付兴宇,程水源,王传达.保定市不同天气型下 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染防治策略 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3582−3592.
Fu X Y, Cheng S Y, Wang C D. Study on prevention and control strategies of $PM_{2.5}$ and O_3 combined pollution under different weather patterns in Baoding City [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3582−3592.

保定市不同天气型下 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染防治策略

付兴宇,程水源*,王传达 (北京工业大学环境科学与工程学院,区域大气复合污染防治北京市重点实验室,北京 100124)

摘要：针对 $PM_{2.5}$ 和 O_3 典型复合污染城市保定,利用 PCT 客观天气分型方法对秋冬季和春夏季京津冀地区的海平面气压场及 10m 风场进行天气分型,并通过后向轨迹(PSCF、CWT)及气象−空气质量模式(WRF−CAMx)对污染天气型下的 $PM_{2.5}$ 与 O_3 进行来源解析,研究其贡献比例和传输路径,探究保定市重污染天气应对及不同天气型下复合污染防治策略.结果显示,保定市 2019~2022 年 $PM_{2.5}$ 年平均浓度呈下降趋势,下降幅度为 26.9%,O_3 呈波动趋势,下降幅度仅为 2.2%;月平均浓度呈现明显的季节性特点.秋冬季京津冀地区以高压场型为主,其中 T5(东部高压后部,11.6%)、T6(鞍型场,11.6%)和 T9(均压场,5.2%)是容易导致保定市 $PM_{2.5}$ 污染的污染天气型;春夏季以低压场为主,易导致保定市 O_3 污染的天气类型为 S3(均压场,12.9%)和 S7(西北部低压后部,16.8%);在 $PM_{2.5}$ 污染天气型下,保定市的 $PM_{2.5}$ 来源贡献均以本地排放为主.T5(东部高压后部)中保定市的 $PM_{2.5}$ 其他贡献区域主要以邯郸、石家庄等西南路径为主;T6(鞍型场)中其他贡献区域主要以山西省和石家庄等西南路径为主;T9(均压场)中其他贡献区域主要以山西省及内蒙古地区等西北路径为主.在 O_3 污染天气型下,保定市的 O_3 本地贡献最高.在 S3(均压场)下,其他地区贡献以保定周边城市传输影响为主;而 S7(西北部低压后部)中其他地区贡献主要以河南省、邯郸、山西省、石家庄等西南路径输送为主.

关键词：$PM_{2.5}$；O_3；天气分型；来源解析；潜在源贡献分析法；浓度权重分析法
中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000−6923(2025)07−3582−11

Study on prevention and control strategies of $PM_{2.5}$ and O_3 combined pollution under different weather patterns in Baoding City. FU Xing-yu, CHENG Shui-yuan*, WANG Chuan-da (Beijing Key Laboratory of Regional Air Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：3582~3592

Abstract：The typical compound pollution of $PM_{2.5}$ and O_3 in Baoding City was investigated in this study. Objective weather classification of sea-level pressure and 10m wind fields in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the autumn-winter and spring-summer seasons was conducted using the Principal Component T-mode (PCT) method. Backward trajectory analysis (PSCF, CWT) and meteorological-air quality modeling system (WRF-CAMx) were applied to identify the source contributions and transport pathways of $PM_{2.5}$ and O_3 under pollution-related weather types. From 2019 to 2022, the annual average $PM_{2.5}$ concentration in Baoding showed a significant decline of 26.9%, whereas O_3 exhibited a fluctuating trend with a slight reduction of only 2.2%, indicating limited improvement. Monthly average concentrations of both pollutants demonstrated pronounced seasonal patterns. In autumn and winter, high-pressure systems dominated, and weather types T5 (eastern high-pressure rear, 11.6%), T6 (saddle-type, 11.6%), and T9 (isobaric field, 5.2%) were most frequently associated with $PM_{2.5}$ pollution events. In contrast, low-pressure systems prevailed in spring and summer, with weather types S3 (isobaric field, 12.9%) and S7 (northwest low-pressure rear, 16.8%) contributing notably to O_3 pollution. Local emissions were identified as the dominant source of $PM_{2.5}$ during pollution weather types. Under T5, additional contributions originated mainly from Handan and Shijiazhuang; under T6, from Shanxi Province and Shijiazhuang; and under T9, from Shanxi and Inner Mongolia. For O_3 pollution, local sources accounted for the largest share. Under S3, transport from surrounding cities played a secondary role, whereas under S7, contributions from southwestern regions, including Henan, Handan, Shanxi, and Shijiazhuang, were more prominent.

Key words: $PM_{2.5}$; O_3; weather classification; source apportionment; potential source contribution function; concentration-weighted trajctory

大气污染与污染源种类、气象条件、污染物区域传输以及地理条件等因素密切相关[1-2].在不同气象条件下,同一污染源排放导致近地层的污染物浓度可能相差几十倍乃至几百倍[3-4],而气象变化又被大气环流形势所制约和影响[5-6].大气环流特征的变化是所有地区污染物浓度的主要驱动因素之一[7],大气环流形势的演变能引起气象因素的变化,同时

收稿日期：2024−12−18
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52330002)
* 责任作者, 教授, bjutpaper@outlook.com

对污染物区域传输产生影响,但不同地区大气污染的环流特征和区域传输特征具有较大差异[8-9],且污染状况具有明显的区域性特征.因此,通过识别污染天气类型,研究不同天气情况下的气象因素、污染物特征及区域传输特征,对于理解污染物的污染机制、提高重污染天气的预报精度具有重要意义.多项研究表明,典型天气形势在不同地区对 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染具有显著影响,并存在明显的区域传输特征.例如,成都地区在高压后部型、底前高后型等天气类型下 $PM_{2.5}$ 污染加重,且南部及西南部地区对污染贡献显著[10];银川地区 O_3 污染的形成与东高西低型天气类型相关,且污染物主要通过东南气流输送[11];弱低压型及高压中心型易导致南京地区形成双高污染,且周边临近省份的污染是影响南京地区双高的主要原因之一[12].京津冀地区作为我国重要的经济核心地区,由于其特殊的地形特点以及产业结构,一直是我国空气污染问题的重点研究对象.目前已有一些利用天气分型法分析京津冀地区污染状况的研究[13-15],但缺少对京津冀内单一城市的天气形势与污染物特征以及不利天气应对策略进行深入分析的研究.

近年来,保定市以巩固空气质量“退后十”为目标,强调大力推进产业和能源结构优化调整及科学精准的应对重污染天气,以实现全市空气质量持续改善.为此,本文采用 T-mode 斜交旋转主成分分析法(PCT)对 2019~2022 年京津冀区域秋冬季(10~3 月)以及春夏季(4~9 月)的天气形势进行天气分型,研究保定市污染天气型下的污染物特征以及气象要素与污染物之间的关联性,并通过后向轨迹模型(Hysplit)的潜在源贡献分析法(PSCF)与浓度权重分析法(CWT)以及空气质量模型(WRF-CAMx)进行污染天气型下保定市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的来源贡献评估,以期为保定市重污染天气应对提供科学依据.

