

三次产业集聚对大气污染的差异化空间效应 ——基于京津冀及周边地区“2+26”城市的实证研究

胡珮琪, 蒋姝睿, 马 中

摘 要: 为提升京津冀及周边地区“2+26”城市的大气污染治理效率, 研究基于空间杜宾模型, 在该区域探究了三次产业集聚对城市大气污染的差异化影响。在 2007—2016 年间, 该区域大气污染具有显著的空间相关性。“2+26”城市一二三产业集聚水平逐渐提高的同时, 第一产业集聚对大气污染影响并不显著, 二三产业集聚水平对大气污染均具有显著的本地和空间溢出效应, 分别表现为正向和负向的影响。区域内各城市经济发展、对外开放、城市化和能源消费对大气污染的影响具有显著的本地效应和空间溢出效应。溢出效应的存在证明了打破区域行政边界、进行产业布局和污染治理的必要性与合理性。提出的政策建议包括多方位实现一体化发展、差异化产业发展策略、提升引进企业的环保门槛、合理规划城市化建设、经济手段和行政手段相结合治理大气污染等。

关键词: 产业集聚; 大气污染; 京津冀及周边地区; 空间杜宾模型

中图分类号: F124.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2021)03-0142-15

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2021.03.011

一、引 言

近年来, 大气污染已经成为中国环境治理的一个重大挑战。其中, 京津冀及周边地区是中国大气污染最严重的地区之一。2010 年, 国务院办公厅首次提出区域联防联控政策。2013 年, 国务院办公厅印发了《大气污染防治行动计划》(大气十条), 首次定义了京津冀及周边地区。为了提升大气污染治理效率, 2017 年环境保护部设定了大气污染传输通道城市, 包括北京和天津 2 个直辖市, 以及石家庄、唐山等其他 26 个京津冀及周边地区城市, 简称“2+26”城市。启动“2+26”城市政策以来, 该地区实施了严格的大气污染减排政策, 针对“散乱污”企业采取了一系列大气污染监管措施^[1]。强有力的政府监管使得大气污染问题得到缓解, 但也导致很多企业停业, 造成当地行业产值的损失^{[2](P11)}。2018 年, 国务院发布了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》, 将京津冀及周边地区划定为大气污染重点区域, 并进一步加强了京津冀及周边地区“2+26”城市的大气污染防治政策。同年, 京津冀及周边地区大气污染防治领导小组成立, 该地区大气污染联防联控协作机制得到完善。“2+26”城市政策的实施使得当地大气环境质量有所改善。2018 年全年京津冀及周边地区“2+26”城市 PM_{2.5} 的年均浓度值为 60 μg/m³, 同比下降 11.8%。然而, “2+26”城市的大气环境

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“北京市农村地区‘煤改电’政策成本分析”(20XNH042)

作者简介: 胡珮琪, 中国人民大学环境学院博士研究生(北京 100872); 蒋姝睿(通讯作者), 中国人民大学环境学院博士研究生, jiangshurui@ruc.edu.cn; 马中, 经济学博士, 中国人民大学环境学院教授、博士生导师

质量仍然低于全国平均水平。2018年, 该区域 $PM_{2.5}$ 的年均浓度值约为全国地级市平均水平的 1.54 倍。同年, 该区域优良天数平均占比仅为 50.5%, 远远低于全国的 79.3%。不断严格的大气环境治理政策和产业发展之间的矛盾日益凸显, 如何在优化产业结构与保护大气环境之间达到平衡成为政府亟待解决的首要问题。

按国民经济部门划分的三次产业从不同方面对区域雾霾污染造成影响。研究发现, 第一产业中的秸秆燃烧、化肥使用和畜禽养殖均是雾霾污染的重要排放源。在农作物秸秆燃烧过程中, 一方面将直接排放大量的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 等一次颗粒物, 产生雾霾污染^[3]; 另一方面其排放的其他一次污染物, 如二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x) 和可挥发性有机物 (VOCs) 等, 通过化学反应最终生成大量气溶胶和 $PM_{2.5}$ 等二次颗粒物, 进一步促进了雾霾污染的发生^[4]。第二产业中, 雾霾污染的主要来源是工业排放和建筑扬尘。研究证实工业排放不仅会产生大量一次颗粒物, 还会由于其他常规污染物在空气中的相互反应生成二次污染物, 进一步造成雾霾污染^[5]。建筑扬尘排放的颗粒物是雾霾污染的另一个主要的工业来源^[6]。此外, 第三产业中的交通运输也是造成雾霾天气的一个重要原因^[7]。研究发现, 机动车尾气排放的一次颗粒物以及 NO_x 和碳氢化合物 (CH_x) 在空气中反应后生成的二次颗粒物均是区域 $PM_{2.5}$ 的重要来源^[8]。目前, 产业集聚是产业结构优化升级的重要任务之一。随着我国经济规模不断扩大, 对于地区产业集聚化、现代化水平都提出了新的要求。2020年7月, 工业和信息化部印发了《京津冀及周边地区工业资源综合利用产业协同转型提升计划(2020—2022年)》, 明确指出要提升京津冀及周边地区工业产业集中度, 到2022年建设形成30个特色鲜明的产业集聚区。对于一二三产业来说, 产业集聚可能通过资金、技术和人力的集中化、规模化, 优化排放效率, 降低环境污染^[9]; 也可能会在当地造成资源和能源的过度消耗, 导致环境的负外部性^[10]。国民经济三次产业集聚对雾霾污染的影响是未知的。在环境问题仍然紧迫的形势背景下, 地区各产业的集聚对区域环境质量是否会造成负面影响, 是一个值得探究的话题。分析相关地区产业集聚的环境影响, 特别是不同产业集聚水平的差异化影响, 可以为未来政策制定提供理论参考和政策依据, 具有重要的现实意义。

为此, 本研究基于空间杜宾模型 (Spatial Durbin Model, SDM), 利用 2007—2016 年京津冀及周边地区“2+26”城市层面数据, 探究一二三产业集聚水平和大气污染之间的关系。通过分解出该区域产业集聚对大气污染的本地效应和空间溢出效应, 从空间经济学的角度探讨了打破行政边界解决区域经济与污染之间平衡问题的必要性, 并针对不同产业集聚对大气污染的效应提出了差异化的发展策略与政策建议。与以往研究相比, 本文的贡献在于: (1) 研究对象上, 细分了国民经济三次产业的集聚对大气污染的差异化影响及其空间溢出效应, 同时考虑了本地和周边城市的经济发展、对外开放、城市化、能源消费和科技进步等相关因素对城市大气污染的影响, 且运用空间计量模型以更准确地反映研究区域产业与污染的动态关联, 也更符合跨区域角度联防联控的决策逻辑。(2) 研究空间尺度上, 在既往文献多从省级层面探讨产业集聚空间效应的基础上, 将空间尺度进一步聚焦至地级市层面, 使得研究在以城市为大气污染主体控制单元的政策背景下更为精准。(3) 研究范围上, 在现有研究产业集聚的文献中, 尚未有文献涉及京津冀及周边地区“2+26”城市的区域研究。本研究着眼于“2+26”城市范围, 拓展了相关文献的实证研究范围, 也可以为现阶段政府区域大气污染治理提供经验参考。

