

太原市大气 PM_{2.5} 季节传输路径和潜在源分析

任浦慧,解静芳*,姜洪进,王淑楠,刘瑞卿 (山西大学环境与资源学院,山西 太原 030006)

摘要: 为了研究太原市大气 PM_{2.5} 不同季节的传输路径和污染源区,利用 HYSPLIT 后向轨迹模型和 NCEP 的 GDAS 全球气象要素数据,对 2017~2018 年不同季节太原市逐日 48h 气流后向轨迹进行聚类分析,同时结合小时污染物质量浓度数据,分析不同季节太原市 PM_{2.5} 的潜在源贡献因子(WPSCF)和浓度权重轨迹(WCWT).结果表明,太原市 PM_{2.5} 的质量浓度在季节上呈现冬季(77.56μg/m³)>秋季(69.89μg/m³)>春季(63.78μg/m³)>夏季(45.51μg/m³)的变化趋势.PM_{2.5} 与 SO₂、NO₂ 和 CO 之间存在明显的同源性和二次转化过程.春、秋和冬季大气传输路径主要以西和西北方向近距离、慢移速的轨迹为主,夏季以南和东方向轨迹为主.PM_{2.5} 潜在源区季节变化明显:夏季主要受太原本地和晋中地区的影响;春、秋和冬季主要受陕西中北部、吕梁、临汾和晋中等地的影响.

关键词: PM_{2.5}; 后向轨迹; 聚类分析; 潜在源贡献因子法; 浓度权重轨迹法

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2019)08-3144-08

Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} in different seasons in Taiyuan city. REN Pu-hui, XIE Jing-fang*, JIANG Hong-jin, WANG Shu-nan, LIU Rui-qing(College of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China). *China Environmental Science*, 2019,39(8): 3144~3151

Abstract: In order to study the transmission paths and pollution source areas of atmospheric PM_{2.5} in different seasons in Taiyuan City, the cluster analysis of daily 48-hour airflow backward trajectories during 2017 to 2018 was conducted, based on the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model and global data assimilation system (GDAS) meteorological element data from National Centers for Environmental Prediction (NCEP), and weighted potential source contribution function (WPSCF) and weighted concentration-weighted trajectory (WCWT) were calculated by combining with hourly pollutant concentration data. The results showed that the sort orders of the average mass concentrations of PM_{2.5} in different seasons of Taiyuan city were as follows: winter (77.56μg/m³)>autumn (69.89μg/m³)>spring (63.78μg/m³)>summer (45.51μg/m³). It seemed to exist the same source and the secondary conversion process between PM_{2.5} and SO₂, NO₂ and CO. The dominant pollutant transport trajectories of spring, autumn and winter were short distance and slow moving speed of airflow in the west and northwest directions; and the dominant transport trajectories of summer was in the south and east directions. The potential source areas of PM_{2.5} presented the obvious seasonal variations: in the summer, Taiyuan local and Jinzhong areas contributed greatly to the PM_{2.5} pollutions in Taiyuan City, while the PM_{2.5} pollutions of spring, autumn and winter were mainly affected by the central and northern Shanxi, Luliang, Linfen and Jinzhong areas.

Key words: PM_{2.5}; backward trajectories; cluster analysis; potential source contribution function (PSCF); concentration-weighted trajectory (CWT)

目前,太原市关于 PM_{2.5} 的研究主要集中于冬季采暖期间 PM_{2.5} 和气态污染物质量浓度的变化,研究时段相对较短^[1-3];研究内容主要集中在 PM_{2.5} 的组分特征、来源解析和健康风险评估等方面^[4-6],而关于传输路径和潜在来源区域的研究尚不多见.后向轨迹模型(HYSPLIT)、聚类分析、潜在源贡献因子方法(PSCF)和浓度权重轨迹方法(CWT)均是通过气流轨迹分析、识别大气污染物潜在来源,进而研究污染物输送扩散的有效手段.主要针对区域污染物分布、气流输送途径、不同方向气流轨迹对研究区域的传输以及影响空气质量浓度的潜在源区等进行研究^[7-10].此外,有研究者发现气流输送途径、轨迹特征及其污染物的分布存

在明显的季节变化^[11-13].

太原市的地形特征为三面环山,北高南低的簸箕型,大气 PM_{2.5} 不仅受本地排放源影响,也受周围地域排放源的传输影响,而不同季节主导风向不同、传输路径各异,不同地域污染源强度变化不同,因此研究 PM_{2.5} 的时空变化特征、传输途径和潜在来源对解决太原市 PM_{2.5} 污染问题有着重要的意义.由此,本研究在分析 2017 年 6 月 1 日~2018 年 5 月 31 日

收稿日期: 2018-12-26

基金项目: 国家大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG-05-11);国家公益性行业(农业)科研专项(201103024)

* 责任作者,教授, xiejf@sxu.edu.cn

太原市 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 浓度时间变化特征的基础上,使用 Spearman 相关系数分析 PM_{2.5} 与其他污染物之间的相关性.并使用后向轨迹聚类分析、PSCF 和 CWT 方法,研究了太原市不同季节 PM_{2.5} 的传输途径和潜在来源.

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

太原市大气 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 的监测数据,来自太原市空气质量实时数据发布平台(<http://183.203.223.83:85/aqi/>);气象数据(温度、湿度、风速)源自中国天气网(<http://www.weather.com.cn/>);后向轨迹聚类、PSCF 和 CWT 分析所需的气象场数据来自美国国家环境预报中心(NCEP)的全球资料同化系统(GDAS) (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).研究时段为 2017 年 6 月 1 日~2018 年 5 月 31 日.

