

王丽,唐智亿,王能辉,等. 关中地区 PM_{2.5} 空间关联、溢出效应与治理成效[J]. 气象与环境科学,2023,46(2):28-35.

Wang Li, Tang Zhiyi, Wang Nenghui, et al. Spatial Correlation, Spillover Effects and Governance Effectiveness of PM_{2.5} in the Guanzhong Region[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2023, 46(2): 28-35.

doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2023.02.004

关中地区 PM_{2.5} 空间关联、溢出效应与治理成效

王丽¹, 唐智亿², 王能辉³, 刘波⁴, 郭庆元¹, 李韬⁵

(1. 西安市气象局, 西安 710016; 2. 西安交通大学未来技术学院, 西安 710049; 3. 陕西秦盾防雷技术有限公司, 西安 710014;
4. 陕西省大气探测技术保障中心, 西安 710014; 5. 陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 西安 710016)

摘要: 以大气污染严重的关中地区为研究对象,运用空间计量模型对2000—2020年 PM_{2.5} 空间关联特征及其影响因素的空间溢出效应进行分析。结果表明,关中地区 PM_{2.5} 呈现长期稳定的空间正相关性和局部聚集特征;人均生产总值、工业产值占比、能源强度具有显著的空间溢出效应,表明关中地区“GDP 锦标赛”式发展方式、跨地区产业转移、以化石燃料为主的能源消费结构不利于地区空气质量改善。2013 年陕西省出台《陕西省大气污染防治条例》后,大气污染区域联防联控发挥了“示范效应”,有效改善了地区环境质量。“十四五”时期关中地区应加强减污降碳协同政策设计,增加可再生能源消费比例,提高环境治理体系与治理能力现代化水平。

关键词: PM_{2.5}; 空间关联; 溢出效应; 关中地区

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1673-7148(2023)02-0028-08

引言

《中共中央关于党的百年奋斗重大成就和历史经验的决议》指出,贯彻新发展理念要让“绿色成为普遍形态”。我国“十四五”乃至更长时期将面临统筹推进深入打好污染防治攻坚战和二氧化碳排放达峰行动,实现减污降碳协同增效。

关中地区被列为全国大气污染重点防治的“三区十群”,2020 年咸阳市、渭南市位居全国重点城市排名后 20 位,减污降碳的目标任务十分艰巨。《陕西省“十四五”生态环境保护规划》已经明确“基本消除重污染天气,关中地区大气污染治理取得明显成效”,并且“鼓励关中地区环境空气质量未达标城市加快达峰进程,加强大气污染治理与碳达峰行动协同增效”。但是受地理位置、自然条件及产业结构等因素影响和制约,关中地区大气污染治理仍然

处于攻坚期和窗口期。例如,2022 年 1 月,新冠肺炎疫情管控下的西安市连续多日出现重污染天气,既有不利气象因素影响,也有本地区少量排放叠加外部跨地区输入的影响。因此,开展关中地区大气污染影响因素及其空间溢出效应研究,有利于科学精准治污减霾,实现减污降碳协同增效。

从自然因素角度看,气象条件、地理位置及植被覆盖是影响城市大气污染聚集和扩散的主要自然因素。大气层结稳定、相对湿度大、气温低、低风速伴随特定风向极易引起上游污染传输和本地污染积累,造成严重污染过程^[1-5];强冷空气、雨雪天气则可以沉降和消减大气污染物^[6-7]。关中地区是位于黄土高原与秦岭山脉之间的盆地,更高海拔和更多植被覆盖起到消减雾霾作用^[8],考虑自然因素的城市规划有助于空气质量改善。从社会经济因素角度看,人口、工业、能源、交通、政策规制是主要影响因

收稿日期:2022-03-01;修订日期:2022-08-29

基金项目:陕西重点产业创新链(群)项目(2020ZDLSF06-02);中国气象局气象软科学研究项目(2023ZDIANXM05);国家自然科学基金项目(41861144021)

作者简介:王丽(1986-),女,陕西汉中,工程师,硕士,从事气象服务研究与应用工作。E-mail:wangli_cma@163.com

通信作者:刘波(1974-),男,陕西商洛人,工程师,硕士,从事大气探测技术研究工作。E-mail:125826672@qq.com

素^[9-11]。工业生产依赖于能源消费,以传统化石燃料为主的能源结构促进了污染物排放,并且最新研究已经揭示出化石燃料燃烧排放的水汽对大气 PM_{2.5} 浓度的贡献占关中地区人为源 PM_{2.5} 的 5.1%,是导致关中地区冬季空气质量恶化的影响因素之一^[12]。近年来,大气污染治理政策有效性逐渐成为研究焦点,关中地区治污减霾政策取得积极成效的同时^[13],也面临跨区域联防联控的难题,其根源在于大气污染“外部性”与治理“属地原则”的冲突^[14]。这就要求不同行政地区统一认识,真正建立跨地区的大气污染联防联控的长效机制。