二、文献综述

目前, 产业集聚会对环境污染产生何种影响在学术界存在争议。一些学者认为产业集聚通过规模效应, 集中提升资源利用的效率, 可以获得地区环境质量的改善^[9]。杨仁发利用门槛面板回归方

法,证明我国省域产业集聚水平高于门槛值时,将有利于改善环境污染^[11]。蔡海亚等验证了中国生产性服务业与制造业协同集聚对雾霾污染的影响,证实产业协同集聚的提升有助于抑制雾霾污染^[12]。另一些学者指出,产业集聚过程中的扩张和资源消耗会加剧区域的环境污染^[13]。De Leeuw等认为工业产业集聚的规模化是加剧大气污染的重要因素^[14]。袁华锡等发现,基于外商直接投资视角时,产业集聚提高单位百分点将增加 0.428% 的人均二氧化硫排放量、1.381% 的人均工业废水中的化学需氧量以及 0.240% 的人均二氧化碳排放量^[15]。还有一些学者认为,产业集聚和环境污染之间存在更为复杂的曲线关系,而非简单的线性关系^[16]。刘宁宁等从空间溢出视角,证明 2000—2015 年中国省域的污染密集型产业集聚和环境污染之间存在倒 U 型曲线关系^[17]。李小帆等验证了中国 2006—2016 年各省制造业产业集聚对碳排放存在双门槛效应,且呈现倒 U 型的非线性关系^[18]。而在探究产业集聚与大气污染之间复杂的非线性关系时,学者们大多仅从单个产业集聚的角度出发,以工业或服务业产业集聚作为衡量产业集聚的指标进行分析^[19]。王素凤等利用工业集聚作为门槛变量,分析工业集聚及其与城镇化耦合效应对污染排放的影响,发现工业集聚与环境污染之间满足倒 U 型曲线关系,而工业集聚与城镇化的耦合效应显著降低了环境污染水平^[20]。谢荣辉等区分了相对专业化集聚和相对多样化集聚对城市大气污染的影响,但其专业化和多样化是仅针对单个国民经济产业进行的区分^[21]。

此外,大气污染是一个跨界污染问题,区域之间往往会存在相互作用关系,面板数据研究无法探讨大气污染的溢出效应^[22],学者们开始将空间因素纳入产业集聚环境效应的研究^{[9][17]}。相较于其他空间模型,空间杜宾模型(SDM)通过同时引入自变量和因变量的空间滞后项来衡量区域内的空间溢出,适合分析区域内个体之间的相互影响^{[23](P46)}。钟娟等在对 210 个城市构建产业集聚、开放经济对污染减排的空间杜宾模型时发现,产业集聚能够促进污染减排,且具有显著空间效应^[24]。但是目前运用 SDM 分析产业集聚对环境污染溢出影响的研究多集中在省级层面。修国义等基于中国省级面板的空间杜宾模型分析,发现产业集聚与人口规模的长期相互作用可抑制雾霾污染^[25]。

由上可知,国内外有关产业集聚对环境污染影响的研究,大部分以工业或服务业产业集聚为单一研究对象,而且有关产业集聚与环境污染之间的关系,学术界始终没有得出一致的结论,对产业集聚的分析也较少考虑不同产业集聚的影响差异,缺乏对区域国民经济三次产业的统筹规划。此外,在利用空间计量分析空间溢出效应的产业集聚研究中,现有文献的研究尺度多集中在省级层面,聚焦地级市层面的相关研究较少。京津冀及周边地区“2+26”城市作为国家重点实施大气污染防治的政策区域,与之相关的研究却仍较为缺乏。基于既往文献中存在的污染溢出效应,本研究从空间经济学角度,利用 2007—2016 年“2+26”城市区域的地级市层面数据,进一步对产业集聚按照国民经济三次产业加以划分,构建空间计量模型来评估该区域一二三产业集聚对大气污染的差异化影响,以期探究经济和环境的协调发展模式,拓展相关领域实证研究,为区域产业发展和大气污染治理提供精准化、因地制宜的决策支持。

三、模型方法与数据

(一) 模型设计

1. 产业集聚水平的计算。区位熵可以消除地区之间的规模差异,相较于其他衡量指标可以更加真实地反映地理要素的空间分布。结合既往文献经验,研究采用区位熵作为衡量产业集聚水平的指标^{[11][26]},计算公式如下:

$$Air = \frac{e_{ir} / \sum_i e_{ir}}{\sum_r e_{ir} / \sum_i \sum_r e_{ir}} \quad (1)$$

其中, A_{ir} 表示 i 地区第 r 产业的区位熵, e_{ir} 表示 i 地区第 r 产业增加值。本研究选取京津冀及周边地区“2+26”政策范围内各地级市的第一、二、三产业增加值分别计算第一、二、三产业的区位熵, 用以衡量各城市产业集聚水平, 区位熵越高表示该产业在当地的集聚水平越高。

2. Moran' s I 指数。为了更加准确地判断研究区域是否具有空间研究价值, 首先应从经济学角度讨论京津冀及周边地区“2+26”城市大气污染是否具有空间效应。Moran' s I 指数被广泛应用于空间经济学, 以计算在空间上相互邻近的区域属性值的关联程度, 因此研究采用 Moran' s I 指数来度量“2+26”城市大气污染的空间相关性。Moran' s I 指数计算公式为:

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

其中, n 代表所有观测单元的个数; ω_{ij} 代表空间权重; x_i 和 x_j 分别代表观测单元 i 和 j 的属性值; $\bar{x}$ 代表观测单元属性值的平均值; S^2 代表观测单元属性值的方差。Moran' s I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$ 。当 $I \in [-1, 0)$ 时, 即表示观测区域的邻近单元之间呈现显著空间负相关; 当 $I \in (0, 1]$ 时, 即邻近单元之间为空间正相关; 当 $I=0$ 时, 表示观测区域没有显著空间自相关关系。

3. 计量模型的设定。考虑到产业集聚与大气污染之间的复杂关系, 二者之间并不一定是简单的线性关系^{[16][19]}。因此, 本研究在模型设计中引入产业集聚水平的平方项, 探究产业集聚与大气污染的非线性关系, 以期更精准地刻画不同产业集聚水平对区域大气污染的动态影响。为了控制不同区域间的发展差异, 研究也应选取一定的控制变量。参考既往文献^{[15][27][28]}, 本研究加入经济发展水平、对外开放水平、城市化水平、能源消费水平和科技进步水平等五个控制变量。此外, 基于 Grossman 等提出的环境库兹涅兹曲线 (EKC) 假说模型^{[29](P9)}, 并结合已有文献中关于 EKC 呈现二次函数或三次函数形式的实证结论^[30], 引入经济发展水平变量的平方项和三次方项。为消除不同变量之间可能出现的量纲差异, 对所有变量进行对数化形式处理, 最终模型设计如下:

$$\ln P_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln FA_{it} + \beta_2 (\ln FA_{it})^2 + \beta_3 \ln SA_{it} + \beta_4 (\ln SA_{it})^2 + \beta_5 \ln TA_{it} + \beta_6 (\ln TA_{it})^2 + \beta_7 \ln G_{it} + \beta_8 (\ln G_{it})^2 + \beta_9 (\ln G_{it})^3 + \beta_{10} \ln E_{it} + \beta_{11} \ln UR_{it} + \beta_{12} \ln TECH_{it} + \beta_{13} \ln F_{it} + \eta_i + \delta_t + \epsilon_{it} \quad (3)$$

