

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023081301

CSTR:32061.14.hjhx.2023081301

汪庆, 韩俊铎, 孙岩, 等. 邯郸市 NO₂ 浓度时空特征及潜在源分析[J]. 环境化学, 2025, 44(1): 234-242.

WANG Qing, HAN Junduo, SUN Yan, et al. Spatio-temporal characteristics and source apportionment of NO₂ in Handan[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (1): 234-242.

邯郸市 NO₂ 浓度时空特征及潜在源分析*

汪庆 韩俊铎 孙岩** 罗景辉 孙少静 李旭力 齐天野

(河北工程大学能源与环境工程学院, 河北省大气污染成因与影响重点实验室,
污水处理及资源化利用河北省工程研究中心, 邯郸, 056038)

摘要 随着城镇化发展和汽车保有量的增加, 许多区域 NO₂ 排放量显著增加, NO₂ 污染对生态环境、植被作物生长、人体健康都有负面影响. 为了解邯郸市 NO₂ 污染时空变化规律及污染来源, 取 2018—2021 年各区县 18 个监测站点数据, 采用反距离权重插值法 (IDW) 和小波分析法, 分析了邯郸市 NO₂ 浓度空间分布情况及时序特征, 同时利用 Meteoinfo 中后向轨迹分析了邯郸市 NO₂ 传输路径. 结果表明, 邯郸市 2018—2021 年 NO₂ 浓度呈下降趋势, 受人为源排放及气象因素影响, 邯郸市 NO₂ 污染主要集中在秋季的 10 月和 11 月和冬季的 12 月和 1 月, 期间气象特征为低温低湿低风速高压强. 邯郸市 NO₂ 浓度在空间上呈集聚态势, 市区平均浓度高于周边县域, 高浓度地区集中在邯郸市西部和中部, 东南部区县浓度较低, 总体呈现西北地区高东南地区低的趋势. NO₂ 浓度除了季节性变化之外, 还存在长期变化趋势. 全年不同季节气流聚类分析中, 冬季来自西北方向的气流轨迹最多, 春季和夏季气流轨迹主要来自南方和东南方向, 秋季气流轨迹主要来自河北北部, 除冬季外来自河北南部气流轨迹占主要贡献.

关键词 NO₂, 时空特征, 影响因素, 小波分析, 聚类分析.

中图分类号 X-1; O6 文献标识码 A

Spatio-temporal characteristics and source apportionment of NO₂ in Handan

WANG Qing HAN Junduo SUN Yan** LUO Jinghui
SUN Shaojing LI Xuli QI Tianye

(College of Energy and Environmental Engineering, Hebei Key Laboratory of Air Pollution Cause and Impact, Hebei Engineering Research Center of Sewage Treatment and Resource Utilization, Hebei University of Engineering, Handan, 056038, China)

Abstract Nitrogen dioxide (NO₂) pollution poses a serious threat to ecological environment, growth of vegetation crops and human health, due to the significant increase of NO₂ emissions in most areas with the development of urbanization and the rapid increase in motor vehicle ownership. To understand the temporal and spatial variation and the source of NO₂ pollution in Handan City, the NO₂ data obtained from 18 counties in Handan City from 2018 to 2021 were analyzed. Inverse distance weighted and wavelet analysis were adopted to explore the characteristics of the spatial and

2023 年 8 月 13 日收稿 (Received: August 13, 2023).

* 国家自然科学基金 (42077393, 52302239), 河北省大气污染成因与影响重点实验室绩效补助经费 (22567628H), 河北省自然科学基金 (D2023402025) 和河北省高等学校科学技术研究项目 (QN2023139, QN2024101) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42077393, 52302239), Performance Grant for Key Laboratory of Causes and Effects of Air Pollution in Hebei Province (22567628H), Hebei Natural Science Foundation (D2023402025) and Science and Technology Project of Hebei Education Department (QN2023139, QN2024101).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: sunyan@hebeu.edu.cn

temporal distribution, and backward trajectories were performed to investigate the transmission path of NO₂. The results indicated that the concentration of NO₂ exhibits a decreasing trend from 2018 to 2021, which is affected by the anthropogenic sources and meteorological factors. Besides, the NO₂ pollution was mainly concentrated in October and November in autumn and December and January in winter, during which the meteorological characteristics were low temperature, low humidity, low wind speed and high pressure. As for the spatial distribution, the concentration of NO₂ showed an agglomeration trend. The average concentration in the urban area was higher than that in the surrounding counties, the NO₂ concentration in the western and central area is high and that in the southeast counties was low. Moreover, the transmission path of NO₂ was investigated by backward trajectories. The results of the cluster analysis of air flow in different seasons showed that the air flow trajectory is mainly from northwest region in winter, mainly from south and southeast region in spring and summer, and the north of Hebei province in autumn, respectively.

Keywords NO₂, spatiotemporal characteristics, influencing factors, wavelet analysis, cluster analysis.

近年来,随着我国工业化和城镇化快速发展,环境污染问题日益严重^[1]. NO₂ 是一种主要的大气污染物,作为 PM_{2.5} 和臭氧形成的主要前体物,与一系列环境问题有关^[2-5]. 大气 NO₂ 不仅影响农作物和生态安全,还会对人体健康造成不利影响,增加哮喘、心血管疾病、冠心病、皮肤病等患病风险,从而影响住院率和死亡率^[6-9].

