**Hans**汉斯

# 2024年11月河南一次重污染过程特点及 成因分析

#### 康智国1,2

<sup>1</sup>中国气象局•河南省农业气象保障与应用技术重点实验室,河南 郑州 <sup>2</sup>河南省气象台,河南 郑州

收稿日期: 2025年5月13日; 录用日期: 2025年7月10日; 发布日期: 2025年7月23日

## 摘要

2024年11月,河南省出现了一次强度大、持续时间长、覆盖范围广的污染天气过程。本研究基于天气象 诊断和后向轨迹分析等多种方法,探讨了气象条件与污染物输送对此次持续性污染事件的影响机制。主 要结论如下:1)500hPa偏西气流主导,冷空气活动偏弱,对流层低层(850hPa)及其以下风速较小是河 南此次污染过程环流背景场的主要特征。2)边界层内逆温层结构及弱辐合作用共同导致污染物积累,垂 直扩散受阻,叠加区域污染物传输,加剧了污染程度。3)后向轨迹聚类分析表明,河南污染气团主要源 自东北路径(占比为57.14%),其次为东南路径(占比为42.85%)。潜在源贡献因子分析进一步揭示此次 过程PM2.5主要贡献区域为河北南部及山东西南部。本研究可为河南及周边区域污染防控策略制定提供科 学依据。

#### 关键词

污染,边界层辐合,逆温,后向轨迹,潜在源

## Analysis of Characteristics and Causes of a Severe Pollution Episode in Henan Province in November 2024

#### Zhiguo Kang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou Henan <sup>2</sup>Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou Henan

Received: May 13<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 10<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2025

#### Abstract

In November 2024, Henan Province experienced a severe, prolonged, and extensive pollution episode. This study investigates the mechanisms of meteorological conditions and pollutant transport influencing this persistent pollution event through meteorological diagnostics and backward trajectory analysis. Key findings include: 1) The synoptic background during the pollution episode was dominated by westerly airflow at 500 hPa, significantly weakened cold air activity, and low wind speeds in the lower troposphere (850 hPa and below), which collectively contributed to pollutant accumulation. 2) The combined effects of temperature inversion structures within the boundary layer and weak convergence hindered vertical dispersion and facilitated pollutant aggregation, further exacerbated by regional pollutant transport. 3) Backward trajectory clustering analysis revealed that heavy pollution air masses in Henan primarily originated from northeastern pathways (57.14%) and secondarily from southeastern pathways (42.85%). Potential source contribution function identified southern Hebei and southwestern Shandong as major contributing regions. This study provides a scientific basis for formulating pollution control strategies in Henan and surrounding areas.

## Keywords

Pollution, Boundary Layer Convergence, Temperature Inversion, Backward Trajectory, Potential Source Contribution Function

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

## 1. 引言

近年来,随着我国经济社会的快速发展和城市化进程的加速,大气污染问题日益凸显,已成为影响 公众健康,生态环境和社会可持续发展的重要挑战。空气污染主要是由大气中的污染物浓度过高导致, 包括细颗粒物(依据颗粒物的动力学直径划分) PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub> 以及各种气体包括 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、CO 等等。严重 的污染天气使得空气质量呈现出较差的状态,当 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 以及其他可吸入颗粒物的平均浓度远超国家 空气质量标准时,会使得患各种呼吸及心血管疾病的人数明显增加[1]-[3]。2013 年 1 月,我国中东部爆 发了一次非常严重的污染事件,很多城市 PM<sub>2.5</sub>浓度超过 500 μg/m<sup>3</sup>,这次严重污染过程对人民群众的身 体健康和生活产生了严重的负面影响,引发了国内外的广泛关注[4]-[7]。

