆变化区域主要集中在沿天山南北坡城市群、城市圈中的乌鲁木齐、昌吉、克拉玛依等城市以及其他绿洲城市, 对区域环境起到积极作用的下降区域主要分布在天山北坡城市群中的乌昌地区、吐鲁番市以及喀什地区喀什市。其余区域中, 南疆以及东疆绿洲城市带 NO_2 浓度变化呈现轻微增加和显著增加, 其中阿克苏地区以及库尔勒市有明显的连片显著增加, 东疆地区也相同。北疆沿石河子、沙湾、乌苏以及精河出现带状

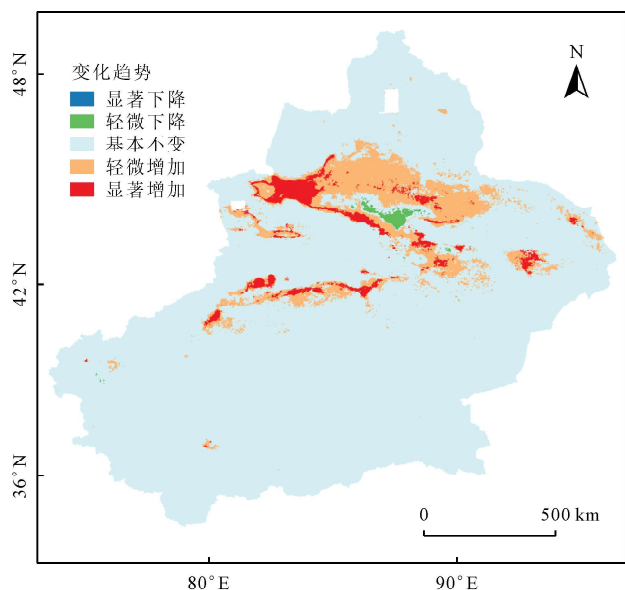


图5 2020年1-12月新疆 NO_2 浓度变化图
Fig.5 Changes in NO_2 concentration in Xinjiang, January-December 2020

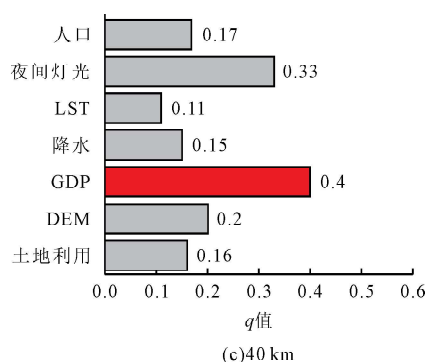
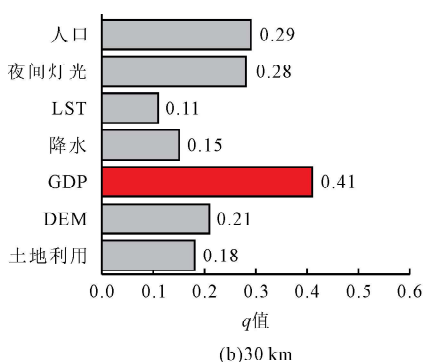
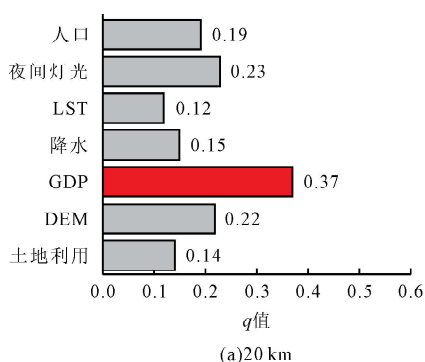


图6 不同网格点下各影响因素 q 值
Fig.6 q -value of each influencing factor under different grid points

