

京津冀城市工业对雾霾污染影响的溢出效应 ——基于制造业投资城市网络的视角

孙铁山^{1,2}, 刘禹圻¹

(1. 北京大学政府管理学院, 北京 100871; 2. 北京大学公共治理研究所, 北京 100871)

摘要:工业生产对城市环境质量的影响具有空间溢出效应,但鲜有研究从城市网络的视角探讨城市工业基于产业投资联系对环境污染影响的溢出效应。论文使用2004—2018年京津冀城市间制造业企业投资数据,分析京津冀制造业投资城市网络特征,并创建城市间制造业投资联系矩阵,结合空间计量模型,实证检验基于制造业投资城市网络的京津冀城市工业对雾霾污染影响的溢出效应。研究发现:京津冀城市间制造业互投资中污染型制造业投资增长最显著,且相比于其他类型的制造业投资,污染型制造业投资城市网络更加分散,是造成城市工业对雾霾污染影响溢出的重要渠道。从时空演变来看,京津冀城市间污染型制造业投资城市网络不断扩张,可能造成城市工业对空气质量更广泛的跨地区影响。实证结果验证了城市工业通过制造业投资城市网络带来雾霾污染的空间溢出,这种溢出的传输机制是通过城市间的产业投资联系,且和投资的产业类型有关。相比于其他类型的制造业投资,污染型制造业投资联系造成的雾霾污染溢出效应最强。因此,城市群地区需要统筹协调好城市间的产业发展,才能更有效地应对区域环境挑战。

关键词:城市网络;雾霾污染;溢出效应;投资联系;京津冀

当前,中国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段。高质量发展不仅需要提高经济发展水平,也要改善生态环境质量,需要兼顾经济发展与环境可持续性。城市群是中国人口集聚和经济发展的主要空间载体,也是带动中国经济高质量发展的主体区域。但当前东部发达地区相对成熟的城市群已开始面临越来越突出的环境问题,因此,解决好城市群经济发展与环境质量之间的矛盾,对应城市群可持续发展挑战、形成以城市群带动中国区域经济高质量发展的战略格局意义重大。

近年来,城市群环境质量中空气质量问题广受关注,城市群地区由于工业活动密集及城市化效应,往往面临较突出的大气污染和灰霾问题。相关研究主要讨论了中国城市群空气质量的时空演化

特征及其影响因素^[1-2],以及城市群建设对城市空气质量的影响等^[3],仍鲜有研究从城市网络的视角探讨城市群城市工业对雾霾污染影响的溢出问题^[4]。城市群是由不同规模等级的城市组成的城市群体,其核心特征在于城市间形成了紧密的产业联系。产业联系隐含了城市间要素流动、市场整合和技术溢出,将城市彼此连接并嵌入城市网络^[5-6]。事实上,影响城市空气质量的根本性因素是人类活动导致的污染物累积,而其中工业活动是重要方面。在城市群中,城市工业可能通过产业转移、技术溢出的网络联系造成其环境影响在城市间的溢出,这种溢出最重要的传输机制就是通过城市间的产业投资联系。因此,城市群城市的空气质量不仅受到城市自身工业活动的影响,也和城市群内其他城市的

收稿日期:2022-06-17;修订日期:2022-11-01。

基金项目:国家自然科学基金项目(41971156);北京大学公共治理研究所学术团队建设重点支持项目(TDXM202104)。

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41971156; The Key Academic Team Building Support Project of the Institute of Public Governance of Peking University, No. TDXM202104.]

第一作者简介:孙铁山(1978—),男,内蒙古包头人,副教授,北京大学公共治理研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为城市与区域经济和管理。E-mail: tieshansun@pku.edu.cn

引用格式:孙铁山,刘禹圻. 京津冀城市工业对雾霾污染影响的溢出效应:基于制造业投资城市网络的视角[J]. 地理科学进展, 2023, 42(2): 237-248. [Sun Tieshan, Liu Yuqi. Spillover effects of urban industries on haze pollution among cities of the Beijing-Tianjin-Hebei region: From the perspective of inter-city manufacturing investment network. Progress in Geography, 2023, 42(2): 237-248.]
DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.02.003

工业发展密切相关。

城市群中城市工业基于产业投资联系对雾霾污染影响的溢出效应可以体现为正或负外部性。一方面,城市间的投资联系尤其是污染型工业企业的投资会带动相关产业的区域转移和扩散,使流入地的污染型工业规模扩大,产业结构中污染型工业占比增加,随之工业污染物的排放和能源消耗也增加,加剧城市空气质量恶化,产生负的环境溢出效应。而另一方面,城市间的产业投资联系也会加强知识、前沿技术、专业人才以及先进管理经验等技术和创新要素在地区间的流动、分享与溢出,使城市工业的技术优势依托城市网络扩散,从而带来正的环境溢出效应。例如通过模仿、竞争、知识溢出带动新技术应用,从而提高原有工业的生产效率和污染治理水平,以及带动新产业发展,推动城市产业转型和结构升级等,进而改善城市的空气质量。现实中,基于产业投资城市网络的城市工业的环境溢出效应到底体现为正或负外部性取决于多种因素,而且和城市间投资联系的产业类型有关。例如,对外商直接投资的环境效应的研究发现,劳动密集型和重污染资本密集型制造业的投资对东道国环境具有“污染避难所”效应,而轻污染资本密集型制造业的投资则具有“污染光环”效应^[7]。因此,城市间污染型制造业的投资联系可能造成城市工业在地区间更强的环境负外部性。

基于上述考量,本文以京津冀城市群为例,采用城市网络分析和空间面板计量模型,分析京津冀城市间制造业投资城市网络特征,并实证检验基于制造业投资联系的京津冀城市工业对雾霾污染影响的溢出效应。现有对雾霾污染空间溢出的研究普遍采用空间计量模型,强调城市工业对雾霾污染影响在地理邻近地区间的溢出效应^[8-9]。随着城市网络理论的发展,集聚外部性下的距离成本和地理邻近的概念不断弱化^[10],本文则从城市网络的视角,考察城市群城市工业对雾霾污染影响基于制造业投资城市网络的溢出效应,强调产业投资联系是城市工业环境影响溢出的重要渠道。为此,本文利用2004—2018年京津冀城市间制造业企业投资数据,创建城市间制造业投资联系矩阵,并结合空间计量模型,实证测度基于网络联系的城市工业对雾霾污染影响的溢出效应。