作为我国中部地区的重要经济枢纽和人口大省,河南省在城市化、工业化快速推进的同时,也面临 着严峻的大气污染问题。尤其是在不利的气象条件与本地污染排放、区域传输等因素的共同作用下,河 南地区频繁出现重污染天气过程,对区域空气质量,居民健康以及社会经济活动造成了显著影响。此外 河南整体地形呈现出明显的簸箕状,西部太行山和伏牛山,南部大别山的高海拔地形阻挡了污染物的传 输,造成污染物在山前进行累积,加重河南地区的污染[8]。研究表明,除地形的影响之外,重污染天气 的发生还与气象条件[7]以及外部的区域污染物传输[9][10]有关,因此分析重污染过程的气象条件和远距 离输送对污染天气的预报具有十分重要的作用。当前研究表明,大气污染的形成与气象条件密切相关, 当重污染发生时,气象条件一般会表现出 500 hPa 的弱高压脊、高空偏西气流、850 hPa 及其以下风速较 小,地面弱高压、均压场、倒槽区等[11][12]。 此外,大气边界层偏低、地面风速较小、逆温等不利的气象因素,导致大气扩散能力较差,也有利于 造成污染的加重[5] [13]。气象因素一方面影响大气污染物的扩散与传输,导致气溶胶等污染物在近地面的 沉积[14],另一方面气象条件也能够直接影响二次气溶胶的生成,高的相对湿度可以促进 SO<sub>2</sub> 通过液相非 均相反应生成硫酸盐,强烈的光化学反应也会促使 NO<sub>2</sub>等气态前体物向颗粒物的转化,进而使大气中污染 物浓度过高,加重空气污染[15]。国内外学者对中国颗粒物的污染特征、来源、机制以及对人体健康的影响 做了大量的研究工作,但主要集中在京津冀、长三角、珠三角等经济发达的区域[16] [17],对河南等内陆地 区的研究较少,对中部过渡地带城市的污染溯源研究仍显不足,尤其缺乏基于长时间序列的动态轨迹解析。

大气污染是一个复杂的环境问题,其形成和演变受到多种因素的影响,包括气象条件、地形地貌、 排放源强等。在不利的气象条件下,污染物难以扩散,容易在局部地区累积形成重污染天气。因此,深 入分析污染过程的气象条件和传输机制,对于提高污染天气预报的准确性和有效性具有重要意义。2024 年 11 月 9 至 14 日,河南出现了严重的污染天气过程,全省多地空气污染指数 AQI (Air Pollution Index) 超过 200,对人们的生产生活及身体健康都产生了严重影响。本研究就该污染过程的污染程度、持续时 间、气象条件以及区域污染传输进行详细讨论分析,旨在探讨河南重污染过程的形成发展机制,以加深 对重污染发展和维持的气象条件的理解,为当地的污染防治提供一定的参考。

## 2. 资料和方法

#### 2.1. 数据来源

研究时段为 2024 年 11 月 9 日~14 日,资料包括: 1) 全国逐小时 AQI 指数和 PM<sub>2.5</sub> 监测资料,数据来源于中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台(<u>http://air.cnemc.cn:18007/</u>); 2) 常规地面气象观测数据由河南省气象局气象档案馆提供,包括 10 min 平均风速、风向、小时降水量、温度和相对湿度。3) ERA5 全球再分析资料(0.25°×0.25°, <u>https://cds.climate.copernicus.eu/datasets</u>)。ERA5 是欧洲中期天气预报中心发布的针对全球气候的第五代大气再分析数据集,该数据提供了 1979 年至今逐小时、逐天、逐月的全球范围的格点气象数据,包括气温、气压、风速、位势高度等多种变量。本文使用气压、相对湿度、温度、风速及位势高度数据; 4) 用于后向轨迹模式计算的气象场资料:美国国家环境预报中心 NCEP 提供的全球资料同化系统 GDAS (Global Data Assimilation System, ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1)资料,水平网格距为1°×1°,时间间隔为1h,用于 HYSPLIT4模式粒子后向轨迹分析。

#### 2.2. 研究方法介绍

#### 2.2.1. 后向轨迹法

HYSPLIT(混合单粒子拉格朗日轨迹)模式[18],是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)与澳大利亚 气象局联合研发的一种专门用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的综合模式系统。该模型能够处 理的排放源种类和气象场的情况类型众多,能够比较完整的还原大气污染物的行进轨迹,目前已被广泛 用于分析污染物的区域传输和特征。

在后向轨迹的分析中,使用了全球数据同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)中 1°×1°水 平网格距的气象数据作为模式的气象输入[19]。后向轨迹向后模拟的时间为1天,高度为500m,每个小时模拟一次。

