

工业集聚对大气污染的影响及门槛特征检验

——基于大气污染防治技术创新的视角

赵增耀 毛佳 周晶晶

摘要:以我国2003-2017年31个省市自治区(不含港澳台)面板数据为样本,采用空间计量模型和面板门槛回归模型实证检验了工业集聚、大气污染防治技术创新与大气污染之间的关系。实证结果表明:工业集聚和大气污染存在显著的空间关联特征,并且工业集聚对大气污染的影响受到技术创新能力的制约;大气污染防治技术创新能力对工业集聚与大气污染之间的作用效果存在显著的单一门槛效应,当技术创新能力较低时,工业集聚会导致大气污染程度的进一步恶化,而当技术创新能力跨越一定的门槛值时,工业集聚将会对大气污染防治产生积极的影响,有助于大气质量的改善。

关键词:工业集聚;大气污染;空间溢出;门槛效应

DOI: 10.19836/j.cnki.37-1100/c.2020.01.012

一、引言

随着我国经济的快速发展,在长三角、珠三角、京津冀以及内地一些经济发达区域,依托城市形成的产业集聚相当普遍,具有产业集聚特征的“块状经济”“专业镇”、工业园区、科技园区等,近些年来发展也十分迅猛。然而,产业集聚在发挥知识溢出、规模经济等积极效应的同时,也产生日趋严重的环境问题,北方地区甚至多次出现雾霾“爆表”情况。环保部公布的空气质量指数显示,我国雾霾污染的主要来源是PM_{2.5},并且其排放主要集中在长江以北的东中部地区,这些地区也是我国工业制造业的主要集聚区,分布有许多规模较大的工业集聚带。有研究指出,造成环境污染的所有排放物中,超过70%来源于工业制造业^①。

工业集聚规模的快速扩张以及由此产生的雾霾污染问题似乎表明,工业集聚是加剧大气污染的重要因素,然而,事实可能并非如此。从理论上而言,工业集聚产生的技术创新外溢、规模经济以及污染的集中处理会降低环境治理的成本,集聚区内形成的循环经济也会提高能源的利用效率,促进节能减排的实现,即工业集聚有利于创新环境的改善,促使环保新技术的研发和运用^②,从而实现环境质量的提升。那么,工业集聚到底是恶化还是改善了大气污染呢?为了厘清二者关系,本文利用2003-2017年中国省际面板数据,通过构建空间面板模型和面板门限模型,实证检验了工业集聚、大气污染防治技术创新和大气污染之间的关系,并在此基础上提出一些对策建议。

二、文献综述

产业集聚与环境污染之间的关系一直是学术界争论的焦点。学术界对这一问题的研究,主要有三

收稿日期:2019-11-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目“产业集聚中的碳排放、空气污染及其协同治理研究”(71873093);国家自然科学基金项目“产业集聚环境效应的机理、评价与调控研究”(71673196)。

作者简介:赵增耀,苏州大学商学院教授,博士生导师(苏州215021; zzy63@sina.com);毛佳,苏州大学商学院博士研究生(苏州215021; doctormao.ns@163.com);周晶晶,南通大学商学院副教授(南通226019; zhjj977@163.com)。

① 东童童、李欣、刘乃全:《空间视角下工业集聚对雾霾污染的影响——理论与经验研究》,《经济管理》2015年第9期。

② 黄娟、汪明进:《科技创新、产业集聚与环境污染》,《山西财经大学学报》2016年第4期。

种代表性观点:一种观点认为产业集聚对环境治理具有正的外部性,集聚会促使企业进行环境技术创新,进而有利于环境的保护。如 Lanjouw 和 Mody 发现产业集聚中由于治污规模经济的存在,整个行业污染治理函数会呈现明显规模报酬递增趋势^①;陆铭和冯皓的研究指出,经济活动的空间集聚会显著降低单位 GDP 的污染排放^②;许和连和邓玉萍的研究发现产业集聚通过强化外商直接投资的减排溢出效应推动了行业间的策略性减排竞争,从而有助于环境质量的改善^③;韩峰和谢锐采用空间杜宾模型和空间滞后模型研究了生产性服务业集聚与碳排放之间的关系,结果表明生产性服务业集聚有助于降低碳排放,实现“稳增长、促减排”的双赢局面^④;徐盈之和刘琦采用 2005~2015 年的省际面板数据实证检验了产业集聚对雾霾污染的影响,结果表明产业集聚规模的扩大和集聚能力的提升会降低雾霾污染的程度^⑤。

另一种观点认为产业集聚对环境治理具有负的外部性,生产中不可避免的污染排放会因为企业在地理上的集聚和规模扩大而加剧区域环境污染。如 Verhoef 和 Nijkamp 通过构建一个一般空间均衡模型发现产业集聚会对集聚区的环境质量产生负面的影响^⑥;张可和汪东芳运用空间联立方程模型考察了经济集聚与环境污染之间的关系,发现经济集聚加重了环境污染^⑦;王兵和聂欣对开发区的设立与周边河流水质变化的研究发现,短期内产业集聚会恶化水质环境,从而不利于环境治理^⑧。

也有学者认为,产业集聚是恶化还是改善环境污染具有不确定性,产业集聚同时存在的正外部性和负外部性的综合结果决定了产业集聚的环境效用,既可能造成环境质量的改善^⑨,也有可能加剧环境质量的恶化^⑩。关于产业集聚与环境污染不确定关系的研究主要聚焦于二者之间存在的非线性关系,部分学者认为产业集聚对环境污染的影响存在显著的门槛效应特征,当产业集聚水平较低时,产业集聚将加剧环境污染,而当产业集聚水平越过拐点时,产业集聚将有助于环境污染的改善^{⑪⑫⑬⑭⑮⑯}。

① Lanjouw J. O., Mody A., “Innovation and the International Diffusion of Environmentally Responsive Technology”, *Research Policy*, 1996, 25(4), pp. 549-571.

