

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.
[LIU Jie, LI Yuan, BAI Xiaoyu, et al. Environmental Regulations, Spatial Spillover Effects, and Urban Environmental Quality: Evidence from Guanzhong Area in China [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 1-7. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.001.]

环境规制、空间溢出与城市大气污染^{*}

——以关中地区为例

刘杰¹, 李苑¹, 白小瑜¹, 王丽², 唐智亿³, 欧颖琳¹, 闵晨⁴

(1. 陕西师范大学国际商学院, 陕西 西安, 710119; 2. 陕西省西安市气象局, 陕西 西安, 710016;
3. 西安交通大学工程力学系, 陕西 西安, 710049; 4. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安, 710119)

摘要: 基于2001-2016年关中地区城市面板数据, 构建空间杜宾模型, 识别城市大气污染治理成效。研究表明, 关中地区PM_{2.5}存在显著的正向空间溢出效应, 周边城市PM_{2.5}浓度升高将加剧中心城市的大气污染状况; 关中地区环境规制对本地大气污染的减排效应以及地区间“逐顶竞争”的空间联动效应不足以抵消城市人口、能源结构以及城市交通等社会经济因素对城市PM_{2.5}排放的促进效应, 并且工业发展、城市交通使得关中地区城市之间存在跨界污染“转移效应”, 不利于区域整体大气质量改善。落实区域大气污染协同治理机制、做好区域内城市经济、产业以及交通的协同发展规划, 提升“逐顶竞争”空间联动效应、规避跨地区污染“转移效应”才能进一步提升大气污染联防联控的成效。

关键词: PM_{2.5}; 环境规制; 溢出效应; 空间杜宾模型; 关中地区

中图分类号: F061.3; X321; X51; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)04-0001-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.001

以西安、咸阳、宝鸡、铜川及渭南为中心的关中地区是全国大气污染最严重的地区之一, 被纳入全国大气污染重点防治区域“三区十群”, 也是PM_{2.5}年均浓度的“高-高”聚集区。近年来关中地区大气污染治理取得一定成效, 但是部分地区出现不降反升的“滑坡”现象^[1]。2019年上半年关中地区PM_{2.5}平均浓度68 μg/m³, 同比上升9.7%, 并且69个县(区)中有38个空气质量下降。关中部分地区大气污染治理出现“滑坡”现象的原因是什么? 在中国大气污染治理已经打破传统的属地治理模式, 并且转向区域大气污染联防联控的背景下, 回答上述问题有助于提高大气污染协同治理成效, 为进一步完善地区大气污染防治协作机制提出针对性的政策建议, 促进区域经济可持续发展和生态文明建设。

1 文献综述与研究假说

国内外学术界主要从环境、社会以及经济学的角度探究大气污染问题的形成原因、影响因素及治理政策。大气污染形成原因与影响因素涉及

社会经济活动过程中大气污染排放量增加、大气环境容量降低及特殊地理位置等重要因素, 研究成果众多。在大气污染防治更加强调区域联防联控的背景下, 学术界最新研究成果重点关注大气污染空间传输的溢出效应、污染治理政策成效以及政府间大气污染治理的联动效应。

从扩散范围角度看, 大气污染区域影响的基准溢出范围为800 km, 其中距离中心城市300 km以内是核心治理区域^[2-4]。从空间溢出规律角度看, 中国城市间大气污染存在显著的空间相关性和长期稳定的空间溢出效应, 某一城市污染是由本地区污染积累与邻近城市、较远城市的外来污染输送共同形成的^[5-9]。空间溢出效应的机制解释可以分为自然和社会经济两个方面。一方面, 在大气环流等自然条件作用下, 大气污染往往会在区域间输送、转化和耦合, 实现跨越行政边界的远距离输送^[10]; 另一方面, 伴随区域开放不断深化, 区域(城市、城市群)之间产业结构、能源结构存在差异性, 产业转移推动形成废气排放集聚地^[11], 社会经济联系愈发紧密使得区域间和部门间大气污染的隐含排放转移愈发显著^[12-13], 包含经济

^{*} 收稿日期: 2020-04-08 修回日期: 2020-07-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(18SZYB20); 陕西重点产业创新链(群)项目(2020ZDLSF06-02); 中国气象局软科学研究重点项目(2020ZDIANXM07); 陕西省关中地区大气污染防治技术与示范(群)项目(2018ZDCXL-SF-02-06)

