

城镇化发展对大气污染的影响研究

温璐歌 许铃川 沈体雁¹

【摘要】：城镇化进程中的大气污染问题一直是政府和社会各界热烈探讨的议题之一。城镇化发展与大气污染具有显著的空间相关性，并表现为“高一高”集聚和“低—低”集聚；空间自回归模型（SAR）是拟合度最高的模型；人口城镇化水平与大气污染呈现显著的负相关，土地城镇化则呈现显著的正相关，同时城镇经济发展水平与大气污染之间呈现倒“U”型结构；适度的环境治理投资将会有效降低大气污染；城镇化发展水平对大气污染不仅具有直接影响，同时也具有间接影响，且影响力方向一致。各地区政策制定者应当以降低大气污染为目标，加强地区间联动，提倡共同治理并加紧区域合作。

【关键词】：城镇化 大气污染 空间自回归模型 区域合作

【中图分类号】 F062.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1004—518X（2022）07—0077-10

一、引言和相关文献述评

大气污染尤其是雾霾对人体健康、气候环境以及城市的可持续发展影响重大，其中，PM_{2.5}是引发雾霾的“元凶”之一。2012年亚洲开发银行与清华大学联合发布的《中华人民共和国国家环境分析报告》显示，中国空气质量的恶化导致了相对较高的经济成本。据估计，PM_{2.5}造成的年度经济损失相当于我国国内生产总值（GDP）的1.2%。^[1]十八大以来，环境问题已经成为我国经济高质量发展进程中不可忽视的重要问题。十九大报告也明确提出，中国特色社会主义事业总体布局是包含生态文明建设在内的“五位一体”，并把污染防治作为决胜全面建成小康社会的三大攻坚战之一列入重点工作规划。^[2]2021年颁布的《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》也进一步显示了党和政府对于环境治理尤其是大气污染治理的决心。^[3]

为研究城镇化发展与大气污染之间的内在影响机理，本文选取引发重度污染最为主要的因素PM_{2.5}作为解释大气污染的代理指标，并采用2009—2019年中国31个省、自治区、直辖市（因数据不全，我国的台湾地区、香港特别行政区和澳门特别行政区未纳入研究范围）的8个指标分析我国各省城镇化发展对大气污染的影响。

对大气污染影响因素的研究，早期主要集中在自然条件方面，包括降雨量、温度、湿度、大气压强等。^{[4][5]}随着经济社会不断发展，人类社会经济活动与大气污染之间的关系成为近些年学者们研究的重点。^[6,7,8,9]城镇化作为经济社会发展到一定阶段的产物^[10]，城镇建设用地的扩张、能源消耗的增长、非农人口向城市的大量集聚等均在一定程度上对生态环境造成了影响。而随着中国城镇化进程趋于成熟，城镇化从“数量”发展转变为“质量”发展，如何将生态文明建设融入城镇化发展进程，实现城镇化与生态环境和谐共生，对促进中国经济高质量发展有着重要的理论和实践意义。

对城镇化与大气污染之间关系的研究主要有三种不同的观点。一是城镇化正向加速了大气污染，即城镇化进程的推进对大气污染的排放产生了正向作用。此类研究主要集中在人口快速增长^[11,12,13]、建设用地急速扩张^{[14][15]}对大气污染的正向作用及对作用机制的解析上。也有学者认为，总体上全国城镇化水平与大气污染存在显著的正相关关系，但东中西部呈现的关系存在差别。

作者简介：温璐歌，北京大学政府管理学院博士生。（北京 100871）

许铃川，对外经贸大学保险学院学生。（北京 100029）

沈体雁，北京大学政府管理学院教授、博士生导师。（北京 100871）

基金项目：国家自然科学基金重点项目“我国产业集聚演进与新动能培育发展研究”（71733001）；国家社会科学基金重大项目“中国产业集群地图系统（CCM）建设与应用研究”（17ZDA055）

