

文章编号: 1673-9469(2018)04-0084-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.018

## 2013—2017年邯郸市PM<sub>2.5</sub>浓度变化特征及污染源区研究

纪尚平, 王丽涛, 齐孟姚, 赵乐, 鲁晓晗, 王雨, 马笑, 张城瑜

(河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 为探索邯郸地区PM<sub>2.5</sub>浓度长期变化特征及污染潜在源区, 对邯郸2012年12月—2018年2月河北工程大学站点在线监测的PM<sub>2.5</sub>质量浓度进行统计分析, 并结合HYSPLIT模型、潜在源贡献因子法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT)对PM<sub>2.5</sub>进行来源解析。结果表明: 邯郸市2013—2017年PM<sub>2.5</sub>年均值为108.4、98.3、92.2、81.2、66.3 μg·m<sup>-3</sup>; 整体呈逐年下降趋势; 秋冬季污染最为严重, 春、夏季次之; 月均值呈单峰型分布, 1月最高(167.4 μg·m<sup>-3</sup>), 7月最低(59.2 μg·m<sup>-3</sup>)。后向轨迹结果显示, 近地层大气污染气团输送路径以近距离轨迹为主, 轨迹较短的路径占比在40%以上。除冬季外, 近距离输送路径均存在螺旋转向, 轨迹方向转为南向和东向路径; 邯郸主要污染源区范围较大, 其中河北中南部、河南北部、山西中南部、陕西北部、内蒙古南部地区的轨迹对邯郸PM<sub>2.5</sub>质量浓度贡献较大。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; HYSPLIT模型; 潜在源贡献因子法; 浓度权重轨迹分析法

**中图分类号:** X513

**文献标识码:** A

## Analysis of PM<sub>2.5</sub> concentration changes and pollution source areas in Handan city during 2013—2017

Ji Shangping, WANG Litao, QI Mengyao, ZHAO Le, LU Xiaohan, WANG Yu, MA Xiao, ZHANG Chengyu

(Department of Environmental Engineering, School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** In order to explore the long-term variation characteristics of PM<sub>2.5</sub> concentrations in Handan and their potential source of pollution, the statistical analysis of the PM<sub>2.5</sub> concentrations obtained from online monitoring of Hebei University of Engineering site from December 2012 to February 2018 was carried out. Source analysis of PM<sub>2.5</sub> was performed by HYSPLIT model, potential source contribution factor method (PSCF) and concentration weight trajectory analysis (CWT). The results show that the average annual values of PM<sub>2.5</sub> in Handan city from 2013 to 2017 are 108.4, 98.3, 92.2, 81.2, 66.3 μg·m<sup>-3</sup>, respectively. The trend is declining year by year, the pollution is more serious in autumn and winter, followed by spring and summer; the monthly mean value of PM<sub>2.5</sub> is unimodal, and the highest in January (167.4 μg·m<sup>-3</sup>), The lowest value appears in July (59.2 μg·m<sup>-3</sup>). The results of the backward trajectory show that the near-surface air pollution air mass transport path is dominated by close-range trajectories, and the path with shorter trajectories accounts for more than 40%. In addition to winter, there are spiral turns in the short-distance transport path, and the trajectory direction turns to the south-direction and east-direction paths. The main pollution source areas are large, and trajectories from central central and southern Hebei, northern Henan, south-central Shanxi, north Shaanxi, and southern Inner Mongolia contribute a lot to the mass concentration of PM<sub>2.5</sub>.

收稿日期: 2018-07-30

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41475131)

作者简介: 纪尚平(1994-), 男, 黑龙江牡丹江人, 硕士研究生, 主要从事大气污染控制方面的研究。

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; HYSPLIT model; potential source contribution function(PSCF); concentration weight trajectory analysis(CWT)

近几年,邯郸市空气质量排名始终位于全国十大严重污染城市前列<sup>[1-5]</sup>。所以分析邯郸市PM<sub>2.5</sub>浓度长期变化趋势,对了解该地区空气污染特征具有重要意义。当前已有学者对邯郸地区大气污染特征进行研究<sup>[6-9]</sup>,但多为分析邯郸市短期大气污染特征的研究,而对PM<sub>2.5</sub>长期变化规律研究相对较少,因此,为研究邯郸地区长期颗粒物污染变化特征,对邯郸市2012年12月—2018年2月在线监测的PM<sub>2.5</sub>年、季节、月际变化特征进行研究,同时结合后向轨迹模型,研究污染物气团输送规律,最后应用潜在源贡献因子法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT)研究潜在源区对PM<sub>2.5</sub>贡献特征。

