

城市群雾霾污染的空间分异及动态关联研究 ——基于京津冀城市群的实证分析

王会芝^{1*}, 杜林蔚², 吕建华³

(1. 天津社会科学院经济分析与预测研究所, 天津 300191; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350;
3. 青岛市环境保护科学研究院, 山东青岛 266003)

【摘要】 污染治理联防联控是解决区域雾霾问题的重要手段, 雾霾污染的城市联动和交互作用是雾霾区域协同治理的关键问题。本文运用探索性空间数据分析和标准偏差椭圆方法, 分析了京津冀雾霾污染的空间关联特征和空间重心转移轨迹, 运用空间计量模型, 测算了京津冀雾霾污染的空间溢出效应和驱动影响因素。结果表明: 京津冀雾霾污染具有显著的空间集聚特征和空间异质性, 雾霾污染的空间溢出效应明显, 经济增长、城镇化发展、产业结构、人口密度等均对京津冀雾霾污染产生正向影响, 外商直接投资对雾霾污染产生负向影响。本文从构建区域污染协同治理机制、区域产业资源的高效配置、城市空间管控等方面提出了城市群雾霾污染治理的对策建议。

【关键词】 雾霾污染; 空间分异; 动态关联; 城市群; 京津冀

【中图分类号】 F124.5; X321

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252 (2020) 01-0080-07

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.01.080

引言

雾霾污染是我国当前亟须解决的重要问题之一, 尤其是京津冀、长三角地区是我国大气污染最严重的地区, 也是国家控制空气污染的重点区域。近年来, 国家高度重视大气污染治理, 以 PM_{2.5} 为主的雾霾污染治理成效显著, 2018 年, 京津冀及周边地区平均优良天数比例为 50.5%, PM_{2.5} 浓度为 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 同比下降 11.8%, 但是京津冀大气污染问题依然严峻, PM_{2.5} 浓度远超 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的国家二级标准, 雾霾污染治理任重道远。由于雾霾污染具有复杂性和长期性的特征, 不同城市雾霾污染存在相互影响和联动效应, 城市间雾霾污染的交互作用增加了雾霾区域污染治理联防联控的难度。因此, 厘清雾霾污染的时空演化与空间交互特征, 从空间计量角度深入剖析雾霾污染与其影响因素之间的关联性, 探索雾霾污染治理的有效措施, 是破解雾霾治理联防联控问题的实证深化, 可为区域生态环境协同提供科学参考和决策支持。

1 文献回顾

我国对雾霾污染的前期研究主要从物理化学、气象地理和生态科学等角度展开, 针对 PM_{2.5} 的成因来

源^[1,2]、扩散影响^[3,4]、健康效应^[5]、时空分布^[6,7]、治理政策措施^[7-10]等方面进行了大量的研究。另有一些研究从空间和经济学角度展开探讨, 主要涉及以下三个方面: 一是经济发展因素对空气污染的影响, 主要从经济增长、能源消耗、产业发展、城镇化发展、人口结构等角度分析其对雾霾污染的影响^[11-15], 例如, 邵帅等^[11]以灯光复合指数作为省(区、市)域城市化水平的测度指标, 从城市化的集聚效应、技术效应、产业结构效应和能源结构效应等方面研究了城市化对雾霾的影响, 童玉芬等^[13]探讨了城市人口增长与雾霾污染的相互作用机制, 裴辉儒等^[15]通过空间计量模型检验了外商投资与 PM_{2.5} 的空间效应和相关性; 二是雾霾污染的经济损失相关研究, 主要通过计量分析方法, 评估雾霾污染对人群健康经济损失^[16,17], 如庞闰枝^[17]利用暴露反应关系和疾病经济负担模型, 对我国雾霾污染造成的健康经济损失进行了测算研究; 三是雾霾污染的空间关联性分析, 主要基于国家层面^[18,19]和大区域层面^[20], 将空间统计技术与计量经济学方法拓展应用到雾霾污染领域, 探讨污染的时空特征和空间联系, 如王自力等^[18]和李欣等^[20]分析了我国和长三角地区雾霾污染的空间效应与影响。