第一作者简介: 刘杰(1985-), 男, 四川内江人, 博士, 主要从事可持续发展理论与政策研究。E-mail: liujiesx@snnu.edu.cn

的关联网络最符合中国雾霾污染的现实情况^[14]。大气污染的空间溢出效应使得“各自为战”治污努力可能因为污染的“溢出效应”而徒劳无功,进一步论证了区域联防联控的必要性^[15-18]。由于大气污染在地区内城市之间的关联更为密切,本文对关中地区大气污染的空间关联提出如下假设:

H1: 关中地区大气污染具有空间“溢出效应”和局部空间聚集特征。

H2: 关中地区社会经济联系可能产生跨地区的大气污染“转移效应”。

随着大气污染空间相关性得到验证,环境治理绩效的“空间联动”特征也引起了学术界的高度关注。由于地区间经济发展水平和污染程度存在差异,治污政策可能导致“逐顶竞争”和“逐底竞争”两种空间联动效应。一方面,一个地区的环境质量持续改善会形成“学习效应”,带动周边地区环境治理积极性,有利于区域联防联控机制的成功实施^[19-20],即表现为“逐顶竞争”效应。另一方面,由于地区经济发展水平存在差异,地方政府在发展经济与保护环境之间的权衡取舍容易导致环境规制的弱化,加重环境污染状况,产生“逐底竞争”效应^[19,21-24]。关中部分地区大气污染出现不降反升的“滑坡”现象可能归因于地区间大气污染治理的“逐顶竞争”效应不显著抑或存在“逐底竞争”效应。本文对关中地区大气污染治理的空间联动效应作如下假设:

H3: 关中地区大气污染协同治理的困境归因于“逐顶竞争”效应不足。

综上所述,大气污染具有空间关联性特征,并且大气污染治理已经从控制局地污染问题向区域联防联控转变,使得污染治理政策具有空间联动效应。本文以关中地区为例,从自然、社会、经济和政策多维度视角出发,考察大气污染传输的空间溢出效应,以及污染治理政策的空间联动效应,实证研究结果可以为大气污染的跨区域联合治理提供更加详实的决策依据。

2 关中地区 PM_{2.5} 空间相关性分析

2.1 全局空间相关性

根据“地理学第一定律”(Tobler's first law of geography),空间自相关可以理解为位置相近的区域具有相似的变量取值。如果高值和高值聚集在一起,低值与低值聚集在一起,则为“正空间自相关”;反之,如果高值和低值相邻,则为“负空间自相关”。为探究关中地区大气污染在空间上是否存在相关性,本文将采用全局 Moran's *I* 指数进行检验。首先构造空间邻接权重矩阵,相邻关系采用车相邻(rook contiguity)原则。

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: $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$; I 是 Moran's *I* 指数,

测度关中地区大气污染的总体相关程度。 W_{ij} 为空间权重矩阵, x_i 表示第 i 个地区的 PM_{2.5} 浓度值, n 为城市个数, I 的取值范围为 $-1 \leq I \leq 1$, 当 I 取值接近 1 时,表示从整体来看关中地区 PM_{2.5} 浓度呈现空间正相关,接近 -1 时表示呈空间负相关,接近 0 时表示不存在空间相关性。

表 1 给出了关中地区五个城市 2001 - 2016 年全局 Moran's *I* 指数的计算结果。检验结果显示,2001 - 2016 年所有全局 Moran's *I* 指数均通过了 1% 水平下的显著性检验,且大部分年份的 Moran's *I* 指数的值均在 0.7 以上,表明研究时段内关中地区大气污染存在较为明显的空间正相关性,且处于长期稳定状态。

表 1 2001 - 2016 年关中地区 PM_{2.5} 的全局 Moran's *I* 指数

年份	Moran's <i>I</i>	Z	P 值
2001	0.675	7.873	0.0000
2002	0.759	8.780	0.0000
2003	0.718	8.321	0.0000
2004	0.679	7.920	0.0000
2005	0.779	8.997	0.0000
2006	0.734	8.508	0.0000
2007	0.786	9.070	0.0000
2008	0.751	8.693	0.0000
2009	0.734	8.520	0.0000
2010	0.750	8.691	0.0000
2011	0.725	8.439	0.0000
2012	0.750	8.707	0.0000
2013	0.758	8.777	0.0000
2014	0.741	8.570	0.0000
2015	0.751	8.696	0.0000
2016	0.779	8.999	0.0000