## 1 研究方法

### 1.1 数据获取

2013—2017年PM<sub>2.5</sub>数据源自河北工程大学能源与环境工程实验楼顶监测站点在线监测的PM<sub>2.5</sub>小时浓度均值,有关该站点地理位置及仪器相关信息在Li Haiyan等<sup>[10]</sup>研究中有详细介绍,在此不做赘述。后向轨迹所用的气象数据为美国国家环境预报中心(NECP)的全球资料同化系统所提供。

### 1.2 后向轨迹分析

HYSPLIT后向轨迹模型由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和澳大利亚气象局联合研发的分析大气污染物输送、扩散模型<sup>[11]</sup>。本文应用HYSPLIT4.9版本,后推起始时间为每日8:00(UTC),后向气团轨迹后推时长为72h,模拟起始高度为500m。

### 1.3 潜在源贡献因子和浓度权重轨迹分析法

基于条件概率函数判别潜在污染源区算法为

潜在源贡献因子法(PSCF)<sup>[12]</sup>,PSCF计算公式为: $PSCF_{ij} = x_{ij}/y_{ij}$ ,式中 $x_{ij}$ 为研究区域内经过网格 $ij$ 的污染轨迹数(本文将PM<sub>2.5</sub>浓度 $>75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的轨迹定义为污染轨迹), $y_{ij}$ 表示经过网格 $ij$ 的轨迹数,分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 、经纬度范围为 $90^\circ\text{E}\sim 130^\circ\text{E}$ , $25^\circ\text{N}\sim 55^\circ\text{N}$ 。 $W_{ij}$ (权重因子)用以提高PSCF准确性。权重函数如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 80 < y_{ij} \\ 0.70, & 20 < y_{ij} \leq 80 \\ 0.42, & 10 < y_{ij} \leq 20 \\ 0.05, & y_{ij} \leq 10 \end{cases}$$

浓度权重轨迹分析法(CWT)是一种计算潜在源区轨迹权重浓度,反映后向轨迹污染程度的方法<sup>[13]</sup>。计算公式如下:

$$CWT_{ij} = \frac{k}{\sum_{k=1}^M \tau_{ijk}} \sum_{k=1}^M C_k \tau_{ijk}$$

式中: $C_{ij}$ 是网格 $ij$ 上平均权重系数, $k$ 是轨迹, $M$ 是网格内轨迹总数, $C_k$ 是轨迹 $k$ 经过网格 $ij$ 时对应的邯郸PM<sub>2.5</sub>质量浓度, $\tau_{ijk}$ 是轨迹 $k$ 在网格 $ij$ 停留的时间,同样,PSCF中的权重系数 $W_{ij}$ 也适用于CWT分析法,可提高CWT准确性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PM<sub>2.5</sub>年际变化特征

图1为PM<sub>2.5</sub>日均值和7d滑动平均值时间序列,因2012年与2018年仅选取几个月数据,不足以反映年际变化趋势,暂不做分析。可以看出,邯郸市PM<sub>2.5</sub>年均值整体呈逐年下降趋势,2014年PM<sub>2.5</sub>浓度较2013年下降了9.3%,2015年较2014年下降了6.2%,2016、2017年降幅相对较大,分别为12.0%和18.3%。2013—2017年PM<sub>2.5</sub>最大值、最小值分

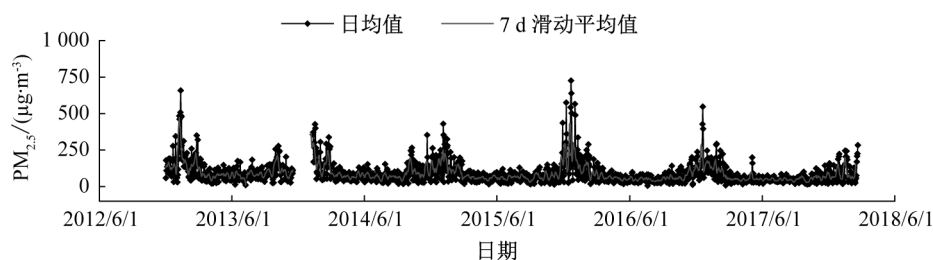


图1 2012年12月—2018年2月PM<sub>2.5</sub>日均值和7d滑动平均值时间序列

Fig.1 PM<sub>2.5</sub> daily average and 7 d average from Dec 2012 to Feb 2018

别为  $108.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2013年)和  $66.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2017年),均高于国家空气质量二级标准 ( $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 2013年  $\text{PM}_{2.5}$  超标了 2.1 倍, 2017 年超标倍数为 0.98 倍。同时  $\text{PM}_{2.5}$  浓度高于世界卫生组织规定的年均限值 ( $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 超标倍数分别为 9.8、5.6 倍。表明邯郸地区颗粒物浓度依旧处于较高水平。