从空间溢出角度看,自然因素和社会经济因素均会引起大气污染的跨地区传输,使空气污染表现为超越行政区划的区域性特征。在关中地区内部,自然因素导致的城市 PM_{2.5} 外源输送的贡献比例可达 50%~60%^[15]。2016 年开始,大气污染防治政策的空间溢出效益日益受到关注^[16-17],主要存在“逐顶竞争”和“逐底竞争”两种溢出效应类型。一方面,生态文明建设深入人心,一个地区的空气质量改善可能形成“学习效应”,带动周边地区环境质量持续改善,产生“逐顶竞争”溢出效应^[18];另一方面,中国财政分权下基于经济激励的政府竞争容易导致地方环境治理投资不足,产生“逐底竞争”溢出效应,严重影响区域环境质量^[19]。环境治理需要提高“逐顶竞争”效应以规避“搭便车”行为,进而提高区域联防联控成效。基于此,本文旨在厘清关中地区城市大气污染的主要影响因素及其空间溢出效应,为“十四五”时期大气污染精准防控与协同治理提供科学参考。

1 材料与研究方法

1.1 数据来源

鉴于 PM_{2.5} 是我国冬季霾天气的首要污染物,社会危害极大,本文以 PM_{2.5} 年均浓度代表城市大气污染状况。由于中国范围内 PM_{2.5} 观测数据大都始于 2014 年,观测数据较少,因此本文采集了圣路易斯华盛顿大学大气成分分析组公开的 PM_{2.5} 浓度卫星观测栅格数据(<https://sites.wustl.edu/acag/datasets/surface-pm-2-5>),空间分辨率为 0.01°×0.01°。该数据利用美国航空航天局中分辨率成像光谱辐射计(MODIS)、多角度成像光谱辐射计(MISR)及海洋观测宽视场传感器(Sea-WIFS)检测的气溶胶光学厚度,并结合地球化学传输模型(GEOS-Chem)与地理加权回归模型估算得到,经验证,与地

面监测点 PM_{2.5} 数据具有较高的匹配度($R^2 = 0.81$)^[20]。相较于地面监测点的数据,遥感反演的数据具有更好的空间连续性,已被证实可以用来进行空气污染物的学术研究^[21-23]。城市级社会经济数据及气象数据来源于历年《中国城市统计年鉴》和《陕西省统计年鉴》。本文利用地理信息系统软件(ArcGIS),首先基于全球 PM_{2.5} 栅格数据(版本 V5.GL.02),提取 2000—2020 年西安、咸阳、宝鸡、铜川、渭南五个城市尺度下的年均 PM_{2.5} 浓度数据,以便与社会经济数据及气象数据相匹配;其次基于中国区域 PM_{2.5} 栅格数据(版本 V4.CH.03),提取 2000—2018 年陕西关中地区区县尺度下的年均 PM_{2.5} 浓度数据。

影响 PM_{2.5} 浓度的因素包括社会经济因素和自然因素两类。社会经济因素涵盖了人口密度、人均国内生产总值、工业产值占比、民用车辆数量、单位 GDP 能源消耗量(能源强度)、废气治理设施数量,自然因素涵盖了年平均风速、年降雨量、年平均气温、年日照时数、年平均相对湿度、年均大气压。2013 年陕西省出台《陕西省大气污染防治条例》,并制定了“治污降霾·保卫蓝天”五年行动计划,基本形成大气污染防治新机制。本文以城市废气治理设施数量表征大气污染防治政策的规制强度,并设置 2013 年为界的时间虚拟变量与大气污染防治政策的交互项,以考察 2013 年前后关中地区城市大气污染治理成效变化。本文所用数据的描述性统计见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 空间相关性分析方法

为探究关中地区大气污染在空间上是否存在相关性,本文分别采用全局 Moran's I 指数和局部 Moran's I 指数进行检验^[18]。全局 Moran's I 指数的计算公式为

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

式中,

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

为样本方差, I 是关中地区大气污染总体相关程度的全局 Moran's I 指数, W_{ij} 为空间权重矩阵, x_i 和 x_j 分别表示第 i 个和第 j 个地区的 PM_{2.5} 浓度值, \bar{x} 为所有地区 PM_{2.5} 浓度均值, n 为样本数量。 I 取值越

接近 1,则表示关中地区 $PM_{2.5}$ 空间正相关性越强,越接近-1时,空间负相关性越强。

表 1 关中地区大气污染影响因素的描述性统计

影响因素	变量	符号	单位	均值	标准差	极小值	极大值
	$PM_{2.5}$	Y	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	41.13	10.77	23.66	67.77
社会经济因素	人口密度	pop	人/ km^2	432.93	267.28	182.80	1282.41
	人均生产总值	pergdp	万元/人	2.81	2.11	0.31	8.59
	工业产值占比	industry	%	50.03	9.49	33.22	74.03
	民用车辆数量	cars	万辆	40.87	71.32	1.14	373.46
	能源强度	energy	吨标准煤/万元	1.56	0.84	0.50	3.97
	废气治理设施	policy	套	634.15	241.06	105.00	1271.00
自然因素	平均风速	wind	m/s	1.65	0.46	0.80	2.40
	降雨量	rain	mm	586.61	132.80	385.20	1025.60
	平均气温	temp	$^{\circ}\text{C}$	13.75	1.48	10.30	16.10
	日照时数	sunshine	h	1990.00	326.25	1091.90	3081.40
	相对湿度	humidity	%	65.33	3.76	58.00	75.00
	大气压	pressure	hPa	950.16	24.18	904.70	975.60

