

信息化有利于降低雾霾污染吗?

——基于空间计量模型的实证检验

吕民乐,陈颖瑶

(合肥工业大学 经济学院,安徽 合肥 230601)

摘要:在分析信息化对雾霾污染影响的内在机理基础上,以2005—2015年中国285个地级及以上城市为样本,使用空间计量模型系统地考察了信息化对雾霾污染的影响。结果表明,在考虑雾霾污染的空间滞后性后,信息化有效降低了雾霾污染,在改变样本、替换变量、改变空间权重矩阵和考虑雾霾污染的时间滞后性等进行检验后,该结果依然稳健。考虑到模型的内生性问题,进一步使用工具变量法和广义空间两阶段最小二乘法进行估计,结果仍然显示信息化能显著降低雾霾污染。异质性检验结果显示,信息化的减霾效应在不同创新基础的城市具有显著差异,在不同经济发展水平城市不具有显著差异。证实了信息化在地级市层面具有减霾效应,为雾霾污染治理提供了政策启示。

关键词:信息化;雾霾污染;空间溢出效应;PM_{2.5}浓度;异质性影响

中图分类号:F062.4;F205 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6049(2021)03-0013-12

一、引言与文献综述

近年来,中国经济总量不断增加,然而雾霾污染问题已成为中国经济可持续高质量发展的“拦路虎”。根据国际能源机构的数据,2013年后中国成为全球雾霾浓度最高的国家。雾霾污染问题不仅关乎人类健康,更影响经济发展质量,已经引起了经济学界的广泛关注。围绕雾霾污染,学者们从经济集聚、技术进步、环境规制、交通状况等诸方面进行了探讨。其中,与本文较为相关的研究是技术进步对雾霾污染的影响,但完全针对这一问题的文献较少,更多的文献研究技术进步对环境的影响。Grossman and Kreuger^[1]将经济发展对环境的影响,归类为规模效应、结构效应和技术效应。这一理论此后被广泛借鉴以分析经济活动对环境的影响,包括分析技术进步对环境的影响,如Acemoglu *et al.*^[2]、申萌等^[3]、金培振等^[4]、杨莉莎等^[5]等指出技术进步对环境具有直接效应和间接效应双重影响:直接效应是技术进步能够直接改善能源效率,间接效应是经济增长会增加新的能源需求从而增加二氧化碳排放;王班班和齐绍洲^[6]指出技术进步能够降低能源强度;白俊红和聂亮^[7]则认为技术进步对环境污染的影响存在着倒U形特征。在用实证进行考察的文献,主要使用地区或行业面板数据进行检验,研究结论除支持技术进步对环境作用以负向作用为主、倒U型关系外,多数研究支持技术进步有改善环境或提高能源效率的作用,如李廉水和周勇^[8]、Leveinson^[9]、何小钢和张耀辉^[10]、姜磊和季民河^[11]等。

收稿日期:2021-04-16;修回日期:2021-05-20

基金项目:教育部人文社会科学研究规划基金项目“人工智能对产业组织的影响:机理、效应与规制重构研究”(20YJA790050)

作者简介:吕民乐(1972—),女,安徽合肥人,经济学博士,合肥工业大学经济学院副教授,研究方向为产业组织与技术创新;陈颖瑶(1996—),女,安徽六安人,合肥工业大学经济学院硕士研究生,研究方向为产业经济学。

信息通信技术作为一类特殊的技术,其对经济、对环境的影响机理与一般的技术既有相似之处,又有不同之处。信息通信技术的扩散在 20 世纪末形成了“新经济”现象,目前仍处于快速发展和渗透当中。中国政府特别重视信息化及绿色发展,在《中国制造 2025》《工业绿色发展规划(2016—2020 年)》等文件中都提到要推动信息化建设实现工业部门绿色发展。因此,对信息化如何影响环境、影响雾霾污染进行理论和实证研究有重要的价值。

信息化对环境的影响机理研究,基本上仍以 Grossman and Kreuger^[1]的理论为基础,如 Romm^[12]认为,信息化能够通过改进企业生产线提高能源效率,还可以通过减少个人交通需求改变能源消耗结构。Takase and Murota^[13]认为信息化一方面通过促进经济增长增加能源消耗,另一方面影响产业结构,即电子产业快速增长,钢铁和其他的传统产业衰退,从而减少能源消耗。陈庆江等^[14]、刘洪涛和杨洋^[15]认为信息化通过影响技术进步、产业结构、资源配置提高能源效率或减少碳排放。Shahnazi and Dehghan^[16]提出信息化对环境的影响有使用效应、替代效应和成本效应三种效应,使用效应是 ICT 设备的生产、使用所带来的效应,包括两方面,一是 ICT 设备的制造、使用会带来新一轮的能源消费,对环境有负面影响;二是将 ICT 设备应用于污染物监测又可以改善环境。替代效应是信息化带来生产过程的重组,能源消耗的减少,成本效应是指信息化使其他商品和服务价格降低,需求增加,从而能源效率降低和二氧化碳排放增加。张三峰和魏下海^[17]指出信息通信技术的应用可以引致企业技术进步和结构优化从而降低企业能源消耗。

信息化对环境影响的实证研究结论大致有三类不同的结论:第一类,信息化能够提高能源效率或改善环境。部分文献使用行业或企业数据进行研究,如樊茂清等^[18]使用 1981—2005 年中国 33 个行业的数据,研究发现信息通信技术投资及其体现的技术进步有效降低了中国多数部门的能源强度;Khuntia *et al.*^[19]以 300 家印度制造业企业为研究对象,张三峰和魏下海^[17]使用世界银行 2001 年—2012 年中国制造业企业调查数据,均验证了中国制造业企业对信息通信技术的应用能降低能源强度。另外一些文献使用地区数据进行研究,如杜雯翠^[20]对我国 2003—2012 年 281 个城市的面板数据进行分析,发现污染排放程度低时,信息化能够显著降低环境污染;Nagao *et al.*^[21]使用 2013 年日本数据进行研究,结论是信息化减少了 4086 万吨二氧化碳排放。第二类,信息化对能源消耗或环境有负面影响,如 Sadorsky^[22]使用 1993—2008 年 19 个新兴市场经济国家的数据进行实证,发现信息化增加了电力消费;Danish *et al.*^[23]对 1990—2015 年 11 个新兴市场经济国家数据进行研究,结论是信息化会对环境产生负面影响。第三类,信息化对环境的影响呈倒 U 型,如 Higón *et al.*^[24]分析 1995—2010 年 142 个国家的面板数据,发现信息化与二氧化碳排放的关系呈倒 U 型;Shahnazi and Dehghan^[16]对伊朗各省的实证研究,也拟合出了信息化与二氧化碳排放之间的倒 U 型关系,但伊朗各省信息化水平已越过倒 U 型的拐点。