图 2 为 2013—2017 年  $\text{PM}_{2.5}$  污染等级年际变化, 图中污染等级是依据空气质量指数与  $\text{PM}_{2.5}$  对应关系得出的<sup>[14]</sup>, 分为 6 个等级(优, 0~50; 良, 51~100; 轻度污染, 101~150; 中度污染, 151~200; 重度污染, 201~300; 严重污染, >300)进行分析。可以看出, 邯郸近年来优、良天数明显增多, 轻度污染(含)等级以上的天数整体呈逐年

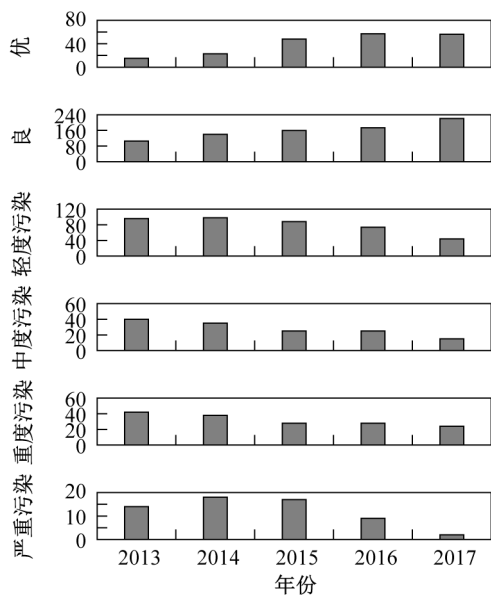


图 2  $\text{PM}_{2.5}$  污染等级的年际变化

Fig. 2 Annual variation of  $\text{PM}_{2.5}$  pollution rank

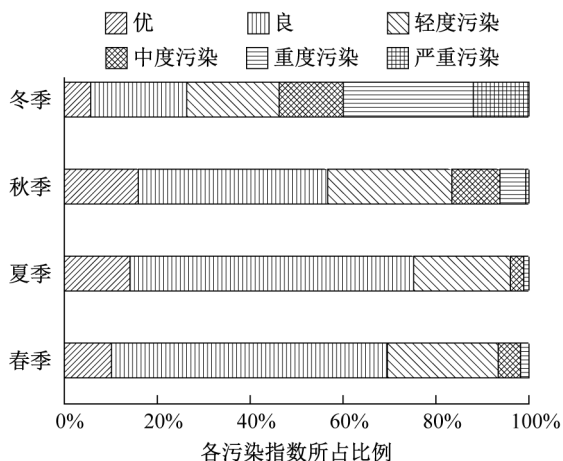


图 3 各污染等级天数所占比例

Fig. 3 The proportion of days of each pollution levels

下降趋势。

图 3 为各污染等级天数占不同季节总天数百分比, 由图可知, 春、夏季优良天数较多, 虽然空气质量为优的天数比秋季少, 但夏季两季并未出现严重污染天气, 且轻度污染(含)等级以上天数占总天数 30% 左右, 污染天气主要以轻度污染为主。中度污染(含)等级以上天气多发于秋冬季, 其中冬季污染最为严重, 污染天数比例高达 74%, 且重度污染及严重污染天气占一半天数以上。秋冬季污染严重主要是由于有利于污染物累积的气象条件, 加之冬季采暖期燃烧大量化石燃料造成的<sup>[15]</sup>。

## 2.2 颗粒物季节和月际变化特征

图 4 为  $\text{PM}_{2.5}$  浓度季节变化。本研究将季节划分为: 春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12—翌年 2 月)。图中可以看出,  $\text{PM}_{2.5}$  表现为冬季浓度最高, 其次是秋、春、夏季, 均值分别为  $146.9$ 、 $80.4$ 、 $66.1$ 、 $60.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。各季节  $\text{PM}_{2.5}$  浓度均呈逐年下降趋势。秋冬季  $\text{PM}_{2.5}$  浓度较高主要为邯郸周边的生物质燃烧, 采暖期燃煤的大量使用, 以及静风、混合层高度较低等。不利于污染物扩散的气象条件引起的<sup>[16]</sup>。

