

周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其污染风险因素[J]. 环境科学研究, 2016, 29(4): 483-493.
ZHOU Lei, WU Jianjun, JIA Ruijing, et al. Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of $PM_{2.5}$ pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Area [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(4): 483-493.

京津冀 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其污染风险因素

周磊¹, 武建军^{2*}, 贾瑞静³, 梁念¹, 张凤英¹, 倪永¹, 刘明⁴

1. 中国环境监测总站, 北京 100012
2. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875
3. 北京市科技社团服务中心, 北京 100088
4. 民政部国家减灾中心, 北京 100124

摘要: 为分析京津冀及其周边区域 2013 年典型污染事件中 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征及污染风险因素, 根据国家城市环境空气质量实时发布数据和京津冀地区地理国情信息监测成果, 采用空间数据挖掘方法对 $PM_{2.5}$ 污染的热点区域进行了划分; 并采用地理探测器定量分析了 $PM_{2.5}$ 污染风险因子及其影响程度。结果表明: 在选取的京津冀 6 个城市中, 在 $PM_{2.5}$ 污染事件统计上存在保定—廊坊—北京—天津—承德—张家口的污染顺序。 $PM_{2.5}$ 污染在空间上呈河南省(山东省)—河北省—北京市(天津市)一线的带状分布特征, 在单次污染事件中, 城市间的 $PM_{2.5}$ 污染存在空间运移关系。空间热点探测表明, 京津冀及其周边区域主要分为 5 个热点聚集区, 其中 3 个高值区分布在北京市、天津市、河北省和山东省的中部, 面积分别为 5.31×10^4 、 10.26×10^4 、 5.04×10^4 km^2 。在 8 个污染风险因子中, 污染企业总数(影响力为 0.97, 下同)、降水量(0.93)、地形坡度(0.89)对 $PM_{2.5}$ 污染的影响显著高于其他风险因子; 其他风险因子影响力排序依次为人口数量(0.60)、降水量大于 0.1 mm 的降水日数(0.57)、地表覆盖类型(0.52)、年均相对湿度(0.51)、年均风速(0.33), 但风险因子间相比没有显著性差异。研究显示, 京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染的主要因素是污染物排放, 其次, 气象要素中的年降水量和自然地理环境中的地形坡度也是影响 $PM_{2.5}$ 污染特征的重要风险因子。

关键词: $PM_{2.5}$; 京津冀; 时空特征; 空间热点探测; 地理探测器

中图分类号: X515

文章编号: 1001-6929(2016)04-0483-11

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.04.03

Investigation of Temporal-Spatial Characteristics and Underlying Risk Factors of $PM_{2.5}$ Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Area

ZHOU Lei¹, WU Jianjun^{2*}, JIA Ruijing³, LIANG Nian¹, ZHANG Fengying¹, NI Yong¹, LIU Ming⁴

1. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China
2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, MOCA/MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
3. Beijing Community Service Center for Science and Technology, Beijing 100088, China
4. National Disaster Reduction Center, Beijing 100124, China

Abstract: In order to investigate the temporal-spatial characteristics of typical $PM_{2.5}$ pollution events in 2013 and the risk factors of $PM_{2.5}$ pollution in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas, real-time, published data on the national urban environmental air quality and geographic national condition monitoring results were analyzed. The spatial data mining method was used to divide the hot spot areas of $PM_{2.5}$ pollution in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas. Using the geographic detector model, the risk factors of $PM_{2.5}$ pollution and the associated influence degree were quantitatively analyzed. The results showed that the pollution in selected cities in the Beijing-Tianjin-Hebei area followed the order Langfang-Beijing-Baoding-Tianjin-Chengde-Zhangjiakou. The $PM_{2.5}$ pollution showed zonal distribution characteristics, and there was a spatial migration pattern among the cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region during a single pollution event. The spatial hot spot detection indicated that Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas were divided into five hot spot areas, with the top three of them being distributed in Beijing, Tianjin, and Hebei-central Shandong

收稿日期: 2015-07-28 修订日期: 2016-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501556); 京津冀地区重要地理国情监测项目(GJ201503)

作者简介: 周磊(1983-), 男, 山东临沂人, 高级工程师, 博士, 主要从事环境遥感和环境质量综合评价研究, zhoulei8341@163.com.

* 责任作者: 武建军(1971-), 男, 陕西榆林人, 教授, 博士, 博导, 主要从事环境遥感研究, jjwu@bnu.edu.cn

Tianjin-Hebei area followed the order Langfang-Beijing-Baoding-Tianjin-Chengde-Zhangjiakou. The $PM_{2.5}$ pollution showed zonal distribution characteristics, and there was a spatial migration pattern among the cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region during a single pollution event. The spatial hot spot detection indicated that Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas were divided into five hot spot areas, with the top three of them being distributed in Beijing, Tianjin, and Hebei-central Shandong

regions, with areas of 53,100 square kilometers, 102,600 square kilometers and 50,400 square kilometers, respectively. Among the eight $PM_{2.5}$ pollution risk factors, the number of industrial companies (influence index 0.94), precipitation (0.93) and topographic slope (0.89) had a significantly higher influence on $PM_{2.5}$ pollution than other risk factors. The influence power index of the other risk factors were as follows: population (0.60), number of precipitation days (0.57), land cover (0.52), relative air humidity (0.51) and wind speed (0.33). The influence of population on $PM_{2.5}$ pollution was slightly greater than that of number of precipitation days, land cover, relative air humidity and wind speed, but with no significant differences among them. The results showed that the main factor in $PM_{2.5}$ pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region is pollutant emission. Secondly, the annual precipitation of meteorological elements and the terrain slope of the natural geography environment are the important risk factors that affect the $PM_{2.5}$ pollution characteristics.

Keywords: $PM_{2.5}$; Beijing-Tianjin-Hebei; temporal-spatial characteristics; spatial hot spot detection; geographic detector

以 $PM_{2.5}$ 为特征污染物的区域性大气污染已成为我国当前最迫切、最突出的环境问题^[1-3]。 $PM_{2.5}$ 的主要来源为燃煤发电、工业生产、汽车尾气、人类活动等排放的残留物,有害元素和化合物富集在颗粒物上,对空气污染、大气能见度等的影响很大^[4-5]。从宏观上掌握区域环境空气质量时空分布特征、区域差异及其变化趋势,可以为区域大气污染治理提供技术支持^[6]。

近年来,借助局部区域的空气质量观测站点和人工采样数据,在污染严重的京津冀、长三角、珠三角区域开展了较多关于 $PM_{2.5}$ 污染特征、污染物来源解析的研究工作^[4-9]。WANG 等^[10]研究了 2013—2014 年 31 个省会城市 6 类主要污染物的时空变化特征,其研究表明,北方污染程度显著高于南方,但由于缺乏实时的空气质量监测数据,无法反映 $\rho(PM_{2.5})$ 的小时变化特征。ZHANG 等^[11]利用 2014—2015 年 190 个城市的空气质量实时监测数据研究了 $\rho(PM_{2.5})$ 的时空分布特征,揭示了城市尺度上 $\rho(PM_{2.5})$ 的空间和季节分布特征,重点分析了北京、上海、广州 $\rho(PM_{2.5})$ 的日变化特征,但该研究没有开展不同城市间污染聚集和消散时空特征的差异分析。HUANG 等^[4]对我国主要城市的 $PM_{2.5}$ 污染源解析表明,二次气溶胶污染是典型 $PM_{2.5}$ 污染事件的重要源头^[4]。但由于采样时间的不同和源解析模型的限制,污染源的分析尚有很多不确定性,目前研究也较少利用数据挖掘和数理统计方法,定量分析 $PM_{2.5}$ 污染的其他影响因子。