^[16]二是城镇化的规模效应和集聚效应有利于降低大气污染，即城镇化进程对大气污染的排放产生负向影响。此类研究主要阐释城镇化发展可以为城市的大气污染减弱带来福利。原因在于，城镇化会带来经济和收入水平的增长，进而会促进人们追求更加宜居的生存环境，从而提升人们的环保意识，间接带来空气污染的下降。^{[17][18]}三是城镇化与大气污染呈非线性关系。不同学者应用门槛效应模型^[19, 20, 21]、EKC 曲线^[22, 23, 24]等方法验证了城镇化与大气污染呈现倒“U”形或者“N”形关系。也有研究发现，全国、东部和西部城镇化对环境污染的影响均呈现倒 N 形，中部则呈现 U 形；并提出，当制度安排较低时，城镇化提高会加剧环境污染，当制度安排逐步完善时，城镇化对环境污染的加剧作用会逐步减弱。^[25]然而，大部分学者对城镇化与大气污染关系的研究只考虑了单一的城镇化指标，探索多维度城镇化指标对大气污染影响的论文并不多见。本文立足于这一切入点，在考虑人口、土地和经济三个维度的城镇化指标的同时，把经济城镇化的二次项也纳入考虑范围，意图探寻城镇化发展与大气污染之间的非线性关系。

此外，尽管研究城镇化与大气污染的文献层出不穷，但大部分文章主要采用时间序列法，分析的是短期数据甚至是一年的数据，这无疑会导致无法准确评估城镇化因素对大气污染的长期影响。而本文则通过使用长期面板数据揭示大气污染 PM_{2.5} 的空间和时间变化，这些数据可以准确地展示 PM_{2.5} 浓度水平的区域差异规律，并为后续对雾霾污染的治理提供支持。与此同时，考虑到大气污染的空间传播性，本文注重使用空间计量经济学理论分析和测量区域之间 PM_{2.5} 的差异及空间依赖性，并使用空间面板模型从时间和空间两个维度探索城镇化对大气污染的影响，为政策制定者与科学研究进一步打开大气污染与城市发展之间的“黑箱”做出贡献。

二、数据来源与研究方法

（一）数据选择及统计性分析

根据数据的可得性，本文采用我国 31 个省、自治区和直辖市 2009—2019 年静态面板数据进行分析。应用不同省份的大气污染物 PM_{2.5} 年度平均值代表自变量 PM_{it} 的值，其单位为 ug/立方米。

为了更全面地反映我国城镇化进程，本文设定了三个城镇化指标，分别是人口城镇化（Pop）、土地城镇化（Land）和经济城镇化（Eco），并从《中国城市统计年鉴》（2009—2019）和国家统计局数据库提取相关数据。首先，人口城镇化。城镇化进程的基本形式是城市（城镇）中人口的大量聚集，因此用城镇人口占年末常住人口的比例进行测算。其次，土地城镇化。人口从农村向城市的迁徙会导致城市人口的增加，进一步产生城市空间结构的变化，因此采用城市的扩张即城市建成区面积占总面积的比例来描述土地城镇化。最后，经济城镇化。我国现在处于城镇化的加速阶段，城镇化不仅影响经济发展，同时也是经济发展的结果，而经济发展方式的升级、产业的提升和结构的优化则是经济持续增长的动力，因此采用人均 GDP 表示经济城镇化的发展水平，单位为 10 万元/人。另外，本文也考虑了人均 GDP 的平方项。主要机理是根据环境库兹涅茨曲线的假设，人为环境质量与经济发展之间呈现一个倒“U”型关系^[23]，且环境质量与经济发展之间具有非常复杂的相关性。因此，为了使本文的模型更符合现实，将人均 GDP 的平方项引入模型，以期提高模型的准确性。特别需要注意的是，为了使数据更严谨，本文使用的人均 GDP 是把 2009 年作为基准年，同时考虑通货膨胀等问题，将 2010 年到 2019 年的数据根据一定比例进行折算，使得整体数据处于同一经济水平。

为了考察其他因素对大气污染的影响，本文在省级层面控制了一些可能的特征变量。主要选取第二产业占比（Sec）、环境投资占比（Env）以及路网密度（Trans）作为控制变量，分别代表工业化程度（Sec）、环境治理能效（Env）以及交通便利度（Trans）。同时，考虑环境治理对大气污染的影响可能是非线性的，本文还引入了环境治理的二次项，处理方法与人均 GDP 一样。具体变量定义如表 1 所示。

