DOI:10.19789/j.1004-9398.2026.03.012 Open Access
文献引用:于付荣,屈林臻,易华炜,等.北京市石景山区空气重污染特征及成因分析:以2024年3次重污染过程为例[J].首都师范大学学报(自然科学版),2026,47(3):127-136. YU F R,QU L Z,YI H W,et al. Analysis of characteristics and causes of heavy air pollution in Shijingshan District,Beijing:evidence from three pollution episodes in 2024[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition),2026,47(3):127-136.

北京市石景山区空气重污染特征及成因分析:以2024年3次重污染过程为例*

于付荣[1,2],屈林臻[1,2],易华炜[2],崔阳阳[2],赵旭龙[2,3],朱利军[2],薛亦峰[2**]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;2. 北京市生态环境保护科学研究院,国家城市环境污染控制工程技术研究中心,北京 100037;
3. 民政职业大学,北京 102600)

摘要:北京市空气质量逐年改善,但秋冬季仍时有区域性空气重污染过程。探讨典型区域尺度空气重污染特征、影响因素及成因,对于制定差异化防治策略具有重要意义。本研究以石景山区为对象,选取2024年发生的3次重污染过程进行分析,比较重污染过程与非污染时段的特征差异。采用混合单粒子拉格朗日积分轨迹模式(HYSPLIT)计算72 h后向轨迹,对污染过程进行溯源,并在重污染期间开展本地主要道路车流量监测,同时结合风速和边界层高度等气象要素分析其与污染物质量浓度的相关性。研究结果表明:$PM_{2.5}$是主要污染物,3次重污染过程使月均质量浓度升高30.8%~44.1%;NO_2污染呈现晚高峰高值与阶梯式下降并存的特征,且存在空间差异;区域传输路径差异决定了污染物累积特征,其中低空短途输送贡献77.0%;风速和边界层高度对污染物稀释作用显著,NO_2与二者均呈稳定负相关,$PM_{2.5}$则表现出阶段性差异,显示气象条件对其稀释效应存在不确定性;本地机动车排放虽对空气质量有一定影响,但在重污染期间并非主导因素,区域污染累积、迁移转化叠加不利扩散条件是主要成因。

关键词:空气重污染;HYSPLIT模型;区域传输;气象条件;机动车排放
中图分类号:X511 **文献标志码**:A

Analysis of characteristics and causes of heavy air pollution in Shijingshan District,Beijing:evidence from three pollution episodes in 2024*

YU Furong[1,2], QU Linzhen[1,2], YI Huawei[2], CUI Yangyang[2], ZHAO Xulong[2,3], ZHU Lijun[2], XUE Yifeng[2**]

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048;
2. Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037;
3. China Civil Affairs University, Beijing 102600)

Abstract: Although air quality in Beijing has improved year by year, regional heavy air pollution

收稿日期:2025-03-20
*北京市生态环境科技项目(BJST20250103)
**通信作者:xueyifeng@cee.cn

episodes still occur in autumn and winter. Investigating the characteristics, influencing factors, and causes of such typical regional-scale heavy pollution events is of great significance for formulating differentiated control strategies. This study focuses on Shijingshan District and analyzes three heavy pollution episodes that occurred in 2024, comparing them with non-pollution periods. The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model was employed to calculate 72 h backward trajectories for source attribution, while real-time traffic flow monitoring was conducted on major local roads during the pollution episodes. In addition, meteorological factors such as wind speed and boundary layer height were analyzed to explore their correlations with pollutant concentrations. Results indicate that $PM_{2.5}$ was the dominant pollutant, with the three heavy pollution episodes increasing the monthly mean concentration by 30.8%-44.1%. NO_2 exhibited both pronounced evening peaks and stepwise declines, along with spatial variability. Regional transport pathways determined pollutant accumulation characteristics, with short-distance low-altitude transport contributing 77.0%. Wind speed and boundary layer height had significant dilution effects, showing stable negative correlations with NO_2, whereas $PM_{2.5}$ displayed stage-dependent relationships, reflecting uncertainties in the meteorological dilution effect. Although local vehicular emissions exerted some influence on air quality, they were not the dominant factor during heavy pollution episodes. Instead, regional pollutant accumulation, atmospheric transformation, and unfavorable dispersion conditions were identified as the main causes.

Keywords: heavy air pollution; HYSPLIT model; regional transport; meteorological conditions; vehicular emissions

CLC: X511 **DC**: A

0 引 言

近年来,随着《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等政策实施,北京市空气质量显著改善,2024年$PM_{2.5}$和NO_2年均质量浓度较2013年分别下降65.9%和57.1%[1]。但在秋冬季静稳天气和污染物复合累积作用下,区域空气污染过程仍时有发生,污染防治仍面临较大挑战[2]。

已有研究表明,北京市重污染过程具有明显的季节性特征,其形成机制涉及本地排放累积与二次转化、不利气象条件以及区域传输等多重因素耦合[3-6]。在来源与输送特征方面,京津冀及周边区域的地面污染水平通常由本地排放与区域输入共同决定,区域传输在重污染期间更突出[7-8]。为识别污染来源与传输路径,混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型(hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory,HYSPLIT)被广泛应用于清洁日与污染日路径对比及潜在源区识别,有研究显示,来自东南或西南方向的低空短程输送在低风速条件下更易触发或加重污染过程,而远距离高空输送多贡献背景浓度[9-12]。近年来,研究还结合轨迹聚类、相关分析等方法,进一步揭示了不同气团路径对污染累积的差异性[13-14]。同时,气流在陆地的滞留时间与跨区域输送距离对浓度水平有重要影响[15-16]。就气象相关性而言,风速与边界层高度(boundary layer height,BLH)是控制近地稀释与通风条件的直接因子,较高风速与抬升的混合层有助于污染物稀释,低风速与低BLH则促进累积与滞留[17-19]。此外,在适宜的温湿度与氧化性条件下,气态前体物(如NO_x、NH_3)可发生二次转化生成硝酸盐,进一步抬升$PM_{2.5}$水平,从而导致气象—化学过程的耦合放大效应[20-22]。除区域传输与气象条件外,本地排放同样对污染水平具有重要影响,其中机动车是城区NO_2的关键来源之一[23-24]。值得关注的是,NO_2在秋冬季的时间-空间高值带往往与主干道路网及高强度交通活动区高度吻合[25-26]。