1.2 方法

HYSPLIT 方法是将太原市市中心(37.54°N 112.33°E)作为后向轨迹的起始点,模拟起始高度设置为 500m,该高度能够准确反映边界层平均流场特征^[14].以每日 12:00 前推 48h 进行轨迹计算.同时结合 GIS 技术开发的 TrajStat 软件,将每个季节的气流轨迹进行聚类分析^[15],再结合对应的污染物质量浓度特征进行统计分析.

PSCF 分析法^[16]主要根据经过某一网格 ij 的污染轨迹数(m_{ij})占经过此网格的所有轨迹数(n_{ij})的比值来确定 PSCF 值的大小,PSCF 的值越大代表经过此网格的气团对接受点的空气质量影响的概率越大.具体公式如下:

$$\text{PSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (1)$$

由于 PSCF 是一种条件概率,当分母 n_{ij} 较小时,计算的 PSCF_{ij} 值会有很大不确定性.为了减少不确定性,故引入权重因子,将 PSCF 值乘以一个权重函数(W_{ij})^[17],即 $\text{WPSCF} = W_{ij} \times \text{PSCF}$.

W_{ij} 定义如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & 80 < n_{ij} \\ 0.72 & 20 < n_{ij} < 80 \\ 0.42 & 10 < n_{ij} < 20 \\ 0.05 & n_{ij} < 10 \end{cases} \quad (2)$$

PSCF 值是一种条件概率,在一定程度上可反映网格对接受点污染程度的贡献大小,但无法确定研究区域的污染程度.因此,本文进一步引用 CWT 分析法^[18-19],结合 $W(n_{ij})$ 计算每个网格中轨迹的污染权重指数来反映不同轨迹的污染程度.计算公式如下:

$$\text{CWT}_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M C_l \cdot \tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \cdot W(n_{ij}) \quad (3)$$

式中: CWT_{ij} 是网格 ij 的平均权重污染物浓度; C_l 是轨迹 l 经过网格 ij 对应的污染物浓度; τ_{ijl} 是轨迹 l 在网格 ij 的停留时间.同样,为减少 m_{ij} 值较小时所引起的不确定性,将 PSCF 分析法中的权重函数 W_{ij} 适用于 CWT 分析法,即:

$$\text{WCWT} = W_{ij} \times \text{CWT} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度季节变化特征

研究期间,太原市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的年均质量浓度分别为 $(64 \pm 37) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(140 \pm 64) \mu\text{g}/\text{m}^3$,二者分别为《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[20] 二级标准(35 和 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的 1.83 和 2.00 倍.太原市 PM_{2.5} 较 2016 年相比有所下降(约 15%),空气质量有明显的改善,但仍高于同期的北京和天津地区(<https://www.aqistudy.cn>).由图 1 可知,研究期间 31% 的天数超过了 PM_{2.5} 的二级日均标准限值 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 42% 的天数超过了 PM₁₀ 二级标准限值 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$.且 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 有显著的相关性,春、夏、秋和冬的相关系数分别为 0.766^{**}、0.805^{**}、0.894^{**} 和 0.916^{**}, $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 可以反映可吸入颗粒物中细颗粒物的含量,研究期间 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 均值为 0.45 ± 0.13 ,且细颗粒物 PM_{2.5} 的质量浓度与 PM₁₀ 日变化情况一致.

由图 2 可知,太原市 PM_{2.5} 的质量浓度在季节上呈现冬季 ($77.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 秋季 ($69.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 春季 ($63.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 夏季 ($45.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的变化趋势.其中冬季 PM_{2.5} 的质量浓度是夏季的 1.70 倍,类似的季节变化可能是由于各季节主要的污染源、排放量以及气象条件存在差异.夏季,太原市大气垂直扩散条件良好,抑制颗粒物的积累,还受东南季风的影响,带来大量的降水,加速细颗粒物的湿沉降,从而使 PM_{2.5} 质量浓度较低;冬季,煤炭燃烧等人类活动使 PM_{2.5} 的排放量增加,且边界层高度低,低湿、无风的静稳天气不利于污染物的扩散^[21].此外,夏季 PM_{2.5} 的质量

浓度相对集中,而秋、冬季的差异较大;根据中位数及均值,可以看出夏、冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度基本呈正态分布。

然而,与 $\text{PM}_{2.5}$ 不同的是: PM_{10} 在四季的平均质量浓度从高到低依次为春季($162.65\mu\text{g}/\text{m}^3$)>秋季($155.99\mu\text{g}/\text{m}^3$)>冬季($142.43\mu\text{g}/\text{m}^3$)>夏季($99.22\mu\text{g}/\text{m}^3$)。除了工业来源和不利的天气条件对

冬季空气污染稀释和扩散的综合影响外,春季还会受到来自北方沙尘的严重影响。生物质燃烧(例如秸秆露天焚烧)可能是导致秋季 PM_{10} 增多的原因。此外,除夏季外,秋、冬和春季的 PM_{10} 均值与中位数基本一致,而冬季 PM_{10} 的均值明显高于中位数,这可能是由于冬季发生几次以 PM_{10} 为主要污染物的重污染过程。