NO_2 浓度的时空变化受多种因子共同影响, 由图 7 可知, 2020 年任意 2 个影响因子叠加下, 除土地利用与 GDP、GDP 与人口交互时为单因子非线性减弱, 其他因子交互时对 NO_2 浓度均为协同增强作用, 交互作用类型均为双因子增强和非线性增强。从各因子的交互作用大小来看, 降水 $\cap$ GDP(0.56)、GDP $\cap$ DEM

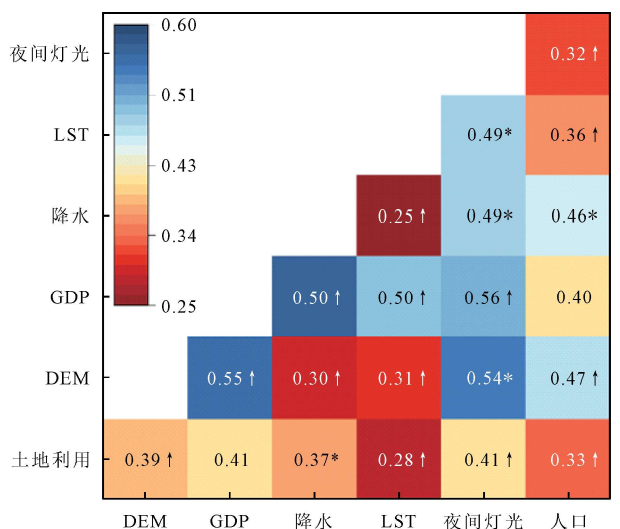
显著增加区域, 在博乐有大面积显著增加。克拉玛依市各区出现全疆最大的连片轻微增加区域, 并包围了天山北坡城市群。

2.4 NO_2 浓度影响因素分析

本文通过新疆 NO_2 浓度时空变化, 结合自然因子和人为因子进行量化研究, 使用 2020 年的数据, 将自然与人为因子使用网格方法分别设置 20、30、40 km 3 种不同长度网格, 最终综合评估 q 值大小后将研究区范围设置为 30 km $\times$ 30 km 网格, 将 NO_2 浓度作为因变量, 自然与人为因子作为自变量, 通过最优地理探测器模型定量分析新疆 NO_2 浓度和各因子之间的交互作用及其显著性, 从而揭示影响 NO_2 浓度的主要驱动力。

由图 6 可知, 运用 3 种不同尺度大小的网格点提取 NO_2 浓度和影响因子进行因子探测, 得到的 30 km $\times$ 30 km 网格各因素的 q 值较高, 因此本文构建对其进行空间自相关分析以及地理探测器的交互作用探测。不同因子按照对 NO_2 浓度的决定力 q 值从大到小依次排序为 GDP(0.41)>人口(0.29)>夜间灯光(0.28)>DEM(0.21)>土地利用(0.18)>降水(0.15)>LST(0.11), 可以看出 GDP、人口、夜间灯光对 NO_2 浓度的解释力较大, 而地表温度对其的解释力最小, 表明 GDP、人口、夜间灯光是 NO_2 浓度变化的主要推动要素, 说明人类活动对于 NO_2 浓度的时空分布具有一定的影响。

(0.55)值较大, 表明 GDP 与其他因子交互作用明显, 说明经济的快速发展对于 NO_2 浓度变化起到主要作用; 其次夜间灯光与其他因子交互作用也较为显著, 说明城市化的扩展对于研究区 NO_2 浓度有一定的影响。因此, 有效合理地规划城市和经济的发展, 可以降低 NO_2 污染, 实现可持续发展。



注: 加*号为影响因素交互作用为非线性增强; 加↑号为双因子增强; 无标记为单因子非线性减弱。

图7 各影响因素交互作用探测结果

Fig.7 Detection results of the interaction of influencing factors

3 讨论

新疆由天山山脉贯穿中部,形成南部的塔里木盆地和北部的准噶尔盆地,绿洲城市多分布在盆地边缘的山前平原和沿河地区,由于近些年绿洲城市经济的快速发展,大气污染问题日益严重。研究对2020年新疆NO₂浓度时空变化进行分析,并探究NO₂浓度变化与自然环境、人类活动之间的响应机制。