其中, P_{it} 表征污染水平, FA_{it} 表征第一产业集聚水平, SA_{it} 表征第二产业集聚水平, TA_{it} 表征第三产业集聚水平, G_{it} 代表经济发展水平, E_{it} 代表能源消费水平, UR_{it} 代表城市化水平, $TECH_{it}$ 代表科技进步水平, F_{it} 代表对外开放水平, β 是解释变量参数项, β_0 是常数项, η_i 是个体固定效应, δ_t 是时间固定效应, ϵ_{it} 是回归误差项。

基于大气污染物的扩散性和外溢性, 有必要将空间溢出效应纳入模型。研究通过结合 SDM, 构建了产业集聚水平与大气污染关系的空间计量模型。SDM 的一般形式如下:

$$y = \rho W_y + X\beta + WX\theta + \epsilon \quad (4)$$

其中, y 表征因变量, 即公式 (3) 中的污染水平, X 表征自变量, 即公式 (3) 采用的各解释变量。 W 是 $N \times N$ 的空间权重矩阵, 用于反映观测样本单元之间的空间关联。 W_y 表征因变量的空间滞后项, WX 是自变量的空间滞后项。 ϵ 是误差项。 ρ 、 β 、 θ 是变量参数。本研究采用考虑空间距离的地理距离矩阵 W_g , 即:

$$W_g = w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{d_{ij}} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (5)$$

其中, d_{ij} 是城市间的地理距离, 通过城市经纬度计算。地理权重矩阵需进一步进行矩阵标准化处理。

在使用 SDM 分析该问题时, 必须保证该模型满足 $\theta \neq 0$ 且 $\theta + \beta\rho \neq 0$ 这一假设条件。当 $\theta = 0$ 时, 式 (4) 可以被简化为空间自回归模型 (Spatial Autoregressive Model, SAR); 当 $\theta + \beta\rho = 0$ 时, 式 (4) 可以被简化为空间误差模型 (Spatial Error Model, SEM); 当 $\theta = 0$ 且 $\theta + \beta\rho = 0$ 时, 式 (4) 可以被简化为不考虑空间效应的传统面板模型, 此时与式 (3) 等价。验证空间杜宾适用性的具体检验包括 LM 检验、固定效应与随机效应检验、Wald 检验和 LR 检验等。

值得注意的是, 解释变量空间滞后项的内生性问题, 会导致最小二乘法 (OLS) 在该空间回归模型中不再适用, 而极大似然估计依然适用^{[31](P46)}。此外, Lesage 等提出 SDM 估计的解释变量系数缺乏准确性^{[23](P34)}, 这是由于 SDM 中存在空间效应, 仅关注解释变量的系数无法得到准确边际效应, 继而得出错误的估计结论。本研究遵循了 Elhorst 的解释, 并且改写 SDM 模型为如下形式^[32]:

$$y_{it} = (I - \rho W)^{-1} (X_{it}\beta + WX_{it}\theta + \eta_i + \delta_t + \epsilon_{it}) \quad (6)$$

其中 I 表示单位矩阵, 本研究进一步通过求解 y_i 关于 X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的偏导矩阵, 将空间溢出效应分解为直接效应和间接效应。直接效应和间接效应的加总为总效应。

(二) 样本和数据

本文以京津冀及周边地区“2+26”城市^①为研究样本。“2+26”城市是指《京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案》中确定的大气污染传输通道城市, 涵盖了北京、天津、河北、河南、山东和山西 6 个省市的 28 个城市。

选取京津冀及周边地区“2+26”城市 2007—2016 年的面板数据, 并对部分数据进行了必要的数据处理, 各变量定义和描述性统计如表 1 所示。各变量间数据量级存在差异, 证明了对模型中变量进行对数化处理的必要性。为了剔除价格因素的影响, 以 2007 年为基期, 运用相应的指数, 对 GDP 进行了不变价处理。此外, 本研究采用全社会用电量衡量能源消费水平主要基于以下考虑: 一是基于文献经验, 全社会用电量和城市能源消费具有高度相关性, 将全社会用电量作为衡量能源消费水平的指标已被学者们广泛使用; 二是考虑到该指标精确性高, 数据来源十分可靠, 有利于确保解释结果的精准性^{[33][34]}。年均 $PM_{2.5}$ 浓度数据来源于哥伦比亚大学社会经济数据和应用中心发布

表 1 研究区域选取变量及其描述性统计

变量表征	符号	定义	单位	均值	标准差	最小值	最大值
大气污染水平	P	年均 $PM_{2.5}$ 浓度	$\mu g/m^3$	59.566	15.453	23.365	86.732
第一产业集聚水平	FA	第一产业区位熵	/	1.447	0.813	0.093	3.471
第二产业集聚水平	SA	第二产业区位熵	/	1.136	0.187	0.466	1.597
第三产业集聚水平	TA	第三产业区位熵	/	0.801	0.230	0.395	1.725
经济发展水平	G	国民生产总值 (GDP)	亿元	2710.219	3100.648	273.240	19088.530
能源消费水平	E	全社会用电量	亿千瓦时	264.689	215.196	29.618	1126.200
城市化水平	UR	人口城镇化率	/	50.104	15.610	21.727	86.510
科技进步水平	$TECH$	发明专利授权量	件	1020	4039	3	41396
对外开放水平	F	外商直接投资和 GDP 的比值	/	0.019	0.016	0.001	0.114

① 其中“2+26”城市包括: 北京市、天津市、石家庄市、唐山市、廊坊市、保定市、沧州市、衡水市、邢台市、邯郸市、太原市、阳泉市、长治市、晋城市、济南市、淄博市、济宁市、德州市、聊城市、滨州市、菏泽市、郑州市、开封市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、濮阳市。

的基于卫星监测的全球栅格数据, 人口城镇化率和全社会用电量来源于各省(地级市)统计年鉴(2008—2017), 发明专利授权量数据来源于 CNRDS 中国研究数据服务平台, 其余数据均来源于《中国城市统计年鉴》(2008—2017)。

四、结果与分析

(一) 京津冀及周边地区“2+26”城市产业集聚分析

根据对京津冀及周边地区“2+26”城市第一、二、三产业区位熵的计算, 得到各城市在2007—2016年国民经济三大产业集聚水平^①, 并计算区域各年均值。区域整体的第一、二、三产业区位熵均值在2007—2016年间有所增强, 表明京津冀及周边地区“2+26”城市三次产业的整体集聚水平得到提升(如图1所示)。