本文的主要内容和创新点包括:一是针对现有研究普遍忽视产业投资联系的城市网络带来的环

境溢出效应,实证检验城市工业通过城市网络对投资关联地区产生的跨地区环境影响;二是从制造业投资出发构建城市网络,相比于交通联系或人口流动能更准确地反映城市网络的经济本质及其导致环境影响溢出的内在逻辑;三是讨论不同产业类型的投资联系在雾霾污染影响溢出效应上的差异。

1 研究区域、数据和方法

1.1 研究区域与数据

本文的研究区域是京津冀城市群,包括北京、天津2个直辖市和河北省石家庄、承德、张家口、秦皇岛、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台、邯郸11个地级市。京津冀城市群是中国北方的经济核心区,目标是建设成为以首都为核心的世界级城市群。尽管近年来京津冀不断加强联防联控联治大气污染,空气质量得到明显改善,但在3大城市群中(包括京津冀、长三角和珠三角),京津冀城市群空气质量仍然相对较差。与其他大气污染物相比,PM_{2.5}对公众带来的健康风险和危害已引起社会的广泛关注^[11]。根据中国气象局发布的2021年《大气环境气象公报》,京津冀2021年PM_{2.5}的年平均浓度为38 μg/m³,高于长三角(31 μg/m³)、珠三角(21 μg/m³)和全国平均(30 μg/m³)。从霾日数来看,2021年京津冀霾日数为31.7 d,也高于长三角(20.9 d)和珠三角(2.1 d)。因此,京津冀空气污染治理任务依然艰巨。

本文以城市PM_{2.5}平均浓度水平反映城市空气质量,利用京津冀城市间制造业企业投资数据构建城市间投资联系网络,分析京津冀城市群制造业投资城市网络特征及城市工业随城市网络对雾霾污染影响的溢出效应。其中,城市PM_{2.5}平均浓度数据来自加拿大达尔豪斯大学大气成分分析组,该数据是基于GEOS-Chem化学传输模型的模拟,并结合地理加权回归模型在全球范围内与地面监测数据交互验证,具有较好的精度,可用于国家、区域、城市多尺度的应用研究^[12]。企业投资数据来自工商企业数据库,该数据库包括企业注册信息、对外投资企业与投资金额、分支机构等信息,本文将京津冀范围内的制造业企业投资关系数据合并汇总到地级市层面,形成京津冀城市间制造业企业投资联系矩阵。此外,京津冀各城市的其他经济数据均来自历年《中国城市统计年鉴》。基于上述数据,本文构建了2004—2018年城市面板数据用于实证分析。

此外,考虑到城市工业随城市网络对雾霾污染影响的溢出效应和城市间投资联系的产业类型有关,为比较不同类型制造业投资联系在雾霾污染影响溢出上的差异,本文将制造业划分为污染型制造业、非污染一般性制造业、高新技术和装备制造业3类。在污染型制造业行业的界定和分类上,主要参考相关研究从排污规模和排污强度等角度确定的污染产业分类^[13-16],以及国务院颁布的《第一次全国污染源普查方案》对重污染产业的划分等,确定了本文的污染型制造业主要包括:石油、煤炭及其他燃料加工业,化学原料和化学制品制造业,黑色金属冶炼和压延加工业,有色金属冶炼和压延加工业,非金属矿物制品业,纺织业,造纸和纸制品业,化学纤维制造业,农副食品加工业,食品制造业,酒、饮料和精制茶制造业,共11个行业。在高新技术和装备制造业行业的界定和分类上,主要参考国家统计局关于高技术产业制造业分类标准和装备制造业分类标准,确定本文的高新技术和装备制造业主要包括:医药制造业,计算机、通信和其他电子设备制造业,电气机械和器材制造业,仪器仪表制造业,通用设备制造业,专用设备制造业,汽车制造业,铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业,金属制品业,共9个行业。其余的制造业行业则被统一划分为非污染一般性制造业,主要包括:烟草制品业,纺织服装、服饰业,皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业,木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业,家具制造业,印刷和记录媒介复制业,文教、工美、体育和娱乐用品制造业,橡胶和塑料制品业,共8个行业。

1.2 城市网络分析

网络分析可用于刻画京津冀城市群基于制造业投资联系所构建的城市网络特征。本文使用网络节点的度中心性,分析城市群中各城市在城市网络中的作用及地位。度中心性一般以网络中每个节点的边数量即度数来衡量。在以投资联系所构建的城市网络中,每条边为城市间的投资流,以投资金额为权重,在加权网络中,度中心性可以用每个节点所有边的权重之和(即投资总额)来测度。根据投资流的方向,可以区分出度和入度中心性。出度中心性指节点流向其他网络节点的边权重之和,反映节点在网络中的辐射和控制能力;入度中心性指流向节点的所有边权重之和,反映节点在网络中的承接和参与能力。比较城市的出度和入度中心性可以得出城市属于净流出还是净流入类型,反映

节点在城市网络中的作用。出度和入度中心性的计算如下:

$$G_{out(i)} = \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

$$G_{in(i)} = \sum_{j=1}^n x_{ji} \quad (2)$$

式中: $G_{out(i)}$ 为出度中心性, $G_{in(i)}$ 为入度中心性, x_{ij} 为从节点*i*到节点*j*的边权重, x_{ji} 为从节点*j*到节点*i*的边权重, n 为城市数量。

本文以京津冀13个城市为节点,以2004—2018年城市间3种类型制造业投资总额为边权重,构建基于制造业投资联系的有向加权城市网络,并分别计算3种类型制造业投资联系的城市网络中各城市的出度和入度中心性,绘制城市间投资流向图,从地理空间上刻画京津冀城市群投资联系的空间网络与等级结构。同时,重点关注对城市空气质量影响较大的污染型制造业投资的城市网络,分阶段分析其网络特征的时空演变。

1.3 空间面板计量模型

本文使用空间计量模型实证分析基于城市网络的城市工业对雾霾污染影响的溢出效应,即城市工业通过制造业投资网络联系对网络关联地区产生的跨地区环境影响。现有相关研究在应用空间计量模型时,往往使用地理相邻或基于距离的空间权重矩阵,主要考虑空气污染物在风、浓度等影响下的跨邻域流动和扩散的特性,强调特定城市的工业可能对污染源的周边城市的空气质量产生空间上的溢出效应^[17]。本文出于类似的考虑,使用空间计量模型进行分析,不同之处在于强调地区间的投资联系所形成的城市网络是城市工业产生跨地区环境影响的渠道,即一个城市的空气质量不仅和本地区的工业活动有关,也受到其他网络关联地区的工业发展的影响。因此,在计量模型中,采用城市间制造业投资联系构建彼此关联的权重矩阵,并计算城市工业水平的空间滞后变量,反映城市工业通过投资网络联系对其他关联地区空气质量的影响。