本研究中,NO₂浓度之间存在较高的相关性,2020年2月NO₂浓度均值较1月有明显的下降,且平均浓度为全年最低,与Liu等^[51]研究新型冠状病毒肺炎(COVID-19)导致中国上空对流层二氧化氮突降较为一致,这表明新冠疫情防控措施影响了正常的工业生产,从而使NO₂浓度下降。2020年浓度较高的区域主要分布在天山北坡城市群中的“乌鲁木齐—昌吉—石河子”城市群(乌昌石地区),这与之前^[52,53]的研究结果大致相同,南疆以及东疆等城市持续低排放,浓度较高区域呈以乌鲁木齐为中心向周围蔓延的块状分布。于志翔等^[43]研究天山北坡经济带城市NO₂污染得出乌鲁木齐、昌吉、五家渠、石河子城市圈污染最严重,2015–2020年天山北坡经济带NO₂浓度整体呈下降趋势。本文只分析了2020年逐月的变化,因此变化与上述研究略有不同,NO₂浓度变化呈整体不变,但是天山北坡城市群中的乌昌地区、吐鲁番市以及喀什地区喀什市出现轻微下降。

目前通过地理探测器模型探究新疆NO₂浓度空间异质性与自然因子和人为因子的之间关系的研究较少,在地理探测器模型中,空间数据离散化以及空间尺度的确定往往是通过经验所决定的,本文使用最

优地理探测器模型以及构建3种不同类型的网格,通过优化空间数据离散化以及空间尺度选择的过程,确定地理探测器模型的最佳参数组合,从而进行更为准确的空间分析。得出的结果符合新疆NO₂浓度变化规律,说明人类活动对于NO₂浓度变化影响比较大,得出的结果也与相关研究结论一致^[54]。研究中通过GDP、夜间灯光、人口以及土地利用等数据代表人为影响因子进行分析,在后续的研究中可以更加深入地选取更加细化的代表人为影响因子的各项指标和数据探究新疆NO₂浓度变化驱动力。此外,人类活动对于NO₂浓度变化影响的正负性之间的关系,以及在不同影响因素下,如何制定最佳NO₂污染的防治机制是仍需进一步探究的关键问题。

4 结论

本文基于2020年1–12月Sentinel-5P卫星所获取的新疆NO₂浓度数据,使用空间自相关模型、Sen+Mann-Kendall趋势分析以及运用最优地理探测器模型,探究了2020年新疆NO₂浓度时空变化特征及其驱动力。

(1)2020年NO₂浓度平均值最高是在7月,最低是在2月,从1月直到7月NO₂浓度先下降后上升,从7月开始下降一直持续到11月。NO₂浓度最高的值出现在12月,其次为1月,NO₂浓度最低的值出现在11月。

(2)2020年1–12月NO₂浓度的Moran' I均为正,表明研究区内NO₂浓度之间存在空间聚集性,1–12月的Moran' I最小值为0.784,最大值为0.921,最大值出现在7、8月,说明7、8月的空间聚集特征最为明显。1–12月NO₂浓度的高-高聚集区主要分布于研究区中部的天山北麓附近,且5–8月高-高聚集区分布范围连片增加。3–7月份以及9–11月在研究区西部的伊犁河谷及南疆绿洲城市也有分布,NO₂浓度低-低聚集区主要分布在研究区北部的阿尔泰山脉及南部昆仑山脉附近。

