

· 环境综合整治 ·

## 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 空间分布特征及其影响因素分析

盛 晴, 洪志敏, 陈女珍

(内蒙古工业大学理学院, 呼和浩特 010051)

**摘要:** 文章选取 2016—2020 年京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 监测站点数据为研究对象, 分析京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的时空分布特征, 并构建地理加权回归模型 (GWR) 分析 PM<sub>2.5</sub> 浓度受各因素影响的时空变化特征。结果表明: (1) 2016—2020 年京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度基本呈下降趋势, 2018 与 2020 年的 PM<sub>2.5</sub> 浓度最低且污染区域最少; PM<sub>2.5</sub> 浓度表现出明显的季节变化特征, 春夏季节较低, 冬季最高。(2) 京津冀北部的张家口、承德和秦皇岛为 PM<sub>2.5</sub> 浓度低值区, 南部的石家庄、邢台、邯郸、保定和衡水为 PM<sub>2.5</sub> 浓度高值区。(3) 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间分布存在明显的聚集特征, 北部保持“低-低”聚集, 南部保持“高-高”聚集, 非显著区域在中间位置, 呈现倒“U”型分布。(4) 不同的影响因素对于 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响程度有着较为明显的空间差异性。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 京津冀地区; 空间自相关; 多重共线性; 地理加权回归模型

**中图分类号:** X513

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022070051

## Spatial distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and its influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region

SHENG Qing, HONG Zhimin, CHEN Nüzhen

(College of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia, 010051, China)

**Abstract:** Fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) has become a major air pollutant affecting Air Quality in China. In this paper, the spatio-temporal effects of PM<sub>2.5</sub> concentrations in Beijing-Tianjin-Hebei region were analyzed from 2016 to 2020, and the spatial variation characteristics of PM<sub>2.5</sub> concentrations affected by various factors were analyzed by a geographically weighted regression model (GWR). The results showed that from 2016 to 2020, the PM<sub>2.5</sub> concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei region basically showed a downward trend. In 2018 and 2020, the PM<sub>2.5</sub> concentration was the lowest and the polluted area was the least with a seasonal characteristic of low in spring & summer and highest in winter. Zhangjiakou, Chengde and Qinhuangdao in the north of Beijing-Tianjin-Hebei were low-value areas for PM<sub>2.5</sub> concentrations, and Shijiazhuang, Xingtai, Handan, Baoding and Hengshui in the south were high-value areas for PM<sub>2.5</sub> concentrations. There were obvious aggregation characteristics in the spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei region, with the northern part maintaining "low-low" aggregation, the southern part maintaining "high-high" aggregation, and the non-significant area in the middle position showing an inverted "U-shaped" distribution. Different influencing factors had obvious spatial differences in the degree of influence of PM<sub>2.5</sub> concentration.

**Keywords:** PM<sub>2.5</sub>; Beijing-Tianjin-Hebei region; spatial autocorrelation; multicollinearity; geographically weighted regression model

**CLC number:** X513

近年来,随着中国城市化以及工业化进程加速推进,地区环境污染形势日益严峻,从城市污染逐步发展为影响范围更广、危害性更强的区域性污染,表现为雾霾天气频繁出现,大气能见度严重下

降<sup>[1-2]</sup>。目前,PM<sub>2.5</sub>已经成为影响中国空气环境质量的重要污染物,其具有粒径小、活性强、表面积大、易附带有毒有害物质等特点,对人体健康危害极大<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期: 2022-07-29

录用日期: 2022-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(81860605); 内蒙古自然科学基金项目(2020MS01005、2023MS01001); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20220087)

作者简介: 盛 晴(1998—),女,硕士研究生。研究方向:空间数据分析。E-mail: 944937805@qq.com

通信作者: 洪志敏(1975—),女,教授。研究方向:空间数据分析。E-mail: zhmhong@imut.edu.cn

引用格式: 盛 晴,洪志敏,陈女珍. 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 空间分布特征及其影响因素分析[J]. 环境保护科学, 2023, 49(5): 68-75.

京津冀地区是一个面积约 21.6 万 km<sup>2</sup>, 拥有超 640 km 海岸线、海陆兼备的特殊地理区域, 是我国最重要的政治、经济、文化与科技中心, 作为中国经济最发达的区域之一<sup>[5]</sup>, 在区位、人力、技术和资源等方面具有天然互补优势, 并在全国区域协调发展中具有极其重要的战略地位, 是国家自主创新战略的重要承载地, 肩负着我国参与全球竞争和率先实现现代化的重任<sup>[6]</sup>。近年来京津冀地区逐步成为以高浓度细颗粒物和臭氧为特征的典型“双高”型污染最严重的区域<sup>[2]</sup>, 该地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度远超全国平均水平, 其治理形势非常严峻<sup>[7]</sup>。