自 2013 年我国推出《大气污染防治行动计划》以来,NO₂ 浓度在 2015 至 2019 年间下降了 5%,但仍高于环境空气二级浓度限值^[10]. 遥感技术有着数据规模大、高空间分辨率和全球覆盖的优势,为区域尺度大气污染研究提供了可靠的依据^[11]. Xie 等^[12] 利用 OMI 卫星反演数据,对万江城市带 NO₂ 污染的时空模式进行了广泛研究,评估了产业转移政策对万江城市带空气质量的影响,分析了典型城市马鞍山市 NO₂ 来源及气团传输路径. 沈永林等^[13] 研究了能源金三角(EGT)地区对流层 NO₂ 柱变化和空间分布,并结合经济数据探讨经济因素对区域 NO₂ 浓度的驱动因素,发现结构产业化的调整使得各 NO₂ 排放源占比发生变化. 陈玲等^[14] 发现汾渭平原 NO₂ 垂直柱浓度于 2012 年达到顶峰并在之后呈逐年下降趋势,夏季 NO₂ 浓度最低,冬季最高且约为夏季的 3.6 倍,汾渭平原 NO_x 减排在城市收益较大,对乡村地区影响不明显. 尽管卫星测量可以解释综合空间变异性,但仍然存在一些不确定性,受到云层和雾霾等天气影响会导致数据失真或缺失^[15]. 李秋芳等^[16] 利用地面监测数据探究 NO₂ 浓度的影响因素发现,NO₂ 与温度的相关性最强,污染较重区域 NO₂ 稳定性相比污染较轻区域更好. Bassani 等^[17] 基于地面监测点和对流层 TROPOMI VCD 的大气观测数据发现,新冠疫情期间 NO₂ 水平显著下降,城市比农村多下降 26%,观测期间污染物浓度下降并不是因气象因素影响,最大影响来源于封控期间城市道路源排放减少. 区域大气污染水平不仅受本地排放源影响,还受长距离外来传输的影响^[18]. 刘光瑾等^[19] 利用 WRF-CMAQ 进行污染物溯源模拟,发现 NO₂ 冬季省内传输占比最大,为 26.02%—76.96%,传输路径多由北向南. 目前对邯郸市大气 NO₂ 的时空特征、影响因素和污染轨迹来源少有报道.

本文基于邯郸市 18 个空气质量监测站 2018—2021 年在线监测数据,运用 Arcgis 软件对邯郸市 NO₂ 浓度特征及时空分布特征进行分析,并根据小波分析结果探讨 NO₂ 浓度时序变化特征,分析污染物浓度与气象因子之间的关系,同时基于 2021 年邯郸市 GDAS 气象数据,利用 Meteoinfo 软件轨迹法后向轨迹模型对 NO₂ 的来源和迁移过程进行聚类,定位可能影响邯郸市 NO₂ 浓度的源区,了解大气 NO₂ 污染特征和排放源潜在源区,以期为邯郸市大气污染精细化管控提供参考.

1 材料与方法(Materials and methods)

邯郸市(36°20′—36°44′ N, 114°03′—114°40′ E)位于京津冀大气污染传输通道“2+26”城市的中部,市域面积约 12066 km²,地势自西向东呈阶梯状下降,高差悬殊,地貌类型复杂多样(图 1). 主城区包括丛台区、邯山区、复兴区,市区包括主城区、永年区、肥乡区和峰峰矿区,其他均为县域.



图 1 邯郸市监测点位分布

Fig.1 Distribution of environmental monitoring points in Handan

1.1 数据来源

本研究数据为中国环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn/>) 发布的 NO_2 浓度小时检测平均值, 监测时段为 2018 年—2021 年, 剔除了因仪器误差而造成的无效数据, 逐日气象资料来源于邯郸市基本站逐日数据. GDAS 数据是 NECP 全球资料同化系统数据 (<ftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>), 气象要素场包括地面温度、相对湿度、气压、水平和垂直风速等, 本研究中该数据被用以计算后向轨迹.

1.2 研究方法

1.2.1 空间插值法

反距离权重插值法 (inverse distance weighted) 是一种常用的空间插值方法, 基于地理学第一定律^[20, 21], 距离近的事物比距离远的事物关联更紧密, 即与监测点越远的位置受到的影响越小. 其方法根据点到监测点的距离分配权重, 距离越近分配的权重越大, 权重随着距离的增大而减小, 公式如下:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}}, \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (2)$$

式中, $\hat{Z}(s_0)$ 为插值点 s_0 处的预测结果; N 为插值点附近监测点的数量; λ_i 为各监测点的权重; $Z(s_i)$ 为 s_i 处的检测值; p 为反距离权重值; d_{i0} 为插值点与各采样点之间的距离.

1.2.2 基于时间序列的小波分析

小波分析可以揭示隐藏在时间序列中的变化周期 (充分反映大气系统在不同时间尺度下的变化趋势), 可以对未来的发展趋势做出定性的估计^[22]. 连续小波变化和小波方差的公式如下:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0) \quad (3)$$

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (4)$$

其中, $W_f(a, b)$ 表示小波变换系数, $f(t)$ 表示信号或平方可积函数, a 表示扩展的尺度, b 表示平移参数, $\bar{\psi} \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 为 $\psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 的副共轭函数, $\text{Var}(a)$ 为小波方差, a 和 b 分别为伸缩尺度和平移参数.