表 1 模型中参数的定义及单位表示

变量名	变量的定义	单位
PM2.5	年均 PM2.5 的含量	ug / 平方米
Pop	城镇人口在年末常住人口的占比	%
Eco	实际人均 GDP	10 万元
Land	建成区在总面积的占比	%
Sec	第二产业在 GDP 中的占比	%
Env	环境投资在本省 GDP 的占比	%
Trans	路网密度	公里/平方公里

(二) 空气质量空间效应检验模型

根据 Tobler 第一定律，空间距离越近，属性值之间的相关性越大，空间依赖性越强，而且大气污染不仅具有空间依赖性，还具有空间异质性。为了定量测量相邻区域大气污染的空间依赖性，本文采用经典全局空间自相关指数 Moran' sI 来衡量其相关度。

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

其中， $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ，n 为选取的省的个数； \bar{x} 代表 n 个省 PM2.5 观测值的中间值； $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ ； W_{ij} 代表空间权重矩阵； x_i 和 x_j 分别指代区域 i 和 j 上的 PM2.5 的观测值。莫兰指数 I 的取值一般介于 [-1, 1] 之间，大于 0 代表正相关，小于 0 代表负相关，并且指数的绝对值越高代表着越强的空间自相关性。局部空间自相关通常可以通过 Moran 散点图和空间关联局部指标 (LISA) 进行测量。^{[26] (P93-115)} Moran 散点图由四个象限组成，第一和第三象限显示正的空间自相关，第二和第四象限显示负的空间自相关。第一象限 (HH) 代表高污染城市，周围是其他污染严重的城市，而第三象限 (LL) 代表低污染城市，周围是其他污染程度低的城市。第二象限 (LH) 和第四象限 (HL) 分别反映城市及其邻近地区具有相反的污染属性。LISA 通常由局部 Moran 指数 I 来度量，其定义如下：

$$I = \frac{(X_i - \bar{X})}{S^2} \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad (2)$$

参数的意义同式 (1)，不多赘述。

(三) 基于空间效应的城市空气质量驱动力模型

空间计量经济学模型可以有效解决传统线性回归 (OLS) 中无法解决的空间依赖性问题。为了探索城镇化对 PM2.5 的空间影响, 本文使用了三种类型的空间计量模型, 分别是空间自回归模型 (SAR)、空间误差模型 (SEM) 和空间杜宾模型 (SDM)。^{[27][28] (P480)} SAR 模型通过描述被解释变量之间的空间相关性, 探讨各变量在一个区域是否具有扩散效应。SEM 模型通过添加空间滞后因子, 探讨因变量的变化对于相邻地区的误差冲击, 通常用于研究机构或者地区之间的相互作用由于所处相对位置的不同而存在差异的情况。SDM 模型作为 SAR 模型和 SEM 模型的组合拓展模型, 既考虑了因变量的空间相关性也考虑了自变量的空间相关性。在本文中, SAR、SEM 和 SDM 的模型表现形式分别由式 (3) (4) (5) 表示:

$$SAR: \ln PM_{it} = \alpha_0 + \rho \sum W \ln PM_{it} + \beta_1 \ln URB_{it} + \beta_2 \ln CT_{it} + \epsilon_{it} \quad (3)$$

$$SEM: \ln PM_{it} = \alpha_0 + \rho \ln PM_{it} + \beta_1 \ln URB_{it} + \beta_2 \ln CT_{it} + \epsilon_{it}, \epsilon_{it} = \lambda W \epsilon_{it} + \mu_{it} \quad (4)$$

$$SDM: \ln PM_{it} = \alpha_0 + \rho \sum W \ln PM_{it} + \beta_1 \ln URB_{it} + \beta_2 \ln CT_{it} + \beta_3 \sum W \ln URB_{it} + \beta_4 \sum W \ln CT_{it} + \epsilon_{it} \quad (5)$$