目前, 众多学者对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的研究区域多以国家、省级或市级为单位<sup>[8-9]</sup>, 针对城市群的研究相对有限。许多学者<sup>[10-11]</sup> 的研究表明 PM<sub>2.5</sub> 污染及其气象影响因素有着十分密切的关系, 气压、相对湿度、气温、日照时长、风速、降雨等气象条件对 PM<sub>2.5</sub> 浓度都具有显著影响。较少针对社会经济变量对 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响的研究, 司晶晶等<sup>[12]</sup> 研究表明, 长江经济带地区的生产总值、第二产业占比、人口密度和建成区绿化覆盖率均与 PM<sub>2.5</sub> 浓度呈正相关; 温佳薇等<sup>[13]</sup> 研究发现, 京津冀地区汽车尾气排放是造成 PM<sub>2.5</sub> 污染的重要影响因素。

本研究以京津冀地区的区县为基本单元, 以 2016 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日的日值 PM<sub>2.5</sub> 浓度数据、气象数据和社会经济数据为研究对象, 分析了京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的时空变化特征, 并着重分析 PM<sub>2.5</sub> 浓度与气象因素和社会经济因素的空间关系, 以期提高《大气污染防治行动计划(2013—2017 年)》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划(2018—2020 年)》实施背景下, 人们对京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 污染的认识, 为我国当前空气污染治理和科学防控提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本文研究的空间区域是京津冀地区, 该地区是中国的“首都经济圈”, 包括北京市、天津市和河北省的 11 个地级市, 基本空间尺度单元是区县, 时间范围为 2016 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日。

### 1.2 数据来源

文中所使用的 PM<sub>2.5</sub> 浓度及气象数据来自 NASA (<https://daac.gsfc.nasa.gov/>) 的遥感 2016 年 1 月

1 日—2020 年 12 月 31 日日值数据, 社会经济数据来自研究区域相同时间窗口的城市统计年鉴。

### 1.3 研究方法

1.3.1 莫兰指数 在空间相互作用和空间扩散的双重影响下, 地理数据可能不再相互独立, 而是具有特定的相关性。本文使用莫兰指数从全局和局部两个角度对京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度进行空间聚类分析。全局莫兰指数  $I$  的计算, 见式(1):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (1)$$

每个地理单元的局部莫兰指数  $I_i$ , 见式(2):

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

式中,  $n$  代表研究区域内区县的数量,  $x_i$  表示第  $i$  个地理单元的 PM<sub>2.5</sub> 浓度,  $\bar{x}$  表示 PM<sub>2.5</sub> 浓度的平均值,  $\omega_{ij}$  为空间权重值, 且当  $i$  与  $j$  之间有公共边时,  $\omega_{ij}=1$ , 否则  $\omega_{ij}=0$ 。

1.3.2 多重共线性分析 选取了 3 个气象指标和 4 个社会经济指标作为协变量, 首先通过计算方差膨胀因子(VIF), 检验变量间是否存在多重共线性, VIF 小于 10 表示存在少量的多重共线性, VIF 越大, 多重共线性越严重。

1.3.3 GWR 模型 GWR 模型表达, 见式(3):

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中,  $(u_i, v_i)$  为区域第  $i$  个空间单元的地理位置信息,  $(y_i; X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip})$  为因变量  $y$  和  $p$  个协变量  $x_1, x_2, \dots, x_p$  的观测数据,  $\beta_0(u_i, v_i)$  为回归模型的截距项,  $\beta_k(u_i, v_i) (k = 1, 2, \dots, p)$  为回归系数,  $\varepsilon_i$  为独立的随机误差项, 满足零均值, 同方差的假定。

采用局部加权最小二乘法校正模型(3)得到的回归系数的估计, 见式(4):

$$\hat{\beta}(u_i, v_i) = [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) y \quad (4)$$

式中,

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix},$$

$x_i^T = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  为矩阵  $X$  的第  $i$  行, 残差向量  $\varepsilon = y - \hat{y}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度时间变化特征

根据空气质量指数技术规定, 将 PM<sub>2.5</sub> 浓度值划分为 6 个等级 (单位为  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 分别为优 [0,35]、良 (35,75]、轻度污染 (75,115]、中度污染 (115,150]、重度污染 (150,250] 和严重污染 (250,+∞)。

2016—2020 年不同等级 PM<sub>2.5</sub> 浓度天数占比, 见图 1。

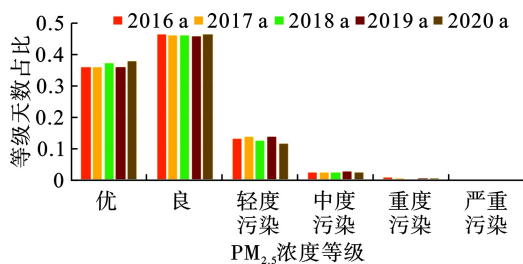


图 1 2016—2020 年不同等级 PM<sub>2.5</sub> 浓度天数占比

Fig. 1 Proportion of days of PM<sub>2.5</sub> concentration values of different grades in 2016—2020

图 1 可知, 自 2016—2020 年, PM<sub>2.5</sub> 浓度处于优良级别的天数占比最多, 重度污染和严重污染天数的占比逐年下降, 其中优良占比最多的年份为 2020 年, 其次是 2018 年, 说明近 5 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度呈现下降的趋势。

2016—2020 年京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度均值季节变化趋势, 见图 2。