总体来看,现有研究为理解区域和城市群层面空气重污染形成提供了重要支撑,但在不同类型重污染过程的驱动差异、气象因子与二次生成的阶段性作用,以及机动车排放在具体过程中的相对贡献仍有待量化。基于此,本文选取北京市典型城区石景山区为研究对象,选取2024年3次重污染过程,

利用空气质量监测数据,HYSPLIT后向轨迹识别区域传输路径与潜在源区,及气象资料探讨风速和边界层高度等因子与污染物质量浓度的相关性,结合道路车流量观测定量评估本地交通源的影响,系统解析区域传输与本地排放的相互作用,为典型城区重污染成因研究及差异化治理提供参考。

1　研究区概况

石景山区位于北京市西部,地理坐标为39°53′~39°59′N和116°07′~116°14′E,总面积约为85.74 km^2,占北京市总面积的5‰。地形西北高东南低,北部为山地,山区面积约占全区总面积的1/3,地形不利于气体污染物扩散。该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,常年年平均气温13.2 ℃,常年年总降水量565.9 mm[27]。石景山区年平均风速与北京市相比均较低。其中:秋季平均风速为1.8 m/s,低于市平均值2.0 m/s,建筑分布密集导致局地风速降低;冬季由于西北季风受石景山区西山山脉阻挡,导致风速降低,进一步导致大气扩散条件不利。

2019—2024年,石景山区$PM_{2.5}$年平均质量浓度为43.0~31.1 μg/m^3,NO_2年平均质量浓度为39.0~30.0 μg/m^3[28]。已有研究表明,一年中夏季浓度最低,秋冬季浓度较高[29-30]。但自2022年起,$PM_{2.5}$与NO_2均表现出回弹或改善放缓的迹象,说明在取得减排成效的同时,交通源与不利气象仍会导致秋冬季短时高浓度事件的重复发生。

2　数据和研究方法

2.1　数据来源

石景山区古城站点逐时空气质量数据和气象数据均来源于北京市生态环境监测中心空气质量实时发布平台[31]。全球数据同化系统(global data assimilation system,GDAS)的气象数据由美国国家环境预报中心提供[32],包含温度、高度和气压等。本研究所用GDAS数据分辨率为1°×1°,时间分辨率为3 h,包含温度、气压、风速和风向等关键气象要素。道路车流量数据由研究团队采用PCP-800V8型便携式智能采集终端在道路边实地布设采集。监测布点包括古城大街和石景山路(10月25—26日),阜石路,古城西路,杨庄东街与八角北路(10月26—27日)。监测时间连续24 h,频率为1 s/次,识别精度>95%,支持车型分类、排放阶段识别及车牌自动识别。通过配套软件可导出交通流量和车辆结构等数据。数据清洗、筛选后与车队排放因子进行耦合,进而估算NO_x排放强度。排放因子来自《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》[33]。

2.2　研究方法

2.2.1　后向轨迹溯源

HYSPLIT是由美国国家海洋和大气管理局开发的一种轨迹和扩散模型。其中:前向轨迹分析是以已知的源点为起始位置,推算污染物随气象条件在未来时段内的传输路径和扩散过程;后向轨迹分析则以研究区域为起点,反推空气团在之前时段内的运动路径,从而识别可能的污染物来源区域。本研究以石景山区为受体区域,采用后向轨迹分析方法,可有效追溯不同污染过程期间进入该区域的空气团来源,进而判断潜在的外来输送贡献。HYSPLIT模型可通过轨迹图、浓度分布图等形式直观展示模拟结果,对于污染源追踪和气象事件研究具有重要作用。设置HYSPLIT模型起始位置为39°53′N,116°07′E,起始高度<50 m,3次重污染过程溯源计算起始时间分别为2024年10月26日00:00、11月1日00:00和11月9日19:00,且均每隔3 h计算1次,共往回追溯72 h。

2.2.2　相关性分析

为评估不同因素对污染过程的影响,本研究采用皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient,r),对逐时空气质量监测数据与外部因子进行线性相关性检验。包括:气象因子方面,分析风速和边界层高度与NO_2、$PM_{2.5}$质量浓度之间的关系;本地排放方面,利用道路交通流量监测数据与同期NO_2、$PM_{2.5}$浓度进行相关性拟合,探索机动车排放对城区污染水平的影响。相关性分析均进行显著性检验,以评价影响强度与稳定性;P<0.05为显著差异。

3　重污染过程判定与特征

3.1　重污染过程判定

根据2024年10月25日京津冀及周边启动了重污染天气预警、10月31日开展了区域应急联动(北京市启动黄色预警)及11月8日北京启动空气重污染橙色预警,结合古城站点$PM_{2.5}$日均质量浓度≥115 μg/m^3且持续时间≥24 h的判定条件,确定10月25—27日、10月30—11月1日、11月8—10日为第1~3次重污染过程。