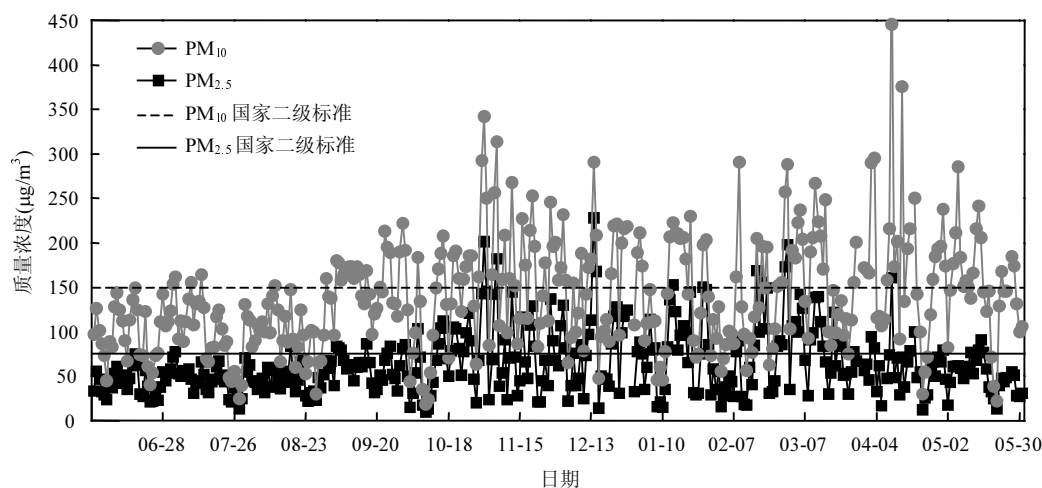


图1 2017年6月~2018年5月太原市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的日均质量浓度

Fig.1 Daily average mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in Taiyuan from June 2017 to May 2018

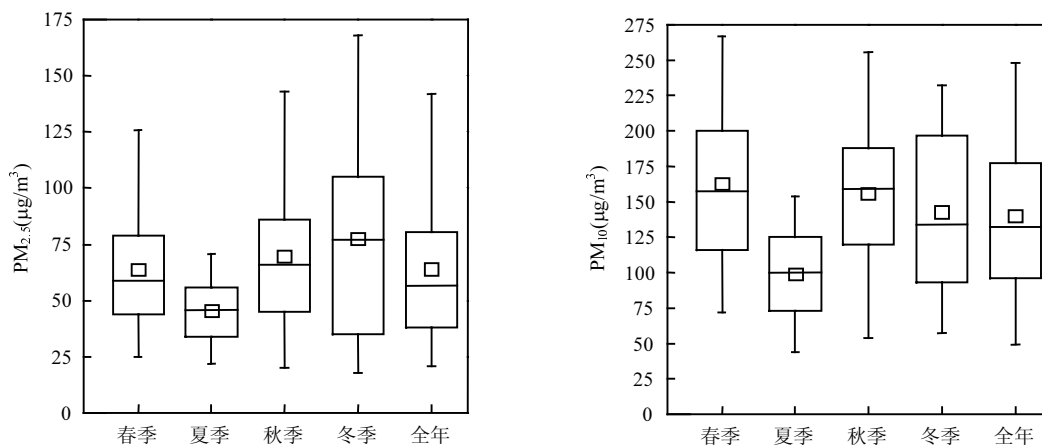


图2 太原市不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度

Fig.2 Average mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} of four seasons in Taiyuan

2.2 不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 与气态前体物及气象因素之间的关系

由表1可知, $\text{PM}_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 和 CO 在4个季节均呈不同程度的显著正相关;而 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 只在夏季和冬季分别呈现相反的正、负相关关系。大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 不仅来自于污染源的直接排放,也来自于 SO_2

和 NO_x 等气态前体物在大气中通过均相或非均相(在颗粒物表面)反应生成硫酸盐、硝酸盐和有机气溶胶等二次污染物^[22]。上述太原市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 和 CO 之间的良好正相关性,表明其相互间存在明显的二次转化过程,大气中的 SO_2 和 NO_2 通过均相或非均相反应生成硫酸盐和硝酸盐,对

PM_{2.5} 质量浓度变化具有重要影响.夏季高温、低湿和强的太阳辐射易产生大量的·OH,继而与 VOCs 反应形成 O₃.O₃ 和·OH 均可加速颗粒物表面的均相或非均相化学反应,生成二次颗粒物;而冬季 PM_{2.5} 形成的气溶胶消光作用对 O₃ 生成产生抑制作用,所以,PM_{2.5} 与 O₃ 在夏季和冬季分别呈现相反的正、负相关性.

表 1 不同季节 PM_{2.5} 与气态前体物的 Spearman 秩相关系数
Table 1 Spearman correlation matrix between PM_{2.5} and gaseous precursors in different seasons

季节	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃
春季	0.579**	0.455**	0.700**	0.120
夏季	0.501**	0.232*	0.695**	0.541**
秋季	0.683**	0.689**	0.911**	-0.139
冬季	0.743**	0.705**	0.897**	-0.299**

注:*表示P<0.05, **表示P<0.01.

此外,由表 1 可知,PM_{2.5} 与 SO₂、NO₂ 和 CO 具有较强的同源性,SO₂ 主要来源为化石燃料的燃烧,NO₂ 主要来自机动车排放和燃煤,CO 主要来源于冶金工业、内燃机排气和化石燃料的不完全燃烧.因此,煤炭燃烧和汽车尾气的排放对太原市大气 PM_{2.5} 具有较高的贡献.

由表 2 可知,春季 PM_{2.5} 与温度、湿度和风速均无明显的相关关系;夏季 PM_{2.5} 只与温度呈显著正相关;秋季 PM_{2.5} 与温度无明显的相关关系,而分别与湿度和风速呈显著正负相关性;冬季 PM_{2.5} 与温度和湿度均呈显著正相关,与风速呈显著负相关.

