

济南市冬季典型重污染天气过程及成因分析*

冯亚洁 廉丽姝[#] 李宝富 于 森 张朝雨

(曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东 日照 276826)

摘要 以山东省济南市 2017 年 12 月 27—31 日的重污染天气过程为例,运用数值模拟与观测资料统计相结合的方法,对此次重污染天气过程的天气形势、气象条件、输送路径和潜在源区进行分析。结果表明:(1)此次重污染天气过程属于静稳累积型污染,基于 $PM_{2.5}$ 逐时监测数据,将此次污染过程分为污染物累积、重污染持续和显著减弱 3 个阶段。(2)气压和相对湿度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著的正相关,风速则呈显著的负相关,相关系数分别为 0.85、0.67、-0.48。地面均压场、持续的小风高湿、逆温等静稳天气有利于污染物的累积与持续。(3) $PM_{2.5}$ 输送路径主要为东南和西北路径,分别占轨迹总数的 50.71% 和 49.29%;由于地形原因,东南路径对污染过程的贡献不明显;泰安、淄博等地为此次重污染过程的潜在源区,且以济南市本地污染累积为主。

关键词 重污染过程 气象条件 输送路径 潜在源区 济南市

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.06.016

The analysis and causes of typical heavy pollution weather process in winter in Jinan FENG Yajie, LIAN Lishu, LI Baofu, YU Miao, ZHANG Zhaoyu. (College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao Shandong 276826)

Abstract: The heavy pollution weather process from December 27 to 31, 2017 in Jinan, Shandong was taken as an example. Based on the combination of numerical simulation and statistical analysis of observational data, the weather situation, the meteorological conditions, transport paths and potential source areas of the heavy pollution weather process were analyzed. The results showed that: (1) the heavy pollution weather process was defined as the meteorological stagnant-accumulated pollution and divided into three stages: pollutant accumulation, heavy pollution continuous and significant reduction on the monitoring data of hourly $PM_{2.5}$. (2) There was a significant positive correlation of pressure and relative humidity with $PM_{2.5}$ concentration while the wind speed was negatively correlated, and the correlation coefficients were 0.85, 0.67 and -0.48, respectively. The static and stable weather such as ground pressure field, persistent breeze, high humidity and inversion were conducive to the accumulation and persistence of pollutants. (3) The $PM_{2.5}$ transport paths were mainly the southeast route and the northwest route, accounting for 50.71% and 49.29% of the total number of trajectories respectively. Due to the topography, the contribution of the southeast route was not obvious. Tai'an, Zibo and so on were potential sources and the pollution was mainly local.

Keywords: heavy pollution process; meteorological conditions; transport paths; potential source areas; Jinan

由 $PM_{2.5}$ 引起的灰霾天气可直接或间接的对人体健康、经济社会等造成较大威胁^[1-2]。我国区域重污染问题不断恶化,光化学烟雾、大气灰霾等复合型污染不断加剧,城区重污染表现出明显的区域性和复合性^[3-5]。其中,京津冀、长三角、成渝、中原等地区污染严重^[6]。

许多学者从不同角度、用不同方法对区域重污染天气过程的成因进行了大量研究。程念亮等^[7]、张蓬勃等^[8]、周一敏等^[9]、徐丽娜等^[10]研究表明,近地面逆温层结较强、相对湿度较大、风速较小等气象条件有利于污染物的累积。翟华等^[11]、程丽萍

等^[12]、杨旭等^[13]研究发现,稳定的大气环流形势、地面弱气压场、边界层较低是重污染天气过程发生时的天气形势和环流特征。近年来,数值模拟逐渐成为污染物传输路径及潜在源区的重要研究手段。王爱平等^[14]、蒋伊蓉等^[15]、王芳等^[16]⁶⁴⁰利用后向轨迹模式(HYSPLIT)及相关研究方法和中尺度数值模式分析区域输送对重污染过程的影响。

山东省地处华北平原中心与京津冀地区相邻,是我国空气污染最严重的地区之一^[17]⁶⁵⁴、^[18]。前人关于济南市的研究大都是从 $PM_{2.5}$ 组分^[19-21]或基于污染发生过程中的某一个或两个影响因素进行分