常见的用于检验溢出效应的空间计量模型包括:空间滞后模型(SAR)、空间滞后自变量模型(SLX)、空间杜宾模型(SDM)、广义空间自回归模型(SAC)等。其中,空间杜宾模型与其他空间回归模型相比,既包含了因变量的空间滞后变量,也包含了自变量的空间滞后变量,更具一般性。本文中,模型因变量为以城市PM_{2.5}平均浓度水平反映的城

市空气质量,核心解释变量为城市工业水平,因变量的空间滞后变量用于反映地区间空气质量的直接交互影响,而核心解释变量的空间滞后变量则反映城市工业通过制造业投资联系对网络关联地区空气质量的影响,即环境溢出效应。本文主要基于空间杜宾模型进行实证分析,模型形式如下:

$$y_{it} = \rho W y_{it} + \beta x_{it} + \theta W x_{it} + \gamma Z_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中: i 表示城市, t 表示年份; y 为因变量, W 为空间权重; x_{it} 为核心解释变量,即城市工业水平; Z_{it} 为控制变量; θ 为城市工业水平的空间滞后变量所对应的系数,反映工业活动随城市网络的环境溢出效应; ρ 为空间自回归系数, β 和 γ 分别为解释变量和控制变量的回归系数, μ_i 和 δ_t 分别表示个体和时间固定效应, ε_{it} 为随机扰动项。

本文利用城市间制造业投资联系构建空间权重矩阵,或称网络权重矩阵,体现城市间企业互投资产生的产业联系形成的城市网络。在网络权重矩阵中,第*i*行第*j*列的元素 w_{ij} 代表了2004—2018年间城市*i*对城市*j*的年平均制造业投资金额,年平均投资额消除了投资金额的逐年波动,反映两城市间长期的投资联系,之后对矩阵进行行标准化,使矩阵中的元素转化为权重。

对环境污染影响因素的研究普遍采用STIRPAT模型和环境库兹涅兹曲线(EKC)假说作为基本的理论框架,本文结合两者选取雾霾污染的影响因素^[18]。STIRPAT模型认为,环境质量主要受人口规模、人均财富和技术水平的影响,因此,除核心解释变量城市工业水平外,本文首先考虑将各城市的人口、经济和技术发展水平作为控制变量。具体如下:

(1) 城市工业水平(ind)。本文主要考察城市工业活动对雾霾污染的影响及其溢出效应,因此,选取工业总产值占GDP的比重反映城市工业水平,作为核心解释变量。考虑根据EKC假说,城市工业水平和环境质量之间可能具有非线性关系,同时将其一次项和二次项纳入模型,并使用其空间滞后变量反映城市工业通过制造业投资联系对网络关联地区空气质量的影响。

(2) 城市人口水平(pop)。采用城市年末总人口和建成区面积计算的人口密度反映城市人口规模和集聚水平。考虑人口生活和生产活动的集聚是加剧城市雾霾污染的重要因素,因此其系数预期为正。

(3) 城市经济水平(pgdp)。以各城市的人均GDP反映地区经济发展水平。根据EKC假说,地区

环境质量和经济发展水平具有倒U型或U型等曲线关系,因此,将其一次项和二次项同时纳入模型。

(4) 城市技术水平(patents)。地区环境质量还和当地生产技术水平相关,创新能力强的地区不仅可以通过技术创新带动产业转型升级,还可以直接通过节能减排技术改进,提高生产效率和清洁程度,从而通过效率提升、技术改进和结构优化等降低污染强度。本文使用各城市专利授权量反映城市技术水平,数据来自国家知识产权局的中国专利公布公告系统,汇总为各城市的专利授权数量,其系数预期为负。

除上述因素外,本文还参考现有相关研究^[8,18-19],进一步选取了其他可能影响雾霾污染的控制变量,包括城市交通水平、绿化水平、环境规制以及对外开放水平等。具体如下:

(5) 城市交通水平(roadarea)。交通运输中机动车尾气排放是空气中PM_{2.5}的主要来源之一,本文以市区道路面积与建成区面积之比计算的的道路面积密度反映城市交通水平,控制交通因素对城市空气质量的影响。

(6) 城市绿化水平(greenarea)。城市绿化水平的增加有利于空气质量的提升,使用市区绿地面积反映城市绿化水平,控制其对城市空气质量的影响。

(7) 城市环境规制(regulation)。环境规制可以有效降低工业活动的污染排放,借鉴相关研究^[8],本文基于污染物排放量衡量环境规制强度,即高强度的污染排放代表相对宽松的环境规制,使用工业氮氧化物排放量和工业烟(粉)尘排放量代理环境规制强度。

(8) 城市对外开放水平(fdi)。由外商直接投资反映的对外开放程度是中国环境污染研究普遍考虑的基本因素,因此,本文选取各城市接受外商直接投资总额反映城市对外开放水平,控制其对城市空气质量的影响。

此外,城市空气质量还和城市的地形、气候等自然因素有关,但考虑城市的自然条件在短期内随时间不变或变动较小,本文主要通过空间面板模型的固定效应加以控制。面板模型中的固定效应可有效控制各类随时间不变或变动缓慢的可能遗漏的解释因素。同时,采用的空间面板模型也可通过因变量的空间滞后变量控制一些无法观测的可能遗漏的对空气质量产生影响的其他区域性因素^[20],以尽可能避免遗漏变量导致的模型结果的偏误。

2 京津冀制造业投资城市网络特征

京津冀城市间制造业互投资比较活跃,增长较快。图1a显示了2004—2018年京津冀城市间制造业互投资总额的增长趋势。从3种类型的制造业来看,污染型制造业投资的增长最显著,超过了整体制造业和其他2种类型制造业投资的增长。从制造业投资的行业结构来看,2004—2018年京津冀城市间制造业互投资中污染型制造业投资占比为38.5%,占比仍较高。分阶段来看,2004—2008年污染型制造业投资占京津冀城市间制造业互投资的比例为47.5%,2009—2013年下降到45.3%,2014—2018年进一步下降到33.7%。总体上,随着京津冀制造业的结构调整,城市间制造业投资的行业类型也有所变化,但不容忽视的是,污染型制造业投资在京津冀城市间制造业互投资中仍占据重要地位,这和京津冀制造业的产业结构有关。图1b展示了根据2004、2008、2013和2018年4次经济普查数据整理的京津冀制造业中3种类型制造业的营业收入占比。由图1b可见,虽然在2008年后,污染型制造业收入占比有所降低,但污染型制造业在京津冀制造业中一直占据主导地位,其收入占比一直在50%以上。因此,京津冀制造业中污染型制造业占比较高,在城市间制造业的互投资中其增长也最为显著,需要关注随制造业投资的环境溢出问题。

