刘晓咏，王自发，王大玮，等. 2019. 邢台沙河市冬季大气污染特征与潜在源区分析 [J]. 气候与环境研究, 24(3): 313−323. Liu Xiaoyong, Wang Zifa, Wang Dawei, et al. 2019. Analyses of air pollution characteristics and potential sources in Shahe City, Xingtai during the winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(3): 313−323. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18125

# 邢台沙河市冬季大气污染特征与潜在源区分析

刘晓咏[1,2,3] 王自发[1,2,3] 王大玮[2] 向伟玲[2] 潘小乐[2] 刘航[2,3] 田雨[2,3]
张瑜[4] 王刘铭[2,3] 李杰[2] 苏方成[5] 贺泓[1]

1 中国科学院城市环境研究所区域大气环境研究卓越创新中心，福建厦门361021
2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室，北京100029
3 中国科学院大学，北京100049
4 成都信息工程大学，成都610103
5 郑州大学，郑州450001

**摘　要**　为了解邢台沙河市冬季大气污染特征，选取2017年12月至2018年2月沙河市区3个省控站点（司法局、市政府、宣传中心）的逐时监测数据，分析了沙河市主要污染物的时空分布特征和潜在源区。污染物浓度特征分析表明：整个冬季司法局、市政府和宣传中心站点的细颗粒物（PM2.5）平均浓度分别为118.0 μg/m$^3$、121 μg/m$^3$和135 μg/m$^3$。在大气自然活动和人为污染排放的共同作用下，PM10、PM2.5、$SO_2$、$NO_2$和CO均有明显的日变化特征。整个冬季沙河市的$\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10)、$\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$均值分别为0.57和1.05（$\rho$为各物质的浓度）。且随着污染加重，$\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10)、$\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$均明显升高，表明燃煤贡献增加；污染物空间分布特征分析表明：位于3个站点东北处的玻璃企业产生的污染物可能对监测站点造成了一定影响。污染物空间差异分析表明，区域污染范围越大、强度越高，大气污染的空间差异性越小；潜在源分析表明：沙河市PM2.5的强潜在源区分布在其周边区域，随着PM2.5浓度增加，强潜在源区呈缩小趋势。沙河市东南部的本地源对PM2.5浓度有主要贡献，而此处正是玻璃企业的聚集地。

**关键词**　工业城市　大气污染　时空分布特征　污染来源
**文章编号**　1006-9585(2019)03-0313-11　　**中图分类号**　X831　　**文献标识码**　A
**doi:**10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18125

# Analyses of Air Pollution Characteristics and Potential Sources in Shahe City, Xingtai during the Winter

LIU Xiaoyong[1,2,3], WANG Zifa[1,2,3], WANG Dawei[2], XIANG Weiling[2], PAN Xiaole[2], LIU Hang[2,3], TIAN Yu[2,3], ZHANG Yu[4], WANG Liuming[2,3], LI Jie[2], SU Fangcheng[5], and HE Hong[1]

1 *Center for Excellence in Regional Atmospheric Environment*, *Institute of Urban Environment*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xiamen*, *Fujian Province* 361021
2 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
4 *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610103
5 *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001

**收稿日期**　2018-09-15；**网络预出版日期**　2018-11-22
**作者简介**　刘晓咏，男，1992年出生，博士研究生，主要从事大气监测及数值模式研究。E-mail: xyliu@iue.ac.cn
**通讯作者**　王自发，E-mail: zifawang@mail.iap.ac.cn
**资助项目**　国家自然科学基金41675128
**Funded by**　National Natural Science Foundation of China (NSFC, Grant 41675128)

**Abstract** To study the air pollution characteristics in Shahe, Xingtai, Hebei Province in the winter, the air monitoring data collected at three monitoring sites from December 2017 to February 2018 are analyzed. Spatial and temporal characteristics and potential sources of major pollutants in Shahe are analyzed. The study reveals that the average mass concentrations of PM2.5 in the sites of Sifaju, Shizhengfu, and Xuanchuanzhongxin stations are 118.0, 121, and 135 μg/m$^3$, respectively. Under the joint effects of natural and anthropogenic emissions, the major pollutants display an obvious diurnal variation. Over the whole campaign period, mean values of $\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10) and $\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$ are 0.57 and 1.05 ($\rho$ is pollutant concentration), respectively. With the aggravation of air pollution, both $\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10) and $\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$ raise sharply, which demonstrate the increase in coal combustion. Analyses of spatial characteristics of pollutants illustrate that pollutants produced by glass enterprises located to the northeast of the three sites may have an impact on the monitoring sites. Analyses of spatial variation of air pollution reveal that the more severe the pollution, the smaller the spatial difference. For Shahe, local and surrounding cities are strong potential sources of PM2.5.With increases in PM2.5 concentration, the areas of strong PM2.5 source shrink. It is also found that local emission sources in southeastern Shahe, where most of glass factories are located, make a major contribution to high PM2.5 concentration in Shahe.

**Keywords** Industrial city, Air pollution, Spatial and temporal distribution characteristics, Pollution source

## 1 引言

近年来，我国经济发展迅猛，工业化和城市化进程加快。然而前期粗放型、高消耗和高污染的发展方式（Huo et al.，2014；Qi et al.，2017），对环境“欠账”严重，导致大气污染问题突出。珠三角、长三角、京津冀等（Zhang et al.，2008；Zhou et al.，2010；孙业乐，2018）区域性复合型污染事件频发，对人们的身体健康造成巨大威胁（Cao et al.，2005），引起了专家学者的广泛关注及讨论（吴兑，2012；张小曳等，2013；贺泓等，2013）。

尤其是2013年1月，我国中东部出现了长时间、高强度的灰霾事件，席卷了我国中东部、东北及西南共计10个省市区，受害人口高达8亿以上，其中北京细颗粒物（PM2.5）小时浓度最高超过600 μg/m$^3$（贺泓等，2013；王自发等，2014）。同年，国家从顶层设计，在战略高度上启动了大气污染防治行动计划（2013-2017），向灰霾和PM2.5污染宣战。

河北省是全国主要能源供应基地，煤炭、钢铁、水泥、石化等企业众多，聚集于石家庄、邢台、邯郸等城市。高强度的大气污染物排放、复杂的排放环境等使得河北省成为污染的重灾区。目前对河北省大气污染特征及成因的研究上，大都以区域（Huang et al.，2017）、省域（Wang et al.，2014）及单个地级市（Meng et al.，2016；Qin et al.，2017）为主要空间尺度，而针对更高空间分辨率—小城市上的研究尚少。这些小城市聚集着大量规模下的工业企业，亦是污染排放的重灾区，是不能忽视的重要排放源。明晰小城市的大气污染特征及成因，对区域联防联控有重要意义。

邢台市位于河北省南部，西依太行山与山西省毗邻，东邻京杭大运河与山东省相望，北连石家庄、衡水，南接邯郸。邢台市在全国74个重点城市空气质量排名靠后，大气污染不容乐观。沙河市为县级市，隶属于邢台市，是我国的玻璃城，在此生产的玻璃占全国平板玻璃总量的近20%，产能居全国之首。2017年，国家启动了大气重污染成因与治理攻关项目，经过一系列努力京津冀及周边地区空气质量显著改善。沙河市的PM2.5、PM10、$NO_2$等各项空气主要污染物也均有不同幅度降低，但污染仍较重，在邢台区县空气质量排名靠后。