② 陆铭、冯皓:《集聚与减排:城市规模差距影响工业污染强度的经验研究》,《世界经济》2014 年第 7 期。

③ 许和连、邓玉萍:《外商直接投资、产业集聚与策略性减排》,《数量经济技术经济研究》2016 年第 9 期。

④ 韩峰、谢锐:《生产性服务业集聚降低碳排放了吗?——对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析》,《数量经济技术经济研究》2017 年第 3 期。

⑤ 徐盈之、刘琦:《产业集聚对雾霾污染的影响机制——基于空间计量模型的实证研究》,《大连理工大学学报(社会科学版)》2018 年第 3 期。

⑥ Verhoef E. T., Nijkamp P., “Externalities in Urban Sustainability: Environmental Versus Localization-Type Agglomeration Externalities in a General Spatial Equilibrium Model of a Single-Sector Monocentric Industrial City”, *Ecological Economics*, 2002, 40, pp. 157-179.

⑦ 张可、汪东芳:《经济集聚与环境污染的交互影响及空间溢出》,《中国工业经济》2014 年第 6 期。

⑧ 王兵、聂欣:《产业集聚与环境治理:助力还是阻力——来自开发区设立准自然实验的证据》,《中国工业经济》2016 年第 12 期。

⑨ Zeng D., Zhao L., “Pollution Havens and Industrial Agglomeration”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2009, 58, pp. 141-153.

⑩ Andersson M., Löf H., “Agglomeration and Productivity: Evidence from Firm-Level Data”, *The Annals of Regional Science*, 2011, 46, pp. 601-620.

⑪ 杨仁发:《产业集聚能否改善中国环境污染》,《中国人口·资源与环境》2015 年第 2 期。

⑫ 李筱乐:《市场化、工业集聚和环境污染的实证分析》,《统计研究》2014 年第 8 期。

⑬ 原毅军、谢荣辉:《产业集聚、技术创新与环境污染的内在联系》,《科学学研究》2015 年第 9 期。

⑭ 黄娟、汪明进:《科技创新、产业集聚与环境污染》,《山西财经大学学报》2016 年第 4 期。

⑮ 刘满凤、谢晗进:《我国工业化与城镇化的环境经济集聚双门槛效应分析》,《管理评论》2017 年第 10 期。

⑯ 刘耀彬、袁华锡、封亦代:《产业集聚减排效应的空间溢出与门槛特征》,《数理统计与管理》2018 年第 2 期。

纵观现有研究,主要存在两方面不足:一方面,现有研究在量化环境污染程度时往往采用二氧化硫等指标进行度量。事实上,二氧化硫仅仅是造成环境污染的一种因素,对于目前严重的雾霾污染来说,其主要来源是PM2.5、PM10等细颗粒物超标,二氧化硫并不是主要来源。在此情况下,仍然用二氧化硫排放来表征大气污染并不是十分合理。基于这种考虑,本文采用PM2.5来表征大气污染水平。另一方面,集聚理论认为,集聚企业之间的竞争和对高利润的追求,会驱使企业增加研发等创新投入,而企业在空间上的集聚和面对面交流,有助于技术、信息特别是隐性知识的转移;与研究机构、政府和其他企业的合作,可以降低研发的成本或提高研发的收益;技术、人才、金融等服务中介组织的活动又为创新提供重要的专业服务,所有这些因素都会促使集聚内部的技术创新,政府恰当的环境规制又会将创新引导到绿色创新。然而,上述描述可能只是一种理想状态,能否实现还取决于产业集聚的发展导向、集聚规模以及环境规制等因素。当产业集聚一味追求粗放型的规模扩张时,企业的技术创新就不会受到重视,集聚就可能加重环境污染。因此,产业集聚、技术创新、环境污染之间并不是简单的线性关系,集聚因素与技术创新因素存在着多种耦合及对应的技术创新水平,技术创新水平也可能存在某种临界值,低于临界值时,集聚就会加重污染;高于临界值时,集聚就会减缓污染。现有研究要么仅仅分析产业集聚与环境污染之间的关系,没有将技术创新纳入一个统一的分析框架,要么将三者之间看作线性关系,本文试图将工业集聚、大气污染和大气污染防治技术创新纳入一个统一的分析框架,首先建立空间面板模型,考察工业集聚对大气污染的空间外溢特征;再构建面板门槛模型,检验工业集聚、技术创新和大气污染三者之间的非线性关系。

