

杨淳棉,黄宇,黄海滨,等.基于 TROPOMI 数据的湖北省 O₃ 生成敏感性分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):50-57.

Yang C M, Huang Y, Huang H B, et al. Sensitivity analysis of O₃ generation in Hubei Province based on TROPOMI data [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):50-57.

基于 TROPOMI 数据的湖北省 O₃ 生成敏感性分析

杨淳棉¹,黄宇²,黄海滨¹,何泽煌³,成海容^{1*} (1.武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉 430072; 2.武汉市生态环境科技中心,湖北 武汉 430023; 3.成都信息工程大学资源环境学院,四川 成都 610225)

摘要: 基于湖北省环境空气质量站点监测的地面臭氧(O₃)数据,TROPOMI 对流层 HCHO 和 NO₂ 柱浓度数据,运用 O₃ 生成敏感性的指示剂法,研究了 2019~2023 年湖北省 O₃ 污染的时空分布特征、变化趋势和前体物生成敏感性.结果表明,湖北省 O₃ 浓度总体呈上升趋势;季节上,O₃ 和 HCHO 柱浓度呈夏高冬低,NO₂ 则相反;空间上,O₃ 柱浓度值从南向北随纬度逐渐升高,NO₂ 和 HCHO 柱浓度值自西向东呈阶梯状升高.O₃ 控制区空间分布特征分析结果表明,6~9 月湖北省大部分地区 O₃ 生成受 NO_x 控制,VOCs 控制区面积占比较少;湖北省东部的武汉市及周边城区属于 VOCs 控制区,鄂西地区主要为 NO_x 控制区,其余大部分地区属于协同控制区.2019 年后,湖北东部地区 O₃ 生成由 VOCs 控制区向 NO_x-VOCs 协同控制区转变.

关键词: TROPOMI; O₃ 生成敏感性; HCHO; NO₂

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)01-0050-08

Sensitivity analysis of O₃ generation in Hubei Province based on TROPOMI data. YANG Chun-mian¹, HUANG Yu², HUANG Hai-bin¹, HE Ze-huang³, CHENG Hai-rong^{1*} (1.School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2.Wuhan Ecological Environment Science and Technology Center, Wuhan 430023, China; 3.College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China). *China Environmental Science*, 2025,45(1): 50~57

Abstract: Based on the ground-level ozone (O₃) data from provincial air quality stations and tropospheric HCHO and NO₂ column concentration data from TROPOMI, the spatial and temporal distributions, variation trends and precursor sensitivity of O₃ pollution in Hubei Province from 2019 to 2023 were studied by using the indicator method of O₃ generation sensitivity. The results showed that the concentration of O₃ columns in Hubei Province presented an overall upward trend. For the seasonal variations, the concentrations of O₃ and HCHO were higher in summer and lower in winter, while NO₂ was the opposite. For the spatial distributions, the concentration of O₃ column increased gradually from south to north, and the concentration of NO₂ and HCHO column increased in a stepwise manner from west to east. Through analyzing the spatial distributions of controlling factors for O₃, we found that O₃ generation in most areas of Hubei Province was controlled by NO_x from June to September, and only a small area was controlled by NO_x. Wuhan and its surrounding urban areas in eastern Hubei Province belong to the VOCs-control area, the western Hubei region mainly belongs to the NO_x-control area, the rest of the areas mostly belong to NO_x-VOCs collaborative-control area. After 2019, O₃ generation in eastern Hubei Province has changed from VOCs-control area to NO_x-VOCs collaborative control area.

Key words: TROPOMI; O₃ generation sensitivity; HCHO; NO₂

近地面臭氧(O₃)是大气中主要的污染物之一,高浓度的 O₃ 影响人类身体健康、导致农作物减产和生态系统遭到破坏^[1-2].自 2013 年我国启动大气污染防治行动计划以来,颗粒物污染问题开始得到逐渐缓解,然而 O₃ 浓度不降反升,O₃ 污染问题愈发突出^[3].

O₃ 是氮氧化物(NO_x)与挥发性有机物(VOCs)在阳光照射下发生光化学反应形成的二次污染物,其浓度与前体物浓度、光照、气温等因素密切相关^[4].我国大部分城市大气 O₃ 污染呈现夏季高、冬季低的特征,且随着 NO_x 和 VOCs 的减排,O₃ 生成敏感性

的时空分布特征发生显著变化^[5].NO_x 和 VOCs 生成 O₃ 的化学机制较为复杂,控制单一污染物可能导致 O₃ 浓度上升,研究控制区域 O₃ 生成的敏感性,科学确定 NO_x 和 VOCs 减排比例是降低 O₃ 浓度的关键^[6].Sillman 等^[7]首次提出将 P(H₂O₂)/P(HNO₃)作为指示剂判定 O₃ 生成敏感性,众多化学指示剂中,P(H₂O₂)/

收稿日期: 2024-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42277093);湖北省自然科学基金(重点类)杰出青年项目(2023AFA057);校基本科研业务费专项资金资助项目(2042024kf0013)

* 责任作者,教授,chenghr@whu.edu.cn

P(HNO₃)被认为最具普适性的指标^[8-9],但在区域层面 P(H₂O₂)/P(HNO₃)实际监测数据难于获取.HCHO 是几乎所有 VOCs 氧化的中间产物.因此,它被广泛用作 VOCs 的指标^[10].NO 在 NO_x 中占有重要地位,能够反映 NO_x 的总体污染状况,常被用作衡量 NO_x 污染水平的重要指标.

