

引用格式: 杨宇, 何唯, 李鹏, 等. 中国城市化与PM2.5浓度时空动态及作用机理: 基于胡焕庸线变迁的视角[J]. 资源科学, 2022, 44(10): 2100–2113. [Yang Y, He W, Li P, et al. Spatiotemporal dynamics and mechanisms in urbanization and PM2.5 concentration in China: A perspective based on the transition of Hu Huanyong Line[J]. Resources Science, 2022, 44(10): 2100–2113.] DOI: 10.18402/resci.2022.10.12

# 中国城市化与PM2.5浓度时空动态及作用机理 基于胡焕庸线变迁的视角

杨宇<sup>1</sup>, 何唯<sup>1</sup>, 李鹏<sup>2</sup>, 刘皓宇<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学商学院, 成都 610059; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 南昌大学经济与管理学院, 南昌 330031)

**摘要:** 在快速城市化给环境带来严峻挑战的背景下, 围绕中国典型城市群的城市化对环境污染影响的研究取得了显著进展。然而, 聚焦胡焕庸线时空变迁而形成的“美丽中国中脊带”(简称中脊带)的城市化与雾霾污染相关深入研究较为鲜见。为此, 本文利用2005—2018年全国314个地级市城市灯光复合指数(城市化)、雾霾污染(PM2.5)及其他方面的面板数据, 借助ArcGIS厘定了中脊带及其东西两侧地区城市化与雾霾污染的时空变化, 在STIRPAT模型和环境库兹涅茨曲线(EKC假说)的理论框架下实证分析了3个区域城市化对雾霾污染的异质性影响并揭示了其作用机理。研究表明: ①受人口密度低等影响, 西侧地区城市化推进速度上升趋势要远低于东侧及中脊带地区; ②城市化与雾霾污染的关系在东侧地区存在显著的倒“U”型关系, 在西侧地区表现出明显的正相关关系, 在中脊带地区未呈现出显著规律; ③在东侧地区通过人口集聚效应和产业结构效应可缓解城市化对雾霾污染的不利影响, 而在西侧地区产业结构效应会加剧不利影响, 中脊带地区人口集聚效应和产业结构效应均不明显。以上结论可为建立区域联防联控的环境治理机制、推进产业结构调整 and 增强人口集聚规模效应等政策建议提供实证依据, 并促进西侧地区高水平的现代化和高质量的城镇化。

**关键词:** 城市化; 雾霾污染; 胡焕庸线; 中脊带; 作用机理; 空间杜宾模型; 城市灯光复合指数; PM2.5; 中国

DOI: 10.18402/resci.2022.10.12

## 1 引言

中国城市化快速推进, 1978—2018年城镇化率增长了3.3倍。城镇消费群体扩大和消费潜力释放, 对经济增长产生了正向促进效果<sup>[1-3]</sup>; 这也对城市生态环境造成了较大压力, 其中空气污染问题尤为严峻<sup>[4]</sup>。据《中国生态环境状况公报》, 2018年全国338个城市以PM2.5为首要污染物的天数占重度及以上污染天数的60%。PM2.5不仅对健康构成严重威胁<sup>[5]</sup>, 也对经济高质量发展形成巨大挑战<sup>[6]</sup>。

围绕城市化对环境污染影响及作用机理已取

得显著进展, 但结论未达成共识。一种观点认为, 粗放式的城市化进程会加剧环境污染(如提升PM2.5浓度)<sup>[7,8]</sup>, 即通过交通运输和基础设施建设、产业集聚和资源消费等强度的增加恶化了环境<sup>[9]</sup>。另一种观点认为, 城市化进程在一定程度上能够抑制环境污染<sup>[10,11]</sup>, 即通过促进技术创新、降低能源强度以及优化产业结构等途径可缓解其对环境污染的损害<sup>[11-13]</sup>。此外, 学界还认为城市化与PM2.5浓度存在非线性关系, 即在不同发展阶段城市化对PM2.5浓度影响存在“拐点效应”<sup>[14,15]</sup>。

收稿日期: 2022-05-25; 修订日期: 2022-09-29

基金项目: 成都理工大学“双一流”建设哲学社会科学重点建设项目(ZDJS202207); 成都理工大学哲学社会科学研究基金项目(YJ2022-ZD006); 中国科学院青年创新促进会会员人才专项(CAS2020055)。

作者简介: 杨宇, 男, 四川金堂人, 博士, 副教授, 主要研究方向为资源与环境经济。E-mail: yangyu15@cdut.edu.cn

通讯作者: 李鹏, 男, 江西永新人, 博士, 副研究员, 主要从事资源遥感与边境地理研究。E-mail: lip@igsnnr.ac.cn

2022年10月

上述研究结论出现差异的原因,除受不同研究时间跨度和研究方法影响外,研究尺度也是重要因素。目前,研究多集中于京津冀、长三角、长江经济带及其他重点污染区等典型区域<sup>[7,8,16]</sup>,或立足全国讨论东、中、西部城市化对PM2.5浓度的异质性影响<sup>[14,15]</sup>。作为中国重要的人口地理分界线<sup>[17]</sup>、城市群PM2.5浓度冷热点的分界线<sup>[18]</sup>,也是中国区域发展绝对不平衡与城镇化水平的分界线<sup>[19]</sup>,胡焕庸线已成为研究中国人口、经济和社会发展等问题的重要参照之一<sup>[20]</sup>。然而,聚焦胡焕庸线来深入系统讨论城市化对PM2.5污染影响的研究较为鲜见。

2014年,国务院总理李克强基于统筹区域协调发展视角,提出“城镇化关系到中国现代化的成败,胡焕庸线是个经济地理问题,应不应该打破?能不能打破?……”<sup>[21]</sup>,引起学者关注。“胡焕庸线怎么破”之问促进了地理学、生态环境及经济均衡发展等学科/领域学者对胡焕庸线的研究<sup>[22]</sup>,深化了对胡焕庸线的认知,从“胡焕庸线”扩展到“美丽中国中脊带”(以下简称中脊带)<sup>[23]</sup>。中脊带的提出是科学认知的突破,可作为破解“胡焕庸线”东、西部发展不平衡、不充分的战略抓手<sup>[23]</sup>。由此,探讨中脊带及其东西两侧地区城市化与雾霾污染(PM2.5污染)的时空演变及其关系,不仅契合国家区域均衡发展和生态环境战略导向,也可为指导区域经济均衡发展实践、新型城镇化的实施及生态环境建设提供参考,进一步回答“胡焕庸线怎么破”之问。

基于此,本文提出3个科学问题:中脊带及其东西两侧地区的城市化与PM2.5浓度时空演变趋势是怎样的?城市化对PM2.5浓度的影响是否会在3个区域上产生异质性效果?如果存在差异,影响差异的机理又是如何?对此,利用2005—2018年中脊带及其东西两侧地区314个地级市的城市化、PM2.5浓度及其他相关经济与气候指标数据,运用ArcGIS、空间自相关等方法揭示城市化与PM2.5浓度的时空演变趋势;在STIRPAT模型和环境库兹涅茨曲线(EKC假说)的理论框架下,构建空间计量经济模型深入分析3个区域的城市化对PM2.5浓度的异质性影响,并探索其影响机理。

## 2 研究区域、数据来源及研究方法

### 2.1 研究区域概况

胡焕庸线是中国东西两侧人口密度差异分界

线、东西地理条件差异分界线,也是东西区域发展不平衡的分界线。作为东西部联动的传递带、新旧动能的转换带<sup>[23]</sup>,中脊带地区成为缩减东西侧发展不平衡的战略区域,契合“胡焕庸线怎么破之问”。中脊带地区、中脊带东侧地区(以下简称东侧地区)和中脊带西侧地区(以下简称西侧地区)的范围如下:中脊带地区为王心源等<sup>[23]</sup>提出的“美丽中国中脊带”,具体包括黑龙江、吉林、内蒙古、山西、陕西、甘肃、宁夏、四川、云南9省份和辽宁、河北、青海、重庆等省份的局部,共77个城市;东侧地区和西侧地区,分别囊括了209和28个城市,其中,受限于部分社会经济变量数据的可得性,港澳台地区和西藏自治区未参与模型分析,仅在城市化与PM2.5浓度时空演化图中有显示。3个地区合计314个地级市,城市数量的差异主要由于东侧人口密集而西侧地广人稀。