式 (3) 中 i 和 t 分别代表省份和年份。W 是基于空间权重矩阵, $\sum W \ln PM_{it}$ 是作为空间权重矩阵 W 的空间滞后因变量, 反应空间距离对于各个空间单元之间的作用。 ρ 为空间回归系数, 反应的是空间单元之间的相互关系, 也就是相邻省份大气污染 PM2.5 的浓度变化对于该省份的影响程度。式 (4) 中 λ 是空间误差自相关系数, 模型中的误差项 ϵ_{it} 是由其空间自相关项 $W \epsilon_{it}$ 和随机扰动项 μ_{it} 构成, 其中 μ_{it} 服从正态分布。式 (5) 中 $\sum W URB_{it}$ 和 $\sum W CT_{it}$ 分别代表空间权重矩阵 W 的空间滞后自变量。另外, PM_{it} 指代 PM2.5 在不同城市不同时间上的浓度值, URB_{it} 指代城镇化的相关指标, CT_{it} 指代控制变量指标。为了减少数据的波动并消除异方差, 对方程两边的变量采用对数形式进行标准化处理。

本文使用最大似然法 (Maximum likelihood, ML) 对空间回归模型进行参数估计。空间权重矩阵作为 SAR、SEM、SDM 运算过程中非常重要的系数矩阵, 对结果会产生重要影响, 本文采用基于球面距离的反比例函数作为空间权重矩阵进行后续的分析。对于不同模型拟合优度的比较采用对数似然比 (LR) 进行检验。

三、结果分析

(一) PM2.5 浓度时空分布特征与空间自相关分析

基于中国《环境空气质量标准》(GB3095—2012) 中 PM2.5 年均浓度限制, 将 PM2.5 年均浓度划分为四个区间: 低于 $15 \mu g/m^3$ 、 $15 \mu g/m^3 \sim 35 \mu g/m^3$ 、 $35 \mu g/m^3 \sim 55 \mu g/m^3$ 、高于 $55 \mu g/m^3$, 用以分析 2009—2019 年中国 PM2.5 浓度分布的结构特征。从图 1 可以看出, PM2.5 的年均浓度低于 $15 \mu g/m^3$ 的低污染地区从 2009 年到 2019 年基本维持不变, 同时随着政府对于大气污染治理的日益重视, PM2.5 的年平均浓度高于 $55 \mu g/m^3$ 的高污染地区在 2019 年达到最小值, 首次实现了清零。处于中间污染程度的地区在 2009—2019 年逐渐增多, 尤其是处于 $15 \mu g/m^3 \sim 35 \mu g/m^3$ 的城市, 在 2009 年到 2019 年间增加了三倍。

为了能更直观地展现各区域大气污染的时序变化, 图 2 将 2009 年到 2019 年东部地区、西部地区、中部地区、东北地区以及全国平均 PM2.5 变化通过折线图的方式展示出来了。从图中可以看出, 东部地区、西部地区和中部地区的平均 PM2.5 的排放量整体呈现下降趋势, 东部地区的下降幅度最为明显, 从 2009 年到 2019 年该地区的大气污染减了 34%, 远高于全国平均水平, 西部地区和中部地区与全国平均水平基本持平, 下降幅度分别为 28% 和 27%。而东北地区的大气污染在 2009 年到 2019 年间呈现出先上升后下降的趋势, 在 2014 年前后达到峰值, 之后呈现下行趋势。

在详细分析大气污染排放的时空特征后，本文使用 STATA15.0 计算全国 31 个省 2009—2019 年全球 Moran' sI 指数，用以判断大气污染是否具有空间自相关性。如表 2 所示，所有年份的 Moran' sI 均大于 0，且在 1% 的水平下显著，说明大气污染 PM2.5 具有显著的空间正向自相关性。为了进一步观察每个省份 PM2.5 的具体空间特征，本文绘制了 2009 年和 2019 年 PM2.5 的局域 Moran 散点图（图 3a 和图 3b）。四个象限分别对应区域单位和相邻区域局部空间相关性。如图 3 所示，大多数省位于第一或第三象限，即表现为“高一高”相关性（高值聚合）和“低—低”相关性（低值聚合），这表明它们具有很强的空间依赖性。同时，位于第一象限内的省份主要集中于东部沿海，且 2009 年到 2019 年高集聚度的空间特征增加；第三象限的低值集聚集中于西部地区。第二和第四象限分别表示“低—高”相关性和“高一低”相关性，表明这些区域具有很强的空间异质性。2009—2019 年，第四象限包含的省份有下降趋势；湖南、新疆、重庆的大气污染依旧严重，但其周边省份的大气污染浓度依旧维持在较低的水平。