遥感卫星产品中 HCHO 和 NO₂ 应用广泛,HCHO 浓度可作为 VOCs 的指示剂,而 NO₂ 浓度可作为 NO_x 的指示剂,利用 HCHO/NO₂ 指示剂来判断 O₃ 控制区具有人为干扰因素小,时间、空间连续性等优点^[11].

卫星遥感监测具有覆盖范围广、长时间序列和成本低等特点^[12],可以很好地反映研究区 NO₂、O₃、HCHO 的时空分布规律.Duncan^[13]、单源源^[14]等利用卫星 OMI 遥感数据分析了城市 O₃ 生成的敏感性、O₃ 控制区变化状况,但 OMI 数据空间分辨率不足,仅适于研究大尺度区域.TROPOMI 是目前世界上技术最先进、空间分辨率最高的大气监测光谱仪,国内外广大学者利用监测设备和机载监测设备对 TROPOMI 对流层柱浓度进行了验证,反演结果与地表观测接近^[15-17].TROPOMI 获取数据的分辨率相较于 OMI 提高了一个数量级,空间分辨率更高,已经能够很好地应用于单个城市区域.

目前,湖北地区大气 O₃ 污染研究仍多采用实地布点监测,主要集中在 O₃ 污染特征、形成机制的研究,缺少对全省尺度上 O₃ 与其前体物高分辨率空间变化,及 O₃ 与其前体物关系的研究.TROPOMI 卫星反演数据高空间分辨率的优势能够深入分析 O₃、NO₂ 和 HCHO 等污染物的空间差异,有助于深入分析各地区污染物的影响因素.基于此,本研究针对湖北地区日益加剧的 O₃ 污染,利用 2019~2023 年 TROPOMI 对流层 O₃、NO₂ 和 HCHO 柱浓度数据,采用 HCHO/NO₂ 指示剂方法判别 O₃ 生成敏感性,重点分析了湖北省 O₃ 敏感性的时空变化及原因,为制定该地区 O₃ 控制策略提供科学依据.

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究中 2019~2023 年对流层 NO₂ 和 HCHO 垂直柱浓度每日网格数据来源于 TROPOMI 卫星反演的 3 级产品,其空间分辨率为 7km×3.5km.数据产

品提取时以研究区域的经纬度、时间和数据质量为条件,数据质量满足云量少于 15%,表面反照率≤0.2,研究区域内无冰/雪覆盖.为便于统计,将卫星反演数据 O₃ 柱浓度单位换算为多布森单位(DU),HCHO 和 NO₂ 柱浓度单位定为 10¹⁵molec/cm².研究区域为湖北省,地理位置为 108°02'42"E~116°07'50"E、29°01'53"N~33°06'47"N.将获取的每日数据做月均、年均处理,将 3~5 月、6~8 月、9~11 月、12~次年 2 月作为四季划分做季均处理.

湖北省目前已建立较为完善的环境空气质量自动监测网络.在本研究中,为保证研究的连续性和可比性,选取空间分布较为均匀的 21 个国控站点作为实测数据基础,O₃ 污染物小时数据来源于湖北省环境空气自动监测系统(<http://124.128.84.34:8900/>),计算每日 O₃ 最大 8h 平均浓度(MDA8)用于表示 O₃ 浓度,单位为 μg/m³.

1.2 研究方法

近年来随着卫星遥感技术的发展,基于卫星遥感的 FNR 指示剂法(HCHO/NO₂Ratio),即对流层柱浓度 HCHO/NO₂ 值被用来判断 O₃ 生成敏感区的指标^[18],这种方法具有时间、空间连续性的优点,且受人为干扰因素小,并被广泛使用.

$$FNR = c(\text{HCHO})/c(\text{NO}_2) \quad (1)$$

式中:c(HCHO)为 HCHO 柱浓度;c(NO₂)为 NO₂ 柱浓度;FNR 为二者比值.本研究获取了 2019~2023 年间湖北省网格化 NO₂ 和 HCHO 月均产品,为实现不同分辨率的数据匹配,将 0.05°分辨率的 HCHO 数据重采样到 0.125°,并计算逐网格 FNR.

2 结果与讨论

2.1 湖北省 MDA8 浓度时空变化

2.1.1 湖北省 MDA8 浓度的时间变化 2019~2023 年间湖北省 MDA8 浓度总体呈上升趋势(图 1),年均增长为 0.168μg/(m³·a).MDA8 浓度最高值出现于 2022 年,为 144μg/m³;2020 年平均 MDA8 浓度是近五年最低,平均 MDA8 为 90.7μg/m³.2019~2023 年间湖北省 MDA8 浓度月均值呈显著的周期性变化,年内变化幅度较大,MDA8 浓度从 1 月开始不断上升,每年 6~9 月出现最大值,之后浓度值开始下降,在 11、12 月~次年 1 月最低,有明显的季节特征.湖北省春、夏季的 MDA8 浓度平均值明显高于秋、冬季,秋冬

季增长趋势明显,冬季的年均增长率最大,为 $2.29\mu\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{a})$,春夏季相对平缓。