上述全局空间相关性可能会忽略局部地区的污染物聚集特征。为考察关中地区大气污染是否存在显著的局部聚集效应,本文进一步引入局部 Moran's I 指数来检验,其计算公式为

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n W_{ij}(x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

式中, I_i 是 i 地区与周围其他地区相关程度的局部 Moran's I 指数,其他变量的设定均与全局 Moran's I 指数的计算设定相同。 $I_i > 0$ 时,地区 i 的 $PM_{2.5}$ 浓度与其周围地区呈现正相关性,表现为高-高型或低-低型聚集特征; $I_i < 0$ 时,地区 i 的 $PM_{2.5}$ 浓度与其周围地区呈现负相关性,表现为低-高型或高-低型聚集特征。

1.2.2 空间计量模型分析方法

在大气污染物空间关联性分析基础上,构建空间面板数据模型,进一步考察影响关中地区大气污染排放的主要因素及其空间溢出效应。鉴于一个地区的 $PM_{2.5}$ 浓度不仅与其邻近地区的 $PM_{2.5}$ 排放水平有关,还可能与其他地区的社会经济因素存在关联。本文构建空间杜宾模型(Spatial Durbin Model, SDM)的矩阵表达式如下:

$$Y = \rho WY + \alpha I_n + X\beta + WX\theta + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N(0, \delta^2 I_n) \quad (3)$$

式中, Y 为城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度, W 为空间权重矩阵, ρ 为反映邻近地区污染浓度变化对本地区影响大小的空间溢出效应, I_n 和 α 分别表示单位矩阵及其系数, X 和 β 分别表示大气污染影响因素向量及其系数, ε 表示模型残差项(服从均值为 0,方差为 δ^2 的正态分布), θ 表示临近地区自然因素或社会经济因素的空间溢出效应。当 θ 为零时,SDM 退化为空间滞后模型(Spatial Lag Model, SLM);当 ρ 和 θ 同

时为零时,地区间 $PM_{2.5}$ 关联性受到其他不可观测因素影响,SDM 退化为空间误差模型(Spatial Error Model, SEM)。

为进一步提高分析结果的稳健性,借鉴已有研究,本文借助 Stata 软件 16.0 版本,分别构建空间邻接权重矩阵、空间反距离权重矩阵和空间经济距离矩阵。空间邻接权重矩阵的设置以相邻关系为原则,是最简单的二进制权重矩阵,使用 0 或 1 表示地区之间的空间相邻情况。基于地理距离计算的空间反距离权重矩阵构建方法如下^[24]:

$$W_{ij} = 1/d_{ij}^2 \quad (4)$$

$$d_{ij} = \arccos[(\sin\phi_i \times \sin\phi_j)(\cos\phi_i \times \cos\phi_j \times \cos(\Delta\tau))] \times R \quad (5)$$

式中, d_{ij} 为地区 i 和地区 j 的地理距离, ϕ_i 和 ϕ_j 分别表示 i 和 j 所在地区的地理位置的纬度, $\Delta\tau$ 为两个地区间经度差值, R 为地球半径。

空间经济距离权重矩阵定义如下^[25]:

$$W_{ij} = 1 - |(GDP_j - GDP_i)/GDP_j GDP_i| \quad (6)$$

式中, GDP_i 和 GDP_j 分别表示不同地区 2018 年国内生产总值。当两个地区经济水平相近时,空间经济距离矩阵取值越接近于 1,反之则越接近于 0。与空间邻接矩阵相比,空间反距离矩阵和空间经济距离矩阵不仅可以反映地区之间的联系方式,还可以定义两个地区之间的联系程度。

2 结果与分析

2.1 $PM_{2.5}$ 的空间关联特征

图 1 为基于区县级数据计算的全局 Moran's I 指数。纵向比较看,邻接矩阵、反距离矩阵、经济距离矩阵三种空间权重矩阵下的全局 Moran's I 指数

均显著大于零,其均值分别为 0.358、0.228 及 0.415;除 2015 年出现明显减小外,其余年份的指数值均在一定波动范围内维持在比较稳定的状态,表明研究时段内关中地区 PM_{2.5} 浓度值呈现长时间的显著空间正相关性。横向比较结果表明,反距离矩阵下全

局 Moran's I 指数最低,邻接矩阵和经济距离矩阵下 Moran's I 指数比较接近,但是三种空间权重矩阵对应的 Moran's I 指数具有近似波动变化特征,表明本文构建的空间权重矩阵能够真实表征关中地区大气污染物排放的空间关联性。