在 2013 年国家城市环境空气质量实时监测数据发布之前,由于缺乏大区域范围内的自动监测数据,对 $\rho(PM_{2.5})$ 时空变化特征的研究仅限于局部区域或部分监测点,并且受连续采样时间的限制,较难研究大区域范围内精细时间尺度(如小时)的 $\rho(PM_{2.5})$ 特征^[11]。借助区域城市环境空气质量监测网的 $\rho(PM_{2.5})$ 实时发布数据,定量研究 $PM_{2.5}$ 污染时空特征、聚集区域和影响因素,对实施科学有效的环境监管和治理具

有重要意义^[12-13]。因此,该研究选取京津冀及其周边区域,分析典型污染事件的 $\rho(PM_{2.5})$ 时空特征,定量揭示该区域污染的聚集效应并探测其环境影响风险因子,以期为区域大气污染治理和联防联控措施的实施提供科学参考和决策支持。

1 数据与方法

1.1 数据来源

1.1.1 $\rho(PM_{2.5})$ 数据来源

$\rho(PM_{2.5})$ 来源于 2013 年 1—12 月国家城市环境空气质量实时发布数据(<http://106.37.208.233:20035>),包括京津冀及周边 6 个省区共计 49 个城市、240 个自动监测站点的空气质量监测数据^[14]。各省区及城市自动监测点位的数量和空间分布分表见表 1、图 1。

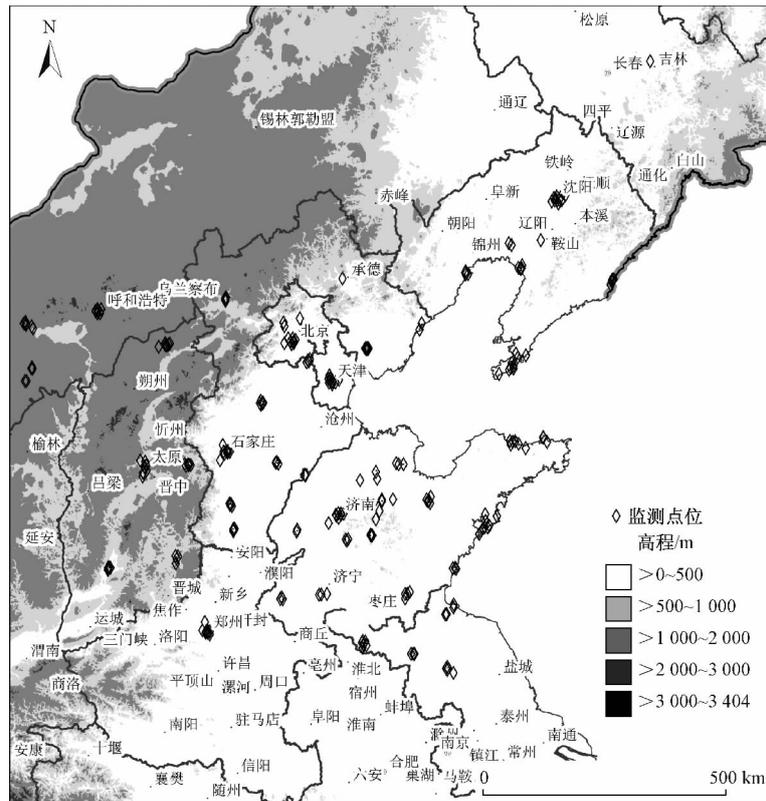
表 1 各省区城市和自动监测点位的数量

Table 1 The related provinces, cities and automatic air quality monitoring sites in study area

序号	省区	城市数量/座	监测点位数量/个
1	北京	1	12
2	天津	1	10
3	河北	11	41
4	河南	1	8
5	山东	16	66
6	辽宁	6	35
7	江苏	5	20
8	山西	5	31
9	内蒙古	3	17
合计	9	49	240

1.1.2 其他数据来源

京津冀地区大气颗粒物污染源数据来源于京津冀地区重要地理国情监测项目成果(2013)〔见图 2(a)〕。人口空间分布数据来源于橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)2013 年公布的全球人口数据库(LandScan 2013 Global Population



注:底图来源于国家测绘地理信息局(<http://219.238.166.215/mcp/Default.html>)下载的1:400万基本要素版《中华人民共和国地图》(2008年6月国家测绘局制).
审图号:GS(2008)1400号.下同.

图1 研究区域PM_{2.5}自动监测点位的分布

Fig. 1 The spatial distribution of automatic PM_{2.5} monitoring sites in study area

Database, <http://web.ornl.gov/sci/landscan>) [见图2(b)]. 降水量月均值、降水大于0.1 mm的日数、相对湿度、风速等气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html>); 数字高程数据(DEM)来源于国家自然科学基金委员会中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>), 空间分辨率为1 km. 土地利用数据提取自中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 2013年的土地利用产品(MCD12Q1).

1.2 时空特征分析

对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 序列采取8 h滑动平均的方法进行平滑处理以获取其变化趋势, 设定连续8个滑动平均值呈上升趋势时为出现一次PM_{2.5}累积过程. 确定每次污染事件对应的滑动最小均值(滑动平均曲线最小值), 选择以其为中心的8 h窗口内的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 实测曲线, 将首次超过 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的时间点记为污染累积的开始时间(T_s). 同样, 以滑动最大均值为中心的

窗口内 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 实测最大值对应的时间点记为污染物累积的结束时间(T_e). T_s 和 T_e 的时间间隔即为一次污染事件的污染物累积历时(ΔT). 统计典型污染事件不同城市 T_s 和 ΔT 的差异和相关关系, 分析PM_{2.5}污染发生、发展的时序特征. 同时, 对240个PM_{2.5}实时监测点位典型污染事件的面板数据采用反距离加权(inverse distance weighted, IDW)的方法进行空间插值, 研究典型污染事件发生过程中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的空间分布及变化特征.