基于此，本研究使用沙河市3个省控站点冬季的环境监测资料，分析主要污染物的时间变化、空间分布特征和污染来源，初步揭示大气污染成因，为进一步改善沙河市环境状况，制定合理、经济的环保措施提供一定的参考依据。

## 2 材料及方法

### 2.1 观测站点及观测仪器

3个省控监测站分别为市政府站点（114.5098°N，36.8613°E）、司法局站点（114.5248°N，36.8820°E）、宣传文化中心站点（简称宣传中心）（114.5136°N，36.8734°E）（见图1）。3个省控站点位于沙河市东南角，彼此相距1.4～2.5 km。沙河市冬季盛行北

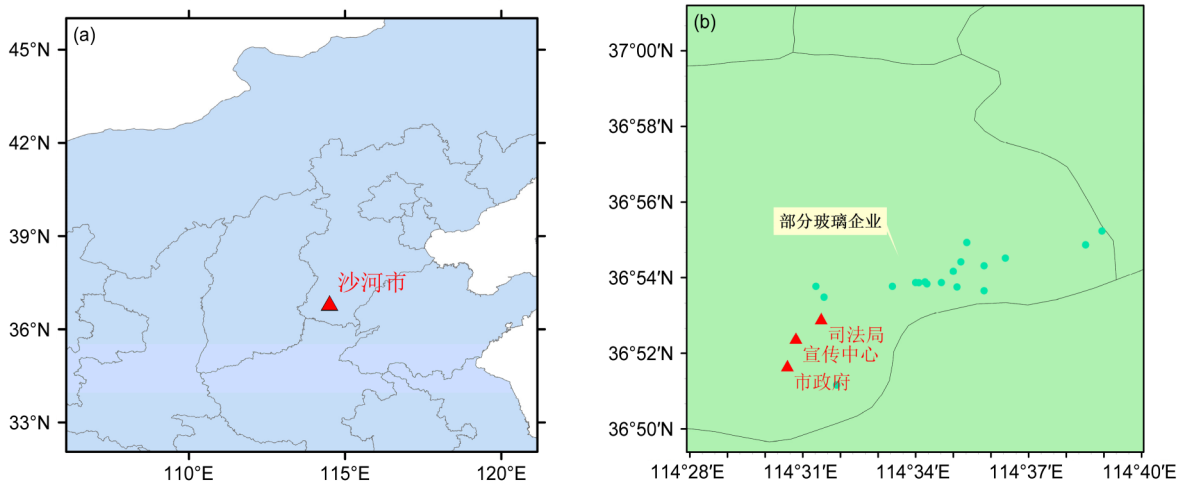


图1　（a）沙河市及（b）3个监测站点所在位置

Fig. 1　Locations of (a) Shahe and (b) the three monitoring sites

风，在3个站点上风位（东北方位）6 km处聚集着大量玻璃企业。3个站点可表征本地企业排放对空气质量的影响，因此拟采用此3个站点的监测数据作为研究基础。

观测时段为2017年12月1日至2018年2月27日。PM2.5、PM10、$O_3$、$NO_2$、$SO_2$和CO质量浓度及气象数据均来源于河北省沙河市环境监测（市政府、司法局和宣传文化中心）站点的连续观测资料（小时值）。其中，PM2.5和PM10监测仪基于$\beta$射线法，$SO_2$和$O_3$基于紫外吸收法，$NO_2$基于化学发光法，CO基于气体相关滤波法。

### 2.2　潜在源贡献因子分析法

潜在源贡献因子（potential source contribution function，PSCF）分析法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（Begum et al.，2005；王爱平等，2014；朱书慧等，2016），其定义为经过某一区域的气团到达观测点时对应的某要素值超过设定阈值的条件概率（记为PSCF）。将研究区域划分为一定分辨率的若干个网格（$i$，$j$），对研究的要素（本研究为PM2.5）设定一个阈值（本研究分别设置了0、75、150 μg/m³ 3个阈值），当轨迹所对应的要素值高于这个阈值时，认为该轨迹是污染轨迹，PSCF计算式为

$$F_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}}, \tag{1}$$

其中，$F_{ij}$为网格（$i$，$j$）的潜在源贡献因子，$m_{ij}$为经过网格（$i$，$j$）的污染轨迹端点数，$n_{ij}$为落在网格（$i$，$j$）内的所有轨迹端点数。

PSCF的误差会随着网格与采样点的距离增加而增加（王爱平等，2014），当$n_{ij}$较小时，会有很大的不确定性。为了降低这些特殊网格对于计算结果的影响，引入权重系数$W_{ij}$来降低PSCF的不确定性（Hopke et al.，1995；Xu and Akhtar，2010），记为$W_{\mathrm{PSCF}}$（weighted potential source contribution function，WPSCF）：

$$W_{\mathrm{PSCF}} = F_{ij} W_{ij}, \tag{2}$$

其中$W_{\mathrm{PSCF}}$为网格（$i$，$j$）的权重潜在源贡献因子。$W_{ij}$的取值如下式：

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, 3n_{\mathrm{ave}} < n_{ij} \\ 0.70, 1.5n_{\mathrm{ave}} < n_{ij} \leqslant 3n_{\mathrm{ave}} \\ 0.4, n_{\mathrm{ave}} < n_{ij} \leqslant 1.5n_{\mathrm{ave}} \\ 0.17, n_{ij} \leqslant n_{\mathrm{ave}} \end{cases} \tag{3}$$

其中$n_{\mathrm{ave}}$为每个网格的平均轨迹端点数。

### 2.3　浓度权重轨迹分析

PSCF算法反映的是网格对受点污染程度的贡献大小，不能区分相同PSCF值的网格对观测点污染程度贡献的大小，即网格内轨迹的要素值高出设定阈值的程度范围。而浓度权重轨迹（concentration weighted trajectory，CWT）分析可以通过计算轨迹的权重浓度定量给出每个网格的平均权重浓度（Hsu et al.，2003；朱书慧等，2016），反映不同网格区域对研究区域的污染程度贡献。同时也引入权重系数$W_{ij}$来降低CWT的不确定性，记为WCWT（weighted concentration weighted trajectory），计算公式如下：

$$C_{ij}=\frac{\sum_{l=1}^{M}C_{l}\cdot\tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^{M}\tau_{ijl}}\cdot W_{ij}, \quad (4)$$

其中，$C_{ij}$为网格（$i$，$j$）的平均权重浓度，$l$是轨迹，$M$为网格（$i$，$j$）内的轨迹数，$C_l$为轨迹$l$经过网格（$i$，$j$）时对应的受点PM2.5质量浓度，$\tau_{ijl}$为轨迹$l$在网格（$i$，$j$）所停留的时间。