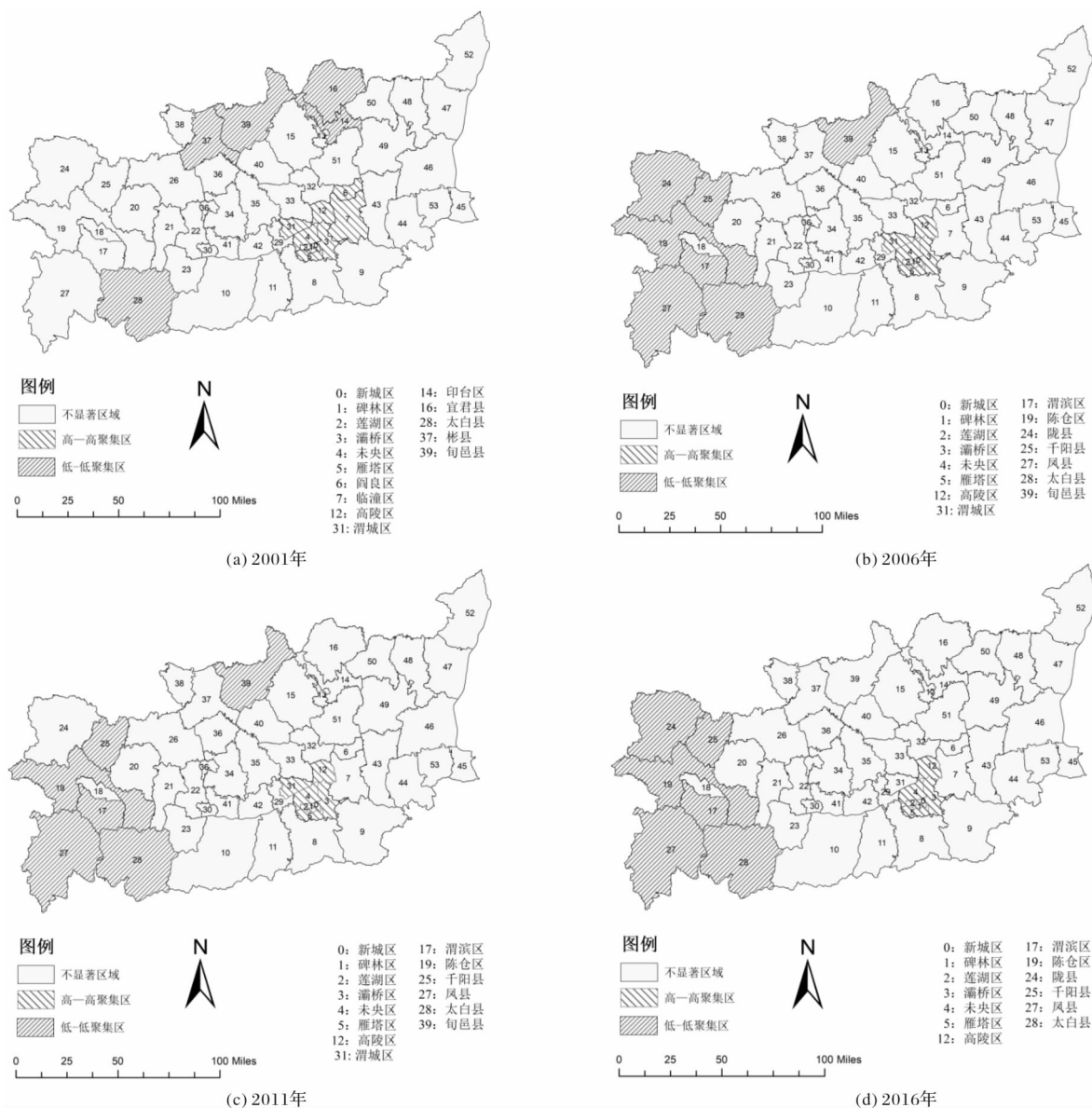
注: Z 为 I 值的 Z 检验值, P 值为其伴随概率。

2.2 局域空间相关性

上述全局空间相关性反映了关中地区 PM_{2.5} 浓度的整体相关状况,但可能会忽略局部地区的非典型特征。为考察关中地区城市大气污染局部是否存在显著的聚集效应,本文进一步引入局域 Moran's *I* 指数(LISA)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 是局域 Moran's *I* 指数,测度 i 地区与周围其它地区的相关程度。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} 浓度与其周围地区的 PM_{2.5} 浓度呈现正相关性,表现为一个 PM_{2.5} 浓度高的地区与一个或多个 PM_{2.5} 浓度高的地区集聚在一起(高-高型聚集),或是一个 PM_{2.5} 浓度低的地区与一个或多个 PM_{2.5} 浓度低的地区集聚在一起(低-低型聚集); $I_i < 0$ 时,地区 i 的 PM_{2.5} 浓度与其周围地区的 PM_{2.5} 浓度呈现负相关性,表现为一个 PM_{2.5} 浓度低的地区与高 PM_{2.5} 浓度的地区集聚在一起(低-高型或高-低型聚集)。

