

城镇化对雾霾污染的影响研究

——基于中国 285 个地级市的实证检验

杨冕^{1,2}, 程燕¹, 李强谊³

(1. 武汉大学 经济与管理学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 经济研究所, 湖北 武汉 430072;
3. 广西师范大学 经济管理学院, 广西 桂林 541006)

[摘要] 雾霾污染影响人体健康、生活质量和劳动生产率, 是我国城市发展中面临的突出问题。文章以中国 285 个地级及以上城市为研究对象, 根据雾霾污染程度将 285 个地级及以上城市分为高排放区、中排放区和低排放区, 运用空间计量和门槛模型分析方法, 实证研究了城镇化率对 $PM_{2.5}$ 污染的影响。研究表明: 我国城市的 $PM_{2.5}$ 具有空间溢出效应; 全国层面、中排放区和低排放区城镇化率的提高会增加 $PM_{2.5}$ 浓度, 而高排放区城镇化率的提高会降低 $PM_{2.5}$ 浓度; 城镇化率对 $PM_{2.5}$ 污染具有门槛效应, $PM_{2.5}$ 浓度随城镇化率的提高呈现边际递增趋势。

[关键词] 雾霾污染; 城镇化; 空间溢出效应; 门槛效应

[中图分类号] F291

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-6973(2022)02-0026-14

一、引言

改革开放四十多年以来, 中国经济社会发展取得了举世瞩目的成就。伴随着经济实力、科技实力、综合国力的大幅提升, 中国已跃升为世界第二大经济体。目前, 中国的城镇化率已达到较高水平, 人口城镇化率从 1978 年的 17.9% 增长到 2020 年的 63.89%。城镇化进程的推进是我国经济发展的强大引擎^[1], 然而该过程不可避免地衍生了严重的环境污染、资源浪费等一系列“城市病”现象^[2]。根据《2020 年中国生态环境状况公报》相关数据显示, 全国空气质量超标城市比例达到 43.3%。由此可见, 我国正处于空气污染较为严峻的阶段, 云雾迷蒙的“雾霾天”频现, 个别城市还显现“爆表”现象^[3]。这不仅直接威胁到人类的身心健康及生命安全^[4], 甚至进一步阻滞城镇化建设的步伐, 对城市无序的发展亮起了红灯。为了增强人民蓝天幸福感, 中国高度重视改善空气质

[收稿日期] 2021-11-09

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目“能源价格扭曲纠正视角下中国工业全要素生产率提升潜力与实现路径研究”(71774122); 国家自然科学基金面上项目“环境税内生假定下合理税率及其动态优化研究——以大气污染物征税为例”(71874064)。

[作者简介] 杨冕(1983—), 男, 江苏连云港人, 博士, 武汉大学教授、博士生导师, 主要研究方向为能源经济学、环境经济学。

[通讯作者] 李强谊(1986—), 男, 湖南岳阳人, 博士, 广西师范大学副教授, 主要研究方向为资源与环境经济学。

量,坚决打好污染防治攻坚战。长期以来,国家和地方政府通过环保法律法规出台了一系列政策工具对环境进行治理,如2013年国务院发布的《大气污染防治行动计划》以及2018年国务院发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》。可以看出,中国政府通过不懈努力,深入打好污染防治攻坚战,建立健全环境治理体系。那么,地方政府在城市发展和环境治理的双重压力下,城镇化会对雾霾污染产生怎样的影响?对邻近地区是否存在空间溢出效应?同时,考虑到污染水平的地区差异,何种程度的城镇化水平更有利于减少雾霾污染?这是本文亟待研究的问题,这一系列问题的回答,不仅是对可持续发展理论的有益补充和完善,还可以为政府治理雾霾提供经验支持和实践指导。基于此,本文选择城镇化对雾霾污染的影响进行研究,以期打赢蓝天保卫战提供理论借鉴。

由于雾霾天气频发,学界对于雾霾污染的研究也开始逐渐增多,虽然诸多学者从不同角度对城镇化与环境污染的关系进行了研究,但是两者之间的关系并未达成共识。根据研究结论,大致可以分为以下三类:第一种观点认为城镇化发展不利于环境改善。Sushinsky等认为城镇化会导致严重的环境退化^[5]。Han等发现中国城市的人口城镇化率与 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著的正相关关系^[6]。肖严华等研究发现城镇化水平与雾霾之间存在“正U型”关系,并且大部分城市未跨过拐点^[7]。李光勤等认为人口集聚带来的生活污染和交通污染会加重本地区的雾霾污染,还会导致邻近地区的雾霾污染^[8]。邵帅等研究发现我国城市化进程尚处于加重雾霾污染的阶段^[9]。王班班等从经济城市化、土地城市化和人口城市化方面探讨了城市化进程对城市群雾霾的影响,研究发现城市扩张是导致城市群雾霾暴露上升的重要因素^[10]。李子豪和袁丙兵同样发现城镇化在增加当地雾霾污染上相对显著^[11]。第二种观点认为城镇化发展有利于环境改善。Wang等研究了山东省城镇化与大气环境的耦合关系,结果发现城镇化有利于改善大气环境质量^[12]。王星运用主成分分析法构造城市经济、人口和空间的耦合指标测度城镇化水平,指出城市规模和雾霾污染负相关,以大城市的负向关系最显著^[13]。梁伟等通过广义空间三阶段最小二乘法研究了城镇化可以降低以AQI为表征的雾霾污染,并以60.8%的城镇化率将全国分为两组,结果发现高城镇化率地区对 $PM_{2.5}$ 浓度的降低作用强于低城镇化率地区^[14]。程钰等发现京津冀及周边地区的城镇化率与以AQI为表征的空气质量呈显著负相关,说明城镇化推动了空气质量的改善^[15]。姚成胜等研究发现城镇化建设带来的人口城镇化和工业城镇化明显地促进了环境质量的改善^[16]。第三种观点认为城镇化与环境污染不具有明确的关系。Wang等运用动态耦合协调度模型研究发现,城市化与生态环境之间的关系呈倒U型曲线^[17]。Xu和Lin通过考察东、中、西部城市化和二氧化碳排放的关系,发现东部地区和中部的城市化与二氧化碳排放分别具有倒U型关系和正U型关系,西部地区城市化和二氧化碳排放之间的非线性影响关系不显著^[18]。蔺雪芹和王岱运用空间计量模型研究得出2003—2014年中国城市化对城市空气质量没有显著的影响^[19]。Ji等基于79个发展中国家的面板数据,发现城市化与 $PM_{2.5}$ 浓度存在倒U型关系^[20]。李佳佳研究发现,就全国整体而言,城镇化与环境污染的关系呈倒N型,两者之间的关系存在区域异质性,东西部城镇化水平对环境污染的影响呈倒N型,而中部地区呈U型^[21]。