第一作者:冯亚洁,女,1995年生,硕士研究生,主要从事大气环境研究。[#] 通讯作者。

* 山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2019MD022)。

析^[22-23],针对污染事件的整体分析较少。本研究以济南市2017年12月27—31日一次重污染天气过程为例,基于PM_{2.5}监测数据,利用中尺度天气预报模式(WRF)和HYSPLIT及其相关的分析方法,对污染期间的天气形势、气象条件、潜在源区及输送途径进行分析,以期揭示济南市典型重污染天气的形成与发展机制,为空气污染防治提供理论参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

PM_{2.5}浓度逐时数据集为中国环境监测总站公布的济南市8个国控点的监测数据,监测站点分布如图1所示。数据时间跨度为2017年12月26—31日。WRF所用的气象资料是由美国国家大气研究中心提供的6 h间隔、1°×1°空间分辨率的美国国家环境预报中心(NCEP)-FNL再分析数据资料(<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>)和WRF官网(http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html)提供的静态数据。HYSPLIT输入数据是由NCEP提供的全球资料同化系统(GDAS)数据(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>)。所用气象要素数据来自WRF模拟结果。

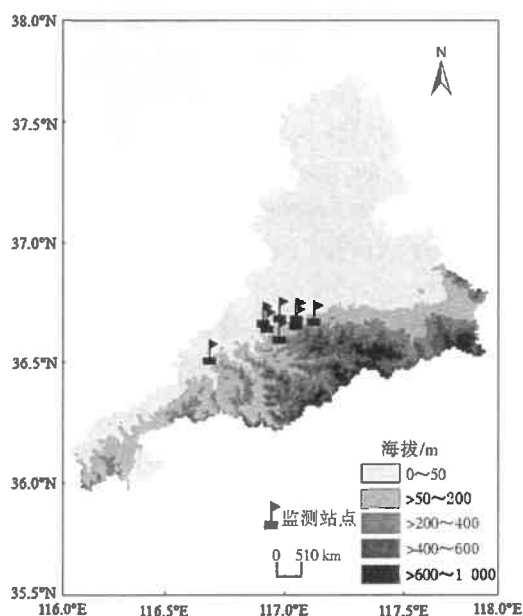


图1 研究区地理位置及空气质量监测站点分布
Fig.1 Location of the study area and distribution of air quality monitoring stations

1.2 研究方法

1.2.1 污染过程气象场数值模拟

WRF是一种完全可压非静力模式,采用Arakawa C网格,集数值天气预报、大气模拟及数据同

化于一体,目前主要应用于有限的天气研究和业务预报。采用WRF V3.9版本对NCEP-FNL再分析数据进行降尺度处理得到研究期间气象要素场。WRF包含众多物理和动力参数化方案,参考前人研究,选择的长波和短波辐射方案分别为RRTM和Dudhia方案,微物理方案为WSM 5-class方案,陆面过程方案为unified Noah land-surface方案,边界层和近地面方案为YSU和Revised MM5 Monin-Obukhov方案。设置2层1:3网格嵌套,其中模拟区域的中心经纬度为36.7°N、117.0°E,网格分辨率分别为18、6 km,对应格点数为105×105、148×148。读取WRF模拟得到的各气象要素数据,对各气象要素与PM_{2.5}浓度进行皮尔逊相关分析^[24],研究PM_{2.5}浓度与气象要素之间的关系。

1.2.2 污染物输送路径的后向轨迹分析

HYSPLIT是一种用于计算和分析大气污染输送、扩散轨迹的综合专业模型,目前广泛应用于多种污染物的地区传输扩散研究。结合GDAS提供的1°×1°再分析场资料,计算到达济南市的36 h后向轨迹,每天计算24个整点时次。城市上空300 m左右高度的大气污染以大尺度远距离的城市周边源输送为主,100 m以下则以低层城区尺度内近距离污染源影响为主^{[16]638},本研究选择轨迹模拟高度为300 m。