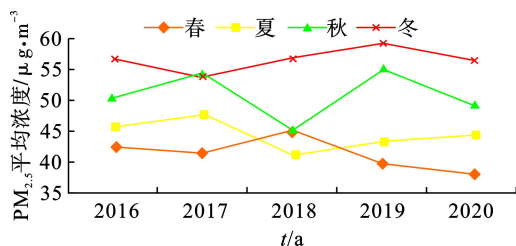


图 2 2016—2020 年京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度均值季节变化趋势

Fig. 2 Seasonal variation trend of mean PM<sub>2.5</sub> concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2016—2020

图 2 可知, PM<sub>2.5</sub> 浓度表现出明显的季节变化特征: 春夏两季低, 秋冬两季高且冬季最高。春季 PM<sub>2.5</sub> 浓度最低的主要原因可能是春季多风沙, 吹散大气中的 PM<sub>2.5</sub>; 夏季大气垂直扩散旺盛有利于污染物的清除; 秋季大气层结构向冬季转换, 扩散条件逐渐变差<sup>[14]</sup>; 冬季气候干燥寒冷, 空气自净能

力差, 大气层结构比较稳定, 逆温强度大, PM<sub>2.5</sub> 稀释扩散能力降低, 导致 PM<sub>2.5</sub> 等污染物快速积累, 且 10 月份至次年 3 月份是北方的供暖期, 工业企业和居民都使用煤炭作为取暖燃料, 燃煤产生的大气污染不易扩散, 是加强释放 PM<sub>2.5</sub> 的主要元凶之一。目前, 秋冬期间的 PM<sub>2.5</sub> 浓度过高已成为影响我国大气环境质量的主要矛盾和突出短板。

不同水平 PM<sub>2.5</sub> 浓度逐月变化, 见图 3。

— 下四分位数 — 中位数 — 均值 — 上四分位数

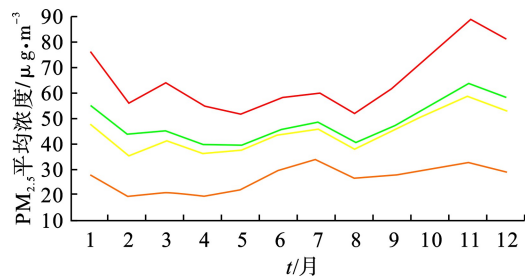


图 3 不同水平 PM<sub>2.5</sub> 浓度逐月变化

Fig. 3 The concentration of PM<sub>2.5</sub> at different levels varies from month to month

图 3 可知, 该组数据中 PM<sub>2.5</sub> 的平均浓度全年大于中位数, 称为右偏分布, 说明这组数据中偏大数较偏小数据多, PM<sub>2.5</sub> 污染形势依然严峻。关注均值曲线, 2016—2020 年京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 的月平均浓度呈左右两边顶点高, 中间顶点低的“W”型分布, 3—9 月 PM<sub>2.5</sub> 浓度较低, 空气质量较好, 10 月至次年 3 月的 PM<sub>2.5</sub> 污染较为严重, 11 月份达到最高。这种月变化的差异主要和不同季节的大气环流形势, 以及不同的主导风向、边界层抬升和降水量会产生不同的扩散、传输和沉降条件有关<sup>[15]</sup>。

### 2.2 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间变化特征

为了进一步探索 PM<sub>2.5</sub> 浓度污染的空间集聚特征, 逐年分析 2016—2020 年京津冀地区 200 个区县的 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度, 计算四分位数, 把区间分为 4 类: 良好区 (min ~ 25%), 低污染区 (25% ~ 50%), 中污染区 (50% ~ 75%), 重污染区 (75% ~ max)。

2016—2020 年京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间变化特征, 见图 4。

图 4 可知, 2016—2020 年, 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度在北部呈低浓度的空间分布格局, 在南部呈高浓度的分布格局。良好区域: 燕山—太行山北部的张家口、承德、秦皇岛和北京西北部地区是 PM<sub>2.5</sub> 的环境良好区, 唐山在 2018—2020 年除玉田县外其他区县均为环境良好区间。由于这些区域

人类活动较弱, 污染物排放强度较小, 且承德和张家口等地由阴山脉横贯其中, 地势较高, 污染物和水汽不易在此堆积, 扩散条件较好, 另外地域内的污染物排放较小, 因此 PM<sub>2.5</sub> 浓度显著低于研究区域内其他城市。平原东北部的 PM<sub>2.5</sub> 浓度为低中污染区, 推测原因是滨海区域主要得益于大气扩散条件好, 内陆部分以北京为代表主要得益于产业结构高级化带来的污染物排放强度相对较小。重污染区域: 石家庄、邢台和邯郸的东部以及保定的南部和衡水的西部地区的 PM<sub>2.5</sub> 污染最为严重, 这些城市位于京津冀地区的东南位置, 且是以工业为主的主要聚集区之一, 另外由于太行山脉是天然的屏