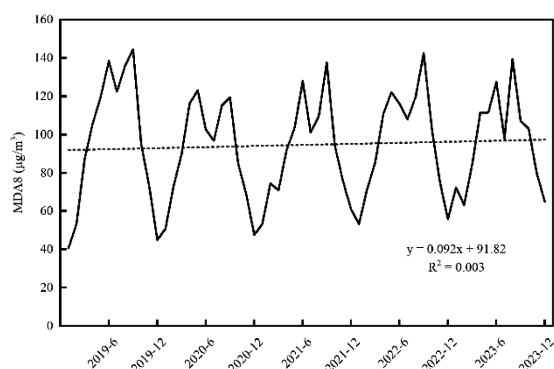


图1 2019~2023年湖北省MDA8变化趋势

Fig.1 Variations of MDA8 concentration in Hubei Province from 2019 to 2023

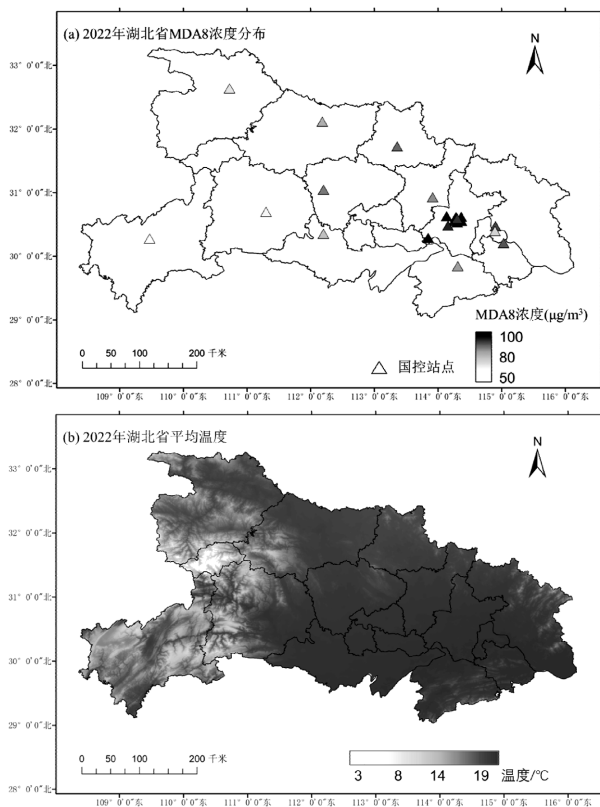


图2 2022年湖北省MDA8浓度及平均气温分布

Fig.2 Distribution of MDA8 concentration and average temperature in Hubei Province in 2022

这种变化与他人研究结果相似^[19], O_3 前体物排放比例的不合理和气象条件可能是 O_3 浓度升高的主要原因.太阳辐射、温度等自然因素对 O_3 浓度变化影响较大,春夏季随着气温的升高和太阳辐射的增强,光化学反应活跃,有利于 O_3 生成.2023年春季 O_3 浓度大幅降低,可能是由于降水增多,不利于 O_3 的

生成.统计数据发现,2023年春季降水量较常年同期偏高,气温与常年同期持平,由于云量增多太阳辐射强度减弱,光化学反应降低, O_3 前体物生成 O_3 的速率和强度均降低.

2.1.2 湖北省MDA8浓度的空间变化 图2展示了2019~2023年湖北省21个站点MDA8年均值的空间分布.由图可知,湖北省MDA8浓度空间差异大,MDA8浓度值呈东西向递增趋势,高值区主要集中在鄂西、鄂西北的十堰市、襄阳市北部,低值区分布在鄂西南,主要为恩施土家族苗族自治州,鄂南地区部分城市. O_3 浓度也偏低.这与湖北省温度空间分布情况较为一致(图2b),随着温度逐渐上升, O_3 前体物生成 O_3 的光化学反应速率加快, O_3 浓度随之增加.

2.2 对流层HCHO柱浓度时空变化

TROPOMI HCHO 对流层柱浓度可以表征VOCs排放的变化,而TROPOMI NO_2 柱浓度可以反映 NO_x 浓度的变化.本文利用2019~2023年TROPOMI NO_2 和HCHO柱浓度分析湖北省 NO_x 与VOCs排放的时空变化特征.

由图3可见,2019~2023年间湖北省对流层HCHO柱浓度总体变化不大,年均值在 $9\times 10^{15}\text{mole}/\text{cm}^2$ 上下浮动且波动较小,90%的对流层HCHO柱浓度在 $8\times 10^{15}\sim 12\times 10^{15}\text{mole}/\text{cm}^2$ 之间变化,最高值出现于2022年,为 $13.6\times 10^{15}\text{mole}/\text{cm}^2$.湖北省HCHO柱浓度月均值呈显著的“单峰”型波动.年内月均值最高常出现在6月,最低值出现在12月以及次年1月,与 O_3 浓度的月变化趋势相同,在季节上表现为夏季最高,春秋季节次之,冬季最低.HCHO总柱浓度在冬季主要受到交通和工业排放、生物源燃烧等的控制^[20],而夏季气温升高、日照时间拉长,HCHO浓度主要受大气光化学氧化作用增强影响.2020~2023年夏季HCHO总柱浓度呈上升趋势,这与湖北省气温变化趋势一致.HCHO的二次生成主要由甲烷和其他VOCs在OH、 NO_3 和 O_3 等氧化剂作用下形成^[21],植被释放的异戊二烯、单萜烯和其他VOCs的排放量主要受季节变化影响,每年春末夏初,温度快速升高,植被VOCs排放量随之增大.由于夏季高温、高辐射和日照时间长等因素,8月植被VOCs排放量达到最大^[22],当温度逐步降低后,植被VOCs排放量才会下降.由于湖北省夏季高温持续时间较长,6~8月的HCHO柱浓度变化幅度不大,9月气温较低时

HCHO 柱浓度明显降低.