夏季高温,太阳辐射增强,可促进气态前体物气相和颗粒物表面氧化反应的进行,加速二次污

染的形成,导致夏季温度升高 PM_{2.5} 质量浓度增大;秋季较高的湿度能促使大气硫氧化物和氮氧化物被氧化成二次硫酸盐和硝酸盐^[23],加速颗粒物的吸湿增长,同时较低的风速减弱了对颗粒物的扩散作用,易导致 PM_{2.5} 的积累;冬季取暖化石燃料燃烧细颗粒物排放增大,低风速、高湿和逆温天气都是导致颗粒物污染严重的重要因素.

表 2 不同季节 PM_{2.5} 与气象因素的 Spearman 秩相关系数
Table 2 Spearman correlation matrix between PM_{2.5} and meteorological parameters in different seasons

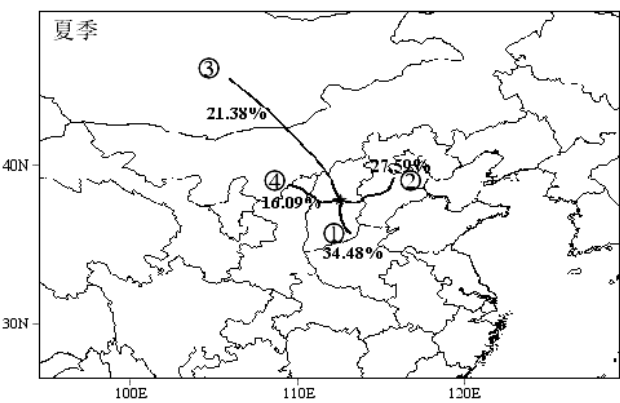
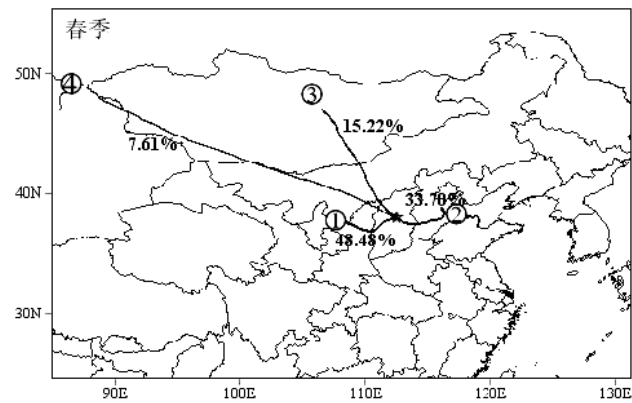
季节	温度	湿度	风速
春季	-0.063	-0.025	-0.075
夏季	0.329**	-0.131	-0.129
秋季	-0.091	0.263**	-0.377**
冬季	0.319**	0.661**	-0.604**
全年	-0.196**	0.082	-0.391**

注:*表示P<0.05, **表示P<0.01.

2.3 后向轨迹模型对 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 浓度的季节变化分析

根据不同季节 PM_{2.5} 与其他污染物之间相关性分析结果,选择相互关系较为密切的 PM₁₀、SO₂、NO₂ 进行后向轨迹聚类分析,结果见图 3.

由图 3 可知,研究期间,不同季节气流轨迹最终聚类的总类数不同,春、夏和冬均为 4 类,只有秋季为 5 类.由不同季节气流轨迹来看,太原市不同季节气流轨迹与季风气候关系密切.春、秋和冬季受冷空气南下的影响,盛行西北风,西北方向轨迹较长,但占比最高的气流轨迹主要集中于太原市西和西北方向,且以近距离、移速慢的轨迹为主;而夏季气流轨迹较为分散,以南和东方向轨迹为主.