3.2　空气重污染过程特征变化

本文系统分析了3次重污染过程NO_2与$PM_{2.5}$的质量浓度峰值、时间百分比及阶段性变化规律(表1)。在这3次过程中,NO_2日均质量浓度整体呈下降趋势,由53降至36 μg/m³,逐步回落至国家二级标准以内;$PM_{2.5}$虽呈下降趋势(157~118 μg/m³),但整体水平依然显著高于国家日均限值,最低值仍达82 μg/m³,显示$PM_{2.5}$仍是主要污染物。以2024年10—11月除3次重污染过程外的其余非重污染日(平均质量浓度为36 μg/m³)为参照,重污染日期间$PM_{2.5}$平均质量浓度普遍>227.8%,差异显著,表明污染负荷严重。

对古城监测站3次重污染过程中NO_2小时质量浓度进行72 h的分析(图1(a)),在第1次污染过程峰值高达97 μg/m³(超标142.5%),而第3次降至68 μg/m³(超标70.0%);污染时间百分比从69.4%降至38.9%,反应其突发性和持续性均有所缓解。但在第2次过程中,NO_2均值升至50 μg/m³,为3次中最高,表现出阶段性波动。总体看NO_2峰值主要集中在夜晚19:00—24:00时,与交通晚高峰时段高度吻合,提示局地排放贡献显著。

$PM_{2.5}$表现出峰值下降而持续时间延长(图1(b))。第1次峰值达217 μg/m³(超标448.6%),第3次降至169 μg/m³(超标382.9%)。但污染时间百分比却由68.1%升至97.2%,其中11月8—10日中有87%时间处于重污染状态,连续污染长达70 h。说明$PM_{2.5}$虽峰值减弱,但长时间累积效应更为突出,其形成主要受不利气象条件、区域传输及本地排放叠加影响。这一差异也提示了不同污染过程在成因上的复杂性。

3.3　石景山区10—11月空气质量特征变化

为对比重污染过程与整体空气质量水平,进一步分析了2024年10月1日—11月30日期间,古城站点NO_2和$PM_{2.5}$的小时质量浓度变化(图2)。10月份NO_2质量浓度波动较大,多次超过日均限值,高值集中在下旬;11月份虽然整体水平下降,但波动频繁,峰值主要出现在上旬。10月NO_2质量平均浓度为38 μg/m³,11月为33 μg/m³,均高于全年均值。$PM_{2.5}$呈现明显的阶段性特征。10月总体水平不高,但下旬出现连续强峰值;11月上旬亦有显著污染过程,而之后质量浓度快速下降趋于较低水平。10和11月的月均质量浓度分别151和49 μg/m³,均处于中度污染状态。整体看,$PM_{2.5}$污染仍是石景山区秋冬季空气质量的主要问题。

依据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试

表1　3次重污染过程NO_2和$PM_{2.5}$日均质量浓度特征

Table 1　daily mean concentrations of NO_2 and $PM_{2.5}$ during three heavy pollution episodes

重污染过程	日均最高值/(μg·m⁻³)		高出年均限百分比/%		日均最低值/(μg·m⁻³)		日平均值/(μg·m⁻³)		高出非重污染日百分比/%	
	NO_2	$PM_{2.5}$	NO_2	$PM_{2.5}$	NO_2	$PM_{2.5}$	NO_2	$PM_{2.5}$	NO_2	$PM_{2.5}$
第1次	55	192	37.5	448.6	50	121	53	157	55.9	336.1
第2次	60	165	50.0	371.4	35	82	47	127	38.2	252.8
第3次	45	125	13.2	257.1	27	101	36	118	5.9	227.8

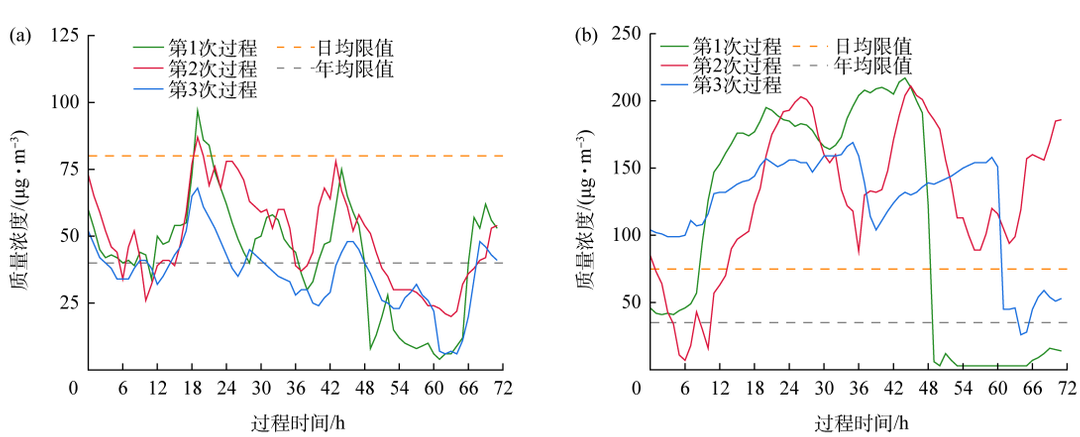


图1　古城3次重污染过程中不同污染质量浓度变化

(a)NO_2;(b)$PM_{2.5}$

Figure 1　variation of NO_2 mass concentrations over 72 hours during three heavy pollution episodes in Gucheng

(a)NO_2;(b)$PM_{2.5}$

行):HJ 633—2012》[34],当环境空气质量指数(ambient air quality index,AQI)为200~300且主要污染物为$PM_{2.5}$时,空气质量等级为重度污染。结合图2可见,10月下旬至11月上旬$PM_{2.5}$质量浓度出现的3次峰值均对应AQI>200的重污染过程,并持续超过国家二级标准[35](75 μg/m³)。具体来看,10月的重污染过程中,NO_2和$PM_{2.5}$对月均质量浓度分别提升了2.7%和30.8%;11月分别提升3.1%和44.1%。