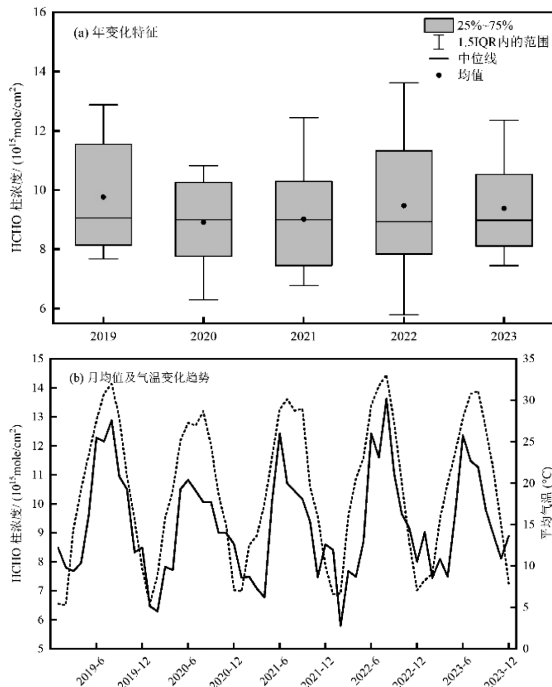


图3 2019~2023 年湖北省对流层 HCHO 柱浓度变化趋势
Fig.3 Variations of HCHO column concentration in the troposphere of Hubei Province from 2019 to 2023

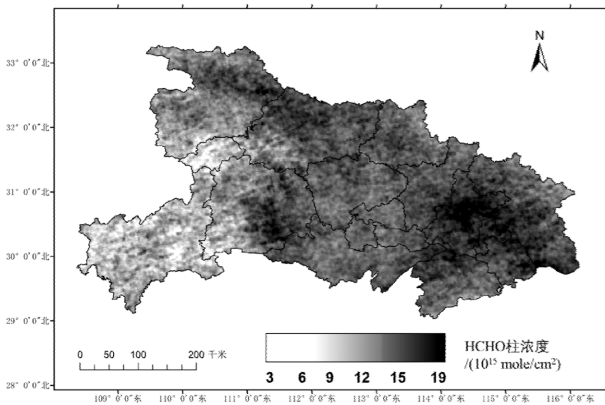


图4 2022 年 HCHO 柱浓度空间分布
Fig.4 Distribution of HCHO column concentration in Hubei Province in 2022

2019~2023 年间,湖北省对流层 HCHO 柱浓度在空间上的变化不大.图 4 为 2022 年湖北省对流层 HCHO 柱浓度空间分布.湖北省对流层 HCHO 柱浓度在空间上分布不均匀,自西向东 HCHO 柱浓度值呈阶梯状升高,襄阳市西南部、宜昌市西部有较为明显的陡升.全省范围内高值区主要集中在武汉市、宜昌市等较大城市中心地带,鄂西、鄂南等人口密度相对较小、人为活动相对较少的地区 HCHO 柱浓度偏

低,这可能是中心城市地区人为活动带来的高 HCHO 排放有关,此外,高人为源 VOCs 排放贡献也会导致这些地区 HCHO 较高^[23].

2.3 对流层 NO₂ 柱浓度时空变化

图 5 和图 6 为 2019~2023 年间 NO₂ 柱浓度时间和空间分布.2019~2023 年间湖北省 NO₂ 柱浓度月均值呈震荡变化,2019 年 NO₂ 柱浓度最高,平均柱浓度为 7.2×10^{15} mole/cm²,2022 年 NO₂ 柱浓度最低,平均柱浓度为 5.7×10^{15} mole/cm².2019 年 1~3 月 NO₂ 柱浓度值偏高,此后 NO₂ 柱浓度月均值在 $4 \sim 8 \times 10^{15}$ mole/cm² 范围内,处于偏低水平,变化幅度较小.年内 NO₂ 柱浓度最大时为温度较低的 1 月,随后逐渐降低,最低值出现在 7~9 月,季节变化特征与 HCHO 柱浓度变化特征相反,冬季最高,春秋季节次之,夏季最低.人为源排放特征和气象因素对流层 NO₂ 柱浓度季节分布产生重要影响,冬季静稳天气较多,气象条件不利于污染物扩散,NO₂ 柱浓度相对较高;夏季太阳辐射增强加速 NO₂ 的氧化过程,NO₂ 柱浓度降低.此外,湖北地区夏季降水量大,大气环流活动比较频繁,植被生长旺盛,降水多,降水的冲刷作用使污染物 NO₂ 沉降于树木冠层、水体表面和地面^[24],因此夏季 NO₂ 浓度较低.

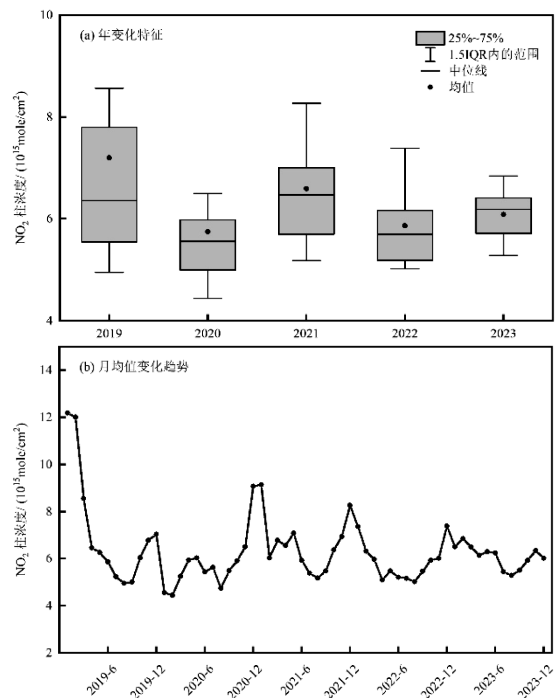


图5 2019~2023 年湖北省对流层 NO₂ 柱浓度变化趋势
Fig.5 Variations of tropospheric NO₂ column concentration in Hubei Province from 2019 to 2023