### 2.2 数据来源及其预处理

被解释变量选取细颗粒物PM2.5浓度来表征雾霾污染程度。曹子阳<sup>[24]</sup>认为PM2.5是诸多有害物质的载体和集合体,能最大限度代表整体大气污染水平。PM2.5浓度数据来源于加拿大达尔豪斯大学大气成分分析组公布的全球PM2.5栅格数据,已广泛应用于中国空气环境污染等研究<sup>[25,26]</sup>。借助ArcGIS技术将此栅格数据解析为全国2005—2018年的年均PM2.5浓度值( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。

城市化是本文关注的核心变量。城市化是一个人口、产业、技术等多种因素共生演化发展的过程<sup>[27]</sup>。单纯从人口城镇化视角不足以反映城市化综合状态,需从人口、经济空间和社会等城市要素综合考量<sup>[28]</sup>。夜间灯光平均强度正是人口、经济空间和社会等城市要素相互作用的综合体现<sup>[29]</sup>。由此,采用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)发布的DMSP/OLS与NPP/VIIRS数据。在借鉴Zhao<sup>[30]</sup>的算法对原始数据进行校正的基础上,依据陈晋等<sup>[29]</sup>的做法,构造2005—2018年全国范围内的灯光复合指数作为城市化水平的代理变量,用于表征城市密集发展程度与城市规模扩张程度<sup>[15]</sup>。灯光复合指数的计算公式为 $urban_i = \phi urban1_i + (1 - \phi)urban2_i$ 其中,urban1为平均灯光强度表征的城市化深度;urban2为区域面积灯光属性表征的城市化广度;参考陈晋等<sup>[29]</sup>和邵帅等<sup>[15]</sup>的做法,权重 $\phi = 0.8$ 。

鉴于资源禀赋、经济水平、人口规模、产业结构、地理环境及气候因素等社会经济自然要素是影响雾霾污染的综合动因<sup>[15,31]</sup>,为本文选择控制变量提供依据。本文人口密度、经济水平、技术水平、产业结构、公共服务水平等社会经济变量数据来源于《中国城市统计年鉴(2006—2019)》、中经网数据库和经济预测系统(Economy Prediction System 简称EPS)数据库;平均风速、年累积降水量及最高气温等自然条件变量数据来源于国家地球系统科学数据中心。为避免部分缺失值对结论产生影响,采用了线性插值方法填补相应缺失数据。为消除物价因素影响,GDP数据均以2005年为基期换算为可比价。各变量的说明和描述性统计情况见表1。

### 2.3 数据分类

为便于后文进行城市化与雾霾污染的时空动态分析,从科学性和代表性的角度,以2005、2010、2015、2018年为节点把现有数据分成4段,分别对应于“十五”“十一五”“十二五”及“十三五”规划(收集数据截至2018)。这有益于厘定这期间脊带及其东西两侧地区城市化和PM2.5浓度的时空变化趋势。将灯光复合指数均等分5类来表征城市化水平(urban):低( $0 < urban \leq 3$ )、较低( $3 < urban \leq 6$ )、中( $6 < urban \leq 9$ )、较高( $9 < urban \leq 12$ )、高( $urban > 12$ )。参照世界卫生组织(WHO)和中国《环境空气质量标准》,将雾霾污染(以PM2.5浓度 $pm$ 表示,单位为 $\mu g/m^3$ )划分为5个空气质量等级:优( $0 < pm \leq 20$ )、良( $20 < pm \leq 35$ )、中等( $35 < pm \leq 50$ )、轻度污染( $50 < pm \leq 70$ )和重度污染( $pm > 70$ )。

## 2.4 研究方法

### 2.4.1 全局空间自相关

区域经济或环境在时空尺度具有溢出效应和累积效应。运用ArcGIS从时空视角分别探讨3个区域PM2.5浓度和城市化时空演变趋势。依据标准化的地理反距离空间权重矩阵,运用全局Moran's  $I$ 对PM2.5浓度和城市化进行空间相关性分析。计算公式为:

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

式中: $n$ 为研究城市总数; $x_i$ 、 $x_j$ 分别为城市 $i$ 和 $j$ 的PM2.5浓度(或城市化水平)的观测值; $\bar{x}$ 为区域间PM2.5浓度(或城市化水平)的平均值; $s^2$ 为PM2.5浓度(或城市化水平)的方差; $w_{ij}$ 为空间权重值,本文中的空间权重矩阵为地理反距离空间权重矩阵。其权重矩阵计算式如下:

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{d_{ij}} & \text{当区域} i \text{和} j \text{相邻接} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $d_{ij}$ 为 $i$ 市域单元与 $j$ 市域单元两个单元的质心坐标,可表征两个区域单元之间的欧氏距离。另外,常采用标准化统计量 $Z$ 来计算Moran's  $I$ 指数是否存在空间自相关关系。其计算公式如下:

$$Z_i = \frac{I - E(I)}{\sqrt{V(I)}}, E(I) = -1/(N-1), V(I) = E(I^2) - (E(I))^2 \quad (3)$$

表1 数据说明与变量统计描述

Table 1 Data and descriptive statistics of the variables

变量名称	具体指标	均值	标准差	最小值	最大值
城市化	灯光复合指数	5.64	6.27	0.03	45.31
雾霾污染	年均PM2.5浓度/( $\mu g/m^3$ )	44.18	15.99	4.18	108.53
人口密度	单位面积人口数/(人/ $km^2$ )	406	477	1	6523
经济水平	人均GDP/(万元/人)	3.70	2.871	0.24	21.55
技术水平	3种专利(发明专利授权量、实用新型专利授权量和外观设计专利授权量)受理数/件	2582.59	7324.27	1.00	139739
产业结构	二三产业增加值的比值	1.40	0.83	0.23	11.16
公共服务水平	卫生机构床位总数/张	15935	13011	677	143248
平均风速	城市平均风速/(m/s)	23.79	13.05	2.00	164.00
年累积降水量	城市年累积降水量/mm	953.86	495.44	45.48	2490.96
最高气温	城市最高气温/ $^{\circ}C$	29.71	3.40	12.83	37.45



2022年10月

式中:  $E(I)$  为  $I$  的期望值;  $V(I)$  为  $I$  的方差。

为提高结论准确性,参考王振波等<sup>[18]</sup>的做法进行显著性水平检验。当  $Z_i < 2.58$  时,说明研究对象空间自相关性不显著,空间上随机分布,不存在任何相关性;若  $Z_i < -2.58$  时,即 Moran's  $I$  小于 0,研究对象在空间分布上存在负相关关系;若  $Z_i > 2.58$  时,即 Moran's  $I$  大于 0,研究对象在空间分布上存在正相关关系,其值越大,空间相关性越明显。

#### 2.4.2 基于 STIRPAT 和 EKC 假说的理论框架构建计量经济模型

经典 IPAT 模型被用于刻画与分析人类活动对环境影响<sup>[32]</sup>。具体模型为:

$$I = P \times A \times T \quad (4)$$

式中:  $I$  为环境压力;  $P$  为人口因素;  $A$  为富裕程度;  $T$  表示技术水平。为克服模型中要素间共线性, York 等<sup>[33]</sup>在 IPAT 模型基础上拓展并构建了考虑随机项的 STIRPAT 模型。该模型已被广泛应用于厘定经济社会要素对环境的影响<sup>[15]</sup>。具体模型(5)及取对数的模型(6)分别为:

$$I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i \quad (5)$$

$$\ln I_i = \ln a_i + b \ln P_i + c \ln A_i + d \ln T_i + \ln e_i \quad (6)$$

鉴于 STIRPAT 模型可用于 EKC 假说等非线性假说的验证并支持对相关变量进行分解和改进<sup>[33]</sup>,故将 STIRPAT 模型与 EKC 假说结合来构建城市化对雾霾污染影响这一主题的计量经济模型:

$$\ln pm_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln urban_{it} + \alpha_2 (\ln urban_{it})^2 + \alpha_3 X_{it} + \mu_{it} \quad (7)$$