1.2.3 污染物的潜在源区分析

潜在源贡献法(PSCF)是基于条件概率函数发展而来的一种根据气流轨迹辨别污染源区的统计分析方法^[25]。PSCF通过结合污染轨迹(本研究以PM_{2.5}≥75 μg/m³对应轨迹为污染轨迹)和某污染物浓度来给出可能的污染源位置。PSCF计算公式为:

$$P_{ij} = m_{ij} / n_{ij} \quad (1)$$

式中: P_{ij} 为网格(i, j)的潜在源贡献; m_{ij} 为经过网格(i, j)的污染轨迹数; n_{ij} 为经过网格(i, j)的总轨迹数。

基于TrajStat软件^[26]对气流轨迹涉及区域(31°N~44°N、93°E~121°E)按0.25°×0.25°进行网格化处理。

由于 P_{ij} 是一种条件概率,当网格内 n_{ij} 较小时, P_{ij} 会有较大的不确定性,故需利用经验权重函数($W_{(n_{ij})}$)进行降误差处理(见式(2)和式(3))^[27]。

$$W_{(n_{ij})} = \begin{cases} 1.00 & 3.0n_{ave} < n_{ij} \\ 0.70 & 1.5n_{ave} < n_{ij} \leq 3.0n_{ave} \\ 0.42 & n_{ave} < n_{ij} \leq 1.5n_{ave} \\ 0.17 & n_{ij} \leq n_{ave} \end{cases} \quad (2)$$

$$WP_{ij} = W_{(n_{ij})} P_{ij} \quad (3)$$

式中: n_{ave} 为每个网格内平均轨迹数; WP_{ij} 为网格 (i, j) 的权重潜在源贡献。

P_{ij} 反映的是比值, 无法区分相同 P_{ij} 的网格 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献, 因此本研究引入浓度权重轨迹分析法(CWT)^[28]来反映不同轨迹的污染程度。CWT 中, 每个网格点 (i, j) 都有一个 $PM_{2.5}$ 权重质量浓度 $(C_{ij}, \mu g/m^3)$, 计算公式为:

$$C_{ij} = \frac{\sum_l C_l \times \tau_{ijl}}{\sum_l \tau_{ijl}} \quad (4)$$

式中: l 为经过网格 (i, j) 的气流权重轨迹序号; C_l 为轨迹 l 经过网格 (i, j) 时对应的济南市 $PM_{2.5}$ 质量浓度, $\mu g/m^3$; τ_{ijl} 为轨迹 l 在网格 (i, j) 停留的时间, 用落在网格内的气流权重轨迹数代替。

CWT 同样需要引入 $W_{(n_{ij})}$, 以减少 n_{ij} 较少时引起的不确定性, 计算公式为:

$$WC_{ij} = C_{ij} W_{(n_{ij})} \quad (5)$$

式中: WC_{ij} 为网格 (i, j) 的 $PM_{2.5}$ 最终权重质量浓度, $\mu g/m^3$ 。

2 结果与分析

2.1 $PM_{2.5}$ 污染特征

此次污染过程中 $PM_{2.5}$ 质量浓度逐时变化见图 2。整个污染过程历时 108 h, $PM_{2.5}$ 均值为 $155 \mu g/m^3$ 。2017 年 12 月 26 日 0:00 至 27 日 12:00, $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势较平缓, 无明显变化, 均值为 $85 \mu g/m^3$, 空气质量状况为轻度污染(空气质量指数(AQI)为 101~150)。27 日 12:00 至 28 日 23:00, $PM_{2.5}$ 明显上升, 从 $75 \mu g/m^3$ 升高到 $250 \mu g/m^3$, 空气质量状况为中度污染(AQI 为 151~200)。29 日, 污染水平加重, $PM_{2.5}$ 持续高值, 并在 12:00 达到峰值($341 \mu g/m^3$), 是《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准日均限值($75 \mu g/m^3$)的 4.5 倍, 空气质量状况为严重污染(AQI>300)。31 日 6:00 后, $PM_{2.5}$ 从 $126 \mu g/m^3$ 骤减到 $46 \mu g/m^3$, 并在 14:00 达到最低值($37 \mu g/m^3$), 空气质量状况转为良好(AQI 为 51~100)。综上, 济南市整个重污染天气过程演变经历了 3 个阶段: (1) 27 日 12:00 至 28 日 23:00, 污染物累积阶段(阶段 I); (2) 28 日 23:00 至 31 日 6:00, 污染物浓度达到峰值并保持持续高值的重污染持续阶段(阶段 II); (3) 31 日 6:00—23:00, $PM_{2.5}$ 降低到谷值的显著下降阶段(阶段 III)。