三、实证模型、变量测度与数据说明

(一) 计量模型设定

目前,学术界广泛采用Dietz和Rosa建立的STIRPAT模型^①,研究产业集聚与环境污染之间的关系^②,综合STIRPAT模型在研究产业集聚与环境污染方面的可靠性,本文同样基于STIRPAT基础模型构建工业集聚与大气污染的计量模型。标准的STIRPAT模型如下:

$$I = aP^{\lambda_1} A^{\lambda_2} T^{\lambda_3} e \quad (1)$$

其中, I 表示环境污染水平, a 是常数项, P 表示人口规模, A 表示人均财富水平, T 表示技术水平, e 为随机误差项。 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别表示人口规模、人均财富水平和技术水平的影响系数,当 $\lambda_1 > 0$ 、 $\lambda_2 > 0$ 、 $\lambda_3 < 0$ 时,人口规模和财富水平的增长将会恶化环境,而技术水平的提升则会有助于环境质量的改善。

事实上,除了人口规模、技术水平、财富水平以外,还有一些其他因素也会影响大气污染,如人力资本、对外开放程度、环境规制强度等。因此,基于(1)式的基础模型,进一步加入上述控制变量,并对模型取对数,得到如下计量模型:

$$\begin{aligned} \ln I_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \ln Agg_{it} + \beta_2 \ln Inm_{it} + \beta_3 \ln Agg_{it} \cdot \ln Inm_{it} + \beta_4 \ln City_{it} \\ & + \beta_5 \ln Pgd_{it} + \beta_6 \ln Reg_{it} + \beta_7 \ln Open_{it} + \beta_8 \ln Hum_{it} + \mu_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, i 、 t 分别表示第 i 个省份第 t 年的数据, I 表示的是大气污染水平, Agg 表示的是产业集聚水平, $Inmo$ 表示的是大气污染防治技术创新指标, $City$ 表示省份的城镇化率,用以代替模型(1)中的

^① Dietz T., Rosa E. A., "Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology", *Human Ecology Review*, 1994, 1, pp. 277-300.

^② 刘耀彬、袁华锡、封亦代:《产业集聚减排效应的空间溢出与门槛特征》,《数理统计与管理》2018年第2期。

人口规模变量, $Pgdp$ 表示人均地区生产总值,用以代替模型(1)中的人均财富水平, Reg 表示的是环境规制强度, $Open$ 表示的是对外开放度, μ_i 、 ψ_t 、 ε_{it} 分别表示地区固定效应、时间固定效应和随机误差项。

(二)数据来源与变量测度

本文选取了 2003-2017 年全国 31 个省市(直辖市)的面板数据作为样本(不含港澳台),数据主要来源于历年的《中国统计年鉴》《中国工业经济统计年鉴》以及《中国环境统计年鉴》。相关指标数据的具体计算和测度如下:

(1)大气污染程度(I):尽管造成大气污染的来源有多种^①,而工业生产则是造成大气污染的重要来源。随着近年来国家和各地政府的严格控制二氧化硫、氮氧化物等污染物排放,整体上呈现出下降的趋势,与此同时,我国的大气质量仍然没有得到根本改善,以 PM2.5 为主要构成来源的雾霾污染已成为目前大气污染防治的重点。因此,本文利用各省份历年的 PM2.5 数据来表示大气污染状况,数据来源于巴特尔研究所和哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心^②。

(2)工业集聚水平(Agg):学术界关于如何度量产业集聚水平展开了一系列的研究,并且形成了空间基尼系数、E-G 指数、赫芬达尔-赫希曼指数等。由于上述方法在度量时无法准确地反映出地理要素的空间分布和地区规模差异,而区位熵能够弥补上述方法中存在的不足,从而被学术界广泛采用。基于此,本文采用区位熵指数的方法来对地区的产业集聚水平进行衡量,计算公式为:

$$Agg_{ij} = \left(\frac{E_{ij}}{\sum_i E_{ij}} \right) / \left(\frac{\sum_j E_{ij}}{\sum_i \sum_j E_{ij}} \right) \quad (3)$$

其中, i 、 j 分别表示地区 i 和产业 j 。 E_{ij} 表示是 i 地区 j 产业的工业总产值。本文采用各省历年制造业总产值来计算各地区的工业集聚水平。

(3)大气污染防治技术创新(Imm):尽管现有文献中有大量研究关注了技术创新与环境污染之间的关系,但是其技术创新数据来源仍然较为笼统。事实上并不是所有的技术创新都有助于改善环境,用笼统的技术创新数据无法真实地反映技术创新对环境的影响。因此,本文借鉴 Hall 和 Helmers 以及林玲的方法^{③④},将防治大气污染专利数作为大气污染防治技术创新水平的衡量指标。根据 OECD 给出的大气污染防治专利分类号^{⑤⑥},本文从国家知识产权局获取了各省份历年的大气污染防治专利授权情况。

(4)其他控制变量。城市化水平($City$):用各省历年非农业人口占全部总人口的比重来表示;经济发展水平($Pgdp$):用各省人均地区生产总值来衡量;环境规制强度(Reg):用各省历年环境治理投资完成额占 GDP 的比重来表示;对外开放度($Open$):用进出口总额占 GDP 的比重来表示;人力资本

① 大气污染物的来源主要有工业生产、交通运输工具对化石能源的使用、森林火灾以及生活炉灶与采暖锅炉。

② 文献来源: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/sdei-global-annual-gwr-pm2-5-modis-misr-seawifs-aod/data-download>. 2018 年 5 月 8 日访问。

③ 林玲、赵旭、赵子健:《环境规制、防治大气污染技术创新与环保产业发展机理》,《经济与管理研究》2017 年第 11 期。

④ Hall B. H., Helmers C., “Innovation and Diffusion of Clean/Green Technology: Can Patent Commons Help?”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2013, 66, pp. 33-51.