#### 2.2.2. 潜在源贡献因子分析法

潜在源贡献因子分析(Potential Source contribution function, PSCF 分析) [20]是一种将后向轨迹与特定 研究区域的大气污染程度相耦合的方法,利用该方法可以对观测站点污染物产生贡献的潜在源区进行初

步的确定。其本质上是将研究区域划分为具有一定精度的网格,通过计算经过某一单元的网格(*i*,*j*)(*i*,*j*代表该单元网格所在的经度和纬度)高浓度轨迹数的条件概率来判定该网格是否是潜在源的算法。首先要对所研究的要素设定一个阈值,如果轨迹所对应的污染物浓度高于所设定阈值时,该轨迹即为污染轨迹。 PSCF 的具体公式如下:

$$\text{PSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}}$$

上式中,  $n_{ij}$  代表落在指定的网格(i, j)中的所有轨迹端点数之和,  $m_{ij}$  代表在网格(i, j)中所有的污染轨迹 端点数之和。PSCF 值的大小反映了当气团经过网格时, 气团承载的污染浓度超过所设定浓度阈值的可能 性。PSCF 值越大, 表明该网格对目标观测站点的污染物浓度的贡献也就越大。但是, PSCF 分析法在本 质上属于条件概率, 其误差会随着网格与采样点的距离增加而变大, 对于某些经过轨迹数量相对较少时, 其分析结果的不确定性比较大, 计算出 PSCF 值可能并不存在意义。因此为了减少误差, 提高 PSCF 的准 确性。这里需要引入权重函数  $W_{ij}$  其计算公式为将 PSCF<sub>ij</sub> 乘以  $W_{ij}$  权重函数, 其中  $n_{ave}$  代表至少含有一条 轨迹的所有网格单元中的平均轨迹数。

WPSCF"的计算公式定义为:

$$WPSCF_{ii} = PSCF_{ii} \times W_{ii}$$

 $W_{ii}$ 的定义如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.0 & (3n_{ave} < n_{ij}) \\ 0.7 & (1.5n_{ave} < n_{ij} \le 3n_{ave}) \\ 0.4 & (n_{ave} < n_{ij} \le 1.5n_{ave}) \\ 0.2 & (n_{ij} \le n_{ave}) \end{cases}$$

## 3. 结果与讨论

#### 3.1. 污染变化实况

2024年11月9日至14日,我国华北黄淮地区经历了一次大范围的污染过程。以PM<sub>2.5</sub>为代表的污染物在污染发展过程中呈现出爆发式增长。图1为2024年11月9日0:00~14日23:00河南省郑州、三门峡、焦作、洛阳、安阳、南阳各市逐小时PM<sub>2.5</sub>浓度的时间变化,在此次污染期间,全省各市污染物浓度在30~209μg/m<sup>3</sup>范围内变化。污染最严重的焦作市,10日18:00为93μg/m<sup>3</sup>,11日7:00达到170μg/m<sup>3</sup>,12小时浓度剧增77μg/m<sup>3</sup>,12日15:00,PM<sub>2.5</sub>浓度达到过程最大值209μg/m<sup>3</sup>。期间全省豫北、豫西5市过程最大浓度均超过160μg/m<sup>3</sup>,南阳市接近140μg/m<sup>3</sup>。各市PM<sub>2.5</sub>最大浓度出现时间分别为:安阳市出现在11日10时、郑州市出现在12日20时,三门峡市出现在11日12时,焦作市出现在12日15时,洛阳市出现在12日15时、南阳市出现在12日10时。全省PM<sub>2.5</sub>质量浓度呈现出自东北向东南传输的趋势,污染程度自豫北向西南逐渐减轻。13日各市PM<sub>2.5</sub>浓度呈现出波动式下降,直至11月15日夜间污染浓度降至75μg/m<sup>3</sup>以下,污染过程趋于结束。