通过对文献的阅读,发现相关研究存在着以下几个方面不足:一是研究信息化与雾霾污染关系的文献较少,同时相关文献对于技术进步或信息化影响环境的机理分析不够深入,且未能紧密结合信息通信技术或信息化的特点;二是研究使用数据以国家面板数据、省级面板数据、行业面板数据或企业微观数据为主,这些数据用于研究信息化与雾霾污染问题都有不足之处,首先雾霾污染是空间层面的问题,且来源不仅包括生产者,也包括消费者,因此企业数据和行业数据不适用;其次使用国家和省级面板数据,单个样本的空间范围偏大,不如使用空间范围更小的城市数据准确;三是研究方法上,运用空间计量模型对二者关系进行实证检验的相关文献较少。

与已有文献相比,本文的边际贡献在于:(1)提炼出信息化的四个特点,即创新互补、范式变革、信息密集和网络联通,并基于这些特征,从生产组织和生活方式变革、产业体系转型、清洁技术创新、雾霾治理四个方面深入探究了信息化降低雾霾污染的内在机理;(2)使用中国 285 个地级及以上城市的面板数据,运用静态和动态空间计量模型以及广义空间两阶段最小二乘法(GS2SLS)进行实证检验,首次提供了信息化降低 PM2.5 浓度的地级市层面证据;(3)采用 1984 年每百万人邮局数量与上一年全国互联网普及率交乘作为信息化的工具变量,尽可能地缓解了内生性问题;(4)验证了在不同创新

基础和经济发展水平的城市信息化对雾霾污染的影响是否存在异质性。

二、影响机制与研究假说

信息化是运用信息通信技术改造传统的经济、社会结构的过程^[25],具有以下四个特点:一是创新互补。信息通信技术作为“使能性技术”(Enabling Technologies),它通常是开辟新的技术方向和技术机会,而不是提供完全的、最终的解决方案^[26]。因此,信息化并不是单纯的技术应用,信息化通常伴随着其应用领域形成持续性的互补性创新,并形成正向反馈,激发更多的互补性创新。二是范式变革。信息通信技术以芯片技术为核心和支柱技术,在观念、任务、范式上与以往的任何技术根本不同,具有重大突破性。信息化的过程,既包含着许多根本性的创新群,又伴随着许多技术系统的变更,几乎影响到经济的每一个部门,并改变人们的常识,是技术-经济范式的变革。三是信息密集。信息通信技术所要解决的问题,是以信息的获取、传输、处理、存储、显示和利用为主。信息化过程中,信息可获得性逐渐提高,获取信息的成本也不断降低,信息资源得到更充分的开发利用,信息成为各产业的关键要素,信息化过程就是信息密集性不断提高的过程。四是网络联通。信息通信技术的发展,如互联网等技术的发展,很大程度上突破了人际联系的时空限制,使人们能够在更大范围内,更快捷、更频繁地建立联系,无论从广度还是频度上都提高了社会网络的联通度。基于以上对信息化特点的分析,信息化会从以下四个方面影响雾霾污染。

(一) 信息化引发生产组织、生活方式的集约转化

信息化对企业生产组织的影响,与信息化的创新互补特点密切相关。企业信息化的过程不是简单的应用信息通信技术的过程,这一过程中激发了大量的互补性创新。这些互补性创新,可以涉及企业产品产前、产中、产后的各个环节,引发企业生产组织的集约转化,改善企业资源整合,提高企业生产效率,降低单位产出的物资消耗和能源消耗。如工业企业在生产设备上使用传感器和智能监控设备,能够全面了解生产加工环节的操作情况、实时监测能源消耗情况,帮助企业进行产品生态设计,最大限度降低单位产品的资源能源消耗。应用ERP系统、CRM系统等能够有效提供企业资源的使用信息和客户信息,优化企业生产流程的设计,进而提高企业资源利用效率。

信息化是整个技术-经济范式的变革,不仅改变了企业的生产组织,还通过影响社会网络联通的广度和频度,深刻改变人们的生活方式,改变人们的观念和常识。信息化使线上与线下生活紧密交融,电子商务、移动支付、远程教育得到推广普及,减少人们的出行次数,降低了机动车使用频率,减少了机动车尾气排放和道路扬尘。信息通信技术的发展赋能各项开放平台,大大拓展了资源交换和共享的边界,实现了全社会资源的最优匹配。如二手交易平台在更大范围内对闲置资源进行整合和再利用,也推动了消费观念、消费行为的潜移默化。共享经济平台普及了共享汽车、共享单车的使用,出行方式选择上逐渐多样化,有益于减少能耗和机动车尾气排放。同时出行的便捷化在一定程度上也改变了人们的购车观念,进一步减少了机动车尾气的排放^[27]。智能交通系统和地图软件能够让用户实时了解到车流量、车流速度、道路拥堵以及其他道路异常状况,帮助用户合理规划出行路线,提高道路的通行能力,缓解交通拥堵,降低雾霾污染^①。