空间上,湖北省 NO_2 柱浓度的分布规律与 HCHO 柱浓度分布相似.自西向东 NO_2 柱浓度值逐渐升高,高值区主要集中在武汉、宜昌等城市中心城区,且沿中心城区向外呈现明显递减趋势; NO_2 柱浓度较低的区域为鄂西的恩施土家族苗族自治州、神农架林区以及十堰市西部地区.对流层 NO_2 柱浓度均与人类活动有密不可分的关系,污染物排放强度越大的地区,柱浓度越高.2023 年湖北省统计年鉴显示,武汉市、鄂州市、黄石市为人口密度前三的城市,襄阳市、宜昌市的人均地区生产总值也名列前茅,这些地区 NO_2 柱浓度相对偏高.高密度的人口分布、高强度的经济和工业生产活动、高保有量的机动车使得武汉市中心地区污染物排放强度较高,进而导致对流层柱浓度显著高于其他地区.

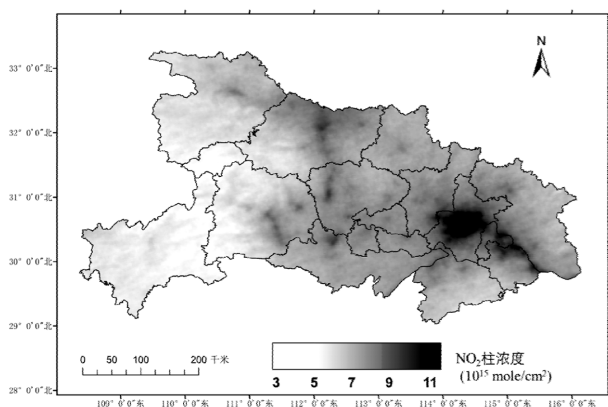


图 6 2022 年湖北省 NO_2 柱浓度空间分布

Fig.6 Distribution of NO_2 column concentration in Hubei Province in 2022

2.4 O_3 生成敏感性分析

2.4.1 FNR 值计算 O_3 及其前体物之间呈非线性关系,利用 O_3 生成对 VOCs 和 NO_x 排放变化的不同响应关系可以将 O_3 前体物控制区域分为 VOCs 控制区、 NO_x 控制区和协同控制区.FNR 阈值是在美国由 Duncan 等^[18]结合模型和 OMI 卫星反演数据测量得到,FNR 小于 1 表示 O_3 生成受 VOCs 控制,FNR 大于 2 表示 O_3 生成受 NO_x 控制,介于 1 和 2 之间时, O_3 受 VOCs-NO_x 协同控制.鉴于各地区不同的地理、气象条件、大气气溶胶条件差异较大^[18],以上研究得出的 FNR 阈值不能通用,须进行本地化细分.此外,研究表明 TROPOMI 传感器获得的对流层 NO_2 柱浓度,不管从分布区域上还是从柱浓度数值上,均相较

OMI 传感器所获得的柱浓度偏高^[25].以往研究根据 OMI 数据划分的 FNR 阈值并不适用于本研究中的 TROPOMI 数据结果.综上,本研究进行了基于湖北省 TROPOMI 卫星反演数据的 FNR 阈值计算.

本研究采用谢绍东等^[26]的计算方法,将 21 个地面国控站点实测获取的每日 O_3 浓度与 TROPOMI HCHO/NO_2 关联匹配,通过将二阶及三阶多项式模型拟合,得到二者的非线性关系.拟合结果表明,三阶多项式模型比二阶模型更能拟合高相关系数的数据,因此本文使用三阶多项式模型来推导最大平均 O_3 浓度(图 7 曲线的峰值).假设曲线的峰值(斜率为 0)标志着从 VOCs 限制到 NO_x 限制的过渡,过渡区(协同控制区)被定义为斜率在 $-3\sim+3$ 之间的范围.本研究最终得到的湖北省 TROPOMI HCHO/NO_2 阈值为 $1.6\sim 2.1$, R^2 为 0.86.FNR 小于 1.6 表示 O_3 生成受 VOCs 控制,FNR 大于 2.1 表示 O_3 生成受 NO_x 控制,介于 $1.6\sim 2.1$ 之间时, O_3 受 VOCs-NO_x 协同控制.