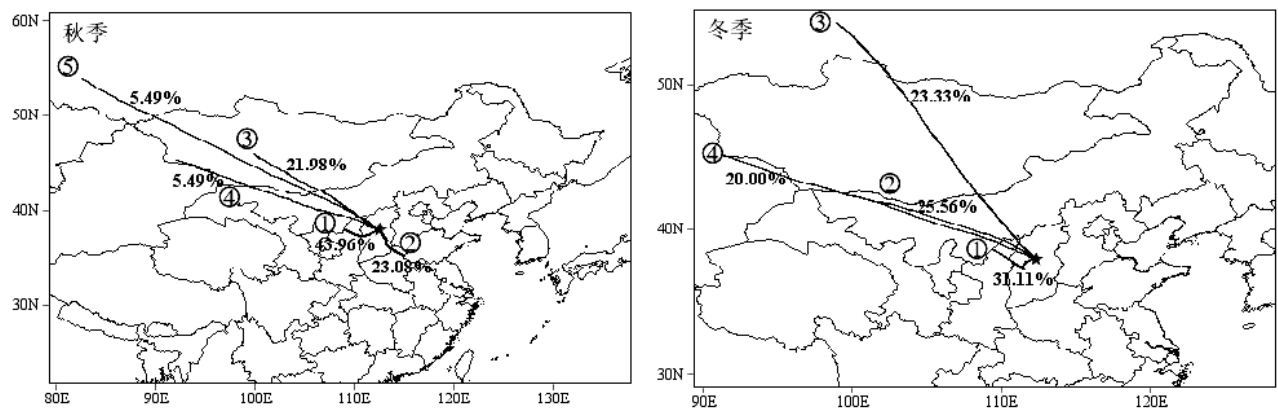


图3 太原市四季后向轨迹聚类分析

Fig.3 Clustering analysis of four seasons backward orbits in Taiyuan

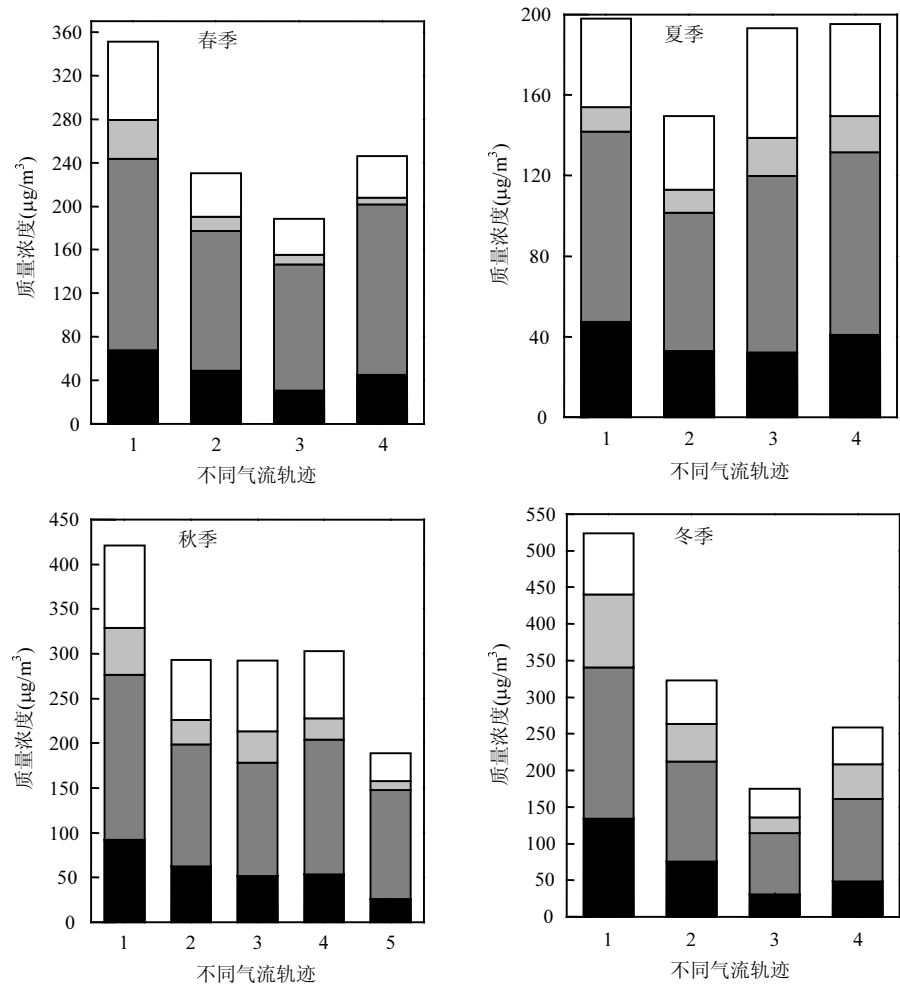


图4 四个季节不同气流轨迹污染物质量浓度

Fig.4 Concentration of pollutants from different clusters during four seasons

□ NO₂ ▒ SO₂ ■ PM₁₀ ■ PM_{2.5}

由图4可知,除夏季以外,其他3个季节基本遵循气流轨迹占比越大携带的污染物质量浓度越高.3个季节中来自西和西北方向近距离传输的气流轨迹占比最高,携带污染物(PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂和NO₂)

质量浓度亦最高.但亦存在气流轨迹占比最小,携带的污染物质量浓度较大的情况.如春季来自西北方向的远距离传输占比最小,却携带了较多的污染物,且可以看出以PM₁₀贡献为主,可能是传输过程中携

带了部分扬沙所致;秋季气流轨迹 4 和 5 虽然占比相同,但所携带的污染物质量浓度存在明显差异,主要以 SO₂ 和 NO₂ 的差异最为明显,说明气流轨迹占比和其携带污染物质量浓度大小之间的关系与轨迹的长度有关.相同占比情况下,轨迹越短所携带的污染物质量浓度越高.冬季气流轨迹 2、3 和 4 占比大小差异不大,但气流轨迹 3 携带的污染物质量浓度最小,可能是由于太原市的地形特征是三面环山,北高南低的簸箕型,来自北方的气流能吹散集聚的污染物,因此携带的污染物质量浓度较低.夏季不同气流轨迹长短不同,占比各异,但不同轨迹携带的污染物质量浓度差异不大,只有来自东边的气流轨迹携带污染物(PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 NO₂)质量浓度最小.而来自西北方向的气流轨迹携带了较高的 SO₂ 和 NO₂.除此之外,唯有夏季有来自南面山西长治和晋中等地的气流轨迹 1,且携带的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓

度相对较高.

综上所述,春、秋和冬季,污染物质量浓度较高的输送路径均来自西和西北方向的近距离输送,气流受太行山的阻挡,在太原盆地聚集,颗粒物质量浓度增大;夏季主要为南和东方向气流轨迹,其中来自南边的轨迹污染物质量浓度较高,受地形影响不易扩散;而来自偏东的轨迹经过地区污染源少,携带污染物质量浓度较低,有利于本地污染物的稀释和扩散.