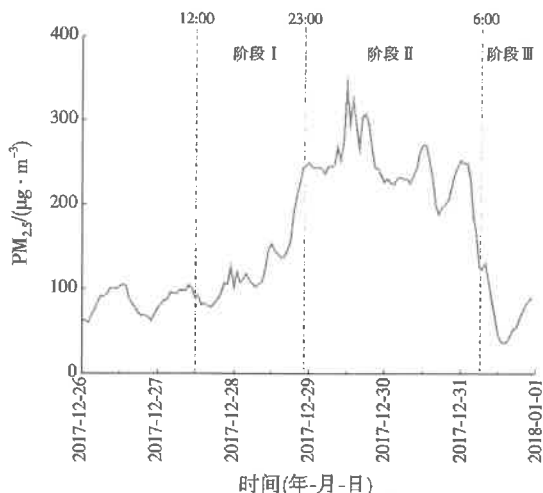


图 2 $PM_{2.5}$ 质量浓度逐时变化

Fig.2 Hourly variation of $PM_{2.5}$ mass concentration

2.2 污染过程的气象条件

2.2.1 气象要素变化特征

在污染源相对稳定的一定时期内, 气象要素是引起大气污染物浓度变化的重要因素^[29-30]。图 3 为各气象要素(相对湿度、风速、气压)的演变和 $PM_{2.5}$ 的变化趋势; 图 4 为各污染阶段典型时刻温廓线分布。

整个重污染天气期间, $PM_{2.5}$ 浓度与各气象要素有显著的相关关系($p < 0.01$), 气压和相对湿度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著的正相关, 相关系数分别为 0.85 和 0.67; 风速与 $PM_{2.5}$ 浓度呈负相关, 相关系数为 -0.48。污染期间不同阶段, 气象要素特征有明显差异, 主要表现为:

(1) 污染物累积前期: 相对湿度变幅较小, 大致在 50% 上下, 均值为 44%; 气压变幅较大, 3 h 变压最大达到 3.0 hPa, 总体呈下降趋势, 均值为 989 hPa; 风速变幅较大且不稳定, 为 1~8 m/s, 均值为 5.0 m/s。阶段 I 与污染物累积前期相比, 相对湿度与气压不断上升, 相对湿度的涨幅较大, 从 34% 增长到 96%, 气压的涨幅较小, 从 985 hPa 增加到 989 hPa。由图 4 可知, 在 850、975 hPa 处有逆温现象出现, 其中 850 hPa 处的逆温现象稍显著。经计算, 975 hPa 处平均逆温强度为 $0.002 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$, 而 850 hPa 处平均逆温强度为 $0.003 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 。研究表明, 逆温形成的上暖下冷的温度层结不利于污染物的垂直扩散, 导致水气和污染物的堆积^[31]。根据李令军等^[32]对大气重污染类型研究, 可将此次重污染天气过程定义为静稳累积型污染。