图 2、图 3 给出了郑州站和安阳站气象要素以及污染物浓度和 AQI 指数的时序变化,此次污染期间 AQI 与 PM<sub>2.5</sub> 的变化具有明显的一致性。在污染的开始阶段,郑州和安阳 PM<sub>2.5</sub> 的浓度均在 100 μg/m<sup>3</sup>以 下,9~11 日郑州和安阳污染物浓度迅速增加,11 日 19 时,安阳市 PM<sub>2.5</sub> 浓度超过 150 μg/m<sup>3</sup>,达到 165 μg/m<sup>3</sup>, AQI 达到 215。随后郑州 PM<sub>2.5</sub> 也在 11 日 1 时达到 142 μg/m<sup>3</sup>, AQI 达到 189。污染期间,郑州和 安阳相对湿度处于一个相对较高的水平,相对湿度分别为 81%±11.8 和 88%±13.2。11 月 12 日 19 时郑 州相对湿度达到 90%以上, 12 日 21 时安阳市相对湿度达到 100%, 伴随着第一阶段微弱的降水, 可以发



**Figure 1.** The time-series variation diagram of PM<sub>2.5</sub> concentrations at representative monitoring sites in Henan Province from November 9 to 14, 2024 图 1. 2024 年 11 月 9 日至 14 日,河南省代表站点 PM<sub>2.5</sub>的浓度时序变化图



**Figure 2.** The time-series variations of meteorological parameters (precipitation, wind, temperature, humidity) and PM<sub>2.5</sub>, AQI in Zhengzhou from November 9 to 14, 2024 图 2. 2024 年 11 月 9 日至 14 日,郑州市气象要素(降水、风、温度、湿度)和 PM<sub>2.5</sub>、AQI 的时序变化



Figure 3. The time-series variations of meteorological parameters (precipitation, wind, temperature, humidity) and PM<sub>2.5</sub>, AQI in Anyang from November 9 to 14, 2024

图 3. 2024 年 11 月 9 日至 14 日, 安阳市气象要素(降水、风、温度、湿度)和 PM2.5、 AQI 的时序变化

现两市污染物浓度仍然维持在较高的水平,其中郑州的 PM<sub>2.5</sub>浓度在降水第一阶段发生了轻微的增加,从 133 μg/m<sup>3</sup> 增加至 168 μg/m<sup>3</sup>,可能是由于降水导致空气湿度增加,为二次污染物的转化提供了较好的湿 度条件。从 11 月 12 日 20 起至 14 日 4 时,郑州和安阳污染物浓度呈现出明显的下降趋势,分别从 168 μg/m<sup>3</sup>、177 μg/m<sup>3</sup>降至 40 μg/m<sup>3</sup>、48 μg/m<sup>3</sup>,降幅均超过 70%,考虑是由于第二阶段降水的湿清除作用, 导致污染物浓度的急剧下降。

### 3.2. 污染发展的原因分析

#### 3.2.1. 天气形势分析

11 月 9~12 日,从高空形势场(图 4)可知,高空 500 hPa 以纬向环流为主,冷空气势力较弱,从高原 多短波槽向东掠过,云系较多,大气的垂直扩散能力较差。从海平面气压场可以看出,河南区域被一个 弱的高压系统控制,高压中心处于河南的东北部(图 5),河南地区处于弱的均压场中,等压线较稀疏,不 利于地面风力加大,有利于污染物的累积产生。近地面湿度较大(相对湿度大于 60%),为二次污染物的形 成提供了有利的湿度条件。近地面风速在 2~4 m/s (图 7),在河南北中部存在有明显的弱辐合区,大气水 平扩散能力较差,边界层内垂直速度小于 0.5 m/s,污染物的水平扩散和垂直环流双重受阻,污染物较易 积累,有利于静稳天气发生。

图 6 给出了基于 ERA5 资料的逐 6 h 郑州市 1000~500 hPa 风、温和相对湿度的时间 - 高度剖面图,



**Figure 4.** 500 hPa Geopotential Height and Wind. (a) at 20:00 on November 9 2024 (b) 20:00 on November 10 (c) 20:00 on November 11 (d) 20:00 on November 12. Contours represent geopotential height (unit: dagpm) 图 4. 500 hPa 高度场及风场。(a) 2024 年 11 月 9 日 20:00 (b) 11 月 10 日 20:00 (c) 11 月 11 日 20:00 (d) 11 月 12 日 20:00。等值线为等高线(单位: 位势什米)