⑤ OECD, “Invention and Transfer of Invention and Transfer of Environmental Technologies”, *OECD Publishing*, 2011.

⑥ OECD 大气污染防治专利分类号主要有以下几种: B01D46、B01D47、B01D49、B01D50、B01D51、B01D53/34-36、B01D53/46-72、B03C3、C10L10/02、C10L10/06、C21B7/22、C21C5/38、F01N3、F01N5、F01N7、F01N9、F01N11、F23B80、F23C9、F23G7/06、F23J15、F27B1/18、G08B21/12-14。

(Hum):参照已有研究关于人力资本的计算方法来衡量中国 2004~2013 年人力资本^{①②③}。 $Huma = prim \times 6 + midd \times 9 + high \times 12 + univ \times 16$,其中 *prim*、*midd*、*high*、*univ* 分别表示小学、初中、高中、大专以上教育程度居民占各省市 6 岁及以上人口的比重,用 0 年、6 年、9 年、12 年和 16 年分别表示文盲半文盲、小学、初中、高中、大专及以上教育程度的居民平均受教育年限。2010 年各地区人口受教育年限数据根据第六次人口普查数据得到,其余年份的数据根据《中国统计年鉴》中对各地区人口受教育程度的抽样调查样本数据获得。

(三)变量的描述性统计

变量的描述性统计结果如表 1 所示,其中大气污染程度变量 lnPM2.5 的均值为 3.233,标准差为 0.710,最小值为 1.052,最大值为 4.405,可见各地区的污染程度在样本期间内存在着较大的空间差异;工业集聚程度变量 AGG 的均值为 1.005,最小值和最大值分别为 0.446 和 24.410,表明当前我国各地区的工业集聚水平仍然存在着较大的差距,空间分异明显;大气污染防治技术创新变量 lnINN 的均值、最小值和最大值分别为 3.680、0 和 7.938,说明当前我国大气污染防治技术创新水平总体上偏低,且各地区的创新水平差异较大。

表 1 变量的描述性统计

变量	均值	标准差	最小值	最大值	样本数
大气污染程度(lnPM2.5)	3.301	0.703	1.052	4.405	465
工业集聚程度(AGG)	1.012	1.128	0.446	24.410	465
大气污染防治技术创新(lnINN)	3.811	1.871	0	8.240	465
经济发展水平(lnPGDP)	10.212	0.730	8.189	11.768	465
城市化率(CITY)	0.507	0.149	0.205	0.896	465
对外开放程度(OPEN)	0.312	0.385	0.016	1.721	465
人力资本(HUMA)	8.570	1.214	3.738	12.666	465
环境规制程度(REG)	1.322	0.689	0.050	4.660	465

注:作者计算整理。

四、空间计量检验与实证分析

(一)工业集聚与大气污染的空间相关性分析

大气污染作为产业集聚过程中的负外部性,会随着自然环境的变化而产生污染物的空间转移和扩散,即大气污染在空间上可能存在一定的关联效应^④。此外,地区之间的竞争可能会导致大气污染的空间关联,从而导致某一地区的工业集聚可能会对周边地区的大气污染物排放产生影响。为了探讨工业集聚和大气污染之间的空间关联特征,本文采用 Moran's I 来探讨大气污染和工业集聚的空间关联性。其中,Moran's I 的计算公式如下:

① 樊纲、王小鲁、马光荣:《中国市场化进程对经济增长的贡献》,《经济研究》2011 年第 9 期。

② 李海峥、贾娜、张晓蓓:《中国人力资本的区域分布及发展动态》,《经济研究》2013 年第 7 期。

③ 李成友、孙涛、焦勇:《要素禀赋、工资差距与人力资本形成》,《经济研究》2018 年第 10 期。

④ 韩峰、谢锐:《生产性服务业集聚降低碳排放了吗?——对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析》,《数量经济技术经济研究》2017 年第 3 期。

$$\text{Moran's } I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

其中, X_i 表示的是区域 i 的观测值, W_{ij} 表示的是标准化的空间权重矩阵, 表示为:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ 和 } j \text{ 接壤} \\ 0, & i \text{ 和 } j \text{ 不接壤} \end{cases} \quad (5)$$

Moran's I 值介于 -1 到 1 之间, 在给定显著性水平下, Moran's I 值大于 0 表示正相关, 小于 0 表示负相关。本文通过 Moran 散点图来描述工业集聚和大气污染的空间分布, 此外, 为了阐述我国工业集聚和大气污染的时间演变和动态变迁, 样本考察期间, 大气污染和工业集聚指标的 Moran 指数均为正, 并且通过了 1% 的显著性水平检验, 表明大气污染和工业集聚具有显著的空间关联性, 并且从图 1 和图 2 中可以看出, 随着时间的变化, 大气污染和工业集聚的空间关联强度越来越大。