上述研究为我们探讨城镇化对雾霾污染的影响奠定了重要基础,但这些研究依然存在一些不足:首先,较多文献从省域、城市群或者东中西部分区域展开研究,缺乏从长时间、大范围尺度上的研究;其次,对于城镇化与环境污染的关系,较多学者分析了城镇化对 $PM_{2.5}$ 的线性关系,假定各个阶段城镇化率对 $PM_{2.5}$ 浓度具有同质性影响,较少文献从非线性视角对城镇化与 $PM_{2.5}$ 排放之间的

关系进行分析;最后,现有文献从人口单一维度,或者人口、经济、土地和社会综合维度,来构造城镇化综合指标进行研究,但对于城镇化与雾霾污染关系的研究,并未达成一致结论。

基于以上研究背景,本文以雾霾污染(主要指 $PM_{2.5}$)为研究对象,采用空间计量和门槛效应模型等分析方法,探讨了城镇化对雾霾污染的影响,主要贡献体现在以下三个方面:第一,考虑到省域、城市群或者东中西部分区域,这种按地域属性进行划分的方式具有一定的局限性,本文依据2003—2016年285个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度年均值对城市进行分组,探究城镇化率对高、中、低污染地区 $PM_{2.5}$ 浓度的作用,弥补了按地域属性进行划分的不足;第二,本文采用卫星监测数据进行解析,较为准确地得到了2003—2016年中国285个地级及以上城市 $PM_{2.5}$ 浓度数据,解决了官方统计数据年度短、缺失多等问题,并且通过构建空间地理权重矩阵,探索了城镇化水平对 $PM_{2.5}$ 的空间溢出效应,丰富和加深了对雾霾污染的认识;第三,为了避免二次项与一次项对解释变量进行回归时产生共线性而导致模型不稳定,本文采用了门槛计量方法研究不同阶段的城镇化率对 $PM_{2.5}$ 浓度的门槛特征,进而克服了这方面的不足。本文旨在通过以上经验分析,总结我国城镇化对雾霾污染的影响特征,探寻雾霾污染的经济根源,识别城镇化对雾霾污染的具体演变路径,从而在推动新型城镇化进程中,为我国政府制定治霾政策提供决策参考和经验支持。

二、基本模型、变量与数据

(一)模型构建

为研究城镇化对雾霾污染的影响,本文借鉴环境经济学领域的经典模型——IPAT模型(又称为IPAT公式),该模型主要用来分析人口、经济与技术进步对环境的影响,进而评估三者对环境造成的压力。IPAT模型是在20世纪70年代初被提出的,IPAT模型的基本方程如下^[22]:

$$I = PAT \quad (1)$$

式(1)中, I 为环境影响(Impact), P 为人口(Population), A 为人均财富(Affluence), T 为技术(Technology)。由于该模型最初仅考虑了人口、社会富裕程度以及技术水平与环境之间的相互关系,其具有一定局限性,为更加易于利用统计工具进行分析,York等将IPAT模型拓展为STIRPAT模型,方程表示如式(2)^[23]:

$$I = \alpha P^{\beta_1} A^{\beta_2} T^{\beta_3} e \quad (2)$$

式(2)中, I 、 P 、 A 、 T 的含义与IPAT方程一致, α 表示模型的系数, β_1 、 β_2 和 β_3 表示待估计参数, e 为误差项。STIRPAT模型可用于分析多个因素对环境的非等比例影响。通过对式(2)两边分别取对数,则可以得到公式(3)。式(3)的回归系数表示当其他解释变量不变时,某一解释变量变化百分之一所引起的被解释变量变化的百分比。

$$\ln I = \ln \alpha + \beta_1 \ln P + \beta_2 \ln A + \beta_3 \ln T + e \quad (3)$$

为考察城镇化水平对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响,本文在STIRPAT模型基础上,以 $PM_{2.5}$ 浓度作为环境对象,加入核心解释变量城镇化率,同时考虑到 $PM_{2.5}$ 浓度还可能受到其他因素的影响,借鉴已有研究,在模型中加入了一系列控制变量,得到如下计量模型:

$$\ln PM_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln ur_{it} + \beta_2 \ln pgdp_{it} + \beta_3 \ln ins_{it} + \beta_4 \ln fdi_{it} + \beta_5 \ln sci_{it} + \beta_6 \ln tra_{it} + e \quad (4)$$

公式(4)中, i 、 t 分别表示地区和年份, $\ln PM$ 为被解释变量,用 $PM_{2.5}$ 浓度表示, $\ln ur$ 为核心解释变量,用城镇化率表示, β 表示待估计参数, e 表示随机误差项。此外,模型中加入的控制变量有人均

GDP($pgdp$)、产业结构(ins)、外商直接投资(fdi)、科技投入(sci)和交通运输强度(tra),为了降低异方差对估计结果的影响,模型中所有变量均采用对数形式。

(二)变量选取

1. 被解释变量:雾霾污染(PM)

雾霾污染为本文的被解释变量。雾霾的主要成分包括 SO_2 、 NO_x 和可吸入颗粒物($PM_{2.5}$, PM_{10}),本文选择 $PM_{2.5}$ 浓度(单位: $\mu g/m^3$)表征雾霾污染程度,主要是因为 $PM_{2.5}$ 已经成为我国雾霾污染的元凶,且较多研究表明 $PM_{2.5}$ 影响经济发展,且严重危害人类的健康和生活质量。

2. 核心解释变量:城镇化水平(ur)