## 3 结果与讨论

### 3.1 污染物浓度特征分析

#### 3.1.1 站点污染物浓度水平

图2为观测时段内沙河市3个省控站点PM10、PM2.5、$SO_2$、$NO_2$、CO等主要污染物的时值浓度盒须图。图2所示，3个监测站点的污染物浓度有所差异。市政府、司法局、宣传中心的$\rho$(PM2.5)、$\rho$(PM10)均值分别为118.0、121、135 μg/m³和188、193、217 μg/m³，均以宣传中心最高。$\rho$($SO_2$)和$\rho$(CO)由高到低依次为市政府、宣传中心、司法局。3个站点$SO_2$与CO的Pearson相关系数分别为0.71、0.76、0.71，这表明3个站点均受含硫燃料的不完全燃烧影响。市政府、司法局、宣传中心的$\rho$($NO_2$)均值分别为65、69、59 μg/m³。

#### 3.1.2 站点污染物浓度日变化特征

3个监测站点PM10、PM2.5、$SO_2$、$NO_2$、CO等主要污染物的浓度日变化见图3。图3所示，3个监测站点的PM10、PM2.5日变化趋势相同，均呈现“双峰”特征，第一个峰出现在10:00（北京时间，下同）左右，谷值出现在15:00前后，第二个峰值出现在23:00前后。00:00至19:00，司法局站点PM2.5浓度一直高于市政府，而19:00后两者浓度基本持平，表明夜间司法局站有更强烈的排放源。宣传中心站点的$\rho$(PM2.5)、$\rho$(PM10)均最高，而$\rho$($NO_2$)、$\rho$($SO_2$)较低，表明宣传中心站点受颗粒物直接排放的影响更大。

3个站点的$SO_2$变化趋势较为一致，浓度由高到低依次为市政府、宣传中心、司法局。10:00出现第一个峰值，推测为沙河市的$SO_2$主要来自企业的高架排放，夜晚大气较稳定、$SO_2$逐渐累积，并在混合层顶上形成残留层（许波等，2017），日出后边界层的内部扩散增强，$SO_2$残留层迅速向地面传输，在10:00前后混合均匀。随后太阳热力作用加强，大气更不稳定，对$SO_2$的稀释扩散和水平输

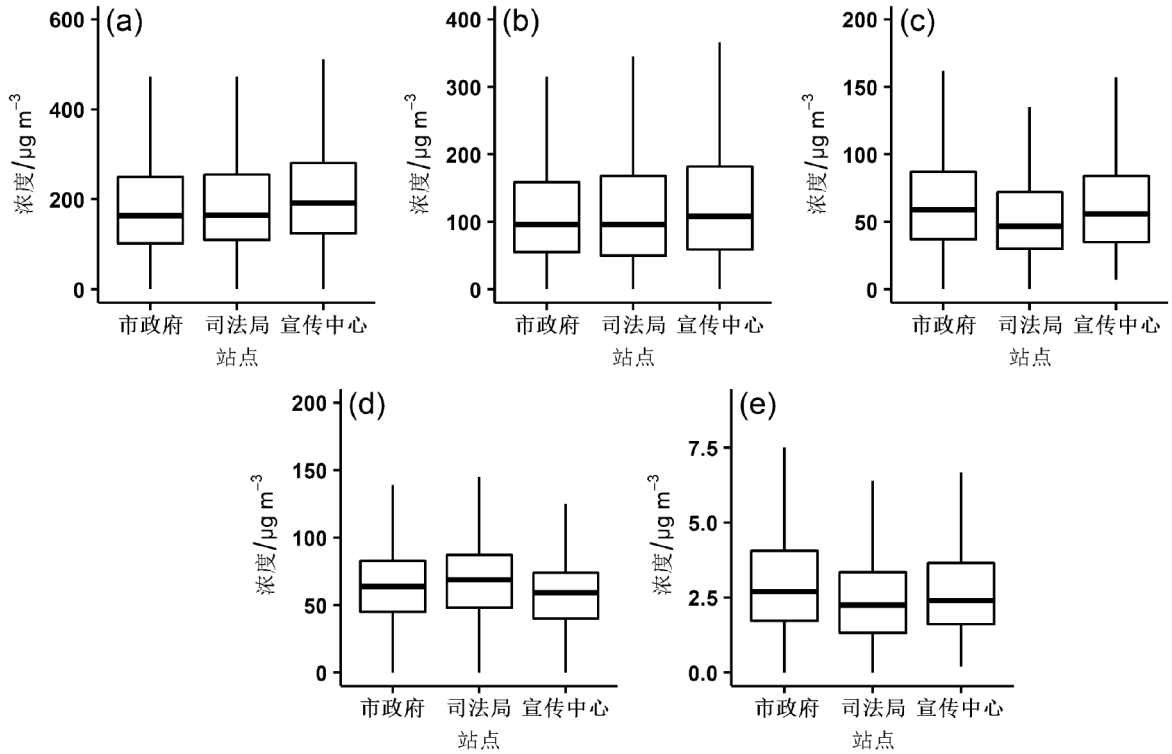


图2 2017年冬季沙河市3个监测站点主要污染物（a）PM10、（b）PM2.5、（c）$SO_2$、（d）$NO_2$、（e）CO浓度盒须图

Fig. 2 Box-and-whisker plots of principal atmospheric pollutants (a) PM10, (b) PM2.5, (c) $SO_2$, (d) $NO_2$, and (e) CO concentrations at three observational sites in Shahe in the winter of 2017