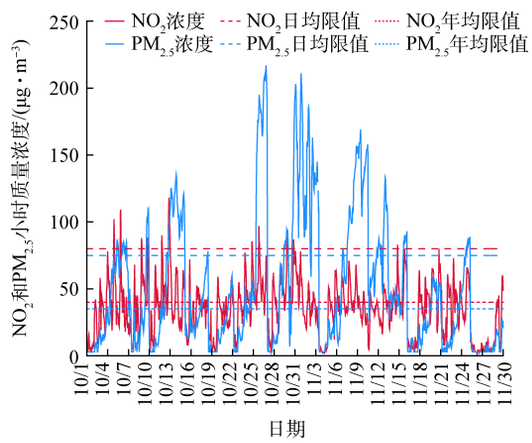


图2　2024年10—11月NO_2和$PM_{2.5}$小时质量浓度变化

Figure 2　variations of NO_2 and $PM_{2.5}$ hourly mass concentration from October to November 2024

4　空气重污染过程成因分析

4.1　空气重污染过程的气团来源与输送特征

为揭示重污染过程中外来输送与本地累积的作用,本文选取2024年10月26日、11月1日和11月9日3个典型污染过程的起始时刻,利用HYSPLIT模型开展72 h后向轨迹聚类分析,结果如图3所示。不同轨迹被划分为若干类别(类别1、类别2等),分别代表一组具有相似来源路径和传输高度特征的气团。整体来看,3个污染过程中气团来源路径、传输高度与贡献比例方面存在显著差异,揭示了局地排放与区域传输的复合作用特征。

在10月26日的污染过程中,气团来源呈现多路径叠加特征。聚类结果显示,42%的类别1源自西南方向的山西、河北等近地面区域,传输距离<500 km,高度<1 000 m,受低边界层高度限制,该路径易导致污染物持续积累[36]。类别2百分比21%,气团来自内蒙古地区中层高度(1 500~2 000 m),携带一定区域背景污染。其余38%的气团来自中亚地区,传输高度>3 000 m,属于远距离高空输送,主要贡献背景物质。污染物质量浓度对比结果显示,西南近地面路径对应的NO_2和$PM_{2.5}$质量浓度峰值分别为57和192 μg/m³,而远距离高空路径对应$PM_{2.5}$仅4~34 μg/m³,验证了Zhang等[37]指出的远距离高空传输主要提供背景浓度而非主导贡献。

11月1日的污染过程则表现出NO_2和$PM_{2.5}$均呈现明显的局地排放主导特征。基于轨迹聚类结果,类别1和2合计占比高达88%,气团集中源自河北、河南等相邻区域,传输距离<300 km,传输高度<500 m。在边界层压缩条件下,这类低空、近距离气团易发生累积[11],从而形成高质量浓度污染负荷。进一步计算表明,类别1和2对应的$PM_{2.5}$平均质量浓度为125~126 μg/m³,显著高于其他路径,且与整体污染水平高度一致,表明局地及相邻区域排放在该过程

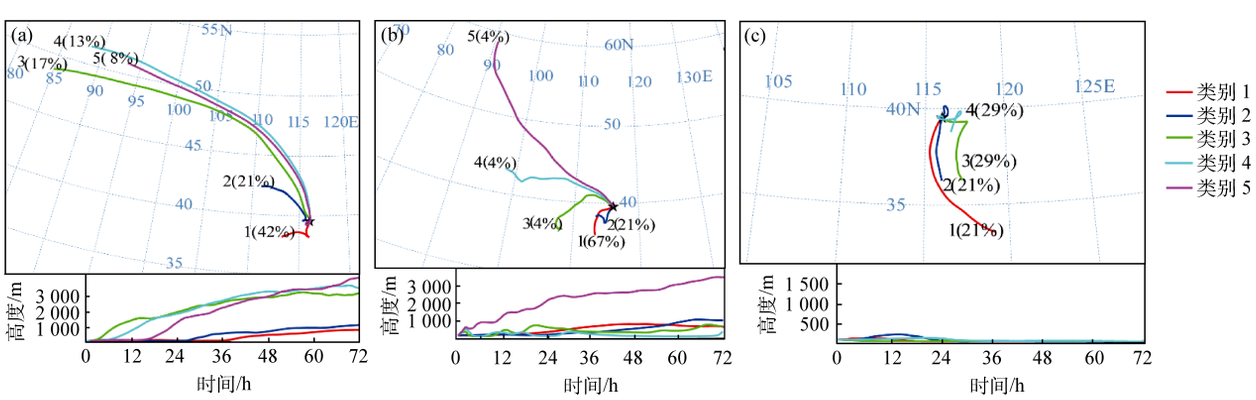


图3　10—11月石景山区重污染日72 h后向轨迹聚类分析结果

(a)10月26日;(b)11月1日;(c)11月9日

Figure 3　72 h backward trajectory clustering analysis on heavy pollution days in Shijingshan District from October to November

(a) October 26; (b) November 1; (c) November 9

中的主导作用。相比之下,类别3(4%)来自西北方向,传输高度为1 500~2 000 m,对区域背景成分(如臭氧)具有一定影响[38]。而类别4和5虽合计百分比8%,但传输高度>3 000 m,对应$PM_{2.5}$质量浓度仅3 μg/m³,对本次污染贡献有限。

11月9日的污染过程表现为区域传输与局地排放的叠加效应。聚类结果显示,58%的类别3和4气团来自河北—天津城市群的超低空路径,对应$PM_{2.5}$质量浓度达62~73 μg/m³,显著高于其他路径。类别1(21%)源自东南方向的江苏地区,21%类别2则由山东地区的南北输送路径[39]。此时大气边界层高度始终<300 m[40],这与李源等[41]研究中早晚交通排放的高频累积时段高度吻合,从而进一步强化了局地累积效应。