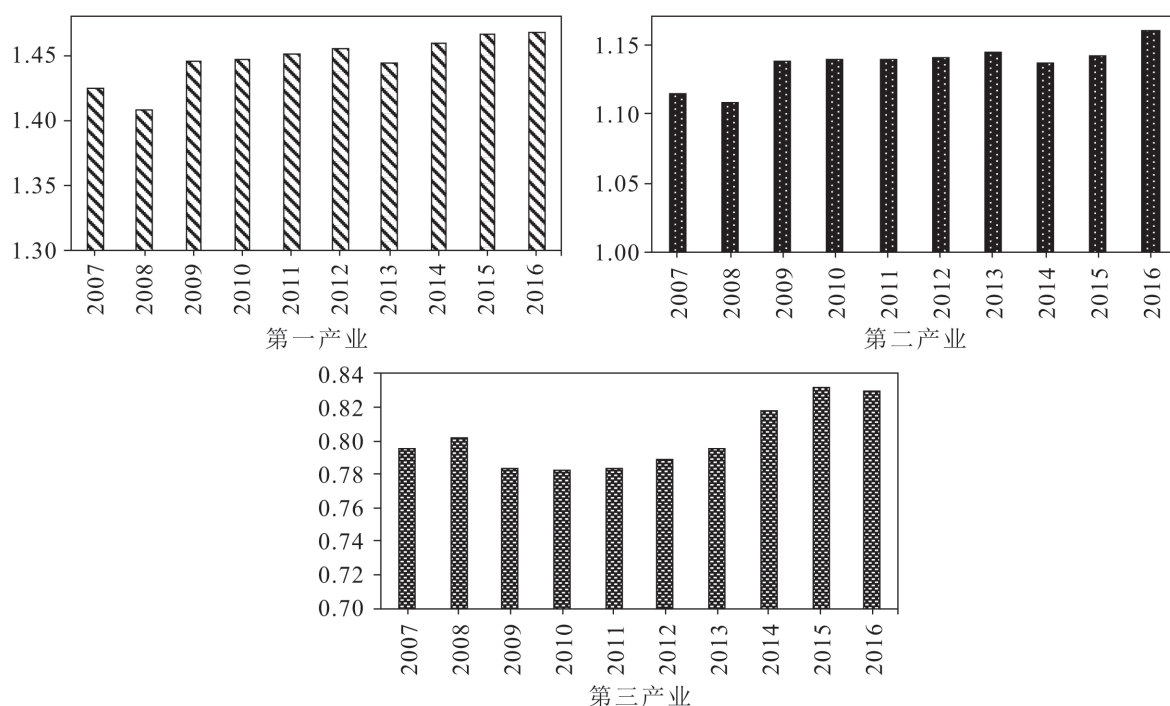


图1 2007—2016年京津冀及周边地区“2+26”城市三次产业集聚水平区域均值

表2展示了相较2007年和2016年, 产业集聚水平有所上升(下降)的城市。可以看出, 城市之间产业集聚水平的年际变化差异明显, 不同产业之间各城市产业集聚水平的变化情况也有所不同。值得注意的是, 2016年北京市的三次产业集聚水平相较于2007年均有所下降, 这与北京市近年来强调疏解非首都功能, 关停、转移和调整北京整体产业链的相关政策相符合。

此外, 区域内部各城市第一、二、三产业集聚水平存在明显差异。对各城市2007—2016年的三次产业集聚水平计算十年间均值, 发现一、二、三产业平均集聚水平最高的城市分别为开封市(3.181)、濮阳市(1.460)和北京市(1.636), 十年间平均集聚水平最低的城市分别为北京市(0.126)、北京市(0.489)和濮阳市(0.458), 最高值与最低值之间存在显著差距。同一城市不同产业之间的集聚水平也存在显著区别。以北京市为例, 其第三产业在区域内具有最高的平均集聚水

^① 限于篇幅, 未展示全部结果, 如有需要可联系作者。

表2 产业集聚水平上升（下降）的城市名单

产业	产业集聚水平上升城市	产业集聚水平下降城市
第一产业	唐山、邯郸、邢台、保定、沧州、衡水、太原、阳泉、长治、晋城、济南、淄博、济宁、德州、滨州、菏泽、安阳、鹤壁、新乡、焦作	北京、天津、石家庄、廊坊、聊城、郑州、开封、濮阳
第二产业	石家庄、唐山、邯郸、邢台、保定、沧州、衡水、长治、晋城、德州、聊城、滨州、郑州、开封、鹤壁、新乡、焦作、濮阳	北京、天津、廊坊、太原、阳泉、济南、淄博、济宁、菏泽、安阳
第三产业	天津、沧州、廊坊、太原、阳泉、长治、晋城、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽、开封、安阳、鹤壁、焦作	北京、石家庄、唐山、邯郸、邢台、保定、衡水、济南、郑州、新乡、濮阳

平，但第一产业和第二产业平均集聚水平都在区域内处于最低水平，这主要是由于北京市以发展第三产业为主，第一、二产业所占比重较低，因此也难以形成规模效应。再以濮阳市为例，其第二产业表现出最高的产业集聚水平，第一产业集聚水平较强，但第三产业集聚水平却处于区域最低，说明濮阳市的产业集聚集中在第一、二产业，而第三产业的集约化、规模化尚未形成。省会城市或直辖市的平均集聚水平更容易表现出第一产业与第二产业较低、第三产业较高的特征。例如第一产业十年间平均集聚水平排名后五位的城市依次为北京、天津、太原、阳泉和郑州，其中4个为省会城市；第二产业十年间平均集聚水平排名后五位的城市依次为北京、石家庄、太原、济南和开封，均为省会城市；第三产业平均集聚水平排名前五位的城市依次为北京、天津、太原、济南和郑州，均为省会城市。

（二）空间相关性

全局 Moran' s I 指数计算结果如表3所示。在地理距离权重矩阵下，大气污染变量的 Moran' s I 指数均大于0，且通过了显著性检验，体现了京津冀及周边地区“2+26”城市的污染存在空间聚集效应，进而证明了构建空间计量模型的必要性。在2007—2016年间，大气污染的 Moran' s I 指数呈现波动上升趋势，说明在这10年间区域内部污染水平的空间自相关有所增强。