1　研究资料与方法

1.1　数据资料

天气分型所使用的资料来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)官网下载的 ERA-Interim 再分析资料,同时作为 WRF 模型气象场的输入文件.此外,ERA5 数据中的逐时边界层高度、温度、相对湿度、10m 风场、太阳辐射量以及降水量等数据用来进行不同天气型下气象要素场的分析.本研究选取了 2019~2022 年逐日平均海平面气压场和 10m 风场作为分型对象,时空分辨率为 1h、0.25°×0.25°,研究范围为 108°E~125°E、32°N~45°N,涵盖整个京津冀区域;空气质量数据来源于中国环境监测总站的全国空气质量实时发布平台(https://air.cnemc.cn:18007/),其中包括保定市 6 个监测站点的 $PM_{2.5}$ 和 O_3 逐小时浓度监测资料.

1.2　客观天气分型方法

使用的天气分型方法是基于欧盟 cost733 项目开发的天气分型软件[16]中的 PCT 客观分型方法,其原理是将高维数据矩阵 Z 分解为 F 和 A 两个低维矩阵 $Z=FA^T$,每行为 N 个空间格点,每列为 M 个观测时次,其中 F 为主成分(称为 PC),A 为 PC 载荷.所有的主成分依次按照对应特征值的大小进行排序,选取累计贡献率超过一定百分比(一般是 85%)的特征值所对应的前 K 个($K\leqslant M$)主成分 F,从而实现降维的目的.该方法能够较为准确的反映环流场原始的特征,不会因对象的调整产生太大变化,得到的时空场也更稳定[17-18].

1.3　PSCF 及 CWT

基于天气分型结果对污染天气型下的污染个例进行 PSCF 和 CWT 分析.后向轨迹模型是由美国国家海洋与大气管理局研发、用于计算气团轨迹和模拟气团扩散以及沉积的模型[19].Wang 等[20]在模型基础上开发出了 TrajStat 软件,其在分析大气污染物输送和扩散中具有广泛的适用性[21].

PSCF 是一种基于条件概率函数发展而来的一种判断污染源可能方位的方法,计算公式如下:

$$\mathrm{PSCF}_{ij}=\frac{m_{ij}}{n_{ij}} \tag{1}$$

PSCF 为研究区域内某一网格(i,j)的污染轨迹数 m_{ij} 与经过该网格所有轨迹数 n_{ij} 的比值;PSCF 值越大,表明该网格对应区域对采样点的影响越大.本文采取 PSCF 值以轻度(0~0.3)、中度(0.3~0.7)和重度(>0.7)标识潜在源区属性,因此可确认影响研究区域空气质量的潜在源[22-23].为消除条件概率计算中导致的误差,本研究通过引入权重函数来减小不确定性,即:

$$\mathrm{WPSCF}=\mathrm{PSCF}\cdot W_{ij} \tag{2}$$

$$W_{ij}=\begin{cases}1.00, 80\leqslant n_{ij}\\ 0.70, 20\leqslant n_{ij}<80\\ 0.42, 10\leqslant n_{ij}<20\\ 0.05, n_{ij}<10\end{cases} \tag{3}$$

CWT 是一种计算潜在源区气流轨迹权重浓度的方法,通过将污染物浓度与网格相关的轨迹求平均,将停留时间加权浓度分配给每个网格单元,从而获得不同污染网格的具体贡献浓度,故 CWT 值越大,表明该区域对受体点浓度贡献越大,计算公式如下:

$$C_{ij}=\frac{\sum_{l=1}^{M}C_l\tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^{M}\tau_{ijl}} \tag{4}$$

式中:C_{ij} 为网格(i,j)的加权平均浓度;τ_{ijl} 为轨迹 l 在网格中停留的时间;C_l 为轨迹开始时间的浓度;M 为后向轨迹总数.CWT 同样采用与 PSCF 相同的权重因子 W_{ij} 消除其不确定性.

1.4 WRF−CAMx 空气质量模型

利用 WRF−CAMx 中的 PSAT 与 OSAT 模块对污染天气型下的个例进行来源解析,其中 WRF 模型作为 CAMx 模型气象场驱动场,源解析的源体区域包括保定、北京、天津、廊坊、秦皇岛、唐山、承德、张家口、石家庄、衡水、沧州、邢台、邯郸、山西省、河南省、内蒙古自治区、山东省以及其他地区.WRF 与 CAMx 模式采用 3 层嵌套方案,最外层 D01 分辨率为 27km,覆盖中国东部区域,D02 分辨率为 9km,覆盖整个京津冀区域,D03 分辨率为 3km,覆盖保定市(图 1),具体参数设置如表 1 所示.

PSCF、CWT 与 WRF−CAMx 用于探究保定市 $PM_{2.5}$ 与 O_3 的潜在源区及贡献比例,将两者的结果进行对比以验证结果的合理性.本文中 PSCF、CWT 分析结果与 WRF−CAMx 分析结果差异性较小,表明模拟与实际污染源的输送路径具有较好的一致性,验证了模型在分析 $PM_{2.5}$ 与 O_3 的污染源和外来输送路径中的有效性.

表 1 WRF 和 CAMx 模型参数设置

Table 1 WRF and CAMx model parameter Settings

WRF 参数		CAMx 参数	
投影方式	Lambert 投影	模型版本	6.3
真纬度	30°和 60°	嵌套网格数	两层
边界条件	1°×1°NCEP 资料	水平分辨率	最外层 27km,内层 9km,最内层 3km
长波辐射方案	GFDL 长波辐射方案	垂直层数	14
短波辐射方案	Dudhia 短波辐射方案	气溶胶化学机制	EBI
微物理过程	WSM6	气象化学机制	CB05
PBL 方案	Yonsei University 边界层方案	水平扩散方案	PPM
地形方案	Noah 地表模型,23 层	光化学速率	由 TOMS 臭氧浓度资料计算
		网格烟羽模块	关

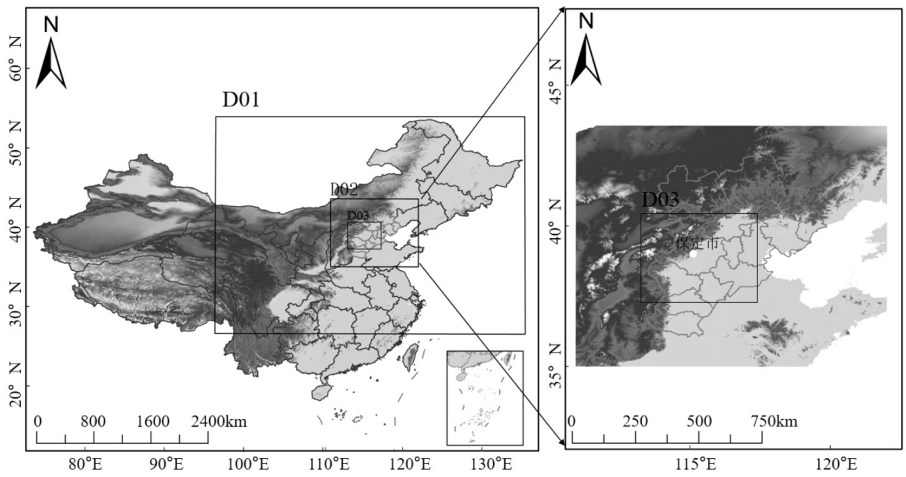


图 1 三层嵌套区域示意

Fig.1 Illustration of the three−layer nested area

审图号:GS(2022)4308

1.5　模型验证

WRF−CAMx 模式模拟个例起始及结束日期见表 5,共包括 5 个污染个例.本研究采用标准化平均偏差(NMB)、标准化平均误差(NME)和相关系数(R)评估模拟效果.如表 2 所示,WRF 模式对温度、相对湿度以及风速模拟的 R 分别为 0.85、0.71 和 0.68,NMB 分别为 12.19%、−19.34%、18.62%,NME 范围为 19.23%~26.38%,说明 WRF 模式能够较好地模拟气象要素时间变化特征且对温度模拟效果最好.图 2 表明对 $PM_{2.5}$ 模拟的 R 为 0.62~0.74,NMB 为 −9.25%~−18.62%,对 O_3 模拟的 R 为 0.62~0.75,NMB 为 −7.68%~−17.98%,说明模拟效果较好且模型对 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的模拟均存在一定低估.对两种污染物模拟的 NME 均小于 30%.总体来看,WRF−CAMx 模式模拟效果较好,误差在可接受范围内.

