

经济学研究

# 黄河流域城市二氧化碳排放的空间关系研究\*

李庆

**【摘要】**黄河流域城市的经济社会发展、二氧化碳排放和生态资源环境之间都存在不容忽视的空间效应。本文从研究黄河流域城市二氧化碳排放的空间效应入手,利用莫兰指数、空间滞后模型、地理加权模型和多尺度地理加权模型,对黄河流域城市二氧化碳排放的空间相互依赖关系和空间异质性特征进行量化分析,并在此基础上对优化黄河流域城市二氧化碳减排政策、加快碳达峰进程提出建议。

**【关键词】**黄河流域 二氧化碳排放 空间效应

**【作者简介】**李庆,中国社会科学院生态文明研究所副研究员。

(中图分类号) F124.5 (文献标识码) A (文章编号) 1000-2952 (2021) 03-0071-09

## 一、引言

黄河流域是中国最具代表性的流域空间之一,自古以来就是中国经济和社会发展的重点区域,该流域内的城市无论在生态环境、资源禀赋和经济社会发展上都有着深刻的空间关系。因此,针对黄河流域城市二氧化碳排放的研究不能忽视空间效应影响。黄河流域地域空间辽阔,流域内的自然生态条件和经济社会发展水平差别很大,既有生态脆弱的经济欠发达地区,也有实体经济蓬勃发展的工业化地区。从自然地理角度看,黄河流域自东向西分布着沿海、平原、丘陵、山地和高原等地形地貌,相邻城市间存在着河流贯穿、山体相连、森林湖泊湿地共享、野生动物迁徙、风霜雨雪覆盖等自然地理贯通情况,这些特征勾勒出黄河流域城市地理空间的相关性和异质性基础。从社会人文角度看,黄河流域是中华文明的主要发祥地,人文历史悠久,曾经是中国古代长期的政治、经济、文化中心,流域内的黄淮平原、汾渭平原、河套灌区是传统的农产品主产区,中上游煤炭、矿产资源丰富,煤炭储量占全国一半以上,是我国能源、化工和原材料生产集中的地区,流域内分布着大型重型机械制造、国防军工制造、交通运输设备制造、电子信息设备制造以及高端合成材料、精密机械装备制造

\* 本文系中国社会科学院创新工程重大专题“推进新时代中国特色生态文明建设与绿色发展战略研究”(2017YCXZD007)、中国社会科学院生态文明研究智库项目“空间效应对生态文明建设评价的影响分析”(STWM-2019-C-008)的阶段性成果

造等重要产业,在资源禀赋、人口规模、经济总量、富裕程度、技术水平、文化教育等多方面存在空间相关性和异质性。错综复杂的自然和人文空间相关性和异质性共同构成了影响黄河流域城市二氧化碳排放的空间效应背景,使得对于黄河流域城市二氧化碳排放的结构分析必须考虑空间效应的影响。

## 二、研究基础和进展

二氧化碳排放主要源于经济活动,黄河流域城市的二氧化碳排放绩效也建立在流域经济活动的空间联系上。由于黄河流域不同城市在发展阶段、经济结构、气候条件、人口结构等方面都有较大差异,其影响二氧化碳排放的主要因素及影响程度也各不相同。人们在经济规律的驱动下对经济资源进行空间配置,从而产生该流域不同空间位置城市之间、不同规模城市之间的空间效应。从空间相关性看,空间效应可能是城市间二氧化碳排放输送产生的滞后效应,也可能是造成二氧化碳排放的人口、工业、交通、采暖等因素在城市间产生的滞后效应,还可能是保留在综合影响因素中的空间误差效应,更大的可能是这些空间效应多重组合产生的综合空间效应,而空间相关性回归模型为我们识别和量化这种影响提供了分析工具。从空间异质性看,传统的二氧化碳排放研究使用通用的回归模型,只能得到全局回归参数用以评价整个流域内变量对二氧化碳排放的影响程度,而不能反映在空间效应作用下整个流域内不同地区在空间异质性条件下产生的回归关系,地理加权回归模型为我们提供了观察空间异质性的分析工具,多尺度地理加权方法进一步提供了不同变量存在空间异质性情况下的分析工具。无论是城市间的不同,还是各个变量空间关系的不同,都是空间的常态,而多尺度地理加权方法更加贴近事物的现实状态,是分析黄河流域城市二氧化碳排放空间关系的有效工具。