(3)2020年研究区约89.14%的区域NO₂浓度基本不变,8.31%的地区NO₂浓度轻微增加,2.19%的地区NO₂浓度显著增加,NO₂浓度变化存在增加的区域共计10.5%,0.36%的区域呈轻微下降,没有明显下降的区域。变化区域主要集中在沿天山北坡城市群、天山南部以及其他区域绿洲城市,对区域环境起到积极作用的下降区域主要分布在天山北坡城市群中的乌昌地区、吐鲁番市以及喀什地区喀什市,其中阿克苏、库车以及库尔勒市有明显的连片显著增加,而东疆地区也相同。北疆沿石河子、沙湾、乌苏以及精河出现带状显著增加区域,在博乐有大面积显著增加;克拉玛

依市各区出现全疆最大的连片轻微增加区域,分布于天山北坡城市群周围。

(4)通过因子探测和交互作用探测结果可以看出,GDP、人口、夜间灯光对 NO_2 浓度的解释力较大,而地表温度对其的解释力最小。GDP与其他因子交互作用明显,其次夜间灯光与其他因子交互作用也较为显著,说明人类活动对于 NO_2 浓度的时空分布具有一定的影响,有效合理地规划城市和经济的发展,可以降低 NO_2 污染,实现可持续发展。

[参考文献]

- [1] 王敏,黄滢. 中国的环境污染与经济增长[J]. 经济学(季刊), 2015,15(2):557-578.
Wang Min, Huang Ying. China's environmental pollution and economic growth[J]. China Economic Quarterly, 2015, 15(2):557-578.
- [2] 翟青. 以产业高质量发展支撑生态环境高水平保护[J]. 中国环保产业, 2023(4):17-18.
Zhai Qing. Supporting high-level protection of ecological environment with high-quality industrial development[J]. China Environmental Protection Industry, 2023(4):17-18.
- [3] 刘佳雯,贾若愚,蒋玉颖,等. 中国主要空气污染物浓度对土地利用类型的响应关系[J]. 资源科学, 2023,45(9):1869-1883.
Liu Jiawen, Jia Ruoyu, Jiang Yuying, et al. The response of major air pollutants concentration to land use types in China [J]. Resources Science, 2023,45(9):1869-1883.
- [4] 仝泽鹏,李艳红,刘岩,等. 天山南北绿洲城市夏季对流层 NO_2 浓度特征分析[J]. 环境科学与技术, 2018,41(7):125-132.
Tong Zepeng, Li Yanhong, Liu Yan, et al. Concentration characteristics of NO_2 in oasis cities between south and north Tianshan Mountains in summer[J]. Environmental Science & Technology, 2018,41(7):125-132.
- [5] 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_2 变化特征[J]. 生态学报, 2011,31(5):1249-1259.
Cheng Miaomiao, Jiang Hong, Chen Jian, et al. Characters of the OMI NO_2 column densities over different ecosystems in Zhejiang Province during 2005-2009[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(5):1249-1259.
- [6] 王柯懿,康平,欧奕含,等. 黄石市大气二氧化氮健康效应与人群暴露风险[J]. 中国环境科学, 2023,43(1):383-393.
Wang Keyi, Kang Ping, Ou Yihan, et al. Health effects and population exposure risk of nitrogen dioxide in Huangshi City[J]. China Environmental Science, 2023,43(1):383-393.
- [7] 梁琛瑜,王万州,马麟,等. 大气 NO_2 长期暴露与中国成人慢性肾脏病的关联:基于中国慢性肾脏病流行病学调查[J]. 环境与职业医学, 2021,38(6):566-572.
Liang Chenyu, Wang Wanzhou, Ma Lin, et al. Association between long-term exposure to ambient NO_2 and prevalence of chronic kidney disease: findings from China National Survey of Chronic Kidney Disease[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021,38(6):566-572.