表 2　气象要素观测值和模拟值验证统计

Table 2　Meteorological elements observed and simulated values verify statistical tables

气象要素	观测值	模拟值	统计指标		
			相关系数(R)	NMB(%)	NME(%)
温度(℃)	14.48	15.56	0.85	12.19	24.34
相对湿度(%)	72.15	56.79	0.71	−19.34	19.23
风速(m/s)	1.49	1.64	0.68	18.62	26.38

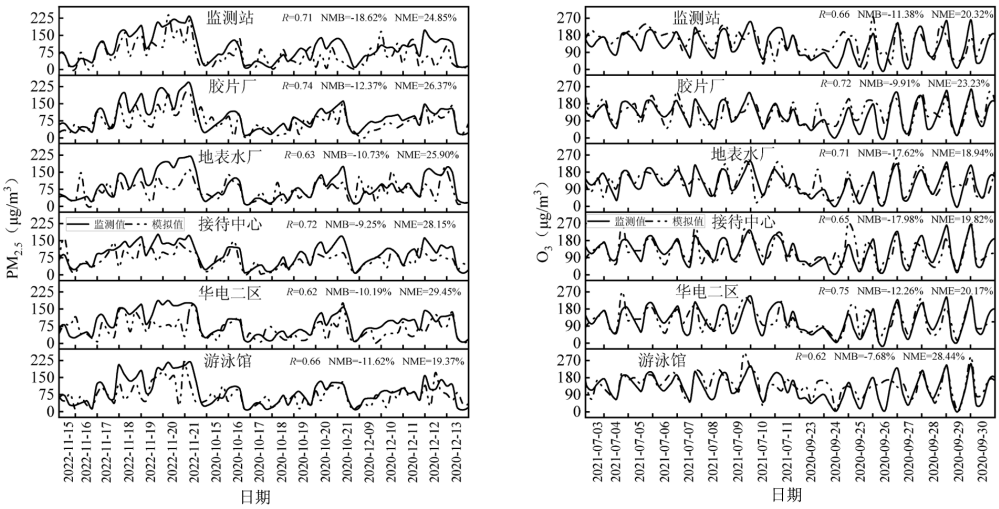


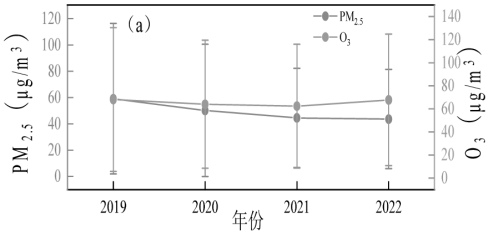
图 2　污染个例监测值与模拟值污染物浓度比较

Fig.2　Comparison of pollutant concentration between the monitoring value and the simulated value of pollution cases

2　结果与分析

2.1　保定市 $PM_{2.5}$ 与 O_3 污染形势

如图 3(a)所示,2019~2022 年间,保定市 $PM_{2.5}$ 年平均浓度呈逐年下降趋势,下降幅度为 26.9%,相比之下,2019~2021 年期间 O_3 年平均浓度呈现下降趋势,但 2022 年又有所提高,整体下降幅度仅为 2.2%.两种污染物的年平均浓度表明,保定市在 $PM_{2.5}$ 的管控治理上取得了一定成效,这是由于我国通过制定一系列政策减少 NO_x 与 SO_2 等污染物的排放来降低 $PM_{2.5}$ 的浓度,使得 $PM_{2.5}$ 浓度呈现明显下降趋势,但由于不合理的 NO_x 与 VOCs 减排比例,导致 2022 年 O_3 浓度有所升高[24].由于两种污染物之间的关联性[25],保定市未来应继续加强 $PM_{2.5}$ 与 O_3 的协同控制.从月平均浓度(图 3(b)、(c))角度来看,$PM_{2.5}$ 浓度较高的情况集中在秋冬季节(11~2 月),这主要由于冬季的采暖需求增加以及大气稳定性较差,导致了污染物积聚.对于 O_3,浓度在春夏季节内达到高峰,特别是 6 月 O_3 月平均浓度范围为 162~196μg/m^3.总体来看,这两种污染物的高浓度情况发生时间相对独立,因此本研究针对秋冬季以及春夏季的京津冀地区天气形势进行天气分型并进行后续研究.



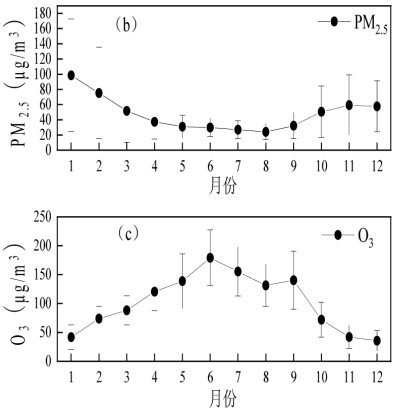


图 3 保定市 2019~2022 年 $PM_{2.5}$ 与 O_3 浓度变化及标准差

Fig.3 Changes and standard deviations of $PM_{2.5}$ and O_3 concentrations in Baoding City from 2019 to 2022

2.2 天气分型结果

根据以往学者的研究经验[26-27],利用 PCT 方法对研究区域 2019~2022 年秋冬季和春夏季的海平面气压场与 10m 风场分别划分为 9 种类型.秋冬季天气类型为 T1~T9(图 4),其中 T1 和 T9 为均压场型、T2 为西部高压前部、T3 为东北部高压后部、T4 为西北部高压前部、T5 为东部高压后部、T6 为鞍型场、T7 为东南部高压后部、T8 为低压场型;春夏季为 S1~S9(图 5),其中 S1 为低压中部型、S2 为东部高压后部型、S3、S8 和 S9 为均压场型、S4 为南部低压型、S5 为东北部低压后部型、S6 为东部低压后部型、S7 为西北部低压后部型.