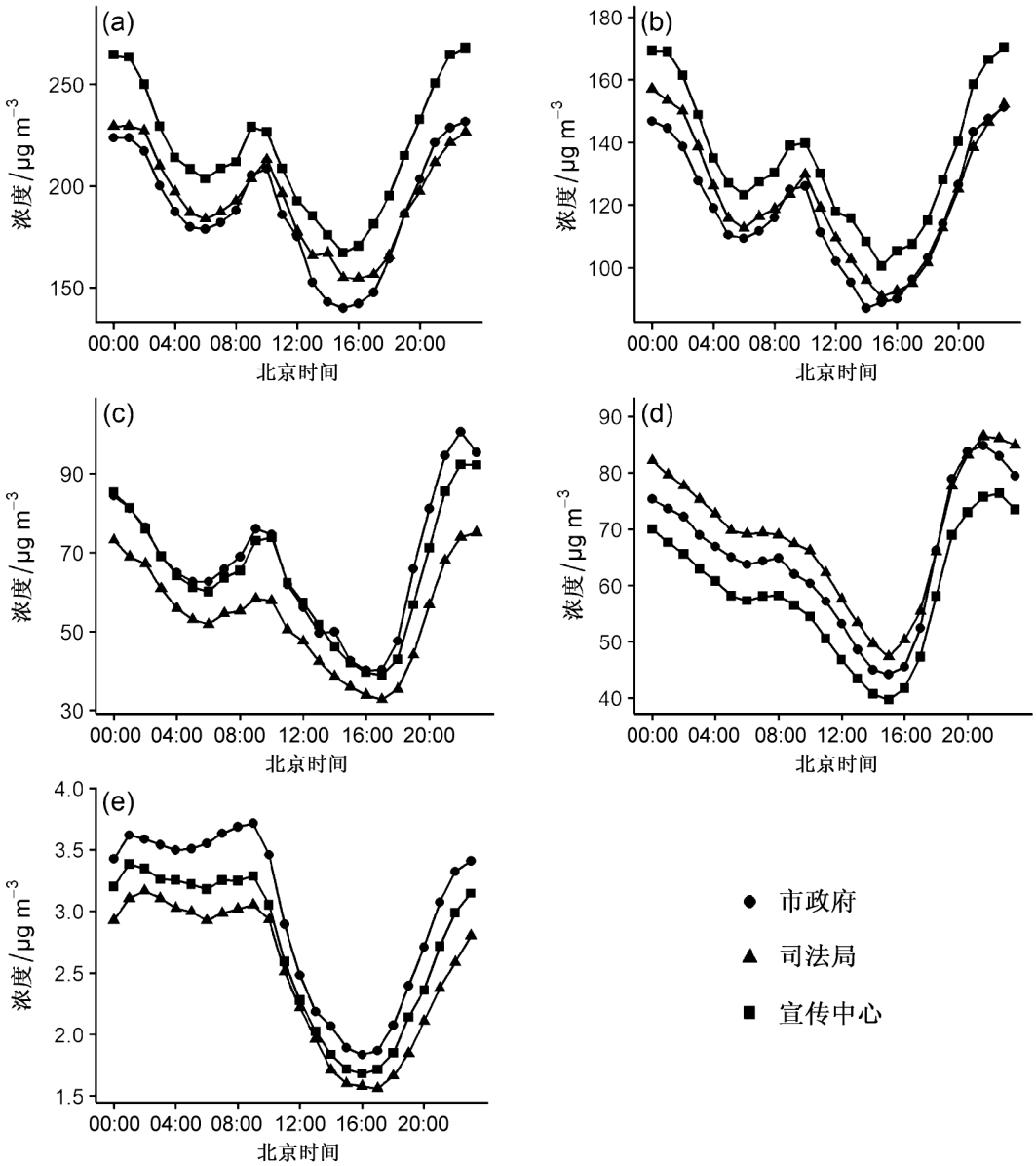


图3　2017年冬季沙河市3个监测站点主要污染物（a）PM10、（b）PM2.5、（c）$SO_2$、（d）$NO_2$、（e）CO浓度日变化

Fig. 3　Diurnal variations of principal atmospheric pollutants (a) PM10, (b) PM2.5, (c) $SO_2$, (d) $NO_2$, and (e) CO concentrations at three observational sites in Shahe in the winter of 2017

送作用增强，使得低层大气$SO_2$浓度降低（孟晓艳等，2009）。17:00以后气象条件不利与大气扩散，加之取暖源排放开始增大，$SO_2$积累到22:00左右达到第二个峰值。

$NO_2$的变化上，3个站点在8:00左右出现小峰值，可能源于早交通高峰。夜间由于太阳辐射的消失，$NO_2$的光解反应停止（徐鹏等，2014），同时边界层下降、晚高峰排放的累积，因此造成夜间$NO_2$的高值。在15:00左右出现的谷值，可能也和此时段$NO_2$向亚硝酸（$HNO_2$）的转化有关（Clapp and Jenkin，2001）。

对于CO，3个站点的日变化趋势基本相同。00:00至05:00，CO浓度维持在中游水平。06:00城市生活开始，CO累积，至10:00前后出现峰值。随着太阳辐射增强，大气边界层上升，CO浓度下降，在16：00前后出现谷值，与在北京观测到的结果类似（刘希文等，2014）。

### 3.1.3　三个站点污染物浓度比值特征分析

PM2.5与PM10的浓度比值表示颗粒物中细颗粒物的比例，体现人为源排放细粒子的贡献。

$\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$可在一定程度上指示燃煤和机动车排放的相对重要性。表1给出了不同空气质量指数下各站点的$\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10)和$\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$值。

整个观测期间，$\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10)均值为0.57，低于成都冬季的0.85（Li et al.，2015），与南京（贾梦唯等，2016）、邯郸（许亚宣等，2015）较为接近。清洁天时3个站点$\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10)在0.41～0.53，当污染加重，比值也增加，最高至0.71，表明污染过程中二次粒子的化学转化对细颗粒物浓度的影响增大。

2017年12月至2018年2月3个站点$\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$均值为1.05，同时期北京值为0.21、重庆为0.22、邯郸为0.81、邢台为0.71（数据来自环保部数据中心 http：//datacenter.mep.gov.cn/［2018-04-16］），与重庆2012年冬季值相同（徐鹏等，2014），高于西安2016年均值0.52（朱常琳等，2017）。中重度污染等级下，3个站点$\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$均值为1.12，同样污染等级下兰州市2002～2011年的均值为1.59（赵敬国等，2015）。

截止2017年6月底，北京、重庆汽车保有量分别为555万、350万辆，而沙河市作为县级市，汽车保有量远低于北京、重庆等大城市。沙河市作为典型的工业城市，煤炭是其主要的消费能源。因此$\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$偏高，燃煤对污染的贡献高于机动车排放。同时随着污染加重（如表1所示），$\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$呈升高的趋势，表明污染期间燃煤的贡献升高。

**表1 2017年12月至2018年2月3个站点PM2.5与PM10、$SO_2$与$NO_2$质量浓度比值的平均值**

**Table 1 $\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10) and $\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$ at three observational sites in Shahe from Dec 2017 to Feb 2018**

| 污染等级 | 监测站点 | 平均值 | |
|---|---|---|---|
| | | $\rho(SO_2)/\rho(NO_2)$ | $\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10) |
| 优良 | 市政府 | 1.1901 | 0.5338 |
| | 司法局 | 0.7379 | 0.4114 |
| | 宣传中心 | 1.0786 | 0.4757 |
| 轻度 | 市政府 | 1.0888 | 0.5698 |
| | 司法局 | 0.7778 | 0.5597 |
| | 宣传中心 | 1.1432 | 0.5404 |
| 中重度 | 市政府 | 1.1092 | 0.6738 |
| | 司法局 | 0.8463 | 0.7051 |
| | 宣传中心 | 1.3924 | 0.6738 |

### 3.2 污染物空间分布特征

#### 3.2.1 污染物条件概率分布

条件概率函数（conditional probability function，CPF）可展示污染物高浓度下的主导风向，并给出条件概率：

$$P_\theta = m_\theta / n_\theta, \tag{5}$$

其中，$P_\theta$污染物在$\theta$风向上的条件概率，$m_\theta$为$\theta$风向上混合比高于某值的样品数量，$n_\theta$为相同风向上样品总数量。图4给出了3个站点主要污染物90%分位浓度的概率图。

市政府站点高浓度的PM2.5、PM10和$NO_2$由偏北风主导，司法局站点和宣传中心站点分别由西北风和东北风主导。污染物均在北方位展现出高浓度特征，表明监测站点北方可能有颗粒物和$NO_2$的排放源，与沙河市玻璃企业分布特征相似（如图1b）。玻璃制造过程中的玻璃熔窑烟气、原料处理含粉尘废气、熔化工段和切装工段产生的含尘废气，以及无组织粉尘排放等，均会产生颗粒物。玻璃制造工艺中常在配合料里引入一定量的硝酸盐，导致氮氧化物的产生。另一方面，企业生产过程中需交通工具（多为重型卡车）为运输载体，也排放氮氧化物。玻璃企业产生的污染物可能对监测站点有一定影响。