2.4 PSCF 和 CWT 对不同季节 PM_{2.5} 潜在源分析

为了进一步厘清 PM_{2.5} 潜在来源,采用 PSCF 进行计算分析,将 HYSPLIT 计算的气流轨迹所覆盖的区域网格化,网格大小为 0.25°×0.25°, PM_{2.5} 标准值设为《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[20] 中的二级日均标准限值 75 μg/m³, WPSCF 计算结果见图 5.

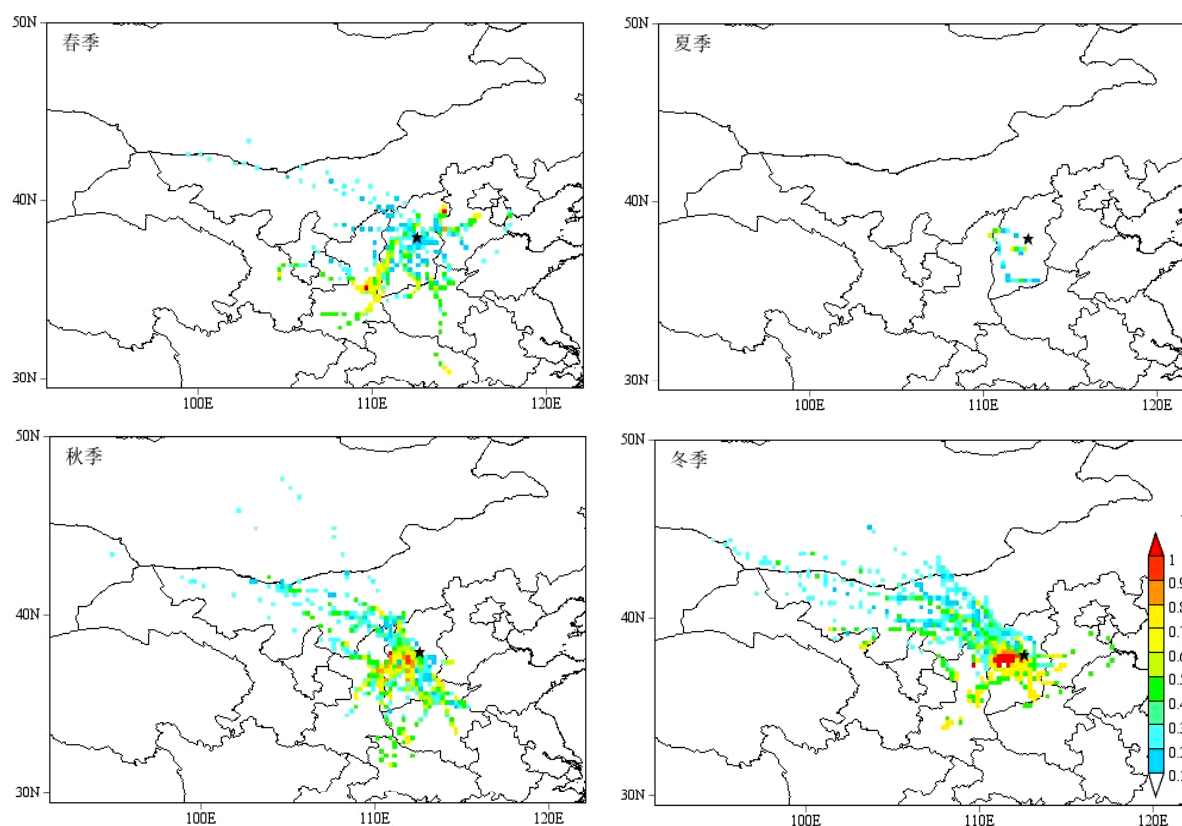


图 5 太原市四季 PM_{2.5} 的 WPSCF 分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of WPSCF in the four seasons of PM_{2.5} in Taiyuan

由图 5 可知,不同季节潜在源区分布不同.夏季 PM_{2.5} 质量浓度最低,其 WPSCF 值大多小于 0.1,其相对较大值集中在太原和吕梁地区,太原本地源贡献较高;春季太原市及周边的 WPSCF 值介于 0.1~0.4,

大于 0.7 的区域主要集中于经陕西东部、山西吕梁、临汾等地向太原市传输路径的汾渭平原一带;秋季太原市及周边的 WPSCF 值介于 0.2~0.5,WPSCF 大于 0.6 的区域主要在山西吕梁、临汾等地和陕西的

东北部;冬季 WPSCF 的整体值较其他 3 个季节是最高的,且潜在污染源区集中,WPSCF 值大于 0.8 的区域主要分布在太原市西部和山西吕梁地区.通过 PSCF 结果可以看到,潜在源区存在明显的季节变化,但也存在长时间影响的潜在源区,如陕西的东北部

在秋冬季 WPSCF 值均较高;此外,山西吕梁地区在秋冬季的 WPSCF 值也较高.

为了进一步验证 WPSCF 的分析结果,采用 CWT 方法,同样将计算的气流轨迹所覆盖的区域网格化,网格大小亦为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, WCWT 分析结果见图 6.