式中:  $i$  为样本城市;  $t$  为年份; PM2.5 年均浓度 ( $pm$ ) 为 STIRPAT 模型中的环境压力  $I$ ; 城市化水平 ( $urban$ ) 为模型中扩展的变量,即关注的核心变量。控制变量 ( $X$ ) 包含了人口因素  $P$ 、富裕程度  $A$  和技术水平  $T$ ,即人口密度 ( $pop$ )、经济水平 ( $pergdp$ ) 和技术水平 ( $tec$ )。另外,模型还引入了产业结构 ( $str$ )、公共服务水平 ( $bed$ )、平均风速 ( $wind$ )、年累积降水量 ( $precip$ )、最高气温 ( $tm$ ) 等其他控制变量 ( $X$ )。这些变量对雾霾浓度有影响<sup>[6,15]</sup>。 $\alpha_0$  为常数项;  $\alpha_1 - \alpha_3$  为待估系数;  $\mu_{it}$  为模型误差项。

城市化和 PM2.5 浓度在空间上可能有溢出效应<sup>[15,34]</sup>。若忽略空间相关性计量检验,可能引起估计参数有偏,甚至引致错误结论。因此,在式(7)基

础上构建了空间计量经济模型,具体模型如下:

$$\ln pm_{it} = \beta_0 + \rho \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} \ln pm_{jt} + X_{it} \beta + \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} X_{jt} \theta + \mu_{it} \mu_{it} = \varphi \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} \mu_{jt} + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

式中:  $\rho$  和  $\varphi$  分别为空间自回归系数和空间自相关系数。在模型(8)中,3种不同的空间交互效应为:若  $\varphi = 0$ 、 $\theta = 0$ 、 $\rho \neq 0$ ,则模型(8)为空间滞后模型(SAR);若  $\varphi \neq 0$ 、 $\theta = 0$ 、 $\rho = 0$ ,其为空间误差模型(SEM);若  $\varphi = 0$ 、 $\theta \neq 0$ 、 $\rho \neq 0$ ,其为空间杜宾模型(SDM)。运用 LM 检验、LR 检验以及 Husman 检验来判定适用的空间计量经济模型类型。

#### 2.4.3 中介效应模型

城市化推进过程中主要通过人口集聚效应和产业结构效应对雾霾污染产生影响<sup>[15]</sup>,本文依据 Baron 等<sup>[35]</sup>提出的逐步法来构建中介效应模型进一步进行作用机理分析。人口集聚效应和产业结构效应分别用人口密度和产业结构(二产与三产增加值之间的比值)来表示。具体形式如下:

$$\ln pm_{it} = \theta_0 + \rho \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} \ln pm_{jt} + \theta_1 \ln urban_{it} + \phi_1 \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} \ln urban_{jt} + \quad (9)$$

$$\theta_2 Y_{it} + \phi_2 \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} Y_{jt} + \mu_{it} \quad D_{it} = \varphi_0 + \rho \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} D_{jt} + \varphi_1 \ln urban_{it} + \quad (10)$$

$$\delta_1 \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} \ln urban_{jt} + \varphi_2 Y_{it} + \delta_2 \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} Y_{jt} + \mu_{it} \quad \ln pm_{it} = \gamma_0 + \rho \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} \ln pm_{jt} + \gamma_1 \ln urban_{it} + \quad (11)$$

$$\gamma_2 D_{it} + \gamma_3 Y_{it} + \zeta_1 \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} \ln urban_{jt} + \zeta_2 \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} D_{jt} + \zeta_3 \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} Y_{jt} + \mu_{it}$$

式中:  $Y$  为一系列的控制变量;  $D$  为人口密度 ( $pop$ )、产业结构 ( $str$ ) 这两个可能的中介变量。若  $\theta_1$ 、 $\varphi_1$  和  $\gamma_2$  均显著,且  $\gamma_1$  较  $\theta_1$  数值减少或显著程度下降,说明存在中介机制效应,即城市化对雾霾污染的影响来自直接影响和因中介变量引起的间接影响;如果上述条件都成立,但  $\gamma_1$  不显著,则城市化对雾霾污染的影响完全通过中介变量来实现;如果  $\varphi_1$  或  $\gamma_2$  不显著,则城市化对雾霾污染的影响不是通过中介变量实现的。

## 3 结果与分析

### 3.1 时空动态分析

#### 3.1.1 城市化和 PM2.5 浓度的时空演化规律

由图 1 可见,2005—2018 年,3 个区域城市化水

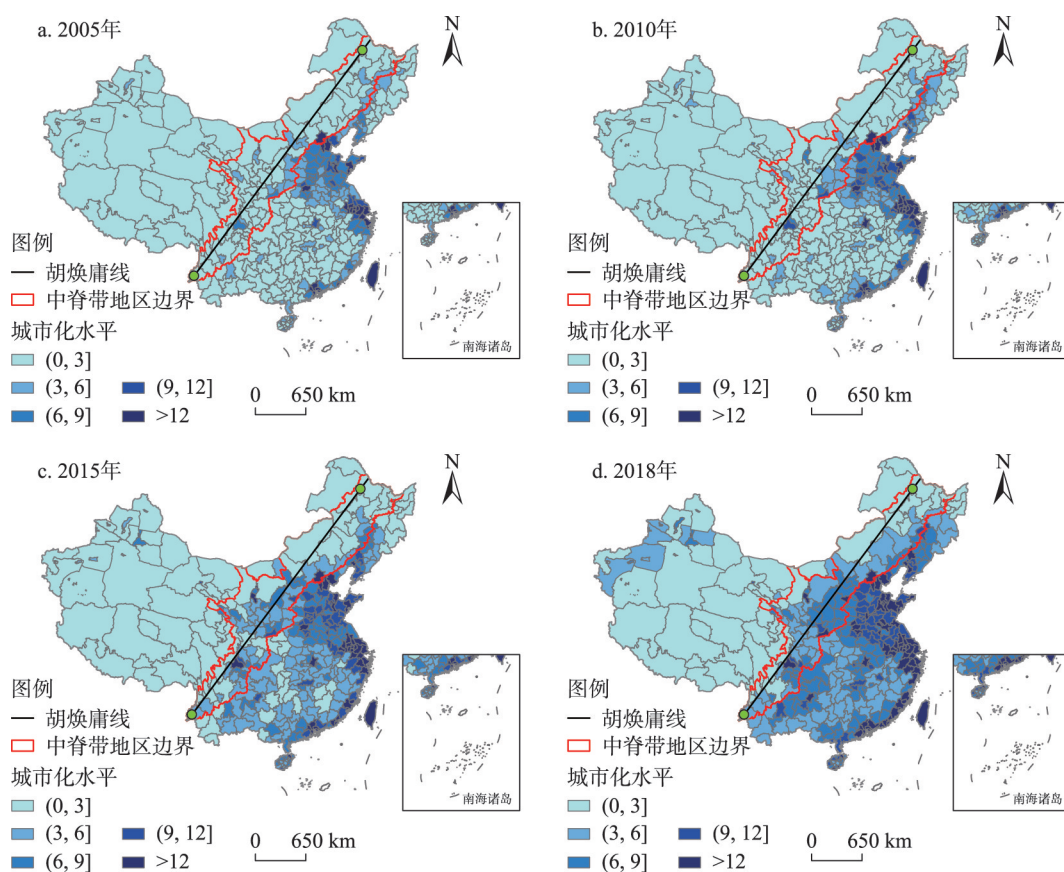


图1 2005—2018年中脊带及其东西两侧地区的城市化时空演化

Figure 1 Spatial variations of urbanization in the Mid-Spine Belt and the east and west regions, 2005-2018

注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,底图无修改。时空变化虽包括了西藏和港澳台地区,但作为3个地区进行比较时没有包括,下同。

平均有提升,但速度差异明显。首先,在东侧,2005—2010年城市化速度较快区域集聚于京津冀、长三角、珠三角等经济发达地区;2010—2018年,东侧地区各城市的城市化水平均不断提升。其次,在西侧,2005—2015年城市化水平进展缓慢,到2018年仅新疆城市化有显性增长。这与西侧“地广人稀”的人口分布格局和经济发展较缓慢难以形成城市化聚焦和累积效应有关。最后,中脊带地区2005—2010年城市化水平较低,2010—2018年则快速增长。这可能与同期东侧的经济增长或城市化的效应向中脊带地区辐射有关。按现有发展趋势,这种空间效应向西侧地区横向溢出仍需较长时间。