#### 3.2.2 污染物空间相关性

使用高斯核函数对风向和径向变量（风速）加权，分别计算3个站点$NO_2$和$SO_2$、CO和$SO_2$的加权皮尔森相关系数（$r$=1表示完全相关），见图5。

CO和$SO_2$的高相关性可表示煤的不完全燃烧。图5所示，3个站点均在不同程度上受煤的不完全燃烧影响，尤其是司法局站点所受影响最大。3个站点相关系数玫瑰图差异较大，表明站点受不同局地源影响。在东北风时，3个站点的CO和$SO_2$均表现出高相关性，表明此方位有燃煤源，可能是来自于企业。

$NO_2$和$SO_2$的高度相关表示来源具有一致性。偏北风向上，3个站点$NO_2$和$SO_2$的$r$达0.7以上。可能是东北方位处的企业烟气排放影响了3个监测站点。

#### 3.2.3 站点空间差异性

使用自动归一化指数——发散系数（coefficient of divergence，CD，记为$C_D$）比较沙

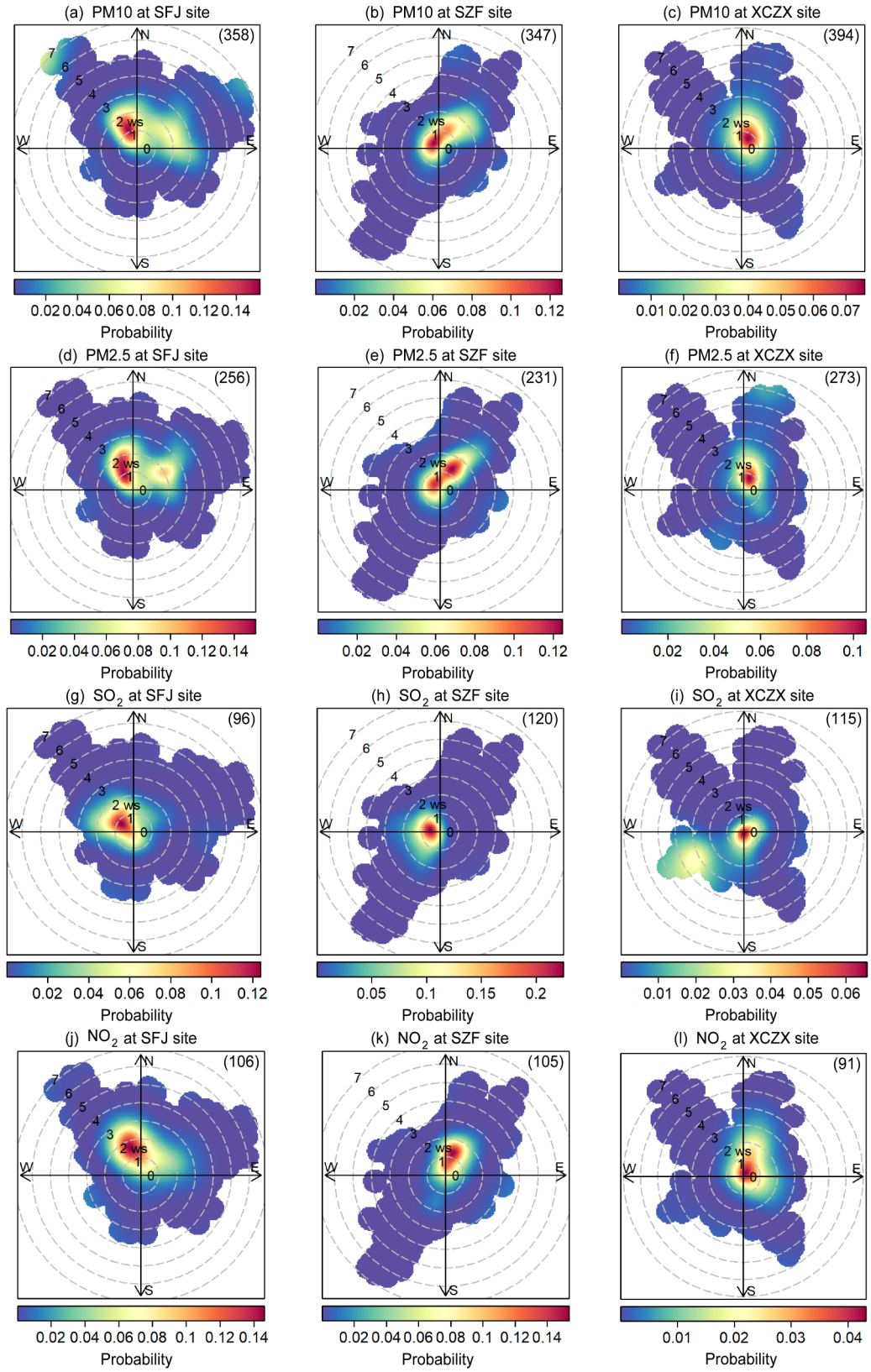


图4　2017年冬季沙河市3个监测站点（司法局、市政府、宣传中心）主要污染物90%分位浓度（右上角数值，单位：μg/m³）的概率分布（填色；半径为风速，单位：m/s）

Fig. 4　Probability distributions of mass concentration above the 90th percentiles for principal atmospheric pollutants (values right top, units: μg/m³) at three observational sites (SFJ, SZF, and XCZX) in Shahe in the winter of 2017 (shadings; radius are wind speeds, units：m/s)