图1 关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度 LISA 显著性分布图

数据来源: 根据 CIESIN 公布的 $PM_{2.5}$ 浓度统计数据, 以国家标准地图为底图制作

图1为关中地区部分选取年份 $PM_{2.5}$ 浓度的 LISA 显著性分布图, 高-高聚集区长期稳定集中在西安市城区, 低-低聚集区主要分布在关中北部和西部地区。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, 本文研究假说1得到验证。

3 空间计量模型构建与实证分析

3.1 指标选取、数据来源及数据描述

本文选取的研究样本为2001-2016年西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南五个城市的面板数据。由于中国城市 $PM_{2.5}$ 统计数据始于2013年, 样本数据量较少, 因此本文选取了美国哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心(Columbia University Center for International Earth Science Information Net-

work, CIESIN)公布的 $PM_{2.5}$ 浓度统计数据。已有学者研究证实哥伦比亚大学利用卫星搭载设备对气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth)进行测定得到的 $PM_{2.5}$ 数据与生态环境部公布的数据基本一致^[25], 因而具有较高的可信度。其他社会经济数据全部查找自历年《陕西省统计年鉴》(2002-2017)和《中国统计年鉴》(2002-2017)。非空间面板数据和空间面板数据的处理运用 stata15.1 软件。

本文以 $PM_{2.5}$ 年平均浓度代表城市大气污染状况作为被解释变量, 核心解释变量为废气治理设施运行费用(wgc)和废气治理设施数量(wgf), 其他解释变量包括地区生产总值(gdp)、年末常住人口(pop)、民用车辆拥有数量(car)、第二产业产值占地区生产总值的比重($indus$)、煤炭消费总量占能源消费总量的比重($coal$)以及年平均风速($wind$)。数据的统计性描述如表2所示。

表 2 数据的统计描述

变量类型	符号	经济含义	单位	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	<i>pm</i>	PM _{2.5} 年平均浓度	μg/m ³	32.95	6.46	20.10	48.04
核心解释变量	<i>wgc</i>	废气治理设施运行费用	万元	24414.42	27945.17	1308.00	121000.00
	<i>wgf</i>	废气治理设施数量	套	580.44	201.27	105.00	972.00
	<i>pop</i>	年末常住人口	万人	459.55	240.06	82.99	883.21
	<i>gdp</i>	地区生产总值	万元	1167.95	1353.39	37.08	6282.65
	<i>indus</i>	第二产业产值占比	%	50.86	8.58	35.00	65.00
	<i>coal</i>	煤炭消费总量占比	%	72.96	3.02	68.90	80.51
	<i>car</i>	民用车辆拥有量	万辆	29.60	47.70	1.26	244.00
	<i>wind</i>	年平均风速	m/s	1.61	0.46	0.80	2.40

数据来源: CIESIN 公布的 PM_{2.5} 浓度统计数据; 2002 - 2017 年《陕西省统计年鉴》; 2002 - 2017 年《中国统计年鉴》。

3.2 模型构建

首先, 建立非空间面板数据模型(公式 3), 对除百分比以外的其他解释变量进行对数变换以削弱异方差对模型参数估计的影响, 模型具体形式设定为:

$$PM = \alpha + X\beta + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \delta^2). \quad (3)$$

式中: X 表示由全部解释变量所组成的向量, β 表示模型待估参数。依据“环境库兹涅茨曲线”理论, 引入地区经济产值对数的一次项和二次方项, 以考察城市大气污染与经济增长之间的非线性关系。

其次, 前文通过空间相关性分析已经发现关中地区 PM_{2.5} 存在显著空间正相关性, 进一步构建空间面板数据模型(公式 4), 考察关中地区大气污染的空间溢出效应、环境规制政策的空间联动效应以及地区间污染“转移效应”。故本文选取空间杜宾模型(Spatial Durbin Model, SDM)进行实证研究, 模型形式设定如下:

$$PM = \rho WPM + \alpha I_n + X\beta + WX\theta + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \delta^2 I_n). \quad (4)$$