2005—2018年,3个区域的PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化呈现显著差异(图2)。在东侧地区,雾霾污染呈现先加剧后减缓的趋势。2005—2010年,PM<sub>2.5</sub>“轻度污染”区域从华北平原和长三角蔓延到江西、湖北等中部地区,华北平原“重度污染”区域面积也不

断加大;到2015年,“轻度污染”区域有所减缓,但“重度污染”区域未出现明显减缓趋势;到2018年,“重度污染”“轻度污染”和空气质量“中等”的区域均有减少趋势。综上,东侧地区PM<sub>2.5</sub>浓度趋势呈现倒“U”趋型特征。

在西侧地区,尤其是新疆从2005年的局部地区“轻度污染”扩大到2010年的大部分地区,部分地区甚至出现“重度污染”;到2015年和2018年污染程度尽管有所减弱但仍处于高位。位于西侧的内蒙古部分地区也从2005年的空气质量“良”向2010年“中等”转移,2015年和2018年“中等”区域有所缩减。西侧地区在吸引投资和承接产业转移上可能存在环境政策执行不严或标准尺度放宽<sup>[36]</sup>,内蒙古和新疆能源消耗总量较高<sup>[20]</sup>及新疆城市群城市化推进速度加快,这些因素叠加可能加剧环境污染。另外,处在高污染区的塔里木盆地可能受到塔克拉玛干沙漠的春季扬尘影响<sup>[37]</sup>。

2022年10月

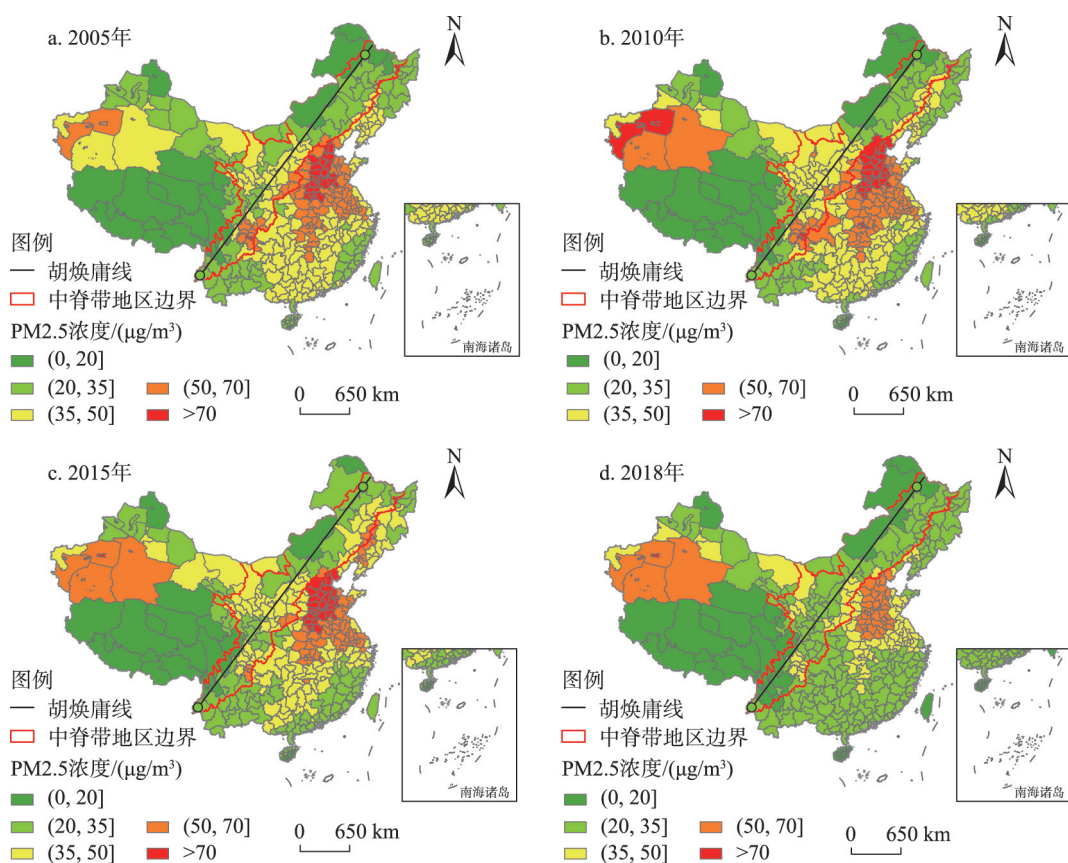


图2 2005—2018年中脊带及其东西两侧地区的PM2.5浓度时空演化

Figure 2 Spatial variations of PM2.5 concentration in the Mid-Spine Belt and the east and west regions, 2005-2018

注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,底图无修改。

相比于东侧,中脊带地区雾霾污染强度要低,也呈现先上升后下降。除四川部分区域和与华北平原相接的少数城市群出现过“轻度污染”外,其他地区PM2.5浓度均呈现空气质量“中等”“良好”及“优”的状态。2005—2010年,PM2.5浓度出现“轻度污染”的区域逐渐增加和与华北平原相近的少数部分区域出现了“重度污染”;到2015年,“轻度污染”区域逐渐减少和“重度污染”区域逐渐消失;到2018年,处于“轻度污染”和“中等”的区域,分别改善成为“中等”和“良好”状态。

### 3.1.2 城市化和PM2.5浓度的空间关联特征

表2显示了空间自相关分析与检验结果。2005—2018年,样本区域的城市化全局Moran's  $I$ 指数在1%的显著性水平下均为正。这表明存在空间正相关性,即呈现显著的“高-高”型和“低-低”型的集聚分布特征。PM2.5浓度全局Moran's  $I$ 指数也呈现显著的空间正相关性。另外,2005—2018年

间城市化的Moran's  $I$ 指数逐步增长,PM2.5浓度的Moran's  $I$ 指数呈波动增长趋势,表明集聚程度逐渐增强。在风向、温差、降雨等天气因素所引起的大气自然流动,以及产业转移及要素和产品贸易等区域间社会经济活动互联的双重驱动下,经济地理相近的地区,其城市化水平与雾霾污染程度密切相关。

## 3.2 影响机理分析

### 3.2.1 空间效应检验

LM检验和稳健(Robust)LM检验值表明,3个区域均存在空间误差项和空间滞后项,即应使用广义空间杜宾模型(表3)。LR检验结果均通过了1%的显著性检验,即拒绝SDM退化为SAR或SEM的原假设,进一步验证使用广义空间杜宾模型的稳健性。此外,Hausman检验中零假设 $H_0$ 为优先选择随机效应模型,对立假设 $H_1$ 为优先选择固定效应模型,结果发现, $P$ 值小于0.01,即拒绝原假设,表明在



表2 2005—2018年全国314个城市城市化和PM2.5浓度的全局Morans' I统计指标

Table 2 Statistics of Morans' I indicators of urbanization and PM2.5 concentration in 314 cities in China, 2005-2018

年份	城市化			PM2.5		
	Morans' I	Z值	P值	Morans' I	Z值	P值
2005	0.147	32.162	0.000	0.204	42.789	0.000
2006	0.150	32.699	0.000	0.188	39.550	0.000
2007	0.153	33.266	0.000	0.216	45.253	0.000
2008	0.155	33.608	0.000	0.193	40.437	0.000
2009	0.155	33.660	0.000	0.220	45.974	0.000
2010	0.157	34.017	0.000	0.209	43.866	0.000
2011	0.159	34.455	0.000	0.215	45.007	0.000
2012	0.161	34.703	0.000	0.201	42.033	0.000
2013	0.163	35.240	0.000	0.218	45.610	0.000
2014	0.165	35.547	0.000	0.221	46.251	0.000
2015	0.166	35.815	0.000	0.236	49.469	0.000
2016	0.168	36.271	0.000	0.219	45.934	0.000
2017	0.172	37.078	0.000	0.229	47.927	0.000
2018	0.176	37.770	0.000	0.223	46.715	0.000