综上可见,10月26日的污染过程虽有38%的远距离高空气团,但其贡献极低,主控因素仍是西南近距离低空输送;11月1日的高污染水平与近地面路径占比高度一致,凸显局地排放的重要性;而11月9日则突出河北-天津城市群超低空气团与交通排放的耦合作用,导致污染的持续性累积。总体来看,近距离低空输送路径是驱动污染爆发的主导因子,而远距离高空路径多为背景输入,对本地污染水平的贡献有限。

4.2 空气重污染过程与气象条件的相关性分析

气象条件是影响污染物扩散与累积的关键外因。其中,风速和BLH是最直接的控制因子。风速主要反映水平输送与通风条件,BLH控制着污染物的垂直扩散空间,其变化直接影响污染物的积累与消散。为揭示气象条件在不同污染过程中的作用,本节分别从风速和边界层高度2个方面分析其与NO_2和$PM_{2.5}$质量浓度的相关性。

4.2.1 风速与污染物质量浓度的相关性

风速与污染物浓度的相关性结果显示,风速在不同污染过程中的作用存在显著差异。在第1次和第3次过程中,NO_2分别与风速呈显著和中等负相关(r=−0.58、−0.34,P<0.05),表明风速增加有利于NO_2扩散稀释;而第2次过程中则无明显相关性(P>0.05),显示该阶段NO_2积累主要受局地排放控制,风速作用有限。这种差异性与混合层偏低和弱风等不利气象条件的影响一致,这些条件会抵消部分减排带来的NO_2质量浓度下降效应,尤其在静稳期,通风受限将进一步放大污染物累积效应[42]。

对$PM_{2.5}$而言,在第1次和第3次过程同样表现为显著和中等负相关(r=−0.63、−0.37,P<0.05),说明风速增强有助于降低颗粒物质量浓度。这与中国利用天气研究与预报-化学模式进行模拟的结果一致,即风速和边界层混合共同决定昼夜稀释—积累变化,从而控制$PM_{2.5}$的风速敏感性[43]。而在第2次过程中相关性极弱(P>0.05),提示其污染形成主要受区域输送和静稳条件控制,风速的削弱作用被掩盖。

综上,风速在第1、3次污染过程中发挥了主要的扩散调节作用,而第2次污染过程则更符合典型的局地积累型特征。

4.2.2 边界层高度与污染物质量浓度的相关性

边界层高度与污染物浓度的相关性结果显示:3次污染过程中,NO_2质量浓度均与BLH呈负相关(r=−0.379~−0.508,P<0.05),表明混合层抬升显著增强了近地面NO_2的稀释作用。相比之下,$PM_{2.5}$则表现出阶段性差异:在第2次过程中,$PM_{2.5}$与BLH呈显著负相关(r=−0.364,P<0.05),说明较好的垂直扩散条件有助于颗粒物质量浓度降低;而在第1次和第3次过程中,二者相关性不显著(P>0.05)。这种差异可能与高湿条件下二次无机气溶胶生成增强有关,当气溶胶吸湿增长和反馈效应显著时,$PM_{2.5}$与BLH之间可能出现脱耦,导致相关性减弱[44-46]。此外,华北冬季盛行的稳定层结以及气溶胶辐射效应也会抑制BLH发展,加剧污染累积过程[47]。

总体而言,NO_2作为气态污染物,对气象条件的响应更敏感,表现出与风速、BLH均显著的负相关关系。而$PM_{2.5}$因成分复杂、易受区域传输与二次生成过程影响,其与气象因子的关系更具阶段性。在第1、3次污染过程中,风速和BLH共同发挥了稀释作用;而第2次污染过程中,则是静稳气象条件下局地排放和区域传输的叠加效应主导了污染形成。

4.3 机动车污染排放对空气质量影响及相关性分析

除区域输送与气象条件外,本地机动车排放是影响城区空气质量的重要影响因素。为定量评估其贡献,本文基于道路车流量监测数据估算了NO_x排放量,并与古城站点NO_2质量浓度进行相关性分析。结果表明,古城大街及其与石景山路的组合、阜石路及其与古城西路的组合均与NO_2质量浓度存在显著正相关(P<0.05),相关性强度从中等到较强。表明古城大街机动车NO_x排放与NO_2质量浓度相关性最高(r=0.624,P<0.05),该结果与城市道路近场

监测普遍发现的“主干道高于次干道”的NO_2质量浓度分布规律及随距离衰减的特征相一致[48]。同时,交通拥堵导致的平均车速下降与怠速比例上升会显著增加交通源排放,并加重近地面污染负荷,这与晚高峰时段NO_2峰值的观测结果高度吻合[49]。采用道路排放叠加的方式进行分析,有助于减弱单一路段分析的偶然性,更能反映整体排放对站点质量浓度的综合影响。

进一步对比,阜石路与古城西路在早晚高峰时段的排放峰值与古城站NO_2质量浓度的高值高度吻合(r=0.72,P<0.05)。这种典型的“双峰型”日变化特征,与多地研究所揭示的高峰期交通排放叠加低混合层高度或弱风通风受限的共同作用相一致[50]。结果表明,主干道路交通流量的瞬时增加是污染峰值的重要驱动力,本地机动车排放在特定时段对空气质量的贡献显著。相比之下,杨庄东街及其与八角北路的NO_x排放均和NO_2质量浓度未表现出显著相关性(P>0.05)。主要原因在于2条道路距离监测点较远,且均为次干道,车流量有限,排放量不足以对站点浓度产生明显影响。

可见,阜石路、古城大街等主干道的机动车排放是古城站NO_2的主要来源,尤其在早晚交通高峰期,排放与质量浓度峰值呈现高度同步。而次要道路因交通量小、排放水平低,对NO_2影响有限。这表明石景山区NO_2的时空分布具有明显的空间异质性和高峰期累积特征,其变化不仅受道路交通排放强度控制,也与道路结构密切相关[51]。