城镇化率为本文的核心解释变量。国内外城镇化率测算方法主要包括城镇人口比例法、建成区面积比例法和构造综合指标法。城镇化的核心是人,人口城镇化也是通常意义上的城镇化,因此,本文采用人口城镇化率表示城镇化水平^[24]。由于城市层面城镇人口和城镇常住人口的数据无法获得,所以根据一般文献的做法,本文采用市辖区总人口占全市总人口的比例来衡量城镇化水平。

3. 其他控制变量

本文参考了已有文献中影响雾霾污染的因素^[25-30],选择了一些可能造成雾霾污染的控制变量,具体包括以下变量:(1)经济发展水平($pgdp$)。随着经济发展水平的提升,国家加大了对环境保护的力度,同时,人们对环境质量的要求也越来越高,积极推动了环境质量的改善。本文的经济发展水平采用人均 GDP 衡量,并以 2003 年为基期,经过 GDP 平减指数的调整,消除了价格变化的影响,得到人均实际 GDP。(2)产业结构(ins)。经济发展需要产业的推动和支撑,而三大产业中,第二产业主要以工业为主,其中,化工、冶金和发电等行业是化石能源消耗的关键部门,其生产过程中排放的污染物是雾霾形成的主要原因,这直接影响到当地空气质量。本文采用第二产业增加值占 GDP 比例来表示产业结构。(3)外商直接投资(fdi)。外商直接投资是一把双刃剑,既可以东道国造成环境污染,也可有助于降低东道国的环境污染。研究表明外商直接投资主要是通过技术、规模、规制和结构等方式来影响东道国的环境质量^[28]。本文采用各地区实际使用外资额来表示外商直接投资水平,其中实际使用外资额的计算如下,首先,将各地区当年的外商直接投资总额按照当年人民币对美元的平均汇率换算成人民币;其次,以 2003 年的价格为基准,按照 GDP 平减指数得出 2003—2016 年实际使用外资额。(4)科技投入(sci)。科技投入作为我国创新驱动发展的经济基础,科技创新能够促进产业结构升级,改善企业生产决策,进而影响到环境质量。本文采用科技支出占政府财政支出的比例来表示科技投入水平。(5)交通运输强度(tra)。公路交通运输过程中,机动车排放的尾气是形成 $PM_{2.5}$ 的重要来源,因此,可以认为交通运输是影响雾霾污染的重要因素,本文采用全年公路客运总量来表示交通运输强度。

(三)数据来源与描述性统计

$PM_{2.5}$ 浓度的度量是本文的关键, $PM_{2.5}$ 数据来源于哥伦比亚大学社会经济数据和应用中心,该数据为栅格数据形式的全球 $PM_{2.5}$ 浓度监测数据,并进一步采用 ArcGIS 10.2 软件将此栅格数据进行解析^[31]。本研究运用 2003—2016 年全国 285 个地级及以上城市的面板数据,数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》《中国城乡建设统计年鉴》《中国统计年鉴》和中经网统计数据库。本文选择 2003 年作为样本区间起点,主要是因为自 2003 年开始能获得绝大部分城市的

数据。根据数据的可得性,本文研究范围包括大陆的22个省(不包括台湾)和4个自治区(不包括西藏)的地级市以及北京、上海、天津和重庆等4个直辖市,剔除了可获得数据较少的城市后,选择的285个地级及以上城市均是能获得绝大部分数据的样本,个别城市缺失的数据采用“内插法”补足。各指标数据均采用全市的统计口径。本文的样本一共有3990个,其描述性统计如表1所示。

表1 各变量的描述性统计

变量	描述	平均值	最小值	最大值	标准差
$\ln pm$	PM _{2.5} 浓度	3.4854	1.5380	4.5109	0.5010
$\ln ur$	城镇化率	-1.3168	-3.3778	-0.0126	0.6398
$\ln pgdp$	人均 GDP	9.9042	7.5454	12.4442	0.8434
$\ln ins$	产业结构	-0.7490	-1.9005	-0.0946	0.2479
$\ln fdi$	外商直接投资	11.2754	2.8066	17.0183	2.2978
$\ln sci$	科技投入	-4.9563	-8.2345	-1.5758	0.9809
$\ln tra$	交通运输强度	8.4854	4.4067	12.5657	0.9735

(四)样本组别划分

我国地域辽阔,区域发展不平衡,不同的省区、城市的雾霾污染具有较大的差异性。若按照简单的东、中、西部区域划分进行分组,并不能探究城镇化对不同污染程度地区 PM_{2.5} 影响的差异性。基于此,本文根据 PM_{2.5} 浓度数据对城市进行分组,分组依据是2003—2016年285个城市的 PM_{2.5} 浓度年均值。PM_{2.5} 浓度年均值较高的前95个城市为高排放区,PM_{2.5} 浓度年均值较低的95个城市为低排放区,剩余的95个城市为中排放区。本文基于此分组运用空间计量探究城镇化率对高、中、低污染地区 PM_{2.5} 浓度的作用^[32]。

三、城镇化对雾霾污染的空间效应

(一)空间相关性分析

根据新经济地理学相关理论,事物之间往往具有空间关联性,距离越近,联系越紧密^[33]。因此,需要在传统的计量经济学模型中加入空间效应,以期减少传统计量模型估计带来的偏误。根据 Anselin 的研究思路,在进行空间计量之前首先需要进行空间相关性分析,空间相关包括全局空间自相关和局部空间自相关^[34],本文主要对全局空间自相关进行分析。

由于 PM_{2.5} 在空间上具有传播性,可能存在空间溢出效应,因此需要检验空间效应是否存在。本文采用全局 Moran's I 指数检验 PM_{2.5} 浓度的全局空间相关性。由于本文的研究对象是285个地级及以上城市,地理单元较小,因而选择基于地理距离的空间权重矩阵进行空间计量分析^[34]:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1/d, i \neq j \\ 0, i = j \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, d 表示两地之间的欧氏距离。全局空间自相关分析是从统计学视角检验 PM_{2.5} 浓度的空间关联性,当统计较为显著时,有意义进一步使用空间计量模型进行回归分析。全局 Moran's I 常用来反映全局空间自相关,全局 Moran's I 指数的计算公式如式(6):

$$\begin{cases} I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2}, I \in [-1, 1] \\ \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, x_i, x_j 为 i, j 地区 x 的观测值, n 是地区总数, w_{ij} 表示空间权重矩阵。当全局 Moran's I 大于 0 时, 表示对象之间具有正相关关系; 当全局 Moran's I 小于 0 时, 对象间具有负相关关系; 全局 Moran's I 等于 0 时, 对象在空间上独立。全局 Moran's I 绝对值的大小表示自相关的强弱。