资助项目: 国家社科基金青年项目“京津冀雾霾治理的经济影响与减排效应研究”(17CJY021)。

作者简介: 王会芝(1984—), 女, 副研究员, 主要从事环境经济、低碳发展等方面的研究, E-mail: huizhiwangnk@163.com。

综合来看,学术界对雾霾已经进行了一些实验分析、方法探索和实证研究,现有一些研究已经揭示出雾霾污染存在空间上的相互关联性,然而由于方法和数据的限制,现有研究虽涉及多个空间尺度和时间尺度的研究,但较少开展不同时空尺度的动态演化分析,尤其是针对京津冀不同城市间雾霾污染的空间传输特征进行系统研究,缺乏从空间经济学角度考量京津冀雾霾污染的驱动影响。因此,解决京津冀雾霾协同治理问题,本研究拟从以下几个方面进行扩展和补充:京津冀城市群雾霾污染是否具有显著的空间溢出效应?雾霾污染时空动态演化特征和空间交互作用程度如何?近年来京津冀雾霾污染的空间重心如何转移?影响因素如何作用于京津冀雾霾污染?本研究基于以上考虑,运用多种空间计量模型为测算依据,并引入空间重心转移曲线,探讨京津冀雾霾污染的时空演化、空间交互特征和空间转移轨迹,从空间计量角度剖析雾霾污染与其影响因素之间的关联性,并提出京津冀雾霾治理的对策建议,以期为京津冀城市群雾霾污染的协同治理和联防联控提供理论和决策参考。

2 数据与方法

2.1 数据来源

雾霾污染以 $PM_{2.5}$ 为主,本研究选取 $PM_{2.5}$ 年均浓度作为衡量京津冀雾霾污染程度的指标。我国自 2013 年起对城市 $PM_{2.5}$ 数据进行监测,2013 年之前的数据缺失,美国哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心(CIESIN)和巴特利纪念研究所(Battelle Memorial Institute)通过卫星监测,将中分辨率成像光谱仪(MODIS)测算的气溶胶光学厚度(AOD)转化为栅格数据,从而得出全球的 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据(1998—2016年),本研究采用 ArcGIS 软件对遥感栅格数据进行解析,得出京津冀 13 个城市的 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据(1998—2016年),为更好地了解近几年京津冀雾霾污染和治理情况,同时加入国家监测站发布的 2014—2018 年 $PM_{2.5}$ 污染数据作为对比。

本研究选取京津冀 13 个城市空间面板数据进行分析,测度指标来源于 1999—2016 年的《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》以及不同城市相应年份的统计年鉴和国民经济发展统计公报等。

2.2 研究方法

本研究利用探索性空间数据分析法(ESDA)中的全局和局部空间自相关分析法对京津冀雾霾污染的空间关联进行分析;利用标准偏差椭圆 SDE 方法,分

析京津冀雾霾污染的空间重心转移曲线;探讨雾霾污染的时空演化与相互时空关联特征;运用空间计量方法,揭示雾霾污染与其影响因素之间的空间关联性。

2.2.1 空间重心转移曲线

本研究用 ArcGIS 中的标准偏差椭圆 SDE 方法,绘制京津冀雾霾污染的空间重心转移曲线,分析京津冀雾霾污染的时空转移方向。SDE 的范围表示雾霾污染的主要空间分布区域,中心表示雾霾污染分布的相对位置。

2.2.2 空间相关性度量

探索性空间数据分析(ESDA)广泛应用于空间数据的相关性研究中,主要采用全局空间自相关指数以及局部空间自相关指数来测度。其中,全局空间自相关性用于分析雾霾污染在京津冀整个区域范围内的相关性,局部空间自相关性用于分析不同城市雾霾污染的相关性。

全局空间相关性方面,本研究运用 ArcGIS10.2 工具测度 Global Moran's I 指数(莫兰指数)来反映京津冀雾霾污染的空间分布状况,具体公式如下:

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

式中, I 为全局莫兰指数,用于测度不同京津冀雾霾污染的总体空间相关性; n 为研究区域内地区的总数; W_{ij} 代表空间权重矩阵; x_i 和 x_j 分别为第 i 个城市和第 j 个城市的雾霾污染情况; \bar{x} 为京津冀各城市总体雾霾污染的均值。指数 I 的取值范围在 $(-1,1)$ 之间,若指数 $I > 0$,说明京津冀雾霾污染呈现空间正自相关,不同城市雾霾污染存在较强的空间交互性;若指数 $I < 0$,则呈现空间负相关,说明雾霾污染在空间上呈现离散型,不同城市雾霾污染存在较大的空间异质性。若 $I = 0$,则说明雾霾污染在空间上呈现随机分布,没有明显规律。