(二) 信息化促进产业体系的绿色转型

信息化过程信息密集度逐渐提高是产业体系绿色转型的关键。一方面,信息化通过创造新的最终需求和中间需求催生了一些与信息技术相关的新兴产业,如信息技术制造业、信息服务业、云计算,等等。这些产业一般都是信息密集度高、能源依赖度低、雾霾污染排放少的产业,随着这些新兴产业的产生和发展,产业体系的能源消耗强度会逐渐降低,雾霾污染物的排放量也会逐渐减少。另一方面,信息化通过与传统产业的融合,深度改造传统产业,实现传统产业的绿色转型。信息化使信息成

^①交通状况的拥堵会导致车内燃料燃烧不充分,汽车尾气排放的污染物含量是正常行驶的2~3倍^[28]。

为各产业的关键要素,信息技术成为产业运行的主要平台,整个产业体系的信息密集程度提高^[29],因而能耗、污染降低。而且,信息化与传统产业的融合是不平衡的,由于规模经济、资金保障等原因,大企业在创新方面更有优势^[30],因此,那些个体规模较大的行业如钢铁、机械、冶金等更有优势与信息化融合,而这些行业往往也是高能耗、高污染的行业,这样就更大程度上降低了整个产业体系的能耗强度和雾霾污染排放。

(三) 信息化助推清洁技术的创新

为适应环境规制,企业对清洁技术的需求越来越大,而信息化的网络联通性特点,为这类技术创新提供了助力。信息化扩大了知识搜寻边界,提高了知识传递速度,降低了知识传递成本,促进了知识共享,有助于企业增加知识存量,也有利于企业减少知识获取和技术创新方面的路径依赖,提高创新能力。同时,还为企业的开放式创新提供了条件和可能,在更大空间范围内引入外部创新资源,实现企业与外部创新者的合作创新。在国家逐渐加强环境规制的背景下,这些都能促进企业在清洁生产、清洁能源和可再生能源开发方面的技术创新及应用,如除尘技术、建筑扬尘控制技术和光伏发电技术等,降低雾霾污染物排放。

(四) 信息化提高雾霾治理的精准度和协作性

信息化可以从两个方面影响雾霾治理水平,一是雾霾监测。信息化通过创新雾霾污染监管方式,提高雾霾监测水平,例如将各类传感器、智能监控技术应用于遥感分析和空气质量监测领域,能够实现雾霾污染源的精准定位和监测。二是雾霾污染数据采集和整理。信息化能够帮助环境规制部门动态采集雾霾污染物生成、演化、降解和危害的相关信息,同时,还可以帮助整合来自不同来源的雾霾污染数据信息,打破政府、企业以及社会公众之间的信息壁垒,并对这些数据进行分析,形成全面完整的雾霾污染数据信息系统。环境规制部门可以利用这些数据信息,对雾霾污染发展趋势进行准确预测,为有效治理提供依据,还可以制定具有针对性的雾霾污染物排放标准,给高污染物排放的行业企业一定的压力,提高雾霾治理的精准度。同时也能够引导企业前端预防、监测及末端治理潜在的雾霾污染物,还可以通过在互联网平台及时、公开地将雾霾污染相关信息反馈给社会各界,提高公众环保意识,引导公众参与到治理雾霾污染行动中,提高雾霾治理的协作性。

根据以上分析,本文提出第一个理论假说:

假说1:信息化有利于降低雾霾污染。

如果一个城市创新基础好,知识存量高,信息化带来的互补性创新可能就越多,从而更有利于降低能源消耗、促进清洁生产,减少雾霾污染,即信息化的减霾效应可能会因为城市创新基础不同而不同。由此,进一步提出以下假说:

假说2:信息化的减霾效应可能会因为城市创新基础不同存在差异性。

三、研究设计

(一) 基准计量模型的设定

考虑到信息化对雾霾污染的影响可能存在着空间关联性,本文通过构建静态空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)进行估计,其计量模型相应表示为式(1)和式(2):

$$\ln PM_{it} = \rho W \cdot \ln PM_{it} + \alpha_0 + \alpha_1 \ln ICT_{it} + \alpha_2 X_{it} + v_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$\ln PM_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln ICT_{it} + \beta_2 X_{it} + v_i + v_t + \mu_{it} \quad (\text{其中 } \mu_{it} = \gamma W \cdot \mu_{it} + v_{it}) \quad (2)$$

其中, PM_{it} 表示*i*城市在*t*时期的雾霾污染; ICT_{it} 表示*i*城市在*t*时期的信息化; ρ 和 γ 分别是空间滞后项系数和空间误差项系数; W 为空间权重矩阵; X_{it} 为模型的控制变量; v_i 和 v_t 分别表示城市固定效应和年份固定效应; ε_{it} 、 μ_{it} 、 v_{it} 表示随机误差项。

(二) 变量选取与数据来源

1. 被解释变量

雾霾污染(PM)是本文所关注的被解释变量。与 PM_{10} 等颗粒物相比, $PM_{2.5}$ 直径更小,且更不易沉降,可以使用遥感技术进行监测,能够较好地量化雾霾污染,反映雾霾污染的真实水平^[31],因此,

本文选取 PM2.5 年均浓度值来衡量雾霾污染。

2. 解释变量

信息化(ICT)为本文的解释变量,用互联网使用人数占总人口数的比重来表示,反映了互联网的普及程度,与一个城市或地区的信息化水平有一定的对应,因此也常被用以测度信息化水平^[16,20]。

3. 控制变量

(1) 经济密度(ED),使用各城市 GDP 与建成区面积的比值衡量,根据环境库兹涅茨曲线假说,同时将经济密度的二次项引入模型。(2) 产业结构(SEC),这里采用第二产业增加值占 GDP 比重衡量。(3) 环境规制强度(ER),以各城市工业污染治理投资额衡量。(4) 对外开放(OPEN),采用进出口总额占 GDP 比重表示。(5) 人口密度(PD),采用单位面积的年末人口数量衡量。(6) 科研投入(RD),采用城市科学技术支出与财政一般预算支出的比值表示。(7) 教育程度(HC),采用普通高校在校学生数占城市人口总数的比重表示。(8) 公交服务(BUS),使用城市公共汽车客运量衡量。(9) 城市绿化(GREEN),采用城市绿化覆盖率进行衡量。