二氧化碳排放结构分析从20世纪70年代就已经开始,人们利用IPAT模型从人口规模、富裕程度和环境技术水平的角度对环境影响进行结构分析。<sup>①</sup>为了克服IPAT模型的线性局限性,人们在IPAT模型的基础上建立了STIRPAT模型。<sup>②</sup>此后,研究者们结合二氧化碳排放Kaya等式,把二氧化碳排放量作为被解释变量,利用STIRPAT模型展开了大量研究,取得了丰富的研究成果。随着研究的不断深入,STIRPAT模型不仅引入技术、产业、制度、文化等诸多方面的解释变量对二氧化碳排放量进行结构分析,而且从全球、国家、地区和城市等不同的空间层面进行了大量研究。在研究中国城市二氧化碳排放方面,王丽等利用IPAT模型对人口规模、人均GDP和能源效率等经济社会发展因素对环境的影响进行了分析。<sup>③</sup>陈占明等利用扩展的STIRPAT模型对影响中国地级以上城市二氧化碳排放的人口规模、第二产业产值占比和采暖需求等因素进行了时间序列分析。<sup>④</sup>也有学者从城市化的角度利用STIRPAT模型对城市化率、服务水平、研发支出占比、能源强度和能源结构等影响因素进行了分析。<sup>⑤</sup>随着STIRPAT模型应用的不断深入和优化,围绕模型方法和解释变量的研究成果还在不断涌现,但是这些研究普遍遵循经典计量模型的高斯—马尔可夫假设,没有考虑城市二氧化碳排放的空间效应特征,而城市二氧化碳排放不仅受到自身控制变量因素的影响,而且

① Paul R. Ehrlich and John P. Holdren, Impact of Population Growth, *Science*, Vol. 171 (3977), 1971, pp. 1212-1217.

② Thomas Dietz and Eugene A. Rosa, Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology, *Human Ecology Review*, Vol. 1 (2), 1994, pp. 277-300; Richard York, Eugene A. Rosa and Thomas Dietz, STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts, *Ecological Economics*, Vol. 46 (3), 2003, pp. 351-365.

③ 王丽、欧阳慧、马永欢:《经济社会发展对环境影响的再认识——基于IPAT模型的城市碳排放分析》,《宏观经济研究》2017年第10期,第161~168页。

④ 陈占明、吴施美、马文博等:《中国地级以上城市二氧化碳排放的影响因素分析:基于扩展的STIRPAT模型》,《中国人口·资源与环境》2018年第10期,第45~54页。

⑤ 赵涛、张思聪:《基于STIRPAT模型的区域城市化碳排放影响因素差异分析》,《甘肃科学学报》2019年第3期,第125~130页。

受到其他城市二氧化碳排放的影响，这些空间效应打破了经典回归模型的不相关假定，使得沿用传统回归模型对城市二氧化碳排放进行回归分析暴露出明显缺陷。

空间计量经济学理论方法的不断进步为研究城市二氧化碳排放的空间效应提供了条件。1974年，Paelinck在荷兰统计协会年会上提出空间计量经济学概念。1988年，Anselin出版著作《空间计量经济学：方法与模型》，<sup>①</sup>将空间计量经济学推入主流经济学。2008年，美国经济学家保罗·克鲁格曼获得诺贝尔经济学奖，空间计量经济学受到越来越多的重视，其在主流经济学中的地位不断提升。20世纪90年代，学者们开始在STIRPAT模型基础上，采用空间计量经济学手段对城市二氧化碳排放进行考虑空间相关性的回归分析。进入21世纪以来，在地理信息技术和计算机技术发展的推动下，空间计量经济学更是迎来发展的高峰期。目前，利用残差检验选择空间回归模型进行二氧化碳排放空间相关性的研究已经比较成熟，研究成果层出不穷。

20世纪90年代末，以地理加权回归方法研究空间异质性的论文开始出现。Fotheringham等采用空间变参数方法建立了地理加权回归模型(GWR)，<sup>②</sup>用局部加权回归的方法构造出一个既能反映空间随机过程非平稳性，又能平滑地拟合参数空间的恰当模型关系，样本表达式为：

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_j \beta_j(u_i, v_i)x_{ij} + \epsilon_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

其中， $(u_i, v_i)$ 是第*i*个样本点的空间坐标， $\beta(u_i, v_i)$ 是连续函数 $\beta(u, v)$ 在 $(u_i, v_i)$ 点的回归参数，这种安排使得回归参数成为地理位置的函数， $\epsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ ， $Cov(\epsilon_i, \epsilon_j) = 0 (i \neq j)$ 。地理加权回归模型利用加权最小二乘法进行参数估计：

$$\hat{\beta}(u_i, v_i) = [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y$$