(2) 阶段 II: 气象要素处于一个相对稳定的状态。相对湿度均值为 77%, 且最高值达到 98%; 气

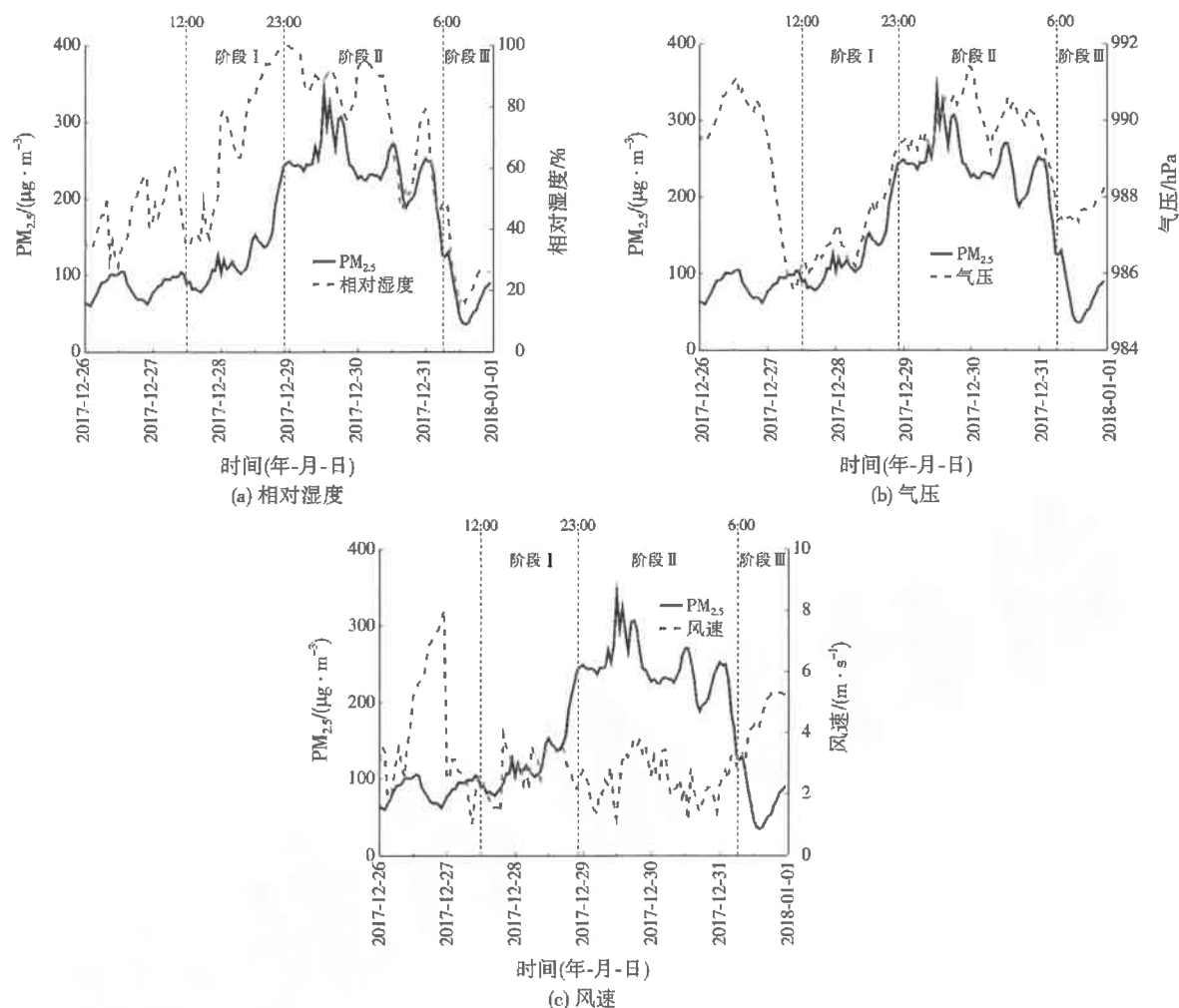


图3 $PM_{2.5}$ 逐时质量浓度与各气象要素变化

Fig.3 The variation of hourly $PM_{2.5}$ mass concentration and meteorological elements

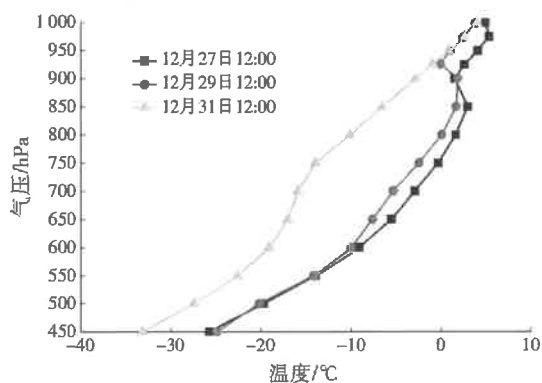


图4 各污染阶段典型时刻温廓线

Fig.4 Temperature profiles at typical times of each pollution stage

压均值为 987 hPa,在此期间 3 h 变压最大仅为 1.0 hPa;风速仍然较小,均值仅为 2.5 m/s。由图 4 可知,在近地面 900 hPa 处出现显著逆温现象,平均逆温强度为 0.009 °C/m,说明稳定的气象条件下,逆温层的出现会抑制空气的垂直对流运动,削弱甚至阻止空气环流的形成,导致重污染的持续。