障, 静风天气多, 空气流动性小, 导致 PM<sub>2.5</sub> 污染累积, 若有西部地区冷空气来袭则会将污染物扩散到北京、天津等地区<sup>[16]</sup>。重污染浓度范围在 2018 年最小, 其次是 2020 年, 可能的原因是归功于京津冀区域压减燃煤、控车节油、清洁能源改造等各项减排任务的合力推进, 持续加强大气污染治理, 说明 2018 和 2020 年《打赢蓝天保卫战三年行动计划》和采取污染减排措施取得了显著的成效。值得注意的是, 邯郸市的西南角处的涉县紧挨着中污染地区, 外面又被重污染的区县包围, 但是这 4 年一直处于轻度污染区间, 说明该区域没有受到周边地区污染的影响, 自身的环境保护效果较好。

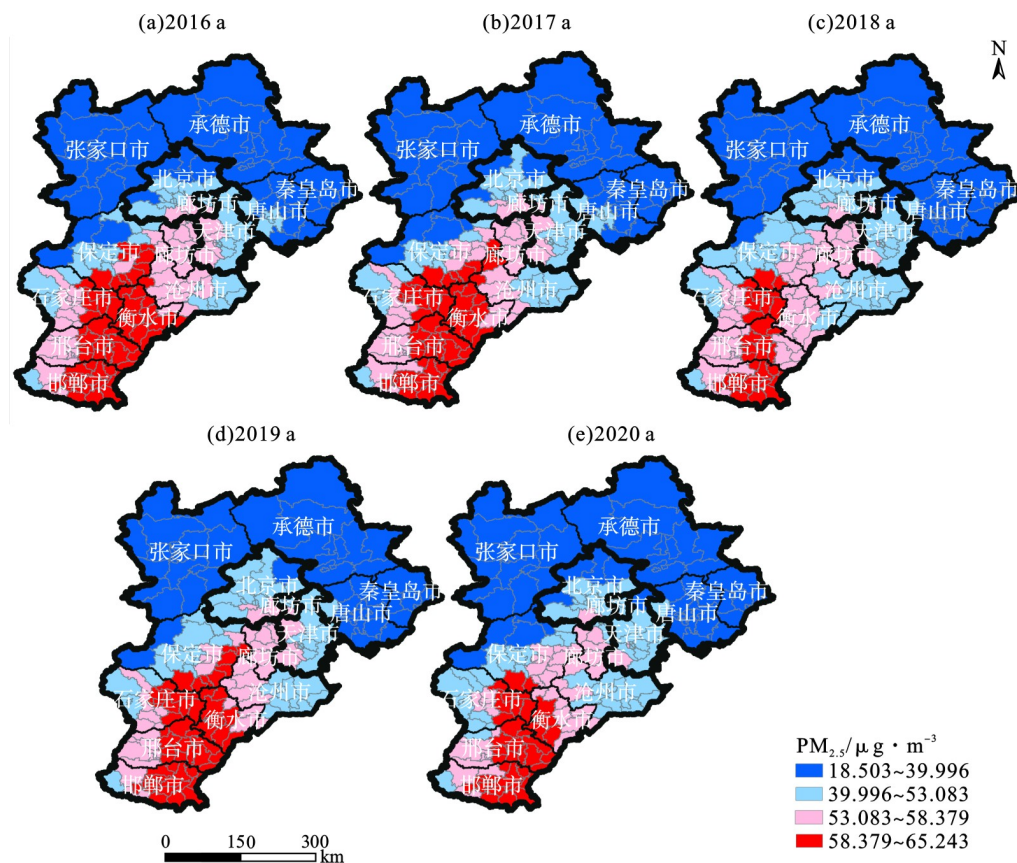


图 4 2016—2020 年京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间变化特征

Fig. 4 Spatial variation characteristics of PM<sub>2.5</sub> concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2016—2020

### 2.3 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间聚集效应

2016—2020 年京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度全局莫兰指数, 见表 1。

表 1 可知, 京津冀地区的莫兰指数  $I$  均为正值, 且  $Z$  值显著为正, 远超过了临界值 2.58, 表明京津冀地区 200 个区县的 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间分布表现出较为显著的空间集聚, 说明这些区域的空气污染需集中治理。

PM<sub>2.5</sub> 浓度局部莫兰指数聚集分布, 见图 5。

图 5 可知, 2016—2020 年的局部莫兰指数空间变化幅度并不显著, 说明这 4 年的空间聚集格局没有发生较大变化。京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度年平均浓度的“高-高”聚集主要分布在河北省的南部地区, 可能由于这些城市钢铁、建材石化、电力等高污染、高能耗行业集中, 另外地理条件不利于污染物扩散所致。而“低-低”聚集分布在京津冀的北部地

区,这些区域污染企业的数量相对较少且气候条件较利于污染物扩散,而且人口密度小,活动相对分散<sup>[1]</sup>,京津冀地区的聚集分布主要由上述两种情况为主。非显著区域在“高-高”和“低-低”区域中间,

集中在北京附近,呈现倒“U”型变化,可能的原因是北京是我国的首都,虽然人口密度大,但是高污染、高耗能产业相对较少,更加注重环境的治理,所以,其对周围城市的影响并不显著。