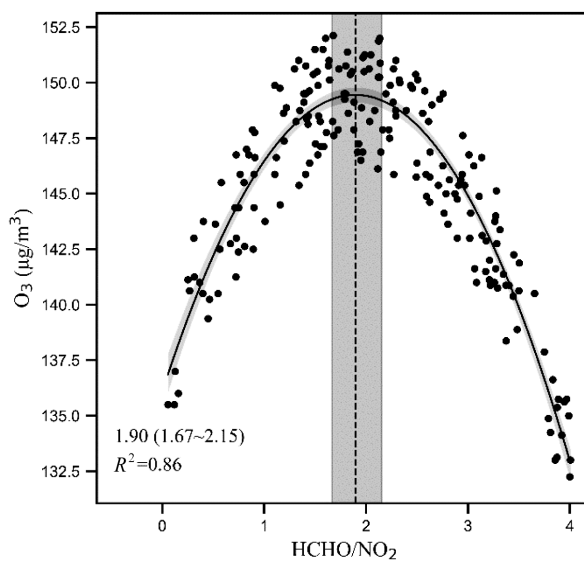


图 7 TROPOMI HCHO/NO_2 与地面 O_3 浓度拟合

Fig.7 TROPOMI HCHO/NO_2 and ground O_3 concentration fitting

阴影表示 95% 的置信区间,垂直线表示拟合曲线的最大值,垂直阴影表示曲线斜率从 $-3\sim+3$ (过渡区) 的范围

2.4.2 O_3 控制区时空分布 据前文 2.1 研究结果,湖北省 6~9 月 O_3 浓度较高,因此,选取 6~9 月作为 O_3 高浓度时段,基于 2019~2023 年卫星 HCHO/NO_2 变化规律,研究湖北省 O_3 生成的敏感性.

根据 2019~2023 年卫星 HCHO/NO_2 变化规律,

湖北省 O₃ 生成主要受 NO_x 控制或 NO_x-VOCs 协同控制(图 8)。从空间分布看,湖北省东部,主要为武汉市及周边城区属于 VOCs 控制区。在鄂西地区,十堰 NO_x 控制区,其余大部分地区属于协同控制区。鄂西的 NO_x 控制区多为人为活动相对较弱的林区,生物源 VOC 排放量较大,削减 NO_x 排放能够有效降低 O₃ 浓度。鄂东南分布有少量 NO_x 控制区,零散分布在黄冈市、黄石市及咸宁市南部地区,结合湖北省降水

的空间分布分析,这可能与该地区夏季降水量相对较多有关。2019 年和 2022 年,湖北省大部分地区为 NO_x 控制区,协同控制区和 VOCs 控制区面积较小,2022 年武汉市及周边 VOCs 控制区面积占比最低。这可能与气温相关(由图 3(b)可见),2019 年和 2022 年夏季气温相对较高,高温带来的光化学反应增强使得夏季 O₃ 浓度也相应较高,高 O₃ 浓度受 NO_x 影响较大。

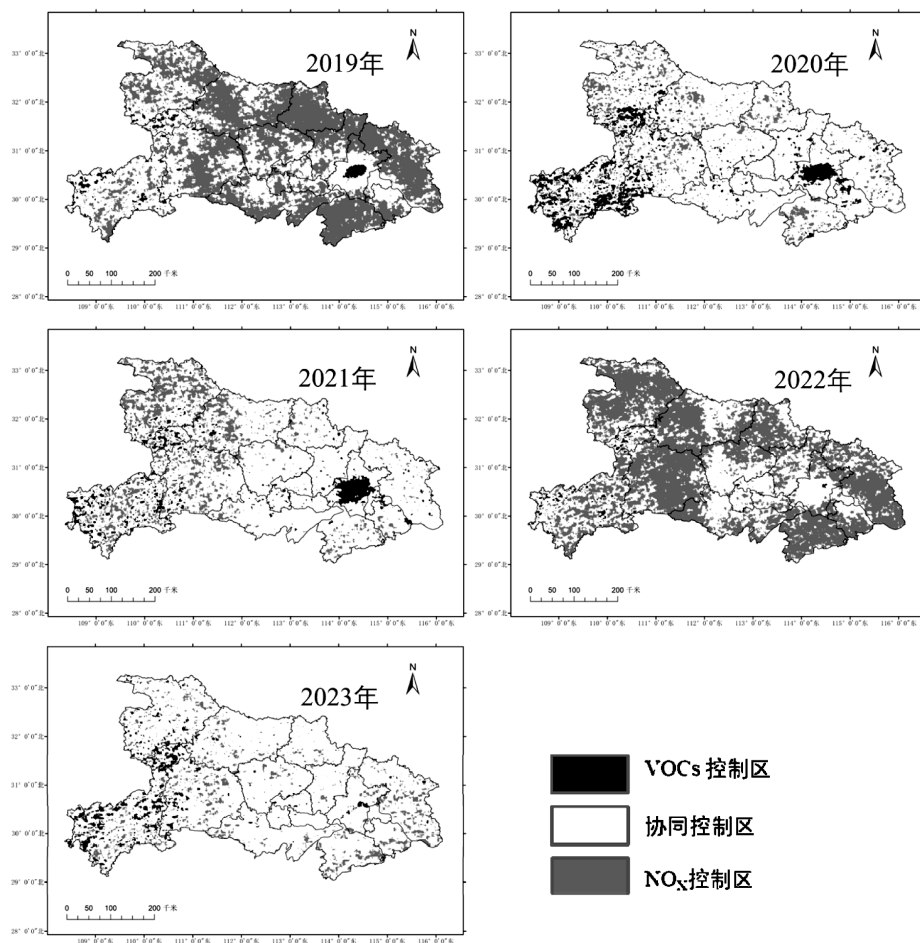


图 8 2019~2023 年湖北省 HCHO/NO₂ 空间分布

Fig.8 Spatial distribution of HCHO/NO₂ in Hubei Province from 2019 to 2023

湖北省 VOCs 控制区面积占比呈先增后减的趋势。2019 年湖北省 VOCs 控制区面积占比约为 18%,2021 年后 VOCs 控制区的面积占比下降,2023 年 VOCs 控制区面积比例最低,仅为 4.4%。NO_x 控制区面积比例在 30%~75% 范围内波动变化,2022 年约为 74%,是 5a 内 NO_x 控制区面积占比峰值。湖北东部的武汉市周边地区城市部分 VOCs 控制区向 NO_x-VOCs 协同控制区转换,这主要与 NO_x 排放高

有关。武汉市货物运输总量大,区域内公路货运多以高污染的重型柴油车为主,排放 NO_x 占机动车排放量 65% 以上^[27]。华北平原、长三角等区域也出现同样的现象,京津冀等中心城区属于 VOCs 控制区,并且在 NO_x 排放量减少的基础上,VOCs 控制区向协同控制区转换。总体而言,湖北地区 O₃ 生成敏感性随时间、空间变化明显,控制 O₃ 需要深入开展 O₃ 污染形势分析,分析不同控制区域 NO_x 与 VOCs 协同减排

面临的科学问题,优化减排比例,进而提高城市大气污染防治的精细化水平.