1.2.3 后向轨迹分析

本研究利用 Meteoinfo 软件以及其中的 Trajstat 插件来进行后向轨迹分析, 选取邯郸市中心经纬度 ($36^{\circ}37' \text{ N}$, $114^{\circ}28' \text{ E}$) 为受体点, 模拟时段为 2018—2021 年, 选取研究时段为每日 00:00、06:00、12:00、15:00、18:00 时 (北京时间) 计算后向轨迹. 考虑到邯郸市及周边地区的大气边界层高度, 为了减少近地面 对气团传送模拟结果的影响, 后向轨迹计算的模拟高度设为 500 m.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 NO₂ 时空分布特征

2.1.1 年变化特征

2018—2021 年邯郸市 NO₂ 浓度由 40.61 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 29.88 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 下降速率为 2.68 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^{-3}\cdot\text{a})^{-1}$ (图 2). 邯郸市区 NO₂ 浓度 4 年均值变化中, 市域平均浓度下降速率为 2.85 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^{-3}\cdot\text{a})^{-1}$, 复兴区 (44 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和永年区 (43 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) NO₂ 污染较重, 平均值都高于 40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 与其是以钢铁、化工为主的工业区有关, 丛台区 (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、邯山区 (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、肥乡区 (32 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和峰峰矿区 (34 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 浓度较低. 邯郸市县域中, NO₂ 浓度下降速率为 2.60 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^{-3}\cdot\text{a})^{-1}$, 其中临漳县治理效果最为显著, NO₂ 浓度下降 15.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 武安市 NO₂ 浓度最高 (43 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 与其以钢材、文化旅游的产业结构有重要联系, NO₂ 浓度 4 年均值高于 40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 还有磁县, 魏县 NO₂ 浓度最低 (31 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 磁县 4 年内 NO₂ 平均浓度较高且下降幅度大, 2018 年磁县出台了《磁县大气污染综合治理三年作战计划》, 实行企业深度治理、煤改气煤改电等科学管控措施, 治理效果明显. 污染较重的区域集中在邯郸市的中部以及西北和西南部的边界区域, 除了受市域内自身排放源影响, 边界区域更多受周边城市短距离外来输送的影响^[23-24].

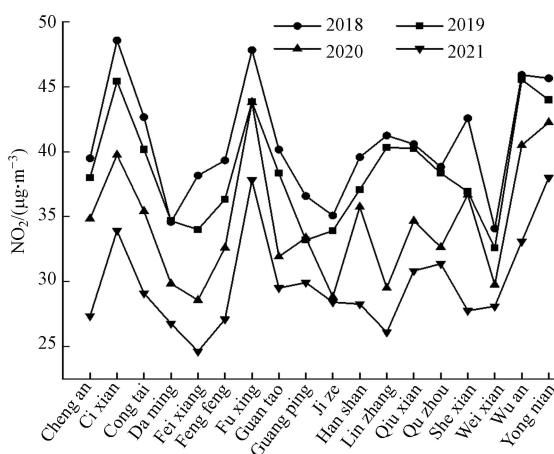


图 2 邯郸市 2018—2021 年各站点 NO₂ 年际变化

Fig.2 Interannual variation of NO₂ in different stations in Handan city from 2018 to 2021

为研究邯郸市时空分布特征, 取 2018—2021 年 NO₂ 浓度数据进行空间插值分析 (图 3), 各区县 NO₂ 时序变化规律差异较小, 其差异主要体现在 NO₂ 浓度分布, 市区平均浓度高于周边县域浓度, 呈中心向周边县域辐射状分布特征. 浓度高值主要集中在复兴区、永年区以及武安市部分区域, 这些区县年平均质量浓度均超过国家二级标准, NO₂ 主要来自于工业生产和交通运输, 2018—2021 年邯郸市 NO₂ 浓度整体呈下降趋势, 平均浓度下降 10.73 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 自 2018 年 7 月《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的深入实施, 建立绿色低碳交通体系, 加大新能源车辆推广力度, 新能源车替代重型燃油车, 到 2023 年底, 全市新能源重型货车保有量确保达到 3000 辆, 使得域内 NO₂ 浓度下降明显.

2.1.2 月变化特征

为进一步分析邯郸市各区县 NO₂ 空间演变格局和污染时段, 取 2018—2021 年邯郸市 18 个区县的 NO₂ 月均浓度数据进行 IDW 空间插值, 插值结果如 (图 4). NO₂ 浓度变化明显, 污染主要集中在秋季 (10 月和 11 月) 和冬季 (12 月和 1 月), 但各月 NO₂ 空间分布差异不大但浓度差异明显, 说明主要因素为污染源的分布及气象条件. 邯郸市污染时段基本为供暖期前后, 中国北方城市能源和燃料消耗增加, 人为排放也随之增加, 其中 1 月各主城区的浓度最高, 为 57 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 7 月浓度最低, 为 20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 各区县中复兴区的月均浓度最高 (43 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 大名县月均浓度最低 (31 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 冬季气温低, 降水少, 不利于污染物的沉积与扩散^[25-26], 而 2 月 NO₂ 浓度减少可能与春节前后多数工厂放假停止工业生产有关; 夏季的强太阳辐射和高温条件会发生强烈的光化学反应, ·OH 自由基作为一种氧化剂与 NO₂ 反应生成硝酸, 对酸雨、水土酸化有重要贡献, 并且在 NH₃ 存在的条件下进而形成硝酸盐等二次无机气溶

胶^[27-28], 邯郸市属于大陆季风气候, 夏季多雨气候湿润, 有利于降低 NO_2 浓度. 此外, 夏季以东南风为主, 大量风从海洋吹向陆地, 有利于污染物的扩散.