表 2 显示了各年份中国 $PM_{2.5}$ 浓度的全局 Moran's I 值及其显著性。可以看出, Moran's I 在 1% 的显著性水平下为正, 且空间相关性比较稳定。这表示在全局视角下, 中国市域 $PM_{2.5}$ 浓度具有空间溢出效应, 存在显著的正向空间自相关。

表 2 中国 $PM_{2.5}$ 浓度的空间自相关检验

年份	Moran's I 值	Z 值	P 值
2003	0.8527	21.0250	0.0000
2004	0.8280	20.4139	0.0000
2005	0.8391	20.6760	0.0000
2006	0.8368	20.6489	0.0000
2007	0.8634	21.2826	0.0000
2008	0.8396	20.6877	0.0000
2009	0.8336	20.5485	0.0000
2010	0.8532	21.0211	0.0000
2011	0.8523	21.0022	0.0000
2012	0.8533	21.0305	0.0000
2013	0.8425	20.7780	0.0000
2014	0.8322	20.5099	0.0000
2015	0.8563	21.0884	0.0000
2016	0.8575	21.1567	0.0000

(二) 空间面板回归模型的构建

根据 Moran's I 指数可知, $PM_{2.5}$ 浓度和城镇化之间存在空间相关性, 因此有必要采用空间计量模型来分析各城市 $PM_{2.5}$ 浓度的空间溢出效应。本文使用空间滞后模型(SLM)进行估计。SLM 包含了解释变量的空间滞后项, 描述了变量在空间中的扩散效应, 是空间实质相关的基本模型, 如公式(7)所示^[35-36]:

$$\begin{cases} y = \rho W y + x \beta + \mu \\ \mu \sim N(0, \sigma^2 I_n) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, y 是被解释变量; x 是解释变量; β 为回归系数; W 代表空间权重矩阵, 采用地理距离表示; ρ 是空间滞后系数; $W y$ 是被解释变量的空间滞后项, 表示周边区域被解释变量对本地区被解释变量的影响程度; μ 为随机扰动项。

结合公式(4)和公式(7),本文设定的空间滞后模型如式(8):

$$\begin{cases} \ln PM_{it} = \beta_0 + \rho W \ln PM_{it} + \beta_1 \ln ur_{it} + \beta_2 \ln pgdp_{it} + \beta_3 \ln ins_{it} + \beta_4 \ln fdi_{it} + \beta_5 \ln sci_{it} + \beta_6 \ln tra_{it} + \mu \\ \mu \sim N(0, \sigma^2 I_n) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, PM 表示 $PM_{2.5}$ 浓度; ur 代表城镇化率,为本文的核心解释变量; $pgdp$ 、 ins 、 fdi 、 sci 和 tra 为控制变量; W 代表空间权重矩阵; ρ 是空间滞后系数; μ 为随机扰动项。

(三)空间面板回归模型的估计结果

本文使用空间滞后模型(SLM)进行估计^[37-38]。表3中结果显示全国以及高、中、低排放区的 $PM_{2.5}$ 浓度的空间滞后系数在1%水平下显著为正,说明 $PM_{2.5}$ 污染具有正向的空间溢出效应,这意味着一个地区的雾霾污染水平不仅受本地区相关因素的影响,还受到相邻地区雾霾污染水平的影响。 $PM_{2.5}$ 污染具有负外部性,在空间上的传播严重影响到周边地区。接下来,从全国、高排放区、中排放区和低排放区层面分别进行分析。

表3 SLM模型估计结果

变量	全国	高排放区	中排放区	低排放区
$\ln ur$	0.0604*** (5.6189)	-0.0372*** (-4.7347)	0.0168** (2.4597)	0.0576*** (3.4131)
$\ln pgdp$	-0.2423*** (-16.7690)	-0.0552*** (-3.9450)	-0.0597*** (-6.3928)	-0.2900*** (-14.2594)
$\ln ins$	0.3270*** (12.9817)	0.1368*** (5.6781)	0.0319* (1.7769)	0.1704*** (5.2690)
$\ln fdi$	0.0923*** (23.5609)	0.0299*** (6.5489)	0.0272*** (8.8320)	0.0382*** (7.6307)
$\ln sci$	0.0168* (1.6912)	0.0219*** (2.9617)	-0.0187*** (-3.0157)	0.0514*** (3.0421)
$\ln tra$	0.0924*** (13.0374)	-0.0442*** (-7.4392)	0.0074* (1.6850)	0.0676*** (6.1951)
$W * dep. var$	0.9870*** (573.7070)	0.9420*** (87.9338)	0.9220*** (64.0003)	0.5280*** (7.6211)
R^2	0.5197	0.4734	0.4518	0.2634
观测值	3990	1330	1330	1330

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平,()内代表t值

由表3可知,中国城市的 $PM_{2.5}$ 浓度在空间分布上具有正相关关系,邻近地区的雾霾污染会相互影响。从全国层面来看,城镇化率($\ln ur$)的系数为正,说明人口城镇化率对 $PM_{2.5}$ 浓度具有正向影响。城镇化率每提升1%, $PM_{2.5}$ 浓度升高0.0604%。人口城镇化不仅体现为人口在地理上的集聚,还体现为产业和经济的集聚。城镇化率对 $PM_{2.5}$ 浓度具有促进作用,可能存在以下四点原因:其一,由于人口在地理上的集聚导致资源和能源消耗增加,如私家车数量增加,排放的废气加重雾霾污染^[39-40],尤其在北方地区,人们在冬季主要依靠燃煤等化石能源取暖,以及焚烧生活垃圾等都会导致污染物的积累以及雾霾持续时间的增长^[41];其二,随着人口流动的加快,城市的住房和基础设施需求加大,这不仅拉动了钢铁、水泥等高耗能、高排放行业的过度增长,而且在建设过程中产生大量的扬尘,客观上增加了雾霾污染^[9];其三,由于城镇化过程中建成区面积不断扩张,大量的农业用