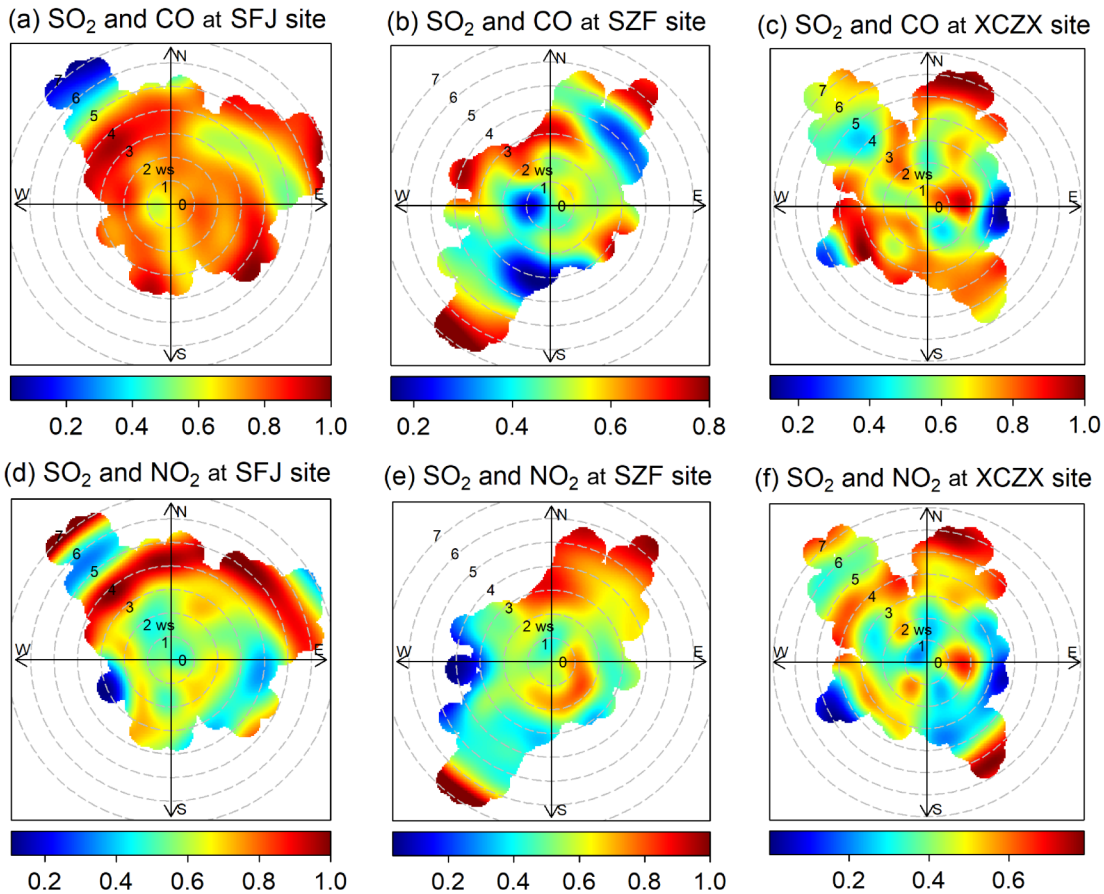


图5 2017年冬季沙河市3监测站点CO浓度与$SO_2$浓度、$SO_2$浓度与$NO_2$浓度相关系数玫瑰图

Fig. 5 Rose diagrams of correlation coefficients between CO concentration and $SO_2$ concentration, and between $SO_2$ concentration and $NO_2$ concentration at three observational sites in Shahe in the winter of 2017

河市3个站点的大气污染空间差异。CD的计算公式为

$$C_{\mathrm{D}\,nk} = \sqrt{\frac{1}{p}\sum_{m=1}^{p}\left(\frac{x_{mn}-x_{mk}}{x_{mn}+x_{mk}}\right)^2}, \qquad (6)$$

其中，$n$、$k$表示不同的采样点，$m$表示污染物种类，$x_{mn}$、$x_{mk}$表示不同采样点污染物$m$在某采样时段内的平均浓度值，$p$表示污染物种类数。

分别计算不同空气质量指数下站点之间的CD值，结果如表2。

若CD值接近0，表明两站点污染相似。接近1，则空间差异明显（Park and Kim，2004；刘卫等，2017）。由表2可看出，空气质量优良时，宣传中心与司法局、宣传中心与市政府、司法局与市政府的CD值分别为0.078、0.0785、0.0678。当轻度污染和中重度污染时，除了宣传中心与市政府间的CD值增大，其他站点间的CD值均呈降低的趋势。污染程度越高，大气污染的空间差异性越小。

**表2 2017年冬季沙河市3个监测站点在不同空气污染等级下的发散系数**

**Table 2 Coefficient of divergence values under different air pollutant levels at three observational sites in Shahe in the winter of 2017**

| 污染等级 | 站点 | 发散系数 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 宣传中心 | 司法局 | 市政府 |
| 优、良 | 宣传中心 | — | 0.078 | 0.0785 |
| | 司法局 | — | — | 0.0678 |
| | 市政府 | — | — | — |
| 轻度 | 宣传中心 | — | 0.0652 | 0.0665 |
| | 司法局 | — | — | 0.0558 |
| | 市政府 | — | — | — |
| 中、重度 | 宣传中心 | — | 0.0588 | 0.0854 |
| | 司法局 | — | — | 0.0476 |
| | 市政府 | — | — | — |

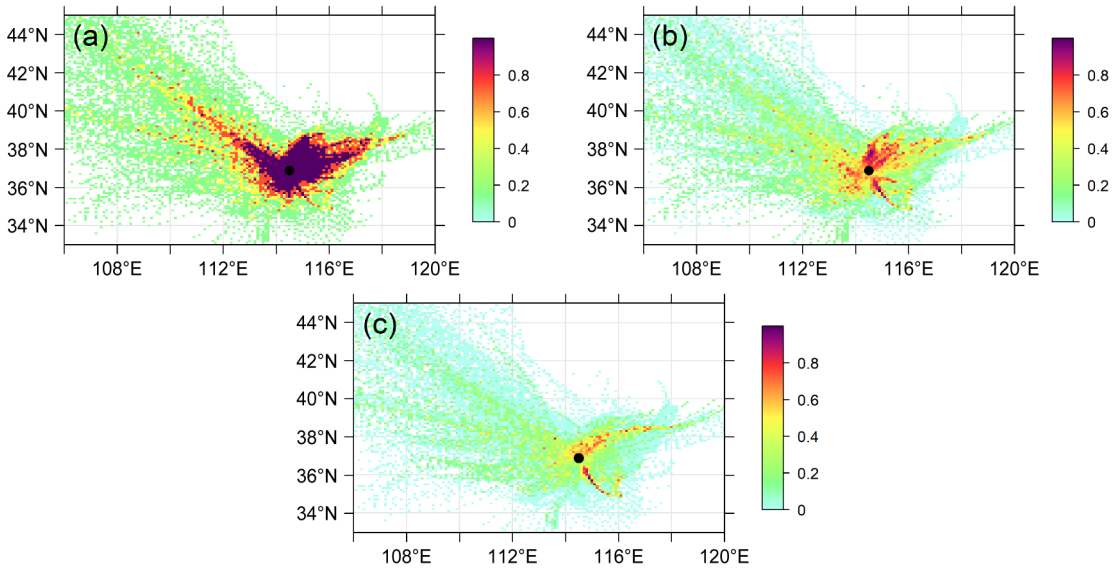


图6　2017年冬季沙河市（a）PM2.5浓度≥0 μg/m³、（b）PM2.5浓度≥75 μg/m³、（c）PM2.5浓度≥150 μg/m³的潜在来源分析（阴影为WPSCF值）

Fig. 6　Weighted potential source contribution function (WPSCF) analysis of different PM2.5 concentration thresholds in Shahe in the winter of 2017: (a) PM2.5 concentration≥0 μg/m³; (b) PM2.5 concentration≥75 μg/m³; (c) PM2.5 concentration≥150 μg/m³ (shadings are WPSCF values)

## 3.3　潜在源分析

### 3.3.1　潜在源贡献因子分析

基于NCEP提供的全球资料同化系统GDAS数据［数据分辨率为1°（纬度）×1°（经度）］，利用Meteoinfo软件（Wang et al.，2009），对沙河市（36.87°N，114.51°E）2017年12月1日至2018年2月28日，每日24个时次的24 h后向气团所对应的PM2.5浓度进行分析。轨迹计算起始点高度设为100 m，研究区域范围选择为（33°N～51°N，99°E～122°E），将研究区域划分成0.1°（纬度）×0.1°（经度）的网格。图6给出了不同PM2.5阈值下的WPSCF计算结果。