式中: W 为空间权重矩阵, ρ 为 PM_{2.5} 的空间溢出系数, 反映邻近地区 PM_{2.5} 变化对本地区的影响程度; θ 表示邻近地区具有空间溢出效应的社会经济因素或自然因素对本地区大气污染的溢出效应。为进一步提高本文实证研究结果的稳健性, 分别应用空间邻接矩阵、反距离权重矩阵以及经济距离矩阵, 其中反距离权重矩阵是基于城市间的地理距离来定义相邻关系的方法; 经济距离矩阵中, 两个城市经济发展水平越相似, 两者之间的空间依赖性越大, 故权重取值就越大。与空间邻接矩阵相比, 反距离权重矩阵和经济距离权重矩阵不仅可以反映关联方式, 而且可以定义两个地区的关联程度。

3.3 非空间面板数据模型的回归分析

本文首先使用基本的非空间面板数据模型进行回归, 采用逐步引入环境规制变量的方法检验模型参数估计稳健性。通过模型的豪斯曼检验表明, 非空间面板数据适合选择固定效应模型, 具体参数估计结果及显著性检验如表 3 所示。

表 3 非空间面板模型回归结果

变量	模型 1	模型 2	模型 3
<i>lnpop</i>	43.011 ** (2.42)	41.774 ** (2.34)	39.877 ** (2.21)
<i>lngdp</i>	-1.420 (-0.32)	-1.899 (-0.43)	-5.703 (-0.93)
<i>lngdp2</i>	-0.538 (-1.54)	-0.462 (-1.26)	-0.258 (-0.58)
<i>indus</i>	0.424 *** (2.85)	0.434 *** (2.90)	0.518 *** (2.95)
<i>coal</i>	0.538 *** (3.82)	0.522 *** (3.65)	0.542 *** (3.85)
<i>ln car</i>	5.303 ** (2.29)	5.578 ** (2.37)	5.421 ** (2.34)
<i>ln wind</i>	-3.758 ** (-1.32)	-3.737 (-1.31)	-2.909 (-0.98)
<i>ln wgc</i>		-0.582 (-0.74)	
<i>ln wgf</i>			-1.803 (-1.00)
<i>Constant</i>	-310.535 *** (-2.83)	-300.522 *** (-2.71)	-271.963 ** (-2.34)
<i>R-squared</i>	0.362	0.367	0.371
<i>F-test</i>	5.505 ***	4.854 ***	4.942 ***
固定/随机效应选择	$X^2 = 25.174$ (0.001)	$X^2 = 129.388$ (0.000)	$X^2 = 2244.615$ (0.000)

注: ***, **, * 分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平。

在不考虑空间溢出效应的条件下, 人口规模、产业结构、能源结构以及城市交通均显著促进了城市 PM_{2.5} 浓度升高; 经济发展与城市 PM_{2.5} 浓度之间的倒“U”型曲线关系不具有统计显著性; 风速仅在模型 1 中表现为显著抑制 PM_{2.5} 浓度的作用; 城市大气污染规制政策能够发挥消减城市 PM_{2.5} 浓度的作用, 但没有通过显著性检验。

3.4 空间面板数据模型的回归分析

鉴于关中地区 PM_{2.5} 的显著空间相关性, 本文

进一步构建空间面板数据杜宾模型,选择废气治理设施运行费用为政策规制变量,实证检验关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度的空间溢出效应、地区间环境规制的空间联动效应以及社会经济因素引发的污染“转