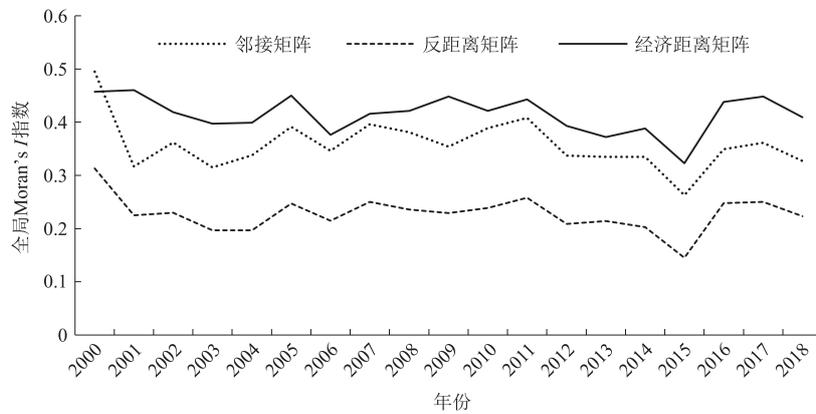


图1 关中地区2000—2018年 PM_{2.5} 浓度全局 Moran's I 指数

三种空间权重下关中地区 PM_{2.5} 浓度局部 Moran's I 指数的空间分布特征近似。鉴于篇幅所限,本文仅展示地理邻接距离矩阵下 2000 年、2006 年、2012 年及 2018 年的关中地区大气污染局部聚集特征分布(图 2)。关中地区 PM_{2.5} 局部空间相关性以“高一高”和“低—低”两种类型为主。“高一高”型聚集区长期稳定集中于西安市新城区、未央区、碑林

区、莲湖区、雁塔区、灞桥区及其周边区域;“低—低”型集聚区主要出现在关中盆地西部和北部,包括铜川市王益区和印台区、咸阳市长武县、旬邑县及宝鸡市陇县、太白县等。结合全局空间相关性分析可知,关中地区 PM_{2.5} 具有显著空间溢出效应和空间聚集特征。

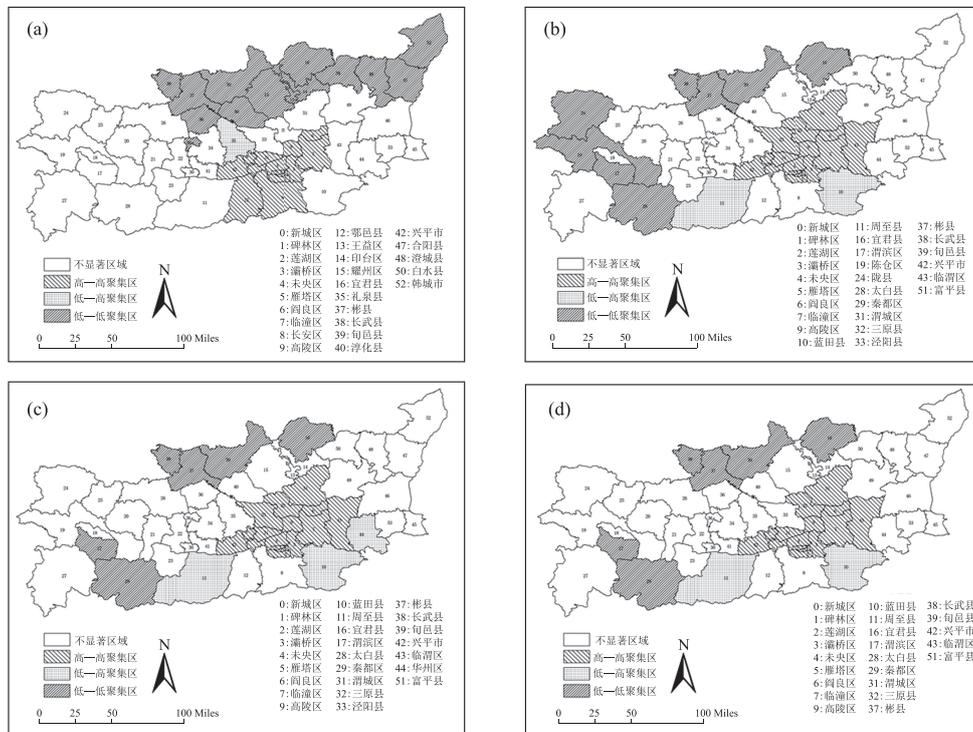


图2 关中地区 2000 年(a)、2006 年(b)、2012 年(c)和 2018 年(d) PM_{2.5} 浓度局部聚集特征分布

2.2 PM_{2.5} 影响因素的空间溢出效应

2.2.1 空间计量模型检验

选择空间计量模型中哪一种类型进行参数估计,需要进行严谨的统计学诊断评估,才能科学评价关中地区 PM_{2.5} 排放影响因素的空间溢出效应。第一步对空间滞后模型和空间误差模型进行拉格朗日乘子(LM)检验和稳健拉格朗日乘子(Robust LM)检验,第二步采用似然比(LR)检验考察空间杜宾模型是否可以退化为空间滞后模型或空间误差模型。