地转为建设用地,导致农林等土地面积减少,绿色植被覆盖率削减,植被对雾霾等污染物的净化能力弱化,城市的热岛效应增强,从而加剧了雾霾污染^[42-43];其四,随着城镇化的加快,就业机会和商机增加,使得更多人口涌入城市,刺激了工业生产规模的扩张和能源消耗,这势必会加剧空气污染^[44-45]。

从控制变量上来看,人均 GDP 提高会降低 $PM_{2.5}$ 浓度。这可能是因为经济发展水平的提高,人们的消费能力随之提高。此时,企业会扩大生产规模,带来规模经济效应,降低单位 GDP 能耗。我国第二产业比例的增加会使本地 $PM_{2.5}$ 浓度增加,表明以工业为主的第二产业会加重空气污染,因此需要优化产业结构。外商投资的增加导致我国的 $PM_{2.5}$ 浓度增加,说明“污染天堂假说”在我国存在,须警惕外资带来的污染。我国科技投入的提高会增加 $PM_{2.5}$ 浓度,说明我国科技投入可能是偏向生产技术进步,而不是绿色技术进步,因此需要提高绿色技术进步水平。交通运输强度会增加雾霾污染,可能原因是机动车数量增多,从而增加空气污染物的排放。

从分地区层面来看,高、中、低排放区各区域内 $PM_{2.5}$ 浓度的增加对邻近地区的 $PM_{2.5}$ 浓度有促进作用,且污染扩散作用依次递减。这说明污染程度越高的地区, $PM_{2.5}$ 污染扩散和相互影响越严重。在高排放区, $lnur$ 系数为负,说明城镇化率的提高会降低 $PM_{2.5}$ 浓度。在中、低排放区,城镇化率增加 1%, $PM_{2.5}$ 浓度分别增加 0.0168% 和 0.0576%。高排放区城镇化率的提高会降低雾霾污染,这可能是因为污染较重的区域,人口城镇化有利于提高公共基础设施的使用率,促进资源的高效利用和能耗的降低。人口向城镇集聚是城镇化发展的必然结果,人口集聚过程中积累的人力资本为防治环境污染提供智力支持。人口城镇化还会增强人们的环保意识,加强环保力度,使环保工作成效显著。中、低排放区城镇化率的提高会加重雾霾污染,这可能是因为空气污染不严重的地区,城镇化率的提高对空气污染影响较显著。分区域研究验证了随着雾霾污染的加重,城镇化率对 $PM_{2.5}$ 浓度的促进作用逐渐降低,甚至转为负向影响。这可能是因为高排放区一般都是在东部、京津冀等经济较为发达的地区,城镇化率较高,且邻近地区之间的 $PM_{2.5}$ 污染影响更大,城镇化率已经不是影响 $PM_{2.5}$ 浓度的主要因素;而在低排放区,邻近地区 $PM_{2.5}$ 污染的扩散作用较低,城镇化率一般较低,城镇化率仍是影响 $PM_{2.5}$ 浓度的主要因素。

从控制变量来看,高、中、低排放区城市的人均 GDP 与 $PM_{2.5}$ 浓度负相关;二产占比和外商直接投资与 $PM_{2.5}$ 浓度正相关;高、低排放区的科技投入与 $PM_{2.5}$ 浓度正相关,中排放区的科技投入与 $PM_{2.5}$ 浓度负相关;中、低排放区的交通运输强度与 $PM_{2.5}$ 浓度正相关。这与全国层面的研究结论也基本一致。

四、城镇化对雾霾污染的门槛效应

为了进一步识别城镇化对雾霾污染的门槛效应,本文运用 Hansen(1999)提出的门槛回归模型确定门槛值,检验城镇化对雾霾污染影响的门槛效应^[46]。估计门槛模型的思路是建立起关于关键变量的分段函数,把未知变量门槛值引入模型中,进一步估计门槛值与门槛效应^[46-47]。

(一) 面板门槛模型设定

根据前文的分析,城镇化率对 $PM_{2.5}$ 浓度可能存在门槛效应。本文借鉴 Hansen 的门槛模型^[46],设定了城镇化率与 $PM_{2.5}$ 浓度的门槛效应模型,其基本形式如式(9):

$$PM_{it} = \beta_0 x_{1it} + \beta_1 ur_{it} I(q_{it} \leq \gamma) + \beta_2 ur_{it} I(q_{it} > \gamma) + \epsilon_{it} \quad (9)$$

式(9)中: PM_{it} 表示被解释变量 $PM_{2.5}$; ur_{it} 为存在门槛效应的核心解释变量城镇化率; x_{1it} 代表除 ur_{it} 外的控制变量; i 代表地区; t 代表年份; β_0 是控制变量系数; q_{it} 代表门槛变量; γ 表示待估计的门槛值; β_1 和 β_2 是门槛变量的系数; I 是指标函数,当括号内条件成立时为1,条件不成立时为0; ε_{it} 为随机干扰项。式(9)是存在单一门槛的形式,而门槛模型中可能存在多重门槛的情景。以双重门槛为例,模型设定如下:

$$PM_{it} = \beta_0 x_{1it} + \beta_1 x_{2it} I(q_{it} \leq \gamma_1) + \beta_2 x_{2it} (\gamma_1 < q_{it} \leq \gamma_2) + \beta_3 x_{2it} I(q_{it} > \gamma_2) + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

式(10)中, $\gamma_1 < \gamma_2$,单一门槛模型的估计与检验方法仍适用于双重门槛及多重门槛。门槛效应的检验用似然比 LR 统计量,如式(11)所示, S_0 表示原假设 H_0 成立时的残差平方和。同时还可以得到 LR 检验图,根据门槛值的置信区间和拒绝域检验结果的准确性。

$$LR = \frac{S_0 - S_1(\gamma)}{\gamma^2} \quad (11)$$

(三)门槛效应检验结果分析

前文的空间计量结果显示城镇化对雾霾污染具有正向影响,且随着地区污染程度的加深,城镇化的正向作用有所减弱,在高排放区甚至转为负向作用,这反映了城镇化率对 $PM_{2.5}$ 浓度存在非线性特性。本部分则重点识别门槛的具体值和区间。