图 5 为  $\text{PM}_{2.5}$  月均值变化,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度呈单峰型分布, 1 月浓度最高, 为  $167.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 7 月浓度最低, 为  $59.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在 7 月 25%~75% 分位数之间跨度最小, 且中值和均值均为所有月份中最低值, 体现出 7 月空气质量较为稳定, 空气质量全年最好的特点。同时, 对比各污染物中值和平均值可以发现, 各月份平均值整体均高于中值, 这也可以反映出邯郸市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度低于平均值的频率较高, 这一现象与北京地区<sup>[17]</sup> 研究结果基本一致。

## 3 $\text{PM}_{2.5}$ 的输送来源分析

图 6 为邯郸市各季节后向轨迹聚类结果。其中冬季为 2012—2017 年聚类结果, 其余季节为 2013—2017 年聚类结果。邯郸四季以近距离气团轨迹输送为主且占比在 40% 以上, 与石家庄<sup>[18]</sup> 类似。除冬季外, 近距离轨迹输送路径均存在螺旋转向, 转为南向和东向。分析四季轨迹路径分布得出, 夏季轨迹较分散, 受季风和海洋暖湿气流影响, 轨迹较短, 轨迹方向为东、南向。秋季冷空气南下, 轨迹较夏季长, 说明冷空气气团移速较快, 近距离轨迹方向

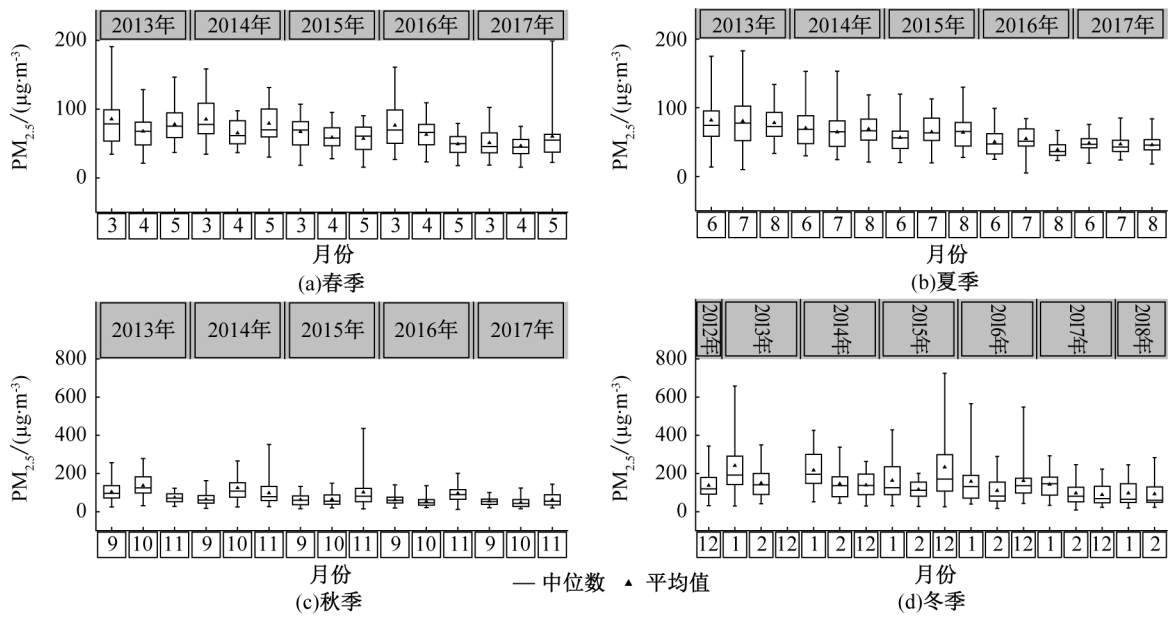


图 4 邯郸市 PM<sub>2.5</sub> 季节变化  
Fig. 4 PM<sub>2.5</sub> changes with seasons in Handan City