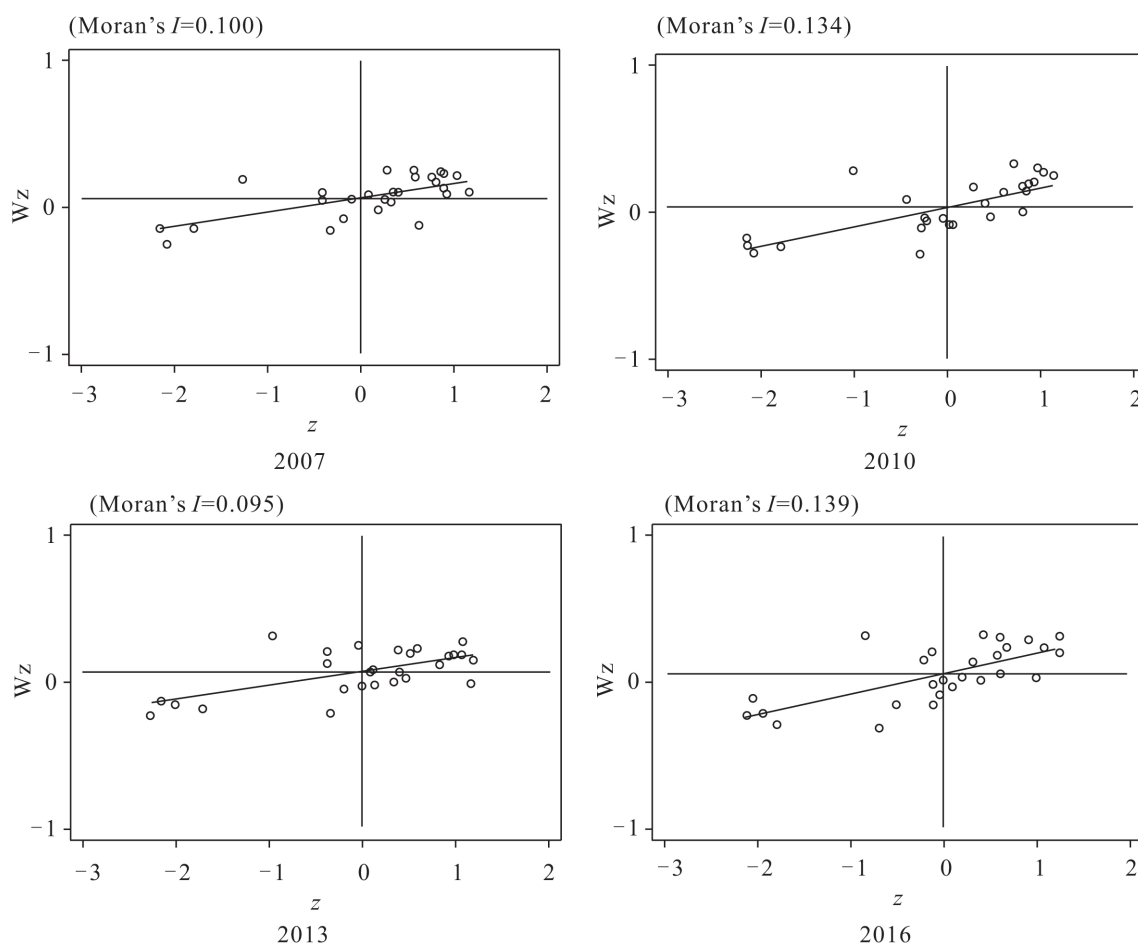
表3 2007—2016年大气污染的 Moran' s I 指数

变量	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
P	0.100***	0.151***	0.140***	0.134***	0.125***	0.126***	0.095***	0.120***	0.140***	0.139***

注：*** $p < 0.01$ 、** $p < 0.05$ 、* $p < 0.1$ 为显著性水平。

进一步考察区域内部各城市大气污染空间自相关的差异。研究采用 Moran' s I 指数散点图测量局部空间自相关^[35]。第一象限和第四象限分别是高-高聚集型和低-低聚集型城市，意味着大气污染较高（低）的城市，其周边的大气污染也较高（低）；第二象限和第三象限分别是低-高聚集型和高-低聚集型城市，表示大气污染较高（低）的城市，其周边的大气污染反而较低（高）。本研究以2007年、2010年、2013年和2016年数据为例，绘制了 Moran' s I 指数散点图（如图2所示）。各年份中，大部分城市的大气污染指标都位于图中第一或第三象限，表明大部分城市都是高-高聚集型城市和低-低聚集型城市。大气污染较高（低）的城市在空间上更易聚集，区域内大气污染的空间差异较小，城市之间具有较强的空间聚集效应。

为考察区域内部城市大气污染变量空间自相关的年际变化，依据大气污染变量 Moran' s I 指数散点图，进一步分析2007—2016年间对区域大气污染影响较为显著的高-高聚集型城市。尽管全局 Moran' s I 指数证明京津冀及周边地区“2+26”城市整体的空间聚集性在2007—2016年间有

图2 2007、2010、2013和2016年大气污染指标的 Moran' s I 指数的散点图

所增强, 各城市的聚集特性保持相对稳定, 大气污染变量的高-高聚集型城市在不同年份之间稍有变动。其中, 始终为高-高聚集型的城市包括滨州、沧州、德州、菏泽、衡水、济南、济宁、聊城、天津等, 说明这些城市的高污染往往也伴随周边城市的高污染问题。变动的城市包括安阳、保定、鹤壁、开封、濮阳、唐山、淄博等, 表明这些城市污染水平的空间聚集特性还不够稳定。

(三) 产业集聚与大气污染的空间计量分析

1. SDM 适用性检验。为了避免空间面板模型的伪回归, 确保估计结果的有效性, 首先依据 Levin 等提出的 LLC 检验^[36], 进行面板数据的平稳性检验。所有变量均在 1% 的水平上拒绝原假设, 说明数据平稳。为确保空间计量模型的适用性, 依据混合最小二乘法 (POLS) 的回归结果进行空间效应诊断, 检验结果如表 4 所示。在地理权重矩阵下, 面板模型的 Moran' s I 指数通过了 1% 水平上的显著性检验, 再次证明构建的模型存在显著的空间效应, 构建空间面板模型是必要的。表征 LM 检验结果的四个相关统计量均通过了显著性检验, 说明 SAR 与 SEM 模型同时适用, 可以进一步考虑 SDM 在本研究中的适用性。Hausman 检验结果通过了 1% 水平的显著性检验。此外, 由于选择的样本并非随机而是基于政府政策, 样本城市集中在京津冀及周边地区, 其结果对于其他地区的推广性较难验证。基于这两点, 本研究采用固定效应的空间面板模型较为合理。Wald 检验与 LR 检验均通过了 1% 水平上的显著性检验, 表明 SDM 比 SEM 和 SAR 更加适用于研究设定的空间面板模型。此外, 时间固定效应和个体固定效应均通过了 1% 水平上的显著性检验, 因此本研

究采用个体、时间双固定效应，并依据 Lee 等的方法进行极大似然估计^[37]。

表 4 LM 检验、Wald 检验和 LR 检验的结果

lnP	检验结果	lnP	检验结果
Moran's I	10.546***	Hausman	88.07***
LM Error	92.588***	LM Lag	128.020***
Robust LM Error	5.274**	Robust LM Lag	40.706***
Wald: $\theta=0$	62.670***	Wald: $\theta+\beta\rho=0$	66.920***
LR-SEM	72.440***	LR-SAR	69.010***
LR-ind fixed	26.270***	LR-time fixed	612.590***

注：*** $p<0.01$ 、** $p<0.05$ 、* $p<0.1$ 为显著性水平。

2. 回归结果分析。考虑到 SDM 回归结果系数本身会存在偏误，再加上分析空间效应主要是为了区分本地和周边城市的不同影响，本研究将效应分解为总效应、直接效应、间接效应进行分析（如表 5 所示）。结果表明，系数 ρ 通过了 1% 水平上的显著性检验，表明区域内部空间溢出效应显著。

表 5 SDM 的回归结果情况

lnP	(3)	(4)	(5)
	直接效应	间接效应	总效应
lnFA	0.034 (0.073)	-0.496 (1.390)	-0.462 (1.450)
(lnFA) ²	-0.017 (0.031)	-0.619 (0.640)	-0.636 (0.666)
lnSA	-0.297* (0.156)	-7.538*** (2.945)	-7.835*** (3.049)
(lnSA) ²	2.244*** (0.510)	37.659*** (11.769)	39.903*** (12.249)
lnTA	-0.283 (0.217)	-7.929* (4.220)	-8.212* (4.394)
(lnTA) ²	-0.419** (0.208)	-8.872** (4.373)	-9.291** (4.561)
lnG	-40.952*** (10.488)	-736.594*** (234.098)	-777.546*** (244.137)
(lnG) ²	2.466*** (0.631)	44.007*** (14.097)	46.473*** (14.701)
(lnG) ³	-0.049*** (0.013)	-0.876*** (0.282)	-0.926*** (0.294)
lnE	0.059* (0.031)	1.601** (0.636)	1.660** (0.663)
lnUR	0.063* (0.034)	1.068* (0.631)	1.131* (0.656)
lnTECH	-0.007 (0.011)	-0.091 (0.130)	-0.098 (0.136)
lnF	0.033*** (0.008)	-0.661*** (0.151)	0.694*** (0.157)
ρ		0.793*** (0.046)	
组内 R^2		0.715	