其中， $W$ 为空间权重矩阵。地理加权回归允许回归模型变参数，参数空间权重矩阵由核函数和带宽决定，核函数一般选择高斯核函数或二次核函数，而带宽则一般由特定的准则来确定。空间核函数的高斯函数矩阵的表达式为：

$$W(u_i, v_i) = \exp\left[-\left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2\right]$$

Fotheringham等将AIC准则运用到地理加权回归权函数的带宽选择上：<sup>③</sup>

$$AIC_c = 2n \ln(\hat{\sigma}) + n \ln(2\pi) + n \frac{n + \text{tr}(S)}{n - 2 - \text{tr}(S)}$$

其中， $\hat{\sigma} = \frac{RSS}{n - \text{tr}(S)}$ ，是随机误差项方差的极大似然估计，帽子矩阵 $S$ 的迹 $\text{tr}(S)$ 是带宽 $b$ 的

函数，同样的样本数据，AIC值最小的权函数所对应的带宽为最优的带宽。地理加权回归放松了不同样本相同空间权重的限制，但是不同控制变量仍然使用相同的带宽权重。在现实问题中，不同控制变量的空间尺度是不同的，采用相同带宽不能展示出不同变量存在的空间异质性特征。例如，在导致鱼群数量减少的因素中，气候变化的尺度可以是全球的，而过度捕捞的尺度可以是海域的，气候变化变量和过度捕捞变量具有不同的空间尺度，也就具有不同的空间权重关系。Fotheringham等基于广义加性模型(GAM)提出了多尺度地理加权回归(MGWR)，<sup>④</sup>使得每个变量拥有各自的空

① Luc Anselin, *Spatial Econometrics: Methods and Models*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

② A. Stewart Fotheringham, Martin Charlton and Chris Brunsdon, Geographically Weighted Regression: A Natural Evolution of the Expansion Method for Spatial Data Analysis, *Environment and Planning A*, Vol 30 (11), 1998, pp 1905-1927.

③ A. Stewart Fotheringham, Chris Brunsdon and Martin Charlton, *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*, Chichester: Wiley, 2002.

④ A. Stewart Fotheringham, Wenbai Yang and Wei Kang, Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR), *Annals of the American Association of Geographers*, Vol 107, October 2017, pp 1247-1265.

间尺度,从而能够识别不同变量的空间异质性。多尺度地理加权回归模型把变量间的空间异质性纳入到回归模型,采用广义加性模型的后退拟合算法进行各个平滑项的拟合,推导出多尺度地理加权回归局部参数的标准误差和信息准则,进而获取每个控制变量的有效参数数(ENP),以有效参数数为统计量使得每个变量拥有各自的空间尺度,从而能够识别不同变量的空间异质性:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_j \beta_{bwj}(u_i, v_i)x_{ij} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

其中,  $bw_j$  代表了第  $j$  个变量的回归系数使用的带宽。地理加权回归将空间结构嵌入参数矩阵拟合城市间空间关系的非平稳性,多尺度地理加权回归进一步放松了控制变量参数间的空间同尺度约束,允许回归模型不同控制变量在不同的空间尺度上进行回归,更加贴近空间效应的客观现实。多尺度地理加权回归方法出现后,直到 da Silva 等论证了地理加权回归的多重检验问题,<sup>①</sup>于瀚辰等完善了多尺度地理加权回归的统计检验方法,<sup>②</sup>多尺度地理加权回归模型对空间异质性研究的方法和检验才得以完整确立。近两年,相关研究成果开始增多,如 Bilgel 利用 2009—2015 年美国各州的枪支拥有率,采用多尺度地理加权回归方法对持枪案件进行分析,证实了“枪支越多,犯罪越少”的假设。<sup>③</sup>但是,采用多尺度地理加权回归方法对流域城市二氧化碳排放进行研究的成果尚未出现。