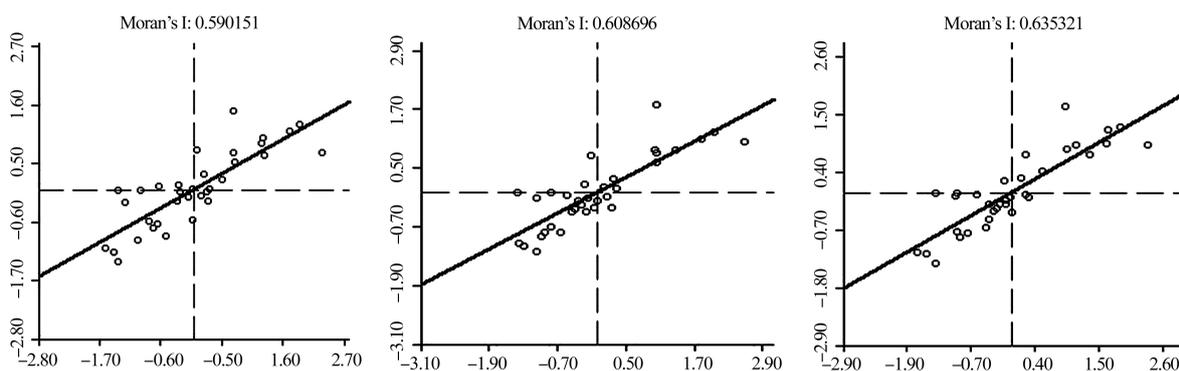


图 1 2003、2010、2017 年大气污染 Moran 散点图

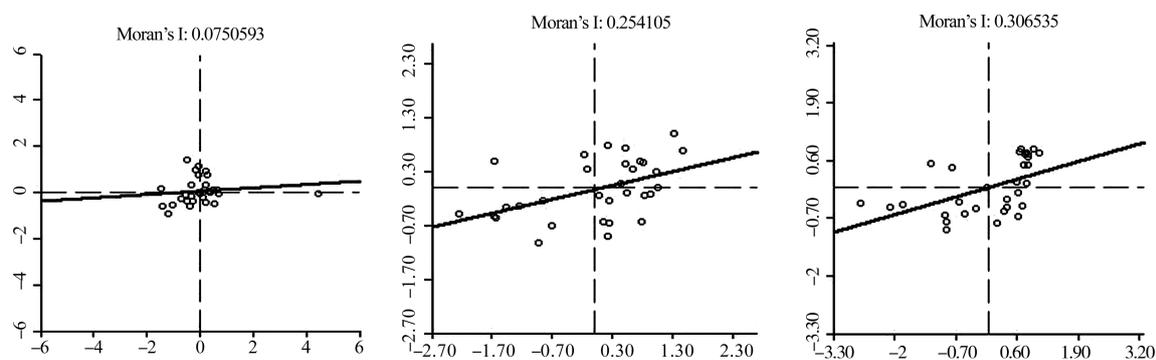


图 2 2003、2010、2017 年工业集聚 Moran 散点图

(二) 工业集聚、大气污染与技术创新的空间计量检验

1. 空间计量模型设定

根据公式(2), 本文建立如下空间计量模型来对工业集聚、大气污染以及技术创新三者之间的空间关联效应进行分析, 具体的模型如下:

$$\begin{aligned} \ln I_{it} = & \rho W I_{it} + \beta_1 \ln Agg_{it} + \beta_2 \ln Inn_{it} + \beta_3 \ln Agg_{it} \cdot \ln Inn_{it} + \beta_4 \ln City_{it} \\ & + \beta_5 \ln Pgd p_{it} + \beta_6 \ln Reg_{it} + \beta_7 \ln Open_{it} + \beta_8 \ln Hum_{it} + \mu_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \ln I_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln Agg_{it} + \beta_2 \ln Inn_{it} + \beta_3 \ln Agg_{it} \cdot \ln Inn_{it} + \beta_4 \ln City_{it} \\ + \beta_5 \ln Pgd p_{it} + \beta_6 \ln Reg_{it} + \beta_7 \ln Open_{it} + \beta_8 \ln Hum_{it} + \mu_i + \varphi_t + \epsilon_{it} \\ \epsilon_i = \lambda W \epsilon_j + \eta_i \end{cases} \quad (7)$$

其中式(6)和式(7)分别表示空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)。W为空间权重矩阵， ρ 和 λ 分别为空间滞后系数和空间误差系数， ϵ 为随机误差项并且服从正态分布。