3 结论

3.1 2019~2023 年间湖北省 MDA8 浓度总体呈上升趋势,年均增长为 $0.168 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$,6~9 月出现最大值;春、夏季的 MDA8 浓度平均值明显高于秋、冬季,春季最高,夏季次之;空间上,MDA8 浓度值从西向东逐渐升高,高值区主要集中在鄂西、鄂西北,低值区分布在鄂西南.

3.2 2019~2023 年间湖北省 HCHO 柱浓度年均值在 $9 \times 10^{15} \text{mole}/\text{cm}^2$ 左右,月变化趋势与 MDA8 浓度相同,6 月最高;季节变化特征显著,夏季最高,春秋季节次之,冬季最低;空间上,自西向东 HCHO 柱浓度值呈阶梯状升高,在鄂西的襄阳市西南部、宜昌市西部有较为明显的陡升,鄂西、鄂南等地区 HCHO 柱浓度偏低.

3.3 2019~2023 年间湖北省 NO_2 柱浓度月均值呈震荡变化,最高柱浓度为 $7.2 \times 10^{15} \text{mole}/\text{cm}^2$,年内 NO_2 柱浓度最大时为 1 月,最低值出现在 7~9 月; NO_2 柱浓度季节变化特征与 HCHO 柱浓度变化特征相反,冬季最高,春秋季节次之,夏季最低;空间上,湖北省 NO_2 柱浓度的分布规律与 HCHO 柱浓度分布相似.自西向东 NO_2 柱浓度值逐渐升高,高值区主要集中在武汉、宜昌等城市中心城区,且沿中心城区向外呈现明显递减趋势.

3.4 2019~2023 年间 6~9 月 O_3 生成敏感性的年际变化特征表明,湖北省 VOCs 控制区呈先增加后减少的趋势,全省范围内大部分地区为 NO_x 控制区或 NO_x -VOCs 协同控制区, NO_x 控制区最高时占总面积 74%;空间上,湖北省东部的武汉市及周边城区属于 VOCs 控制区,鄂西地区分布 NO_x 控制区,其余大部分地区属于协同控制区,2019 年后,湖北东部地区,主要为武汉市周边地区城市,部分 VOCs 控制区向 NO_x -VOCs 协同控制区转变.

3.5 总体而言,湖北地区 O_3 生成敏感性随时间、空间变化明显,大部分地区削减 NO_x 排放能够有效降低 O_3 浓度.加强区域内以高污染的重型柴油车为代表的货运车辆管控、油品升级、提高排放标准、逐步实现电动化等将大幅助力城市大气污染治理.

参考文献:

- [1] Li K, Jacob D J, Shen L, et al. Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences [J]. *Atmos Chem Phys*, 2020,(19):11423-11433.
- [2] 孙晓艳,李青松,李大秋,等.济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 [J]. *环境科学*, 2022,(2):43.
Sun X, Li Q, Li D, et al. Changes of Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Ji'nan from 2015 to 2020. [J]. *Environmental Science*, 2022,(2):43.
- [3] Xu J, Huang X, Wang N, et al. Understanding ozone pollution in the Yangtze River Delta of eastern China from the perspective of diurnal cycles [J]. *Sci Total Environ*, 2020,752:141928.
- [4] 王占山,李云婷,陈添,等.北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(12):3001-3008.
Wang Z, Li Y, Chen T, et al. Analysis on diurnal variation characteristics of ozone and correlations with its precursors in urban atmosphere of Beijing. [J]. *China Environmental Science*, 2014,34(12):3001-3008.
- [5] 李霄阳,李思杰,刘鹏飞,等.2016 年中国城市臭氧浓度的时空变化规律 [J]. *环境科学学报*, 2018,38(4):12.
Li X, Li S, Liu p, et al. Spatial and temporal variations of ozone concentrations in China in 2016. [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(4):12.
- [6] Gao C, Xiu A, Zhang X, et al. Spatiotemporal characteristics of ozone pollution and policy implications in Northeast China [J]. *Atmos Pollut Res*, 2020,11(2):357-369.
- [7] Sillman S, He D. Some theoretical results concerning O_3 - NO_x -VOC chemistry and NO_x -VOC indicators [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002,107(D22):(ACH 26-1-ACH 26-15).
- [8] Tonnesen G S, Dennis R L. Analysis of radical propagation efficiency to assess ozone sensitivity to hydrocarbons and NO_x Local indicators of instantaneous odd oxygen production sensitivity [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2000,105(D7):(9213-9225).
- [9] Sillman S. The use of NO_2 :HCHO, H_2O_2 , and HNO_3 as indicators for ozone - NO -ROG sensitivity in urban locations [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995,10:14175-14188.
- [10] Fried A, Cantrell C, Olson J, et al. Detailed comparisons of airborne formaldehyde measurements with box models during the 2006 INTEX-B and MILAGRO campaigns: potential evidence for significant impacts of unmeasured and multi-generation volatile organic carbon compounds [J]. *Atmos Chem Phys*, 2011,11(22):11867-11894.
- [11] Wang W, Ronald V D A, Ding J, et al. Spatial and temporal changes of the ozone sensitivity in China based on satellite and ground-based observations [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2021,21:7253-7269.
- [12] 张国强,巨天珍,王勤花,等.宁夏吸收性气溶胶时空分布及其影响因素研究 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(6):2371-2380.
Zhang G, Ju T, Wang W, et al. Studying on spatial and temporal distribution of absorbent aerosols and its influencing factors in Ningxia. *China Environmental Science*, 2020,40(6):2371-2380.
- [13] Jin X, Fiore A M, Murray L T, et al. Evaluating a space-based indicator of surface ozone- NO_x -VOC sensitivity over midlatitude