局部空间相关性方面,本研究运用 GeoDa 软件创建权重矩阵,权重矩阵基于空间二进制邻接关系进行设定,当区域 i 和区域 j 相邻时,则 W_{ij} 等于 1,否则 W_{ij} 等于 0。在此基础上,绘制京津冀雾霾污染的 Moran 散点图,Moran 散点图包含 4 个象限:高-高型(H-H)、低-低型(L-L)、高-低型(H-L)、低-高型(L-H),散点图第一象限表示该城市与其他临近城市雾霾污染相对较高,呈现出正相关特征,属于高-高型集聚区;第二象限表示城市雾霾污染低于临

近城市,呈现负相关特征,属于低-高型集聚区;第三象限表示该城市与邻近城市的雾霾污染均较低,呈现正相关特征,属于低-低型集聚区;第四象限表示该城市高于其他邻近城市,呈现负相关特征,属于高-低型集聚区。

2.2.3 空间计量模型

建立空间计量模型,分析不同自变量对因变量的影响程度,一般选取空间滞后模型(Spatial Lag Model, SLM)和空间误差模型(Spatial Error Model, SEM)进行测算,公式如下:

$$y_i = \alpha + \rho w_i y + \beta x_i + \varepsilon \quad (2)$$

$$y_i = \beta x_i + \varepsilon + \lambda w_{\varepsilon} + \mu \quad (3)$$

式中, x_i 和 y_i 分别为自变量和因变量; ρ 为空间回归系数; w_i 为空间权重矩阵; λ 为空间误差系数; ε 和 μ 为误差项。

3 结果与分析

3.1 京津冀雾霾污染的时空分布及空间相关性

京津冀地区各城市雾霾污染空间差异显著,总体上呈现南高北低、东高西低的特点,东、中部污染较为突出。通过对美国哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心和巴特利纪念研究所的数据进行分析,从时间维度来看(图1),京津冀三地雾霾污染表现出同向发展的态势,1998—2006年呈波动性上升趋势,2007—2012年呈小幅下降趋势,2006年和2013年的污染程度为历年最高。从空间维度来看,1998—2016年,京津冀雾霾污染在空间上呈现出扩大的趋势,1998—2004年,京津冀雾霾污染主要集中在邯郸、邢台、衡水、沧州、廊坊和天津等城市,2005—2013年,除了张家口和承德两个城市外,京津冀其他各城市均面临不同程度的污染,其中衡水、沧州、廊坊、天津等城市的雾霾污染均超过国家二级标准。2013年后,我国开始重视大气污染防治,通过政策和技术手段治理雾霾污染,近年来京津冀雾霾污染有所减缓。进一步对2014—2018年中国环境监测总站提供的京津冀逐月雾霾数据进行分析(图2),发现京、津、冀三地雾霾污染呈现出显著的季节特征,冬季雾霾污染程度明显高于其他几个季节,同时三地冬季雾霾污染程度逐年趋