本文采用哥伦比亚大学社会经济数据和应用中心使用卫星监测获得的不同城市 PM2.5 年均浓度值数据。除 PM2.5 数据外,其余数据来源于各年的《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》和各省统计年鉴。样本区间为 2005—2015 年中国 285 个地级及以上城市,各变量的描述性统计分析如表 1 所示。

表 1 变量描述性统计

变量	样本数	均值	中位数	标准差	最小值	最大值
PM	3 135	54.821 4	50.131 5	24.679 5	7.282 0	179.296 0
ICT	3 135	122.845 9	80.952 0	162.970 0	0.060 0	3 663.476 3
ED	3 135	597.004 4	494.508 1	465.087 8	4.166 9	5 221.901 4
SEC	3 135	49.418 9	49.890 0	10.959 2	15.170 0	90.970 0
ER	3 135	228.005 9	164.600 0	204.683 0	5.300 0	1 416.200 0
OPEN	3 135	0.196 0	0.080 0	0.359 5	0.000 0	3.480 0
PD	3 135	4.248 4	3.525 0	3.254 0	0.047 0	26.481 1
RD	3 135	0.206 3	0.846 2	1.140 5	0.026 5	9.883 3
HC	3 135	1.584 7	0.760 0	2.184 0	0.000 0	12.940 0
BUS	3 135	203.209 9	66.049 9	455.737 2	0.070 0	5 256.024 4
GREEN	3 135	37.162 8	38.800 0	8.730 3	1.410 0	95.250 0

(三) 空间权重的设定和空间相关性检验

考虑到雾霾污染本身可能存在空间溢出效应,本文构造了三种空间权重矩阵来反映雾霾污染的空间关联性,分别为地理距离空间权重矩阵(W_1)、空间邻近权重矩阵(W_2)与空间经济距离权重矩阵(W_3)。其中, W_1 的元素 w_{ij} 用两个地级市间直线距离的倒数表示,其直线距离依据经纬度计算所得。由于邻近城市之间可能受彼此雾霾污染的影响, W_2 是本文依据两个地级市是否有共同的行政边界建立的基于邻近关系的 0 ~ 1 权重矩阵,即 i 城市与 j 城市相邻 W_2 的元素 w_{ij} 为 1,不相邻为 0。考虑到各地级市的经济水平存在空间相关性,本文还构建了经济距离权重矩阵 W_3 ,元素 w_{ij} 用 i 城市和 j 城市实际人均 GDP 绝对差值的倒数表示。空间相关性检验最广泛的方法是通过测算 Moran's I 指数,本文以我国 285 个地级及以上城市作为研究单元,分别测度雾霾污染在 2005—2015 年间的 Moran's I 指数,表 2 列出了空间相关性检验结果。可以看出,在三种空间权重矩阵下, Moran's I 指数均显著为正,表明用空间计量模型进行分析是合理的。

表 2 2005—2015 年我国 PM2.5 年均浓度的 Moran's 指数

年份	W_1	W_2	W_3
2005	0.210 ***	0.830 ***	0.073 ***
2006	0.215 ***	0.813 ***	0.057 **
2007	0.220 ***	0.822 ***	0.077 ***
2008	0.196 ***	0.802 ***	0.085 ***
2009	0.185 ***	0.781 ***	0.079 ***
2010	0.201 ***	0.805 ***	0.075 ***
2011	0.214 ***	0.818 ***	0.065 ***
2012	0.212 ***	0.824 ***	0.067 ***
2013	0.209 ***	0.805 ***	0.051 **
2014	0.188 ***	0.787 ***	0.075 ***
2015	0.208 ***	0.806 ***	0.080 ***

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

图1以 W_1 为例,绘制了2005年、2010年和2015年城市雾霾污染的Moran散点图,其横轴为标准化的PM2.5浓度值,纵轴为PM2.5浓度值的空间滞后值。从图1可以看出,大部分城市位于第一(高一高)、第三(低—低)象限,可以进一步表明雾霾污染存在正向空间溢出效应。

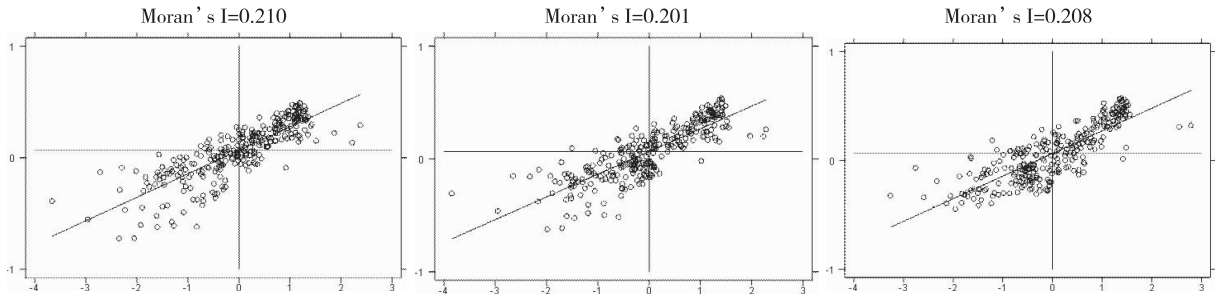


图1 地理距离空间权重矩阵下部分年份中国285个城市雾霾污染散点

以上分析表明,中国城市间的雾霾污染存在着显著的空间关联性,用普通面板模型进行估计,估计结果可能有偏差,采用空间计量模型来研究信息化对雾霾污染的影响具有一定的合理性。为确定最终估计模型,首先需要进行LM检验。检验结果汇报在表3中,在地理距离空间权重矩阵(W_1)设定下,空间误差模型通过了显著性检验,而针对空间滞后模型的LM检验均不显著,故而,空间误差模型更适宜本文研究。