5　结　论

本文基于石景山区2024年10—11月空气质量监测数据,结合HYSPLIT后向轨迹与气象因子分析,系统探讨重污染过程的时空特征及成因:(1)在2024年10月25—27日、10月30日—11月1日和11月8—10日,石景山区发生3次典型重污染过程。NO_2质量浓度整体呈逐步下降趋势,达标率逐步提升,但交通晚高峰仍存在显著峰值;$PM_{2.5}$质量浓度虽峰值有所降低,但污染持续性显著增强,部分过程连续超标时间超过70 h,累积效应突出。(2)后向轨迹分析表明,不同污染过程的主导因素存在显著差异:第1次过程以西南方向近地面气团输送与本地排放叠加为主;第2次过程在静稳条件下,受西南低空气团传输控制,导致区域滞留积累;第3次过程则表现为河北—天津的超低空气团(<300 m)输入,叠加区域输送与二次生成作用,形成持续污染积累。(3)气象条件对污染过程具有显著调节作用。NO_2对扩散条件更为敏感,在3次污染过程中均与风速和边界层高度呈显著负相关;$PM_{2.5}$则受区域传输、二次生成及湿度条件影响,与气象因子的相关性呈阶段性变化。整体来看,第1、3次污染过程中气象条件对扩散稀释作用较为明显,而第2次则表现为典型静稳积累型污染事件。(4)交通源是城区NO_2的重要贡献源,古城大街、阜石路等主干道路段的NO_2排放与监测站点浓度显著相关,峰值质量浓度与早晚交通高峰高度吻合。说明本地机动车排放对近地污染水平具有重要作用。建议加强主干道路交通排放管控,加快高排放车辆淘汰和新能源车辆替代,并结合区域协同治理,以实现NO_2与$PM_{2.5}$的协同削减。

©The editorial department of Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition) 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参 考 文 献

[1] 北京市生态环境局.2023年北京市生态环境状况公报[EB/OL].[2025-01-29]. https://sthjj. beijing. gov. cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/436457401/index.html.
Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau. Beijing ecological and environmental status bulletin 2023[EB/OL].[2025-01-29].https://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/436457401/index.html.

[2] 赵妤希,陈义珍,杨欣,等.北京市中心城区$PM_{2.5}$长期变化趋势和特征[J].生态环境学报,2016,25(9):1493-1498. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906. 2016.09.011.
ZHAO Y X, CHEN Y Z, YANG X, et al. Long-term variation trend and characteristics of $PM_{2.5}$ in central urban area of Beijing[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(9): 1493-1498.

[3] 张莹,袁金国,王莹莹,等.基于OMI数据的京津冀地区对流层NO_2浓度遥感监测[J].长江流域资源与环境,2018,27(2):443-452. DOI:10.11870/cjlyzyyhj 201802024.
ZHANG Y, YUAN J G, WANG Y Y, et al. Remote sensing monitoring of tropospheric NO_2 concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region based on OMI data[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(2): 443-452.

[4] 殷丽娜,褚旸晰,段菁春,等.“2+26”城市一次多因素叠加重污染过程的特征分析[J].环境科学研究,2019,32(12):

2022-2030. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2019.07.19.
YIN L N, CHU Y X, DUAN J C, et al. Characterization of a multi-factor heavy pollution episode in the '2+26' cities[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(12):2022-2030.

[5] 杨孝文,周颖,程水源,等.北京冬季一次重污染过程的污染特征及成因分析[J].中国环境科学,2016,36(3):679-686. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2016.03.007.
YANG X W, ZHOU Y, CHENG S Y, et al. Pollution characteristics and cause analysis of a heavy pollution episode in winter in Beijing[J]. China Environmental Science, 2016, 36(3):679-686.

[6] 薛亦峰,周震,聂滕,等.2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化[J].环境科学,2016,37(5):1593-1601. DOI:10.13227/j.hjkx.2016.05.001.
XUE Y F, ZHOU Z, NIE T, et al. Analysis of a heavy air pollution episode in Beijing in December 2015 and the variation of pollution source emissions [J]. Environmental Science, 2016, 37(5):1593-1601. DOI:10.13227/j.hjkx.2016.05.001.

[7] LIU Y, ZHENG M, YU M Y, et al. High-time-resolution source apportionment of $PM_{2.5}$ su in Beijing with multiple models [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(9):6595-6609. DOI:10.5194/acp-19-6595-2019.

[8] CHEN Z Y, CHEN D L, WEN W, et al. Evaluating the "2+26" regional strategy for air quality improvement during two air pollution alerts in Beijing: variations in $PM_{2.5}$ concentrations, source apportionment, and the relative contribution of local emission and regional transport[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(10):6879-6891. DOI:10.5194/acp-19-6879-2019.

[9] STEIN A F, DRAXLER R R, ROLPH G D, et al. Noaa's hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(12):2059-2077. DOI:10.1175/bams-d-14-00110.1.

[10] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4):295-308.

[11] 张慧敏,刘朋飞.京津冀及周边地区近地面NO_2污染时空特征及来源分析[J].环境科学学报,2024,44(11):1-15. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2024.0240.
ZHANG H M, LIU P F. Spatiotemporal characteristics and source analysis of near-surface NO_2 pollution in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(11):1-15.

[12] 王郭臣,王东启,陈振楼.北京冬季严重污染过程的$PM_{2.5}$污染特征和输送路径及潜在源区[J].中国环境科学,2016,36(7):1931-1937. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2016.0310.
WANG G C, WANG D Q, CHEN Z L. Pollution characteristics, transport pathways and potential source areas of $PM_{2.5}$ during a severe pollution episode in winter in Beijing[J]. China Environmental Science, 2016, 36(7):1931-1937.