注:全局Moran's I取值为(0, 1]时,雾霾污染表现为空间正自相关性;取值为[-1, 0)时,表现为空间负相关性;取值为0时,不具有空间相关性。

表3 LM、LR与Hausman检验结果

Table 3 Results of the LM, LR, and Hausman tests

检验	东侧地区		西侧地区		中脊带地区	
	统计量	P值	统计量	P值	统计量	P值
LM(error)	2777.020	0.000	15.189	0.000	455.300	0.000
Robust LM(error)	2054.469	0.000	12.874	0.000	345.981	0.000
LM(lag)	954.142	0.000	119.832	0.000	126.096	0.000
Robust LM(lag)	231.591	0.000	117.517	0.000	16.777	0.000
Hausman	89.830	0.000	55.990	0.000	238.530	0.000
LR(lag)	61.080	0.000	21.750	0.000	46.470	0.012
LR(error)	102.600	0.000	23.700	0.000	50.120	0.008

模型设定上固定效应模型优于随机效应模型(表3)。综上,选择具有个体固定效应的空间杜宾模型来展开分析。

本文利用模型整体拟合优度(Log likelihood值)作为判断依据择优选择模型(表4)。结果表明,在东侧和中脊带地区,非线性拟合模型均优于线性拟合模型,而西侧地区则相反。因此,在东侧和中脊带地区,着重分析非线性拟合模型,在西侧地区分析线性拟合模型。空间自回归系数 $\rho$ 均在1%的显著水平下为正。这与描述分析一致,各城市雾霾污染在空间交互作用下存在明显的空间集聚特征和空间溢出效应,这也证实了其他学者的结论<sup>[38]</sup>;另

外,在东侧和中脊带地区,城市化的一次项或二次项与空间矩阵之间交叉项系数显著为正,即城市化的空间效应对雾霾污染也会产生显著的影响。

3.2.2 影响异质性分析

表5展示了在地理反距离空间权重矩阵下各变量效应分解后的结果。在东侧地区的总效应中,城市化一次项和二次项的系数分别显著为正和负,显示城市化水平与雾霾污染之间存在着显著“先增后减”的倒“U”型关系。这表明不同发展阶段的城市化推进对雾霾污染产生不同方向的影响(存在拐点效应)。鉴于城市化是产业结构、人口结构和社会组织结构等方面变化的综合反映<sup>[28]</sup>,借助生态现代

2022年10月

表4 中脊带及其东西两侧地区的空间杜宾模型回归结果

Table 4 Regression results of the spatial Durbin model (SDM) in the Mid-Spine Belt and the east and west regions

变量	东侧地区		西侧地区		中脊带地区	
	线性	非线性	线性	非线性	线性	非线性
$\ln urban$	-0.012** (0.006)	0.007*** (0.006)	0.023** (0.018)	0.008 (0.023)	0.027*** (0.008)	0.020 (0.009)
$(\ln urban)^2$		-0.007*** (0.002)		0.010** (0.005)		-0.006 (0.004)
$\rho (W \times \ln pm)$	0.910*** (0.005)	0.909*** (0.006)	0.564*** (0.034)	0.562*** (0.034)	0.878*** (0.011)	0.877*** (0.011)
$W \times \ln urban$	-0.003 (0.008)	0.005** (0.008)	0.032 (0.023)	0.038 (0.028)	0.045*** (0.013)	0.042* (0.014)
$W \times (\ln urban)^2$		-0.003** (0.003)		0.000 (0.007)		-0.007** (0.007)
$control$	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
$W \times control$	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
$Log\ likelihood$	5680.35	6687.10	596.42	493.61	1877.73	2884.81
$N$	2926	2926	392	392	1078	1078

注: \*、\*\*、\*\*\*分别表示10%、5%、1%的显著水平;括号里面的值是标准误差;下同。

表5 中脊带及其东西两侧地区的直接效应、间接效应和总效应

Table 5 Direct, indirect, and total effects in the Mid-Spine Belt and the east and west regions

变量	东侧地区			西侧地区			中脊带地区		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
$\ln urban$	0.015** (0.008)	0.119** (0.056)	0.135** (0.061)	0.038* (0.021)	0.082* (0.043)	0.120** (0.057)	0.002 (0.016)	0.181* (0.101)	0.183 (0.115)
$(\ln urban)^2$	-0.010*** (0.003)	-0.040* (0.024)	-0.050** (0.025)				-0.005 (0.006)	-0.007 (0.049)	-0.012 (0.054)
$\ln pop$	-0.069*** (0.019)	-0.516*** (0.199)	-0.585*** (0.215)	0.024 (0.029)	0.037 (0.065)	0.061 (0.088)	0.043 (0.041)	0.314 (0.315)	0.357 (0.349)
$\ln pergd p$	0.001*** (0.007)	0.170*** (0.056)	0.171*** (0.060)	0.005 (0.024)	0.056 (0.047)	0.062 (0.062)	0.011 (0.014)	0.117 (0.081)	0.129 (0.091)
$(\ln pergd p)^2$	-0.007*** (0.002)	-0.016** (0.007)	-0.024* (0.014)	0.005 (0.007)	0.015 (0.014)	0.020 (0.017)	-0.005 (0.004)	0.016 (0.026)	0.011 (0.029)
$\ln tec$	-0.008*** (0.002)	-0.024 (0.022)	-0.032 (0.024)	-0.004 (0.008)	0.021 (0.017)	0.017 (0.023)	-0.003 (0.005)	-0.052 (0.033)	-0.055 (0.036)
$\ln str$	0.030*** (0.006)	0.159*** (0.044)	0.189*** (0.048)	0.112*** (0.024)	0.131*** (0.050)	0.244*** (0.069)	0.027*** (0.010)	0.142** (0.062)	0.169** (0.070)
$\ln bed$	-0.008*** (0.009)	-0.088*** (0.076)	-0.096*** (0.082)	-0.013 (0.036)	-0.006 (0.091)	-0.019 (0.113)	-0.002 (0.017)	-0.289** (0.114)	-0.291** (0.127)
$\ln wind$	-0.003 (0.003)	-0.008 (0.020)	-0.012 (0.022)	0.047 (0.030)	0.016 (0.077)	0.063 (0.100)	-0.016** (0.007)	-0.107** (0.047)	-0.123** (0.052)
$\ln preci$	-0.014 (0.018)	-0.182*** (0.053)	-0.197*** (0.053)	-0.034 (0.038)	-0.119* (0.062)	-0.153** (0.061)	-0.112*** (0.027)	-0.027 (0.079)	-0.139* (0.080)
$\ln tm$	-0.650*** (0.104)	0.001 (0.290)	-0.649** (0.284)	0.468** (0.191)	-0.424 (0.269)	0.044 (0.253)	-0.150 (0.128)	0.252 (0.385)	0.102 (0.394)
$N$	2926	2926	2926	392	392	392	1078	1078	1078



化理论和紧凑城市理论予以阐释<sup>[15]</sup>。生态现代化理论强调,当社会经济处于从低级阶段向中等发展阶段时,生态环境问题会随着城市化推进呈现恶化趋势;当发展到高阶阶段时,城市化对生态环境的损害得到缓解。这是由于城市化进程的加快,促进了产业结构优化升级,提高了对外贸易水平、技术创新水平以及环境规制强度<sup>[27]</sup>。紧凑城市理论表明,城市化伴随着人口和要素的集聚,有利于能源利用、污染治理以及医疗、交通、教育等公共资源的共享,进而优化资源合理配置,改善环境质量<sup>[15]</sup>。样本数据显示,跨越拐点的城市(约66%)已经进入雾霾污染随城市推进而逐渐下降阶段,在一定条件下有望实现城市化与雾霾污染的“脱钩”,但诸如广西、黑龙江、湖南、贵州等省(自治区)部分城市未跨越拐点(34%),即雾霾污染随城市化推进而逐渐上升。另外,这种效应是由自身城市化对雾霾污染影响的直接效应,与邻近城市的城市化对雾霾污染影响的间接效应(空间溢出)叠加形成的。