诊断结果(表 2)表明,在邻接矩阵和经济距离

矩阵下,LM 检验表明在 1% 的显著性水平下空间滞后模型和空间误差模型无显著差别;在反距离权重矩阵下,LM 检验表明在 5% 的显著性水平下空间误差模型优于空间滞后模型。进一步的稳健 LM 检验均接受无空间滞后和无空间误差的原假设。另外,LR 检验均在 1% 的显著性水平上拒绝空间滞后模型或空间误差模型嵌套于空间杜宾模型之中的原假设。综上考虑,本文对三类空间权重矩阵均采用空间杜宾模型开展实证分析。

表 2 关中地区大气污染空间计量模型检验

检验方法	邻接矩阵	反距离矩阵	经济距离矩阵
SLM-LM 检验	6.577 ***	2.492	13.941 ***
SEM-LM 检验	7.412 ***	4.638 **	12.340 ***
稳健 SLM-LM 检验	0.047	0.476	1.606
稳健 SEM-LM 检验	0.882	2.622	0.005
LR 检验;SLM 嵌套于 SDM 之中	54.84 ***	47.59 ***	70.94 ***
LR 检验;SEM 嵌套于 SDM 之中	46.45 ***	43.15 ***	65.34 ***

注: * 表示 $p < 0.10$, ** 表示 $p < 0.05$, *** 表示 $p < 0.01$,下同。

2.2.2 影响因素及其空间溢出效应

由空间计量模型的豪斯曼检验结果可知,反距离矩阵的空间杜宾模型选择随机效应,其余两类矩阵的空间杜宾模型选择固定效应。关中地区 PM_{2.5} 主要影响因素的参数估计结果见表 3,其中略去模型估计参数的标准误差统计量。

首先,关中地区 PM_{2.5} 自身的空间溢出效应非常显著,三类空间权重矩阵下模型参数均能通过 1% 显著性水平检验。关中地区邻近城市 PM_{2.5} 浓度每上升 1.00%,则本地区 PM_{2.5} 浓度上升 0.21%~0.29%。其次,自然因素中相对湿度显著提高了本地区 PM_{2.5} 浓度,印证了已有研究关于相对湿度对污染物累积的贡献^[26-27],平均风速表现为显著的负向空间溢出效应。最后,社会经济因素中城市交通、能源强度显著提高本地区 PM_{2.5} 浓度,而大气污染治理政策可以有效降低本地区 PM_{2.5} 浓度;人均生产总值和能源强度表现为显著的正向空间溢出效应,工业产值占比和 2013 年后的大气污染治理政策表现为显著的负向空间溢出效应。

人均生产总值的正向空间溢出效应揭示出关中地区存在传统“GDP 锦标赛”式发展方式,地方政府片面追求 GDP 增长不利于地区之间空气质量的整体改善;工业产值占比的负向空间溢出效应反映了相邻地区 PM_{2.5} 浓度升高会导致本地区 PM_{2.5} 浓度降低,提示关中地区经济发展过程中地区间产业转移可能加剧邻近地区大气污染状况,这一发现与马

表 3 关中地区大气污染空间计量回归结果

变量	邻接矩阵	反距离矩阵	经济距离矩阵
pop	0.8208 ***	-0.0521	0.8992 ***
pergdp	0.2168	-0.0875	0.0293
industry	-0.0961	0.2492 *	-0.1269
cars	0.1903 ***	0.1841 **	0.1736 ***
energy	0.3815 *	0.2796 **	0.2971 *
policy	-0.1072 **	-0.1122 **	-0.1781 ***
policy×year 2013	0.0931 *	0.1085 **	0.1107 **
wind	-0.0642	-0.0854	-0.0349
rain	0.0469	0.1066	0.0523
temp	1.1632 *	0.9235	0.7810
humidity	1.4220 ***	1.1406 ***	1.3713 ***
pressure	-1.4225	-0.7188	-0.2719
sunshine	0.0491	-0.1265	0.0734
W×pop	-0.4307	-0.6072	-1.1374 *
W×pergdp	1.0785 ***	1.3185 ***	0.8058 ***
W×industry	-1.4849 ***	-1.5930 ***	-1.3676 ***
W×cars	-0.2617	-0.0220	0.1130
W×energy	2.4887 ***	2.9783 ***	1.7912 ***
W×policy	0.0632	0.0605	0.0552
W×policy×year 2013	-0.1116 **	-0.1212 **	-0.1398 ***
W×wind	-0.1630 **	-0.2564 **	-0.1955 ***
W×rain	-0.0400	-0.1319	0.0220
W×temp	0.6066	0.9206	0.6385
W×humidity	0.0472	0.5657	-0.3890
W×pressure	-1.9115	-0.6603	1.6224
W×sunshine	0.0101	0.0997	-0.1012
ρ	0.2876 ***	0.2421 **	0.2070 **
Log-likelihood	98.2260	97.2929	102.1178
固定效应/随机效应	29.29 ***	16.40	34.69 ***