2. 工业集聚、技术创新影响大气污染的空间计量估计结果

基于上述计量模型，表2给出了相应的计量回归结果。

表2 产业集聚、技术创新对大气污染影响的实证回归结果

变量	基本面板模型		空间滞后模型		空间误差模型	
	随机效应	固定效应	随机效应	固定效应	随机效应	固定效应
lnAgg	0.025** (2.02)	0.027** (0.35)	0.015** (2.11)	0.026** (1.98)	0.021** (2.35)	0.019** (2.05)
lnInn	-0.008** (-2.36)	-0.091*** (-2.67)	-0.039** (-2.23)	-0.055** (-1.98)	-0.016** (-2.44)	-0.049** (-2.34)
lnAgg * lnInn	-0.018* (-1.78)	-0.101* (-1.92)	-0.025*** (-3.11)	-0.053** (-2.42)	-0.039*** (-2.64)	-0.047*** (-2.73)
lnPgd p	-0.150* (-1.68)	-0.295** (-2.17)	-0.068 (-1.08)	-0.065 (-0.55)	-0.094 (-1.38)	-0.001 (-0.01)
lnHum	0.188** (2.49)	0.199 (0.70)	-0.150** (-2.07)	-0.062** (-2.38)	-0.201** (-1.97)	-0.043** (-2.25)
lnOpen	-0.318* (-1.92)	-0.184* (-1.67)	-0.080 (-1.07)	-0.088 (-0.71)	-0.019 (-1.39)	-0.044 (-0.62)
lnCity	-0.412*** (3.11)	-0.878*** (-2.17)	0.359 (1.29)	0.186 (0.70)	-0.047 (-0.18)	-0.164 (-0.62)
lnReg	-0.024** (-2.04)	-0.069** (-2.12)	-0.041** (-1.99)	-0.052** (-2.46)	-0.032** (-2.00)	-0.035** (-2.18)
C	6.167*** (4.86)	6.884*** (3.97)	1.205** (2.51)	— —	1.899*** (2.48)	
ρ			0.788*** (10.49)	0.706*** (7.44)		
λ				0.806*** (9.12)	0.705*** (13.13)	
个体效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	465	465	465	465	465	465
R-Square	0.836	0.895	0.176	0.265	0.478	0.537

注：括号内的数字为t值。***、**和*分别表示在1%、5%和10%的水平上变量显著。

表2中第2、3列显示的是基于基本面板数据模型的回归结果，第4、5列显示的是基于空间滞后模型的回归结果，第6、7列显示的是基于空间误差模型的回归结果。在对空间计量模型结果进行分析时，我们首先要关注的是工业集聚与大气污染之间是否存在空间关联性。从表2的回归结果中可以看出，SLM模型的空间相关系数 ρ 和SEM模型的空间相关系数 λ 均为正，并且在1%的统计水平下显著，表明大气污染确实存在显著的空间外溢和转移效应。从表2的估计结果可以看出：工业集聚的估计系数为正并且在5%的显著性水平下显著，这表明工业集聚对大气污染具有显著的正向作用，

即工业集聚程度的增加会加剧大气污染的恶化。可能原因在于,一方面,目前我国工业集聚仍然是以低端产业的粗放型集聚为主,尚未形成以高技术、高附加值为主的集约型产业集聚,生产过程中的高消耗、高能耗比较普遍,循环经济、治污的规模经济和绿色技术创新尚未发挥应有的作用。大气污染防治技术创新的估计系数显著为负,表明大气污染防治技术创新能力的提升有助于大气污染程度的改善,实现环境的治理。

对于表2的回归结果,我们需要重点关注的是技术创新与工业集聚的交互项对大气污染的影响。从回归结果中可以看出,无论是基础面板回归模型还是空间滞后模型和空间误差模型,交互项的系数均为负,并且均达到了显著性水平,表明大气污染防治技术创新有助于抵消工业集聚对大气污染的消极影响,并转而发挥出积极的效用。随着大气污染防治技术创新能力的不断提升,工业集聚的知识外溢和技术创新的积极效用将得到发挥,进而有助于大气环境质量的改善。

其他控制变量的回归结果显示,经济发展水平对大气污染的影响为负,但均未达到显著性水平,意味着生活质量的改善增强了居民的环保意识,但是仍然有待进一步提高。人力资本对大气污染的影响显著为负并且通过了1%的显著性检验,表明教育水平的提高有助于大气环境质量的改善。对外开放程度的估计系数为正,但未达显著性水平,这与现有研究结论相一致,即对外开放既有助于先进技术的引进,以提升资源利用效率,实现污染排放的降低,也有可能引进发达国家高污染产业的转移,从而加剧环境的恶化。环境规制强度对大气污染的影响系数显著为负,说明环境规制有助于大气环境质量的改善。

(三)面板门限效应检验

表2的回归结果显示,产业集聚对大气污染的影响受到技术创新能力的调节,从而导致二者之间不是简单的线性关系。目前,关于变量间非线性关系的探讨,学者们有的用分组检验来验证其门槛效应,但其不足是主观地切割分组点,且无法检验回归分析结果的差异性;也有学者采用交叉项检验或加入平方项和更高次项的方法来验证变量间存在的U型(倒U型)或S形曲线关系,这种方法虽然能够估计出具体的“门槛值”,但实证检验时选择交叉项还是更高次项的依据难以客观设定。与上述两种门槛值计算的方法相比,Hansen提出的门槛回归模型^①,将门槛值作为一个未知变量加入回归方程中一起分析,通过构建分段函数的回归系数,来对门槛效应进行估计,以及可能存在的内生性进行显著性检验,弥补了分组检验和交叉检验门槛值的不足。基于此,本文进一步借助Hansen的门限模型来考察大气污染防治技术创新对工业集聚和大气污染之间作用的非线性关系。