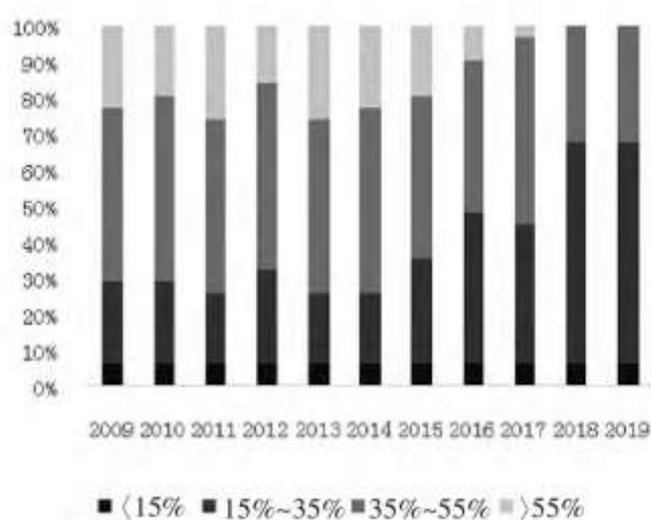


图 1 2009—2019 年全国分等级 PM2.5 浓度占比图

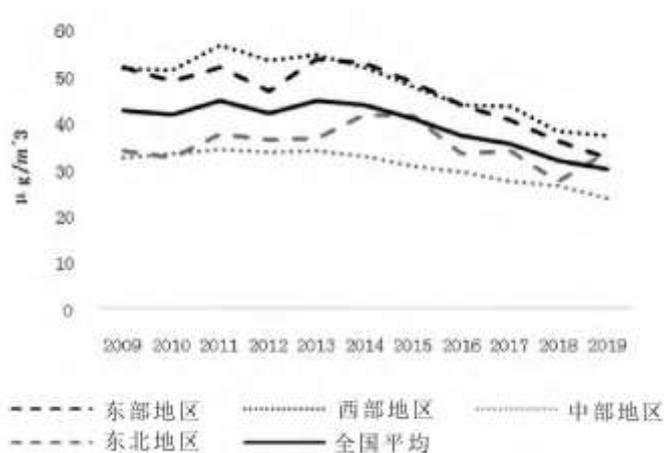


图 2 2009—2019 年全国分地区 PM2.5 浓度变化图

（二）空间回归结果比较与因素分析

通过对空间自相关结果进行分析，本文得出 PM_{2.5} 具有强烈的空间依赖性，因此如果采用传统的 OLS 回归，则会产生一定程度的偏误，于是引入空间面板模型。由于分析是针对特定的个体进行的，因此假定模型为固定效应模型，并进行下一步的回归分析。

表 2 2009—2019 年 PM_{2.5} 的全局莫兰 I 指数

年份	莫兰 I 指数	P-VALUE*
2009	0.184	0.000
2010	0.362	0.000
2011	0.328	0.000
2012	0.317	0.000
2013	0.299	0.000
2014	0.303	0.000
2015	0.350	0.000
2016	0.354	0.000
2017	0.337	0.000
2018	0.306	0.000
2019	0.263	0.000