2.1 总体特征及行业差异

从京津冀城市间总体制造业的互投资来看,首先计算各城市的出度和入度中心性,在城市网络中

出度较高的节点主要是北京、石家庄、天津和唐山4个城市,其中北京对京津冀各城市的制造业投资量都较高,占了京津冀城市间投资流出量的绝大部分。城市网络中入度较高的节点主要是天津、唐山、石家庄和邯郸4个城市,其中天津和唐山是制造业投资流入最多的2个城市,投资流入量远高于其他城市。从出度和入度的比较来看,只有北京是制造业投资净流出地区,其他城市包括天津在内都是投资净流入地区,因此,京津冀制造业投资城市网络体现为高度极化的单中心辐射形态。

从具体流向来看,图2展示了2004—2018年京津冀13个城市之间制造业互投资的热力图。由图2可见,北京对京津冀所有城市都有很强的投资辐射,投资流出第二多的是石家庄,其投资主要流入河北各市,尤其是邯郸、沧州和张家口。天津和唐山作为区域内工业基础较好的城市,也有较多制造业的对外投资,天津投资的流入地主要集中在唐山、北京、沧州、保定和廊坊,唐山投资的流入地主要集中在承德、石家庄和天津。在京津冀地区中,天津对北京的制造业投资相对较多,而河北各市对北京的制造业投资相对较弱,河北各市更多地向天津、唐山进行投资。

进一步比较3类制造业城市间互投资情况,图3展示了2004—2018年京津冀城市间3种类型制造业投资的网络流向图。由图3可见,3类制造业投资城市网络存在明显差异。

(1) 从污染型制造业来看,出度最高的节点是北京和石家庄,这2个城市也是投资净流出城市,入

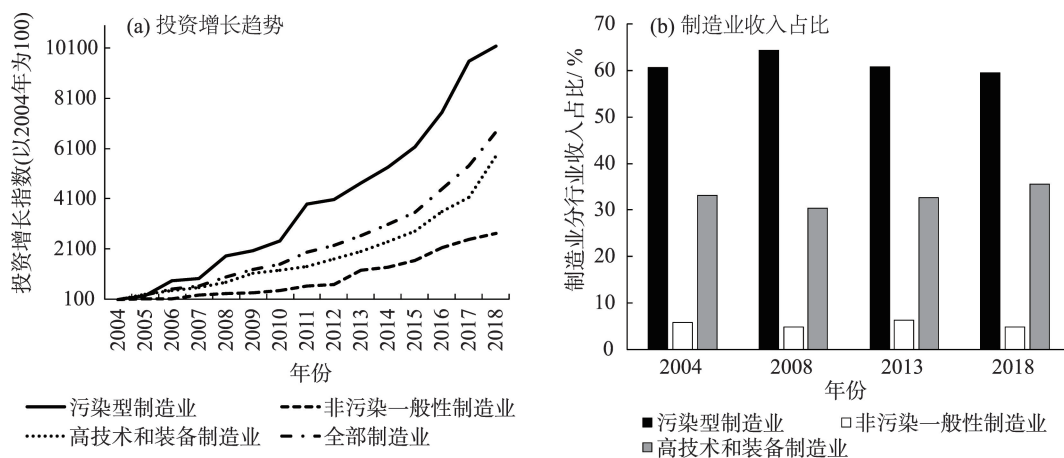


图1 京津冀不同类型制造业城市间投资增长趋势与收入占比变动

Fig.1 Investment growth trend and income share change among different types of manufacturing in cities of the Beijing-Tianjin-Hebei region

度最高的节点是唐山、天津和邯郸。唐山和天津的污染型制造业投资出度和入度都较高,但总体仍表现为投资净流入。在流向上,北京投资主要流向唐山和天津,石家庄投资主要流向邯郸。

(2) 从非污染一般性制造业来看,这类制造业在京津冀制造业中占比较低,因此投资量也相对较小。出度最高的节点是北京、石家庄和邯郸,入度

最高的节点是石家庄和天津,其中北京和邯郸是投资净流出城市。投资流向上,主要是北京向石家庄、天津和廊坊投资,以及邯郸向天津投资。

(3) 从高新技术和装备制造业来看,出度最高的节点是北京,入度最高的节点是天津、石家庄和唐山。除北京外,保定和邢台都是投资净流出城市,保定的高新技术和装备制造业投资出度和入度都较高,总体表现为微弱的投资净流出,而邢台投资入度很低,因此也表现为微弱的投资净流出。从流向上看,高新技术和装备制造业的投资流主要由北京向天津、石家庄和唐山的投资主导,其他规模较大的投资流也主要是北京向河北其他城市的投资。

总体上,污染型制造业投资城市网络相对分散,而高新技术和装备制造业投资更加围绕北京,城市网络更加紧凑和极化。

2.2 污染型制造业投资城市网络的时空演变

污染型制造业投资相比于其他类型的制造业投资更可能带来城市工业的负向环境溢出,其城市网络的时空演变值得关注。图4展示了2004—2008、2009—2013、2014—2018年3个阶段京津冀污染型制造业投资的网络流向图。由图4可见,3个阶段污染型制造业投资城市网络有明显变化。

(1) 2004—2008年,京津冀污染型制造业投资主要以北京向津冀城市的投资为主,北京投资主要流向唐山,这一时期的城市网络呈现明显的单中心辐射形态。



注:图中颜色深浅表示城市间制造业投资金额的大小,颜色越深表示城市间投资金额越高,反之亦然。

图2 京津冀城市间制造业互投资热力图

Fig.2 Heat map of manufacturing investment among cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region