1.3 空间自相关分析方法

利用所有监测点位的2013年典型污染事件的空间面板数据, 分析PM_{2.5}污染的全局和局域自相关特征, 有利于分析PM_{2.5}污染的空间聚集程度. 全局空间自相关(Moran I)指数用于描述整个研究区空间对象之间的关联程度, 以表明空间对象之间是否存在显著的空间分布模式^[15-16]. 局域空间自相关则进一步考查监测值的高值或者低值的局部空间聚集, 以说明哪个区域单元对全局空间自相关的贡献更大, 用

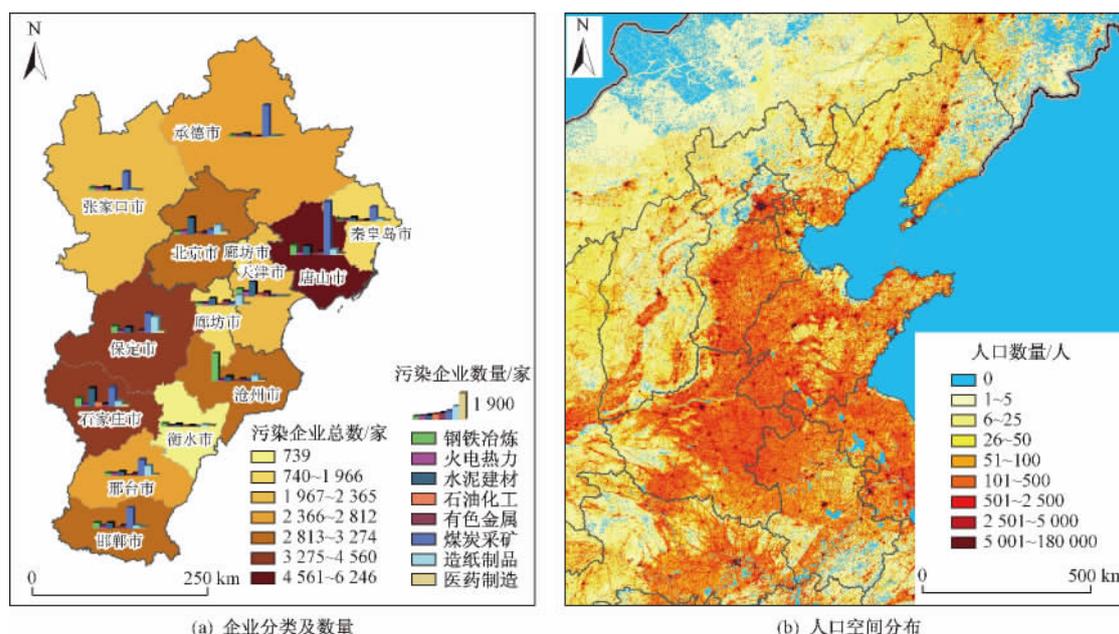


图2 研究区域各地级市污染企业分类、数量和人口空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of enterprise classification and its number in each prefecture-level city and spatial distribution of population

于衡量每个空间对象属性在“局部(一般近邻)”的相关性质^[17]。

1.4 空间热点探测模型

采用空间热点探测模型分析典型污染事件中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的空间分布特征,有助于从空间统计学上定量剖析 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的重点分布区和轻污染区,辅助环境保护措施的调整和确定区域联动措施的实施范围,发现污染源集中区及区域输送的可能源头。空间热点分析是空间聚类的特例,其试图在研究区内寻找属性值显著异于其他地方的区域,并将该区域视为异常区^[18-19]。空间热点探测方法首先根据所有样本对应的空间距离构造一个对称矩阵,然后根据极限距离的方法确定聚集区域^[16]:

$$D = 0.5\sqrt{A/n} \pm \gamma \left(\frac{0.26136}{\sqrt{n^2/A}} \right) \quad (1)$$

式中: D 为极限距离, km; A 为研究区域面积, km^2 ; n 为空间点对数量; γ 为给定置信度时的分位数。

1.5 地理探测器

地理探测器在流行疾病和灾害原因探测中有着重要应用^[20]。HU等^[21]应用地理探测器确定了汶川地震儿童罹难因子,主要包括地震烈度、房屋倒塌状况和地形坡度,并且三者之间的交互影响显著增加了儿童死亡风险。 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征的影响因子和流行疾病、灾害发生原因具有一定的相似性,即受到人为因

素、气象条件和自然地理要素的综合影响^[22-24], 研究分析其主要的风险因素是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源解析和污染防控的重要基础。

污染物排放是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的主要原因,气象要素和自然地理条件对污染物的化学转化、聚集、消散等也均有影响^[25-26]。从污染源、气象要素和自然地理因素三方面选择了8个风险因子,定量分析各风险因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染和空间特征的影响程度差异,这8个风险因子包括工业企业总数、人口数量、降水量、降水大于0.1 mm的日数、年均风速、年均相对湿度、地形坡度(由海拔高程(见图1)计算得到)、地表覆盖类型(见图2.3)。在风险因子选择过程中首先排除与其他因子高相关性的因子,保留有区分度的代表性因子,同时参考了有关 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响因子的研究成果^[27-28]。

采用反距离加权模型,对城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值和气象参数进行空间插值为1 km分辨率的栅格数据。由于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的空间自相关距离在50~80 km之间^[29],该研究将京津冀划分为20 km × 20 km 网格,分别提取每个网格内2013年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值和各风险因子数值,其中人口数量提取网格内人口总数,地表覆盖类型提取网格内面积占比最大的类型。然后将每个网格的变量数值输入地理探测器,分析各风险因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响程度并检验风险因子间差异的显著性。