丽梅等^[28]的早期研究结论一致;能源强度的正向空间溢出效应表明周边地区以化石能源为主的能源消费结构会加重本地污染水平;治理政策与年份虚拟变量交互项具有显著负向空间溢出效应,结合非空间溢出效应项的参数估计结果可知,2013年以前关中地区大气污染治理政策主要作用是消减本地污染物,2013年以后治理政策主要作用表现为“逐顶竞争”式的空间联动效应,即周边地区治污减霾的成效会形成“示范效应”,促进本地区环境质量改善;平均风速的负向空间溢出效应非常显著,表明临近地区风速增大将显著消减本地区 PM_{2.5} 浓度水平。

为了深入解释各个自变量对地区 PM_{2.5} 的直接影响和间接影响,本文进一步对空间计量模型所得结果开展分解和分析。采取黄寿峰^[24]和李欣等^[29]的相同方法,在表3的基础上对自变量的回归结果进行分解,得到对应自变量的直接效应、间接效应和总效应(表4)。

社会经济因素方面,城市人口密度主要表现为促进本地 PM_{2.5} 浓度升高,间接效应和总效应不显著;人均生产总值间接效应显著,周边地区人均生产总值每增加1%,本地区 PM_{2.5} 浓度升高0.98%~

1.65%;周边地区工业产值占比每增加1.00%,本地区 PM_{2.5} 浓度降低1.66%~1.96%,由此说明通过向周边地区进行产业转移会减轻本地污染水平,关中地区工业化进程伴随着“污染转移”现象;城市交通主要通过增加本地区 PM_{2.5} 排放加剧环境污染,本地民用车辆数量每增加1.00%,本地区 PM_{2.5} 浓度升高0.16%~0.18%;能源强度的直接效应、间接效应和总效应均十分显著,化石能源消费不仅提高了本地区 PM_{2.5} 浓度,还极大地提高了周边地区 PM_{2.5} 排放水平;2000—2013年大气污染治理政策显著降低了本地区 PM_{2.5} 浓度,2013年以后治理政策形成了“示范效应”,周边地区废气治理设施数量每增加1.00%,本地区 PM_{2.5} 浓度降低0.11%~0.13%。

自然因素方面,平均风速主要发挥间接效应显著消减雾霾,周边地区平均风速每增加1 m/s,本地区 PM_{2.5} 浓度下降22.89%~33.34%,可见风速具有显著负向空间溢出效应,对关中地区大气污染消散发挥着关键作用。相对湿度的直接效应非常显著,本地区相对湿度每增大1%,本地区 PM_{2.5} 浓度将显著增加1.24%~1.50%。

表4 关中地区大气污染影响因素的直接效应、间接效应和总效应

变量	邻接矩阵			反距离矩阵			经济距离矩阵		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
pop	0.7997***	-0.2956	0.5041	-0.0984	-0.7943	-0.8927	0.8223***	-1.1637	-0.3413
pergdp	0.3509*	1.5023***	1.8532***	0.0206	1.6544***	1.6750***	0.0954	0.9795***	1.0749***
industry	-0.2608	-1.9613***	-2.2221***	0.1316	-1.9174***	-1.7858***	-0.2297	-1.6578***	-1.8874***
cars	0.1638**	-0.2682	-0.1044	0.1834**	0.0172	0.2006	0.1840***	0.1828	0.3668
energy	0.6933***	3.4187***	4.1120***	0.5480***	3.8555***	4.4035***	0.4585***	2.2323***	2.6908***
policy	-0.0997**	0.0457	-0.0539	-0.1052**	0.0461	-0.0591	-0.1726***	0.0245	-0.1481
policy×year 2013	0.0812*	-0.1072**	-0.0260*	0.0984**	-0.1154**	-0.0170	0.0979*	-0.1344***	-0.0365***
elevation	-0.0010	-0.0001	-0.0011	0	0	0	-0.0001	-0.0011	-0.0011
wind	-0.0812	-0.2289**	-0.3101**	-0.1037*	-0.3334**	-0.4371**	-0.0481	-0.2378***	-0.2859**
rain	0.0448	-0.0385	0.0063	0.0979	-0.1358	-0.0379	0.0569	0.0352	0.0921
temp	1.2583**	1.2469	2.5052***	1.0058*	1.4457*	2.4515***	0.8383	0.9551	1.7933***
humidity	1.5017***	0.6196	2.1214***	1.2380***	1.0719*	2.3099***	1.3807***	-0.1092	1.2714**
pressure	-1.7695	-3.0773	-4.8469	-0.9187	-1.5031	-2.4217	-0.1890	1.8630	1.6740
sunshine	0.0622	0.0495	0.1117	-0.1120	0.1104	-0.0016	0.0731	-0.0907	-0.0176