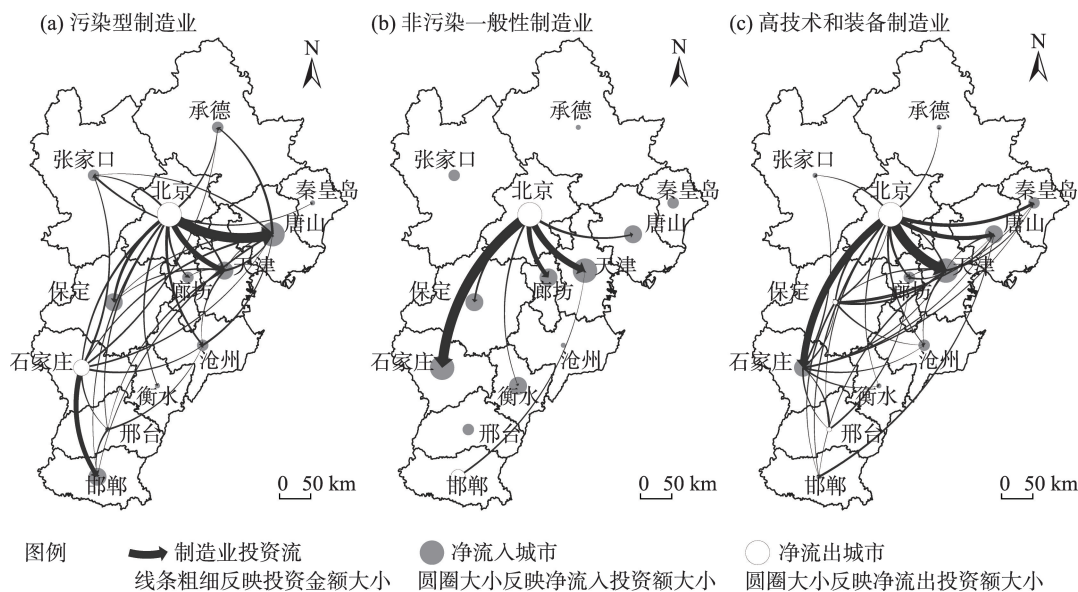


图3 京津冀城市间3种类型制造业投资网络流向图

Fig.3 Flows of three types of manufacturing investment network among cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region

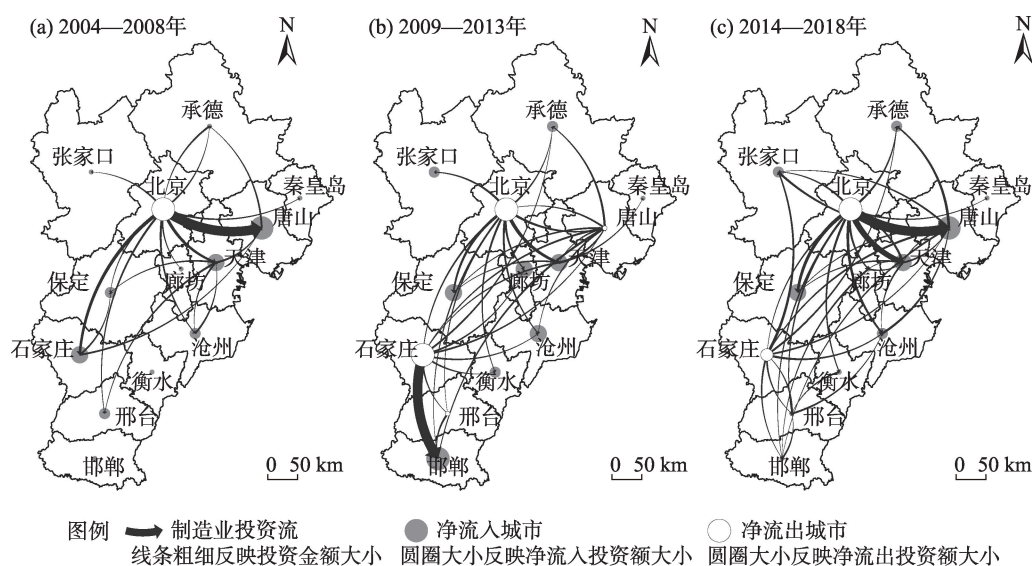


图4 分阶段京津冀城市间污染型制造业投资网络流向图

Fig.4 Flows of polluting manufacturing investment network among cities by periods in the Beijing-Tianjin-Hebei region

(2) 2009—2013年,北京和石家庄同时成为主要的投资净流出城市,构成城市网络的双中心,城市网络围绕2个中心形成南北2个区块。北京的投资主要流向天津、保定和唐山,石家庄的投资主要流向邯郸。此外,这一阶段唐山和邢台也表现为微弱的投资净流出。

(3) 2014—2018年,这一阶段仅剩北京和石家庄2个投资净流出城市,投资仍以北京和石家庄为中心,北京投资主要流向唐山、天津,石家庄投资主要流向张家口。除了北京、石家庄向外的投资,其他城市间也出现了较强的投资流,如唐山向承德和石家庄,天津向北京,以及沧州向唐山的投资等,整体上城市间投资联系更加广泛。

总体而言,京津冀污染型制造业投资城市网络的时空演变具有以下特征:① 投资联系趋于分散。2004—2008年,京津冀城市间污染型制造业84.7%的投资流入集中在入度最高的前4个城市(唐山、石家庄、天津和沧州),而在之后2009—2013、2014—2018年,该比例逐步分别下降为72.0%和70.2%,集中度明显降低。② 城市网络不断扩展。京津冀城市间污染型制造业投资呈现从中心向外围扩散的趋势,以北京向津冀城市的投资为主导,但在后期河北各市之间的投资联系有所加强,城市间投资网络化特征更加明显。③ 形成以北京和石家庄为投资净流出城市的双中心网络结构。北京的投资流出主要集中在京津唐和中部核心区;而石家庄的投

资流出主要到河北城市,相对集中在邯郸、沧州等冀南地区。

从京津冀三地来看,北京一直是污染型制造业投资净流出地区,这和北京的产业结构调整和非首都功能疏解有关;而天津在污染型制造业投资流入和流出上都比较活跃,但总体上表现为投资净流入,仍在承接污染型制造业的转移;河北城市也主要以承接污染型制造业转移为主。

3 基于城市网络的雾霾污染溢出效应

3.1 基于污染型制造业投资网络的溢出效应

为了检验京津冀城市工业基于制造业投资城市网络对雾霾污染影响的溢出效应,本文以城市 $PM_{2.5}$ 平均浓度为因变量的空间面板模型进行分析,其中城市工业水平和网络权重矩阵相乘计算的滞后变量反映城市工业通过制造业投资对网络关联地区产生的跨地区环境影响。表1列出了固定效应空间滞后自变量模型(FE-SLX)、随机效应空间滞后自变量模型(RE-SLX)、固定效应空间杜宾模型(FE-SDM)、随机效应空间杜宾模型(RE-SDM),以及进一步考虑随机扰动项空间自相关的固定效应广义空间自回归模型(FE-GNS)的结果。在模型中,我们首先使用基于污染型制造业投资的网络权重矩阵,因为相比于其他类型的制造业,污染型制造业投资可能带来更显著的负向环境溢出。

表1 基于污染型制造业投资网络的雾霾污染溢出效应的计量结果

Tab.1 Estimation results of spillover effects on haze pollution through polluting manufacturing investment network