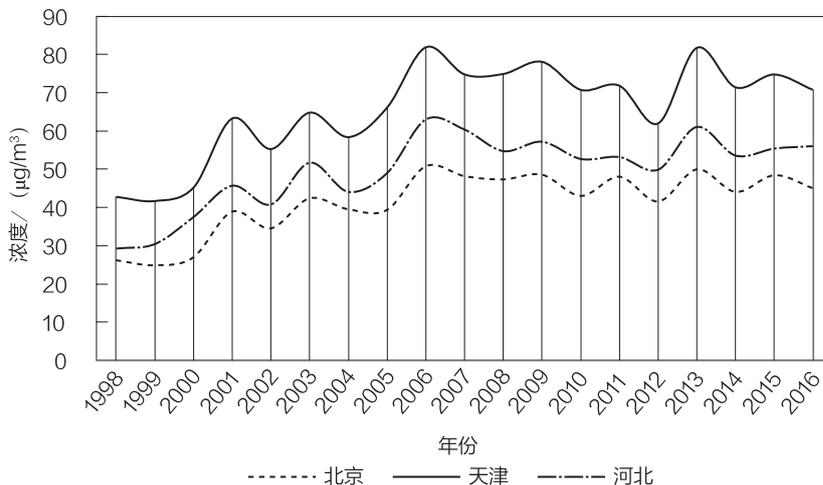


图1 1998—2016年京津冀雾霾污染演变

数据来源:美国哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心、巴特利纪念研究所

缓,尤其是2017年和2018年的冬季污染浓度明显低于其他年份同期污染浓度,充分体现了大气污染防治的成效。

1998—2016年京津冀地区雾霾污染的全局空间自相关 Moran's I 指数在 0.323~0.437 波动(表1),且所有的空间自相关系数通过 5% 的显著性检验,说明京津冀地区雾霾污染存在明显的空间正自相关性,雾霾污染存在空间集聚效应。

表1 1998—2016年京津冀雾霾污染局部空间自相关检验结果

年份	Moran's I 指数	Z 值	P 值
1998	0.422	2.166	0.030
1999	0.425	2.219	0.026
2000	0.412	2.160	0.031
2001	0.404	2.424	0.032
2002	0.398	2.114	0.034
2003	0.415	2.322	0.028
2004	0.355	2.172	0.030
2005	0.408	2.213	0.030
2006	0.397	2.205	0.034
2007	0.420	2.224	0.025
2008	0.335	2.052	0.043
2009	0.354	2.071	0.050
2010	0.381	2.076	0.036
2011	0.323	2.085	0.048
2012	0.386	2.130	0.035
2013	0.397	2.142	0.035
2014	0.334	1.854	0.044
2015	0.131	0.939	0.048
2016	0.402	2.144	0.032

进一步分析京津冀 13 个城市雾霾污染的空间异质性,利用 GeoDa 软件创建权重矩阵,测算绘制了

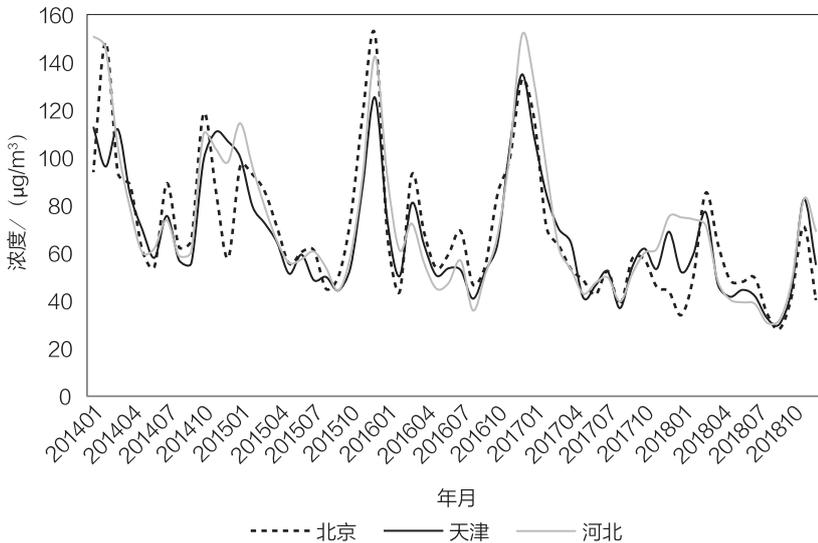


图2 2014—2018年京津冀雾霾污染PM_{2.5}月均浓度

数据来源：中国环境监测总站发布的PM_{2.5}污染数据

京津冀各城市2000年、2004年、2008年、2012年和2016年雾霾污染的Moran散点图(图3),其中,横轴表示PM_{2.5}浓度值,纵轴表示PM_{2.5}浓度值的空间滞后值。检验结果显示,京津冀雾霾污染具有显著高-高型集聚和低-低集聚的空间正相关性,其中,天津、廊坊、衡水、沧州、邢台等城市一直处于第一象限

限内,呈现显著的高-高空间集聚特征,北京、张家口、承德和秦皇岛一直处于第三象限内,呈现显著的低-低空间集聚特征,随着时间推移,石家庄、保定和唐山逐渐由第二象限移到第一象限,集聚状态更为显著,由此说明,京津冀各城市雾霾污染的空间相关性越来越显著。