根据前文实证分析,本文以城镇化率为门槛变量进行检验,在门槛效应存在的情况下,考察城镇化率对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响。本文对门槛模型进行估计并检验,取得 F 统计量检验值与在反复自抽样(Bootstrap)300 次基础上的 P 值。全国层面城镇化率的门槛分析结果如表 4 至表 6 所示,表 4 是存在门槛效应的门槛变量的检验结果,表 5 是变量的门槛值估计结果,表 6 是以具有门槛效应的城镇化率为门槛变量时,门槛回归模型的估计结果。

表 4 门槛效应检验结果

门槛变量	F 统计量	P 值	临界值		
			1%	5%	10%
单一门槛	14.450***	0.000	13.391	11.324	9.002
双重门槛	131.230***	0.000	-33.872	-38.183	-40.344
三重门槛	-46.843	1.000	-6.409	-8.544	-9.724

注:***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平,() 内代表 t 值

表 5 门槛值估计结果

门槛变量	估计值	95% 的置信区间
门槛值 γ_1	-1.281	[-1.292, -1.273]
门槛值 γ_2	-0.485	[-0.491, -0.485]

表 6 门槛模型估计结果

解释变量	系数估计值
$\ln ur_1 (ur_1 \leq 27.78\%)$	0.1244*** (11.19)
$\ln ur_2 (27.78\% < ur_2 \leq 61.57\%)$	0.2545*** (12.35)

解释变量	系数估计值
$\ln ur_3 (ur_3 > 61.57\%)$	0.5903*** (10.25)
$\ln pgdp$	-0.0170** (-2.15)
$\ln ins$	0.1177*** (5.84)
$\ln fdi$	-0.0044*** (-2.63)
$\ln sci$	0.0134*** (2.64)
$\ln tra$	0.2899*** (5.70)
常数项	3.8380*** (33.97)
F 统计量	34.45***
观测值	3990

注:***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平, () 内代表 t 值

门槛值 γ 是门槛参数的估计值,此时 LR 统计量等于 0。通过似然比函数可以看到不同模型设定下门槛值的估计以及置信区间的构造过程。我们通过绘制似然比函数看到全国城市城镇化率的门槛效应表现,如图 1 所示。图中虚线对应临界水平,每幅图中都有部分 LR 统计量值在临界水平之下,说明门槛参数真实有效。

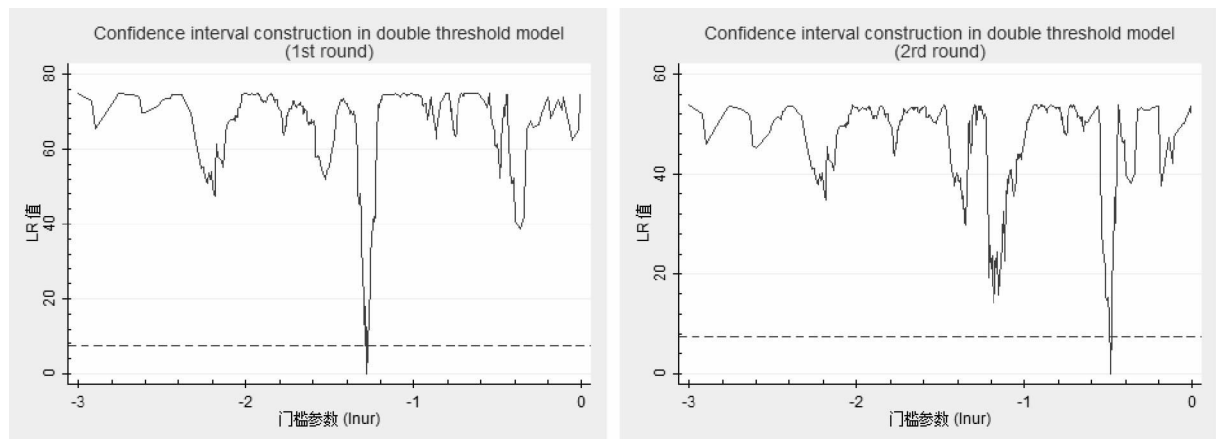


图 1 全国城镇化率($\ln ur$)的门槛参数 LR 检验

由表 5 和表 6 中的门槛回归结果可知,在全国层面,城镇化率对 $PM_{2.5}$ 浓度具有正向的双重门槛作用,且跨过门槛值后,正向促进作用更加明显。以城镇化率为门槛变量时,按城镇化率的高低将城镇化率划分为 27.78% 和 61.57% 两个分界点。当城镇化率低于 27.78% 时,城镇化率增加 1%, $PM_{2.5}$ 浓度增加 0.1244%;当城镇化率处于 27.78% 至 61.57% 的区间时,城镇化率增加 1%, $PM_{2.5}$ 浓度增加 0.2545%;当城镇化率超过 61.57% 时,城镇化率增加 1%, $PM_{2.5}$ 浓度增加 0.5903%,对 $PM_{2.5}$ 浓度的促进作用更加明显。我国当前大部分城市的人口城镇化率都超过了 27.78%,部分城市城镇化率超过了 61.57%。从全国层面来看,人口城镇化率越高,也即人口在地理上越集聚, $PM_{2.5}$ 浓度就越高,城镇化对 $PM_{2.5}$ 浓度存在非线性的正向影响。可能的原因是在城镇