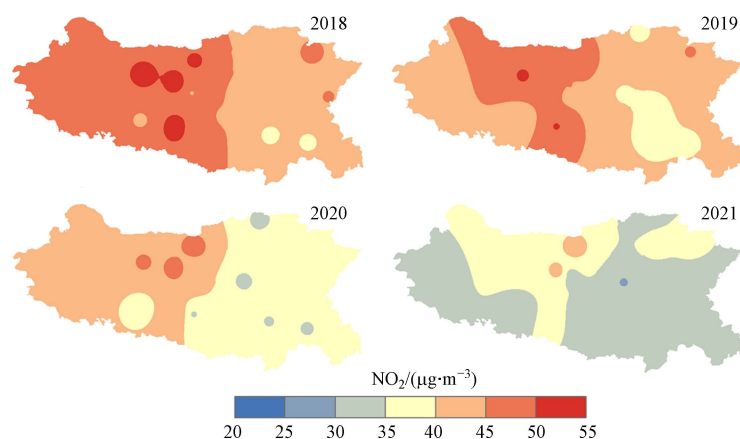


图3 邯郸市 2018—2021 年 NO_2 浓度的时空格局

Fig.3 Spatio-temporal patterns of NO_2 concentrations of Handan from 2018 to 2021

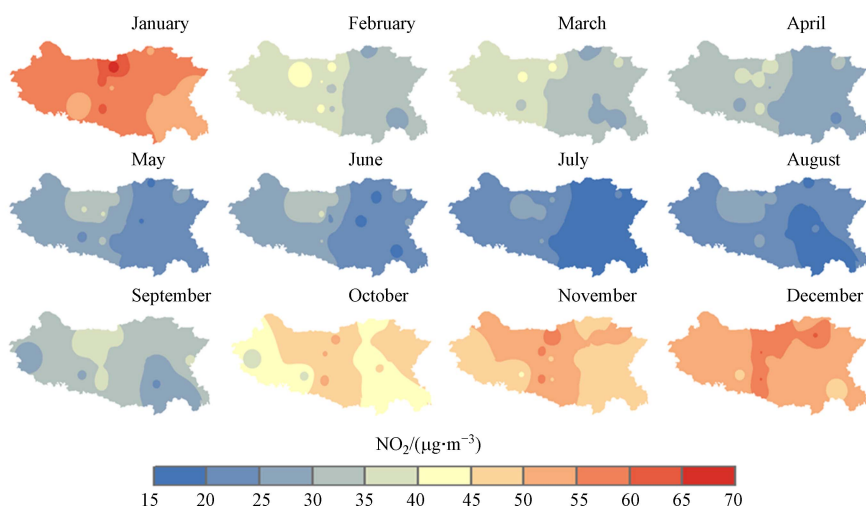


图4 邯郸市 2018—2021 年月际 NO_2 浓度的时空格局

Fig.4 Spatio-temporal patterns of NO_2 monthly concentrations of Handan from 2018 to 2021

2.2 NO_2 浓度周期变化分析

应用小波分析方法对 2018—2021 年 NO_2 浓度数据进行处理, 以揭示长时序 NO_2 的动态特征, 小波分析结果如图 5. 小波实部的等值线图可以反映 NO_2 浓度在不同时间尺度上的周期性变化及其在时域上的分布, 进而可以确定 NO_2 浓度在不同时间尺度上的未来变化趋势. 小波分析方差图可以确定浓度变化所包含的主要周期.

图 5(a) 显示了邯郸市 NO_2 浓度变化的多时间尺度特征. 小波系数实部等值线图显示存在 3 个可能的时间尺度: 268—273、541—547 及 863—869 d, 其中 541—547 d 的时间尺度具有明显的周期变化, 中心尺度在 546 d 左右, 呈现明显的“低-高-低”的交替变化特征. 268—273 d 和 541—547 d 的全局性较弱. 小波随尺度的变化称为小波方差图, 反映了信号波动的能量的分布与尺度. 因此, 小波方差图可用于确定信号中不同尺度扰动的相对强度和存在的主要时间尺度, 即主要时期. 在小波方差图中存在 3 个不同的峰, 其分别对应 546 d (第一主周期)、868 d (第二主周期)、269 d (第三主周期), 这 3 个周期的波动代表了 2018—2021 年 NO_2 浓度的变化特征. 正负小波系数的转折点对应着突变点, 小波系数的绝对值代表着该时间尺度下变化的显著性, 从图 5(a) 中可以看出, 小波系数为零的点及为突变点, 是 NO_2 浓度变化的拐点. 第一主周期中, 突变点大概出现在 3 月和 8 月左右, 小波实部系数高值出现在采暖期中, 低值在非采暖期中. 而在其他时间尺度内 NO_2 的小波系数在正负相位间的变化缓慢.