表3 空间面板模型的LM检验

LM 检验	W_1		W_2		W_3	
	χ^2	P 值	χ^2	P 值	χ^2	P 值
no lag	0.491	0.483	27.810	0.000	1.833	0.176
no lag(robust)	0.117	0.733	28.504	0.000	1.780	0.182
no error	20.394	0.000	0.028	0.978	0.065	0.799
no error(robust)	20.019	0.000	0.012	0.911	0.012	0.912

在空间邻近权重矩阵(W_2)设定下,依据检验结果空间滞后模型更为合理。而空间经济距离权重矩阵(W_3)的LM检验结果都未通过显著性检验,因此,本文将依据空间权重矩阵 W_1 和 W_2 进行实证分析。

四、实证结果与分析

(一) 基准回归结果

表4第(2)列至第(5)列报告了基于空间权重矩阵 W_1 的空间误差模型和空间滞后模型估计结果,根据Hausman检验结果,加入了城市和年份固定效应。由表3可知空间误差模型更适当,因此我们主要关注空间误差模型的估计结果,即表4第(3)列和第(5)列。为了使结果更具有对比性,我们也汇报了非空间面板模型(双向固定效应模型)的估计结果,如表4第(1)列所示。从结果可以看出,当不考虑空间因素影响时,普通面板估计可能会高估信息化的减霾效应。

表4 信息化与雾霾污染:基准回归

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	非空间面板模型	SLM	SEM	SLM	SEM
ρ		0.988*** (0.004)		0.988*** (0.004)	
γ			0.988*** (0.004)		0.988*** (0.004)
$\ln ICT$	-0.028*** (0.006)	-0.016*** (0.004)	-0.011*** (0.004)	-0.018*** (0.004)	-0.013*** (0.004)
控制变量	YES	NO	NO	YES	YES
Log-L		3 927.498	3 922.091	3 965.853	3 938.264
城市固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
观测值	3 135	3 135	3 135	3 135	3 135
R^2	0.202	0.001	0.003	0.003	0.384

注:括号内为系数的标准误,*、**和***分别表示在10%、5%和1%的显著性水平下显著。

表4第(3)列和第(5)列显示,误差项的空间自回归系数为0.998,且通过了1%的显著性检验,这

与 Moran's I 指数一致,再次表明考虑雾霾污染空间溢出效应,以此研究信息化的减霾效应具有一定的合理性。所有估计结果都显示了,信息化对雾霾污染存在抑制作用,并在 1% 水平上显著。因此,本文的假说 1 得到初步验证。

(二) 稳健性检验

1. DID 稳健性检验

智慧城市是基于新一代信息通信的城市发展模式,实质是信息化发展的高级形态,智慧城市建设可以作为信息化发展的政策冲击^[32]。因此将我国 2012 年施行智慧城市试点政策当作一次准自然实验,运用 DID 方法对信息化的减霾效应进行检验。在本文的样本区间为 2005—2015 年,将 2012 年的首批智慧城市试点城市作为处理组^①,非试点城市设定为对照组。为了评估政策的效力,删除了有些地级市只是将某个区、县设置为试点城市。基于此,构建如下计量模型:

$$\ln PM_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Treat_i \times Post_t + \alpha_2 X_{it} + v_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中, $Treat_i$ 表示是否为第一批智慧城市试点城市,智慧城市试点城市定义为 1,其他城市定义为 0。 $Post_t$ 表示该年份是否为 2012 年前后,将 2012 年及之后定义为 1,其他为 0。 $Treat_i \times Post_t$ 为城市虚拟变量与政策时间虚拟变量的交叉项,其他变量含义同式(1)和式(2)。表 5 第(1)列结果显示,智慧城市建设与雾霾污染存在着显著的负相关关系。

2. 替换解释变量

既有的研究表明,冶金、化工和发电等行业,生产主要依靠能源消耗,由此排放的污染物是造成雾霾污染的主要原因^[33],有必要验证工业企业信息化程度的提高是否能降低雾霾污染。为此,采用 2005 年世界银行在中国 120 个地级市的营商环境调查数据构建 IT 指数,将调查问卷中企业数据加总,得到城市的接受正规 IT 培训的劳动力比例和城市经常性使用计算机的员工比例,这两项指标相加进而构成城市 IT 指数。与中国工业企业数据库(2004 年企业拥有计算机终端的数量)相比,世界银行数据更能体现信息化的实际应用情况。表 5 第(2)列至第(4)列分别表示 OLS 模型、空间截面滞后模型和空间截面误差模型,从结果来看,信息化的系数均显著为负,再次验证了信息化对雾霾污染的抑制作用。

3. 剔除直辖市和异常值

首先,考虑到直辖市的经济发展水平较高,在城市属性、经济发展水平和基础设施建设等方面也与普通地级城市不同,因此在研究样本中剔除直辖市数据,结果见表 6 第(1)列。可以看出,信息化对雾霾污染仍然存在抑制作用。其次,为排除异常值的干扰,本文删除了雾霾污染程度较高的两个年份进行回归,即 2007 年和 2013 年,估计结果见表 6 第(2)列。从结果中看出,信息化与雾霾污染显著负

表 5 信息化与雾霾污染:稳健性检验(一)

变量	(1) DID	(2) OLS	(3) SAR	(4) SEM
ρ			0.945 *** (0.000)	
γ				0.928 *** (0.000)
$Treat \times Post$	-0.023 ** (0.011)			
$\ln ICT$		-0.142 *** (0.050)	-0.120 ** (0.007)	-0.103 * (0.029)
控制变量	YES	YES	YES	YES
常数项	4.523 *** (0.663)	3.704 (5.018)	1.078 (0.799)	3.806 (0.381)
Log-L			-17.378	-23.568
城市固定效应	YES	NO	NO	NO
时间固定效应	YES	NO	NO	NO
观测值	2112	120	120	120
R ²	0.076	0.475		

注:括号内为系数的标准误,*、**和***分别表示在 10%、5%和 1%的显著性水平下显著。

①智慧城市试点名单的信息来自住建部公布的正式文件,首批公布于 2012 年,之后在 2013 年和 2014 年又相继公布两批。在回归过程的样本里没有加上 2013 年和 2014 年相继增加的智慧城市试点城市。