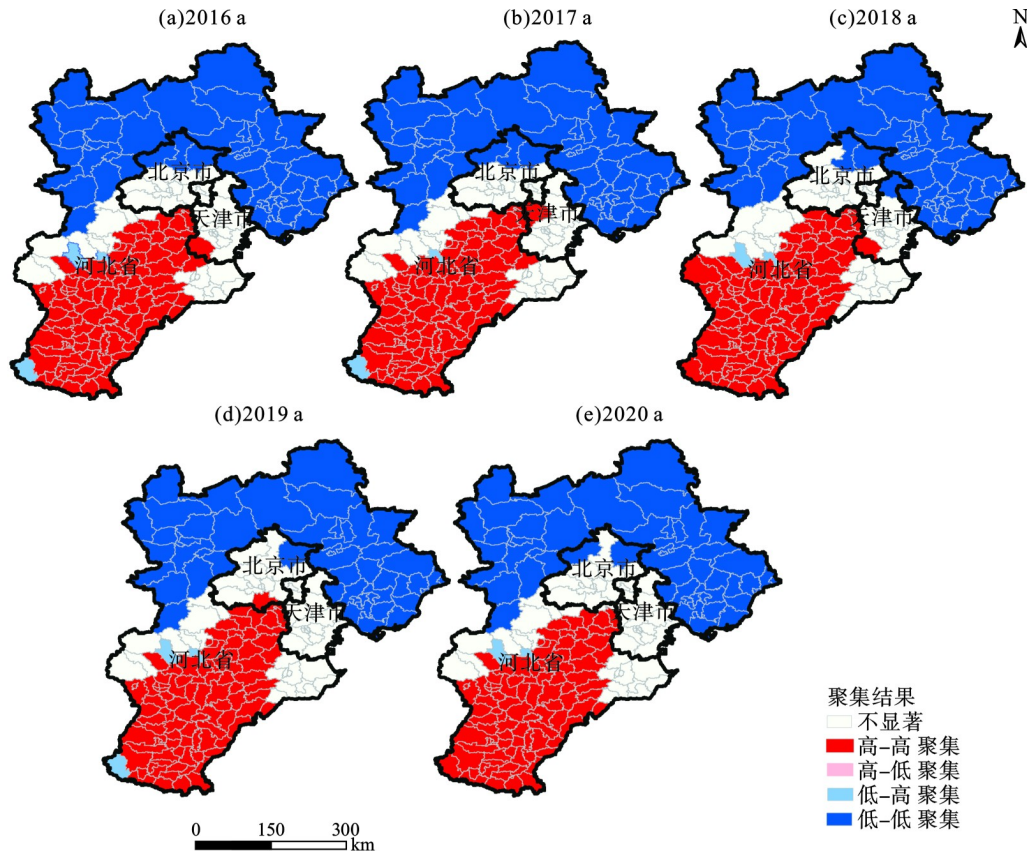


图 5 2016—2020 年  $PM_{2.5}$  浓度局部莫兰指数

Fig. 5 2016—2020  $PM_{2.5}$  concentration local Moran index

表 1 2016—2020 年京津冀地区  $PM_{2.5}$  浓度全局莫兰指数统计

Table 1 Statistics of global Moran index of  $PM_{2.5}$  concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2016—2020

t/a	全局莫兰指数 $I$	检验 $Z$ 值	检验 $P$ 值
2016	0.575	20.833	0.000
2017	0.569	20.610	0.000
2018	0.607	21.965	0.000
2019	0.578	20.922	0.000
2020	0.604	21.849	0.000

#### 2.4 京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度空间效应的影响因素分析

气象因素和社会经济指标的多重共线性检验结果,见表 2。

表 2 可知,没有自变量的 VIF 值  $>10$ ,表明这些因素自身与其他因素均不呈现多重共线性,不需要

进行剔除。

GWR 模型  $PM_{2.5}$  浓度残差莫兰指数,见图 6。

图 6 可知,使用 GWR 模型后获得的残差在京津冀的大部分区域不显著,只有在河北省承德市的西北部和秦皇岛的北部、南部地区呈现“高-低”分布格局,在保定市和石家庄的小部分区县分别呈现“低-低”和“高-高”的分布格局。可能由于这些地区自然环境、经济发展、模型等因素的影响,导致区域关联性较强,但是大部分区域的残差无相关性,因此可以说明 GWR 模型基本消除了空间自相关性,可以较好地揭示出  $PM_{2.5}$  浓度分布和各项指标之间复杂的关系和空间依赖性。

对 GWR 模型中因变量  $PM_{2.5}$  浓度与每个协变量对应的回归系数进行空间可视化,进而分析影响因素空间作用差异及强弱。京津冀地区气象因素显著性指标空间变化特征,见图 7。

表 2 方差膨胀系数表

Table 2 Table of variance expansion coefficients

变量	VIF值
日均湿度 (RH)	2.965
日均温度 (AT)	2.883
日均风速 (AW)	1.228
建成区绿化覆盖率 (X <sub>1</sub> )	1.505
人均地区生产总值 (X <sub>2</sub> )	1.805
第一产业增加值占GDP比重 (X <sub>3</sub> )	1.834
第二产业增加值占GDP比重 (X <sub>4</sub> )	1.641