**Figure 5.** Sea Level Pressure. (a) at 20:00 on November 9 2024 (b) 20:00 on November 10 (c) 20:00 on November 11 (d) 20:00 on November 12. The shaded areas represent sea level pressure (unit: hPa) 图 5. 海平面气压。(a) 2024 年 11 月 9 日 20:00 (b) 11 月 10 日 20:00 (c) 11 月 11 日 20:00 (d) 11 月 12 日 20:00。填色 为海平面气压场 (单位: 百帕)



**Figure 6.** Time-height cross-section of meteorological parameters in Zhengzhou based on ERA-Interim Reanalysis Data from 8:00 on November 9 to 8:00 on November 14, 2024 (Wind barbs: wind direction and speed, long barbs = 4 m/s, short barbs = 2 m/s; red contours: air temperature/°C (solid lines ≥ 0°C, dashed lines < 0°C); shading: relative humidity/%) **26.** 基于 ERA5 再分析资料的 2024 年 11 月 9 日 8:00~2024 年 11 月 14 日 8:00 郑州市气象要素时间 - 高度剖面(风 羽:风向风速,长横线代表 4 m/s,短横线代表 2 m/s; 红色等值线:气温/℃(实线为高于 0℃,虚线为低于 0℃);填 色:相对湿度/%)



**Figure 7.** Surface wind and convergence line in Henan Province (a) at 11:00 (b) and 17:00 on November 10, 2024 (The dashed lines represent wind speed convergence lines, and the arrows represent significant streamlines of wind speed) 图 7. 河南地面风场填图。(a) 2024 年 11 月 10 日 11:00 (b) 17:00 (虚线代表风速辐合线、箭头代表风速显著流线)



Figure 8. Sounding diagrams for Zhengzhou City. (a) at 8:00 on November 10, 2024 (b) and at 8:00 on November 12, 2024 (The yellow-shaded indicate temperature inversions) 图 8. 郑州市探空图。(a) 2024 年 11 月 10 日 8:00 (b) 12 日 08:00 (黄色阴影部分表示逆温层)

时间为 2024 年 11 月 9 日 08 时~2024 年 11 月 14 日 08 时。由图 6 可知, 11 月 9 日~10 日郑州市 PM<sub>2.5</sub>浓 度剧增期间, 700 hPa 左右对流层中层主要以偏西风为主。850 hPa 以下,郑州市主要以偏南风为主, 10 日,风向转为东北风为主,风速增加到 4~6 m/s,同时在 9~10 日,850 hPa 温度有明显的升高。PM<sub>2.5</sub>浓 度达到峰值之后,边界层内风速较弱,风速维持在 2~4 m/s,扩散条件较差。如图 8 所示,在 10 日清晨 和 12 日清晨,在边界层低层 1 km 高度以下,均有明显的逆温层存在,逆温层限制了污染物在垂直方向 的扩散,使污染物快速累积,使污染物保持在较高的水平,加重污染程度。12 日之后,郑州市上空相对 湿度快速增加到 90%以上,并伴随着弱降水,适宜的温度条件和高的湿度环境加速了二次污染物的转化 过程,PM<sub>2.5</sub>也在 12 日 20 时达到了此次污染过程的峰值。由图 2 可知,在 13 日 20 时,郑州市出现降 水,至 14 日 02 时降水结束,总降水量超过 10 mm。可以看出,从 13 日后半夜至 14 日,污染物浓度快 速下降(PM<sub>2.5</sub>浓度下降超过 70 μg/m<sup>3</sup>)并维持在一个较低的水平,可能的原因是降水的湿清除作用导致的。 此后,东南风持续加强,扩散条件较好,空气质量得以改善,污染过程趋于结束。