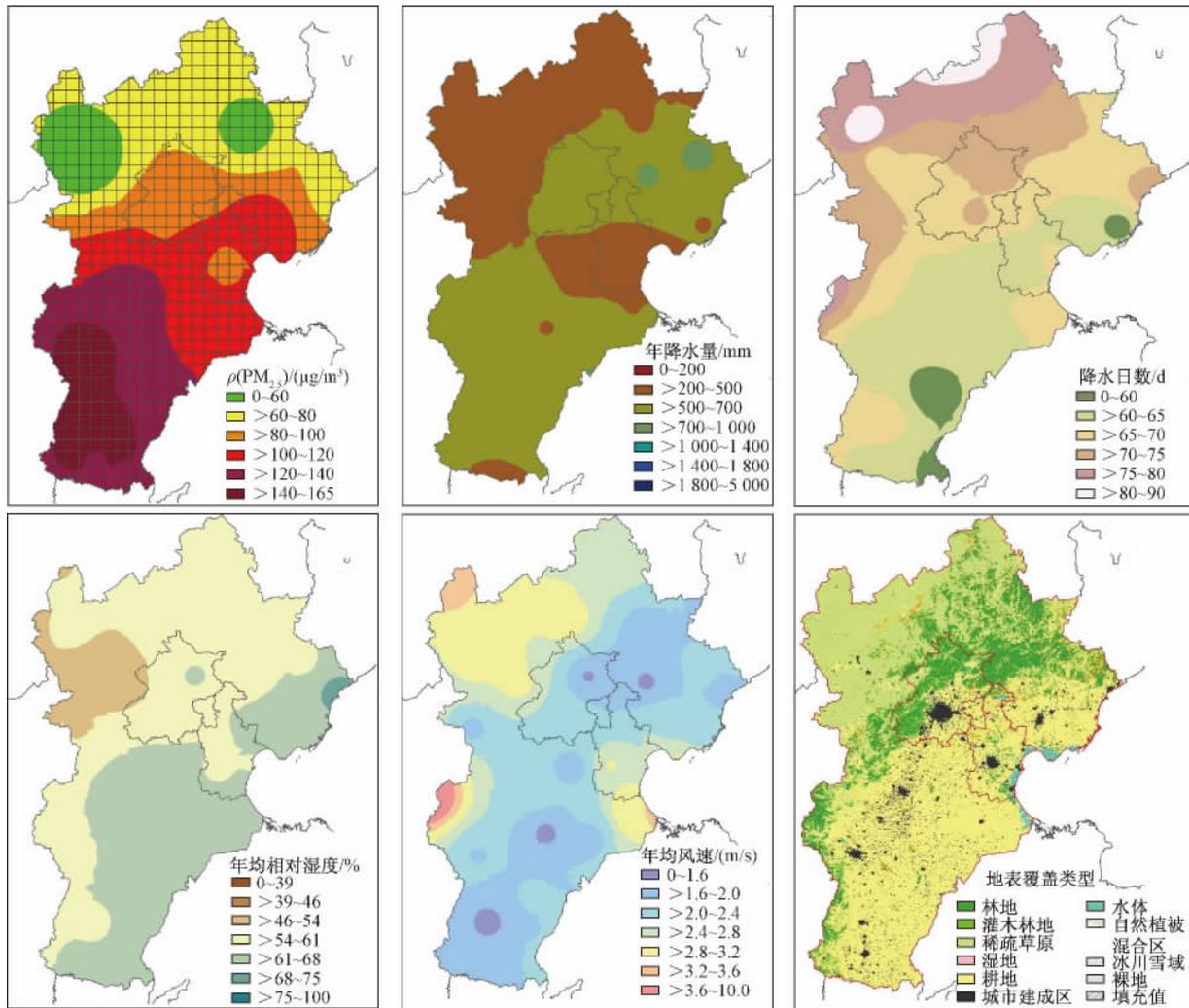


图 3 京津冀网格划分及 PM_{2.5} 污染风险因子

Fig. 3 Geographic grid division of Beijing-Tianjin-Hebei area and spatial distribution of PM_{2.5} pollution risk factors

2 结果与讨论

2.1 区域 PM_{2.5} 污染事件

2013 年京津冀地区经历了严重的空气污染过程, 污染超标天数中以 PM_{2.5} 为首要污染物的天数占到了 66.6%, 所有评价城市均未达到 GB 3095—2012 《环境空气质量标准》 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值的二级标准^[30]. 不同季节典型污染事件的发生诱发因素和过程有些相似, 即气象条件不利于污染物扩散时, PM_{2.5} 在不同城市开始累积升高, 进而形成区域污染态势, 待气象条件(气压、风力或者降水)转好时, 污染物开始逐渐消散^[31]. 选取研究区域内北京市、天津市、廊坊市、保定市、张家口市、承德市共 6 个城市的典型监测站点, 按不同季节抽取典型的区域 PM_{2.5} 污染事件, 分析 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的时空变化特征和规律, 其中春季(3 月 4—10 日), 夏季(5 月 31 日—6 月 9 日), 秋季(9

月 26 日—10 月 4 日), 冬季(1 月 25 日—2 月 2 日).

从不同季节典型污染事件的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的时序变化(见图 4)来看, 春冬季相似性明显, 北京市、天津市、廊坊市、保定市整体上呈单峰变化曲线. 夏秋季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的曲线特征部分相似, 但震荡频率大于春冬季. 这主要是由于京津冀地区冬春季出现逆温层的概率较大, 形成了极稳定的空气层, 对流作用减弱, 加重了大气污染; 而夏季夜间的逆温作用减弱, 导致 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 昼夜的差别不如冬春季显著^[32]. 计算 6 个城市在历次污染事件中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 开始出现污染直至到达峰值的历时时间, 结果如表 2 所示. 由表 2 可见, 北京市、天津市和廊坊市平均历时均为 16.00 h 左右, 而保定市仅经 10.67 h 就由轻度污染升至峰值, 污染过程发展较快. 在污染较轻的城市中, 承德市平均历时为 11.50 h; 张家口市的污染过程波动明

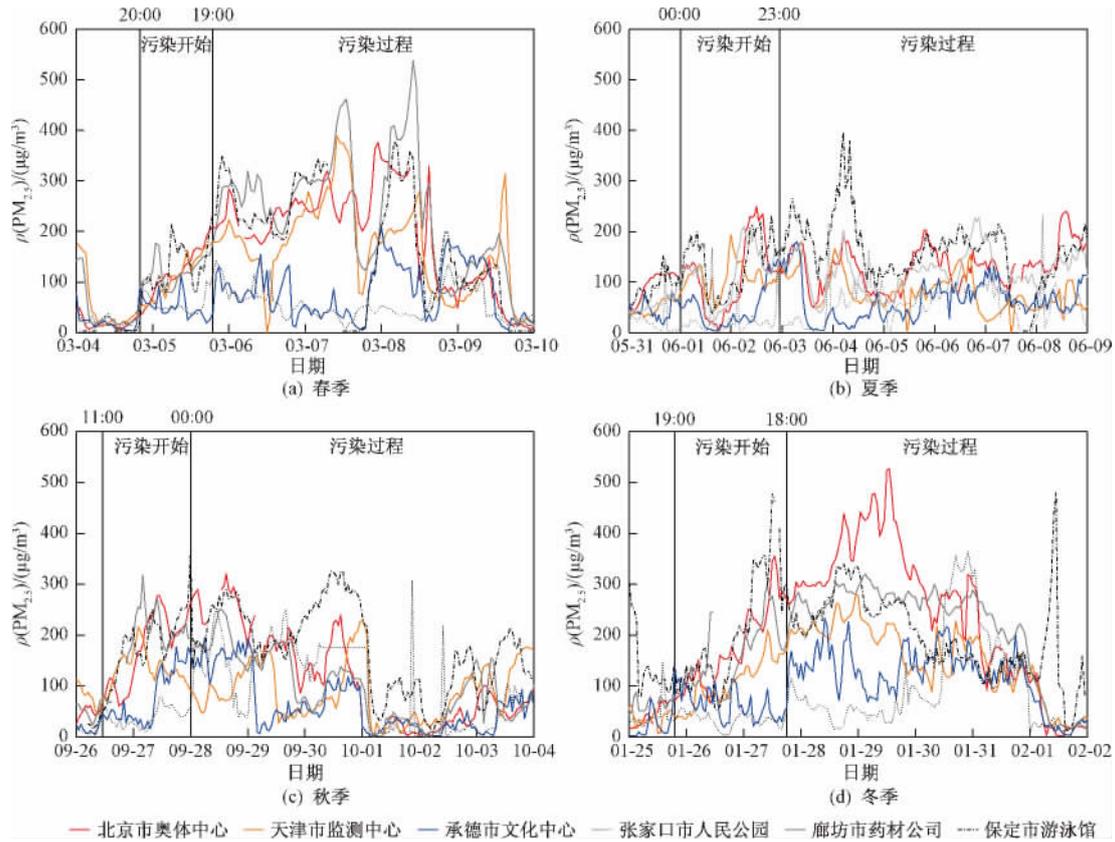


图4 不同城市典型污染事件的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 时序变化

Fig. 4 The time series variation curves of $\text{PM}_{2.5}$ concentration of typical pollution events in different cities