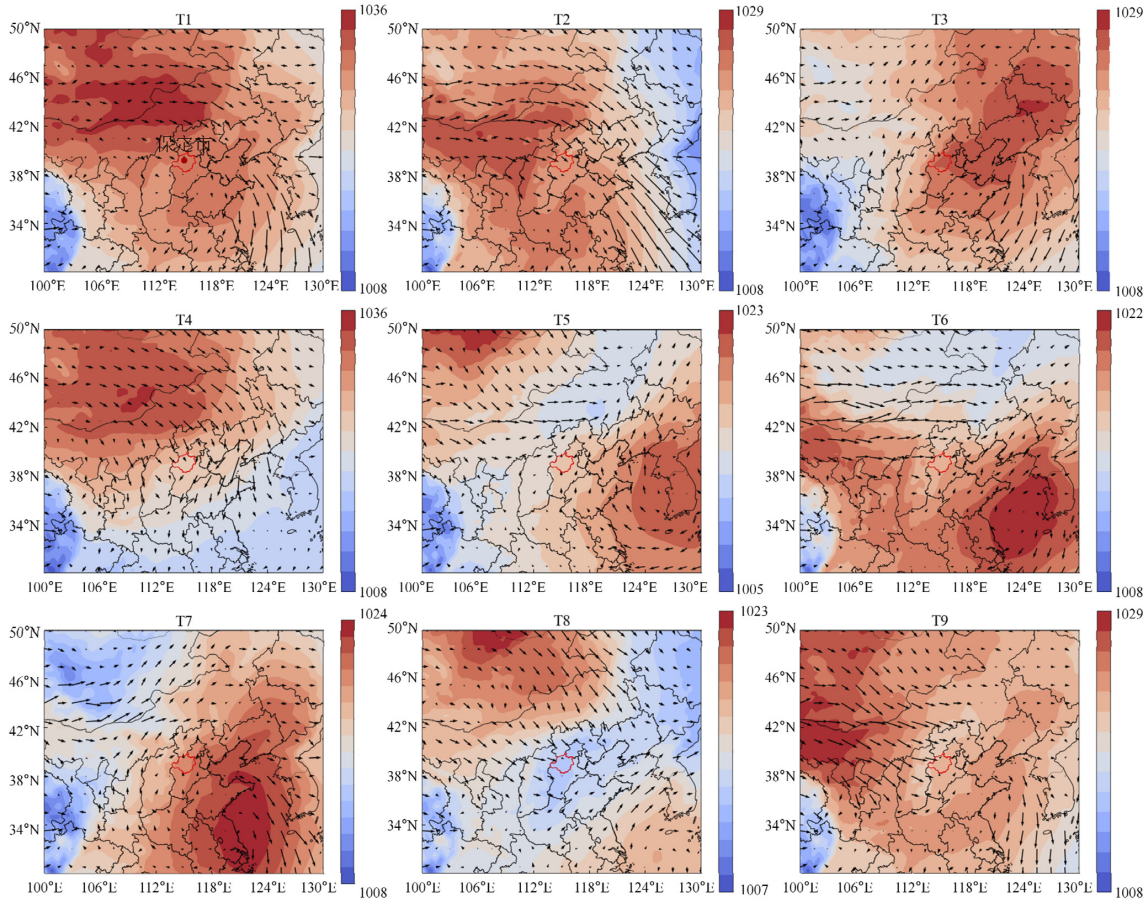


图 4 2019~2022 年秋冬季海平面气压场及 10m 风场分型

Fig.4 Classification of sea level pressure field and 10m wind field in autumn and winter of 2019~2022

京津冀地区秋冬季节最常见的天气场型为高压场型,具体表现为西部高压前部(T2:16.1%)、东北部高压后部(T3:13.5%)、东部高压后部(T5:11.6%)、西北部高压前部(T4:8.5%)以及东南部高压后部(T7:5.0%).其中 T2 和 T3 场型的频率较高,表明该区域在秋冬季节大气环流以高压控制为主,保定市在高压场型的影响下天气通常较为稳定,气温较低.其次,均压场型(T1:20.5%、T9:5.2%)的出现频率也较为显著.在 T1 类型下,保定市处于高压中心前的均压场,风速较小;在 T9 型下,高压中心位于内蒙古西部,保

定市处于均压场范围内,可能会出现局部气温波动.鞍型场(T6:11.6%)的海平面气压场呈现从西北至东南方向的高-低-高变化,保定市近地面风场主要为西南风,通常气温相对较高.低压场型(T8:7.5%)下京津冀地区处于低压系统控制下,保定市在此类天气中可能出现降水和气温回升等变化.

春夏季的天气分型结果显示低压场型的发生频率最高,具体表现为西北部低压后部型(S7: 16.8%)、低压中部型(S1:12.2%)、东部低压后部型(S6:7.2%)、南部低压型(S4:7.1%)及东北部低压后部型(S5:6.6%).其中,西北部低压后部型(S7)和低压中部型(S1)在研究时段频率较高,反映出低压系统对京津冀地区的控制较为显著,保定市可能常出现气温升高、降水频繁的天气状况.均压场型包括 S3 型(12.9%)、S8 型(4.5%)和 S9 型(8.8%).在 S3 型天气下,低压中心位于东北及内蒙古西部,保定市近地面风场以西南风为主,气温较高且可能伴随局部降水;S8 型下低压中心位于内蒙古西部,京津冀地区整体位于均压场,保定市近地面为东南风但风速较小,天气状况较为平稳;S9 型则呈现两低压中心的布局,分别位于内蒙古与蒙古交界处及浙江省上空,保定市位于两低压中心之间的均压场中.高压场型为东部高压后部型(S2:23.4%),气压中心位于渤海上空,气压梯度较小,保定市在此类天气中常出现晴朗天气,气温适中且风速较小.