化的推进过程中人口集聚、城市扩张、产业结构转变和消费水平的提升加重了雾霾污染,且 $PM_{2.5}$ 浓度随城镇化率的提高呈现边际递增情况。

五、结论与启示

本文以中国2003—2016年285个地级及以上城市为研究对象,以城镇化率为核心解释变量,加入人均GDP、二产占比、外商直接投资、科技投入和交通运输强度等5个控制变量,运用空间计量和门槛计量分析城镇化率对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响。本文的主要结论如下:(1)中国城市的 $PM_{2.5}$ 具有空间溢出效应。在空间分布上具有正相关关系,邻近地区的雾霾污染会相互影响,且随着本地区雾霾污染的加重,对邻近地区雾霾污染的扩散作用就越强。(2)在全国层面,城镇化率与 $PM_{2.5}$ 浓度具有正相关关系,且具有正向双重门槛作用,跨越门槛值后正向影响不断增大,人均GDP与 $PM_{2.5}$ 浓度负相关,二产占比、外商直接投资、科技投入和交通运输强度与 $PM_{2.5}$ 浓度正相关。(3)高排放区城市的城镇化率与 $PM_{2.5}$ 浓度具有负相关关系,人均GDP与 $PM_{2.5}$ 浓度负相关,二产占比、外商直接投资和科技投入与 $PM_{2.5}$ 浓度正相关;中排放区城市的城镇化率与 $PM_{2.5}$ 浓度具有正相关关系,二产占比、外商直接投资和交通运输强度与 $PM_{2.5}$ 浓度正相关;低排放区城市的城镇化率与 $PM_{2.5}$ 浓度具有正相关关系,人均GDP与 $PM_{2.5}$ 浓度负相关,二产占比、外商直接投资、科技投入和交通运输强度与 $PM_{2.5}$ 浓度正相关。总体而言,这表明城镇化率的提高会加重雾霾污染,且在不同程度的污染区域,随着城市雾霾污染的加重,城镇化率对 $PM_{2.5}$ 的促进作用会逐渐降低,甚至变为负向影响。

基于上述研究结论,提出以下政策建议。

第一,打破区域壁垒,建立雾霾污染治理联防联控机制。从实证结果可知,邻近地区雾霾污染会相互影响,且存在显著的空间溢出效应,这意味着仅靠“单边”的治霾努力,难以善治。因此,需要树立全国上下“一盘棋”的雾霾共治观念,打破区域、部门和项目壁垒,加强区域合作,明确雾霾治理的责任和主体,实现环境信息共享机制、技术扩散机制以及联合预警机制,通过以上措施,发挥各自优势以求达到共赢,进而形成治霾的区域合力。

第二,因地制宜,采取差异化的治霾政策。城镇化对雾霾污染的影响在全国以及高、中、低排放区具有明显差异,采用“一刀切,大而统”的治霾政策可能事倍功半。因此,在治霾政策制定过程中,需要结合当地城镇化水平和雾霾污染程度,采用差异化的治霾政策,充分平衡好各地区城市发展规划和产业布局,建立城镇化与环境的长效协调机制,从根源上遏制城市无序开发、环境超载的问题^[48],实现城镇化与治雾减霾两者协调发展。

第三,优化产业结构,转变经济发展方式。产业结构与雾霾污染呈现出显著的正向关系,即第二产业增加值占GDP比例增加会加剧雾霾污染程度。因此,需要优化产业结构,加强对工业企业末端治理的监督和管理,逐步淘汰高耗能、高污染的工业企业,促使工业企业低碳、清洁生产;同时,积极推动高新技术产业和现代服务业的发展,转变过度依赖工业为主的经济发展方式。

第四,加大绿色环保技术的研发,提倡居民绿色出行。绿色技术的研发是治理雾霾污染的重要抓手,当前我国绿色技术研发面临数量少、质量低的双重困境,并未对治霾产生积极作用。因此,需要加快绿色环保投资,积极引进治霾人才;同时,要将环保理念传播和渗透到居民生活当中,倡导居民绿色消费、绿色出行。此外,政府部门在招商引资过程中,要有选择、有针对性地引入外资,避免“污染天堂”现象的发生。总而言之,治理雾霾是一项全国性、复杂性且长期性的系统工程,我们相

信在政府、企业、个人等共同努力下,“既要金山银山,又要绿水青山”的发展愿望定能实现。

[参 考 文 献]

- [1] 杨曦. 城市规模与城镇化、农民工市民化的经济效应——基于城市生产率与宜居度差异的定量分析[J]. 经济学(季刊), 2017, 16(04): 1601—1620.
- [2] 邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验[J]. 管理世界, 2019, 35(01): 36—60.
- [3] 李丁, 张艳, 马双, 等. 大气污染的劳动力区域再配置效应和存量效应[J]. 经济研究, 2021, 56(05): 127—143.
- [4] Chi N, Oanh N. Photochemical smog modeling of $PM_{2.5}$ for assessment of associated health impacts in crowded urban area of Southeast Asia[J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 21: 101241.
- [5] Sushinsky J R, Rhodes J R, Possingham H P, et al. How should we grow cities to minimize their biodiversity impacts? [J]. Global Change Biology, 2013, 19(02): 401—410.
- [6] Han L, Zhou W, Li W, et al. Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles ($PM_{2.5}$) in Chinese cities[J]. Environmental Pollution, 2014(194): 163—170.
- [7] 肖严华, 侯伶俐, 毛源远. 经济增长、城镇化与空气污染——基于长三角城市群的实证研究[J]. 上海经济研究, 2021(09): 57—69.
- [8] 李光勤, 秦佳虹, 何仁伟. 中国大气 $PM_{2.5}$ 污染演变及其影响因素[J]. 经济地理, 2018, 38(08): 11—18.
- [9] 邵帅, 李欣, 曹建华. 中国的城市化推进与雾霾治理[J]. 经济研究, 2019, 54(02): 148—165.
- [10] 王班班, 廖晓洁, 谭秀杰. 城市化对雾霾暴露的贡献——基于对中国城市群的时空分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(07): 63—74.
- [11] 李子豪, 袁丙兵. 地方政府的雾霾治理政策作用机制——政策工具、空间关联和门槛效应[J]. 资源科学, 2021, 43(01): 40—56.
- [12] Wang Q, Yuan X, Lai Y, et al. Research on interactive coupling mechanism and regularity between urbanization and atmospheric environment: A case study in Shandong Province, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2012, 26(07): 887—898.
- [13] 王星. 城市规模、经济增长与雾霾污染——基于省会城市面板数据的实证研究[J]. 华东经济管理, 2016, 30(07): 86—92.
- [14] 梁伟, 杨明, 张延伟. 城镇化率的提升必然加剧雾霾污染吗——兼论城镇化与雾霾污染的空间溢出效应[J]. 地理研究, 2017, 36(10): 1947—1958.
- [15] 程钰, 刘婷婷, 赵云璐, 等. 京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量时空演变与经济社会驱动机理[J]. 经济地理, 2019, 39(10): 183—192.
- [16] 姚成胜, 曹紫怡, 韩媛媛. 工业集聚、人口城镇化、土地城镇化与环境污染[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(05): 145—149.
- [17] Wang S J, Ma H, Zhao Y B. Exploring the relationship between urbanization and the eco-environment: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Ecological Indicators, 2014(45): 171—183.
- [18] Xu B, Lin B. How industrialization and urbanization process impacts on CO_2 emissions in China: Evidence from nonparametric additive regression models[J]. Energy Economics, 2015(48): 188—202.
- [19] 蔺雪芹, 王岱. 中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力[J]. 地理学报, 2016, 71(08): 1357—1371.
- [20] Ji X, Yao Y, Long X. What causes $PM_{2.5}$ pollution? Cross-economy empirical analysis from socioeconomic perspective[J]. Energy policy, 2018(119): 458—472.
- [21] 李佳佳. 制度安排、城镇化与环境污染[J]. 经济经纬, 2020, 37(03): 29—36.
- [22] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth[J]. Science, 1971(171): 1212—1217.
- [23] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving

- forces of environmental impacts[J]. *Ecological economics*, 2003,46(03):351—365.
- [24] 李平,李颖.中国城镇化发展效率和制度创新路径[J].*数量经济技术经济研究*,2016,33(05):30—43.
- [25] Chen G, Hu Y, Zhang R, et al. Evolution of South-north transport and urbanization effects on $PM_{2.5}$ distribution with increased pollution levels in Beijing[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021:103060.
- [26] 马丽梅,张晓.中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J].*中国工业经济*,2014(04):19—31.
- [27] 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(09):73—88.
- [28] 许和连,邓玉萍.外商直接投资导致了中国的环境污染吗?——基于中国省际面板数据的空间计量研究[J].*管理世界*,2012(02):30—43.
- [29] Zha H, Wang R, Feng X, et al. Spatial characteristics of the $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio and its indicative significance regarding air pollution in Hebei Province, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021,193(08):1—12.
- [30] 刘海猛,方创琳,黄解军,等.京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J].*地理学报*,2018,73(01):177—191.
- [31] 王庆喜,蒋烨,陈卓咏.区域经济研究实用方法:基于 ArcGIS,GeoDa 和 R 的运用[M].经济科学出版社,2014.
- [32] 刘伯龙,袁晓玲,张占军.城镇化推进对雾霾污染的影响——基于中国省级动态面板数据的经验分析[J].*城市发展研究*,2015,22(09):23—27.
- [33] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. *Economic geography*, 1970(46):234—240.
- [34] Anselin L. Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2001,83(03):705—710.
- [35] 周侃.中国环境污染的时空差异与集聚特征[J].*地理科学*,2016,36(07):989—997.
- [36] Lesage J P, Pace R K. Spatial econometric models[M]. *Handbook of Applied Spatial Analysis*, Springer Berlin Heidelberg, 2010:355—376.
- [37] 杨冕,王银.长江经济带 $PM_{2.5}$ 时空特征及影响因素研究[J].*中国人口·资源与环境*,2017,27(01):91—100.
- [38] 杨昆,杨玉莲,朱彦辉,等.中国 $PM_{2.5}$ 污染与社会经济的空间关系及成因[J].*地理研究*,2016,35(06):1051—1060.
- [39] Liu H, Fang C, Zhang X, et al. The effect of natural and anthropogenic factors on haze pollution in Chinese cities: A spatial econometrics approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017(165):323—333.
- [40] Wang Q, Kwan M P, Zhou K, et al. The impacts of urbanization on fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentrations: Empirical evidence from 135 countries worldwide[J]. *Environmental pollution*, 2019(247):989—998.
- [41] 于冠一,修春亮.辽宁省城市化进程对雾霾污染的影响和溢出效应[J].*经济地理*,2018(04):100—108.
- [42] Jiang P, Yang J, Huang C, et al. The contribution of socioeconomic factors to $PM_{2.5}$ pollution in urban China[J]. *Environmental Pollution*, 2018(233):977—985.
- [43] 李平星,樊杰.城市扩张情景模拟及对城市形态与体系的影响——以广西西江经济带为例[J].*地理研究*, 2014,33(03):509—519.
- [44] Du Y, Wan Q, Liu H, et al. How does urbanization influence $PM_{2.5}$ concentrations? Perspective of spillover effect of multi-dimensional urbanization impact[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019(220):974—983.
- [45] 陈林,万攀兵.城镇化建设的乡镇发展和环境污染效应[J].*中国人口·资源与环境*,2021,31(04):62—73.
- [46] Hansen B E. Threshold effects in non-dynamic panels: Estimation, testing, and inference[J]. *Journal of Econometrics*, 1999,93(02):345—368.
- [47] Hansen B E. Sample splitting and threshold estimation[J]. *Econometrica*, 2000,68(03):575—603.

[48] 姚士谋,王肖惠,陈振光.大城市群内新型城镇化发展的策略问题[J].人文地理,2015,30(04):1—5.

(责任编辑:蒋萍)

Research on the Impact of Urbanization on Haze Pollution: Based on an Empirical Test of 285 Prefecture-Level Cities in China

YANG Mian^{1,2}, CHENG Yan¹, LI Qiang-yi³

(1. Economics and Management School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072;

2. Institute of Economics, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072;

3. School of Economics and Management, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541006)

Abstract: Haze pollution affects human health, quality of life and labor productivity, and is a prominent problem in the urban development in China. By applying spatial econometric model and threshold model analysis methods, this paper empirically investigates the effect of urbanization rate on $PM_{2.5}$ pollution by dividing 285 prefecture-level and above cities in China into high-emission, medium-emission, and low-emission zones in terms of the degree of haze pollution. The results showed that $PM_{2.5}$ has a spatial spillover effect in Chinese cities. At the national level, the increase of urbanization rate in medium emission areas and low emission areas leads to the increase of $PM_{2.5}$ concentration, while that in high emission area will decrease $PM_{2.5}$ concentration. The urbanization rate has a threshold effect on $PM_{2.5}$ pollution, and $PM_{2.5}$ concentration shows a marginal increasing trend with the increase of urbanization rate.

Key words: haze pollution; urbanization; spatial spillover effect; threshold effect