3 结 论

(1)空间邻接矩阵、反距离矩阵及经济距离矩阵下,关中地区 PM_{2.5} 呈现长期稳定的空间正相关性和局部聚集特征;“高一高”型聚集区长期稳定集中于西安市主城区,“低—低”型聚集区主要出现在关中盆地西部和北部。

(2)关中地区邻近城市 PM_{2.5} 浓度上升将加重本地区污染水平;自然因素与社会经济因素均显著影响本地区 PM_{2.5} 浓度,人均生产总值、工业产值占

比、能源强度、平均风速还表现为较为显著的空间溢出效应,关中地区“GDP 锦标赛”式发展方式、跨地区产业转移、以化石燃料为主的能源消费结构不利于地区空气质量改善。

(3)基于空间计量模型的进一步效应分解表明,大气污染治理政策不仅显著降低了本地区 PM_{2.5} 浓度,2013年后治理政策还发挥了“示范效应”带动周边地区环境质量改善;平均风速、相对湿度对 PM_{2.5} 的影响效应显著,在考虑化石燃料源水汽排放恶化关中地区空气质量条件下,未来需加大可再生能源

消费比例。

4 讨 论

地理学第一定律(Tobler's First Law)说明了任何事物都是与其他事物相关的。特殊的自然地理条件和快速发展的社会经济决定了关中地区大气污染存在空间溢出效应,必须运用空间计量方法才能科学揭示关中地区大气污染的空间关联特征及空间溢出效应。在空间权重构建上,本文不局限于反映空间关联方式的邻接矩阵,而是进一步拓展到反映空间关联程度的反距离矩阵和经济距离矩阵。特别是经济距离矩阵的引入,可以更好地揭示关中地区经济快速发展过程中产业转移带来的“污染转移”效应。

气象因素对关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度影响非常显著,这就要求气象部门开展城市大气污染预报工作要充分考虑风速、相对湿度等不同因素。相对湿度对加重本地 $PM_{2.5}$ 浓度贡献十分显著,加之已有最新研究证明化石燃料源水汽是导致关中地区冬季空气质量恶化的影响因素之一,管控化石燃料源水汽排放亟须引起有关部门政策制定者的重视。鉴于产生同等热量前提下燃烧天然气生成的水汽质量是烧煤生成水汽的近三倍,关中地区在大范围实施“煤改气”进程中应注意相对湿度敏感地区 $PM_{2.5}$ 浓度升高这一负面影响。“十四五”乃至更长时期,需增加可再生能源的使用比例。

2013 年以前关中地区大气污染治理政策显著降低了本地区 $PM_{2.5}$ 浓度,2013 年以后治理政策表现为显著的“示范效应”,区域联防联控成效明显。提高区域环境治理体系与治理能力现代化对完成“十四五”确定的大气污染防治目标至关重要。一方面,决策部门需要继续采取精准治理策略,统筹做好整个地区的联防联控机制建设,进一步强化治理政策的“示范效应”;另一方面,在顶层设计层面,推动产业、能源、交通等重点领域环境质量达标与碳排放达峰“双达”试点示范,实现减污降碳的协同增效。

参考文献

[1] 狄慧,车浩驰,王彦锋. 2000-2019 年兰州地区秋冬季大气环境下的污染特征分析[J]. 气象与环境科学,2023,46(1):66-72.
 [2] 李改琴,唐影,王聪,等. 濮阳一次持续性雾霾天气的阶段性特征和维持机制[J]. 气象与环境科学,2022,45(1):65-72.
 [3] 黄少妮,袁媛,井宇,等. 陕西关中地区冬季一次重霾污染过程及气象条件影响分析[J]. 干旱气象,2016,34(6):1037-1046.