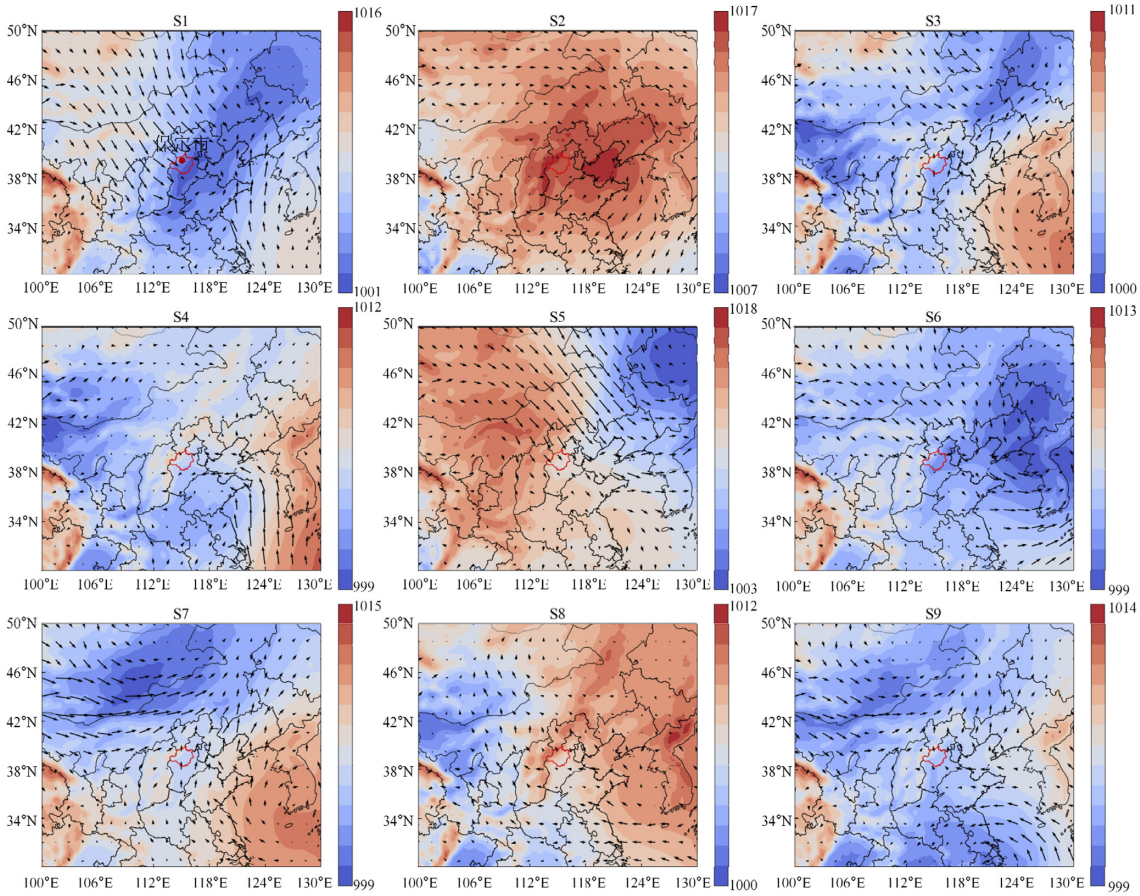


图 5　2019~2022 春夏季海平面气压场及 10m 风场分型

Fig.5　Classification of sea level pressure field and 10m wind field in spring and summer from 2019 to 2022

2.3　不同天气型下气象要素与污染物特征及相关性

表 3 中超标率定义为超标($PM_{2.5}$>75μg/m^3)天数占该天气型总计出现天数的比例.根据气象要素、$PM_{2.5}$ 浓度及超标率可将天气类型分为 3 类:易污染型、较易污染型和不易污染型.易污染型(T5、T6、T9)天气类型下保定市 $PM_{2.5}$ 浓度高于 75μg/m^3 且超标率高(>40%).T5 类型下,低风速限制了污染物的水平扩散,另外较高的相对湿度增强了颗粒物的吸湿能力,使得颗粒物的质量和体积增加从而不利于其扩散,导致 $PM_{2.5}$ 浓度较高.在 T6 类型下,较高的相对

湿度和低风速共同作用,形成了静风和高湿的天气条件,污染物容易积累,形成 $PM_{2.5}$ 污染.T9 类型下,较高相对湿度和低气温加剧了颗粒物的积聚,且低气温和弱风场共同导致边界层高度降低,进一步限制了污染物的扩散,使得 $PM_{2.5}$ 浓度升高;较易污染型(T1、T3、T7、T8)下保定市 $PM_{2.5}$ 浓度相对偏高(60~75μg/m^3)且超标率较高(20%~40%).T1 类型的低风速和较高相对湿度使得污染物的扩散能力差,难以有效地清除污染物,导致 $PM_{2.5}$ 超标率较高.T3 和 T7 类型下低风速以及低边界层高度的共同影响导致了污染物的积聚.T8 类型表现为高温低湿、风速相对偏低、高太阳辐射量且边界层高度较高,容易形成边界层逆温现象[30],造成污染物的积聚和颗粒物浓度升高;不易污染型(T2、T4)下保定市 $PM_{2.5}$ 浓度和超标率相对偏低.T2 类型下较高的风速和较低的湿度有助于污染物的扩散,同时边界层高度较高,也有利于污染物的稀释.T4 型下虽然保定市整体相对湿度偏高,但近地面风速超过 2m/s,有助于污染物的扩散,且较高的降水量能够促进颗粒物的湿沉降过程,从而降低 $PM_{2.5}$ 浓度[28].

表 3 2019~2022 年秋冬季各地面天气型下保定市各污染物及气象要素特征

Table 3 The characteristics of pollutants and meteorological factors in Baoding city under various surface weather types during the autumn and winter seasons from 2019 to 2022

天气类型	天数	气象要素						$PM_{2.5}$		O_3
	(d)	相对湿度(%)	总辐射量(MJ/m^2)	最大边界层高度(m)	气温(℃)	风速(m/s)	平均降水(mm)	平均值(μg/m^3)	超标率(%)	(μg/m^3)
T1	150	59.95	7.41	1054.56	−2.02	1.36	0.08	72.28	28.67	46.99
T2	118	46.09	9.99	1746.22	−2.76	2.15	0.12	36.37	10.17	67.51
T3	99	67.89	6.00	904.11	4.20	1.40	0.58	63.20	30.30	51.16
T4	62	65.19	5.07	1152.15	3.08	2.10	3.08	57.34	20.63	51.82
T5	85	71.45	8.07	869.36	8.16	1.41	0.83	87.36	54.12	69.86
T6	85	62.84	9.18	1046.53	6.41	1.42	0.04	78.56	47.06	64.53
T7	37	61.68	10.15	946.61	4.86	1.55	0	70.70	29.73	67.89
T8	55	58.51	9.81	1265.19	8.18	1.89	0.46	75.09	29.09	73.98
T9	38	69.95	6.82	1079.78	2.61	1.70	0.57	82.39	42.11	48.92

表 4 中超标率定义为超标(O_3>160μg/m^3)天数占该天气型总计出现天数的比例.结合气象因素、O_3 平均值及超标率将天气类型划分为 3 种类型:易污染型、较易污染型以及不易污染型.易污染型(S3、S7)下保定市 O_3 浓度高于 160μg/m^3 且超标率高于 50%.在 S3 类型下保定市边界层高度相对较低且风速低,大气环境静稳,不利于 O_3 前体物的扩散,同时伴随着高太阳辐射以及高温条件,光化学反应速率加快,促进 O_3 形成并导致 O_3 浓度升高.同样 S7 类型下太阳辐射量以及气温较高,为 O_3 的形成提供了有利条件;较易污染型(S4、S6、S8、S9)下保定市 O_3 浓度(140~160μg/m^3)且超标率偏高(30%~50%).S4 类型下较高的湿度和温度加速了 O_3 的形成,风速适中且边界层较低,容易形成 O_3 污染.S6 中低压中心位于京津冀东部,东部低压系统的影响使得空气流动不稳定,尤其在低压后部形成的逆温层,限制了垂直混合,从而造成污染物的积累,同时较高的太阳辐射以及高温也为臭氧的生成提供了有利条件.S8 和 S9 类型则因较高的湿度和温度以及适中的风速,导致 O_3 积聚并维持较高浓度;不易污染型(S1、S2、S5)下保定市 O_3 浓度则低于 140μg/m^3 且超标率低于 30%.S1 中京津冀位于低压中心,通常区域内空气流动强,促进了垂直混合,从而有助于污染物的稀释,同时最大边界层高度较高,风速高,有助于臭氧前体物的扩散.S2、S5 类型下较高的边界层和适中的风速有助于污染物的扩散,O_3 浓度保持在相对较低水平.

综上所述,秋冬季京津冀地区主要被高压场型控制,易引发保定市 $PM_{2.5}$ 的污染天气类型为东部高压后部型(T5)、鞍型场(T6)以及均压场型(T9),其中风速、相对湿度以及气温等气象因素对 $PM_{2.5}$ 影响较大,而西部高压前部型(T2)以及西北部高压前部(T4)下风速等气象因素更有利于污染物扩散,不易形成 $PM_{2.5}$ 污染.春夏季则主要被低压场控制,均压场(S3)和西北部低压后部型(S7)为保定市的 O_3 污染天气型,太阳辐射量、相对湿度和气温是主要影响因

素,低压中部型(S1)、东部高压后部型(S2)及东北部低压后部型(S5)为不易污染型.