- [8] 郭昌胜,高雅,樊境朴,等. 我国大气污染和气候变化协同治理的健康效益研究进展[J]. 环境科学研究, 2023,36(11):2040-2049.
Guo Changsheng, Gao Ya, Fan Jingpu, et al. Research progress on health benefits of collaborative management of air pollution and climate change in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(11):2040-2049.
- [9] 张欢,郑锦航,成金华,等. “十三五”时期以来我国 NO_2 浓度的时空变化及其城市群分布特征研究:兼论“十三五”时期以来我国 NO_2 污染治理成效[J]. 生产力研究, 2023(10):12-20.
Zhang Huan, Zheng Jinhang, Cheng Jinhua, et al. Temporal and spatial changes of NO_2 concentration in China since the 13th Five-Year Plan period and its urban agglomeration distribution characteristics: also on the effectiveness of NO_2 pollution control in China since the 13th Five-Year Plan period[J]. Productivity Research, 2023(10):12-20.
- [10] 朱文东,周廷刚,李洪忠,等. 基于OMI数据的成渝城市群对流层 NO_2 浓度遥感监测[J]. 长江流域资源与环境, 2019,28(9):2239-2250.
Zhu Wendong, Zhou Tinggang, Li Hongzhong, et al. Remote sensing monitoring of tropospheric NO_2 density in Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on OMI data[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(9):2239-2250.
- [11] 张岳军,朱凌云,郭伟,等. 汾渭平原大气 SO_2 和 NO_2 时空变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2020,29(6):1147-1156.
Zhang Yuejun, Zhu Lingyun, Guo Wei, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of atmospheric SO_2 and NO_2 in Fenwei Plain[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020,29(6):1147-1156.
- [12] 吴雅睿,王美景,王涛,等. 新冠疫情下 NO_2 时空变化特征:以陕西省为例[J]. 生态环境学报, 2023,32(3):514-524.
Wu Yarui, Wang Meijing, Wang Tao, et al. Effect of COVID-19 on temporal and spatial distribution of NO_2 concentration and socio-economic life: a case study of Shaanxi Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(3):514-524.
- [13] Eisinger M, Burrows J P. Tropospheric sulfur dioxide observed by the ERS-2 GOME instrument[J]. Geophysical Research Letters, 1998,25(22):4177-4180.
- [14] Valks P, Pinardi G, Richter A, et al. Operational total and tropospheric NO_2 column retrieval for GOME-2[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011,4(7):1491-1514.
- [15] Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, et al. SCIA-