移效应”。为检验实证结果的稳健性,本文将分别应用空间邻接矩阵、反距离权重矩阵和经济距离矩阵进行参数估计,结果见表 4 中模型 4、模型 6 和模型 8 所示。

表 4 空间面板数据模型回归结果

变量	空间邻接矩阵		反距离地理矩阵		经济地理距离矩阵	
	模型 4	模型 5	模型 6	模型 7	模型 8	模型 9
<i>lnpop</i>	4.748*** (2.960)	4.161*** (3.010)	13.296** (2.370)	15.422*** (2.750)	16.588*** (2.590)	17.146*** (2.580)
<i>lngdp</i>	-1.947 (-0.730)	1.622 (0.590)	-1.038 (-0.250)	-1.037 (-0.250)	-2.938 (-0.640)	-4.652 (-0.910)
<i>lngdp2</i>	-0.231 (-1.300)	-0.436** (-2.370)	-0.416** (-2.340)	-0.488** (-2.370)	-0.578*** (-2.690)	-0.481** (-1.980)
<i>indus</i>	0.104 (1.540)	0.016 (0.220)	0.147 (1.620)	0.145 (1.460)	0.152 (1.460)	0.194 (1.640)
<i>coal</i>	0.287*** (2.640)	0.264*** (2.770)	0.240* (1.870)	0.236** (2.110)	0.200** (2.030)	0.250*** (2.700)
<i>ln car</i>	4.244*** (4.230)	2.964*** (2.950)	2.012 (1.610)	1.703 (1.400)	1.595 (1.260)	1.812 (1.440)
<i>ln wind</i>	-1.811 (-1.590)	-1.431 (-1.330)	0.845 (0.610)	0.866 (0.640)	1.666 (1.160)	1.518 (1.060)
<i>ln wgc</i>	-0.025 (-0.060)		-0.081 (-0.200)		-0.302 (-0.730)	
<i>ln wgf</i>		1.205 (1.560)		-0.515 (-0.560)		-0.852 (-0.900)
<i>W * ln wgc</i>	0.010 (0.010)		-0.239 (-0.290)		-0.618 (-1.160)	
<i>W * ln wgf</i>		-3.506** (-2.420)		-5.141*** (-2.710)		-0.427 (-0.420)
<i>W * ln pop</i>	-15.453*** (-7.590)	-13.800*** (-7.140)	8.818 (0.680)	13.612 (1.060)	-9.242* (-1.810)	-7.799 (-1.430)
<i>W * lngdp</i>	-1.832 (-0.740)	-2.985 (-1.330)	-1.159 (-0.250)	-1.588 (-0.370)	6.435 (1.390)	4.916 (1.020)
<i>W * indus</i>	0.218* (1.950)	0.348*** (2.970)	0.021 (0.160)	0.176 (1.230)	-0.053 (-0.400)	-0.017 (-0.120)
<i>W * ln car</i>	1.300 (0.680)	2.677** (1.440)	5.069** (2.260)	5.250** (2.380)	2.885* (1.850)	2.963* (1.880)
<i>W * ln wind</i>	-0.942 (-0.400)	-1.723 (-0.780)	-6.801*** (-2.730)	-7.292*** (-2.990)	-8.893** (-1.970)	-9.487** (-2.060)
<i>W * PM</i>	0.676*** (11.120)	0.661*** (10.580)	0.637*** (9.710)	0.592*** (8.250)	0.677*** (11.090)	0.670*** (10.590)
<i>Constant</i>	9.088 (0.310)	9.331 (0.380)	-193.652** (-2.200)	-200.576** (-2.330)	-87.667** (-2.270)	-94.061** (-2.420)
<i>R-squared</i>	0.85	0.89	0.56	0.62	0.59	0.59
Log-likelihood	-160.62	-155.41	-170.48	-166.85	-175.89	-176.33
固定/随机效应	$X^2 = 21.77$ (0.01)	$X^2 = 11.57$ (0.17)	$X^2 = 0.63$ (1.00)	$X^2 = 0.03$ (1.00)	$X^2 = 0.47$ (1.00)	$X^2 = 0.13$ (1.00)

注:***、**、* 分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平。

由空间杜宾模型豪斯曼检验结果表明,模型4选择固定效应模型,模型6和模型8选择随机效应模型为最优结果。与非空间面板数据模型的回归结果比较,空间面板数据回归结果在统计学显著性、经济学显著性两个方面均发生了显著变化。

首先,在三类空间权重矩阵下,本地环境规制能够发挥 $PM_{2.5}$ 减排作用,模型6和模型8中邻近城市的环境规制政策有助于降低本地 $PM_{2.5}$ 浓度,但上述结果均不能通过显著性检验。其次,城市人口规模、能源结构均显著促进关中城市 $PM_{2.5}$ 浓度水平,城市交通的贡献为正,但仅在空间邻接矩阵中具有统计学显著性。再次,引入空间权重矩阵以后, $PM_{2.5}$ 的空间溢出效应均能通过1%统计显著性检验;关中地区邻近城市 $PM_{2.5}$ 浓度每上升1%,则本地区 $PM_{2.5}$ 浓度上升0.64%~0.68%。最后,模型4的产业结构、模型6和模型8中的城市交通均表现为显著的正向空间溢出效应,模型4和模型8的城市人口、模型6和模型8的风速表现为显著的负向空间溢出效应。