表 4　2019~2022 年春夏季各地面天气型下保定市各污染物及气象要素特征

Table 4　The characteristics of pollutants and meteorological factors in Baoding city under various surface weather types during the spring and summer seasons from 2019 to 2022

天气类型	天数	气象要素						O_3		$PM_{2.5}$
	(d)	相对湿度(%)	总辐射量(MJ/m^2)	最大边界层高度(m)	气温(℃)	风速(m/s)	平均降水(mm)	平均值(μg/m^3)	超标率(%)	(μg/m^3)
S1	90	61.76	14.21	2135.91	22.44	2.37	2.21	134.47	26.67	29.17
S2	172	67.53	10.95	1478.39	17.83	1.89	1.83	122.78	16.28	30.92
S3	95	70.82	13.59	1393.49	25.70	1.73	2.66	179.71	67.37	34.82
S4	52	74.69	9.56	1157.55	24.72	2.25	7.82	140.62	32.69	23.39
S5	49	60.49	15.58	2365.28	19.08	1.96	2.25	115.06	6.12	23.27
S6	53	64.42	16.12	1919.64	24.87	1.98	1.65	146.31	37.74	20.98
S7	123	65.18	12.86	1567.61	22.63	1.99	3.91	164.54	54.47	36.28
S8	33	75.39	10.79	1273.89	24.64	1.72	7.59	156.64	48.48	33.21
S9	65	76.60	9.56	1184.61	25.35	1.79	2.88	152.51	41.54	30.91

2.4　$PM_{2.5}$ 与 O_3 潜在源区分析

表 5 为秋冬季及春夏季污染天气型中的高污染个例,每个时段都提前 2d 进行模拟,消除边界场和初始场的影响,个例的选取上挑选了区域超标率较高且连续的污染过程.

如图 6 所示,WPSCF 与 WCWT 分析结果较为一致,表明模型具有较高可信度.T5 类型下,对保定市 $PM_{2.5}$ 贡献最高的区域集中在保定、邯郸、石家庄、邢台以及衡水,WCWT 值均在 160μg/m^3 以上,其次为北京市南部和山西省中北部,传输路径以西南方向为主;T6 类型下,高贡献区域主要为保定、石家庄、邯郸、太原及山西省南部,同样呈现为西南路径;在 T9 类型下,由于均压场的原因造成污染物的积累,同时高压中心位于内蒙古地区西部,导致高贡献区域表现为保定、山西省南部、内蒙古等地区,传输路径以西北方向为主.

表 5　保定市秋冬季及春夏季污染天气型下 $PM_{2.5}$、O_3 高污染个例

Table 5　High pollution of $PM_{2.5}$ and O_3 in autumn, winter, spring and summer in Baoding City

序号	天气类型	起始日期	结束日期	天数 (d)	$PM_{2.5}$ 平均值(μg/m^3)	O_3 平均值 (μg/m^3)
1	T5	2022-11-15	2022-11-21	7	111.43	35.71
2	T6	2020-10-15	2020-10-21	7	78.29	74.29
3	T9	2020-12-09	2020-12-13	5	83.41	21.60
4	S3	2021-07-03	2021-07-11	9	25.67	192.89
5	S7	2022-09-23	2022-09-30	8	53.00	182.25

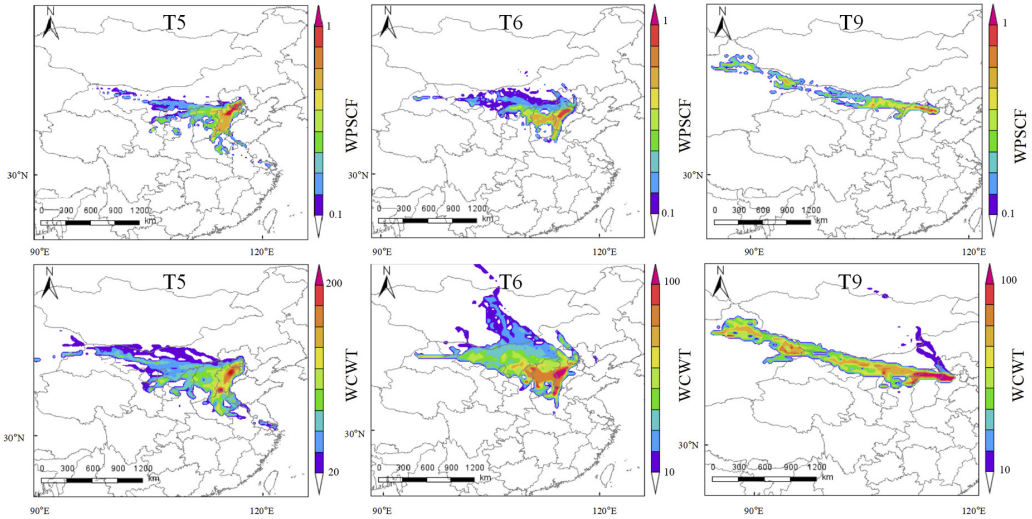


图 6　秋冬季污染天气型下 $PM_{2.5}$ 的 WPSCF 与 WCWT 分布

Fig.6　The WPSCF and WCWT distributions of $PM_{2.5}$ under pollution weather types in autumn and winter

春夏季污染天气类型下 O_3 的 WPSCF 与 WCWT 分析结果(图 7)表明,在 S3 类型下,保定市 O_3 主要来源于保定市内,WCWT 值在 100μg/m^3 以上,其次是石家庄、山西省东部、河南省南部及山东省西部边缘城市,主要以保定市周边城市输送为主;S7 类型下,保定市内部、石家庄、邢台、邯郸、山西省中部以及河南省东北部、安徽省北部地区均存在较高贡献,表现为西南路径的输送.不同污染天气类型下污染物的来源存在明显不同,秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染的外在潜在源区分布在邯郸、邢台、石家庄以及山西省、山东省、河南省部分地区,春夏季 O_3 污染的主要外在潜在源区分布在邯郸、石家庄、邢台以及河南省、安徽省、山西省部分地区,与以往结果相符合[29-30].

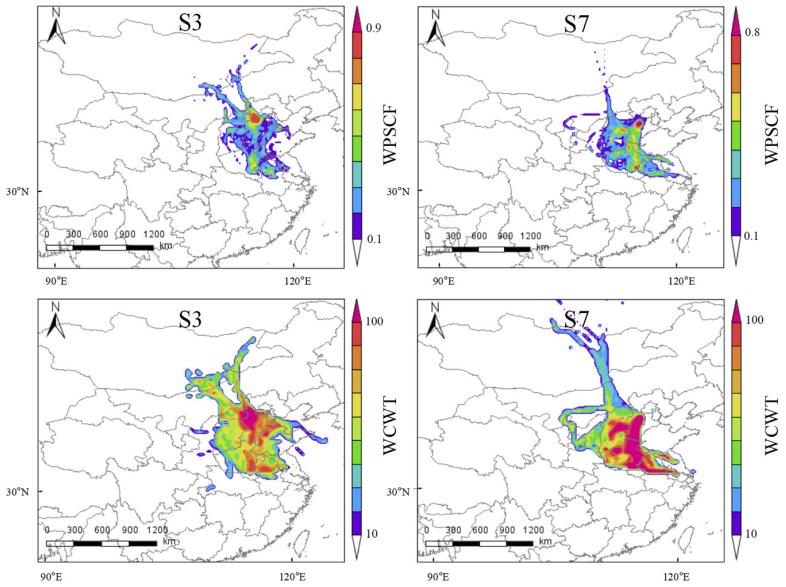


图 7 春夏季污染天气型下 O_3 的 WPSCF 与 WCWT 分布

Fig.7 The WPSCF and WCWT distributions of O_3 under pollution weather types in spring and summer