表2 典型污染事件城市间发生次序、时间间隔及聚集历时长

Table 2 Occurrence orders, the time interval of typical pollution events and the duration length of each event in cities

项目	典型污染事件发生次序						
	1	2	3	4	5	6	
春季	城市	保定	廊坊	北京	天津	张家口	承德
	开始时间	3月4日 20:00	3月4日 20:00	3月5日 01:00	3月5日 02:00	3月5日 16:00	3月5日 19:00
	峰值时间	3月5日 06:00	3月6日 01:00	3月6日 00:00	3月6日 00:00	3月5日 20:00	3月5日 21:00
	聚集历时/h	10.00	29.00	23.00	22.00	4.00	3.00
	时间间隔/h	0.00	0.00	5.00	1.00	14.00	3.00
夏季	城市	天津	廊坊	北京	承德	保定	张家口
	开始时间	6月1日 00:00	6月2日 00:00	6月2日 04:00	6月2日 13:00	6月2日 23:00	6月4日 09:00
	峰值时间	6月1日 09:00	6月2日 06:00	6月2日 12:00	6月3日 07:00	6月3日 10:00	6月4日 17:00
	聚集历时/h	9.00	6.00	8.00	18.00	11.00	8.00
	时间间隔/h	0.00	24.00	4.00	9.00	10.00	10.00
秋季	城市	北京	天津	保定	廊坊	承德	张家口
	开始时间	9月26日 21:00	9月26日 23:00	9月26日 23:00	9月27日 02:00	9月27日 19:00	9月28日 10:00
	峰值时间	9月27日 20:00	9月27日 12:00	9月27日 10:00	9月27日 14:00	9月28日 04:00	9月28日 21:00
	聚集历时/h	23.00	13.00	11.00	12.00	9.00	11.00
	时间间隔/h	0.00	2.00	0.00	5.00	17.00	15.00
冬季	城市	保定	廊坊	北京	天津	承德	张家口
	开始时间	持续污染	1月25日 19:00	1月25日 19:00	1月26日 14:00	1月27日 18:00	无持续污染
	峰值时间	持续污染	1月26日 13:00	1月26日 05:00	1月27日 10:00	1月28日 10:00	无持续污染
	聚集历时/h	—	18.00	10.00	20.00	16.00	—
	时间间隔/h	—	0.00	0.00	19.00	28.00	—
城市次序(次数)	保定(2)	廊坊(3)	北京(3)	天津(2)	承德(2)	张家口(3)	
城市(平均污染聚集历时/h)	保定(10.67)	廊坊(16.25)	北京(16.00)	天津(16.00)	承德(11.50)	张家口(5.75)	
平均间隔时间/h	0.00	6.50	2.25	8.50	17.25	7.00	
平均污染聚集历时/h	14.00	16.50	13.00	18.00	10.00	7.33	

显 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 升至峰值平均历时仅为 5.75 h, 为短暂的波动型污染过程。

研究区域 9 月 27 日典型污染事件中污染物累积阶段的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间变化如图 5 所示。在整个污染事件中, $\text{PM}_{2.5}$ 沿河南省(山东省)—河北省—北京市(天津市)形成带状分布。在西部和北部地区, 因受地势的阻挡作用, 污染带状边际与太行山、阴山山脉的南麓连线一致。在东部和南部与潍坊市—枣庄市—淮北市—阜阳市连线一致。与时间序列变化分析对应, $\text{PM}_{2.5}$ 累积过程中在空间上呈现空间运移的特点。由此可见, 对一次污染物累积的过程而言, 区域尺度上 $\text{PM}_{2.5}$ 污染在 24 h 内出现了由南向北的移动, 呈现显著的区域变化特征, 其污染范围和质量浓度同时增大。北京市以南地区因位于太行山和阴山山脉交界处, 地势由西北向东南倾斜, 南部地势低, 下垫面比较潮湿, 在南风作用下大量污染物和水汽易在山前的平原地区堆积, 因而易形成雾霾或使雾霾有所加重^[29]。而承德市和张家口市由阴山山脉横贯其中, 地势稍高, 污染物和水汽不

宜在此堆积, 扩散条件较好, 加上地域内的污染物排放较小, 因此空气质量显著优于研究区域内其他的城市。

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的空间聚集程度

研究区域所有监测站点的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 呈显著正相关, 全局空间自相关指数为 0.41。说明京津冀及其周边区域的污染呈现集中连片的态势, 区域之间的相互影响现象明显。同为高值区所包围的样本, 主要分布在北京市、天津市、河北省中南部、山东省西南部和河南省郑州市(见图 6(a)), 形成由南向北的污染带, 标识空气污染需集中治理的区域。这主要是由于上述几个省区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源企业的数量较大, 影响区域集中所致。河北省北部的张家口市、承德市、秦皇岛市以及辽宁省的部分区域为低值聚集区(见图 6(b)), 山东省中东部、南部也为低值聚集区域。上述地区的由于自然环境、经济发展模型等因素的影响, 污染企业的数量相对较小且气候条件较利于污染物扩散, 因此为低值聚集区。