相关,与基准回归结果一致,表明了信息化减霾效应比较可靠。

4. 替换空间权重矩阵

为了检验估计结果是否受空间权重矩阵选择的影响,本文进一步选择空间邻近权重矩阵(W_2),采用空间滞后模型来检验基准回归结果是否稳健,估计结果汇报在表6第(3)列中。结果显示,雾霾污染存在较为明显的空间溢出效应;信息化与雾霾污染依然存在着显著的负相关关系。

5. 使用动态空间滞后模型进行检验

雾霾污染具有时间上的动态依存关系,前一期雾霾污染程度高会直接影响到当期的雾霾污染,前文仅反映了静态分析的估计结果,为了增强结论的可靠性,进一步使用动态空间滞后模型进行检验^①。具体形式如下:

$$\ln PM_{it} = \phi \ln PM_{it-1} + \rho W \cdot \ln PM_{it} + \alpha_0 + \alpha_1 \ln ICT_{it} + \alpha_2 X_{it} + v_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中, ϕ 表示雾霾污染水平的动态滞后系数,其他变量含义同式(1)和式(2)。此外,在估计方法上,使用拟极大似然估计方法对模型4进行估计,结果汇报在表6第(4)列。结果显示,雾霾污染的时间滞后系数 ϕ 在1%的水平上显著为正,表明当期的雾霾污染程度确实依赖于上一期的雾霾污染程度,这与邵帅等^[34]研究结论一致。信息化的回归系数显著为负,与静态面板模型结果一致,再次验证了信息化的减霾效应。

(三) 内生性问题

前文的研究结论已经表明,信息化有利于降低雾霾污染,但另一种可能是,两者之间存在反向因果关系,雾霾污染不严重的城市可能是信息技术水平较高的城市,因此其信息化程度也较高。同时,影响雾霾污染的变量很多,可能还存在一些不可观测的同时影响雾霾污染和信息化的变量,因此前述模型存在遗漏变量问题。本文通过寻找信息化的工具变量进行更稳健的估计,同时使用广义空间两阶段最小二乘法(GS2SLS)进行估计,该方法可以有效控制内生性和空间溢出效应。

本文借鉴黄群慧等^[35]的思路,选取1984年每百万人邮局数的历史数据作为信息化的工具变量。一方面,在1998年电信系统从邮电系统分离、信息通信技术广泛应用之前,信息传递主要依赖于邮局,固定电话等最初的信息通信技术也主要由邮局负责。而且,邮局数量会影响城市信息基础设施建设,以及影响社会网络联通,改变人们的生活方式、观念和常识,进而推动信息化发展。所以1984年邮局数量作为信息化的工具变量满足了相关性的要求。另一方面,历史上的邮局数量与雾霾污染并没有直接的关联性。据此认为1984年每百万人邮局数量可以作为信息化的理想工具变量。需要说明的是,本文研究依据的是面板数据,而1984年每百万人邮局数量不是时变变量,为了反映工具变量在地级市层面随时间的变化,本文依据Nunn and Qian^[36]提出的思想进行相应的处理,首先构建各城市1984年每百万人邮局数量(与个体有关),然后再将其与上一年全国互联网普及率(与时间有关)交乘,最终得到信息化的工具变量($post \times I_{t-1}$)。

表6 信息化与雾霾污染:稳健性检验(二)

变量	(1) 剔除直辖市	(2) 剔除雾霾 污染异常值	(3) 替换空间 权重矩阵	(4) 动态空间 滞后模型
ρ			0.911*** (0.006)	0.918*** (0.006)
γ	0.984*** (0.005)	0.988*** (0.004)		
$\ln PM_{t-1}$				0.058*** (0.009)
$\ln ICT$	-0.014*** (0.004)	-0.011*** (0.004)	-0.006*** (0.002)	-0.004* (0.002)
控制变量	YES	YES	YES	YES
Log-L	3 718.073	3 186.505	5 552.553	5 020.264
城市固定效应	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES
观测值	3 091	2 565	3 135	2 850
R ²	0.389	0.390	0.255	0.626

注:括号内为系数的标准误,*、**和***分别表示在10%、5%和1%的显著性水平下显著。

①由于动态空间面板模型只能用于空间滞后模型和空间杜宾模型,所以,本文采用空间滞后模型进行空间动态面板模型检验。

表7 信息化与雾霾污染:工具变量估计

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	2SLS 第一阶段回归		2SLS 第二阶段回归		GS2SLS
ρ					0.029*** (0.005)
$\ln ICT$			-0.436*** (0.066)	-0.303** (0.115)	-0.026*** (0.007)
$post \times I_{t-1}$	0.088*** (0.010)	0.035*** (0.008)			
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES
城市固定效应	NO	YES	NO	YES	NO
时间固定效应	NO	YES	NO	YES	NO
不可识别检验					
Kleibergen-Paaprk LM 统计量	72.709***	19.627***			
弱工具变量检验					
Kleibergen-Paaprk Wald F 统计量	82.891***	19.669***			
Cragg-Donald Wald F 统计量	97.386*** [16.38]	22.723*** [16.38]			
稳健弱识别检验					
Anderson-Rubin Wald 检验	53.770***	10.170***			
观测值	3 135	3 135	3 135	3 135	3 135
R ²			0.425	0.769	0.417

注:括号内为系数的标准误,*、**和***分别表示在10%、5%和1%的显著性水平下显著。中括号内数值为Stock-Yogo弱工具变量检验在10%水平上的临界值。

回归结果呈现在表7中。第(1)列至第(4)列为2SLS回归结果,第(5)列报告了基于空间邻近权重矩阵(W_2)的GS2SLS估计结果,所有的回归均控制了前文出现的控制变量。在第(1)列和第(2)列的2SLS第一阶段回归结果中,可以发现本文选择的工具变量和内生性解释变量显著相关。此外,表7还报告了工具变量的检验结果,各项检验均在1%水平拒绝了原假设,进一步说明工具变量满足了相关性的要求。在第(3)列、第(4)列的2SLS第二阶段回归结果以及第(5)列基于GS2SLS的结果中,显示了信息化系数显著为负,与前文估计结果无明显差异,证实了本文结论是可靠的。