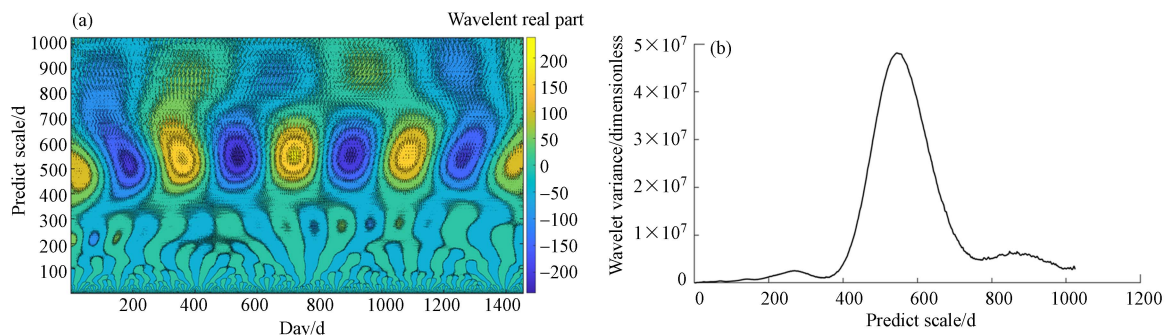


图5 邯郸市 2018—2021 年 NO₂ 浓度小波分析, (a) 小波系数实部等值线图, (b) 小波分析方差图

Fig.5 Wavelet analysis of NO₂ concentration in Handan from 2018 to 2021, (a) Contour map of the real part of wavelet analysis, (b) Wavelet analysis variance diagram

2.3 NO₂ 与气象因子之间的相关性

大气中 NO₂ 浓度与气象条件的变化密切相关, 温度、相对湿度和风速被认为是决定近地面 NO₂ 浓度变化的重要气象因素^[29-30]. 为探讨邯郸市 2018—2021 年 NO₂ 浓度与气象因素的关系, 使用 SPSS 软件进行 Pearson 相关性分析(图 6), 所用气象数据为邯郸市日均数据. 邯郸市 2018—2021 年间 NO₂ 浓度与压强 ($R^2=0.575$) 呈正相关, 与平均温度 ($R^2=-0.598$)、湿度 ($R^2=-0.173$)、降水量 ($R^2=-0.206$)、日照时数 ($R^2=0.386$) 和气压 ($R^2=0.575$) 呈负相关. NO₂ 经过阳光照射后可以产生 O₃, 与 O₃ 的生成气象条件相反, 而空气湿度比较大时 NO₂ 会生成 PM_{2.5}, 促进二次气溶胶的生成, 较大的风速会加速污染物的扩散, 因此风速与 NO₂ 呈负相关关系, 移动源是 NO_x 主要排放源.

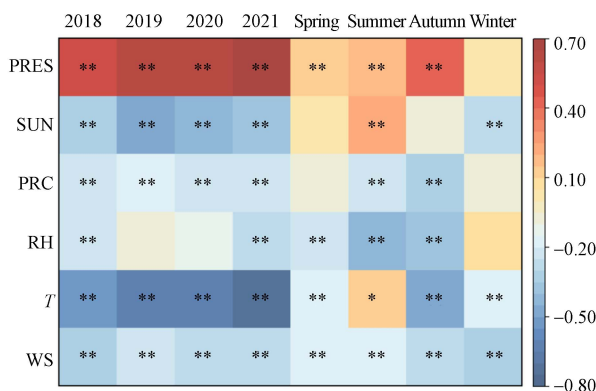


图6 2018—2021 年邯郸市 NO₂ 浓度与气象因子的相关性

注: PRES 表示压强; SUN 表示日照时数; PRC 表示降水量; RH 表示湿度; T 表示气温; WS 表示风速; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

Fig.6 Correlation of NO₂ and meteorological elements in Handan from 2018 to 2021

Note: PRES stands for pressure; SUN stands for sunshine duration; PRC stands for precipitation; RH represents humidity; T stands for temperature; WS stands for wind speed; * means $P < 0.05$; ** means $P < 0.01$.

夏季邯郸地区的强对流天气和充足的降雨有利于降低 NO₂ 浓度^[31], 冬季盛行西北风, 大量污染物由西北方向输送过来, 使 NO₂ 浓度上升. 边界层高度也是影响 NO₂ 的一个重要变量, 其大小在很大程度上决定了污染物的垂直扩散能力和地面附近的温度, 随着大气边界层高度的增加, 污染物更容易扩散, 污染物向上输送, 使得近地面污染物浓度下降. 压强与 NO₂ 变化呈正相关, 可能是因为大气压力的增加提高了大气的稳定性, 不利于 NO₂ 的迁移和扩散.