(3) 阶段Ⅲ:相对湿度显著下降,下降到 20% 左右,均值仅为 20%;气压变化幅度较小,大致为 987~988 hPa,3 h 变压最大为 0.3 hPa;风速显著增大,逐渐增加到 5.4 m/s,均值达到 5.0 m/s。由图 4 可知,逆温现象消失。良好的天气条件使污染物迅速扩散,空气质量好转。

2.2.2 污染过程天气形势特征

天气形势的变化也同样影响大气扩散条件,从而影响区域污染物浓度。本研究对此次污染期间不同阶段典型时刻的天气形势进行分析,其中海平面气压场数据取自 NCEP-FNL 再分析数据,10 m 风场和相对湿度区域分布为 WRF 模拟数据。

(1) 阶段Ⅰ:我国主要气压系统包括中心在我国西部国家吉尔吉斯斯坦和蒙古—我国的黑龙江一带的高压系统、中心在西藏—青海和甘肃一带的低压系统。济南市位于中心在甘肃一带的低压前部及中心在蒙古—黑龙江一带的高压后部,地面受高压和低压双系统控制;近地面出现偏南气流,附近等压

线稀疏,风速较小。相对湿度南高北低,大致为40%~70%,地表由偏南风主导。由于济南市地势复杂,南高北低,来自东南方向的污染物受到南部山地的阻挡加之风速较小,外部污染物难以到达济南市。静风高湿的天气状况加速了污染物的本地累积。

(2) 阶段Ⅱ:中心在吉尔吉斯斯坦一带的高压系统东移到新疆—甘肃一带,中心在蒙古—黑龙江一带的高压北移到黑龙江—吉林一带,两个低压系统则向西南方向移动到西藏—四川一带。济南市位于中心在新疆—甘肃一带的弱高压前部的均压场,大气稳定度较好,近地面出现偏北气流。整体相对湿度>80%,地表由西北风主导,风速较小。济南市西北部的京津冀地区是我国冬季大气污染最严重的地区之一^{[17]645},西北方向的气流可能携带污染物南下,到达济南市。由于济南市地势南高北低,自西北方向的污染物被山体挡回,使污染物在济南市累积。稳定的天气形势、持续的小风高湿、地势南高北低等一系列不利于污染物扩散的天气条件导致本地污染的进一步累积,加剧了空气污染程度。

(3) 阶段Ⅲ:中心在新疆—甘肃一带的高压继续向东北方向移动到蒙古一带,中心在黑龙江—吉林一带的高压系统南移到江苏—浙江一带。济南市位于中心在江苏—浙江一带的弱高压系统内部,近地面出现偏南气流。相对湿度整体下降,大致为30%~40%,地表由东南风主导,风力较强。良好的扩散条件加速了污染物的移动,PM_{2.5}浓度随之降低,空气质量等级也变为优良,此次重污染天气过程结束。

2.3 输送路径及潜在源区分析

2.3.1 输送路径分析

以300 m为计算起始高度,收集2017年12月27—31日到达济南市的36 h后向轨迹,分阶段研究气团的后向轨迹。阶段Ⅰ气团来自东南方向的江苏中北部及济南市周边的临沂和泰安,呈带状分布,输送距离较短;阶段Ⅱ气团主要来自济南市西北方向,途经蒙古国、内蒙古、山西北部及京津冀地区;阶