产业结构的正向溢出效应反映了关中地区周边城市第二产业发展对本地区第二产业发展的正向带动作用,进而间接提高了本地区 $PM_{2.5}$ 浓度水平;城市交通的正向溢出效应表明周边城市交通车辆数量增加,通过城市间车辆流通的途径增加了本地区 $PM_{2.5}$ 浓度水平;周边城市人口数量增长通过人口流动途径间接降低了本地区 $PM_{2.5}$ 浓度水平,而周边城市风速的增大也将有助于消除本地区污染物水平。综上所述,关中地区环境规制对本地 $PM_{2.5}$ 的减排作用以及地区间的“逐顶竞争”联动效应还不足以抵消其他社会经济驱动因素对 $PM_{2.5}$ 的促进效应;城市产业发展、交通车辆增加还引发 $PM_{2.5}$ 浓度的跨地区转移,不利于整体空气质量改善。本文研究假说2和3得到验证。

3.5 稳健性检验

为进一步验证本文所得结论的稳健性,进一步将废气治理设施数量作为政策规制变量,在引入三类空间权重矩阵的基础上,再次实证检验关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度的空间溢出效应、地区间环境规制的空间联动效应以及社会经济因素引发的污染“转移效应”。空间杜宾模型参数估计及显著性检验结果见表4中模型5、模型7和模型9所示。

本地区环境规制对 $PM_{2.5}$ 的减排效应不显著,在模型5和模型7中环境规制具有显著的负向空间溢出效应,即周边城市提高环境规制强度有利于降低本地区 $PM_{2.5}$ 浓度;关中地区周边城市 $PM_{2.5}$ 浓度升高也会导致本地区污染物浓度升高;模型5中产业结构、三类空间权重矩阵下的城市交通仍然具有显著的正向空间溢出效应;模型5中的人口规模、模型7和模型9的风速同样表现为显著的负向空间溢出效应。综上所述,关中地区环境规制对本地 $PM_{2.5}$ 的减排作用以及地区间的“逐顶竞争”空

间联动效应仍不足以抵消其他社会经济驱动因素的促进效应,城市产业和交通车辆仍然是造成 $PM_{2.5}$ 跨地区转移的社会经济驱动因子。

4 结论与建议

本文基于非空间面板数据模型和空间杜宾模型,识别出影响关中地区大气污染的社会经济、政策以及自然因素,实证检验 $PM_{2.5}$ 的空间“溢出效应”、大气污染治理的区域“联动效应”以及地区间的污染“转移效应”。

研究结果表明,关中地区 $PM_{2.5}$ 具有显著空间溢出效应和空间聚集特征,其中,高-高聚集区长期稳定集中在西安市城区,低-低聚集区主要分布在关中北部和西部地区;城市人口规模、产业结构、能源结构以及城市交通是促进 $PM_{2.5}$ 浓度增加的主要因素,在考虑空间溢出效应条件下,经济发展与 $PM_{2.5}$ 浓度的关系符合环境库兹涅茨曲线理论;基于空间杜宾模型的实证分析表明,关中地区大气污染治理的本地减排效应以及地区间的“逐顶竞争”空间联动效应不足以抵消其他社会经济驱动因素对 $PM_{2.5}$ 排放的促进作用;城市工业和交通车辆具有显著的正向空间溢出效应,引起 $PM_{2.5}$ 跨地区转移,不利于地区空气质量整体改善。

基于本文的实证分析结果,提出如下政策建议:

(1) 以产业升级和能源结构优化促进经济增长与 $PM_{2.5}$ 浓度完全脱钩。一方面,要采取市场化、法制化手段,坚决淘汰过剩落后产能,为优质产能释放腾出环境容量和生产要素;另一方面,要着力推动产业结构转型升级,促进工业产业与5G、物联网、人工智能等新型基建深度融合,从而降低粗放的工业产业发展对资源环境的损害。

(2) 进一步完善区域大气污染联防联控实施机制。通过继续完善区域大气污染联防联控的实施机制,进一步提升地区间“逐顶竞争”空间联动效应,以更低成本实现城市环境质量改善的目标。具体来说,地方政府要充分认识大气污染防治攻坚战对我国生态文明转型发展的重要意义,城市间要达成利益共识,共同规划和实施大气污染治理方案,共享治理成果。

(3) 以区域产业结构调整、城市发展规划的协同升级规避污染“转移效应”。关中地区的产业发展需要做好顶层设计和全局规划,重视城市产业结构的协同升级和转型,推进城市绿色交通和城市“通风廊道”建设,提升负向空间溢出效应,规避跨地区的污染转移。

参考文献:

[1] 周亮,周成虎,杨帆,等. 2000-2011年中国 $PM_{2.5}$ 时空演

- 化特征及驱动因素解析[J]. 地理学报, 2017(11): 161–174.
- [2] AUSTIN E, COULL B, THOMAS D, et al. A framework for identifying distinct multipollutant profiles in air pollution data[J]. *Environment International*, 2012, 45(14): 112–121.
- [3] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染时空特征与影响因素解析[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 177–191.
- [4] LIU H, FANG C, ZHANG X, et al. The effect of natural and anthropogenic factors on haze pollution in Chinese cities: A spatial econometrics approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 323–333.
- [5] 马丽梅, 张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J]. 中国工业经济, 2014(4): 19–31.
- [6] 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.
- [7] 向堃, 宋德勇. 中国省域 PM_{2.5} 污染的空间实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(9): 153–159.
- [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] JIANG L, BAI L. Spatio-temporal characteristics of urban air pollution and their causal relationships: Evidence from Beijing and its neighboring cities[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1–12.
- [10] 刘华军, 雷名雨. 中国雾霾污染区域协同治理困境及其破解思路[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10): 88–95.
- [11] 李敦瑞. 工业“大迁移”对重污染天气的加剧作用及对策分析[J]. 中国环境管理, 2019, 11(5): 26–31.
- [12] WANG Y, LIU H W, MAO G Z, et al. Inter-regional and sectoral linkage analysis of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 1436–1444.
- [13] XU W, SUN J, LIU Y, et al. Spatiotemporal variation and socioeconomic drivers of air pollution in China during 2005–2016[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 245: 66–75.
- [14] 刘华军, 裴延峰. 经济发展与中国城市雾霾污染——基于空间关联网络情形下的考察[J]. 城市与环境研究, 2018(3): 15–41.
- [15] ZHOU X, ELDER M. Regional air quality management in China: The 2010 Guideline on Strengthening Joint Prevention and Control of Atmospheric Pollution[J]. *International Journal of Sustainable Society*, 2013, 5(3): 232–249.
- [16] 崔松虎, 杨明娜. SCP 模式下提升京津冀环境污染治理效应研究[J]. 生态经济(中文版), 2015, 31(12): 150–154.
- [17] 李永亮. “新常态”视阈下府际协同治理雾霾的困境与出路[J]. 中国行政管理, 2015(9): 32–36.
- [18] 赵新峰, 袁宗威. 京津冀区域大气污染协同治理的困境及路径选择[J]. 城市发展研究, 2019, 26(5): 94–101.
- [19] HOSSEINI H M, KANEKO S. Can environmental quality spread through institutions? [J]. *Energy Policy*, 2013, 56(2): 312–321.
- [20] 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(7): 170–175.
- [21] 刘建民, 陈霞, 吴金光. 财政分权、地方政府竞争与环境污染——基于 272 个城市数据的异质性与动态效应分析[J]. 财政研究, 2015(9): 36–43.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 罗能生, 王玉泽. 财政分权、环境规制与区域生态效率——基于动态空间杜宾模型的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(4): 110–118.
- [25] 白俊红, 聂亮. 环境分权是否真的加剧了雾霾污染? [J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(12): 59–69.

Environmental Regulations, Spatial Spillover Effects, and Urban Environmental Quality: Evidence from Guanzhong Area in China

LIU Jie¹, LI Yuan¹, BAI Xiaoyu¹, WANG Li², TANG Zhiyi³, OU Yinglin¹ and MIN Chen⁴

(1. *International Business School, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;*

2. *Xi'an Meteorological Bureau in Shaanxi Province, Xi'an 710119, China;*

3. *Department of Engineering Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*

4. *School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)*

Abstract: Based on the panel data of five cities in Guanzhong area from 2001 to 2016, we utilize the Spatial Durbin Model to conduct a quantitative research on the effects of urban environmental regulation policy. The results show that there is significantly positive spatial spillover effects of PM_{2.5} in Guanzhong area, i. e. the increase of PM_{2.5} concentrations in surrounding cities will definitely aggravate air pollution of the central city; critical influencing factors contributing to PM_{2.5} concentrations are population growth, industrial structure, energy mix, and urban transportation; the “race to the top” effect of environmental regulation policy and the cross-regional “transferring effect” of PM_{2.5} have been verified among the prefecture cities in Guanzhong area. This paper emphasizes the importance of promoting synergistic development of urban economy, industrial structure and transportation in the region to further consolidate the implementation mechanism of joint prevention and control of air pollution.

Key words: PM_{2.5}; environmental regulation; spillover effect; SDM; Guanzhong area