根据邯郸市 NO₂ 浓度与气象因素相关性分析结果可知, 不同的气象因素对 NO₂ 浓度的影响不同, 但只分析了单独两个变量的相关性, 没有考虑其他变量的影响. 为定量研究污染物浓度与气象因素的相互关系, 采用逐步多元回归方法, 建立邯郸市 2018—2021 年 NO₂ 与气象因素(平均温度(T))、风速(WS)、湿度(RH)、日照时数(SUN)、降水量($PREC$)、压强($PRES$)之间的最优回归模型, 最终回归方程为: $NO_2 = -0.550T - 4.039WS - 0.203RH - 2.434SUN - 0.281PREC + 77.335$, 模型调整后 R^2 为 0.449, 模拟程度较好, 表明平均温度、风速、湿度、日照时数和降水量可以解释 NO₂ 的 44.9% 的变化量.

2.4 气团轨迹聚类分析

为探讨邯郸市主要传输气团,基于2020年12月—2021年11月NO₂小时浓度数据和GADS气象数据,利用MeteoInfo软件分析全年48 h后向轨迹分布,然后利用TrajStat插件对邯郸市各季节轨迹进行聚类分析(表1),以探索全年各季节不同类型的气流轨迹所占比例和对应的NO₂浓度水平。

表1 邯郸市四季各类轨迹统计结果

Table 1 Seasonal statistical analysis results of various trajectories in Handan

季节 Season	轨迹 Trajectories	途径区域 Pathway area	所有轨迹 All trajectories	
			出现频率/% Frequency of occurrence	$\rho(\text{NO}_2)/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$
冬	1	新疆北部内蒙古南部陕西北部陕西南部	21.84	44.33
	2	内蒙古西部陕西中部山西南部	25.51	33.23
	3	内蒙古西部宁夏北部陕西北部山西南部	20.71	43.40
	4	内蒙古中部山西北部	11.53	59.36
	5	天津渤海方向山东北部河北南部	20.41	46.15
春	1	内蒙古西部山西北部	13.32	27.00
	2	内蒙古东部河北北部北京	7.61	25.33
	3	河南南部	25.27	29.41
	4	内蒙古西部陕西北部山西南部	19.57	25.06
	5	山东东部河北南部	27.99	25.48
	6	内蒙古西部陕西北部山西中部	6.25	24.20
夏	1	河南南部	36.68	18.35
	2	内蒙古西部陕西北部陕西中部	12.23	24.90
	3	渤海方向河北南部	26.36	17.16
	4	江苏东部山东南部	24.73	16.31
秋	1	河北北部	37.09	29.98
	2	内蒙古西部山西北部	14.29	35.54
	3	河南南部	25.55	41.02
	4	内蒙古西部陕西北部山西中部	23.08	41.92

冬季受西伯利亚冷空气影响,来自西北方向的气流轨迹最多(轨迹1、2、3、4),总占比为79.59%。来自内蒙古西部,主要途径陕西北部和山西中部的气流轨迹2类,为邯郸市冬季主要传输通道,该类气流占25.51%,传输气流轨迹最短,表明其气象条件稳定,不利的气象条件阻碍污染物的扩散,山西为我国资源大省,其中中部地区工业化程度高,人口密度大,氮氧化物排放量较高。来自俄罗斯,途径蒙古国、内蒙古西部和山西中部的第4类气流轨迹最少,气流占比为冬季的11.53%,对应的浓度最大,该类气流轨迹长,风速较大,有利于空间污染物的扩散。蒙古国和内蒙古畜牧业发达,产生的氨在微生物的作用下生成亚硝酸盐和硝酸盐被反硝化后生成NO等氮氧化物,NO被氧化后会生成NO₂。

春季聚类轨迹NO₂浓度从高到低依次为3>1>5>2>4>6,其中经过山东东部的第5类气流轨迹最多,占春季轨迹的27.99%,山东省农业为农业大省,春季使用氮肥后,土壤中的微生物通过硝化作用会生成硝酸态氮化合物,其中亚硝酸盐可以进一步转化为NO₂等氮氧化物,硝态氮通过反硝化作用也会生成氮氧化物会散发到环境中。此外,该气流经过青岛、济南、潍坊等城市,是传统工业强市,工业源污染对NO₂污染水平有很大的影响。来自河南南部的第3类轨迹对应的NO₂浓度最高,该区域农业发达,春季秸秆燃烧会使NO₂排放量增加。

夏季NO₂浓度最低,除气象因素影响外,夏季植被茂盛,除了可以吸附二次颗粒物也有助于降低氮氧化物浓度。各轨迹对应NO₂浓度从高到低依次为2>1>3>4,其中,来自俄罗斯、蒙古国的西北方向轨迹2对应的NO₂浓度较高。第3类和第4类轨迹来自海港城市,这两条轨迹占夏季气流轨迹总量的

51.09%, 分别途径港口城市天津和盐城, 航运是港口地区附近空气污染的重要来源, 除船舶排放外重型柴油卡车和货物装卸设备的排放也会产生大量的 NO₂。

秋季气流轨迹主要来自短距离传输, 各轨迹对应的 NO₂ 浓度依次为 4>3>2>1, 来自河北北部的气流最多, 为 37.09%, 携带 NO₂ 浓度最低, 秦皇岛和承德区域空气相对清洁, 人为排放少。来自河南中部的轨迹聚类 3 气流轨迹短, 对应 NO₂ 浓度较高, 郑州是重要的交通枢纽, 移动源排放可能会对 NO₂ 有影响, 除冬季外均有来自河南的气流, 轨迹均较短携带 NO₂ 浓度均较高, 河北南部地区对邯郸市 NO₂ 浓度影响较大。