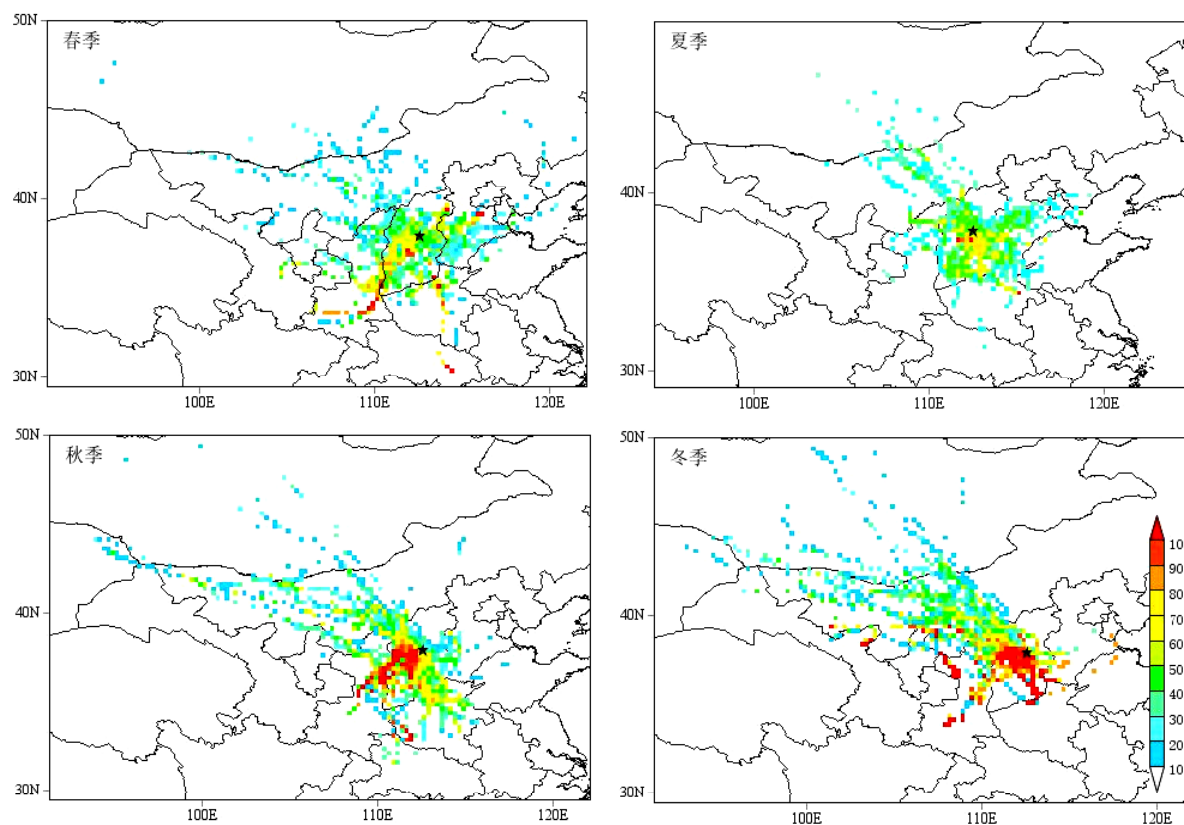


图 6 太原市四季 $PM_{2.5}$ 的 WCWT 分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of WCWT in the four seasons of $PM_{2.5}$ in Taiyuan

由图 6 可见,与 WPSCF 结果类似,夏季 WCWT 值最小,潜在源区的 WCWT 数值基本小于 $75\mu g/m^3$,较高 WCWT 值的贡献源区主要集中在太原市、晋中等地,这与夏季盛行东南风有关.春季主要是远距离运输,WCWT 值在 $75\sim 100\mu g/m^3$ 集中在由陕西经运城、吕梁、晋中向太原运输的路径;同样秋季 WCWT 值大于 $100\mu g/m^3$ 集中在山西的太原市南部、吕梁地区和陕西北部.冬季 WCWT 最大,贡献源区也有所变化,向西和向南延伸,除山西中部、陕西中北部外,山西南部也有贡献,这与各地取暖增加污染排放有关,太原市西、北、东三面环山,整个地形北高南低,且冬季多均压场的天气形势,本地污染物不易扩散,加之地面风场辐合,易导致周边污染汇聚.总之,春季和秋季主要受陕西和吕梁等地的影响,夏

季以太原市本地源的贡献为主,冬季主要来自太原市本地及周边城市如晋中、吕梁和长治等地的影响.

3 结论

3.1 研究时间段内,太原市 $PM_{2.5}$ 质量浓度在季节变化上呈现冬季($77.56\mu g/m^3$)>秋季($69.89\mu g/m^3$)>春季($63.78\mu g/m^3$)>夏季($45.51\mu g/m^3$)的趋势.

3.2 不同季节 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 均呈显著正相关关系,表明其存在明显的同源性;而 $PM_{2.5}$ 与 O_3 在夏季和冬季分别呈现相反的正、负相关关系.分析气象因素,夏季高温、秋冬季低风速和较高湿度是导致细颗粒物污染严重的重要气象因素.

3.3 太原市大气污染输送路径以近距离、移速慢的

轨迹为主。其中春、秋和冬季以西和西北方向轨迹为主;夏季轨迹较分散,以南和东方向轨迹为主,各轨迹携带高质量浓度污染物的轨迹与该轨迹占比基本一致。

3.4 对太原市 PM_{2.5} 潜在源贡献因子和浓度权重轨迹分析表明,太原市 PM_{2.5} 主要污染源区范围较小,夏季主要受太原本地和吕梁地区的短距离输送的影响,春、秋和冬季主要集中于陕西中北部、吕梁、临汾和晋中等地区。

参考文献:

- [1] 贾小花,解静芳,马翔,等.太原市冬季 PM_{2.5} 水溶性组分污染特征分析[J]. 中国环境科学, 2013,33(4):599-604.
Jia X H, Xie J F, Ma X, et al. Analysis of water-soluble constituents in winter of PM_{2.5} in Taiyuan City [J]. China Environmental Science (in Chinese), 2013,33(4):599-604.
- [2] 李义宇,杨鸿儒,王楠,等.太原市一次重污染天气过程的成因分析[J]. 气象与环境学报, 2018,34(2):11-18.
Li Y Y, Yang H R, Wang N, et al. Formation analysis of a severe air pollution event in Taiyuan [J]. Journal of Meteorology and Environment(in Chinese), 2018,34(2):11-18.
- [3] 耿红,宣莹莹,蔡夏童.太原市 2014 年春节期间常规大气污染物浓度变化及聚类分析[J]. 环境科学学报, 2015,35(4):965-974.
Geng H, Xuan Y Y, Cai X T. Mass concentration variation and cluster analysis of urban air pollutants in Taiyuan, Shanxi Province during Chinese New Year of 2014 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(4):965-974.
- [4] Zhang M, Xie J F, Wang Z T, et al. Determination and source identification of priority polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in Taiyuan, China [J]. Atmospheric Research, 2016,178:401-414.
- [5] He Q S, Yan Y L, Guo L L, et al. Characterization and source analysis of water-soluble inorganic ionic species in PM_{2.5} in Taiyuan city, China [J]. Atmospheric Research, 2017,184:48-55.
- [6] 李丽娟,温彦平,彭林,等.太原市采暖季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2014,35(12):0250-3301.
Li L J, Wen Y P, Peng L, et al. Characteristic of elements in PM_{2.5} and health risk assessment of heavy metals during heating season in Taiyuan [J]. Environmental Science (in Chinese), 2014,35(12):0250-3301.
- [7] 邓发荣,康娜, Kanike R K, 等.长江三角洲地区大气污染过程分析[J]. 中国环境科学, 2018,38(2):401-411.
Deng F R, Kang N, Kanike R K, et al. Analysis of air pollution episodes over different cities in the Yangtze River Delta [J]. China Environmental Science(in Chinese), 2018,38(2):401-411.
- [8] 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.
Zhai H, Zhu B, Zhao X T, et al. Analysis of a heavy air pollution event in early winter in the Yangtze River Delta [J]. China Environmental Science(in Chinese), 2018,38(11):4001-4009.
- [9] Zhao Y Z, Man S W, Kwon H L. Estimation of potential source regions of PM_{2.5} in Beijing using backward trajectories [J]. Atmospheric Pollution Research, 2015,6(5):173-177.
- [10] Liu B, Wu J, Zhang J, et al. Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on error estimation from EPA PMF 5.0 model at a medium city in China [J]. Environmental Pollution, 2017,222:10-22.
- [11] 任传斌,吴立新,张媛媛,等.北京城区 PM_{2.5} 输送途径与潜在源区贡献的四季差异分析[J]. 中国环境科学, 2016,36(9):2591-2598.
Ren C B, Wu L X, Zhang Y Y, et al. Analyze to the seasonal differences of transport pathways and potential source-zones of Beijing Urban PM_{2.5} [J]. China Environmental Science(in Chinese), 2016,36(9):2591-2598.
- [12] Sun K, Liu X G, Gu J W, et al. Chemical characterization of size resolved aerosols in four seasons and haze days in the megacity Beijing of China [J]. Journal of environmental Sciences, 2015,32: 155-167.
- [13] 史旭荣,温杰,田瑛泽,等.天津不同气团来向 PM_{2.5} 中组分和污染源贡献的季节变化[J]. 中国环境科学, 2018,38(7):2406-2144.
Shi X R, Wen J, Tian Y Z, et al. Seasonal patterns of PM_{2.5} sources and chemical composition from different air mass directions in Tianjin [J]. China Environmental Science (in Chinese), 2018,38(7):2406-2144.
- [14] 赵恒,王体健,江飞,等.利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源[J]. 热带气象学报, 2009,25(2):181-186.
Zhao H, Wang T J, Jiang F et al. Investigation into the source of air pollutants to Hong Kong by using backward trajectory method during the TRACE-P campaign [J]. Journal of Tropical Meteorology(in Chinese), 2009,25(2):181-186.
- [15] 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]. Environmental Modelling & Software, 2009,24(8):938-939.
- [16] Begum B A, Kim E, Jeong C H, et al. Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode [J]. Atmospheric Environment, 2005,39(20):3719-3724.
- [17] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, et al. The aerosol at Barrow, Alaska: long-term trends and source locations [J]. Atmospheric Environment, 1999,33(16):2441-2458.
- [18] Seibert P, Kromp-Kolb H, Baltensperger U, et al. Trajectory analysis of high-alpine air pollution data [M]. Air Pollution Modeling and Its Application X. Springer US, 1994:253-69.
- [19] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. Atmospheric Environment, 2003,37(4):545-562.
- [20] GB3095-2012 环境空气质量标准 [S].
- [21] Tao J, Gao J, Zhang L, et al. PM_{2.5} pollution in a megacity of southwest China: Source apportionment and implication [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014,14:8679-8699.
- [22] 丁萌萌,周健楠,刘保献,等.2015 年北京城区大气 PM_{2.5} 中 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 及前体气体的污染特征[J]. 环境科学, 2017,38(4): 1307-1316.
Ding M M, Zhou J N, Liu B X, et al. Pollution characteristics of NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ in PM_{2.5} and their precursor gases during 2015 in an urban area of Beijing [J]. Environmental Science(in Chinese), 2017, 38(4):1307-1316.
- [23] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A, et al. Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2006,40(10):3148-3155.

作者简介: 任浦慧(1992-),女,山西晋城人,山西大学硕士研究生,主要从事大气颗粒物的研究.发表论文 1 篇。