[4] 刘婉莉,李冬梅,张倩倩,等. 运城盆地重污染特征及天气模型[J]. 气象与环境科学,2022,45(6):76-84.
 [5] 彭端,杜尧东,樊琦,等. 珠三角一次严重雾霾混合污染数值模拟分析[J]. 气象与环境科学,2021,44(5):1-9.
 [6] 杨晓亮,杨敏. 一次雾霾过程中气象因子与细颗粒物浓度关系的研究[J]. 干旱气象,2014,32(5):781-787.
 [7] 周景坤. 从城市发展水平与年均降雨量的关系探究我国雾霾污染问题研究—基于 2013 年 73 个主要城市截面数据的分析[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(8):94-100.
 [8] 张波,宋国君,周芳. 基于 $PM_{2.5}$ 监测点空间聚类的关中五市空气污染区域识别[J]. 环境科学学报,2021,41(3):797-805.
 [9] 张慧琳,丁文广,田莘冉,等. 2015 年监测城市雾霾污染的时空分布特征及社会经济原因分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2020,14(1):123-131.
 [10] 肖周燕,沈沈次. 人口集聚、产业集聚与环境污染的时空演化及关联性分析[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(2):1-8.
 [11] 窦旺胜,王成新,刘照胜. 2020 年初京津冀及周边地区空气污染特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2020,34(11):8-14.
 [12] 邢萌,曹军骥,刘卫国,等. 化石燃烧源水汽是导致关中地区冬季空气质量恶化的影响因素之一[J]. 地球环境学报,2021,12(2):232.
 [13] 杨哲. 基于高频 AQI 数据的关中城市群空气污染规律分析及治理政策效果评估[D]. 陕西师范大学,2018.
 [14] 齐晓亮,卢春天. 关中地区雾霾治理绩效评价体系研究[J]. 西南民族大学学报(人文社科版),2019,40(4):29-35.
 [15] 李霞,吴佳睿,刘浪,等. 模拟研究咸阳市 2016 年秋冬季雾霾期间 $PM_{2.5}$ 来源[J]. 地球环境学报,2019,10(4):347-363.
 [16] 赵玉,徐鸿,邹晓明. 环境污染与治理的空间效应研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(7):170-175.
 [17] 关中城市群治污减霾联动机制暨西安服务中心协调研究课题组. 大气污染联防联控机制的探索与实践—以关中城市群为例[J]. 环境保护与循环经济,2016,36(9):4-8.
 [18] 刘杰,李苑,白小瑜,等. 环境规制、空间溢出与城市大气污染—以关中地区为例[J]. 灾害学,2020,35(4):1-7.
 [19] 李晓龙,徐鲲. 地方政府竞争、环境质量与空间效应[J]. 软科学,2016,30(3):31-35.
 [20] Hammer M S, van Donkelaar A, Li C, et al. Global estimates and long-term trends of fine particulate matter concentrations (1998-2018)[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(13):7879-7890.
 [21] 高星星,桂海林,潘留杰,等. 基于卫星遥感和地面观测资料的汾渭平原一次空气污染过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2021,15(1):75-83.
 [22] 欧维新,张振,陶宇. 长三角城市土地利用格局与 $PM_{2.5}$ 浓度的多尺度关联分析[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(7):11-18.
 [23] 易成栋,毕添宇,黄志基,等. 国家城市光荣榜时空演化特征及其影响因素—基于多城联创视角的研究[J]. 华东师范大学学报(哲学社会科学版),2022,54(1):155-171.
 [24] 黄寿峰. 财政分权对中国雾霾影响的研究[J]. 世界经济,2017,40(2):127-152.
 [25] 金刚,沈坤荣. 以邻为壑还是以邻为伴?—环境规制执行互动

- 与城市生产率增长[J]. 管理世界, 2018, 34(12): 43-55.
- [26] 赵金霞, 沈岳峰, 范苏丹. 天津市滨海新区持续性重度雾霾成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(6): 69-74.
- [27] 苗爱梅, 李苗, 王洪霞. 一次持续性雾霾天气过程的阶段性特征及影响因子分析[J]. 干旱气象, 2014, 32(6): 947-953.
- [28] 马丽梅, 张晓. 区域大气污染空间效应及产业结构影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(7): 157-164.
- [29] 李欣, 曹建华, 孙星. 空间视角下城市化对雾霾污染的影响分析—以长三角区域为例[J]. 环境经济研究, 2017, 2(2): 81-92.

Spatial Correlation, Spillover Effects and Governance Effectiveness of PM_{2.5} in the Guanzhong Region

Wang Li¹, Tang Zhiyi², Wang Nenghui³, Liu Bo⁴, Guo Qingyuan¹, Li Tao⁵

(1. Xi'an Meteorological Office, Xi'an 710016, China;

2. School of Future Technology of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Shaanxi Qindun Lightning Protection Technology Co Ltd, Xi'an 710014, China;

4. Shaanxi Atmospheric Detection Technical Support Center, Xi'an 710014, China;

5. Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural Remote Sensing and Cash Crop, Xi'an 710016, China)

Abstract: The spatial correlation characteristics of PM_{2.5} and the spatial spillover effects of its influencing factors from 2000 to 2020 are analyzed using a spatial econometric model for the Guanzhong region, where air pollution is serious. The results show that PM_{2.5} in the Guanzhong region exhibits the characteristics of long-term stable and positive spatial correlation and local aggregation. The spatial spillover effects of gross domestic product per capita, industrial output ratio, and energy intensity are statistically significant, indicating that the “GDP tournament” development mode, trans-regional industrial transfer and fossil fuel-based energy consumption structure in the Guanzhong region are not conducive to regional air quality improvement. Since Shaanxi Province issued the “Regulations on Prevention and Control of Air Pollution in Shaanxi Province” in 2013, the joint prevention and control of air pollution in the region has shown a “demonstration effect”, which has effectively improved regional environmental quality. In the 14th Five-Year Plan period, the Guanzhong region should strengthen the design of synergistic policies to reduce pollution and carbon emissions, increase the proportion of renewable energy consumption, and improve the modernization of environmental governance system and capacity.

Key words: PM_{2.5}; spatial correlation; spillover effects; the Guanzhong region