[13] 王敏亦,丁卉,徐锐,等.基于改进Apriori算法的环境空气NO_2浓度变化的关联因素分析[J].热带气象学报,2022,38(6):890-900. DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2022.080.
WANG M Y, DING H, XU R, et al. Analysis of factors associated with ambient NO_2 concentration changes based on an improved Apriori algorithm[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2022, 38(6):890-900.

[14] 闫世明,王雁,郭伟,等.太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析[J].环境科学,2019,40(11):4801-4809. DOI:10.13227/j.hjkx.201904140.
YAN S M, WANG Y, GUO W, et al. Characteristics, transport pathways, and potential source regions of air pollution in autumn and winter in Taiyuan [J]. Environmental Science, 2019, 40(11):4801-4809.

[15] ALAM K, QURESHI S, BLASCHKE T. Monitoring spatio-temporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(27):4641-4651. DOI:.1016/j.atmosenv.2011.05.055.

[16] PERRONE M R, BECAGLI S, ORZA J A G, et al. The impact of long-range-transport on PM_1 and $PM_{2.5}$ at a central mediterranean site[J]. Atmospheric Environment, 2013, 71:176-186. DOI:.1016/j.atmosenv.2013.02.006.

[17] LYU M, LI Z Q, JIANG Q F, et al. Contrasting trends of surface $PM_{2.5}$, O_3, and NO_2 and their relationships with meteorological parameters in Typical Coastal and Inland Cities in the Yangtze River delta [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(23):DOI:10.3390/ijerph182312471.

[18] LI Q H, ZHANG H S, CAI X H, et al. The impacts of the atmospheric boundary layer on regional haze in North China[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science, 2021, 4(1):DOI:10.1038/s41612-021-00165-y.

[19] MIAO Y C, LIU S H, GUO J P, et al. Unraveling the relationships between boundary layer height and $PM_{2.5}$ pollution in China based on four-year radiosonde measurements[J]. Environmental Pollution, 2018, 243:1186-1195. DOI:10.1016/j.envpol.2018.09.070.

[20] 陈云波,徐峻,何友江,等.北京市冬季典型重污染时段$PM_{2.5}$污染来源模式解析[J].环境科学研究,2016,29(5):627-636. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929. 2016.05.03.
CHEN Y B, XU J, HE Y J, et al. Model-based source

apportionment of $PM_{2.5}$ pollution during typical heavy pollution periods in winter in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences,2016,29(5):627-636.

[21] 马小会,廖晓农,唐宜西,等.北京地区重空气污染天气分型及个例分析[J].气象与环境学报,2017,33(5):53-60. DOI:10.3969/j.issn.1673-503X.2017.05.007.
MA X H, LIAO X N, TANG Y X, et al. Weather classification and case study of heavy air pollution in Beijing[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017,33(5):53-60.

[22] 张恒德,张碧辉,吕梦瑶,等.北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J].气象,2017,43(8):998-1004. DOI:10.7519/j. issn. 1000-0526.2017.08.010.
ZHANG H D, ZHANG B H, LYU M Y, et al. Preliminary construction of a comprehensive stagnant weather index in Beijing and its application in environmental meteorology[J]. Meteorological Monthly, 2017,43(8):998-1004.

[23] 张丹.北京市空气质量与机动车尾气排放量关系研究[D].北京:北京交通大学,2017.
ZHANG D. Study on the relationship between air quality and motor vehicle exhaust emissions in Beijing [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2017.

[24] 王晓琦,郎建垒,程水源,等.京津冀及周边地区$PM_{2.5}$传输规律研究[J].中国环境科学,2016,36(11):3211-3217. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2016.11.002.
WANG X Q, LANG J L, CHENG S Y, et al. Study on the transmission patterns of $PM_{2.5}$ in the Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas [J]. China Environmental Science,2016,36(11):3211-3217.

[25] 周刚,徐彬仁,徐炜达,等.基于Sentinel-5P卫星反演京津冀地区近地面NO_2度研究[J].环境科学研究,2024,37(6):1223-1231. DOI:10.13198/j. issn. 1001-6929.2024.04.14.
ZHOU G, XU B R, XU W D, et al. Retrieval of near-surface NO_2 concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on Sentinel-5P satellite[J]. Research of Environmental Sciences,2024,37(6):1223-1231.

[26] HE T, TANG Y, CAO R, et al. Distinct urban-rural gradients of air NO_2 and SO_2: concentrations in response to emission reductions during 2015—2022 in Beijing, China [J]. Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987), 2023, 333: 122021. DOI: 10.1016/j. envpol.2023.122021.

[27] 北京市人民政府门户网站.石景山概况[EB/OL].[2025-02-17]. https://www. beijing. gov. cn/renwen/bjgk/sjsgk/index.html.
Beijing Municipal People's Government Portal. Overview of Shijingshan District[EB/OL].[2025-02-17]. https://www.beijing.gov.cn/renwen/bjgk/sjsgk/index.html.

[28] 北京市生态环境局.2019年北京市生态环境状况公报[EB/OL].(2020-04-27)[2025-02-17]. https://sthjj.beijing. gov. cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/1791057/index.html.
Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau. Beijing ecological and environmental status bulletin 2019[EB/OL].(2020-04-27)[2025-02-17].https://sthjj.beijing. gov. cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/1791057/index.html.

[29] BATTERMAN S, XU L Z, CHEN F, et al. Characteristics of $PM_{2.5}$ concentrations across Beijing during 2013—2015[J]. Atmospheric Environment,2016, 145:104-114. DOI:10.1016/j.atmosenv.2016.08.060.

[30] LIU Z R, GAO W K, YU Y C, et al. Characteristics of $PM_{2.5}$ mass concentrations and chemical species in urban and background areas of China: emerging results from the CARE-China network [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(12): 8849-8871. DOI: 10.5194/acp-18-8849-2018.