注：*** $p<0.01$ 、** $p<0.05$ 、* $p<0.1$ 为显著性水平。

由于采用固定效应模型, 因此主要考察组内 R^2 大小。模型的拟合优度达到 0.715, 解释力度较高。

总效应考察的是区域整体情况。主要解释变量中, 结合显著性检验和系数符号发现, 各城市的第一产业集聚水平对区域整体的大气污染水平并没有显著影响; 各城市第二产业集聚水平与区域整体大气污染水平之间存在正 U 型曲线关系; 各城市第三产业的集聚可以缓解区域整体大气污染情况。第一产业以农业为主, 该区域农业大气污染排放量较少, 因此第一产业的集聚并不会对区域大气污染产生显著效应。作为大气污染排放大户, 第二产业集聚在形成经济规模效应的同时, 也带来了污染的规模效应, 最终成为资源消耗与大气污染的主要原因之一。随着信息技术革命的发展, 现有的第三产业更倾向于“服务化”特征, 为经济发展注入新动力, 相较于工业产业更有利于绿色经济的发展。根据控制变量的显著性检验和系数符号, 各城市经济发展水平与区域整体大气污染水平呈现显著倒 N 型曲线关系, 符合环境 EKC 假设。区域大气环境质量会随着各城市对外开放水平、城镇化水平和能源消费水平的提高而不断恶化, 这主要是地方政府急于谋求地方发展所导致。在引进外资、城市化建设和能源消费过程中, 过低的企业准入门槛、过快的城市扩张、过密的城市建设和过量的化石能源开发利用, 都会导致大气污染水平的上升。科技进步水平未通过显著性检验, 说明该区域的科技进步并不会对大气污染造成显著影响, 与“2+26”城市的大气污染治理主要依靠政策驱动^[38], 而非技术驱动的现实情况相符。

直接效应考察的是本地效应, 即区域内某一城市当地的影响因素对该城市大气污染水平的影响效应。间接效应考察的是空间溢出效应, 即区域内周边城市的影响因素对某一城市大气污染水平的影响效应。主要解释变量的直接效应和间接效应回归结果显示, 第一产业集聚水平在该区域的本地效应和空间溢出效应均不显著; 本地及周边城市第二产业集聚水平和本地大气污染呈现正 U 型曲线关系, 即随着本地及周边城市第二产业集聚, 本地大气污染均将经历先有所缓解, 后不断加重两个阶段; 本地及周边城市第三产业集聚可以缓解本地城市的大气污染。依据控制变量的回归结果, 本地及周边城市的经济发展水平与本地城市大气污染之间呈现倒 N 型曲线关系; 本地及周边城市的对外开放水平越高、城镇化水平越高、能源消费水平越高, 本地大气污染越严重; 本地及周边城市的科技进步水平并不能显著影响本地大气污染水平。

3. 讨论。产业集聚的本地效应和空间溢出效应, 证明了区域内城市大气污染不仅受到本地产业集聚的影响, 还受到来自周边城市产业集聚的影响。这表明单独某个城市的大气污染治理成果很有可能因为其他城市的溢出效应而被抵消。京津冀及周边地区“2+26”政策区域内各城市在制定产业政策时, 主要是以行政区域为边界, 更多考虑自身的发展, 城市之间往往存在竞争关系, 使得仅针对单个城市制定的产业发展或大气污染减排政策缺乏对区域整体情况的统筹判断, 阻碍了跨区域的协作共赢。目前, 中央政府仅在京津冀地区发布了一体化的发展战略, 还应加快制定京津冀及周边地区“2+26”城市一体化发展政策。在环境治理方面, 2018 年 10 月京津冀及周边地区大气环境管理局正式挂牌, 成为我国首个跨区域大气污染防治机构, 但是, 仍需尽快建立集产业整合、经济发展和大气污染联合治理功能为一体的跨区域管理机构。

对于京津冀及周边地区“2+26”城市来说, 不同产业的集聚水平对大气污染水平产生的影响存在差异, 应制定差异化的产业发展策略。第一产业集聚对区域大气污染水平无显著影响。在国家精准扶贫、乡村振兴的发展战略下, 通过培育发展绿色、有机特色农业, 依托生态农业发展模式, 提升农业现代化、集约化水平, 优化农业种植养殖结构, 进一步带动新型环保产业的发展, 既可发

掘当地经济发展的新动力，也能有效保证区域大气环境质量，有助于城市在经济发展与环境保护之间寻求新的平衡点。第二产业集聚对区域大气污染水平呈现正 U 型曲线关系。随着京津冀及周边地区“2+26”城市的集聚水平不断上升，最终工业集聚将对大气污染产生促进作用。要坚决整治“散乱污”企业，淘汰落后产能，促进工业内部转型升级。尽管短期来看，严格的大气污染管控措施不可避免会对当地的工业发展产生影响，但从长期看，对“散乱污”企业进行合理监管，有利于突出环境绩效良好的企业的发展优势，在工业企业间形成良性竞争，为当地重污染产业带来结构调整的机会，有利于行业整体环保能力的提升，也更有利于发挥行业整体的规模效应，既促进环境改善，又实现第二产业的可持续发展。第三产业集聚有助于降低区域大气污染水平。现阶段，地方政府应引导市场，促进当地服务业集聚发展，助推产业结构优化升级。

对于各控制变量来说，第一，无论是直接效应还是间接效应，经济发展水平与大气污染水平之间都满足 EKC 假设，且呈现倒 N 型曲线。在大气污染水平随着经济发展上升的时期，京津冀及周边地区“2+26”城市政府大气治理势必会面临严峻压力，政府在这一阶段的工作重点应是将污染控制在一个可控范围内，尽可能减少对公众和环境的损害。随着区域内经济进一步发展至第二个拐点，产业结构调整合理，大气污染状况改善，政府治理压力也会随之减少，最终实现经济发展与大气环境保护的协调发展。其次，对外开放水平、城市化与能源消费水平对区域整体大气污染水平均呈现正向影响。这是因为过低的外资引进门槛、过急过快的城市发展以及不清洁的城市能源消费均会加重区域大气环境污染。地方政府应当警惕在外资引进、城市化和能源消费过程中所带来的环境污染问题。科技进步水平对区域城市大气污染影响并不显著。这与目前的大气污染治理仍是以政策作为主导有关，技术进步促进大气质量改善的驱动力不足。现阶段，仍应当整合资源，合理制定规划，继续发挥政策驱动优势。