研究区域内所有监测点位未通过 0.05 和 0.01 显

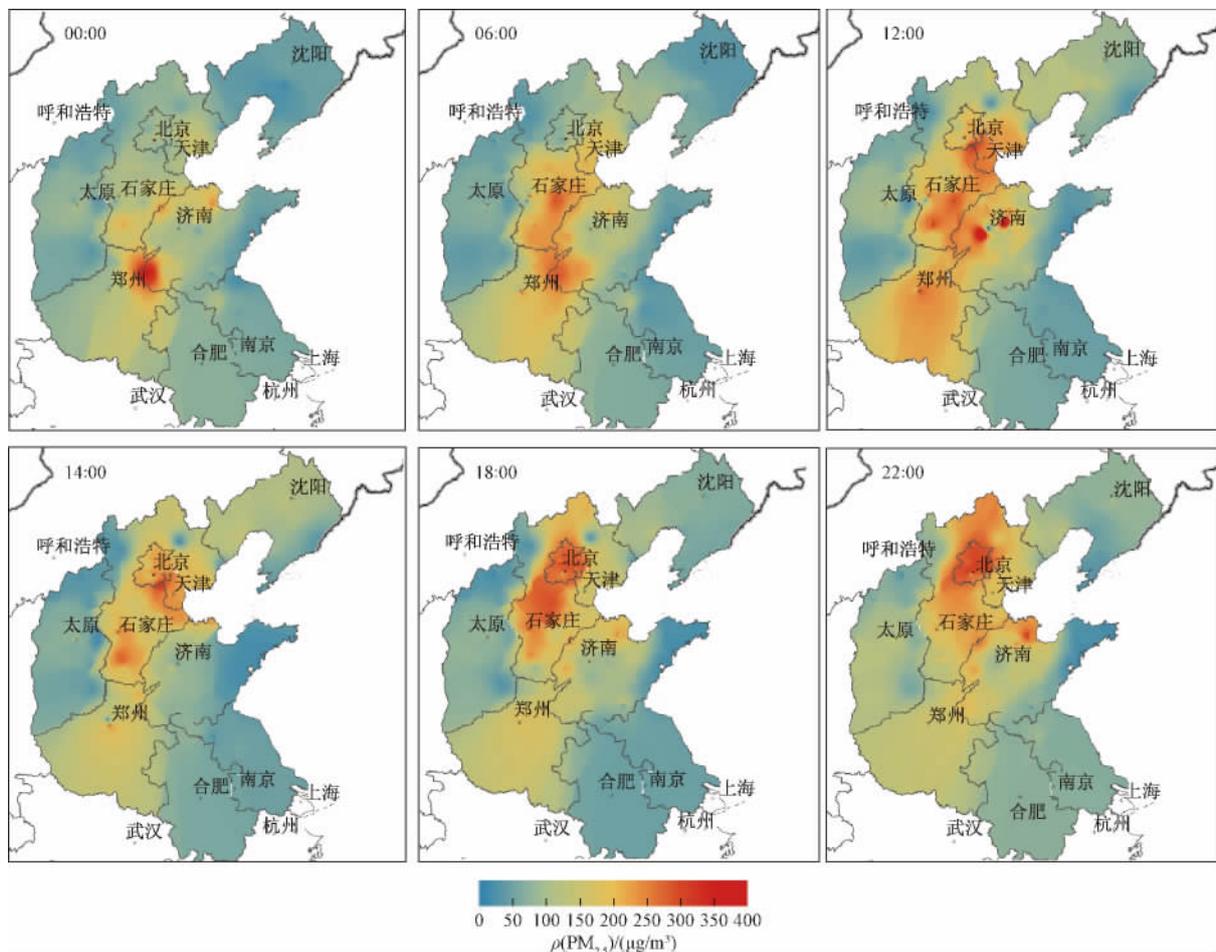


图 5 9 月 27 日污染累积过程中的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的空间变化特征

Fig. 5 The spatial characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ accumulation process on 27th September

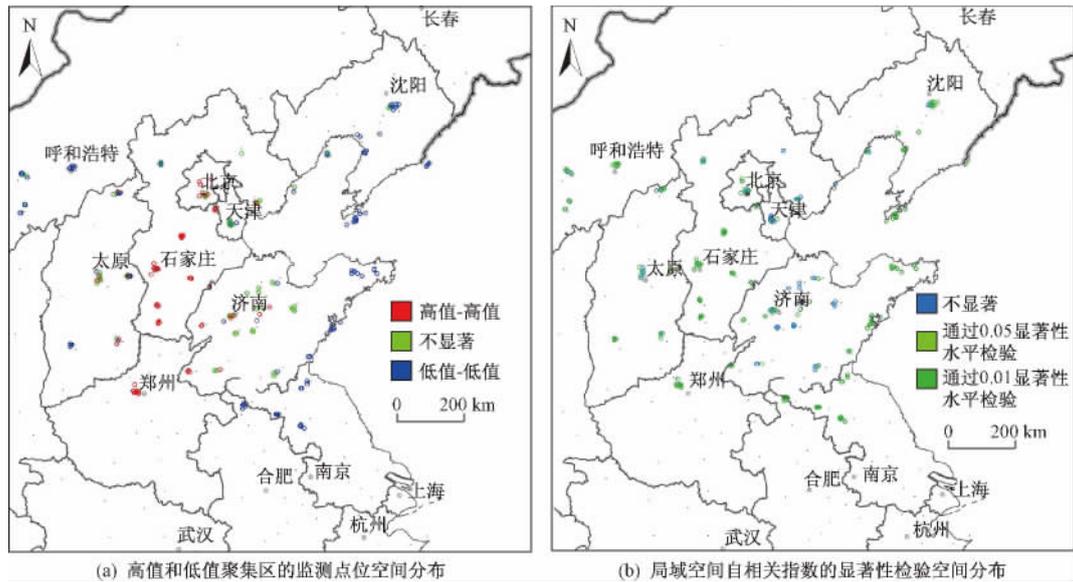


图 6 研究区域各监测点位 $\rho(PM_{2.5})$ 局域空间自相关分析结果

Fig. 6 Local spatial autocorrelation results of $\rho(PM_{2.5})$ for all automatic $PM_{2.5}$ monitoring sites in study area

著性水平检验的样本数量较少; 通过 0.05 显著性水平检验的样本量占总样本量的 21.28%; 通过 0.01 显著性水平检验的样本量占总样本量的 38.82%. 局域空间自相关指数显著性水平高于 0.05 的样本分布于研究区域内的大部分监测站点, 呈显著正相关, 空气污染物严重的区域聚集显著.

2.3 $PM_{2.5}$ 污染的热点区域

对典型污染事件期间所有监测点位的有效观测样本进行空间热点探测, 并统计 $PM_{2.5}$ 污染的空间热点区域的范围和面积, 结果如图 7 所示.

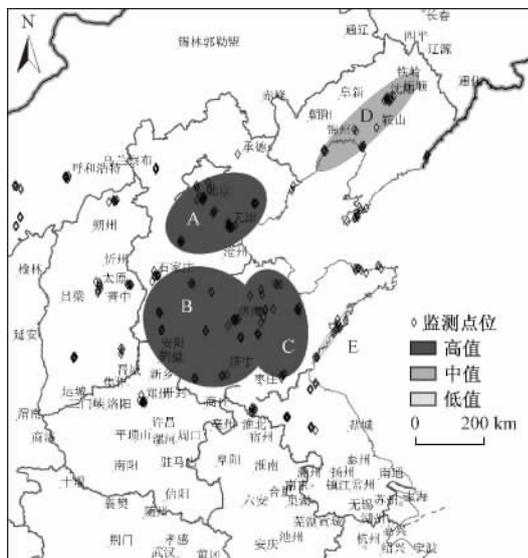


图 7 研究区域 $PM_{2.5}$ 污染热点区域的空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of $PM_{2.5}$ pollution hot spot in study area

由图 7 可见, 研究区域共存在 5 个 $PM_{2.5}$ 热点聚集区, 其中 3 个为高值聚集区——A、B、C 区, 主要涉及北京市、天津市、河北省、河南省北部和山东省中西部, 聚集区椭圆且扁平程度较小, 污染集中连片, 影响面积大, 东北-西南方向相关明显. A 区包括北京市、天津市、廊坊市、唐山市和保定市 5 个城市, 面积为 53 099.25 km^2 (见表 3), 东北-西南方向相关性明显, 说明在该方向上污染物输送和区域影响存在关系. B 区包括河北省南部、河南省北部和山东省西部的大部分城市, 面积为 102 628.97 km^2 , 呈近圆形分布, 方向上的相关性不明显, 该区域为研究区域内 $PM_{2.5}$ 污染最严重、面积最大的区域, 也是 $PM_{2.5}$ 跨省区联防联控的重点区域. C 区主要位于山东省的中部, 包括济南市、淄博市、滨州市等共 8 个城市, 南北-偏西方向相关性明显, 说明该方向上存在污染物输送和区域影响关系. B、C 区在空间上交叉重叠, 济南市、泰安市成为污染区域影响的叠加区域, 污染非常严重. A 区和 B、C 区分别在东北-西南、南北偏西方向上存在 $PM_{2.5}$