- source regions and application to decadal trends [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017,122(10):439–461.
- [14] 单源源,李 莉,刘 琼.基于 OMI 数据的中国中东部臭氧及前体物的时空分布 [J]. *环境科学研究*, 2016,29(8):9.
- [15] Shan Y, Li L, Liu Q, et al. Spatio-temporal distribution of ozone and its precursors over Central and Eastern China based on OMI data [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016,29(8):1128–1136.
- [16] Zheng, Yang, Wu, et al. Spatial variation of NO₂ and its impact factors in China: An application of Sentinel-5P products [J]. *Remote Sens (Basel)*, 2019,11(16):1939.
- [17] Judd L M, Al-Saadi J A, Szykman J J, et al. Evaluating Sentinel-5P TROPOMI tropospheric NO₂ column densities with airborne and Pandora spectrometers near New York City and Long Island Sound [J]. *Atmos Meas Tech*, 2020,(11).
- [18] 杨东上,罗宇涵,曾 议,等.基于 MAX-DOAS 和 TROPOMI 对北京冬季对流层 NO₂ 污染监测和对比分析 [J]. *遥感学报*, 2023,27(7):1680–1690.
- Yang D, Luo Y, Zeng Y, et al. Monitoring and comparative analysis of NO₂ pollution in the troposphere in winter over Beijing based on MAX-DOAS and TROPOMI. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023,27(7):1680–1690.
- [19] Duncan B N, Yoshida Y, Olson J R, et al. Application of OMI observations to a space-based indicator of NO_x and VOC controls on surface ozone formation [J]. *Atmos Environ (1994)*, 2010,44(18):2213–2223.
- [20] 于瑞新,刘旻霞,李 亮,等.长三角地区近 15 年大气臭氧柱浓度时空变化及影响因素 [J]. *环境科学学报*, 2021,41(3):770–784.
- Yu R, Liu M, Li L, et al. Spatial and temporal variation of atmospheric ozone column concentration and influencing factors in the Yangtze River Delta region in recent 15 years [J]. 2021,41(3):770–784.
- [21] 何思聪,王 璐,张自力,等.大气甲醛时空特征与影响因素分析——以中国主要经济区为例 [J]. *科学技术与工程*, 2022,22(1):416–428.
- He S, Wang L, Zhang Z, et al. Estimation and prediction of vegetation ecological water demand in arid region of northwest China under climate change [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022,22(1):416–428.
- [22] Miller S M, Matross D M, Andrews A E, et al. Sources of carbon monoxide and formaldehyde in North America determined from high-resolution atmospheric data [J]. *Atmos Chem Phys*, 2008,8(24):7673–7696.
- [23] 毛红梅,张凯山,第宝锋.四川省天然源 VOCs 排放量的估算和时空分布 [J]. *中国环境科学*, 2016,(5):8.
- Mao H, Zhang K, Di B, et al. Studies on estimates of biogenic VOC emission and its temporal and spatial distribution in Sichuan. [J]. *China Environmental Science*, 2016,(5):8.
- [24] Yin C, Deng X, Zou Y, et al. Trend analysis of surface ozone at suburban Guangzhou, China [J]. *Sci Total Environ*, 2019,695:133880.
- [25] Hwang J, Lee H, Jung U, et al. First-time remote sensing of NO₂ vertical distributions in an urban street canyon using Topographic Target Light scattering Differential Optical Absorption Spectroscopy (ToTaL-DOAS) [J]. *Atmos Environ (1994)*,2012.
- [26] 李美欣,吴 莹,鲍艳松.OMI 和 TROPOMI 的中国对流层 NO₂ 污染数据的时空对比分析 [J]. *海洋气象学报*, 2023,43(1):75–86.
- Li M, Wu Y, Bao Y, et al. Spatial and temporal comparison of tropospheric NO₂ pollution data from OMI and TROPOMI in China. [J], *Journal of Marine Meteorology*, 2023,43(1):75–86.
- [27] Ren J, Guo F, Xie S. Diagnosing ozone–NO_x–VOC sensitivity and revealing causes of ozone increases in China based on 2013–2021 satellite retrievals [J]. *Atmos Chem Phys*, 2022,22(22):15035–15047.
- [28] 2019 年武汉市机动车污染防治年报 [R]. 武汉:武汉市生态环境局, 2019.
- 2019 Wuhan Annual Report on Motor Vehicle Pollution Prevention and Control [R]. Wuhan:Wuhan Municipal Bureau of Ecology and Environment, 2019.

作者简介: 杨淳棉(1997-),女,湖北咸宁人,博士研究生.研究方向为大气区域质量.发表论文 2 篇.chunmian@163.com.