2.5 $PM_{2.5}$ 与 O_3 来源解析

$PM_{2.5}$ 与 O_3 污染个例选取参照表 5.采用 CAMx-PSAT/OSAT 对秋冬季及春夏季污染天气型下 $PM_{2.5}$ 与 O_3 进行来源解析,结果如图 8 所示.在 $PM_{2.5}$ 污染天气类型下,保定市 $PM_{2.5}$ 的主要来源以本地排放为主,但不同天气类型下外来污染物的贡献存在差异.T5 类型下,保定市本地的 $PM_{2.5}$ 排放贡献达到 52.2%,外来贡献主要来自北京、邯郸以及石家庄等地,分别占比 7.7%、6.8%和 6.3%,由于此类天气类型下保定市以偏南风为主,但风速较小,气象条件有利于污染物的积聚与形成,导致本地排放成为主要污染源,且污染物的输送路径主要集中在西南方向;在 T6 类型下,外来污染物的主要贡献来自山西省(11.6%)和石家庄(8%),表明此类天气条件下污染物的输送路径主要为西南方向;对于 T9 天气类型,外来贡献则主要来自山西省(13.6%)和内蒙古自治区(6.3%),说明该类天气型下 $PM_{2.5}$ 的主要来源以西北路径为主.在 O_3 污染天气类型下,保定市的 O_3 同样主要来源于本地排放.在 S3 类型下,本地排放贡献为 28.1%,外来污染物的贡献主要来自石家庄(11.4%)、山西省(9.9%)和北京(6.8%),此外,衡水、邢台、邯郸及河南省等周边地区也对保定市 O_3 浓度产生了一定贡献,外来污染物的输送路径主要为周边输送,次要路径则为南方城市的输送.对于 S7 类型,外来贡献较高的地区包括河南省(10.3%)、邯郸(9.9%)、山西省(9.7%)和石家庄(9.6%),外来污染物的输送路径主要呈现为西南方向.

通过分析保定市污染天气类型下气象要素与污染物的相关性以及 $PM_{2.5}$ 与 O_3 的来源贡献,得出重污染天气的形成与天气条件密不可分且不同气象条件下污染物的来源存在差异.秋冬季节中,当保定市形成近地面风向以西南风为主且风速较小(<1.5m/s)、相对湿度偏高(>60%)、气温相对较高(>6℃)的天气情况时,应当注意东部高压后部型

(T5)、鞍型场(T6)天气类型的发生从而导致 $PM_{2.5}$ 污染,污染物的外来路径以西南方向为主;保定市以偏西风为主且相对湿度偏高、气温较低时应注意均压场型(T9)的发生,$PM_{2.5}$ 的主要外来路径为西北方向.春夏季节中,当保定市近地面风向以西南风为主、相对湿度偏高以及总太阳辐射量较高(>10MJ/m^2)时应注意均压场型(S3)和西北部低压后部型(S7)的发生从而形成 O_3 污染天气,O_3 的外来贡献区域主要以周边城市及西南方向为主.

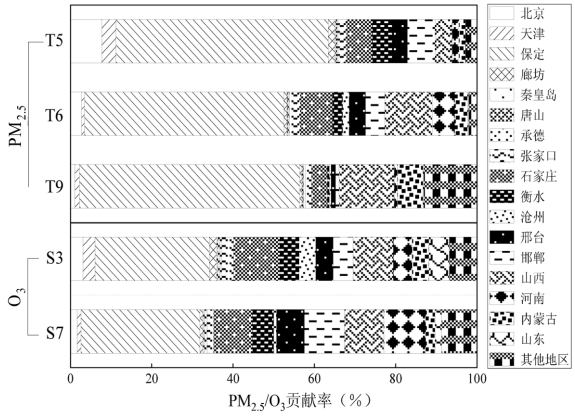


图 8　污染天气型下保定市 $PM_{2.5}/O_3$ 贡献比例

Fig.8　Contribution ratio of $PM_{2.5}/O_3$ in Baoding City under pollution weather

3　结论

3.1　2019~2022 年期间保定市的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度呈现逐年下降的趋势,下降幅度达到了 26.9%;O_3 的年平均浓度呈现波动趋势,下降幅度仅为 2.2%.从月平均浓度来看,$PM_{2.5}$ 浓度较高的情况主要集中在秋冬季节内(11~2 月),而 O_3 的高浓度则主要出现在春夏季节(6~9 月).

3.2　天气分型结果表明秋冬季京津冀地区的天气类型中高压场占比最高,其中东部高压后部型(T5)、鞍型场(T6)以及均压场型(T9)容易导致保定市发生 $PM_{2.5}$ 污染,西部高压前部型(T2)以及西北部高压前部型(T4)能够对 $PM_{2.5}$ 起到扩散作用;春夏季京津冀地区以低压场控制为主,均压场型(S3)和西北部低压后部型(S7)导致保定市形成 O_3 污染,低压中部型(S1)、东部高压后部型(S2)及东北部低压后部型(S5)为不易污染型.

3.3　秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染天气类型下,保定市 $PM_{2.5}$ 来源贡献以本地排放为主,其中东部高压后部(T5)和鞍型场(T6)类型下,保定市的 $PM_{2.5}$ 其他贡献区域主要以邯郸、石家庄、山西等西南路径为主;均压场(T9)型下其他贡献区域主要以山西和内蒙古等西北路径为主.春夏季 O_3 污染天气类型下,保定市的 O_3 本地贡献最高,均压场(S3)型下其他贡献区域主要以周边城市输送影响为主,而西北部低压后部(S7)类型下,其他贡献区域主要以河南、山西、石家庄等西南路径传输为主.

参考文献：

[1] 李　娟,尉　鹏,褚旸晰,等.中国中东部 $PM_{2.5}$ 时空分布变化及气象影响分析 [J]. 环境科学与技术, 2021,44(3):53-62.
Li J, Wei P, Chu Y X, et al. Spatial-temporal distribution changes of $PM_{2.5}$ and meteorological effects analysisin mid-eastern China [J]. Environmental Science & Technology, 2021,44(3):53-62.

[2] 高振翔,叶　剑,周红根,等.江苏省 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 时空变化特征及其与气象因子的关系 [J]. 环境科学与技术, 2020,43(7):51-58.
Gao Z X, Ye J, Zhou H G, et al. The spatial-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} and their relationships with meteorological factors in Jiangsu province [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(7):51-58.

[3] 李宗恺,潘云仙,孙润桥.空气污染气象学原理及应用 [M]. 北京:气象出版社, 1985:122.
Li Z K, Pan Y X, Sun R Q. Principles and applications of air pollution meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1985:122.

[4] 蒋维楣,孙鉴泞,曹文俊,等.空气污染气象学教程 [M]. 北京:气象出版社, 1993:5-12.
Jiang W M, Sun J N, Cao W J, et al. Air pollution meteorology course [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993:5-12.