3 结论(Conclusion)

(1) 邯郸市 2018—2021 年 NO₂ 浓度总体呈逐年减少的趋势, 市区平均浓度高于周边县域浓度, 呈中心向周边县域辐射状分布特征, 污染中心主要集中在复兴区、永年区以及武安市, 高值区域集中在邯郸市西部武安市、磁县和复兴区, NO₂ 低值区域集中在邯郸市东南部大名县和广平县。NO₂ 浓度随季节变化明显, 污染主要集中在冬季的 12 月和 1 月和秋季的 10 和 11 月。NO₂ 浓度时序变动, 主要受 546 d(第一主周期)、868 d(第二主周期)、269 d(第三主周期)这 3 个特征时间尺度的控制。

(2) NO₂ 浓度与压强呈正相关, 与平均温度、湿度、降水量、日照时数和气压呈负相关, 其中平均温度和气压相关性最强。采用逐步多元回归方法, 得到 NO₂ 与气象因素最优回归方程为 $NO_2 = -0.5507T - 4.039WS - 0.203RH - 2.434SUN - 0.281PREC + 77.335$ 。邯郸市地区生产总值影响 NO₂ 质量浓度空间格局的重要影响因素。

(3) 邯郸市气流传输变化存在明显的季节特征。冬季和春季受西伯利亚冷空气影响, 气流主要来自于内蒙古西南部, 气流方向以西北部为主; 夏季以途经江苏东部、山东南部和河南南部的气流为主; 秋季短距离气流占重要优势。

参考文献 (References)

- [1] 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 J F, HOU L L, WANG X L, 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 (in Chinese).
- [2] CARMONA-CABEZAS R, GÓMEZ-GÓMEZ J, GUTIÉRREZ de RAVÉ E, et al. Checking complex networks indicators in search of singular episodes of the photochemical smog [J]. *Chemosphere*, 2020, 241: 125085.
- [3] 王怡然, 袁自冰, 赵恺辉, 等. 粤港澳大湾区 PM_{2.5} 本地与非本地污染来源解析 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1560-1574.
WANG Y R, YUAN Z B, ZHAO K H, et al. Quantitative apportionment of local and non-local contributions to PM_{2.5} in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5): 1560-1574 (in Chinese).
- [4] 解楠, 茹艺. 哈尔滨 PM_{2.5} 和 NO₂ 的污染特征及相关性分析 [J]. 绿色科技, 2022, 24(22): 181-183, 188.
XIE N, RU Y. Pollution characteristics and correlation analysis of PM_{2.5} and NO₂ in Harbin [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, 24(22): 181-183, 188 (in Chinese).
- [5] 赖安琪, 陈晓阳, 刘一鸣, 等. 珠江三角洲 PM_{2.5} 和 O₃ 复合污染过程的数值模拟 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4022-4031.
LAI A Q, CHEN X Y, LIU Y M, et al. Numerical simulation of a complex pollution episode with high concentrations of PM_{2.5} and O₃ over the Pearl River Delta region, China [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(11): 4022-4031 (in Chinese).
- [6] LOBELL D B, Di TOMMASO S, BURNEY J A. Globally ubiquitous negative effects of nitrogen dioxide on crop growth [J]. *Science Advances*, 2022, 8(22): eabm9909.
- [7] KIM S Y, KIM S H, WEE J H, et al. Short and long term exposure to air pollution increases the risk of ischemic heart disease [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 5108.
- [8] 蔡东杰, 杨军, 黄琳, 等. 广州市大气 NO₂ 污染对暴露人群不同疾病死亡的影响 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(8): 3950-3956.
CAI D J, YANG J, HUANG L, et al. Impacts of atmospheric NO₂ pollution on cause-specific mortality of different diseases in exposed population in Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(8): 3950-3956 (in Chinese).
- [9] 华琨, 罗忠伟, 贾斌, 等. 天津市空气污染的健康影响分析 [J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2492-2501.
HUA K, LUO Z W, JIA B, et al. Health impacts of air pollution in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2492-2501 (in Chinese).
- [10] ZHOU W, CHEN C, LEI L, et al. Temporal variations and spatial distributions of gaseous and particulate air pollutants and their health risks during 2015-2019 in China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 116031.