段Ⅲ气团轨迹也来自西北方向,途经内蒙古中部、山西北部、河北南部,再经由鲁西南地区到达济南市。阶段Ⅱ、Ⅲ的气团输送距离均较长。

对整个重污染过程36 h后向轨迹进行聚类分析,结果见表1。重污染期间,到达济南市的气团轨迹可聚为5类,主要来自济南市西北方和东南方,分别占轨迹总数的49.29%和50.71%。轨迹2、3分别占轨迹总数的29.29%和21.43%,来自东南方向的江苏中北部和山东南部地区,且途经发达城市较多,受下垫面的影响较大,气团移动速度缓慢。由2.2.1节可知,整个重污染天气过程期间,风速较小,不利于污染物的输送与迁移。济南市三面环山,地势南高北低,东南方向的气流受到南部山地阻挡,难以到达济南市。因此,该种路径对污染过程的贡献需要进一步确定。轨迹1、4、5大致来自济南市的西北方向,主要是因为冬季我国受西伯利亚冷高压的影响,盛行西北风,故西北方向的气流轨迹占比较大。其中,轨迹4、5为长距离输送,说明气团移动速度较快,总和占轨迹总数的19.29%,经过内蒙古、山西、河北到达济南市。轨迹1为短距离输送,占轨迹总数的30.00%,主要来自西北方向空气污染严重的京津冀区域,途经城市较多,受下垫面影响较大,气团移动速度缓慢。济南市地势中间低四周高,三面环山,来自西北方向污染气流,受到南部山地的阻挡,加速了污染物的累积。同时,北方属于采暖期,大量燃煤燃料废弃的排放加剧了济南市地区的污染程度。

2.3.2 潜在源区分析

本研究针对济南市此次重污染过程中PM_{2.5}的潜在源区展开分析,从而进一步确定济南市PM_{2.5}的输送来源及贡献。研究期间济南市WP_{ij}与WC_{ij}分布如表2所示。研究期间,济南市PM_{2.5}的潜在源贡献较大值主要分布在江苏中北部穿过山东南部,呈条带状分布;经过济南市及周边,向北延伸到河北东南与山东德州、滨州交界处。这些地区对济南市PM_{2.5}的潜在贡献>0.7,其中江苏中北部,山东

表1 研究期间济南市气流后向轨迹聚类分析结果

Table 1 The clustering results of airflow backward trajectories in Jinan during the study period

轨迹序号	方向	途经区域	比例/%
1	西北	河北沧州、山东德州	30.00
2	东南	黄海、江苏连云港、山东临沂、泰安	29.29
3	东南	江苏中北部、山东临沂、泰安	21.43
4	西北	蒙古国、内蒙古中西部、山西北部、河北东南	14.29
5	西北	甘肃南部、内蒙古西部、山西北部、河北东南	5.00

表2 研究期间济南市 WP_{ij} 与 WC_{ij} 分布
Table 2 The distribution of WP_{ij} and WC_{ij} in Jinan during the study period

分布区域	WP_{ij}	$WC_{ij}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$
内蒙古中西部、山西北部、河北中南部(西北—东南走向,带状分布)	$>0.1\sim0.3$	$>40\sim80$
江苏东北部与山东东南沿海城市之间(块状分布)	$>0.1\sim0.5$	0
河北东南与山东德州、滨州交界处(块状分布)	$>0.7\sim0.9$	$>160\sim200$
江苏中北部与山东中南部泰安、淄博等地(东南—西北走向,条带状分布)	$>0.7\sim0.9$	$>160\sim200$
山东济南市本地(块状分布)	>0.9	>240

中南部泰安、淄博及济南市本地的 $PM_{2.5}$ 潜在贡献接近于1,表明这些地区是影响济南市 $PM_{2.5}$ 的主要潜在源区。

WC_{ij} 较大值主要集中在河北东南与山东德州、滨州交界处,江苏中北部与山东中南部泰安、淄博等地,这些地区 $WC_{ij}>160\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其中,济南市周边泰安、淄博等地 WC_{ij} 接近 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$,济南市本地 $WC_{ij}>240\mu\text{g}/\text{m}^3$,这表明泰安、淄博等地为此次重污染过程的潜在源区,且以济南市本地污染累积为主。结合2.3.1节,虽然来自东南方向的输送路径占比较多,但它对此次重污染天气过程的影响较小。

3 结 论

(1) 此次重污染天气过程属于静稳累积型污染,基于 $PM_{2.5}$ 浓度的逐时监测数据,将此次污染事件分为3个阶段:污染物累积阶段(阶段Ⅰ,27日12:00至28日23:00)、重污染持续阶段(阶段Ⅱ,28日23:00至31日6:00)和显著减弱阶段(阶段Ⅲ,31日6:00—23:00)。