近年来,中国空间计量经济学的研究和应用与国际前沿同步发展,对于二氧化碳排放的计量分析也明显向关注空间效应转变,出现了考虑空间因素对二氧化碳排放进行 STIRPAT 模型研究的成果。例如,刘凯等利用 2004—2016 年中国省域面板数据在 STIRPAT 模型基础上建立空间杜宾模型,实证分析了中国省域之间碳排放的空间相互影响。<sup>④</sup>肖宏伟等从区域和工业行业层面研究我国碳排放影响因素,认为各区域碳排放的空间差异明显,具体的差别化减排政策对减排具有重要意义。<sup>⑤</sup>李炫榆等利用地理加权回归模型对中国碳减排的空间异质性进行了研究。<sup>⑥</sup>王雅楠等运用地理加权回归方法研究了我国的 30 个省份分别在 1997 年、2002 年、2007 年和 2012 年的城市化、工业结构和能源强度对二氧化碳排放的空间差异性影响,认为减排政策不仅要分区域、分省域制定目标,还要与相邻的省份制定协同减排计划。<sup>⑦</sup>尽管利用地理加权回归方法对空间异质性的研究成果屡见不鲜,但是受到检验方法的制约,多尺度地理加权回归模型的应用进展相对缓慢,与空间相关效应研究相比,空间异质性研究成果相对较少。本文以黄河流域为基础,依据黄河与地区经济发展的关系,将黄河流域流经九省区的 65 个市级单位(以下统称城市)作为研究对象,从空间效应的角度,利用莫兰指数、空间滞后模型、地理加权模型和最新完善的多尺度地理加权模型对黄河流域城市二氧化碳排放进行 STIRPAT 回归,对黄河流域城市二氧化碳排放的空间相关性和异质性进行量化分析,在此基础上对优化黄河流域城市二氧化碳减排政策设计和碳达峰制度安排提出建议。

### 三、数据来源、计算工具和初步模型

黄河全长 5464 公里,流域总面积 79.5 万平方公里,流经西部地区青海、四川、甘肃、宁夏、

① Alan Ricardo da Silva and A. Stewart Fotheringham, The Multiple Testing Issue in Geographically Weighted Regression, *Geographical Analysis*, Vol 48 (3), 2016, pp 233-247.

② Hanchen Yu, A. Stewart Fotheringham and Ziqi Li et al., Inference in Multiscale Geographically Weighted Regression, *Geographical Analysis*, Vol 52 (1), 2020, pp 87-106.

③ Firat Bilgel, Guns and Homicides: A Multiscale Geographically Weighted Instrumental Variables Approach, *Geographical Analysis*, Vol 52 (4), 2020, pp 588-616.

④ 刘凯、吴怡、陶雅萌等:《中国省域生态文明建设对碳排放强度的影响》,《中国人口·资源与环境》2019年第7期,第50~56页。

⑤ 肖宏伟、易丹辉:《基于时空地理加权回归模型的中国碳排放驱动因素实证研究》,《统计与信息论坛》2014年第2期,第83~89页。

⑥ 李炫榆、宋海清、李碧珍:《集聚与二氧化碳排放的空间交互作用——基于空间联立方程的实证研究》,《山西财经大学学报》2015年第5期,第1~13页。

⑦ 王雅楠、赵涛:《基于GWR模型中国碳排放空间差异研究》,《中国人口·资源与环境》2016年第2期,第27~34页。<http://www.cnki.net>

内蒙古、陕西六省区，中部地区山西、河南二省和东部沿海山东省等九个省区。本文选择上述九省区位于流域范围内的 65 个城市作为样本，以各城市二氧化碳排放量 ( $CO_2 T$ ) 作为被解释变量，选取常住人口数量 (POPL)、城市化率 (URBANR)、第二产业增加值 (SEC)、居民储蓄余额 (REDO)、居民生活消费品支出 (SAC)、第三产业增加值 (TER)、科学教育财政投入 (EDU) 为解释变量，建立 STIRPAT 模型进行初步分析：

$$\ln(CO_2 T) = \alpha + \beta_{POPL} \ln(POPL) + \beta_{URBANR} \ln(URBANR) + \beta_{SEC} \ln(SEC) + \beta_{TER} \ln(TER) + \beta_{EDU} \ln(EDU) + \beta_{REDO} \ln(REDO) + \beta_{SAC} \ln(SAC) + \mu \quad (1)$$

其中，二氧化碳排放数据来自《中国城市温室气体排放数据集 (2015)》<sup>①</sup>，常住人口数量、第二产业增加值、第三产业增加值、居民储蓄余额、居民生活消费品支出和科学教育财政投入数据来自样本城市 2016 年统计年鉴中的 2015 年数据，城市化率数据来自各市经济社会发展统计公报的 2015 年数据。采用 2018 年版本 GeoDa 软件计算黄河流域城市空间关系，采用 R 语言 spdep 程序包 (for R version 3.5.0) 进行多元回归和空间相关性分析，全部计算工具为公开版权计算软件。