3.2 空间重心转移影响

由于京津冀雾霾污染存在显著的空间集聚现象,且随着时间变化不断发生转移,本研究利用ArcGIS软件绘制了京津冀雾霾污染的标准差椭圆、污染的重心以及重心转移轨迹。结果表明,京津冀地区的雾霾污染重心逐渐向西向南转移,污染重心主要集中在廊坊市和沧州市,位于京津冀几何重心的南部,说明京津冀西南部地区的雾霾污染较为严重,从雾霾污染重心转移轨迹阶段来看,京津冀地区雾霾污染重心转移大致可分为两个阶段,分别为1998—2003年重心向西南部方向转移以及2013—2018年重心向

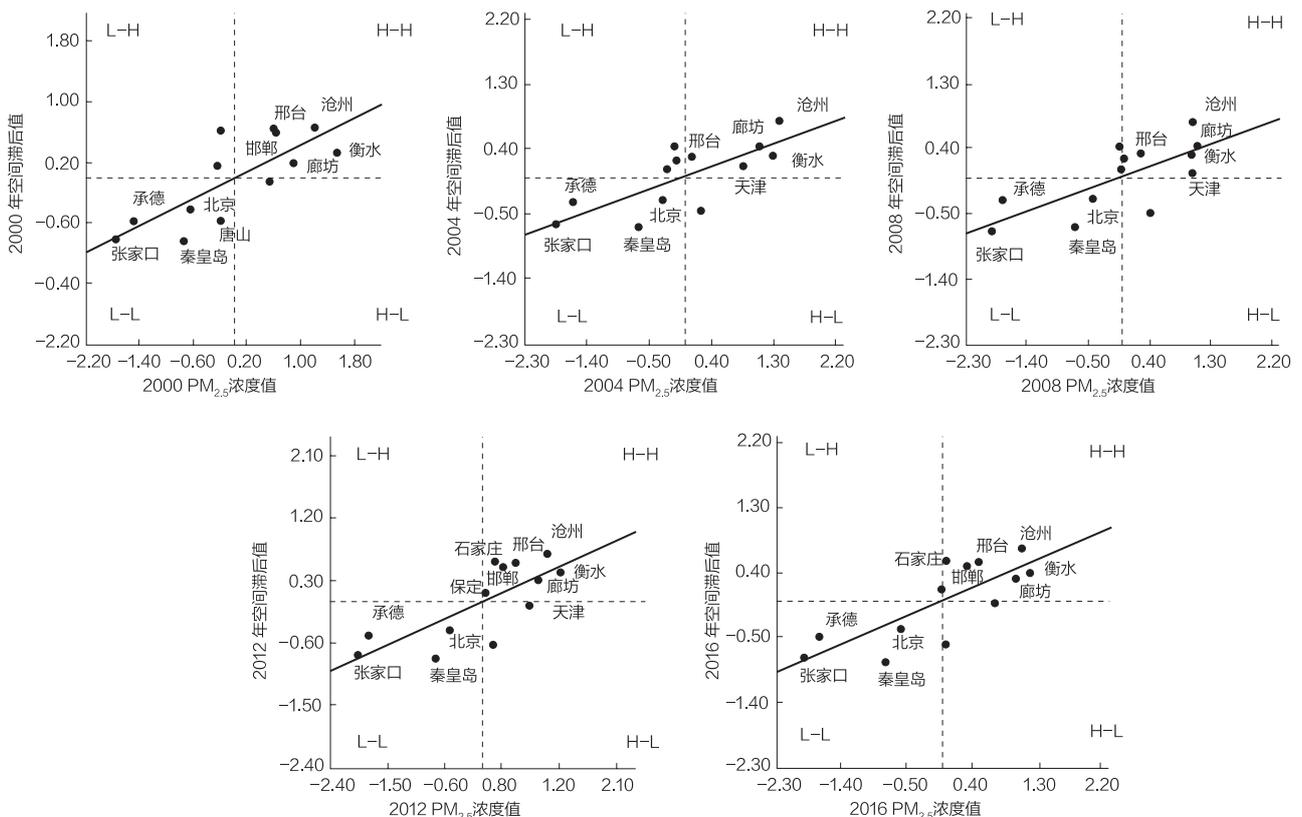


图3 2000年、2004年、2008年、2012年、2016年京津冀各省份PM_{2.5}浓度值Moran散点图

西部方向转移。从重心转移距离来看,1998—2003年转移的距离最大,说明这一时期,京津冀地区雾霾污染的空间异质性强,变化明显,其中该阶段北京和唐山的污染开始凸显,这与各地产业结构调整发展有关,以唐山为例,2000年前后,唐山的钢铁产能仅为470万t,到2003年,钢铁产能达3000多万t,钢铁相关产业产值占GDP的60%左右。2013—2018年,污染重心向西南方向转移,其中邯郸、邢台、石家庄、衡水等城市的污染凸显,主要在于这些城市的产业结构偏重,钢材、建材、石化、电力等“两高”行业企业集中。