(四) 异质性分析

1. 城市创新基础异质性分析

本文根据城市综合创新指数^①将所有城市分成低创新基础城市和高创新基础城市,以检验信息化的减霾效应在不同创新基础的城市是否存在异质性。具体是依据城市综合创新指数将所有城市三等分,一等分组为低创新基础城市,二、三等分组为高创新基础城市,以低创新基础城市为基准,在基准计量模型(2)式的基础上引入创新基础虚拟变量,将信息化与创新基础虚拟变量交互($\ln ICT \times high$),具体估计结果汇报于表8中的第(1)列。结果显示,信息化的回归系数仍显著为负,同时,信息化与创新基础交互项的系数显著为负,这表明信息化的减霾效应在不同创新基础城市确实存在显著差异,城市的创新基础越好,信息化的减霾作用越强,假说2得到验证。

2. 城市经济发展水平异质性分析

已有研究发现,信息化对环境的影响可能与经济发展水平有关^[24],因此本文根据经济发展水平将所有城市分成高经济发展水平城市和低经济发展水平城市两组,以检验不同城市经济发展水平下信息化对雾霾污染的异质性影响。具体做法与城市创新基础异质性分析相似,依据人

①数据来源于寇宗来和刘学悦^[37]发布的《中国城市和产业创新力报告》。

均 GDP 将所有城市三等分,以低经济发展水平城市为基准来构建经济发展水平虚拟变量,在基准计量模型(2)式的基础上将信息化与经济发展水平虚拟变量交互($\ln ICT \times economy$),回归结果见表 8 第(2)列。结果表明,信息化显著降低了雾霾污染,信息化与高经济发展水平城市虚拟变量的交互项的系数为负,但未通过显著性检验,说明信息化的减霾效应在不同经济发展水平的城市没有显著差异,这意味着在不同经济发展水平城市都可以大力推动信息化,发挥信息化减轻雾霾污染的作用。

五、结论与政策启示

本文关于信息化与雾霾污染关系的研究表明,雾霾污染具有空间溢出效应,在其他条件不变情况下,信息化能够有效降低雾霾污染,且这一影响不因样本、变量测度以及估计方法的改变而改变。另外,信息化的减霾效应在创新基础不同的城市表现出显著的差异,创新基础越好的城市,信息化减霾效应越强。但在不同经济发展水平的城市不具有显著差异。

上述研究结论对于推进城市信息化建设、控制雾霾污染具有一定的政策启示。第一,加大信息化基础设施建设,为信息化减霾效应的发挥提供硬件和软件条件。如深入实施“宽带中国”战略,加快 5G 网络、工业互联网等新型基础设施建设进度。第二,重点培育信息化相关新产业,并提高传统产业信息密度以促进传统产业绿色转型,打造信息化、智能化生产体系。一方面,鼓励和推动新兴产业发展,同时为新兴产业发展最大程度提供金融支持和政策上的保障和扶持;另一方面,利用信息化对高污染、高能耗的传统产业进行改造,推动传统产业向数字化、智能化方向发展,加快构建绿色工业体系。第三,积极推进城市雾霾治理信息化,提高雾霾监测水平,加强雾霾数据的采集和整理,更好地发挥信息通信技术在雾霾治理中的作用。政府部门应当做好共享创新平台搭建工作,加强企业、科研机构和高校的合作,进一步创新雾霾污染监测方法和监管方式,提高雾霾污染监测水平。同时,打破信息壁垒,大力推进雾霾数据资源的全面共享,提高雾霾治理的精准性和有效性。第四,鼓励并推进社会信息化,加快信息化对社会生活以及城市管理方方面面的渗透,从而发挥信息化对生活方式绿色转型的作用。在具体推进过程中,可以依托信息通信技术,构建和完善信息通信技术服务平台,将先进技术融入智慧生活、智慧城市、智慧社会,服务于社会生活衣食住行等多个领域,最大化对社会资源进行整合,实现社会生活的绿色化转型。

参考文献:

- [1] GROSSMAN G M, KREUGER A B. Environmental impacts of a north American free trade agreement[R]. NBER working paper, No. 3914, 1991.
- [2] ACEMOGLU D, AGHION P, BURSZTYN L, et al. The environment and directed technical change[R]. NBER working paper, No. 15451, 2009.
- [3] 申萌,李凯杰,曲如晓. 技术进步、经济增长与二氧化碳排放:理论和经验研究[J]. 世界经济,2012(7):83-100.
- [4] 金培振,张亚斌,彭星. 技术进步在二氧化碳减排中的双刃效应——基于中国工业 35 个行业的经验证据[J]. 科学

表 8 信息化与雾霾污染:异质性检验

变量	(1)	(2)
	创新基础异质性	经济发展水平异质性
γ	0.988 *** (0.004)	0.988 *** (0.004)
$\ln ICT$	-0.011 *** (0.004)	-0.012 *** (0.004)
$\ln ICT \times high$	-0.002 *** (0.001)	
$\ln ICT \times economy$		-0.001 (0.001)
控制变量	YES	YES
Log-L	3 943.602	3 938.331
城市固定效应	YES	YES
时间固定效应	YES	YES
观测值	3 135	3 135
R ²	0.376	0.384