1. 面板门限模型设定

Hansen设置的单一门槛模型为:

$$y_{it} = \mu + \beta_1' x_{it} \cdot I(q_{it} \leq \gamma) + \beta_2' x_{it} \cdot I(q_{it} > \gamma) + e_{it} \quad (8)$$

其中, y_{it} 和 x_{it} 分别表示被解释变量和解释变量, q_{it} 为门槛变量, $I(\cdot)$ 为示性函数, γ 为门槛值, μ 为常数项, e_{it} 为随机误差项。通过比较门限变量与门限值的大小,可以将样本观测值分为两个样本组,样本之间的差异主要表现为回归系数 β_1 和 β_2 的取值不同。

结合 Hansen(1999)的基本思想,本文设定如下门槛回归模型:

$$\begin{aligned} \ln I_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \ln Agg_{it} \cdot I(q_{it} \leq \gamma_1) + \beta_2 \ln Agg_{it} \cdot I(\gamma_1 < q_{it} \leq \gamma_2) \\ & + \beta_3 \ln Agg_{it} \cdot I(q_{it} > \gamma_2) + \beta_4 \ln Inn_{it} + \varphi X_{it} + \mu_i + \varphi_t + \epsilon_{it} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 I 表示大气污染程度, Agg 表示产业集聚水平, Inn 表示大气污染防治技术创新, q 表示门限变量, γ 表示的门限值, $I(\cdot)$ 表示的是指示函数, X 表示的是控制变量的集合,包括城市化水平($City$)、经济发展水平($Pgdp$)、环境规制强度(Reg)、对外开放程度($Open$)以及人力资本(Hum)。

为了考察技术创新对工业集聚与大气污染的调节作用,将大气污染防治技术创新作为门槛变量,

^① Hansen B. E., "Threshold Effects in Non-Dynamic Panels: Estimation, Testing, and Inference", *Journal of Econometrics*, 1999, 93, pp. 345-368.

并进行单一门槛、双重门槛和三重门槛的检验,检验结果如表 3、表 4 所示。

表 3 门槛效应检验

	F 值	P 值	Bootstrap 次数	临界值		
				10%	5%	1%
单一门槛	20.02***	0.010	300	16.299	17.945	26.282
双重门槛	18.81**	0.062	300	16.713	25.339	35.489
三重门槛	4.69	0.587	300	20.780	29.263	42.435

表 4 门槛值估计结果

门槛变量	门槛估计值	置信区间
门槛值 γ_1	6.012	[5.785, 6.215]
门槛值 γ_2	4.820	[4.788, 4.913]

从表 3、表 4 可以看出,大气污染防治技术创新能力的单一门槛值在 1% 的显著性水平显著,而在双重门槛值和三重门槛值均未达显著性水平,说明技术创新对大气污染的影响具有单一门槛效应。

2. 门槛模型估计与稳健性检验

技术创新对工业集聚与大气污染的门槛估计结果(见表 5)显示,在不同的大气污染防治技术创新能力水平下,工业集聚对大气污染的影响表现出了显著的门槛特征:当技术创新能力低于 4.820 时,工业集聚对大气污染的影响系数为 0.065;当技术创新能力为 4.820-6.012 时,工业集聚对大气污染的影响系数变为-0.224;当技术创新能力高于 6.012 时,工业集聚对大气污染的影响系数变为-1.500。由此可见,工业集聚与大气污染的关系并不是简单的线性关系。当技术创新能力水平较低时,工业集聚会导致大气污染的加剧,但是随着技术创新能力的提升,工业集聚对大气污染的负面效应会有所减弱。当技术创新能力跨越了更高的门限值时,工业集聚会对大气污染治理产生积极的影响。也就是说,工业集聚与大气污染之间非线性关系的拐点受技术创新水平的影响。联系前文基于PM2.5测度的大气污染随着工业集聚水平的提升而恶化,说明我国目前工业集聚的技术创新水平低下,尚未达到技术创新促进环境改善的临界值。出现这种现象的可能原因在于,到目前为止我国工业集聚总体上尚处在追求规模的粗放型集聚阶段,主要依靠劳动、资本、土地等要素投入,技术进步、资源节约利用、集约化经营、污染集中治理等有助于环境改善的集聚因素尚未发挥应有作用。随着环境规制的加强以及集聚内部技术溢出效应的增强,将会促使企业的绿色技术创新和环保产业的发展,环境恶化、资源短缺、人口红利消失也倒逼集聚企业改变传统的生产经营方式,实现价值链的升级,进而提升工业集聚的整体技术水平和集约化经营,最终达到和超过技术创新的临界值,此时我国的工业集聚将会像今天的发达国家那样,实现集聚经济与环境的双赢。

表 5 面板门槛估计结果及稳健性检验

变量	模型 1	模型 2	模型 3
	PM2.5	SO ₂	NO _x
$\ln Agg(x < \gamma_1)$	0.065 (0.92)	-0.087 (-1.36)	-0.041 (-0.65)
$\ln Agg(\gamma_1 \leq x \leq \gamma_2)$	-0.224 (-0.84)	-0.164* (-1.85)	-0.263** (-2.33)
$\ln Agg(x > \gamma_2)$	-1.500*** (-3.46)	-1.630*** (-6.53)	-0.596*** (-4.28)