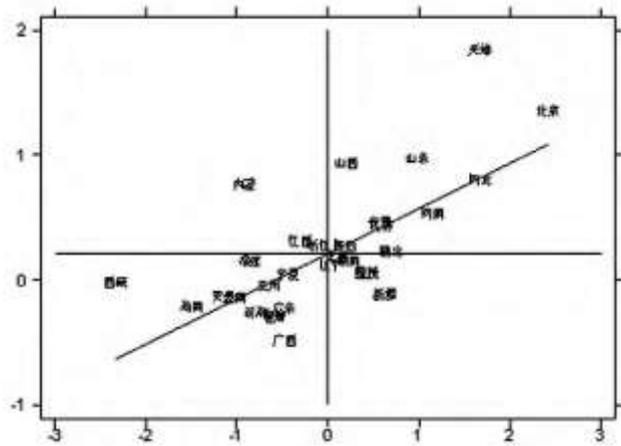


图 3 a 2009 年我国 PM2.5 的局部莫兰 I 指数

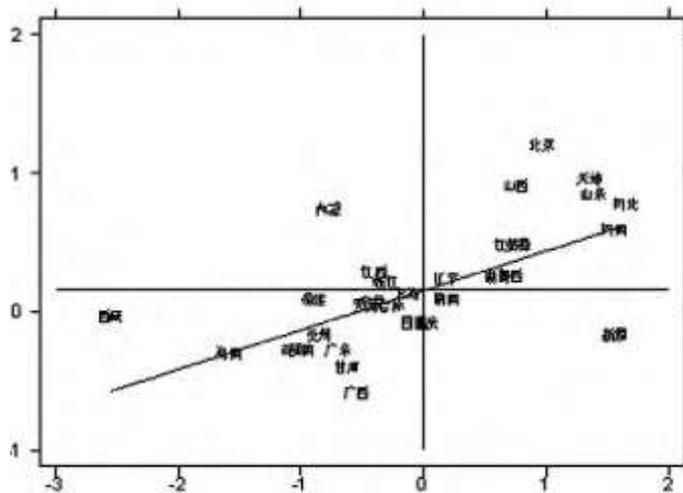


图 3 b 2019 年我国 PM2.5 的局部莫兰 I 指数

首先，在进行回归分析之前，采用 LM 检验以及 RobustLM 检验确认是否需要应用 SDM 模型进行分析。结果所示，LM-lag 和 LM-err 在 1% 的水平上显著，而 Robust-LM-err 未见显著。这意味着 SAR 模型对本文的研究是更好的选择，通过对 SAR 模型进行 Hausman 检验，得到其 chi 值为正且在 1% 的水平上显著，证实了初始假定是正确的。

考虑结果的稳定性，本文将 SEM 和 SDM 的回归结果也展示出来了。空间自回归系数 ρ 和空间误差自相关系数都在 1% 的水平上显著，这意味着 PM2.5 在空间上有强烈的溢出效应，这也与之前得到的全局空间莫兰指数 I 和局部莫兰散点图的结果一致。根据三个模型的参数估计结果，可以得到以下结论。

第一，经济发展与大气污染之间存在着倒“U”形结构关系，即随着经济的进一步发展，大气污染显著增长到一定数值之后会呈现减弱态势。从参数可以看出，人均 GDP 占比的一次项与 PM2.5 的浓度成正相关 ($\beta_{SAR}=0.784$, $\beta_{SEM}=1.043$, $\beta_{SDM}=0.401$)，而其二次项与 PM2.5 的浓度呈现明显的负相关 ($\beta_{SAR}=-0.411$, $\beta_{SEM}=-0.662$, $\beta_{SDM}=-0.0514$)。在城市发展初期，经济的增长是以

牺牲环境质量为代价的，而随着城市的进步、科技的发展以及人们对环境保护意识的增强等，经济的增长会对环境保护起到正向作用。这一结果也证实了环境的库兹涅茨曲线同样适用于中国实际，同时也从空间计量的视角证实了前人的研究。

第二，人口城镇化水平有效降低了大气污染，而土地城镇化则与大气污染呈现显著的正相关。可以看到，城镇人口的增加会削弱大气污染 PM2.5 的浓度。这说明城镇人口的增加有利于环境保护。其主要原因在于，农村固体燃料的使用是 PM2.5 的来源之一。^[29]土地城镇化与大气污染 PM2.5 的浓度呈现显著的正相关 ($\beta_{SAR}=0.0968$, $\beta_{SEM}=0.0781$, $\beta_{SDM}=0.102$)。在城市发展过程中，建设用地的扩张会导致农业用地的收缩，工业企业的增加也会带来大气污染的加重。另外，城市空间的扩张是以消耗城市周围的绿色空间为代价的。耕地减少、湿地破坏等严重阻碍了生态环境的自我再生能力，生态环境的破坏则使得大气污染物无法被自然吸收，从而加剧了环境恶化。

通过观察控制变量，笔者发现环境治理投资对大气污染呈现非线性影响，且较为显著；同时，尽管在本模型中路网密度对大气污染改变的影响非常弱，但也可以看出交通越便利则大气污染越会加剧。在本文中工业化程度对大气污染的改变并没有显著影响，因此不做赘述。