- [11] HUANG G Y, SUN K. Non-negligible impacts of clean air regulations on the reduction of tropospheric NO₂ over East China during the COVID-19 pandemic observed by OMI and TROPOMI[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 745: 141023.
- [12] XIE Y, WANG W, WANG Q L. Spatial distribution and temporal trend of tropospheric NO₂ over the Wanjiang city belt of China[J]. *Advances in Meteorology*, 2018, 2018: 1-13.
- [13] 沈永林, 骆济豪, 马雨阳, 等. 中国能源金三角 NO₂ 时空格局及其驱动因子 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(4): 1585-1593.
SHEN Y L, LUO J H, MA Y Y, et al. Spatiotemporal patterns and driving forces of NO₂ concentrations from different emission sources in the energy golden triangle of China[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(4): 1585-1593 (in Chinese).
- [14] 陈玲, 闫世明, 倪成诚, 等. 基于 OMI 的汾渭平原对流层 NO₂ 长期变化趋势 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(8): 3492-3501.
CHEN L, YAN S M, NI C C, et al. Long-term trends of tropospheric NO₂ over the Fenwei Plain of China based on OMI data[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(8): 3492-3501 (in Chinese).
- [15] JUST A C, WRIGHT R O, SCHWARTZ J, et al. Using high-resolution satellite aerosol optical depth to estimate daily PM_{2.5} geographical distribution in Mexico city[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(14): 8576-8584.
- [16] 李秋芳, 刘翠棉, 丁学英, 等. 石家庄市 NO₂ 时空分布特征及影响因素 [J]. *中国环境监测*, 2022, 38(3): 62-73.
LI Q F, LIU C M, DING X Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and influencing factors of NO₂ in Shijiazhuang[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(3): 62-73 (in Chinese).
- [17] BASSANI C, VICHI F, ESPOSITO G, et al. Nitrogen dioxide reductions from satellite and surface observations during COVID-19 mitigation in Rome (Italy)[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(18): 22981-23004.
- [18] 肖凯, 任学昌, 陈仁华. 嘉峪关市大气污染物传输特征与潜在源分析 [J]. *环境工程*, 2021, 39(9): 92-101,109.
XIAO K, REN X C, CHEN R H. Analysis of transmission characteristics and potential sources of air pollutants in Jiayuguan[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(9): 92-101,109 (in Chinese).
- [19] 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 等. 河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径 [J]. *环境科学*, 2022, 43(8): 3953-3965.
LIU G J, SU F C, XU Q X, et al. One-year simulation of air pollution in central China, characteristics, distribution, inner region cross-transmission, and pathway research in 18 cities[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 3953-3965 (in Chinese).
- [20] 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 等. 石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 [J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5131-5142.
NIE S S, WANG S, CUI J S, et al. Spatio-temporal characteristics and potential source areas of seasonal atmospheric pollution in Shijiazhuang[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 5131-5142 (in Chinese).
- [21] 李万隆, 马清霞, 刘德新. 河南省春节禁燃政策对大气污染的影响分析 [J]. *环境化学*, 2023, 42(2): 544-557.
LI W L, MA Q X, LIU D X. Analysis of effect of burning ban policy on air pollution during the Spring Festival in Henan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(2): 544-557 (in Chinese).
- [22] BREUNIG F M, PEREIRA FILHO W, GALVÃO L S, et al. Dynamics of limnological parameters in reservoirs: A case study in South Brazil using remote sensing and meteorological data[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 574: 253-263.
- [23] 王郭臣, 王珏, 信玉洁, 等. 天津 PM₁₀ 和 NO₂ 输送路径及潜在源区研究 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(12): 3009-3016.
WANG G C, WANG J, XIN Y J, et al. Transportation pathways and potential source areas of PM₁₀ and NO₂ in Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(12): 3009-3016 (in Chinese).
- [24] 武高峰, 王丽丽, 董洁, 等. 国庆前后北京城区 PM_{2.5} 组分污染及来源特征分析 [J]. *环境化学*, 2021, 40(12): 3721-3732.
WU G F, WANG L L, DONG J, et al. Pollution and source characteristics of PM_{2.5} components in Beijing urban area around National Day[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(12): 3721-3732 (in Chinese).
- [25] FAN H, ZHAO C F, YANG Y K. A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014–2018[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 220: 117066.
- [26] 李宏艳, 高雪莹, 李宏宇, 等. 山西省大气 PM_{2.5} 污染时空分布特征 [J]. *环境化学*, 2018, 37(5): 913-923.
LI H Y, GAO X Y, LI H Y, et al. Spatial-temporal distribution and variation characteristics of PM_{2.5} in Shanxi[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(5): 913-923 (in Chinese).
- [27] YIN H, LIU C, HU Q H, et al. Opposite impact of emission reduction during the COVID-19 lockdown period on the surface concentrations of PM_{2.5} and O₃ in Wuhan, China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 289: 117899.
- [28] 赵辉, 郑有飞, 李硕, 等. 我国近地层 O₃ 污染及其风险评估研究进展 [J]. *环境化学*, 2019, 38(12): 2709-2718.
ZHAO H, ZHENG Y F, LI S, et al. Research progress on ground-level O₃ pollution and its risk assessment in China[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(12): 2709-2718 (in Chinese).
- [29] HARKEY M, HOLLOWAY T, OBERMAN J, et al. An evaluation of CMAQ NO₂ using observed chemistry-meteorology correlations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(22): 11775-11197.
- [30] LI R, WANG Z Z, CUI L L, et al. Air pollution characteristics in China during 2015-2016: Spatiotemporal variations and key meteorological factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 902-915.
- [31] 孔露静, 尤子昇, 张永运, 等. 南昌市夏季 NO_y 干沉降及其氮氧同位素昼夜变化特征 [J]. *环境化学*, 2021, 40(11): 3501-3509.
KONG L J, YOU Z S, ZHANG Y Y, et al. Nyctohemeral variations of NO_y dry deposition and its dual isotopic compositions in summer Nanchang[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(11): 3501-3509 (in Chinese).