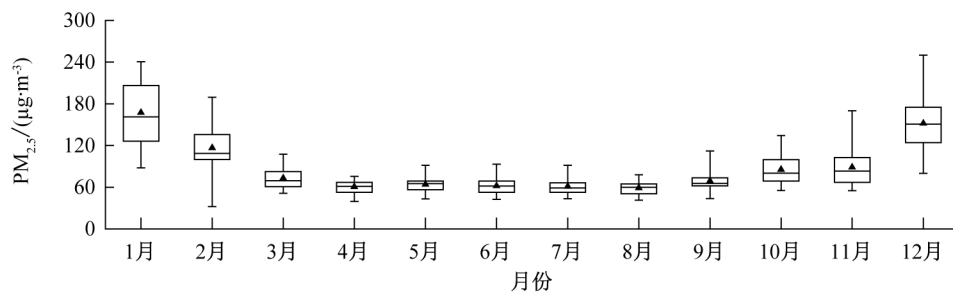


图 5 PM<sub>2.5</sub> 月均值变化图  
Fig.5 Month average of PM<sub>2.5</sub>

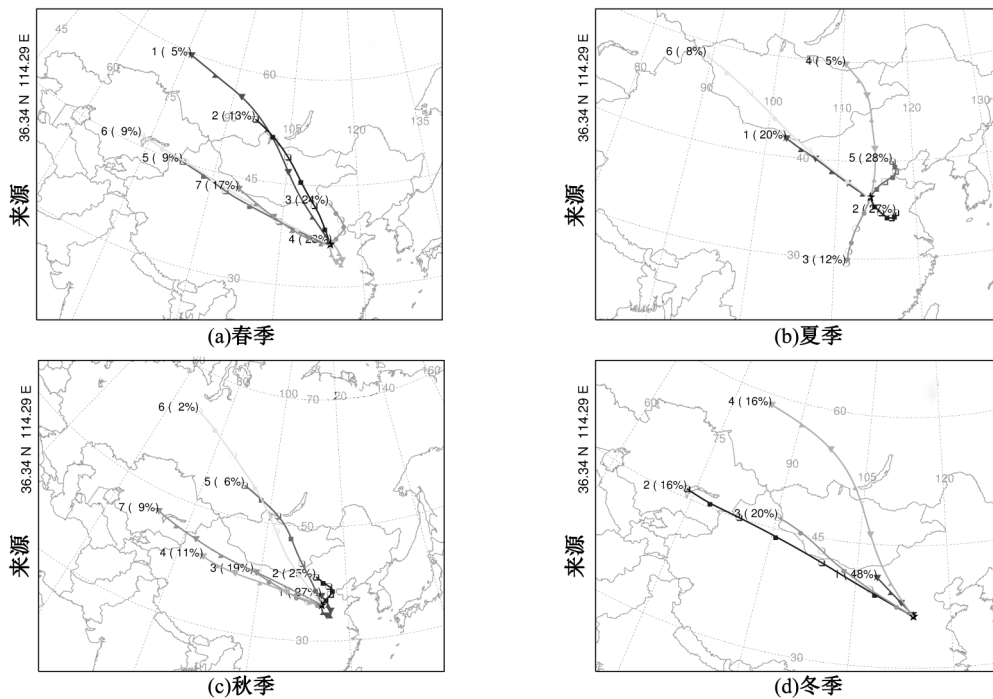


图 6 邯郸地区四季后向轨迹聚类结果  
Fig. 6 Trajectory with four seasons in Handan area

由东、南向转为东北向。冬春两季受西伯利亚寒流影响,西北风为主导风向,且西北气团轨迹较长,短距离气流轨迹占比最高,春季来自我国内蒙古地区和安徽地区两条路径占比分别为24%和23%,气流方向为东北和西南。冬季为西北路径,且西北向气流(35%)占比与春季(36%)相差不大,占比48%的首要气流轨迹路径来自我国内蒙古地区。

#### 4 污染物潜在来源分析

图7为2013—2017年邯郸四季潜在源因子分析(WSPCF)结果,结果表明。夏季WSPCF值均在0.5以下,污染程度较轻。冬季WSPCF值高于0.8范围较大,受西北风影响,延甘肃中部,内蒙古南部、陕西北部、中部、陕西南部、河北南部、河南北部、山东西部形成一个WSPCF高值带。春秋季污染分布较为类似,且WSPCF均在0.7以下,但潜在源区分布略有差别,春季WSPCF在0.5~0.6之间污染源区集中在河北南部和河南大部分地区。而秋季较为分散。