图 7(a) 可知, 整体上趋势表现为京津冀地区由东南向西北平均湿度对 PM<sub>2.5</sub> 浓度分布的影响逐渐变化, 东南部地区回归系数为负, 逐渐增加到西北部地区为显著正相关, 说明在东南部地区, 增加湿度会降低 PM<sub>2.5</sub> 的浓度, 西北部地区相反, 值得注意的是在东部地区的天津市, 与周围地区回归系数的正负性相反, 为显著正相关, 可能天津市在相对湿度较高时, 由于吸湿增强的影响, 颗粒物容易聚集, 加剧 PM<sub>2.5</sub> 污染。图 7(b) 可知, 温度指标值的空间分布与湿度指标值类似, 由东南向西北逐渐降低, 温度回归系数的值在大部分区域都显著为正, 只在东南部的少部分区域为负, 说明在东南部地区的温度对于 PM<sub>2.5</sub> 浓度具有显著负相关的作用, 即较高的温度对于 PM<sub>2.5</sub> 浓度有降低的作用。图 7(c) 可知, 平均风速指标值空间分布呈现东南、西北高, 逐

渐向内降低, 从局部来看, 回归系数西部为负, 逐渐向东部增加至正, 在西部、北部地区, 增加风速会降低 PM<sub>2.5</sub> 的浓度, 说明在该地区较大的风速可能会把 PM<sub>2.5</sub> 吹散开, 有利于降低空气中的 PM<sub>2.5</sub> 浓度<sup>[17]</sup>, 中、东部地区相反, 较大的风速可能会将道路灰尘吹到空气中, 增加 PM<sub>2.5</sub> 浓度, 说明不同地理位置的风速对于 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响有显著差别。当气象条件不利于 PM<sub>2.5</sub> 污染物扩散时, PM<sub>2.5</sub> 浓度在不同城市逐步累积升高, 进而形成区域污染态势, 待气象条件转好时, 污染物开始逐渐消散<sup>[18]</sup>。

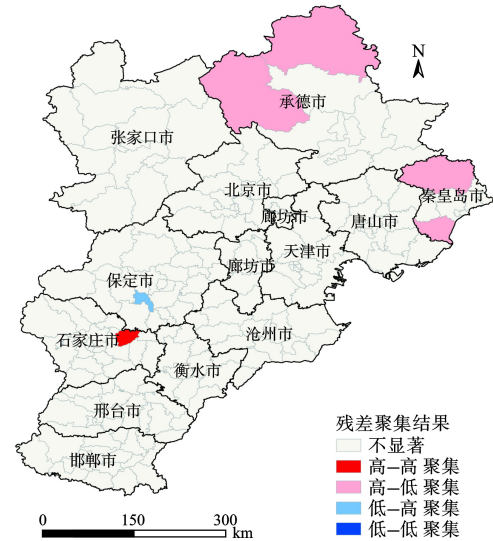


图 6 GWR 模型 PM<sub>2.5</sub> 浓度残差局部莫兰指数  
Fig. 6 GWR model PM<sub>2.5</sub> concentration residual local Moran index

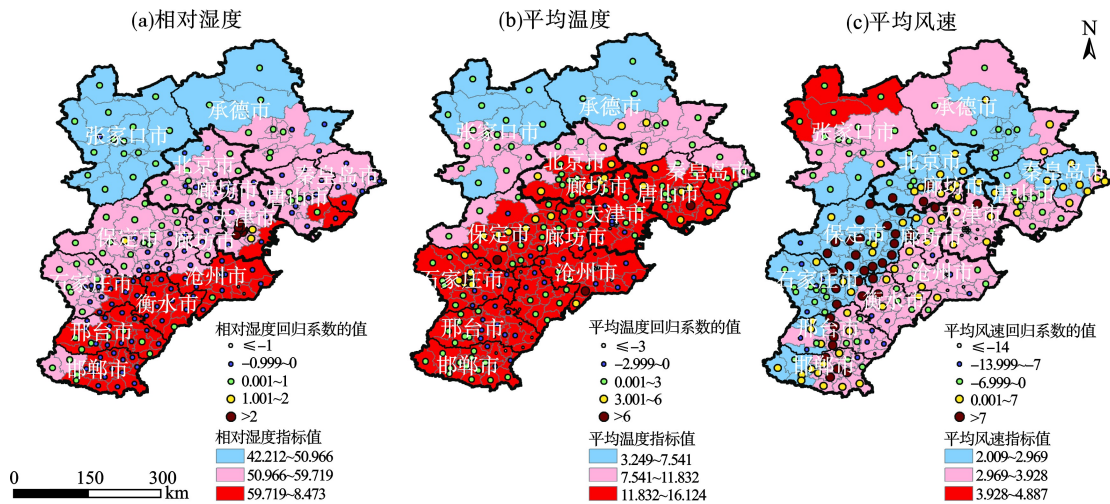


图 7 京津冀地区气象因素显著性指标空间变化特征

Fig. 7 Spatial variation characteristics of significance indicators of meteorological factors in Beijing-Tianjin-Hebei region

京津冀地区社会经济因素显著性指标空间变化特征, 见图 8。

图 8(a) 可知, 在建成区绿化覆盖率较低的京津冀东部地区, 如秦皇岛、唐山市、天津市、沧州市与

衡水市, 该变量对于 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响基本呈现显著负相关, 说明此区域绿化覆盖率越高, PM<sub>2.5</sub> 浓度越低, 可能的原因是, 绿化可以将 PM<sub>2.5</sub> 捕获到树叶表面或直接吸收到树木中, 树木可以通过改变空气