3.3 影响因素与雾霾污染的空间关联特征

本研究选取人均生产总值(GDP)、城镇化率(URB)、人口密度(P)、第二产业占比(IND)、外商直接投资(FDI)五个自变量指标,利用Stata13.0对京津冀雾霾污染的影响进行实证测算,比较不同模型效应的赤池信息准则(AIC)和对数似然估计值(Log-likelihood)(表2),发现空间滞后模型的拟合度优于空间误差模型,进一步对空间滞后模型进行分析。

根据表2的模型测算结果,京津冀雾霾污染的空间自相关系数为0.634,且通过了1%的显著性水平检验,说明京津冀不同城市雾霾污染受邻近城市的影响显著,即雾霾污染存在较为明显的空间溢出效应。经济增长、城镇化水平、工业结构、人口密度等自变量在5%的显著性水平下相关性为正,表明其对京津冀雾霾污染的影响显著。从经济增长来看,人均GDP的系数为0.503,说明京津冀经济的发展会对雾霾污

染产生一定的影响,“环境库兹涅茨曲线”假说认为经济发展与环境污染呈现“倒U型”关系,在拐点到来之前,经济增长伴随着高耗能、高污染和高排放,一定程度上加剧了雾霾污染。从工业结构来看,京津冀第二产业占比的估计系数为0.613,说明工业化发展对雾霾污染的影响较大,尤其是河北省11个城市目前正处于工业化快速发展时期,工业产值占二产产值比重较高,传统的粗放式的工业化发展模式以及重工业的无序发展,导致河北省雾霾污染持续不降,这也说明京津冀高质量绿色发展刻不容缓;从城镇化水平和人口密度来看,京津冀城镇化水平和人口密度的估计系数分别为0.834和0.167,说明城镇化发展和人口密度的不断增加会加重京津冀的雾霾污染。城镇化的无序扩张发展以及人口的不断集聚加大了对能源消费和机动车的需求,导致更多的能源消耗和机动车污染排放;从对外开放来看,外商直接投资估计系数为-0.028,说明外商直接投资没有加重京津冀的雾霾污染,外商直接投资在一定程度上促进了京津冀技术的进步,与“污染天堂”和“污染避难所”假说的关联性并不显著。

4 结论与建议

厘清雾霾污染的空间交互特征,从空间计量角度剖析雾霾污染与其影响因素之间的关联性,是破解城市群雾霾治理联防联控问题的实证深化。当前研究较少针对京津冀城市群雾霾污染的空间传输特征和重心转移进行系统研究,本研究在已有研究的基础上,利用探索性空间数据分析法和标准偏差椭圆SDE方法,分析京津冀13个城市雾霾污染的空间联动特征和空间重心转移曲线,运用空间滞后模型,从经济、产业、城镇化、人口以及对外开放等视角探讨了京津冀雾霾污染的空间关联性。研究结论如下:①京津冀雾霾污染在区域范围以及不同城市之间在空间上存在动态联动效应,具有显著的空间集聚特征和空间异质性,其中,石家庄、唐山、廊坊、衡水、沧州、邢台等城市呈现显著的高-高集聚特征,北京、张家口、承德和秦皇岛等城市呈现显著的低-低空间集聚特征。②京津冀雾霾污染重心,主要位于京津冀几何重心的南部方向,说明京津冀南部地区的雾霾污染较为严重,雾霾污染重心转移大致可分为两个阶段,分别为1998—2003年重心向西向南方向转移以及2013—2018年重心向西部方向转移。③京津冀雾霾污染具有显著的空间溢出效应,经济增长、城镇化发展、产业结构、人口密度等均对京津冀雾霾污染产生正向影响,其反馈