如图8所示,研究发现夏季污染最轻,WJWT

值均在 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,且潜在源区范围较集中。春秋两季污染源区WCWT均在 $90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,但贡献源区分布略有差别,其中春季WCWT在 $70 \sim 90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 潜在源区主要集中在河北南部、河南北部和西南部、湖北中部以及湖南北部地区;而秋季污染源区较分散。冬季污染最为严重,WJWT在 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高值区贡献源范围较大,主要集中在河北南部和河南中北部地区,这与冬季采暖期化石燃料的大量使用以及静稳天气有关;由于冬季盛行西北风,在邯郸、河南中部向山西西部、陕西北部及甘肃北部形成一条西北高值带。

#### 5 结论

1)近年来邯郸市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体均呈下降趋势,优良天数逐年增多,但污染依旧严重;重污染天气集中在秋冬季,春、夏季空气质量较好; $\text{PM}_{2.5}$ 浓度由高到低依次为冬季、秋季、夏季、春季,均值分别为 $146.9$ 、 $80.4$ 、 $66.1$ 、 $60.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\text{PM}_{2.5}$ 月均值呈单峰型分布,1月最高( $167.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),7月最低( $59.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。

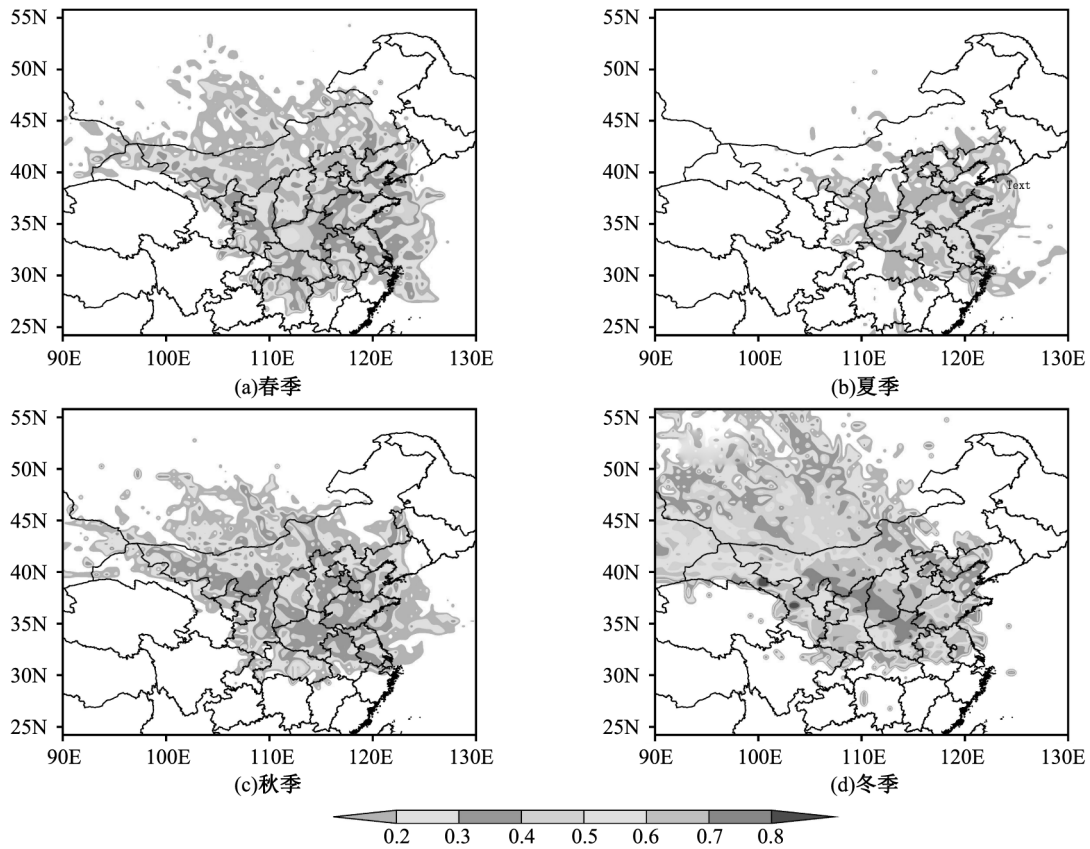
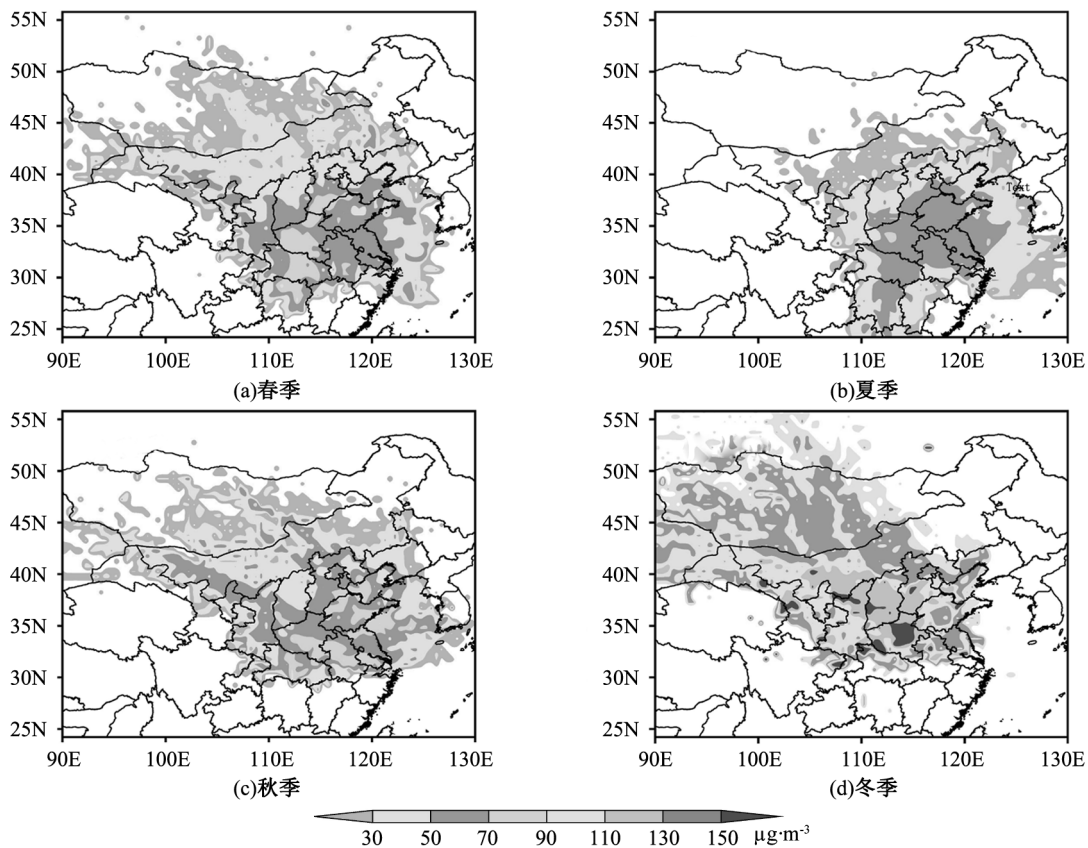