变量	模型				
	FE-SLX	RE-SLX	FE-SDM	RE-SDM	FE-GNS
ind	-0.37 (1.56)	0.24 (1.58)	-3.01*** (0.99)	-2.76*** (1.03)	-3.26*** (0.81)
ind ²	0.08 (0.06)	0.07 (0.06)	0.13*** (0.04)	0.13*** (0.04)	0.13*** (0.03)
W×ind	0.25*** (0.05)	0.19*** (0.04)	0.12*** (0.03)	0.11*** (0.03)	-0.04 (0.04)
pop	1.77*** (0.65)	2.07*** (0.63)	0.63 (0.42)	0.80* (0.42)	0.52 (0.39)
pgdp	-3.72* (1.93)	-3.95** (1.94)	-2.71** (1.23)	-2.80** (1.27)	-4.44*** (1.17)
pgdp ²	0.13 (0.10)	0.15 (0.10)	0.09 (0.06)	0.10 (0.06)	0.16*** (0.05)
patents	-7.68*** (1.74)	-5.11*** (1.64)	-2.66** (1.11)	-2.20** (1.12)	-1.34 (1.24)
regulation	1.29 (0.93)	1.28 (0.92)	0.01 (0.59)	0.03 (0.61)	-0.06 (0.48)
roadarea	0.66** (0.31)	0.54* (0.31)	0.64*** (0.20)	0.60*** (0.20)	0.54*** (0.16)
greenarea	-1.50 (1.13)	-1.10 (1.13)	-1.10 (0.72)	-1.10 (0.74)	-0.72 (0.57)
fdi	0.02 (0.03)	0.03 (0.03)	0.01 (0.02)	0.02 (0.02)	0.01 (0.01)
W _{y_{it}}			0.77*** (0.02)		-0.28*** (0.09)
W _{E_{it}}					0.89*** (0.02)

注：括号中数据为估计值的标准误；***、**、*分别表示 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.1$ 。下同。

由表1可见,在不同的模型形式下,估计结果具有一定的稳健性。从核心变量来看,城市工业水平(ind)的一次项和二次项系数估计值在除SLX模型以外的其他模型中均显著,说明城市工业发展和空气质量之间存在EKC曲线关系。具体来说,当城市工业达到一定水平后,工业在本地经济中占比提高,即工业活动增强,会显著提高城市PM_{2.5}浓度水平,加剧城市空气质量恶化。而城市工业水平的滞后变量(W×ind)的系数估计值在除GNS模型以外的其他模型中均显著为正,说明城市空气质量不仅受到本地工业活动的影响,也受到城市网络中其他关联地区通过污染型制造业投资带来的跨地区环境影响。系数估计值为正说明城市工业会通过投资联系显著提高关联地区的PM_{2.5}浓度水平,产生基于

城市网络的负向环境溢出。

从控制变量来看,城市人口水平(pop)的系数估计值基本显著为正,说明人口生活和生产活动的集聚是加剧城市雾霾污染的重要因素。城市经济水平(pgdp)的系数估计值显著为负,说明经济发展水平的提高有助于降低雾霾污染,但其二次项的系数估计值在大部分模型中并不显著,并未体现出EKC曲线关系。城市技术水平(patents)的系数估计值在大部分模型中显著为负,说明城市技术和创新能力的提升,有助于通过技术改进和结构优化等降低工业污染强度,从而改善空气质量。此外,城市交通水平(roadarea)的系数估计值均显著为正,即交通量的增加会增加污染排放,进而恶化空气质量。而城市绿化水平(greenarea)的系数估计值为负,城市对

外开放水平(fdi)的系数估计值为正,城市环境规制(regulation)的系数估计值绝大部分为正,系数符号符合预期,但结果不够显著。因变量和随机扰动项的空间滞后项的系数均显著,说明城市间空气质量具有交互影响,且存在空间自相关,因此使用空间计量模型十分必要。

3.2 不同类型溢出效应的比较

本节进一步比较污染型制造业投资城市网络和其他类型城市网络带来的雾霾污染溢出效应的差别。根据京津冀城市间非污染一般性制造业投资与高新技术和装备制造业投资数据,创建这2种制造业投资城市网络的权重矩阵,同时创建基于城市间距离倒数的空间权重矩阵,将这些矩阵纳入空间面板计量模型,比较在不同矩阵设定下的溢出效应的估计值。表2列出了基于不同类型权重矩阵的固定效应空间杜宾模型的结果。

由表2可见,在污染型制造业投资城市网络中,城市工业对雾霾污染影响的溢出效应最强,而在其他2种类型制造业投资城市网络中,城市工业水平的滞后变量的系数估计值相对较小,说明相比于其他类型的制造业,污染型制造业投资联系产生最强的环境溢出效应。基于距离倒数的空间权重矩阵计算的城市工业水平的滞后变量的系数显著性最弱,估计值也最低,说明虽然地理邻近也是重要的空间溢出机制,但相比于产业投资联系的城市网络所产生的溢出效应要更弱一些。

基于上述结果可见,工业活动通过城市网络造成雾霾污染在城市间的溢出,主要通过城市间的投资联系,相比于传统的地理邻近的空间溢出,会产生

更大的溢出效应;且溢出效应和投资的产业类型有关,污染型制造业投资联系造成的溢出效应最强。

3.3 内生性问题

模型中城市工业水平、环境规制和城市空气质量间可能存在内生性问题,为了避免内生性对模型估计结果造成的偏误,本文参考现有相关研究^[18,21-22],采用GMM估计和工具变量最大限度克服该问题。首先,本文尝试使用解释变量的一期滞后变量作为自变量,对模型重新估计,以避免自变量与因变量间因反向因果可能产生的内生性问题,表3的模型1给出了相应的计量结果。其次,由于内生性的存在,GMM估计往往相较于传统的最大似然估计更为有效,GMM估计可以使用滞后的解释变量作为工具变量消除内生性。因此,本文使用内生变量的时空间滞后变量作为工具变量,再采用空间广义两阶段最小二乘估计(sg2sls)对模型进行估计,表3的模型2给出了GMM估计结果,模型3给出了带有工具变量的GMM估计结果。由表3可见,在控制了模型内生性后,模型结果总体仍十分稳健,核心解释变量 $W \times ind$ 的系数仍显著为正,但估计值略低于前文估计结果(见表2第一列),说明由于内生性的存在,之前估计结果可能存在对溢出效应高估的情况。