4. 稳健性检验。空间计量模型中的重要元素之一是空间权重矩阵，不同的空间权重矩阵很可能对回归结果产生不同的影响^[15]。为确保回归结果的稳健性，加强研究的论证分析，通过替换空间权重矩阵进行稳健性检验。学者们通常采用的空间权重矩阵可总结为三种：二元邻接矩阵、地理距离矩阵和地理经济距离矩阵^{[30][39](P19)}。为检验结果的稳健性，本研究将地理权重矩阵分别替换为二元邻接矩阵和地理经济距离矩阵来进行空间计量回归，分别用 W_b 和 W_{ge} 进行表征。

$$W_b = w_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ 与 } j \text{ 相邻且 } i \neq j \\ 0 & i \text{ 与 } j \text{ 不相邻或 } i = j \end{cases}$$

$$W_{ge} = W_g \times \begin{bmatrix} \frac{AG_1}{\sum AG_i} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{AG_i}{\sum AG_i} \end{bmatrix}$$

其中， W_{ge} 中对角矩阵中的元素由 i 地区人均 GDP 年均值占有所有地区人均 GDP 年均值比重组成， AG_i 是区域 i 的人均 GDP， $\sum AG_i$ 是所有区域所有涉及年份人均 GDP 的均值。表 6 第（1）—（3）列和第（4）—（6）列分别为采用 W_b 和 W_{ge} 进行估计的直接效应、间接效应和总效应。回归结果显示，主要解释变量中，一二三产业集聚水平变量的显著性水平相较基准回归（如表 5 所示）略有变化，但对大气污染水平的影响与基准回归结果基本一致，表明研究检验结果是稳健的。

表 6 稳健性检验的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	W_b	W_b	W_b	W_{ge}	W_{ge}	W_{ge}
$\ln P$	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
$\ln FA$	-0.011 (0.064)	-0.126 (0.460)	-0.137 (0.516)	-0.017 (0.092)	-0.631 (1.975)	-0.614 (2.058)
$(\ln FA)^2$	-0.034 (0.026)	-0.152 (0.176)	-0.186 (0.197)	-0.004 (0.036)	-0.562 (0.726)	-0.566 (0.758)
$\ln SA$	-0.260* (0.151)	-0.874 (0.995)	-1.134 (1.115)	-0.175 (0.163)	-6.479* (3.315)	-6.655* (3.433)
$(\ln SA)^2$	1.191*** (0.317)	7.023*** (2.540)	8.214*** (2.829)	1.958*** (0.479)	27.833*** (10.695)	29.790*** (11.143)
$\ln TA$	-0.326 (0.203)	-2.303* (1.390)	-2.629* (1.568)	-0.380 (0.277)	-12.067** (5.959)	-12.447** (6.206)
$(\ln TA)^2$	-0.341* (0.187)	-2.698* (1.408)	-3.039* (1.583)	-0.468* (0.252)	-10.079* (5.437)	-10.548* (5.673)
$\ln G$	-24.350*** (5.552)	-171.412*** (42.194)	-195.762*** (47.230)	-49.920*** (14.240)	-956.780*** (342.874)	-1006.700*** (356.780)
$(\ln G)^2$	1.465*** (0.332)	10.168*** (2.531)	11.633*** (2.832)	2.977*** (0.849)	56.788*** (20.483)	59.765*** (21.313)
$(\ln G)^3$	-0.029*** (0.007)	-0.201*** (0.050)	-0.230*** (0.056)	-0.059*** (0.017)	-1.122*** (0.407)	-1.181*** (0.423)
$\ln E$	-0.002 (0.027)	0.064 (0.184)	0.062*** (0.209)	0.054 (0.037)	1.602** (0.783)	1.657** (0.816)
$\ln UR$	0.056* (0.034)	0.436* (0.260)	0.492* (0.288)	0.079** (0.040)	1.578* (0.844)	1.657* (0.877)
$\ln TECH$	-0.005 (0.012)	0.025 (0.079)	0.020 (0.090)	-0.009 (0.012)	-0.203 (0.198)	-0.213 (0.206)
$\ln F$	0.023*** (0.009)	0.025*** (0.205)	0.227*** (0.075)	0.057*** (0.013)	1.273*** (0.329)	1.330*** (0.341)
ρ	0.860*** (0.022)	0.835*** (0.041)				
组内 R^2	0.518	0.637				

注：*** $p < 0.01$ 、** $p < 0.05$ 、* $p < 0.1$ 为显著性水平。

五、结论与启示

本文利用空间杜宾模型，从空间角度验证了 2007—2016 年间京津冀及周边地区“2+26”城市一二三产业集聚水平和大气污染之间关系。主要研究结论如下：（1）2007—2016 年京津冀及周边地区“2+26”城市的产业集聚对大气污染具有显著的空间溢出效应。（2）不同产业集聚水平对区域大气污染的影响具有显著差异。“2+26”城市第一产业集聚水平对大气污染没有显著影响；第二产业和第三产业集聚水平对大气污染均具有显著的本地和空间溢出效应，分别表现为正向和负向的影响。（3）京津冀及周边地区“2+26”城市经济发展与大气污染的本地及空间溢出效应均呈现倒 N 型曲线关系，对外开放水平、城市化水平和能源消费水平对大气污染具有负向的本地和空间溢出

效应。

针对上述结论,本研究提出如下政策建议:第一,“2+26”城市应多方位实现一体化发展。建议成立集产业整合、经济发展和大气污染联合治理功能为一体的跨区域管理机构,加强对产业结构的跨区域合理调整和空间布局,同时坚持加强区域大气污染联防联控政策,为产业集聚和大气环境的协调发展提供条件,从区域层面探索改善“2+26”城市大气污染的最佳路径。第二,针对不同产业应制定更为精准、各有侧重的差异化策略。在发挥各产业规模效应的同时实现大气环境治理改善,一是要大力发展第一产业,依托乡村振兴战略,发展绿色生态农业,提升农业的现代化和集约化水平,盘活乡村经济,实现产业经济与大气环境的双赢局面;二是针对第二产业,要促进工业转型升级,严格工业企业的排放标准,淘汰高污染、高耗能行业,提升资源使用效率,同时应当持续鼓励绿色环保产业发展,加大产业扶持力度;三是要推动第三产业集聚发展,将市场导向与政府推动二者结合,一方面遵循产业发展的规律,充分发挥市场在资源配置中的决定性作用,另一方面应加强规划引导和政策扶持,发挥政府在产业发展中的统筹协调作用,鼓励服务业集聚。第三,建议提升引进企业的环保门槛。应打破传统的行政区划边界,从区域角度实施统一的外资引进标准,鼓励外商投资高新技术产业、绿色环保产业、现代服务业,优化整个区域的外资结构,提高引进外资的绿色效益。第四,“2+26”城市各地方政府需合理规划城市化建设。杜绝盲目追求快速城市化,遵循城市发展的整体进程,循序渐进、科学精准地对城市整体布局加以规划,注重构建绿色清洁的公共交通模式,鼓励公众绿色低碳出行,减少城市化带来的大气污染。第五,经济手段和行政手段相结合治理大气污染。应加大清洁能源发展的资金政策支持力度,促进节能减排技术创新,引导区域内部向绿色化、清洁化的能源结构转变;充分发挥政策驱动优势,控制区域大气污染水平,特别要注意“2+26”城市冬季燃煤问题,强化散煤管控措施。