图6中颜色越接近红色表示WPSCF值越大，表明沙河市PM2.5质量浓度超过阈值时更趋向于受到了来自这些地区的气团影响，可以间接地反映该地区的排放对沙河市PM2.5浓度的影响程度。由图6a可以看出，PM2.5≥0 μg/m³的阈值下，沙河市的强潜在源区非常密集，分布在其周边，主要为邯郸市北部、包括沙河市本地在内的邢台市大部分区域。中等强度潜在源区主要有河北安国市、深州市、辛集市、衡水市、南宫市等，山西省阳泉市东部，河南省安阳市北部。当PM2.5浓度增加时，强、中等强度潜在源区的分布呈缩小趋势，主要为沙河市本地及邢台市（如图6b、6c所示）。

### 3.3.2　浓度权重轨迹分析法

由WPSCF分析可看出，沙河市PM2.5的强潜在源区主要为包括本地在内的邢台市大部分区域。为量化邢台市对沙河市PM2.5的贡献，将研究区域范围缩小至（36.75° N～37.3° N，113.75° E～115.83°E），将研究区域划分成0.01°（纬度）×0.01°（经度）的网格，WCWT的计算结果如图7。

由图7所示，对沙河市PM2.5浓度贡献在10～20 μg/m³的低强度潜在源区主要为邢台县东部、任县及南和县。对沙河市PM2.5浓度贡献大于60 μg/m³

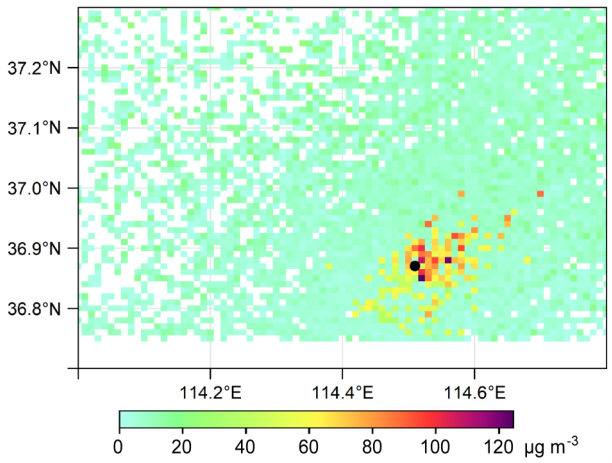


图7　2017年冬季沙河市PM2.5的WCWT分析结果

Fig. 7　Weighted concentration weighted trajectory (WCWT) analysis of PM2.5 in Shahe in the winter of 2017

的中、高强度潜在源区为沙河市东南部、以及与沙河市相邻的永年县（目前已成为市辖区）小部分区域，这表明沙河市的本地源对其高PM2.5有主要贡献。而沙河市东南角聚集着众多玻璃制造等企业（如图1b），推测是企业排放导致此区域成为PM2.5高强度潜在源区。

## 4 结论

基于2017年12月至2018年2月3个省控站点数据，研究了沙河市主要污染物的时空分布特征和污染成因。主要结论如下：

（1）整个冬季司法局、市政府和宣传中心站点的PM2.5平均浓度分别为118.0、121和135 μg/m$^3$。市政府站点的CO和$SO_2$浓度最高、司法局的$NO_2$浓度最高。

（2）3个监测站点主要污染物日变化特征明显，PM10、PM2.5日变化呈“双峰”型，其中宣传中心受颗粒物直接排放的影响最大。$SO_2$在10:00出现的峰值可能与企业夜间的高架排放有关。在16:00前后，PM2.5、PM10、$SO_2$、$NO_2$和CO出现的谷值可能与大气边界层的抬升有关。整个观测期间，$\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10)、$\rho$($SO_2$)/$\rho$($NO_2$)平均值分别为0.57、1.05。当污染加重，$\rho$(PM2.5)/$\rho$(PM10)、$\rho$($SO_2$)/$\rho$($NO_2$)均升高，沙河市作为典型工业城市，燃煤贡献较大。

（3）污染物空间分析表明，3个站点的PM2.5、PM10和$NO_2$在北方位展现出高浓度特征，与沙河市玻璃企业分布特征相似，且3个站点东北方位处的CO和$SO_2$、$NO_2$和$SO_2$为高度相关，可能是玻璃企业产生的污染物对监测站点造成了一定影响。空间差异分析表明，3个站点大气污染特征差异取决于区域污染过程的强度，区域污染范围越大、强度越高，大气污染的空间差异性越小。

（4）WPSCF分析表明，沙河市PM2.5的潜在源区分布在其周边区域。且随着PM2.5浓度增加，中等、强度潜在源区的分布呈缩小趋势，主要为沙河市本地和邢台市；WCWT分析表明，沙河市东南部的本地源对其高PM2.5有主要贡献，而此处正是玻璃企业的聚集地。

### 参考文献（References）


Begum B A, Kim E, Jeong C H, et al. 2005. Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode [J]. Atmospheric Environment, 39(20): 3719−3724. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.03.008

Cao J J, Wu F, Chow J C, et al. 2005. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 5(11): 3127−3137. doi:10.5194/acp-5-3127-2005

Clapp L J, Jenkin M E. 2001. Analysis of the relationship between ambient levels of $O_3$, $NO_2$ and NO as a function of $NO_x$ in the UK [J]. Atmos. Environ., 35(36): 6391−6405. doi:10.1016/S1352-2310(01)00378-8

贺泓, 王新明, 王跃思, 等. 2013. 大气灰霾追因与控制 [J]. 中国科学院院刊, 28(3): 344−352. He Hong, Wang Xinming, Wang Yuesi,et al. 2013. Formation mechanism and control strategies of haze in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 28(3): 344−352.

Hopke P K, Barrie L A, Li S M, et al. 1995. Possible sources and preferred pathways for biogenic and non-sea-salt sulfur for the high Arctic [J]. J. Geophys. Res., 100(D8): 16595−16603. doi:10.1029/95JD01712

Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. 2003. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. Atmos. Environ., 37(4): 545−562. doi:10.1016/S1352-2310(02)00886-5

Huang X J, Liu Z R, Liu J Y, et al. 2017. Chemical characterization and source identification of PM2.5 at multiple sites in the Beijing−Tianjin−Hebei region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(21): 12941−12962. doi:10.5194/acp-17-12941-2017

Huo H, Zhang Q, Guan D B, et al. 2014. Examining air pollution in China using production - and consumption-based emissions accounting approaches [J]. Environ. Sci. Technol., 48(24): 14139−14147. doi:10.1021/es503959t

贾梦唯, 赵天良, 张祥志, 等. 2016. 南京主要大气污染物季节变化及相关气象分析 [J]. 中国环境科学, 36(9): 2567−2577. Jia Mengwei, Zhao Tianliang, Zhang Xiangzhi, et al. 2016. Seasonal variations in major air pollutants in Nanjing and their meteorological correlation analyses [J]. China Environmental Science (in Chinese), 36(9): 2567−2577.