- MACHY: mission objectives and measurement modes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999,56(2):127–150.
- [16] Boersma K F, Eskes H J, Veefkind J P, et al. Near-real time retrieval of tropospheric NO₂ from OMI[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007,7(8):2103–2118.
- [17] Veefkind J P, Aben I, McMullan K, et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,120:70–83.
- [18] 杨太平,司福祺,Ping Wang,等. 大气痕量气体差分吸收光谱仪云量反演算法研究[J]. *光学学报*, 2020,40(9):0901001. Yang Taiping, Si Fuqi, Ping Wang, et al. Research on cloud fraction inversion algorithm of environmental trace gas monitoring instrument[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0901001.
- [19] Kim J, Jeong U, Ahn M H, et al. New era of air quality monitoring from space geostationary environment monitoring spectrometer (GEMS)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020,101:E1–E22.
- [20] 姚尧,李江风,胡涛,等. 中国城市NO₂浓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 Yao, Li Jiangfeng, Hu Tao, et al. Spatiotemporal variation in NO₂ concentrations and socioeconomic driving forces in Chinese cities[J]. *Resources Science*, 2017,39(7):1383–1393.
- [21] Al Yammahi A, Aung Z. A study of nitrogen dioxide (NO₂) periodicity over the United Arab Emirates using wavelet analysis[J]. *Scientific Reports*, 2022,12:18144.
- [22] 武卫玲,薛文博,王燕丽,等. 卫星遥感在NO₂总量控制中的应用[J]. *环境科学*, 2017,38(10):3998–4004. Wu Weiling, Xue Wenbo, Wang Yanli, et al. Application of satellite remote sensing in NO₂ emission control[J]. *Environmental Science*, 2017,38(10):3998–4004.
- [23] Hou Y F, Wang L T, Zhou Y, et al. Spatiotemporal variations of tropospheric column nitrogen dioxide over Beijing–Tianjin–Hebei Region during the past decade[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019,40(1):15–30.
- [24] 章吴婷,张秀英,刘磊,等. 多源卫星遥感的华北平原大气NO₂浓度时空变化[J]. *遥感学报*, 2018,22(2):335–346. Zhang Wuting, Zhang Xiuying, Liu Lei, et al. Spatial variations in NO₂ trend in North China Plain based on multi-source satellite remote sensing[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2018,22(2):335–346.
- [25] 王厚俊,陈志芳,吴莹,等. 基于TROPOMI的扬州市对流层甲醛和二氧化氮时空分布特征分析[J]. *环境监控与预警*, 2022,14(3):70–75. Wang Houjun, Chen Zhifang, Wu Ying, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of formaldehyde and nitrogen dioxide in troposphere in Yangzhou City based on TROPOMI[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2022,14(3):70–75.
- [26] 韦英英,杨苏勤,陈志泉,等. 基于OMI卫星数据的长三角对流层NO₂特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2018,41(3):80–87. Wei Yingying, Yang Suqin, Chen Zhiquan, et al. Tropospheric NO₂ characteristics of the Yangtze River Delta region based on OMI satellite data[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018,41(3):80–87.
- [27] 余玲,何文,李宁,等. 广西NO₂时空变异规律及其影响因素分析[J]. *环境科学与技术*, 2021,44(11):1–9. Yu Ling, He Wen, Li Ning, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of NO₂ pollutants in Guangxi[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021,44(11):1–9.
- [28] 方恺,王婷婷,何坚坚,等. “一带一路”沿线地区NO₂浓度时空变化特征及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2020,40(13):4241–4251. Fang Kai, Wang Tingting, He Jianjian, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of NO₂ concentrations in the Belt and Road Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13):4241–4251.
- [29] 周春艳,厉青,王中挺,等. 2005–2014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*, 2016,20(3):468–480. Zhou Chunyan, Li Qing, Wang Zhongting, et al. Spatiotemporal trend and changing factors of tropospheric NO₂ column density in Beijing–Tianjin–Hebei Region from 2005 to 2014[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016,20(3):468–480.
- [30] 郑子豪,吴志峰,陈颖彪,等. 基于Sentinel-5P的粤港澳大湾区NO₂污染物时空变化分析[J]. *中国环境科学*, 2021,41(1):63–72. Zheng Zihao, Wu Zhifeng, Chen Yingbiao, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of NO₂ pollutants in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area based on Sentinel-5P satellite data[J]. *China Environmental Science*, 2021,41(1):63–72.
- [31] 姜建芳,侯丽丽,王鑫龙,等. 中国近地面NO₂污染分布特征及其社会经济影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2019,28(8):1632–1641. Jiang Jianfang, Hou Lili, Wang Xinlong, et al. Spatial analysis of ground-level NO₂ in China and its socio-economic factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019,28(8):1632–1641.
- [32] Wu J S, Li J C, Peng J, et al. Applying land use regression model to estimate spatial variation of PM_{2.5} in Beijing, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015,22(9):7045–7061.
- [33] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017,72(1):116–134. Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and

- prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134.
- [34] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. *地理研究*, 2019, 38(9): 2173–2187.
- Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Zeng Jie, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(9): 2173–2187.
- [35] 胡畔, 陈波, 史培军. 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J]. *地理学报*, 2021, 76(5): 1148–1162.
- Hu Pan, Chen Bo, Shi Peijun. Spatiotemporal patterns and influencing factors of rainstorm-induced flood disasters in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1148–1162.
- [36] Ablikim K, Yang H, Mamattursun A. Spatiotemporal variation of evapotranspiration and its driving factors in the Urumqi River Basin[J]. *Sustainability*, 2023, 15(18): 13904.
- [37] Mamattursun A, Yang H, Ablikim K, et al. Spatiotemporal evolution and driving forces of vegetation cover in the Urumqi River Basin[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(22): 15323.
- [38] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250–256.
- [39] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593–610.
- [40] 曹可, 窦岚, 李梦, 等. 2016–2022年新疆大气污染物时空分布特征[J]. *职业与健康*, 2024, 40(7): 949–954.
- [41] 易唯, 杨东, 李茜荣. 基于GWR模型的天山北坡经济带 $PM_{2.5}$ 浓度反演及时空特征分析[J]. *地球与环境*, 2021, 49(1): 51–58.
- Yi Wei, Yang Dong, Li Qianrong. Inversion of $PM_{2.5}$ concentration in the Economic Zone of Northern Tianshan Mountain Slope based on the GWR model and the temporal and spatial characteristics[J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(1): 51–58.
- [42] 曹扬, 李艳红. 基于OMI遥感数据及地面数据的新疆部分城市 NO_2 污染特征分析及监测技术应用建议[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(11): 3784–3795.
- Cao Yang, Li Yanhong. Temporal and spatial variation of NO_2 in oasis cities in Xinjiang based on hyperspectral remote sensing technology[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(11): 3784–3795.
- [43] 于志翔, 李霞, 郑博华. 天山北坡经济带城市 NO_2 污染的时空分布特征[J]. *环境监控与预警*, 2023, 15(1): 36–43.
- Yu Zhixiang, Li Xia, Zheng Bohua. Spatial and temporal variations of NO_2 in urbans along the Northern Slope Economic Belt of Tianshan Mountains[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2023, 15(1): 36–43.
- [44] 徐新良. 中国夜间灯光年度数据集[DB/OL]. 2022. 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI:10.12078/2022090902>).
- Xu Xinliang. Dataset of China's Population Spatial Distribution Kilometer Grid[DB/OL]. 2022. Resource and Environmental Science Data Registration and Publishing System (<http://www.resdc.cn/DOI:10.12078/2022090902>).
- [45] 徐新良. 中国GDP空间分布公里网格数据集[DB/OL]. 2017. 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI:10.12078/2023010202>).
- [46] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[DB/OL]. 2018. 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>).
- Xu Xinliang, Liu Jiyan, Zhang Shuwen, et al. China Multi-period Land Use Remote Sensing Monitoring Dataset (CNLUCC)[DB/OL]. 2018. Resource and Environmental Science Data Registration and Publishing System (<http://www.resdc.cn/DOI>).
- [47] 彭守璋. 中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901–2022)[DB/OL]: 国家青藏高原科学数据中心, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3185722>.
- [48] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93–115.
- [49] 王佃来, 刘文萍, 黄心渊. 基于Sen+Mann-Kendall的北京植被变化趋势分析[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(5): 13–17.
- [50] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1170–1186.
- Cai Bofeng, Yu Rong. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2009, 13(6): 1170–1186.
- [51] Liu F, Page A, Strode S A, et al. Abrupt decline in tropospheric nitrogen dioxide over China after the outbreak of COVID-19[J]. *Science Advances*, 2020, 6(28): eabc2992.
- [52] 苏锦涛, 张成歆, 胡启后, 等. 基于卫星高光谱遥感的2007–2017年新疆地区大气 NO_2 时空变化趋势分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(5): 1631–1638.
- [53] 赵晓蓉, 李艳红, 马莹萍. 新疆“乌-昌-五”城市圈对流层 NO_2 、 SO_2 时空变化特征[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(6): 133–142.
- Zhao Xiaorong, Li Yanhong, Ma Yingping. Temporal and spatial changes of NO_2 and SO_2 in the troposphere in the “Wu-Chang-Wu” City Circle in Xinjiang[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(6): 133–142.
- [54] Wu H S, Li Y H, Hu M G. Assessment of influencing factors of nitrogen dioxide in Shandong, China, using the geographical detector method[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2022, 31(4): 3327–3334.