[31] 北京市生态环境监测中心.北京市生态环境监测中心空气质量实时发布平台[EB/OL].[2025-03-07]. http://zx.bjmemc.com.cn/getAqiList.shtml.
Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center. Real-time air quality release platform of Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center [EB/OL]. [2025-03-07]. http://zx.bjmemc.com.cn/getAqiList.shtml.

[32] PREDICTION N C F E. Global Data Assimilation System[EB/OL].[2025-01-31].https://www.ready.noaa.gov/data/archives/gdas1/.

[33] 中华人民共和国生态环境部.道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL].(2023-02-03)[2025-03-07].https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201215_811171.html.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidebook for compiling air pollutant emission inventory of road vehicles (on trial) [EB/OL]. (2023-02-03) [2025-03-07]. https://www. mee. gov. cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201215_811171.html.

[34] 中华人民共和国生态环境部.环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行):HJ 633—2012[S].北京:中华人民共和国生态环境部,2012.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical regulation on ambient air quality index (on trial) [S]. Beijing: China Environmental Science Press,2012.

[35] 中华人民共和国生态环境部.环境空气质量标准:GB 3095—2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012.

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Ambient air quality standards: GB 3095—2012[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012.

[36] 赵妤希,陈义珍,杨欣,等.2018年3月两会期间北京重污染过程边界层气象的演变分析[J].环境科学研究,2019,32(9):1492-1499. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2019.05.11.
ZHAO Y X, CHEN Y Z, YANG X, et al. Evolution analysis of boundary layer meteorology during a heavy pollution episode in Beijing in march 2018 during the Two Sessions period[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(9): 1492-1499.

[37] ZHANG M D, ZHANG S C, BAO Q Y, et al. Temporal variation and source analysis of carbonaceous aerosol in industrial cities of Northeast China during the spring festival: the case of Changchun[J]. Atmosphere, 2020, 11(9): 991. DOI: 10.3390/atmos11090991.

[38] 王格格,谢元礼,杨雪雯,等.2017—2022年陕西省大气污染物变化特征及溯源分析:以$PM_{2.5}$和O_3为例[J].环境科学学报,1-17. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2024.0442.
WANG G G, XIE Y L, YANG X W, et al. Variation characteristics and source analysis of air pollutants in Shaanxi Province from 2017 to 2022: a case study of $PM_{2.5}$ and O_3[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(11): 1-17.

[39] 崔梦娇.京津冀及周边地区大气污染特征及典型城市污染物传输研究[D].上海:华东师范大学,2023.
CUI M J. Study on characteristics of air pollution and pollutant transport in typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas[D]. Shanghai: East China Normal University, 2023.

[40] 王莉莉,王跃思,王迎红,等.北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响[J].中国环境科学,2010,30(7):924-930.
WANG L L, WANG Y S, WANG Y H, et al. Impacts of different weather patterns on atmospheric pollutant concentrations in Beijing during late summer and early autumn[J]. China Environmental Science, 2010, 30(7): 924-930.

[41] 李源,白宇,郭瑞,等.天津市北辰区$PM_{2.5}$污染特征及来源分析[J].环境影响评价,2023,45(6):63-69. DOI:10.14068/j.ceia.2023.06.010.

[42] HUA J X, ZHNG Y X, de FOY B. et al. Quantitative estimation of meteorological impacts and the COVID-19 lockdown reductions on NO_2 and $PM_{2.5}$ over the Beijing area using generalized additive models (GAM)[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 291: 112676. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112676.

[43] DU Q Y, ZHAO C, ZHANG M S, et al. Modeling diurnal variation of surface $PM_{2.5}$ concentrations over East China with WRF-Chem: impacts from boundary-layer mixing and anthropogenic emission[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(5): 2839-2863. DOI: 10.5194/acp-20-2839-2020.

[44] SHI R Z F, SHEN Y, et al. Aerosol liquid water in $PM_{2.5}$ and its roles in secondary aerosol formation at a regional site of the Yangtze River Delta[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 138: 684-696. DOI: 10.1016/j.jes.2023.04.030.

[45] GE S Z Y, SUN Y, et al. Characteristics of PM2.5 hygroscopicity and the influences of particle chemical composition, size and mixing state on hygroscopic growth[J]. Atmospheric Environment, 2024, 314: 120651. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120651.

[46] MENG X W Z, CHEN J, et al. Particle phase state and aerosol liquid water greatly impact secondary aerosol formation: insights into phase transition and its role in haze events[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024, 24: 2399-2414. DOI: 10.5194/acp-24-2399-2024.

[47] MIAO Y C H, ZHANG X, et al. Integrated impacts of synoptic forcing and aerosol radiative effect on boundary layer and pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20: 5899-5909. DOI: 10.5194/acp-20-5899-2020.

[48] VOORDECKERS D M F J R, BILLEN P, et al. The impact of street canyon morphology and traffic volume on roadside NO_2 concentrations[J]. Building and Environment, 2021, 197: 107835. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107835.

[49] WANG P Z R, SUN S, et al. Aggravated air pollution and health burden due to traffic congestion in China in 2020[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023, 23: 2983-3000. DOI: 10.5194/acp-23-2983-2023.

[50] AHMAD N L C, LAU A K H, et al. Estimating ground-level NO_2 across China using GEMS with mixing-height constraints[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024, 24: 9645-9665. DOI: 10.5194/acp-24-9645-2024.

[51] 王宇佳,王新锋,张博,等.济南市区典型道路交通状况及其对空气质量的差异化影响[J].山东大学学报(工学版),2025,55(1):138-148. DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.184.
WANG Y J, WANG X F, ZHANG B, et al. Typical road traffic conditions and their differential impacts on air quality in urban Jinan[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(1): 138-148.

(责任编辑:李拓宇)