注:括号内为系数的标准误,*、**和***分别表示在10%、5%和1%的显著性水平下显著。

- 学研究,2014(5):706-716.
- [5] 杨莉莎,朱俊鹏,贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步的视角[J]. 经济研究,2019(11):118-132.
- [6] 王班班,齐绍洲. 有偏技术进步、要素替代与中国工业能源强度[J]. 经济研究,2014(2):115-127.
- [7] 白俊红,聂亮. 技术进步与环境污染的关系——一个倒U形假说[J]. 研究与发展管理,2017(3):131-140.
- [8] 李廉水,周勇. 技术进步能提高能源效率吗? ——基于中国工业部门的实证检验[J]. 管理世界,2006(10):82-89.
- [9] LEVINSON A. Technology, international trade, and pollution from U. S. manufacturing[J]. American economic review, 2009,99(5):2177-2192.
- [10] 何小钢,张耀辉. 技术进步、节能减排与发展方式转型——基于中国工业36个行业的实证考察[J]. 数量经济技术经济研究,2012(3):19-33.
- [11] 姜磊,季民河. 基于空间异质性的中国能源消费强度研究——资源禀赋、产业结构、技术进步和市场调节机制的视角[J]. 产业经济研究,2011(4):61-70.
- [12] ROMM J. The internet and the new energy economy[J]. Resources, conservation and recycling,2002,36(3):197-210.
- [13] TAKASE K, MUROTA Y. The impact of IT investment on energy: Japan and US comparison in 2010[J]. Energy policy,2004,32(11):1291-1301.
- [14] 陈庆江,杨蕙馨,焦勇. 信息化和工业化融合对能源强度的影响——基于2000—2012年省际面板数据的经验分析[J]. 中国人口·资源与环境,2016(1):55-63.
- [15] 刘洪涛,杨洋. 信息化与中国碳强度——基于中国省级面板数据的经验分析[J]. 科技管理研究,2018(19):226-233.
- [16] SHAHNAZI R, DEHGHAN S Z. The effects of spatial spillover information and communications technology on carbon dioxide emissions in Iran[J]. Environmental science and pollution research,2019,26(23):24198-24212.
- [17] 张三峰,魏上海. 信息与通信技术是否降低了企业能源消耗——来自中国制造业企业调查数据的证据[J]. 中国工业经济,2019(2):155-173.
- [18] 樊茂清,郑海涛,孙琳琳,等. 能源价格、技术变化和信息化投资对部门能源强度的影响[J]. 世界经济,2012(5):22-45.
- [19] KHUNTIA J, SALDANHA T, MITHAS S, et al. Information technology and sustainability: evidence from an emerging economy[J]. Production and operations management, 2018,27(4):756-773.
- [20] 杜雯翠. 信息化能否降低城市环境污染? [J]. 首都经济贸易大学学报,2016(2):116-122.
- [21] NAGAO T, HARA M, HANNOE S, et al. Estimation of reduction in CO₂ emissions by using ICT throughout Japan[M]. Singapore: Springer Singapore,2017.
- [22] SADORSKY P. Information communication technology and electricity consumption in emerging economies[J]. Energy policy,2012,48(2):130-136.
- [23] DANISH, KHAN N, BALOCH M A, et al. The effect of ICT on CO₂ emissions in emerging economies: does the level of income matters? [J]. Environmental science and pollution research,2018,25(23):22850-22860.
- [24] HIGÓN D A, GHOLAMI R, SHIRAZI F. ICT and environmental sustainability: a global perspective[J]. Telematics and informatics,2017,34(4):85-95.
- [25] 林毅夫. 信息化——经济增长新源泉[J]. 科技与企业,2003(8):53-54.
- [26] BRESNAHAN T F, TRAJTENBERG M. General purpose technologies ‘engines of growth’? [J]. Journal of econometrics, 1995, 65(1):83-108.
- [27] YU B, MA Y, XUE M, et al. Environmental benefits from ridesharing: a case of Beijing[J]. Applied energy,2017,191(1):141-152.
- [28] WROBEL A, ROKITA E, MAENHAUT W. Transport of traffic-related aerosols in urban areas[J]. Science of the total environment,2000,257(2):199-211.
- [29] 周振华. 信息化及产业融合中的结构高度化分析[J]. 东南学术,2004(3):75-80.

- [30] GALBRAITH J K. American capitalism[M]. Boston: Houghton Mifflin, 1952.
- [31] VAN D A, MARTIN R V, BRAUER M, et al. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application [J]. Environmental health perspectives, 2010, 118(6): 847-855.
- [32] 石大千, 李格, 刘建江. 信息化冲击、交易成本与企业 TFP——基于国家智慧城市建设的自然实验[J]. 财贸经济, 2020(3): 117-130.
- [33] 冷艳丽, 杜思正. 产业结构、城市化与雾霾污染[J]. 中国科技论坛, 2015(9): 49-55.
- [34] 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.
- [35] 黄群慧, 余泳泽, 张松林. 互联网发展与制造业生产率提升: 内在机制与中国经验[J]. 中国工业经济, 2019(8): 5-23.
- [36] NUNN N, QIAN N. US Food aid and civil conflict [J]. American economic review, 2014, 104(6): 1630-1666.
- [37] 寇宗来, 刘学悦. 中国城市和产业创新力报告 2017[R]. 上海: 复旦大学产业发展研究中心, 2017.

(责任编辑: 黄明晴; 英文校对: 葛秋颖)

Does Informatization Help Reduce Haze Pollution? An Empirical Test Based on Spatial Econometric Model

LV Minle, CHEN Yingyao

(School of Economics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: Based on the analysis of internal mechanism of impact of informatization on haze pollution, taking China's 285 prefecture-level and above cities from 2005 to 2015 as a sample, the spatial econometric model is used to systematically investigate the impact of informatization on haze pollution. Considering the spatial lag of haze pollution. The results show that the informatization can effectively reduce haze pollution after considering the spatial lag of haze pollution. This conclusion remains robust after changing samples, measurements, spatial weight matrix and considering the time lag of haze pollution. Taking into account the endogeneity problems of the variables, this paper further uses the instrumental variable method and the generalized space two-stage least squares method to estimate. The heterogeneity test results show that the haze reduction effect of informatization has significant difference in cities with different innovation bases, but there is no significant difference in cities with different economic development levels. This paper confirms that informatization has the effect of haze pollution reduction at the prefecture-level city level, and provides policy enlightenment for haze pollution governance.

Key words: informatization; haze pollution; spatial spillover effect; PM2.5 concentration; heterogeneous effect