#### 3.2.2. 污染物的来源的后向轨迹及潜在源解析

城市污染物一方面受到局地排放的影响,另一方面,河南典型污染过程通常伴随着污染物的长距 离输送,尤其在重污染天气时,污染物的区域输送是河南地区污染物的主要来源。因此分析此次污染 过程污染物的主要来源,能够对河南区域污染传输过程污染物来源解析具有十分重要的意义。本研究 以郑州市为代表站点,利用后向轨迹模型模拟郑州市城区 11 月 9~14 日污染过程期间的后向轨迹气 流并对其进行了聚类分析,共得到两条主要的输送路径。如图 9 所示,从水平输送来看,轨迹大分为 东北、东南两大类,其中东北路径的轨迹数约占所有轨迹的 57.14%,而东南路径占据所有轨迹的 42.85%。

此外,在东北路径的轨迹较短,移动速度较慢,可能会携带山东、河北等地较重的污染物传输进 我省,进而影响全省大部地区。东南路径轨迹较长,移动速度较慢,轨迹从海上经江苏、安徽自河南 东部进入我省,从潜在源分析可以看出,东南方向的轨迹所携带的污染物浓度较东北轨迹轻。东北路 径中,PM<sub>2.5</sub>浓度较高,轨迹占比大,且长度和移动速度远低于东南轨迹,且垂直方向上变化波动较 小,低层大气稳定,有利于二次气溶胶的形成,导致气团变性,进而给河南地区带来了严重的PM<sub>2.5</sub> 污染。

由郑州市 WPSCF 值分布特征(图 10)可以看出,WPSCF 高值区分布在河北南部、山东西南部、河南 北部等部分城市,表明以上区域可能伴随着强烈的排放源,通过传输影响郑州地区。东南轨迹经过的江 苏省和安徽省 PSCF 值较东北轨迹次之,表明郑州市 PM<sub>2.5</sub>污染除了东北方向的近距离传输外,还受到跨 区域传输的影响。这与段时光等对 2017~2018 年郑州大气 PM<sub>2.5</sub> WPSCF 研究结果一致,该研究认为郑州 市冬季 PM<sub>2.5</sub> 的潜在源区主要是北部京津冀传输通道城市,其次为东部和南部[21]。这些区域污染物传输 会加重郑州污染水平。



**Figure 9.** Backward Trajectory Distribution (black lines) and clustered trajectory distribution (colored lines) in Zhengzhou from November 9 to 14, 2024 图 9. 2024 年 11 月 9~14 日郑州市后向轨迹分布(黑线)及轨迹聚类分布(彩线)



**Figure 10.** Distribution of WPSCF values of PM<sub>2.5</sub> at a height of 500 m in Zhengzhou from November 9 to 15, 2024



## 4. 结论

本文利用气象要素场分析以及轨迹聚类分析等方法,对 2024 年 11 月 9~14 日河南省的一次重污染天 气过程进行分析,得到以下结论:

1) 此次污染过程,河南各代表站点的 PM<sub>2.5</sub>的浓度均达到中度污染标准。500 hPa 为偏西气流,对流 层低层 850 hPa 及其以下风速较小、冷空气活动偏弱,是河南此次污染物过程环流背景场的主要特征,不 利的大气扩散条件、较高的相对湿度和较少的降水是造成颗粒物浓度较高的重要原因。

2) 边界层内存在逆温层及弱的辐合是污染形成的重要条件,在区域污染传输下,边界层内的辐合使污染物汇聚而加重,且弱辐合抬升运动,阻碍了污染物的垂直扩散,有利于重污染事件的发生。污染后期,降水的湿清除作用和较强的风速导致郑州污染物浓度下降超过 70 μg/m<sup>3</sup>,污染过程趋于结束。

3) 通过轨迹聚类分析发现,对于郑州,其重污染轨迹占比最高的是东北路径,占比为 57.14%,其次 为东南路径占比为 42.85%。经 PM<sub>2.5</sub> 潜在源贡献分析结果表明,山东南部、河北南部、安徽北中部、江 苏中部等城市是郑州市 PM<sub>2.5</sub> 主要潜在源区。污染物浓度贡献的高值区主要集中河南北部、河北南部等区 域,这些区域污染物的输送加重了郑州市 PM<sub>2.5</sub> 的污染水平。