表 3 $PM_{2.5}$ 污染热点区域的属性
Table 3 The attributes of $PM_{2.5}$ pollution hot spot areas

区号	$\rho(PM_{2.5})$ 分布	中心位置	角度/($^\circ$)	面积/ km^2
A	高值	116.79 $^\circ$ E, 39.490 $^\circ$ N	69.22	53 099.25
B	高值	115.99 $^\circ$ E, 36.566 $^\circ$ N	38.52	102 628.97
C	高值	118.27 $^\circ$ E, 36.440 $^\circ$ N	86.81	50 408.84
D	中值	122.54 $^\circ$ E, 41.275 $^\circ$ N	57.11	31 186.44
E	低值	120.18 $^\circ$ E, 35.951 $^\circ$ N	43.92	3 821.82

污染的高相关性。

$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的中值聚集区主要分布在辽宁境内的沈阳市—葫芦岛市一线, 热点区域椭圆且扁平程度较大, 面积为 31 186.44 km², 呈明显的东北—西南方向相关。这主要受辽宁省境内的地形影响, 与东北平原的走向相一致, 在大兴安岭和长白山脉之间形成东北—西南走向的通道, 是污染物扩散和区域影响的主要方

向。 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的低值区 E 区包括山东省的青岛市和日照市 2 个城市, 呈东北—西南方向相关。

2.4 PM_{2.5}污染风险因素

利用地理探测器, 以 20 km × 20 km 格网为单元, 提取 2013 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值和当年各风险因子数值, 分析京津冀地区 PM_{2.5} 污染的风险因子的影响权重, 结果如表 4 所示。

表 4 PM_{2.5} 污染环境风险因子的影响力及因子间差异的显著性检验

Table 4 The influence power index of PM_{2.5} pollution risk factors and the significant test of the factor differences

项目	污染企业总数	人口数量	地形坡度	地表覆盖类型	年降水量	降水量 > 0.1 mm 的日数	年均风速	年均相对湿度
因子差异显著性检验	0.94	0.60	0.89	0.52	0.93	0.57	0.33	0.51
污染企业总数								
人口	N							
地形坡度	N	Y						
地表覆盖类型	N	N	N					
年降水量	N	Y	Y	Y				
降水日数	N	N	N	Y	N			
年均风速	N	N	N	N	N	N		
年均相对湿度	N	N	N	N	N	N	Y	

注: Y 表示对对应行上的风险因子对 PM_{2.5} 污染的影响显著大于对应列的风险因子(显著性水平为 0.05); N 表示对对应行的风险因子对 PM_{2.5} 污染的影响与对应列的风险因子相比没有显著差异。

京津冀地区 8 个风险因子对 PM_{2.5} 污染的影响力排序为污染企业总数(0.94) > 年降水量(0.93) > 地形坡度(0.89) > 人口数量(0.60) > 降水量大于 0.1 mm 的日数(0.57) > 地表覆盖类型(0.52) > 年均相对湿度(0.51) > 年均风速(0.33)。其中污染企业总数在一定程度上代表了污染物的排放情况, 是污染的主导因子, 对 PM_{2.5} 污染的影响程度最大; 其次是年降水量, 并且其对 PM_{2.5} 污染的影响程度显著大于(显著性水平为 0.05) 地形坡度、人口数量和地表覆盖类型。自然地理环境的地形坡度对污染物聚集和消散有重要影响, 对 PM_{2.5} 污染特征的影响也较大。地理探测器的风险因子交互影响分析表明, 污染企业总数、年降水量、地形坡度 3 个风险因子之间具有显著的交互影响。人口数量的空间分布对 PM_{2.5} 污染的影响程度略大于降水量 > 0.1 mm 的日数、地表覆盖类型、年均相对湿度和年均风速, 但几个风险因子之间相比并没有显著性差异。

污染企业总数是最大的 PM_{2.5} 污染风险因子, 这在统计上证明了京津冀地区 PM_{2.5} 污染的主要因素是污染物排放。在污染物排放一定的条件下, 气象要素中的年降水量和自然地理环境中的地形坡度是影响 PM_{2.5} 污染特征的重要风险因子。近期环境保护部发布的京津冀地区源解析结果(<http://www.zhb.gov>。

cn) 和相关 PM_{2.5} 源解析研究成果^[4, 33-34] 与该研究结果具有一致性。人口数量也是重要风险因子, 因为人口空间分布与交通粉尘、尾气污染和生活污染源排放等高度相关^[35, 36]。气象因素中除了年降水量以外, 降水量 > 0.1 mm 的日数是对 PM_{2.5} 污染影响最大的风险因子, 降水量 > 0.1 mm 的日数、年均相对湿度和年均风速三者对 PM_{2.5} 污染的影响差异不显著。

3 结论

a) 在春冬季典型污染事件中; 北京市、天津市、廊坊市、保定市、张家口市、承德市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化曲线相似, 整体上呈单峰变化; 夏秋季典型污染事件过程较短, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 曲线波动频繁。先发生污染的城市 PM_{2.5} 自出现轻度污染至浓度峰值的历时差别不大, 后出现污染的城市污染物的聚集历时均缩短。空间上 PM_{2.5} 污染呈现河南省(山东省)—河北省—北京市(天津市)的带状分布特征, 西部和北部边缘与太行山、阴山山脉的南麓一线一致, 并且污染过程中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 表现出空间运移特征。

b) 在京津冀及周边区域典型污染事件中, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 呈显著的空间正相关关系, 全局空间自相关指数为 0.41, 高值和高值聚集, 低值和低值聚集的特征明显。 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高值聚集区主要分布在北京市、天津市、河北省中南部和山东省西部。

c) 京津冀及周边区域共存在5个 $PM_{2.5}$ 污染的热点聚集区,其中3个为 $\rho(PM_{2.5})$ 高值聚集区,主要分布在北京市、天津市、河北省和山东省中部,聚集区椭圆扁平程度较小,污染集中连片,影响面积大,东北-西南方向相关明显。济南市和泰安市成为污染物区域影响的叠加区域,污染较严重。中值聚集区主要分布在辽宁省境内的沈阳市—葫芦岛市一线,热点区域椭圆扁平程度较大,呈明显的东北-西南方向相关。 $\rho(PM_{2.5})$ 低值聚集区主要分布在山东省的青岛市和日照市,呈狭长的走廊型分布。

d) 在京津冀地区所选的8个 $PM_{2.5}$ 污染特征风险因子中,污染企业总数在一定程度上代表了污染源排放状况,是 $PM_{2.5}$ 污染的主导因子(影响力为0.97,下同);其次是年降水量(0.93)和地形坡度(0.89),表明除了污染源,气象条件和自然地理要素对污染变化特征也有重要影响;最后依次是人口数量(0.60)、降水量大于0.1 mm的日数(0.57)、地表覆盖类型(0.52)、年均相对湿度(0.51)和年均风速(0.33),但几个风险因子之间没有显著性差异。