4 结论与讨论

本文基于城市网络分析和空间面板计量模型,实证分析了京津冀城市间制造业投资城市网络特征,并检验基于制造业投资城市网络的城市工业的

表2 基于不同类型权重矩阵的环境溢出效应的计量结果
Tab.2 Estimation results of environmental spillover effects based on different types of weight matrices

变量	基于分类型制造业投资的网络权重矩阵			基于距离倒数的 空间权重矩阵
	污染型制造业投资	非污染一般性制造业投资	高新技术和装备制造业投资	
Wy_{it}	0.77*** (0.02)	0.71*** (0.03)	0.79*** (0.02)	0.84*** (0.03)
ind	-3.01*** (0.99)	-3.01*** (1.07)	-3.17*** (0.98)	-3.14*** (0.79)
ind ²	0.13*** (0.04)	0.14*** (0.04)	0.14*** (0.04)	0.12*** (0.03)
$W \times ind$	0.12*** (0.03)	0.10*** (0.03)	0.08*** (0.03)	0.06** (0.02)
控制变量	控制	控制	控制	控制

注:采用固定效应空间杜宾模型。

表3 考虑内生性的环境溢出效应的计量结果
Tab.3 Estimation results of environmental spillover effects controlling for the endogeneity

变量	模型1	模型2	模型3
WY_{it}	0.76*** (0.03)	1.04*** (0.08)	1.07*** (0.09)
ind	-3.57*** (1.20)	-3.91*** (1.03)	-4.01*** (1.03)
ind ²	0.14*** (0.04)	0.15*** (0.04)	0.15*** (0.04)
$W \times ind$	0.09*** (0.03)	0.07** (0.03)	0.07** (0.03)
控制变量	控制	控制	控制

注:模型1采用解释变量的1期滞后变量作为自变量,模型2为GMM估计结果,模型3为带有工具变量的GMM估计结果。均采用固定效应空间杜宾模型。

环境溢出效应。主要结论如下:

(1) 京津冀制造业中污染型制造业占比较高,在城市间制造业的互投资中其增长也最显著,因此随污染型制造业投资而产生的环境溢出问题值得关注。相比于其他类型制造业的投资,京津冀污染型制造业投资的城市网络更加分散,在京津冀城市间存在广泛的污染型制造业投资联系,是造成城市工业雾霾污染溢出效应的主要传输渠道。

(2) 从时空演变来看,京津冀城市间污染型制造业投资联系趋于分散,呈现从中心向外扩散趋势,城市网络不断扩张,尤其是河北城市之间的投资联系趋于加强,城市间污染型制造业投资网络化特征愈加明显,可能造成对空气质量更广泛的跨地区影响。

(3) 实证结果验证了城市工业通过制造业投资城市网络带来雾霾污染的空间溢出,这种溢出的传输机制是通过城市间的产业投资联系,且和投资的产业类型有关。相比于其他类型的制造业投资,污染型制造业投资联系造成的雾霾污染溢出效应最强。

从本文的结论可以得到一些启示:一是在京津冀区域一体化和协同发展的背景下,需要关注工业活动随城市网络的环境溢出效应,产业投资联系使得城市群城市环境质量不仅和城市自身的工业活动有关,也和城市群内其他城市的产业发展和转移密切相关。因此,对于城市群地区需要统筹协调好城市间的产业发展,才能更有效地应对区域环境挑战。目前,京津冀城市群的环境治理更多强调的是

加强大气污染的联防联控联治,且也取得了积极进展,但不应忽视城市间的产业协同发展对区域环境治理同样至关重要。二是京津冀仍需持续优化制造业产业结构,目前京津冀中北京制造业的产业结构调整成效比较显著,但天津、河北还在不断接受制造业投资转移,且尚未实现制造业结构的优化和升级。建议在京津冀中部核心区,应以“京—津—雄”为中心,探索建立跨区域绿色产业协同发展示范区,共同探索绿色环保技术应用和产业协同转型升级机制。三是应加强北京与津冀城市间的技术合作,发挥好城市网络的技术溢出优势,通过企业投资带动投资流入地区的技术改进、结构优化和产业升级,避免产业转移的环境负外部性。

此外,由于数据可得性的限制,本文只分析了京津冀城市群内部城市间的制造业投资城市网络,未能考虑京津冀城市与其他城市间的制造业投资联系和转移,因此研究结论会受仅分析京津冀内部投资联系的影响,可能存在一定的局限性。

参考文献(References)

- [1] 郭一鸣, 蔺雪芹, 边宇. 中国城市群空气质量时空演化特征及其影响因素 [J]. 生态经济, 2019, 35(11): 167-175. [Guo Yiming, Lin Xueqin, Bian Yu. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air quality in China's urban agglomerations. Ecological Economy, 2019, 35(11): 167-175.]
- [2] 么相姝, 赵文吉, 杨振宇, 等. 基于Ward系统聚类的京津冀城市群空气质量时空变化特征与成因分析 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 340-350. [Yao Xiangshu, Zhao Wenji, Yang Zhenyu, et al. Spatial-temporal variation characteristics of air quality and its influencing factors of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on ward hierarchical clustering. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(2): 340-350.]
- [3] 张国兴, 温俊娜, 林伟纯, 等. 城市群建设改善还是恶化了城市空气质量? 基于双重差分模型的实证检验 [J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(5): 1245-1259. [Zhang Guoxing, Wen Junna, Lin Weichun, et al. Does urban agglomeration construction improve or deteriorate urban air quality? An empirical test based on the difference-in-difference model. Systems Engineering Theory and Practice, 2022, 42(5): 1245-1259.]
- [4] 周宏浩, 谷国锋. 外部性视角下中国城市网络演化及其环境效应研究 [J]. 地理研究, 2022, 41(1): 268-285. [Zhou Honghao, Gu Guofeng. The evolution of China's city network and its environmental effects from the per-