表2 空间效应模型测算结果

自变量	空间滞后模型(SLM)		空间误差模型(SEM)	
	固定效应	随机效应	固定效应	随机效应
GDP	0.503***	0.511***	0.287***	0.279***
URB	0.834***	0.827***	0.821***	0.813***
P	0.167**	0.154**	0.281**	0.249**
IND	0.613***	0.608***	0.456***	0.471***
FDI	-0.028**	-0.026**	-0.049*	-0.050*
ρ	0.634*** (11.02)	0.625*** (11.23)		
λ			0.669*** (12.33)	0.670*** (11.21)
AIC	-443.321	-357.982	-436.456	-349.898
BIC	-412.453	-324.889	-405.781	-312.102
Log-likelihood	269.231	228.122	260.363	220.095

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平检验

效应在一定程度上会对京津冀各地雾霾污染产生促增作用，外商直接投资对雾霾污染产生负向影响，说明外商直接投资没有加重京津冀的雾霾污染。

根据研究结论，本文提出如下建议：

(1) 深化区域雾霾污染协同治理机制。雾霾污染在区域间以及区域内不同城市间存在空间动态交互作用，雾霾污染具有显著的空间溢出效应，因此，需不断深化区域雾霾污染协同治理联防联控。京津冀、长三角和珠三角等地区已经初步建立了区域大气污染防治联防联控机制，但是雾霾污染协同治理大都属于“任务型驱动”协同。一方面，从具体法律和条款来看，雾霾污染协同治理相关规定多属于原则性的规定。就京津冀区域协同而言，京津冀雾霾协同治理主要由京津冀及周边地区大气污染防治协作小组开展工作；2018年7月，协作小组调整为京津冀及周边地区大气污染防治领导小组，在京津冀区域雾霾污染联防联控方面发挥了更大的作用；2018年9月，生态环境部将大气环境管理司更名为大气环境司，同时加挂了京津冀及周边地区大气环境管理局的牌子，成为我国首个跨区域大气污染防治机构。未来，京津冀大气污染协同治理还需在立法制度、标准规范、资金筹集配置等进行整体设计。另一方面，雾霾污染协同治理已经建立了一系列的协同机制，包括信息共享机制、监测预警会商机制、联合执法机制等，但尚未重视和解决的问题还包括利益协同机制。尤其是京津冀三地雾霾治理存在较大的利益差异性和发展不均衡性，北京、天津、河北以及河北各城市在协同治理过程中成本和收益存在较大的不平衡。在京津冀三地协同治理成本收益不平衡的情况下，构建互惠互利的利益协同机制尤为重要，建议进一步建立雾霾污染的生态补偿机制，加大区域均衡的财政转移支付力度，通过利益补偿形式将不同地区雾霾污染治理责任与成本相分离，逐渐形成区域雾霾治理的利益协同，同时建立跨区域大气排污权交易制度，通过市场机制推动区域减排。

(2) 粗放式的工业发展模式和低效扩张的城镇化发展模式是雾霾污染的重要原因。一方面，京津冀和长三角地区产业重构问题突出，导致资源错配和不可持续发展。因此，应从区域协调全局出发，统筹优化区域产业布局，制定负面清单，立足不同城市资源环境禀赋，拉长产业链，推动创新链，提升价值链，实现区域产业资源的高效配置，通过创新驱动与产业优化升级摆脱城市经济发展的传统“路径依赖”。另一方面，城镇化高效集约和绿色发展势在必行，城镇化

转型发展要以绿色发展理念为引领，推动集约紧凑型城市的建设，以合理的布局带动城市产业的优化转型和资源能源的高效利用，通过对城市空间资源的高效科学的利用，实现城市经济发展的空间溢出。

(3) 借助空间管控优化生产、生活、生态空间布局，降低雾霾污染。区域协调发展战略是新时代我国建设现代经济体系的重大战略部署之一，2018年底，中共中央、国务院发布了《关于建立更加有效的区域协调发展新机制的意见》，提出要调整区域经济结构和空间结构。跨区空间管控是空间规划管理的重要手段，空间管控通过综合考虑经济发展、生态环境和自然资源等因素，对国土空间进行分区管控，通过空间管控可有效改善城市的空间、产业、生态、人口等布局，优化城市可持续发展。因此，要实现雾霾污染防治，需要将生态环境空间管控融入城市空间规划体系中，从空间规划源头、宏观战略层面对区域发展的布局、结构、规模等进行优化调整，变过度开发为适度开发，变无序开发为有序开发，变短期开发为持久开发，以生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线作为区域和城市空间规划的底线约束，在空间规划实施过程中落实环境管控和风险防范的要求，将环境功能定位和生态环境风险防范的目标融入空间规划，从而实现区域范围内的协同可持续发展。