（三）直接作用与间接作用分析

为了深入分析空间作用对 PM2.5 的影响，本文进一步展示了由 SAR 模型计算得到的解释变量直接与间接作用的结果可知，人口城镇化、土地城镇化、经济城镇化与经济城镇化的二次项对 PM2.5 有着显著的直接和间接影响。同时经济城镇化对 PM2.5 在直接影响和间接影响上都呈现倒“U”形关系。而环境治理投资占比也显著增加了大气污染的排放，且直接影响远明显于间接影响。另外，第二产业占比与路网密度对大气污染的影响表现微弱。通过对本地大气污染直接效应的绝对影响力从大到小进行排序可知，经济城镇化>人口城镇化>经济城镇化的平方项>土地城镇化>路网密度>环境治理>第二产业占比>环境治理的二次方。同时，可以看出间接影响也有着同样的排列顺序。

四、结论与对策建议

（一）结论

本研究通过分析我国 31 个省、自治区、直辖市大气污染与城镇化发展的关系，运用三种空间计量模型，定量解析了不同城镇化指标与相关变量对我国省级行政区 PM2.5 的贡献程度及空间溢出效应，研究结果显示：

第一，2009—2019 年我国各省份年均 GDP 整体呈现类“M”形状的趋势，空间上呈现东北与西部低，中部与东部高的态势。东部地区的大气污染下降幅度最为显著，中西部地区的大气污染逐年趋好，下降幅度与全国平均水平基本持平，而东北地区的大气污染尽管整体呈现下行的趋势，但其下降水平远低于其他地区。同时，根据全局莫兰以及局部莫兰指数，大气污染 PM2.5 的浓度在省级层面上存在明显的空间自相关性和空间异质性，这表明大气污染在省级层面上的区域性和集聚性特征明显。

第二，城镇化指标对大气污染具有显著影响。本研究实证检验了经济发展与大气污染之间存在倒“U”形关系，符合环境的库兹涅茨曲线假设。环境投资及路网密度对大气污染的影响也较为显著，其中环境投资对大气污染治理的影响同样也存在着非线性影响。另外，从模型分析中可知，各种因素不仅对本地的空气污染有着程度不一的影响，也对周边邻近地区存在着间接影响。

（二）对策建议

本研究选取 2009—2019 年我国省级面板数据进行分析，在此段时间内，前期城镇化发展迅速，经济呈现飞速增长，但此时

的城镇化发展主要体现在“数量”上，因此对环境问题并没有给予太多关注，也导致了环境污染尤其是大气污染急速上升。2014年党的十八届三中全会提出新型城镇化发展战略，强调城镇化发展应当注重“质量”，至此环境污染问题得到重视，大气污染问题也在全国范围内有所缓解。在此背景下，结合研究结论，笔者提出四点建议：一是针对大气污染的空间溢出效应，地方政府之间需要加强合作，控制和防范大气污染恶化。相邻城市及城市群应当采取合作举措，政策制定者需要考虑城市群的联动机制；以加强区域联合预防和控制、区域间合作治理为目的，建立区域间的生态保护合作平台。二是针对城镇化发展带来的人口快速增长、大气污染加速等问题，政策制定者应当加强人才引进力度，用人才的集聚促进城市高效率发展进而减轻人口规模增长对资源环境带来的负外部性。三是针对城镇化发展带来的建设用地扩张、能源能耗扩大等问题，政府应当限制高密度大城市的发展规模，转而发展密度较低且小的中小城市，同时提倡绿色发展战略，增加可再生和清洁能源数量，鼓励并奖励高污染高排放工业企业进行绿色转型。四是为了防止出现恶意破坏环境、损伤生态系统的行为，政策制定者应当在考虑本地经济发展实际的基础上为环境规划和保护立法。

参考文献:

- [1]张庆丰, (美) 罗伯特·克鲁克斯. 迈向环境可持续的未来: 中华人民共和国国家环境分析[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2012.
- [2]习近平. 决胜全面建成小康社会夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利——在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告[M]. 北京: 人民出版社, 2017.
- [3]中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见[N]. 人民日报, 2021-11-08(01).
- [4]张莹, 张婕, 王式功, 康平, 张家熙, 张小玲, 李运超. 成都市 PM_{2.5} 浓度变化的影响因素交互作用研究[J]. 中国环境科学, 2021, (10).
- [5]贺祥, 林振山. 基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响[J]. 环境科学, 2017, (1).
- [6]张广来, 张宁, 任亚运. 大气污染规制对城市空气污染的防治成效研究——基于准实验分析[J]. 生态学报, 2022, (19).
- [7]曾倩, 曾先峰, 岳婧霞. 产业结构、环境规制与环境质量——基于中国省际视角的理论与实证分析[J]. 管理评论, 2020, (5).
- [8]王欣钰, 张欣宇, 姚姗, 李国展, 陈汝阳. 经济集聚对大气污染影响文献综述[J]. 合作经济与科技, 2022, (9).
- [9]柯瑞. FDI 对环境污染影响的实证分析[J]. 统计与管理, 2020, (7).
- [10]曹文莉, 张小林, 潘义勇, 张春梅. 发达地区人口、土地与经济城镇化协调发展度研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, (2).
- [11]Wang S, Zhou C, et al. The characteristics and drivers of fine particulate matter (PM_{2.5}) distribution in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, (4).
- [12]李小帆, 邓宏兵, 谢伟伟. 武汉城市圈城镇化水平和大气污染的关系研究——基于灰色关联和空间计量方法[J]. 城市规划, 2019, (5).

-
- [13] (英) 马尔萨斯. 人口原理[M]. 朱泱, 胡企林, 朱和中, 译. 北京: 商务印书馆, 1992.
- [14] 贾倩, 叶长盛. 中国 35 个大中城市建设用地结构与空气质量的典型相关分析[J]. 中国农学通报, 2019, (25).
- [15] Liu X, Sun T, Feng Q. Dynamic Spatial Spillover Effect of Urbanization on Environmental Pollution in China Considering the Inertia Characteristics of Environmental Pollution. *Sustainable Cities and Society*, 2019.
- [16] 仇怡, 黄丹. 城镇化水平对雾霾污染的影响研究——以我国地级及以上城市为例[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 2020, (4).
- [17] 王瑞鹏, 王朋岗. 城市化、产业结构调整与环境污染的动态关系——基于 VAR 模型的实证分析[J]. 工业技术经济, 2013, (1).
- [18] 杨冬梅, 万道侠, 杨晨格. 产业结构、城市化与环境污染——基于山东的实证研究[J]. 经济与管理评论, 2014, (2).
- [19] 李德立, 王夕文. 经济增长对雾霾污染影响的实证研究——基于中国省级面板数据门槛效应分析[J]. 生态经济, 2017, (10).
- [20] 李存贵. 中国城镇化对环境污染的空间溢出与门槛效应研究[J]. 生态经济, 2021, (3).
- [21] 刘怡彤. 新型城镇化视阈下雾霾污染问题研究——基于面板门槛模型的实证分析[J]. 绿色科技, 2022, (2).
- [22] 郭佳, 何雄伟, 薛飞. 人口城镇化、经济增长对地区环境污染的影响[J]. 企业经济, 2018, (7).
- [23] 汪慧玲, 刘莉. 城镇化发展是否给环境带来负外部性?——基于省际面板数据的实证研究[J]. 石家庄经济学院学报, 2016, (6).
- [24] 崔鑫生, 韩萌, 方志. 动态演进的倒“U”型环境库兹涅茨曲线[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, (9).
- [25] 李佳佳. 制度安排、城镇化与环境污染[J]. 经济经纬, 2020, (3).
- [26] Anselin, L. Local Indicators of Spatial Association-LISA(1995) *Geogr. Anal.*, 27, (2).
- [27] Anselin, L. *Spatial Econometrics*. Palgrave Handbook of Econometrics, 2016, 1, (1).
- [28] Elhorst, J. P. *Spatial Econometrics: from Cross-Sectional Data to Spatial Panels*. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 2014.
- [29] Guang Shi, Xi Lu, Yu Deng. Johannes Urpelainen, Lan-Cui Liu, Zhonghua Zhang, Wendong Wei, and Haikun Wang. *Environmental Science & Technology*, 2020, (10).