在西侧地区,从总效应来看,城市化的一次项系数在5%的显著水平下为正(0.120)。这表明城市化水平对雾霾污染产生显著的单调递增影响。这种加剧趋势不仅由线性递增的直接效应(0.038)引起,也由邻近城市的空间溢出效应(0.082)进一步叠加,产生负外部性。基于上述两个理论,也可以判断西侧多数城市群处在社会经济从低级向中等阶段的发展过程中,呈现出蔓延扩张式的城市化过程。这种低效的城市化推进模式可能会加剧环境污染。在中脊带地区,无论是总效应、直接效应还是间接效应,城市化与雾霾污染之间并无显著的倒“U”型关系,这可能是由于中脊带地区城市化和雾霾污染是介于东侧与西侧之间,故未体现显性规律。

部分控制变量也具有相应的经济学含义。①在东侧地区,无论总效应、直接效应还是间接效应,经济水平与雾霾污染之间均呈现显著的倒“U”型关系,验证了EKC假说和“先发展后治理”的经济发展路径的同时,也进一步证实城市化对雾霾影响的结论;在中脊带和西侧地区,其还未表现出显著的倒“U”型关系。②从技术水平上来说,在东侧地区,其系数在直接效应下显著为负,在间接效应下为负但

不显著,表明本城市技术水平的提高能够显著抑制环境污染,未产生空间溢出效应;在中脊带地区,尽管在3个效应下的技术水平的系数均为负但不显著,这表明中脊带地区的技术水平对减缓污染未产生显性的成效;西侧地区技术水平提高反而加剧雾霾污染,其可能是由于技术水平在提高的同时会过度消耗资源而造成环境污染。③作为衡量地区卫生服务水平的卫生机构床位数,在东侧地区无论是在直接效应、间接效应还是总效应下其系数均显著为负。这表明地区公共卫生服务水平越高(卫生机构床位数越多),在减缓环境污染和增强环境治理效果上越强,同时具有空间溢出效应<sup>[31]</sup>。公共服务水平对减缓环境污染的作用在中脊带地区也有所体现,但在西侧地区并不显著。需说明的是,人口密度和产业结构不在此赘述,接下来将从作用机制的角度进一步解析其含义。

平均风速、年累积降水量及最高气温等自然条件变量对雾霾污染产生了显著影响。①中脊带地区风速的系数在间接效应和总效应下显著为负,这表明风速增加可以加快邻近地区雾霾的消散。②在东西两侧地区,年累积降水量的系数在间接效应和总效应下显著为负,即降水量的增加会显著减少邻近城市空气中雾霾污染的浓度。而在中脊带地区其直接效应和总效应显著为负,表明抑制效果在本城市更为明显。③东侧地区最高气温系数在直接效应和总效应下显著为负,而在西侧地区则为正。如果只考虑气温影响,那么温度持续升高会不断加剧雾霾污染<sup>[40]</sup>,然而降雨量充足对大气污染物具有较好的清除作用<sup>[41]</sup>。在温度持续升高时期,暴雨雨量主要分布在胡焕庸线东侧地区,在西侧地区暴雨雨量均很少<sup>[42]</sup>,这是极端高温天气对东西两侧雾霾产生异质性影响的原因。

### 3.2.3 异质性影响作用机理分析

本文中介效应检验结果如表6、表7所示(因篇幅限制,仅报告了空间杜宾模型中的总效应)。在东侧地区,模型(9)中城市化变量的系数显著为负( $P<0.1$ ),模型(10)中的城市化变量的系数在1%的统计水平下显著为正,模型(11)中城市化变量的系数也显著为负,且与模型(9)相比影响程度有所下降。据此,可以判定人口密度是城市化影响雾霾污

2022年10月

表6 人口集聚的中介效应检验

Table 6 Mediation effect test of the population agglomeration

变量	东侧地区			西侧地区			中脊带地区		
	模型(9)	模型(10)	模型(11)	模型(9)	模型(10)	模型(11)	模型(9)	模型(10)	模型(11)
<i>lnurban</i>	-0.195*	0.062***	-0.157***	0.128*	0.123**	0.120**	0.167*	0.035*	0.156
	(0.061)	(0.013)	(0.061)	(0.058)	(0.055)	(0.057)	(0.095)	(0.021)	(0.097)
<i>lnpop</i>			-0.615***			0.061			0.302
			(0.216)			(0.088)			(0.338)
<i>Controls</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>N</i>	2926	2926	2926	392	392	392	1078	1078	1078

表7 产业结构的中介效应检验

Table 7 Mediation effect test of the industrial structure

变量	东侧地区			西侧地区			中脊带地区		
	模型(9)	模型(10)	模型(11)	模型(9)	模型(10)	模型(11)	模型(9)	模型(10)	模型(11)
<i>lnurban</i>	-0.185***	-0.123*	-0.157***	0.152**	0.132**	0.120**	0.230	0.453***	0.156
	(0.066)	(0.068)	(0.061)	(0.063)	(0.067)	(0.057)	(0.098)	(0.112)	(0.097)
<i>lnstr</i>			0.228***			0.244***			0.163***
			(0.045)			(0.069)			(0.060)
<i>Controls</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>N</i>	2926	2926	2926	392	392	392	1078	1078	1078

染的中介变量(中介机制成立),产生了人口集聚效应。尽管在中脊带和西侧地区,模型(9)和(10)的城市化系数均显著为正,但模型(11)中系数并不显著,表明未产生显著中介效应。这揭示东侧地区城市化推进通过集聚效应减缓雾霾污染,而在中脊带和西侧地区未起到显著作用。

从经济意义来说,东侧地区城市化间接通过人口集聚来抑制雾霾的效应占总效应的19.6% ( $\phi_1\gamma_2/\theta_1$ )。原因正如一些学者论述<sup>[15,43]</sup>,城市化进程中人口集聚作为一种紧凑型空间经济形态,能够产生正外部性,有益于提高技术创新效率、增强资源利用效率,进而表现出改善环境质量、促进节能减排的积极作用。另外,人口集聚也有可能促进环境政策的积极推进和环境意识的显著提升。环境污染防治攻坚战持续推进促使地方政府制定一系列雾霾治理的措施,环保监管力度的加强有效发挥了环境规制政策的治霾效应和正外部性<sup>[44,45]</sup>。根据判定标准,发现产业结构效应在东侧和西侧地区得以验证,在中脊带地区未能实现。从表7了解到,在模型(9)中,城市化变量的系数在东西两侧地区分

别显著为负和正,表明东侧地区城市群的城市化减缓了雾霾污染,在西侧地区则加剧了雾霾污染。在模型(11)中,东西侧地区产业结构变量的系数分别在1%的显著水平下为正(0.228和0.244),表明随着二三产业增加值比值的增加,雾霾污染呈现恶化趋势。在模型(10)中,城市化变量的系数在东西两侧地区分别显著为负( $P<0.1$ )和正( $P<0.05$ )。在东侧地区,城市化推进降低了二三产业增加值比值(“二三”型向“三二”型逐渐转变),在西侧地区提高了二三产业增加值比值。样本数据平均显示,在东侧地区,二三产业增加值比值从2005年的1.36下降到2018年的0.99,在西侧地区,从2005年的1.47上升到2018年的1.88。

综上分析,在东侧地区,城市化通过产业结构调整来减缓雾霾污染的效应占总效应的15.2%,而在西侧,通过产业结构调整加剧雾霾污染的效应占总效应的21.2%。这揭示,在城市化推进所伴随着产业结构调整中,东侧地区部分城市群的污染产业不断向中西部城市群转移,向绿色的服务业方向升级,从而减缓污染。然而,西侧多数城市在承接高

污染、高能耗产业的基础上不断发展工业,因而加剧污染或增加排放。

## 4 结论与政策启示

### 4.1 结论

本文收集 2005—2018 年中脊带及其东西两侧地区 314 个地级市的城市化、PM<sub>2.5</sub> 浓度及其他数据,基于 GIS 揭示了 3 个区域的城市化和 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空演变趋势和特征,在 STIRPAT 和 EKC 假说的理论框架下构建空间计量经济模型,实证分析了城市化对雾霾污染的异质性影响并探索其影响机理。主要结论如下:

(1) 城市化时空差异显著和空间集聚明显。2005—2018 年中脊带及其东西两侧地区城市化水平均有提升,但西侧地区城市化速度明显偏低,需加快推进西侧城市化建设。城市化的全局 Moran's *I* 指数明显增加预示空间溢出效应逐步增强。

(2) PM<sub>2.5</sub> 浓度空间溢出效应突出。空间自回归系数  $\rho$  均在 1% 的显著水平下为正,说明雾霾污染在空间交互作用下存在明显的空间集聚特征和空间溢出效应;另外,东侧和西侧地区城市化对雾霾污染影响的间接效应显著。

(3) 城市化对雾霾污染影响效果及机理的区域差异明显。根据东侧地区城市化与雾霾污染倒“U”型关系,跨越拐点的城市(占 66%)已进入雾霾污染随城市化推进而逐渐下降阶段,反之亦然;而西侧地区城市化对雾霾污染产生显著的单调递增影响。东侧地区城市化间接通过人口集聚和产业结构调整来抑制雾霾污染,西侧地区则通过产业结构调整则加剧雾霾污染。

### 4.2 政策启示

上述研究结论对推动中脊带及其东西两侧地区的经济均衡发展、完善新型城镇化战略以及建设生态环境保护机制具有重要的政策启示:

(1) 应充分利用 3 个区域间相邻空间影响优势,深化区域间经济与文化交流与合作,增强对西侧及中脊带地区城市的辐射效应,同时对西侧地区实施交通基础设施建设、产业合理布局及旅游资源开发等措施,以期实现中脊带及西侧地区更高水平的城市化,并进一步解决人口、经济区域发展的不平衡问题。

(2) 对于中脊带及其东西两侧地区的雾霾污染治理,应建立区域联防联控机制。换言之,要树立“一体化”意识和“一盘棋”思想,构建区域联合环境执法与监督的常态化机制,加强环境污染监测平台协同建设,推进区域环境信息共享和联合预警,坚决避免出现“守住一亩三分地”“以邻为壑”的污染治理条块分割局面。

(3) 雾霾污染政策制定要坚持“因地制宜”,避免“一刀切”。对东侧已跨越拐点的城市群,宜继续发挥人口集聚在优化资源配置和改善环境质量的作用,增强通过技术创新、产业结构升级及能源效率提升等路径来减缓环境污染的优势;对未跨越拐点的城市和西侧城市群,应提高环境准入门槛,限制引进高能耗、高污染产业,逐步向服务业高端制造业转型,注重依靠科技创新推进传统产业转型升级,达到“降碳、减污、扩绿、增长”的效果。

## 参考文献(References):

- [1] 陈诗一, 陈登科. 雾霾污染、政府治理与经济高质量发展[J]. 经济研究, 2018, 53(2): 20–34. [Chen S Y, Chen D K. Air pollution, government regulations and high-quality economic development [J]. Economic Research Journal, 2018, 53(2): 20–34.]
- [2] Liang W, Yang M. Urbanization, economic growth and environmental pollution: Evidence from China[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2019, 21: 1–9.
- [3] Yang Y C, Liu J H, Zhang Y T. An analysis of the implications of China's urbanization policy for economic growth and energy consumption[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 1251–1262.
- [4] Wang Z B, Liang L W, Sun Z, et al. Spatiotemporal differentiation and the factors influencing urbanization and ecological environment synergistic effects within the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 243: 227–239.
- [5] 薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013–2017 年中国 PM<sub>2.5</sub> 污染的快速改善及其健康效益[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(4): 441–452. [Xue T, Liu J, Zhang Q, et al. Rapid improvement of PM<sub>2.5</sub> pollution and associated health benefits in China during 2013–2017[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2020, 50(4): 441–452.]
- [6] 任亚运, 张广来. 城市创新能够驱散雾霾吗? 基于空间溢出视角的检验[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(2): 111–120. [Ren Y Y, Zhang G L. Can city innovation dispel haze? Evidence from the perspective of spatial spillover[J]. China Population, Re-



2022年10月

- sources and Environment, 2020, 30(2): 111–120.]
- [7] Zhu W W, Wang M C, Zhang B B. The effects of urbanization on PM2.5 concentrations in China's Yangtze River Economic Belt: New evidence from spatial econometric analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118065.
- [8] 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, 38(4): 100–108. [Yu G Y, Xiu C L. Effects of urbanization to haze pollution in Liaoning Province based on spatial perspective[J]. Economic Geography, 2018, 38(4): 100–108.]
- [9] Bai Y P, Deng X Z, Jiang S J, et al. Exploring the relationship between urbanization and urban eco-efficiency: Evidence from prefecture-level cities in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 1487–1496.
- [10] Lin B Q, Zhu J P. Changes in urban air quality during urbanization in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 312–321.
- [11] 兰宜生, 徐小锋. 城镇化能够提高环境绩效吗[J]. 经济经纬, 2019, 36(4): 1–8. [Lan Y S, Xu X F. Can urbanization improve environmental performance?[J]. Economic Survey, 2019, 36(4): 1–8.]
- [12] 陈林, 肖倩冰, 蓝淑菁. 基于产业结构门槛效应模型的环境政策治污效益评估: 以《大气污染防治行动计划》为例[J]. 资源科学, 2021, 43(2): 341–356. [Chen L, Xiao Q B, Lan S J. Pollution control effects of environmental policies based on threshold effect model of industrial structure: Taking the air pollution prevention and control action plan as an example[J]. Resources Science, 2021, 43(2): 341–356.]
- [13] 李硕硕, 刘耀彬, 骆康. 环鄱阳湖县域新型城镇化对碳排放强度的空间溢出效应[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1449–1462. [Li S S, Liu Y B, Luo K. Spatial spillover effect of new-type urbanization on carbon emission intensity in counties around the Poyang Lake [J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1449–1462.]
- [14] Wu J S, Zheng H Q, Zhe F, et al. Study on the relationship between urbanization and fine particulate matter (PM2.5) concentration and its implication in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 182: 872–882.
- [15] 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(2): 148–165. [Shao S, Li X, Cao J H. Urbanization promotion and haze pollution governance in China[J]. Economic Research Journal, 2019, 54(2): 148–165.]
- [16] 郭向阳, 穆学青, 丁正山, 等. 长三角多维城市化对PM2.5浓度的非线性影响及驱动机制[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1274–1293. [Guo X Y, Mu X Q, Ding Z S, et al. Nonlinear effects and driving mechanism of multidimensional urbanization on PM2.5 concentrations in the Yangtze River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5): 1274–1293.]
- [17] 胡焕庸. 中国人口之分布: 附统计表与密度图[J]. 地理学报, 1935, 2(2): 33–74. [Hu H Y. The distribution of China's population: With statistical table and density map[J]. Acta Geographica Sinica, 1935, 2(2): 33–74.]
- [18] 王振波, 梁龙武, 王旭静. 中国城市群地区PM2.5时空演变格局及其影响因素[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2614–2630. [Wang Z B, Liang L W, Wang X J. Spatio-temporal evolution patterns and influencing factors of PM2.5 in Chinese urban agglomerations[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2614–2630.]
- [19] 方创琳. 博台线: 中国区域发展均衡线的重要功能与建设构想[J]. 地理学报, 2020, 75(2): 211–225. [Fang C L. Bole-Taipei Line: The important function and basic conception as a line for regional balanced development[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(2): 211–225.]
- [20] 赵莎, 胡最, 郑文武. 中国“胡焕庸线”东西两侧能源消耗空间格局的系统动力学模拟[J]. 地理科学进展, 2021, 40(8): 1269–1283. [Zhao S, Hu Z, Zheng W W. System dynamics model-based simulation of energy consumption pattern on the two sides of the Huhuanong Line in China[J]. Progress in Geography, 2021, 40(8): 1269–1283.]
- [21] 陆大道, 王铮, 封志明, 等. 关于“胡焕庸线能否突破”的学术争鸣[J]. 地理研究, 2016, 35(5): 805–824. [Lu D D, Wang Z, Feng Z M, et al. Academic debates on Hu Huanyong Population Line[J]. Geographical Research, 2016, 35(5): 805–824.]
- [22] 丁金宏, 程晨, 张伟佳, 等. 胡焕庸线的学术思想源流与地理分界意义[J]. 地理学报, 2021, 76(6): 1317–1333. [Ding J H, Cheng C, Zhang W J, et al. The ideological origins and geographical demarcation significance of Hu Huanyong Line[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(6): 1317–1333.]
- [23] 王心源, 郭华东, 骆磊, 等. 从“胡焕庸线”到“美丽中国中脊带”: 科学认知的突破与发展方式的改变[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1058–1065. [Wang X Y, Guo H D, Luo L, et al. From Hu Huanyong Line to Mid-Spine Belt of Beautiful China: Breakthrough in scientific cognition and change in development mode [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1058–1065.]
- [24] 曹子阳. 基于夜间灯光影像的GDP空间分布模拟研究及其与PM2.5浓度的相关分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016. [Cao Z Y. Estimating the Spatial Distribution of GDP Based on Night-time Light Image and Analysis of Correlation Between It and PM2.5 Concentration[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.]
- [25] 王磊, 王雪利, 杨文毅, 等. 汽车共享出行减少空气雾霾了吗? 基于滴滴出行大数据[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(1): 145–155. [Wang L, Wang X L, Yang W Y. Has car-sharing mobility reduced haze? Based on the big data of the Didi APP[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(1): 145–155.]
- [26] 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(7):