参考文献(References):

- [1] 王跃思,张军科,王莉莉,等.京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望[J].地球科学进展,2014,29(3):388-396.
WANG Yuesi, ZHANG Junke, WANG Lili, et al. Researching significance, status and expectation of haze in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(3): 388-396.
- [2] LI Pengfei, YAN Renchang, YU Shaocai, et al. Reinstate regional transport of $PM_{2.5}$ as a major cause of severe haze in Beijing[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(21): E2739-E2740.
- [3] LELIEVELD J, EVANS J S, FNAIS M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. Nature, 2015, 525(7569): 367-371.
- [4] HUANG Rujin, ZHANG Yanlin, BOZZETTI C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. Nature, 2014, 514(7521): 218-222.
- [5] PUI D Y H, CHEN Shengchieh, ZUO Zhili. $PM_{2.5}$ in China: measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation[J]. Particuology, 2014, 13: 1-26.
- [6] 徐小娟,刘子锐,高文康,等.后奥运时期京津冀区域大气本底夏季污染变化[J].环境科学研究,2012,25(9):959-967.
XU Xiaojuan, LIU Zirui, GAO Wenkang, et al. Changes in atmospheric background pollution during summer in the Beijing-Tianjin-Hebei region after the 2008 Olympic Games in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(9): 959-967.
- [7] CHAN C K, YAO Xiaohong. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42.
- [8] LIU Zirui, HU Bo, ZHANG Junke, et al. Characteristics of aerosol size distributions and chemical compositions during wintertime pollution episodes in Beijing[J]. Atmospheric Research, 2016, 168: 1-12.
- [9] ZHAO P S, DONG F, HE D, et al. Characteristics of concentrations and chemical compositions for $PM_{2.5}$ in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(9): 4631-4644.
- [10] WANG Yungang, YING Qi, HU Jianlin, et al. Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013-2014[J]. Environment International, 2014, 73: 413-422.
- [11] ZHANG Yanlin, CAO Fang. Fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in China at a city level[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14884.
- [12] LIU Yansui, LI Yuheng, CHEN Cong. Pollution: build on success in China[J]. Nature, 2015, 517(7533): 145.
- [13] LIU Zhu, GUAN Dabo, WEI Wei, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. Nature, 2015, 524(7565): 335-338.
- [14] 解淑艳,王晓彦,吴彦名,等.环境空气中 $PM_{2.5}$ 自动监测方法比较及应用[J].中国环境监测,2013,29(2):150-155.
XIE Shuyan, WANG Xiaoyan, WU Yaming, et al. Study of the comparison and application of $PM_{2.5}$ automatic monitoring methods[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(2): 150-155.
- [15] JIN Fei, LEE Lungfei. On the bootstrap for Moran's test for spatial dependence[J]. Journal of Econometrics, 2015, 184(2): 295-314.
- [16] 王劲峰,廖一兰,刘鑫.空间数据分析教程[M].北京:科学出版社,2010.
- [17] BONE C, WULDER M A, WHITE J C, et al. A GIS-based risk rating of forest insect outbreaks using aerial overview surveys and the local Moran's I statistic[J]. Applied Geography, 2013, 40: 161-170.
- [18] BESAG J, YORK J, MOLLIE A. Bayesian image restoration, with two applications in spatial statistics[J]. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 1991, 43(1): 1-20.
- [19] DOU Xiangfeng, JIANG Yi, LIN Changying, et al. Spatial, temporal and space-time clusters of hemorrhagic fever with renal syndrome in Beijing, China[M]// ZENG D, YANG C, TSENG V, et al. Smart health. Heidelberg, Berlin, Germany: Springer, 2013: 33-40.
- [20] WANG Jinfeng, LI Xinhu, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [21] HU Yi, WANG Jinfeng, LI Xiaohong, et al. Geographical detector-based risk assessment of the under-five mortality in the 2008 Wenchuan Earthquake, China[J]. Plos One, 2011, 6(6): e21427.
- [22] TRAN H N Q, MÖLDERS N. Investigations on meteorological conditions for elevated $PM_{2.5}$ in Fairbanks, Alaska[J]. Atmospheric Research, 2011, 99(1): 39-49.
- [23] LIU Yang, HE Kebin, LI Shenshen, et al. A statistical model to

- evaluate the effectiveness of PM_{2.5} emissions control during the Beijing 2008 Olympic Games [J]. *Environment International*, 2012, 44: 100-105.
- [24] JEONG J I, PARK R J. Effects of the meteorological variability on regional air quality in East Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 69: 46-55.
- [25] 康娜, 辛金元, 蒯永耀, 等. 北京山前典型细粒子污染过程的气象条件分析[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(9): 1013-1020.
KANG Na, XIN Jinyuan, LIU Yongyao, et al. Meteorological condition analysis of a typical fine particle pollution event in the piedmont region of Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(9): 1013-1020.
- [26] 王丛梅, 杨永胜, 李永占, 等. 2013年1月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(7): 695-702.
WANG Congmei, YANG Yongsheng, LI Yongzhan, et al. Analysis on the meteorological condition and formation mechanism of serious pollution in south Hebei Province in January 2013 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(7): 695-702.
- [27] ZHANG Chen, NI Zhiwei, NI Liping. Multifractal detrended cross-correlation analysis between PM_{2.5} and meteorological factors [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 438: 114-123.
- [28] HAO Yu, LIU Yiming. The influential factors of urban PM_{2.5} concentrations in China: a spatial econometric analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1443-1453.
- [29] 徐伟嘉, 何芳芳, 李红霞, 等. 珠三角区域PM_{2.5}时空变异特征[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(9): 951-957.
XU Weijia, HE Fangfang, LI Hongxia, et al. Spatial and temporal variations of PM_{2.5} in the Pearl River Delta [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(9): 951-957.
- [30] 环境保护部. 2013 中国环境质量报告 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [31] CHEN Chuchih, WU Changfu, YU Hwalung, et al. Spatiotemporal modeling with temporal-invariant variogram subgroups to estimate fine particulate matter PM_{2.5} concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 54: 1-8.
- [32] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. *环境科学*, 2014, 35(6): 2031-2044.
LIAO Xiaonong, ZHANG Xiaoling, WANG Yingchun, et al. Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in summer and winter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(6): 2031-2044.
- [33] 王自发, 李杰, 王哲, 等. 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*, 2014, 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*, 2014, 44(1): 3-14.
- [34] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析[J]. *环境科学*, 2015, 36(4): 1148-1153.
LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, et al. Regional source apportionment of PM_{2.5} in Beijing in January 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4): 1148-1153.
- [35] LI Yunchun, SHU Man, HO S S H, et al. Characteristics of PM_{2.5} emitted from different cooking activities in China [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 166: 83-91.
- [36] FERM M, SJÖBERG K. Concentrations and emission factors for PM_{2.5} and PM₁₀ from road traffic in Sweden [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 119: 211-219.

(责任编辑: 孙彩萍)