续表 5

变量	模型 1	模型 2	模型 3
	PM2.5	SO ₂	NO _x
lnInn	-0.020*** (-2.71)	-0.323*** (-11.54)	-0.249*** (-8.83)
lnPgdp	-0.148* (-1.75)	-0.224*** (-2.64)	-0.693*** (-6.66)
lnHum	-0.483** (-2.35)	-0.571 (-1.58)	-0.821** (-2.23)
lnOpen	-0.332*** (-6.63)	-0.059** (-2.45)	0.187*** (3.92)
lnCity	-1.424*** (-4.18)	-0.359** (-2.24)	-0.265 (-0.72)
lnReg	-0.019** (-2.52)	-0.161*** (-4.27)	-0.152*** (-4.40)
_cons	6.242*** (5.94)	1.824* (1.71)	-4.099*** (-3.28)

由于大气污染物包含多种成分,本文进一步利用二氧化硫排放量和氮氧化物排放量进行稳健性检验,检验结果如表 5 第 3、4 列所示。敏感性分析结果表明,二氧化硫与氮氧化物的双门限效应均通过了显著性检验,只有当大气污染防治技术创新突破一定的阈值之后,才会有助于大气污染的改善。

五、研究结论和建议

本文以我国 2003-2017 年 31 个省市自治区(不含港澳台)面板数据为样本,采用空间计量模型和面板门框回归模型实证检验了工业集聚、大气污染防治技术创新与大气污染之间的关系。实证结果表明:(1)工业集聚和大气污染存在显著的空间关联特征,大气污染物的浓度不仅与当地的工业集聚水平有关,同时还会受到周边地区大气污染程度的影响;(2)工业集聚对大气污染的影响受到技术创新能力的制约,即大气污染防治技术创新能力的提升会显著改善工业集聚对大气污染的负面效应,并有助于大气环境质量的改善;(3)大气污染防治技术创新能力对工业集聚与大气污染之间的作用效果存在显著的单一门槛效应,当技术创新能力较低时,工业集聚会导致大气污染程度的进一步恶化,而当技术创新能力跨越一定的门槛值时,工业集聚将会对大气污染防治产生积极的影响,有助于大气质量的改善。

基于上述研究结论,本文提出了以下对策建议:第一,由于工业集聚和大气污染之间存在着密切的关系,在现有的工业布局和集聚格局下,要将工业集聚作为绿色发展的重要抓手,积极推动工业集聚的发展模式转变,从过去的要素驱动为主转变为创新驱动为主,通过结构调整、规模优化、地区之间环境治理的协同联动、集约化生产等途径,将现有的以环境为代价的粗放型集聚转为集约化的环境友好型集聚,实现工业集聚的环境与经济效应协调和统一。第二,重视技术创新在工业集聚绿色发展中的作用,采取多种措施使得集聚内部的技术创新达到门槛效应。要始终将企业作为技术创新的主体,大力培养自主创新能力,重视对国外先进技术引进、消化吸收和再创新。同时要建立完善的产学研协同创新体系和金融中介服务体系,引导企业建立涵盖绿色技术研发、绿色采购、绿色生产、绿色营销等整个生产经营环节的绿色管理体系,依靠绿色技术创新和绿色经营构建可持续发展下的竞争优势。

第三,进一步增强对集聚区企业的环境规制和约束,提高工业集聚区的准入门槛,建立严格的动态考核机制和退出机制,对集聚区企业的生产经营和污染排放实现实时监督,通过严格的环境规制政策倒逼企业进行绿色技术创新和产业升级,倡导集聚区内部资源的循环利用和清洁生产,逐步改善工业集聚对环境质量的负面影响。

The Spatial Spillover Effects and Threshold Effects of Industrial Agglomeration on Air Pollution: From the Perspective of Technological Innovation on Air Pollution Control

Zhao Zengyao Mao Jia Zhou Jingjing

(School of Business, Soochow University, Suzhou 215021, P. R. China;

School of Business, Nantong University, Nantong 226019, P. R. China)

Abstract: This paper uses the panel data of 31 provinces, cities and autonomous regions from 2003 to 2016 as a sample, and empirically examines the relationship among industrial agglomeration, technological innovation of atmospheric pollution prevention and atmospheric pollution using spatial econometric model and panel threshold regression model. The empirical results show that: (1) there are significant spatial correlations between industrial agglomeration and atmospheric pollution; (2) the impact of industrial agglomeration on atmospheric pollution is constrained by the capability of technological innovation; (3) the capability of technological innovation in air pollution prevention and control has a significant single-threshold effect on the effect of industrial agglomeration and air pollution. When the capability of technological innovation is low, industrial gatherings lead to further deterioration of air pollution, and when technological innovation capability exceeds a certain threshold, industrial agglomeration will affect the atmosphere. Pollution prevention and control have a positive impact and contribute to the improvement of air quality.

Keywords: Industrial agglomeration; Air pollution; Spatial spillover; Threshold effect

[责任编辑:郝云飞]