[5] 姚　青,蔡子颖,刘敬乐,等.气象条件对 2009~2018 年天津地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响 [J]. 环境科学学报, 2020,40(1):65-75.
Yao Q, Cai Z Y, Liu J L, et al. Effects of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentration in Tianjin from 2009 to 2018 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020,40(1):65-75.

[6] 秦靖蒿,王晓红,杨艺科,等.2015~2020 年中国 $PM_{2.5}$ 污染时空演化及其与 ENSO 的关系研究 [J]. 环境科学学报, 2023,43(3):315-332.
Qin J H, Wang X H, Yang Y K, et al. Analysis of the spatial and temporal evolution of $PM_{2.5}$ and the relationship of ENSO and $PM_{2.5}$ concentrations in China from 2015 to 2020 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(3):315-332.

[7] 刘静达.2013~2018 中国臭氧区划和演变特征及其气象形成机制研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2020.
Liu J D. Ozone regionalization and evolution characteristics, and meteorological formation mechanism in China from 2013 to 2018 [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020.

[8] 郭立平,乔　林,石茗化,等.河北廊坊市连续重污染天气的气象条件分析 [J]. 干旱气象, 2015,33(3):497-504.
Guo L P, Qiao L, Shi M H, et al. Analysis about meteorological

conditions of continuous heavy pollution episodes in Langfang of Hebei province [J]. Journal of Arid Meteorology, 2015,33(3):497−504.

[9] 许建明,常炉予,马井会,等.上海秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染天气形势的客观分型研究 [J]. 环境科学学报, 2016,36 (12):4303−4314.
Xu J M, Chang L Y, Ma J H, et al. Objective synoptic weather classification on $PM_{2.5}$ pollution during autumn and winter seasons in Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016,36(12):4303−4314.

[10] 李培荣,肖天贵.成都地区秋冬季污染天气形势下 $PM_{2.5}$ 的扩散与输送 [J]. 中国环境科学, 2020,40(1):63−75.
Li P R, Xiao T G. The diffusion and transport of $PM_{2.5}$ under the polluted weather conditions during autumn and winter seasons in Chengdu [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):63−75.

[11] 严晓瑜,缑晓辉,杨苑媛,等.银川市臭氧污染天气形势客观分型研究 [J]. 环境科学学报, 2022,42(8):13−25.
Yan X Y, Hou X H, Yang Y Y, et al. Study on objective synoptic classification on ozone pollution in Yinchuan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(8):13−25.

[12] 秦 阳,胡建林,孔海江.不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析 [J]. 环境科学, 2024,45(2):626−634.
Qin Y, Hu J L, Kong H J. Transport and potential sources regions of double high pollution in Nanjing by different synoptic situations [J]. Environment Science, 2024,45(2):626−634.

[13] Gu S, Wu S, Yang L, et al. Synoptic weather patterns and atmospheric circulation types of $PM_{2.5}$ pollution periods in the Beijing−Tianjin−Hebei region. Atmosphere, 2023,14,942.

[14] 杨 旭,张小玲,康延臻,等.京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究 [J]. 中国环境科学, 2017,37(9):3201−3209.
Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, et al. Circulation weather type classification for air pollution over the Beijing−Tianjin−Hebei region during winter [J]. China Environmental Science, 2017,37(9):3201−3209.

[15] 张 莹,王式功,贾旭伟,等.华北地区冬半年空气污染天气客观分型研究 [J]. 环境科学学报, 2018,38(10):3826−3833.
Zhang Y, Wang S G, Jia X W, et al. Study on an objective synoptic typing method for air pollution weather in North China during winter half year [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(10):3826−3833.

[16] Philipp A, Beck C, Huth R, et al. Development and comparison of circulation type classifications using the COST733 dataset and software [J]. International Journal of Climatology, 2016,36(7):2673−2691.

[17] Huth R, Beck C, Philipp A, et al. Classifications of atmospheric circulation patterns [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2008,1146(1):105−152.

[18] Richman M B. Obliquely rotated principal components: An improved meteorological map typing technique [J]. Journal of Applied Meteorology, 1981,20(10):1145−1159.

[19] 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.

[20] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat:GIS−based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long−term air pollution measurement data [J]. Environment Modelling & Software, 2009,24(8):938−939.

[21] 汪 蕊,丁建丽,马 雯,等.基于 PSCF 与 CWT 模型的乌鲁木齐市大气颗粒物源区分析 [J]. 环境科学学报, 2021,41(8):3033−3042.
Wang R, Ding J L, Ma W, et al. Analysis of atmospheric particulates source in Urumqi based on PSCF and CWT models [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(8):3033−3042.

[22] 李 清,黄雯倩,马帅帅,等.常州春季 $PM_{2.5}$ 中 WSOC 和 WSON 的污染特征与来源解析 [J]. 环境科学, 2019,40(1):94−103.
Li J, Huang W Q, Ma S S, et al. Characteristics and sources of water−soluble organic carbon/nitrogen in $PM_{2.5}$ during spring in Changzhou [J]. Environment Science, 2019,40(1):94−103.

[23] Ye S Q, Ma T, Duan F K, et al. Characteristics and formation mechanisms of winter haze in Changzhou, a highly polluted industrial city in the Yangtze River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2019,253:377−383.

[24] Lu X, Hong J, Zhang L, et al. Severe surface ozone pollution in China: A Global Perspective [J]. Environment Science & Technology Letters, 2018,5(8):487−494.

[25] 田秀霞,陈瑞敏,张 珺,等.河北南部 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染的气象特征及天气分型 [J]. 四川环境, 2024,43(4):16−23.
Tian X X, Chen R M, Zhang J, et al. Meteorological characteristics and weather patterns of combined pollution caused by $PM_{2.5}$ and O_3 in Southern Hebei, China [J]. Sichuan Environment, 2024,43(4): 16−23.

[26] Zhang J P, Zhu T, Zhang Q H, et al. The impact of circulstion patterns on regional transport pathways and air quality over Beijing and its surroundings [J]. Atmospheric Chemistry & Physics & Discussions, 2012,11(12):33465−33509.

[27] Ye X, Song Y, Cai X, et al. Study on the synoptic flow patterns and boundary layer process of the severe haze events over the North China Plain in January 2013 [J]. Atmospheric Environment, 2016,124:129−145.

[28] 王聪聪,张小玲,卢宁生.2019~2021 年四川盆地污染天气客观分型及典型污染个例研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(5):2182−2197.
Wang C C, Zhang X L, Lu N S. Objective classification of pollution weather and typical pollution cases in Sichuan Basin from 2019 to 2021 [J]. China Environmental Science, 2023,43(5):2182−2197.

[29] 李绍荣.京津冀地区 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染特征及潜在源研究 [D]. 石家庄:河北地质大学, 2022.
Li S R. Pollution characteristics and potential sources of $PM_{2.5}$ and O_3 in Beijing−Tianjin−Heibei region [D]. Shijiazhuang: Heibei GEO University, 2022.

[30] 卢 硕,赵天良,李晓岚,等.2015~2019 年保定市 O_3 变化及其周边源区分析 [J]. 环境科学学报, 2022,42(7):22−31.
Lu S, Zhao T L, Li X L, et al. Analysis of O_3 variations over 2015~2019 in Baoding and the surrounding source distribution [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(7):22−31.

作者简介: 付兴宇(1999−),男,天津人,北京工业大学硕士研究生,主要从事大气污染防治及环境规划管理方面研究.发表论文 1 篇.1015789403@qq.com.