参考文献

- [1] 彭菲,於方,马国霞,等.“2+26”城市“散乱污”企业的社会经济效益和环境治理成本评估[J].环境科学研究,2018(12).
- [2] Clean Air Asia(CAA). *China Air 2019: Air Pollution Prevention and Control Progress in Chinese Cities* [EB/OL]. <http://www.allaboutair.cn/plus/view.php?aid=565>,2020-10-13.
- [3] Long,X.,X.Tie,J.Cao,et al. Impact of crop field burning and mountains on heavy haze in the North China Plain: A case study[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*,2016(15).
- [4] 方冬青,魏永杰,黄伟,等.北京市2014年10月重霾污染特征及有机碳来源解析[J].环境科学研究,2016(1).
- [5] 王德羿,王体健,韩军彩,等.“2+26”城市大气重污染下PM_{2.5}来源解析[J].中国环境科学,2020(1).
- [6] Wu,Z.,X.Zhang,M.Wu. Mitigating construction dust pollution: State of the art and the way forward[J]. *Journal of Cleaner Production*,2016,112.
- [7] Othman,M.,M.T.Latif,A.F.Mohamed. The PM₁₀ compositions, sources and health risks assessment in mechanically ventilated office buildings in an urban environment[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2016(6).
- [8] 彭猛,崔璐璐,王磊,等.唐山市大气PM_{2.5}季节污染特征及来源分析[J].生态环境学报,2020(9).
- [9] 崔立志,陈秋尧.城市产业集聚与环境污染:门槛特征和空间溢出——来自城市面板数据的实证分析[J].长春理工大学学报(社会科学版),2020(4).
- [10] Verhoef,E.T.,P.Nijkamp. Externalities in urban sustainability: Environmental versus localization-type agglomeration externalities in a general spatial equilibrium model of a single-sector monocentric industrial city[J]. *Ecological Economics*,2002(2).

- [11]杨仁发. 产业集聚能否改善中国环境污染[J]. 中国人口·资源与环境, 2015(2).
- [12]蔡海亚, 徐盈之, 赵永亮. 产业协同集聚、制造业效率与雾霾污染[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2020(2).
- [13]张可, 汪东芳. 经济集聚与环境污染的交互影响及空间溢出[J]. 中国工业经济, 2014(6).
- [14]De Leeuw, F. A. A. M., N. Moussiopoulos, P. Sahm, et al. Urban air quality in larger conurbations in the European Union[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001(4).
- [15]袁华锡, 刘耀彬, 胡森林, 等. 产业集聚加剧了环境污染吗? ——基于外商直接投资视角[J]. 长江流域资源与环境, 2019(4).
- [16]韩晶, 毛渊龙, 朱兆一. 产业集聚对环境污染的影响[J]. 经济社会体制比较, 2019(3).
- [17]刘宁宁, 孙玉环, 汤佳慧, 等. 空间溢出视角下中国污染密集型产业集聚的环境效应[J]. 环境科学学报, 2019(7).
- [18]李小帆, 张洪潮. 产业集聚对碳排放的影响研究——以城镇化水平为门槛的非线性分析[J]. 生态经济, 2019(10).
- [19]周明生, 王帅. 产业集聚是导致区域环境污染的“凶手”吗? ——来自京津冀地区的证据[J]. 经济体制改革, 2018(5).
- [20]王素凤, P. Champagne, 潘和平, 等. 工业集聚、城镇化与环境污染——基于非线性门槛效应的实证研究[J]. 科技管理研究, 2017(11).
- [21]谢荣辉, 原毅军. 产业集聚动态演化的污染减排效应研究——基于中国地级市面板数据的实证检验[J]. 经济评论, 2016(2).
- [22]Li, L., X. Liu, J. Ge, et al. Regional differences in spatial spillover and hysteresis effects: A theoretical and empirical study of environmental regulations on haze pollution in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230.
- [23]Lesage, J., R. K. Pace. *Introduction to Spatial Econometrics*[M]. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2009.
- [24]钟娟, 魏彦杰. 产业集聚与开放经济影响污染减排的空间效应分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2019(5).
- [25]修国义, 朱悦, 王俭. 产业集聚、人口规模与雾霾污染: 基于省际面板数据的实证[J]. 统计与决策, 2020(7).
- [26]杨仁发. 产业集聚与地区工资差距——基于我国 269 个城市的实证研究[J]. 管理世界, 2013(8).
- [27]Zhu, L., Q. Gan, Y. Liu, et al. The impact of foreign direct investment on SO₂ emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region: A spatial econometric analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166.
- [28]东童童, 邓世成. 能源消费结构多样化与区域性雾霾污染——来自长江经济带的经验研究[J]. 消费经济, 2019(5).
- [29]Grossman, G. M., A. B. Krueger. Environmental impacts of a North American free trade agreement[A]. Conference on the U. S. -Mexico Free Trade Agreement. *National Bureau of Economic Research Working Paper Series*[C]. Cambridge: MIT Press, 1991.
- [30]Li, J., Y. Luo, S. Wang. Spatial effects of economic performance on the carbon intensity of human well-being: The environmental Kuznets curve in Chinese provinces[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233.
- [31]Elhorst, J. P. *Spatial Econometrics*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
- [32]Elhorst, J. P. Applied spatial econometrics: Raising the bar[J]. *Spatial Economic Analysis*, 2010(1).
- [33]郝宇, 廖华, 魏一鸣. 中国能源消费和电力消费的环境库兹涅茨曲线: 基于面板数据空间计量模型的分析[J]. 中国软科学, 2014(1).
- [34]林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. 管理世界, 2009(4).
- [35]Anselin, L. Local indicators of spatial association—ISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995(2).
- [36]Levin, A., C. Lin, C. J. Chu. Unit root tests in panel data: Asymptotic and finite-sample properties[J]. *Journal of Econometrics*, 2002(1).

- [37] Lee, L., J. Yu. Estimation of spatial autoregressive panel data models with fixed effects[J]. *Journal of Econometrics*, 2010(2).
- [38] 毛显强, 张庆勇. “2+26”城市治霾方案效果评估: 以山东省为案例的研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020(3).
- [39] Anselin, L. *Spatial Econometrics: Methods and Models*[M]. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 1988.

Differential Spatial Effects of the Three-industrial Agglomeration on Urban Air Pollution

— Evidence from the “2+26” Cities in the Beijing-Tianjin-Hebei
and Surrounding Areas

HU Pei-qi, JIANG Shu-rui, MA Zhong

Abstract: To enhance the efficiency of air pollution control in the “2+26” cities of the BTH region and surrounding areas, based on the Spatial Durbin Model (SDM), this study explores the differentiated impacts of agglomeration of the three industries on urban air pollution and its spatial spillover effects in this region. Significant spatial autocorrelations of urban air pollution are evidenced in the “2+26” cities from 2007 to 2016. The agglomeration levels of primary, secondary and tertiary industries in “2+26” cities have increased. There is no significant correlation between the agglomeration of the primary industry and air pollution in this region. The agglomerations of the secondary industry and the tertiary industry both have local and spatial spillover effects on air pollution, and show positive and negative impacts respectively. Economic development, opening up, urbanization and energy utilization have significant local and spatial spillover effects on air pollution. The existence of spillover effects proves the necessity and rationality of breaking administrative boundaries and carrying out industrial layout and pollution control. Policy recommendations include multi-faceted integrated development, differentiated development strategies of different industries, raising the environmental protection threshold of imported enterprises, rational planning of urbanization construction, combination of economic and administrative means to control air pollution, etc.

Key words: industrial agglomeration; air pollution; the Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas; Spatial Durbin Model

(责任编辑 孙 洁)