参考文献

- [1] 孙华臣, 卢华. 中东部地区雾霾天气的成因及对策 [J]. 宏观经济原理, 2013(6): 48-50.
- [2] 任保平, 宋文月. 我国城市雾霾天气形成与治理的经济机制探讨 [J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2014, 44(2): 77-84.
- [3] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 跨区域传输特征数值模拟研究 [J]. 中国环境科学, 2016, 34(6): 1361-1368.
- [4] 张秀芝. 哈尔滨市典型街谷空间形态对 $PM_{2.5}$ 扩散影响的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [5] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制 $PM_{2.5}$ 污染的健康效益评估 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 166-174.
- [6] 高会旺, 陈金玲, 陈静. 中国城市空气污染指数的区域分布特征 [J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(10): 25-34.
- [7] 李斌, 李拓. 中国空气污染库兹涅茨曲线的实证研究 - 基于动态面板系统 GMM 与门限模型检验 [J]. 经济问题, 2014(4): 17-22.
- [8] 陈诗一, 陈登科. 雾霾污染、政府治理与经济高质量发展 [J]. 经济研究, 2018(2): 20-34.
- [9] 王诺, 程蒙, 臧春鑫, 等. 成本 - 效果分析 / 成本 - 效益分析方法在雾霾治理研究中的应用 [J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(11): 85-88.
- [10] 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(9): 73-88.
- [11] 邵帅, 李欣, 曹建华. 中国的城市化推进与雾霾治理 [J]. 经济研

- 究, 2019(2): 148-165.
- [12] 王琰. 多维度城市化对空气质量的影响: 基于中国城市数据的实证检验 [J]. 东南大学学报, 2017, 19(4): 100-110.
- [13] 童玉芬, 王莹莹. 中国城市人口与雾霾: 相互作用机制路径分析 [J]. 北京社会科学, 2014(5): 4-10.
- [14] 张英奎, 刘思懿, 曾雅婷, 等. 雾霾污染、经营绩效与企业环境社会责任 [J]. 中国环境管理, 2019, 11(4): 46-51.
- [15] 裴辉儒, 彭依文. 外商投资企业 PM_{10.5} 污染的空间计量分析——基于 1999-2016 年省际数据检验 [J]. 陕西师范大学学报 (哲学社会科学版), 2018, 47(6): 57-67.
- [16] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 [J]. 环境科学, 2014, 35(1): 1-8.
- [17] 庞润枝. 中国雾霾污染健康经济损失与治理路径研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2018.
- [18] 王自力, 何小钢. 中国雾霾集聚的空间动态及经济诱因 [J]. 广东财经大学学报, 2016, 31(4): 31-41.
- [19] 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.
- [20] 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 Differentiation and Dynamic Association of Haze Pollution in Urban Agglomeration: An Empirical Analysis Based on Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

WANG Huizhi^{1*}, DU Linwei², LV Jianhua³

(1.Tianjin Academy of Social Sciences, Tianjin 300191, China; 2.College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 3.Qingdao Research Academy of Environment Sciences, Qingdao, 266003)

Abstract: Joint prevention and control is an important means to solve the haze problem, and urban interaction and interaction of haze pollution is a key issue for the coordinated management of haze pollution control. This paper applied the Exploratory Spatial Data Analysis method and Standard Deviation Ellipse method to analysis the spatial correlation characteristics and the transfer trajectory of spatial center of gravity of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. The spatial spillover effect and driving factors of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei were calculated by using spatial econometric model. The results showed that the haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei has significant spatial agglomeration characteristics and heterogeneity. The spatial spillover effect of haze pollution is obvious. Economic growth, urbanization, industrial structure and population density all have a positive impact on haze pollution in the local region, while FDI has a negative impact on haze pollution. Finally, the countermeasures and suggestions of haze pollution control in urban agglomerations were put forward from the aspects of building a mechanism of coordinated treatment of regional pollution, efficient allocation of regional industrial resources and urban space control.

Keywords: haze pollution; spatial differentiation; dynamic association; urban agglomeration; Beijing-Tianjin-Hebei