Li Y, Chen Q L, Zhao H J, et al. 2015. Variations in PM10, PM2.5 and PM1.0 in an urban area of the Sichuan basin and their relation to meteorological factors [J]. Atmosphere, 6(1): 150−163. doi:10.3390/atmos6010150

刘卫, 马笑, 王丽涛, 等. 2017. 邯郸市大气PM2.5成分空间分布研究 [J]. 环境工程, 35(10): 105−109, 60. Liu Wei, Ma Xiao, Wang Litao, et al. 2017. Analysis of the space distribution of composition of PM2.5 in Handan [J]. Environmental Engineering (in Chinese), 35(10): 105−109, 60. doi:10.13205/j.hjgc.201710022

刘希文, 徐晓斌, 赵花荣, 等. 2014. 北京及周边地区3个典型站点$NO_x$和CO的变化特征 [J]. 安全与环境学报, 14(6): 252−257. Liu Xiwen, Xu Xiaobin, Zhao Huarong, et al. 2014. Changing characteristics of $NO_x$ and CO emission on the three sites in Beijing and its surrounding areas [J]. Journal of Safety and Environment (in Chinese), 14(6): 252−257. doi: 10.13637 / j. issn. 1009-6094.2014.06.056

Meng C C, Wang L T, Zhang F F, et al. 2016. Characteristics of concentrations and water-soluble inorganic ions in PM2.5 in Handan

City, Hebei Province, China [J]. Atmospheric Research, 171: 133–146. doi:10.1016/j.atmosres.2015.12.013

孟晓艳, 王普才, 王庚辰, 等. 2009. 北京及其周边地区冬季$SO_2$的变化与输送特征 [J]. 气候与环境研究, 14(3): 309–317. Meng Xiaoyan, Wang Pucai, Wang Gengchen,et al. 2009. Variation and transportation characteristics of $SO_2$ in winter over Beijing and its surrounding areas [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(3): 309–317. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.03.08

Park S S, Kim Y J. 2004. PM2.5 particles and size-segregated ionic species measured during fall season in three urban sites in Korea [J]. Atmos. Environ., 38(10): 1459–1471. doi:10.1016/j.atmosenv.2003.12.004

Qi J, Zheng B, Li M, et al. 2017. A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the Beijing–Tianjin–Hebei Region, China [J]. Atmos. Environ., 170: 156–168. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.09.039

Qin K, Wang L Y, Wu L X, et al. 2017. A campaign for investigating aerosol optical properties during winter hazes over Shijiazhuang, China [J]. Atmospheric Research, 198: 113–122. doi: 10.1016 / j.atmosres.2017.08.018

孙业乐. 2018. 城市边界层理化结构与大气污染形成机制研究进展 [J]. 科学通报, 63(14): 1374–1389. Sun Yele. 2018. Vertical structures of physical and chemical properties of urban boundary layer and formation mechanisms of atmospheric pollution [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 63(14): 1374–1389.

王爱平, 朱彬, 银燕, 等. 2014. 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, 34(4): 852–861. Wang Aiping, Zhu Bin, Yin Yan, et al. 2014. Aerosol number concentration properties and potential sources areas transporting to the top of mountain Huangshan in summer [J]. China Environmental Science (in Chinese), 34(4): 852–861.

Wang L T, Wei Z, Yang J, et al. 2014. The 2013 severe haze over southern Hebei, China: Model evaluation, source apportionment, and policy implications [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 14(6): 3151–3173. doi:10.5194/acp-14-3151-2014

Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. 2009. 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 and Software, 24(8): 938–939. doi:10.1016/j.envsoft.2009.01.004

王自发, 李杰, 王哲, 等. 2014. 2013年1月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策 [J]. 中国科学: 地球科学, 44(1): 3–14. Wang Zifa, Li Jie, Wang Zhe, et al. 2014. Modeling study of regional severe hazes over Mid-Eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. Science China: Earth Sciences, 57(1): 3–13. doi:10.1007/s11430-013-4793-0

吴兑. 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述 [J]. 环境科学学报, 32(2): 257–269. Wu D. 2012. Hazy weather research in China in the last decade: A review [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 32(2): 257–269. doi:10.13671/j.hjkxxb.2012.02.011

许波, 张英杰, 吴序鹏, 等. 2017. 2016年夏季淮安市大气污染特征及成因分析 [J]. 科学技术与工程, 17(27): 316–321. Xu Bo, Zhang Yingjie, Wu Xupeng, et al. 2017. Characteristics and causes of air pollution in Huai'an city in the summertime of 2016 [J]. Science Technology and Engineering (in Chinese), 17(27): 316–321. doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2017.27.052

徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 等. 2014. 重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 [J]. 环境科学, 35(3): 820–829. Xu Peng, Hao Qingju, Ji Dongsheng, et al. 2014. Observation of atmospheric pollutants in the urban area of Beibei District, Chongqing [J]. Environmental Science (in Chinese), 35(3): 820–829. doi:10.13227/j.hjkx.2014.03.003

Xu X, Akhtar U S. 2010. Identification of potential regional sources of atmospheric total gaseous mercury in Windsor, Ontario, Canada using hybrid receptor modeling [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10(15): 7073–7083. doi:10.5194/acp-10-7073-2010

许亚宣, 李小敏, 于华通, 等. 2015. 邯郸市大气复合污染特征的监测研究 [J]. 环境科学学报, 35(9): 2710–2722. Xu Yaxuan, Li Xiaomin, Yu Huatong, et al. 2015. Characteristics of air pollution complex in Handan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 35(9): 2710–2722. doi:10.13671/j.hjkxxb.2014.1064

张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾—霾成因及其治理的思考 [J]. 科学通报, 58(13): 1178–1187. Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 58(13): 1178–1187.

Zhang Y H, Su H, Zhong L J, et al. 2008. Regional ozone pollution and observation-based approach for analyzing ozone–precursor relationship during the PRIDE-PRD2004 campaign [J]. Atmos. Environ., 42(25): 6203–6218. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.05.002

赵敬国, 王式功, 张天宇, 等. 2015. 兰州市大气重污染气象成因分析 [J]. 环境科学学报, 35(5): 1547–1555. Zhao Jingguo, Wang Shigong, Zhang Tianyu, et al. 2015. The analysis of meteorological factors causing heavy air pollution in Lanzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 35(5): 1547–1555. doi: 10.13671 / j.hjkxxb.2014.0829

Zhou Y, Fu J S, Zhuang G S, et al. 2010. Risk-based prioritization among air pollution control strategies in the Yangtze River Delta, China [J]. Environmental Health Perspectives, 118(9): 1204–1210. doi:10.1289/ehp.1001991

朱常琳, 李夏清, 李富渊. 2017. 西安市主要大气污染物浓度变化特征及相关特性分析 [J]. 环境工程, 35(11): 104–109. Zhu Changlin, Li Xiaqing, Li Fuyuan. 2017. Analysis on variation trends and related features of concentration of main air pollutants in Xi'an [J]. Environmental Engineering (in Chinese), 35(11): 104–109. doi:10.13205/j.hjgc.201711022

朱书慧, 周敏, 乔利平, 等. 2016. 2015年12月气流轨迹对长三角区域细颗粒物浓度和分布的影响 [J]. 环境科学学报, 36(12): 4285–4294. Zhu Shuhui, Zhou Min, Qiao Liping, et al. 2016. Impact of the air mass trajectories on PM2.5 concentrations and distribution in the Yangtze River Delta in December 2015 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 36(12): 4285–4294. doi: 10.13671 / j.hjkxxb.2016.0166