图7 邯郸四季 $\text{PM}_{2.5}$ 的WSPCF空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of WSPCF of  $\text{PM}_{2.5}$  in Handan

图8 邯郸四季PM<sub>2.5</sub>的WCWT分布特征Fig.8 Spatial distribution of WCWT of PM<sub>2.5</sub> in Handan

2) 对邯郸四季后向轨迹结果分析表明, 邯郸市近地层气团轨迹路径主要以近距离输送为主, 短距离气流轨迹占比在40%以上。除冬季外, 轨迹较短气团输送路径均存在螺旋转向, 气流方向转为南向和东向。夏季轨迹较短且较分散, 轨迹方向为东、南向, 秋季气团路径较夏季长, 轨迹方向由东、南向转为东北向。冬季受西北风影响, 西北方向轨迹较长, 但近距离输送路径占比仍最高(48%), 冬季轨迹方向为西北向, 春季为东北、西南向。

3) 冬季污染源最为严重, 且河北中南部、河南北部、山西中部、陕西北部及内蒙古南部对邯郸污染贡献最大, 潜在源区范围最大。春、秋季污染贡献源区范围也较大, 春季污染源区集中在河北中南部、河南北部、中南部和湖北中部, 而秋季源区较分散。夏季PM<sub>2.5</sub>浓度最低, 且源区范围较集中。

#### 参考文献:

- [1] 郝吉明, 程真, 王书肖. 我国大气环境污染现状及防治措施研究[J]. 环境保护, 2012(9): 16-20.
- [2] 胡炳清, 柴合发, 赵德刚, 等. 大气复合污染区域调控与决策支持系统研究[J]. 环境保护, 2015, 43(5):

43-47.