温度和释放挥发性有机化合物稀释空气中 PM<sub>2.5</sub> 的浓度。图 8(b) 可知, 人均地区生产总值较高的区域为北京市、天津市与沧州市, 这些地区该变量对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响基本呈现负相关性, 说明人均 GDP 越大, PM<sub>2.5</sub> 浓度越低, 可能的原因是越高的富裕程度环保意识越强。由图 8(c) 可知, 第一产业增加值占 GDP 的比重较高的区域为张家口市、保定市、邯郸市与秦皇岛市, 第一产业增加值占 GDP 的比重指的是农业收入增长量占国家 GDP 总量的百分比, 数值越大表明农业化程度越高, 在该指标值较高的张家口市该自变量与 PM<sub>2.5</sub> 浓度基本呈现显

著负相关性, 同样在较高区间的秦皇岛市呈现显著正相关性, 说明相同区间的第一产业增加值占 GDP 的比重在不同地区对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响程度有着较大的差别。图 8(d) 可知, 第二产业增加值占 GDP 的比重较低的区域为北京市, 且该变量对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响基本呈现正相关的关系, 另外在整个京津冀区域, 第二产业增加值占 GDP 比重的回归系数在大部分区域为正, 但第二产业占 GDP 比重指标值的空间格局却不同, 说明京津冀地区影响 PM<sub>2.5</sub> 浓度减少的因素除了降低第二产业占 GDP 比重, 还包括很多其他因素的综合影响。

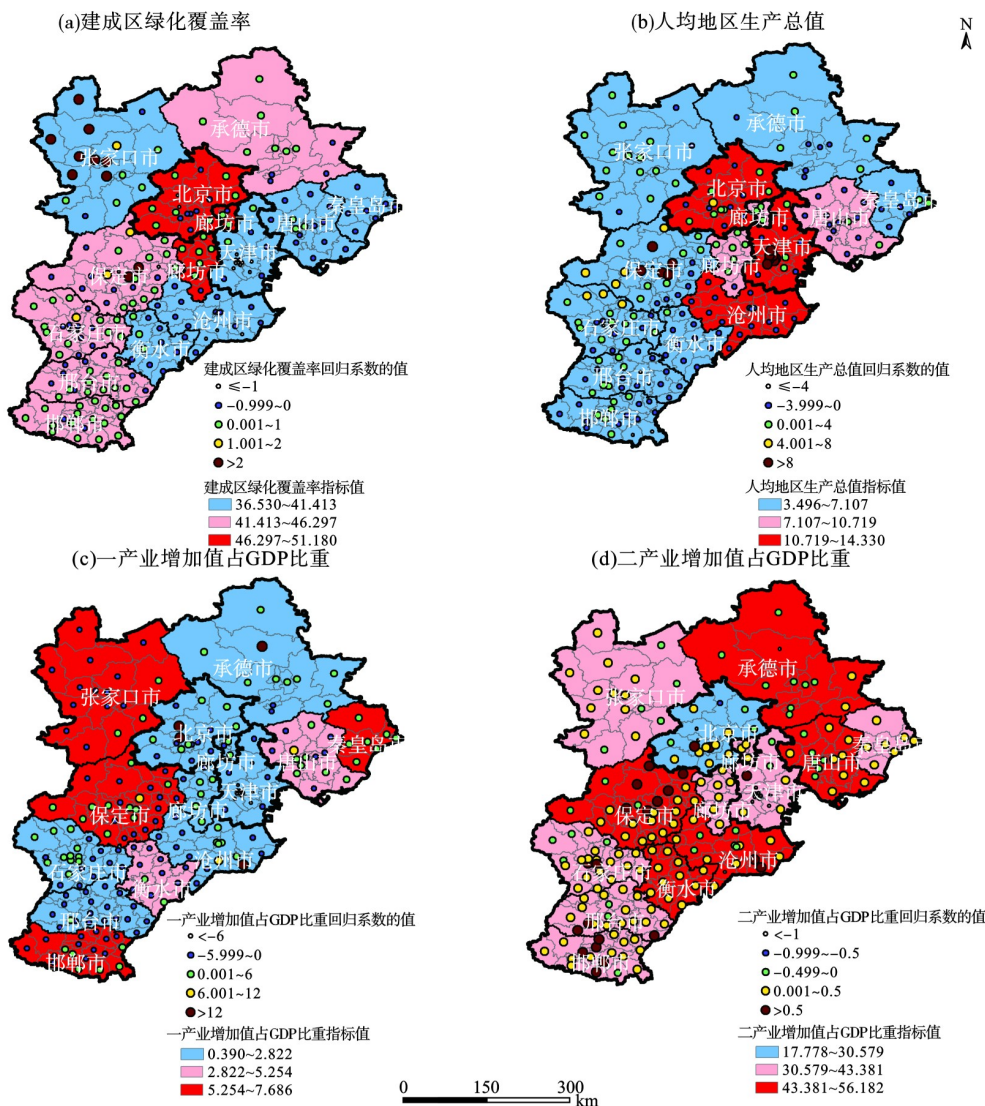


图 8 京津冀地区社会经济因素显著性指标空间变化特征

Fig. 8 Spatial variation characteristics of significance indicators of socio-economic factors in Beijing-Tianjin-Hebei region