(2) 整个重污染天气过程期间, $PM_{2.5}$ 浓度与各气象要素有显著的相关关系,气压和相对湿度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著的正相关,相关系数为0.85和0.67;风速与 $PM_{2.5}$ 浓度呈负相关,相关系数为-0.48。地面均压场、持续的小风高湿、逆温等静稳天气有利于污染物的持续累积;污染后期济南市位于弱高压内部,地表由东南风主导,风速变大,相对湿度降低,良好的扩散条件使此次重污染天气过程得到有效缓解。

(3) 此次重污染天气过程期间, $PM_{2.5}$ 主要输送路径为西北和东南路径,分别占轨迹总数的49.29%和50.71%,由于地形原因,东南路径对污染过程的影响不明显。济南市周边泰安、淄博等地 WC_{ij} 接近 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$,济南市本地 $WC_{ij}>240\mu\text{g}/\text{m}^3$,这表明泰安、淄博等地为此次重污染过程的潜在源区,且以济南市本地污染累积为主。

参考文献:

[1] KHEIRBEK I, HANEY J, DOUGLAS S, et al. The contribu-

tion of motor vehicle emissions to ambient fine particulate matter public health impacts in New York City: a health burden assessment[J]. Environmental Health, 2016, 15(1): 1-14.

[2] XIE Y, DAI H C, DONG H J, et al. Economic impacts from $PM_{2.5}$ pollution-related health effects in China: a provincial-level analysis[J]. Environmental International, 2016, 115: 220-229.

[3] 庄欣, 黄晓峰, 陈多宏, 等. 珠江三角洲 $PM_{2.5}$ 高污染天气的区域污染特征分析[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(10): 1088-1091.

[4] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418-427.

[5] TANG G Q, ZHAO P S, WANG Y H, et al. Mortality and air pollution in Beijing: the long-term relationship[J]. Atmospheric Environment, 2017, 150: 238-243.

[6] 李玉玲. 江苏省 $PM_{2.5}$ 时空分异及土地利用影响研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.

[7] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013年1月北京市一次空气重污染成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1154-1163.

[8] 张蓬勃, 金琼, 陆晓波, 等. 2013年1月持续性霾天气中影响污染程度的气象条件分析[J]. 气象科学, 2016, 36(1): 112-120.

[9] 周一敏, 赵昕奕. 北京地区 $PM_{2.5}$ 浓度与气象要素的相关分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 111-124.

[10] 徐丽娜, 李兴华, 冯震, 等. 呼和浩特市大气污染特征及气象影响因子研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(6): 150-157.

[11] 翟华, 朱彬, 赵雪婷, 等. 长江三角洲初冬一次重污染天气成因分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4001-4009.

[12] 程丽萍, 李嘉欣, 赵纲, 等. 基于 SPAMS 的石家庄市 2018 年春节期重污染过程研究[J]. 河北工业科技, 2019, 36(1): 66-74.

[13] 杨旭, 康延臻, 王式功, 等. 郑州市大气污染特征及其与气象条件的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 348-354.

[14] 王爱平, 朱彬, 银燕, 等. 黄山顶夏季气溶胶数浓度特征及其输送潜在源区[J]. 中国环境科学, 2014, 34(4): 852-861.

[15] 蒋伊蓉, 朱蓉, 朱克云, 等. 京津冀地区重污染天气过程的污染气象条件数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2681-2692.

[16] 王芳, 陈东升, 程水源, 等. 基于气流轨迹聚类的大气污染输送影响[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6).

[17] 李名升, 任晓霞, 于洋, 等. 中国大陆城市 $PM_{2.5}$ 污染时空分布规律[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3).

[18] 姜磊, 周海峰, 赖志柱, 等. 中国城市 $PM_{2.5}$ 时空动态变化特征分析: 2015—2017年[J]. 环境科学学报, 2018, 38(10): 3816-3825.

[19] 刘雨思, 李杏茹, 张怡萌, 等. 济南市秋冬季大气细粒子污染特征及来源[J]. 环境化学, 2017, 36(4): 787-798.

(下转第754页)