- spective of externalities. *Geographical Research*, 2022, 41(1): 268-285.]
- [5] Camagni R, Capello R. The city network paradigm: Theory and empirical evidence [J]. *Contributions to Economic Analysis*, 2004, 266: 495-529.
- [6] 程玉鸿, 苏小敏. 城市网络外部性研究述评 [J]. *地理科学进展*, 2021, 40(4): 713-720. [Cheng Yuhong, Su Xiaomin. Review on the urban network externalities. *Progress in Geography*, 2021, 40(4): 713-720.]
- [7] 孙淑琴, 何青青. 不同制造业的外资进入与环境质量: “天堂”还是“光环”? [J]. *山东大学学报(哲学社会科学版)*, 2018(2): 90-100. [Sun Shuqin, He Qingqing. Foreign direct investment in different manufacturing industry and its effect on environmental quality: Pollution heaven or pollution halo? *Journal of Shandong University (Philosophy and Social Sciences)*, 2018(2): 90-100.]
- [8] Chen C F, Sun Y W, Lan Q X, et al. Impacts of industrial agglomeration on pollution and ecological efficiency: A spatial econometric analysis based on a big panel dataset of China's 259 cities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120721. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120721.
- [9] Chen S M, Zhang Y, Zhang Y B, et al. The relationship between industrial restructuring and China's regional haze pollution: A spatial spillover perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 115808. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.078.
- [10] 晏龙旭, 王德, 张尚武. 城市中心体系研究的理论基础与分析框架 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(9): 1576-1586. [Yan Longxu, Wang De, Zhang Shangwu. Theoretical foundation and framework for understanding urban centers. *Progress in Geography*, 2020, 39(9): 1576-1586.]
- [11] 陈曼, 黄柏石, 刘晔. PM_{2.5}污染对中国人口死亡率的影响: 基于 346 个城市面板数据的实证分析 [J]. *地理科学进展*, 2022, 41(6): 1028-1040. [Chen Man, Huang Baishi, Liu Ye. Effects of PM_{2.5} concentration on mortality in China: A study based on city-level panel data. *Progress in Geography*, 2022, 41(6): 1028-1040.]
- [12] 别同, 韩立建, 何亮, 等. 城市空气污染对周边区域空气质量的影响 [J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4268-4275. [Bie Tong, Han Lijian, He Liang, et al. Impact of urban air pollution on surrounding areas in Beijing, Tianjin, and Hebei. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4268-4275.]
- [13] 仇方道, 蒋涛, 张纯敏, 等. 江苏省污染密集型产业空间转移及影响因素 [J]. *地理科学*, 2013, 33(7): 789-796. [Qiu Fangdao, Jiang Tao, Zhang Chunmin, et al. Spatial relocation and mechanism of pollution-intensive industries in Jiangsu Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(7): 789-796.]
- [14] 崔建鑫, 赵海霞. 长江三角洲地区污染密集型产业转移及驱动机理 [J]. *地理研究*, 2015, 34(3): 504-512. [Cui Jianxin, Zhao Haixia. Spatial relocation of pollution-intensive industry and the mechanism in Yangtze River Delta. *Geographical Research*, 2015, 34(3): 504-512.]
- [15] 豆建民, 沈艳兵. 产业转移对中国中部地区的环境影响研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(11): 96-102. [Dou Jianmin, Shen Yanbing. On the influence of the industrial transfer on the environment in the central region of China. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(11): 96-102.]
- [16] 王丽萍, 夏文静. 中国污染产业强度划分与区际转移路径 [J]. *经济地理*, 2019, 39(3): 152-161. [Wang Liping, Xia Wenjing. Interregional transfer path of pollution industry in China. *Economic Geography*, 2019, 39(3): 152-161.]
- [17] 韩立建. 城市化与 PM_{2.5}时空格局演变及其影响因素的研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(8): 1011-1021. [Han Lijian. Relationship between urbanization and urban air quality: An insight on fine particulate dynamics in China. *Progress in Geography*, 2018, 37(8): 1011-1021.]
- [18] 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. [Shao Shuai, Li Xin, Cao Jianhua, et al. China's economic policy choices for governing smog pollution based on spatial spillover effects. *Economic Research Journal*, 2016, 51(9): 73-88.]
- [19] 原毅军, 谢荣辉. 产业集聚、技术创新与环境污染的内在联系 [J]. *科学学研究*, 2015, 33(9): 1340-1347. [Yuan Yijun, Xie Ronghui. Empirical research on the relationship of industrial agglomeration, technological innovation and environmental pollution. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(9): 1340-1347.]
- [20] LeSage J P, Pace R K. *Introduction to Spatial Econometrics* [M]. New York, USA: Chapman and Hall/CRC Press, 2009.
- [21] Dou J M, Han X. How does the industry mobility affect pollution industry transfer in China: Empirical test on Pollution Haven Hypothesis and Porter Hypothesis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 105-115.
- [22] 黄磊, 吴传清. 长江经济带污染密集型产业集聚时空特征及其绿色经济效应 [J]. *自然资源学报*, 2022, 37(2): 459-476. [Huang Lei, Wu Chuanqing. Spatial and temporal characteristics of pollution intensive industrial agglomeration and its green economy effect in the Yangtze River Economic Belt. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(2): 459-476.]

Spillover effects of urban industries on haze pollution among cities of the Beijing–Tianjin–Hebei region: From the perspective of inter-city manufacturing investment network

SUN Tieshan^{1,2}, LIU Yuqi¹

(1. School of Government, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Public Governance, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In urban agglomerations, the environmental impact of urban industries may spillover between cities not only through the pollution diffusion, but also through the inter-city linkages of industrial investment and transfer. The spillover effect of urban industries on air quality through the urban industrial investment network has been largely ignored in the literature. Due to the urban network externality, the air quality in a city is not only influenced by its own industrial activities, but also closely related to the industrial development of other cities connected through the industrial investment in the urban network. By applying the investment data of manufacturing enterprises among cities in the Beijing–Tianjin–Hebei region from 2004 to 2018, this study investigated the characteristics of the inter-city manufacturing investment network in the region. This study created inter-city manufacturing investment network matrices under a spatial econometric model to empirically test the spillover effect of urban industries on haze pollution via the inter-city manufacturing investment network in the Beijing–Tianjin–Hebei region. The findings suggest that the investment in polluting manufacturing has increased significantly under the mutual investment in manufacturing between cities in the region. Furthermore, compared with other types of manufacturing investment, the polluting manufacturing investment network among cities in the Beijing–Tianjin–Hebei region is more dispersed. Those extensive investment linkages in polluting manufacturing industries between cities in the region are important channels for the spillover effect of urban industries on haze pollution. From the perspective of spatiotemporal evolution, our results indicate that the gradual expansion of the network of polluting manufacturing investment between cities in the Beijing–Tianjin–Hebei region is more likely to generate extensive cross-city environmental impacts. Our empirical results confirm the spillover effect of urban industries on haze pollution via the inter-city manufacturing investment network. The transmission mechanism of this spillover effect is based on the investment linkages between cities and depends on the types of invested industries. Specifically, the polluting manufacturing investment linkages result in more significant and stronger spillover effects of urban industries on haze pollution through the urban network. Therefore, the coordinated development of urban industries among cities in the urban agglomeration is necessary for meeting the regional environmental and sustainability challenges.

Keywords: urban network; haze pollution; spillover effects; investment linkages; Beijing–Tianjin–Hebei region