- [3] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境状况公报[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2015 [2016-06-03]. [http://www.mep.gov.cn/hjzl/tj/201606/t20160603\\_353508.shtml](http://www.mep.gov.cn/hjzl/tj/201606/t20160603_353508.shtml).
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境状况公报[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2016 [2017-06-06]. [http://www.mep.gov.cn/hjzl/tj/201706/t20170606\\_415527.shtml](http://www.mep.gov.cn/hjzl/tj/201706/t20170606_415527.shtml).
- [5] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境状况公报[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017[2018-05-31]. [http://www.mep.gov.cn/hjzl/tj/201805/t20180531\\_442197.shtml](http://www.mep.gov.cn/hjzl/tj/201805/t20180531_442197.shtml).
- [6] WANG L T, ZHANG Y, WANG K, et al. Application of Weather Research and Forecasting Model with Chemistry (WRF/Chem) over northern China: Sensitivity study, comparative evaluation, and policy implications[J]. Atmospheric Environment, 2016, 124: 337-350.
- [7] 张芬芬, 王丽涛, 苏捷, 等. 邯郸市PM<sub>2.5</sub>中含碳组分的特征及来源分析[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(8): 94-100.
- [8] 许亚宣, 李小敏, 于华通, 等. 邯郸(下转第94页)

- Southeastern U.S. Sites with Different Contributing Sources: Relationships between Composition and Effects [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2006, 114(9): 1387-1393.
- [9] 张霞, 孟琛琛, 王丽涛, 等. 邯郸市大气污染特征及变化趋势研究 [J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2015, 32(4): 69-74.
- [10] HAO J M, WANG L T. Improving Urban Air Quality in China: Beijing Case Study [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005(55): 1298-1305.
- [11] 张延峰, 宋崇林, 成存玉, 等. 车用柴油机排气颗粒物中有机组分和无机组分的分析 [J]. *燃烧科学与技术*, 2004(3): 197-201.
- [12] 潘锁柱. 缸内直喷汽油机排气微粒物理化学特征的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [13] KLEEMAN M J, SCHAUER J J, CASS G. Size and composition distribution of fine particulate matter emitted from motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(7): 1132-1142.
- [14] JIN Q, FANG X Y, WEN B, et al. Spatio-temporal variations of PM<sub>2.5</sub> emission in China from 2005 to 2014 [J]. *Chemosphere*, 2017, 183: 429-436.
- [15] 李梦仁, 胡敏, 吴宇声, 等. 缸内直喷汽油机排放颗粒有机物特征及影响因素分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(16): 4443-4451.
- [16] 苏捷, 王丽涛, 魏巍, 等. 2001—2011年我国城市空气污染变化特征及分析 [J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2012, 29(4): 48-52.
- (责任编辑 王利君)
- 
- (上接第 89 页)
- 市大气复合污染特征的监测研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(9): 2710-2722.
- [9] 魏哲, 杨晶, 王丽涛, 等. 2013年1月邯郸市严重霾天气的污染特征分析 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(5): 1118-1124.
- [10] LI Haiyan, ZHANG Qi, ZHANG Qiang, et al. Wintertime aerosol chemistry and haze evolution in an extremely polluted city of the North China Plain: significant contribution from coal and biomass combustion [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17: 4751-4768.
- [11] 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*, 2016, 96(12): 2059-2077.
- [12] TIAN M, WANG H B, CHEN Y, et al. Characteristics of aerosol pollution during heavy haze events in Suzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 16(11): 7357-7371.
- [13] 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.
- [14] 高庆先, 刘俊蓉, 李文涛, 等. 中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 [J]. *环境科学*, 2015, 36(4): 1141-1147.
- [15] MENG C C, WANG L T, ZHANG F F, et al. Characteristics of concentrations and water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> in Handan City, Hebei province, China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 171: 133-146.
- [16] 王敬, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 乌鲁木齐市重污染期间PM<sub>2.5</sub>污染特征与来源解析 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(2): 113-119.
- [17] 王浩, 高健, 李慧, 等. 2007—2014年北京地区PM<sub>2.5</sub>质量浓度变化特征 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(6): 783-790.
- [18] 铃伟妙, 张艳品, 陈静, 等. 石家庄大气污染物输送通道及污染源区研究 [J]. *环境科学学报*, 2018(9): 3438-3448.
- (责任编辑 王利君)