- 63-74. [Wang B B, Liao X J, Tan X J. Urbanization and its contribution to haze exposure: A spatial-temporal decomposition of Chinese urban agglomerations[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(7): 63-74.]
- [27] 柳清瑞, 唐璐. 城镇化对能源消费的推拉效应及其影响因素: 基于门槛效应模型的实证检验[J]. *资源科学*, 2022, 44(5): 1022-1035. [Liu Q R, Tang L. Push-pull effect of urbanization on energy consumption and its influencing factors: An empirical test with threshold effect model[J]. *Resources Science*, 2022, 44(5): 1022-1035.]
- [28] 袁晓玲, 李朝鹏, 方恺. 中国城镇化进程中的空气污染研究回顾与展望[J]. *经济学动态*, 2019, (5): 88-103. [Yuan X L, Li Z P, Fang K. Retrospect and prospect of research on air pollution in the context of China's urbanization[J]. *Economic Perspectives*, 2019, (5): 88-103.]
- [29] 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于DMSP/OLS数据的中国城市化过程研究: 反映区域城市化水平的灯光指数的构建[J]. *遥感学报*, 2003, (3): 168-175. [Chen J, Zhuo L, Shi P J, et al. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data: Development of a light index for urbanization level estimation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, (3): 168-175.]
- [30] Zhao M, Zhou Y Y, Li X C, et al. Building a series of consistent night-time light data (1992-2018) in southeast Asia by integrating DMSP-OLS and NPP-VIIRS[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(3): 1843-1856.
- [31] 王小龙, 陈金皇. 省直管县改革与区域空气污染: 来自卫星反演数据的实证证据[J]. *金融研究*, 2020, (11): 76-93. [Wang X L, Chen J H. Province managing county reform and regional air pollution: Empirical evidence from satellite inversion data[J]. *Journal of Financial Research*, 2020, (11): 76-93.]
- [32] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth[J]. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [33] 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(3): 351-365.
- [34] 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, (9): 57-69. [Xiao Y H, Hou L L, Mao Y Y. Economic growth, urbanization and air pollution: An empirical study based on the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Shanghai Journal of Economics*, 2021, (9): 57-69.]
- [35] Baron R M, Kenny D A. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations[J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1986, 51(6): 1173-1182.
- [36] 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(4): 62-73. [Chen L, Wan P B. Township development and environmental pollution effect of urbanization construction[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(4): 62-73.]
- [37] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011年中国PM2.5时空演化特征及驱动因素解析[J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2079-2092. [Zhou L, Zhou C H, Yang F, et al. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM2.5 in China between 2000 and 2011[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2079-2092.]
- [38] 刘华军, 彭莹. 雾霾污染区域协同治理的“逐底竞争”检验[J]. *资源科学*, 2019, 41(1): 185-195. [Liu H J, Peng Y. "Race to the bottom" test of collaborative management in haze pollution area[J]. *Resources Science*, 2019, 41(1): 185-195.]
- [39] Escudero M, Lozano A, Hieero J, et al. Urban influence on increasing ozone concentrations in a characteristic Mediterranean agglomeration[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 99: 322-332.
- [40] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 夏季持续高温天气对北京市大气细粒子(PM2.5)的影响[J]. *环境科学*, 2002, 23(4): 33-36. [Song Y, Tang X Y, Zhang Y H, et al. Effects on fine particles by the continued high temperature weather in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(4): 33-36.]
- [41] 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 等. 郑州市2014-2017年大气污染特征及气象条件影响分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 3856-3867. [Guo M M, Jiang N, Wang S B, et al. Analysis of air pollution characteristics and meteorological conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 3856-3867.]
- [42] 孔锋. 中国不同月份暴雨的多属性时空演变特征及区域差异(1961-2016年)[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(2): 26-37. [Kong F. Multi-attribute spatio-temporal evolution characteristics and regional differences of heavy rainfall in different months in China from 1961 to 2016[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(2): 26-37.]
- [43] 孙猛, 费不凡. 人口集聚与碳排放: 基于空间溢出效应视角的经验考察[J]. *人口学刊*, 2022, 44(5): 72-85. [Sun M, Fei B F. Population agglomeration and carbon emissions: An empirical investigation based on the perspective of spatial spillover effects[J]. *Population Journal*, 2022, 44(5): 72-85.]
- [44] 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(1): 40-56. [Li Z H, Yuan B B. Environmental policy mechanism of local governments in the treatment of haze pollution: Policy tools, spatial correlations and threshold effects[J]. *Resources Science*, 2021, 43(1): 40-56.]
- [45] 张明, 张鹭, 宋妍. 异质性环境规制、空间溢出与雾霾污染[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(12): 53-61. [Zhang M, Zhang L, Song Y. Heterogeneous environmental regulations, spatial spillover and haze pollution[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(12): 53-61.]

# Spatiotemporal dynamics and mechanisms in urbanization and PM2.5 concentration in China:

## A perspective based on the transition of Hu Huanyong Line

YANG Yu<sup>1</sup>, HE Wei<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, LIU Haoyu<sup>3</sup>

(1. School of Business, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. School of Economics & Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** In the context of severe challenges to the environment brought by rapid urbanization, significant progress of research has been made on the impacts of urbanization on environmental pollution, especially focusing on the Mid-Spine Belt of Beautiful China (referred to as the Mid-Spine Belt for short) formed by the spatiotemporal changes of Hu Huanyong Line, and its east-west differences. Therefore, with multiple datasets of the prefecture scale (covering a total of 314 cities) including the composite index of night-light (for the level of urbanization), PM2.5 concentration (for the degree of haze pollution), and other panel statistics during 2005-2018, the spatiotemporal heterogeneities of urbanization and haze in the Mid-Spine Belt and the eastern and western regions were consistently determined via the ArcGIS platform. Next, under the theoretical framework of the STochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology (STIRPAT) model and the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis, this study empirically analyzed the heterogeneous impact of urbanization on haze pollution in the three regions and its mechanism. The main conclusions show that: (1) Affected by low population density, the rising trend of urbanization on the west side of the Mid-Spine Belt is much lower than those on the east and in the Mid-Spine Belt; (2) There is a significant inverted U-shaped relationship between haze pollution and urbanization on the east side, contrasting a significantly positive linear relationship on the west and no significant relationship in the Mid-Spine Belt; (3) In the east, the adverse impact of urbanization on haze pollution may be alleviated through the effect of population concentration and industrial structure adjustment, while in the west, the effect of industrial structure is intensified, and the two effects are not obvious in the Mid-Spine Belt. These conclusions provide an empirical basis for policy recommendations such as establishing an environmental governance mechanism of regional joint prevention and control, promoting industrial restructuring and enhancing the scale effect of population aggregation, and promoting high-level modernization and high-quality urbanization in the western region.

**Key words:** urbanization; haze pollution; Hu Huanyong Line; Mid-Spine Belt; mechanism; spatial Dubin model; composite index of night-light; PM2.5; China