值得指出的是,由于本研究只是对 2024 年 11 月持续性强污染天气的个例分析,没有涉及和河南历 史污染事件的诊断。因此在未来进一步利用长时间气象、污染资料开展河南污染事件的历史统计特征和 规律、定量分析气象要素变化并结合数值模拟等量化不同气象条件对污染物的输送和扩散的影响分析是 十分必要的。此外,结合排放源清单和污染物成分数据等进行更全面的朔源分析,对深入认识污染物远 距离传输对河南污染的发生和维持无疑具有十分重要的意义。

## 基金项目

安阳市观象台/鹤壁市农业气象与遥感重点实验室开放研究基金(AYNCOF202511; AYNCOF 202419); 中国气象局•河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金(KQ202203)。

#### 参考文献

- [1] 黄家敏,陈星宇,安静宇,等. 霾期间上海低层气溶胶微物理属性与地面相对湿度分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015,9(1): 39-44.
- [2] 袭祝香, 张硕, 高晓荻, 等. 吉林省雾霾和雾霾事件的时空特征及评估方法[J]. 干旱气象, 2015, 33(2): 244-248+290.
- [3] 郑庆锋, 史军. 上海霾天气发生的影响因素分析[J]. 干旱气象, 2012, 30(3): 367-373.
- [4] Sun, Y., Jiang, Q., Wang, Z., Fu, P., Li, J., Yang, T., et al. (2014) Investigation of the Sources and Evolution Processes of Severe Haze Pollution in Beijing in January 2013. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119, 4380-4398. <u>https://doi.org/10.1002/2014jd021641</u>
- [5] 张文龙, 尤凤春, 张小玲, 等. 北京2013年1月严重霾天气过程的气象成因分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(2): 46-54.
- [6] 唐宜西,张小玲,熊亚军,等.北京一次持续霾天气过程气象特征分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(5): 12-19.
- [7] 张人禾,李强,张若楠. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学:地球科学, 2014,44(1):27-36.
- [8] 王梦珂, 曹乐, 徐力强, 等. 河南省 PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> 双高复合污染的特征及影响因素[J]. 环境科学, 2025, 46(3): 1285-1301.
- [9] 张恒德, 吕梦瑶, 张碧辉, 等. 2014 年 2 月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析[J]. 环境科学 学报, 2016, 36(12): 4340-4351.
- [10] 赵敬国, 王式功, 张天宇, 等. 兰州市大气重污染气象成因分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1547-1555.
- [11] 冯丽莎, 宋攀, 田力, 等. 河南 3 次重污染天气过程的气象条件诊断及传输影响分析[J]. 气象与环境科学, 2020, 43(1): 104-113.
- [12] 杨茜,高阳华,陈贵川. 降水对重庆市大气污染物浓度的影响分析[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(2): 68-73.
- [13] 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 1935-1943.
- [14] 权建农, 徐祥德, 贾星灿, 等. 影响我国霾天气的多尺度过程[J]. 科学通报, 2020, 65(9): 810-824.
- [15] 郭滢超, 权建农, 潘昱冰, 等. 2008-2017 年北京市 PM2.5 周期性变化特征与影响机制[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1013-1021.
- [16] 徐楠, 王甜甜, 李晓, 等. 北京冬季 PM<sub>2.5</sub> 中有机气溶胶的化学特征和来源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2101-2109.
- [17] 王心培. 长三角背景点大气颗粒物中水溶性无机离子污染特征、来源与形成机制[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [18] Draxler, R.R. and Hess, G.D. (1998) An Overview of the HYSPLIT\_4 Modeling System for Trajectories, Dispersion, and Deposition. *Australian Meteorological Magazine*, 47, 295-308.
- [19] Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D. and Ngan, F. (2015) Noaa's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 2059-2077. <u>https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00110.1</u>
- [20] Pekney, N.J., Davidson, C.I., Zhou, L. and Hopke, P.K. (2006) Application of PSCF and CPF to PMF-Modeled Sources of PM<sub>2.5</sub> in Pittsburgh. *Aerosol Science and Technology*, 40, 952-961. <u>https://doi.org/10.1080/02786820500543324</u>
- [21] 段时光,姜楠,杨留明,等.郑州市冬季大气 PM2.5 传输路径和潜在源分析[J].环境科学, 2019, 40(1): 86-93.