### 3 结论

时间尺度 2016—2020 年京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度基本呈现下降趋势, 2018 与 2020 年的 PM<sub>2.5</sub>

浓度最低且污染区域最少, 说明这两年的大气污染防治取得了显著的成效; 京津冀地区空气质量达到优、良的天数逐年增多, 重度污染和严重污染天数

逐年减少,北京和天津近几年的 PM<sub>2.5</sub> 空气污染治理效果最显著;PM<sub>2.5</sub> 浓度表现出明显的季节变化特征,春夏季节较低,冬季最高。空间尺度京津冀北部的张家口、承德和秦皇岛地区的 PM<sub>2.5</sub> 污染较轻,石家庄、邢台和邯郸的东部以及保定的南部和衡水的西部地区的 PM<sub>2.5</sub> 污染最为严重;京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度存在显著的正相关特征,北部保持“低-低”聚集特征,南部保持“高-高”聚集特征,非显著区域在中间位置,呈现倒“U”型分布。

在京津冀东南部地区,增加湿度会降低 PM<sub>2.5</sub> 的浓度,西北部地区相反;温度对于 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响在大部分区域为正,在东南部地区为负;不同地理位置的风速对于 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响有显著差别。建成区绿化覆盖率、人均地区生产总值、第一产业占 GDP 比重的回归系数在京津冀的东西地区有显著差别,建成区绿化覆盖率与人均地区生产总值的回归系数西部地区呈正相关,东部地区呈负相关,第一产业占 GDP 比重的回归系数在西部地区呈负相关,东部地区呈正相关,说明这 3 个协变量对于 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响在东西部地区的影响程度差异较大;第二产业占 GDP 比重在京津冀区域,基本呈正相关性。

京津冀北部地区风力较大且地势较高,又有燕山山脉这道天然屏障相隔,有利于空气污染的扩散。而京津冀南部地区处在太行山东麓平原地区,晋冀鲁豫交界位于背风坡区域,这里由于受太行山脉影响,风速减小,大气垂直层结构稳定,不利于污染物的扩散,且冀南地区是河北省重工业聚集地,重污染企业密集,造成这些地区空气污染严重聚集,所以该区域 PM<sub>2.5</sub> 污染的空间分布特征与地形和工业生产结构密切相关,因此,京津冀区域未来的空气污染控制行动应以中部和南部为主。PM<sub>2.5</sub> 的生成、传输和分布因素较多,影响过程较为复杂多变,且 PM<sub>2.5</sub> 自身极易受外界环境的影响,变化时间较短、速度较快,所以对于研究 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响因素还有待进一步的加深。

## 参考文献

- [1] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀 PM<sub>2.5</sub> 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.
- [2] 王跃思, 姚利, 刘子锐, 等. 京津冀大气霾污染及控制策略思考[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 353 - 363.
- [3] 邹佳乐, 林尧林, 杨薇. 中国近年 PM<sub>2.5</sub> 污染研究进展[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(3): 357 - 361.
- [4] 邓悦, 刘纪平, 刘洋, 等. 北京 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间分布的贝叶斯地理加权回归模拟[J]. 测绘科学, 2018, 43(10): 39-45.
- [5] 成通, 祝善友, 张桂欣, 等. 2018 年京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 季节变化及其与地表温度的关系分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1457-1466.
- [6] 叶堂林. “十二五”期间京津冀区域产业升级与整合研究[J]. 开发研究, 2011(1): 23 - 26.
- [7] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 177 - 191.
- [8] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角[J]. 经济研究, 2016, 51(9): 73-88.
- [9] 刘鹏姣. 东北地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空特征及健康风险评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2018.
- [10] 杨兴川, 赵文吉, 熊秋林, 等. 2016 年京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征及其与气象因素的关系[J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1747 - 1754.
- [11] 谢劭峰, 周志浩, 李国弘. 南宁市 PM<sub>2.5</sub> 浓度与气象因素的关系[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 460 - 466.
- [12] 司晶晶. 长江经济带大气颗粒物的社会经济影响因素分析[J]. 中国经贸导刊(中), 2021(5): 111 - 112.
- [13] 温佳薇, 贺军亮, 赵晴, 等. 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 的时空效应研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(9): 1033-1038.
- [14] 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 等. 京津冀地区高分辨率 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化模拟与分析[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4083 - 4094.
- [15] 黄俊, 王超群, 周宝琴, 等. 广州 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及与气象因素的关系分析[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(2): 176-181.
- [16] 王旭, 胡引翠, 田冰, 等. 京津冀地区 AOD 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的特征及相关性分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 5069 - 5074.
- [17] 王晓琦, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀及周边地区 PM<sub>2.5</sub> 传输规律研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(11): 3211-3217.
- [18] CHEN C C, WU C F, YU H L. et al. Spatiotemporal modeling with temporal-invariant variogram subgroups to estimate fine particulate matter PM<sub>2.5</sub> concentrations[J]. Atmospheric environment, 2012, 54: 1 - 8.