以赤池信息准则对初始变量进行逐步回归，代表人口规模的常住人口数量、代表城市化水平的城市化率和代表工业化水平的第二产业增加值对黄河流域城市二氧化碳排放具有显著影响，而代表经济发展阶段水平的第三产业增加值、代表科技发展水平的科学教育财政投入以及代表生活水平的居民储蓄余额和居民生活消费品支出对二氧化碳排放的影响并不显著，变量选择后的黄河流域城市二氧化碳排放回归模型为：

$$\ln(CO_2 T) = \alpha_n I + \beta_{POPL} \ln(POPL) + \beta_{URBANR} \ln(URBANR) + \beta_{SEC} \ln(SEC) + \mu \quad (2)$$

多尺度地理加权回归对黄河流域城市二氧化碳排放的模型设定为：

$$\ln(CO_2 T_i) = \alpha_i I + \beta_{POPL}(u_i, v_i) \ln(POPL) + \beta_{URBANR}(u_i, v_i) \ln(URBANR) + \beta_{SEC}(u_i, v_i) \ln(SEC) + \mu \quad (3)$$

其中，空间位置采用地理球面坐标， $(u_i, v_i)$  是各城市中心的地理坐标， $\beta$  是解释变量的参变量。模型计算采用可加性算法，权函数采用高斯核函数算法，带宽优化标准选择空间赤池信息准则。

#### 四、黄河流域城市二氧化碳排放的空间相关性分析

从空间效应视角看，黄河流域城市二氧化碳排放不仅受到人口规模、城市化水平和工业化水平的影响，而且会受到流域内其他城市二氧化碳排放空间效应的影响。为了识别二氧化碳排放空间相关效应水平，采用空间邻接权重矩阵以莫兰指数对二氧化碳排放的空间自相关特征进行全局空间自相关检验，计算公式为：

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

其中， $n$  表示城市数量， $x_i$  和  $x_j$  表示不同城市的二氧化碳排放量， $\bar{x}$  表示流域内城市二氧化碳排放均值， $S^2$  表示二氧化碳排放的均方差， $W_{ij}$  表示空间权重矩阵。莫兰指数的取值范围为  $[-1, 1]$ ，大于 0 时，表示呈现空间正相关特征，即存在空间相似属性；小于 0 时，表示呈现空间负相关特征，即与周边存在相反的依赖关系；趋于 0 时，表示呈现随机分布特征，不具有空间关联性。黄河流域城市二氧化碳排放的全局莫兰指数为 0.531，蒙特卡罗模拟检验在 1% 的水平上显著，说明存在明显的空间自相关特征，有必要对黄河流域城市二氧化碳排放回归模型进行空间改造。对回归模型最小二乘法残差进行拉格朗日乘数及其稳健性检验，结果显示空间滞后效应和空间误差效应都处

① 中国城市温室气体工作组：《中国城市温室气体排放数据集 (2015)》，中国环境出版集团 2019 年版。reserved. <http://www.cnki.net>

于显著水平, 但空间滞后效应稳健性显著而空间误差效应稳健性不显著, 因此选择空间滞后模型(见表1)。

表1 拉格朗日乘数及其稳健性检验结果

检验项	LMIag	LMerr	RLMIag	RLMerr	SARMA
检验值	7.5866***	3.7711*	4.0657**	0.25016	7.8367**

注: \*、\*\*和\*\*\*分别表示10%、5%和1%的显著性水平。

增加空间滞后项建立黄河流域城市二氧化碳排放空间滞后模型, 进行考虑空间相关性的黄河流域城市二氧化碳排放结构分析:

$$\ln(CO_2 T) = \alpha_n I + \rho W \ln(CO_2 T) + \beta_{POPL} \ln(POPL) + \beta_{URBANR} \ln(URBANR) + \beta_{SEC} \ln(SEC) + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n) \quad (4)$$

回归结果显示, 黄河流域城市二氧化碳排放除了受到人口规模、城市化水平、工业化水平等因素影响外, 还受到空间相关性的明显影响。空间滞后参数  $\rho = 0.262$ , 即空间相关性对黄河流域城市二氧化碳排放的贡献为 0.262。与传统模型相比, 空间滞后模型的常住人口数量、城市化率和第二产业增加值对黄河流域城市二氧化碳排放的贡献都有所降低。其中, 常住人口数量的贡献从 0.490 下降到 0.451; 城市化率的贡献从 1.474 下降到 1.410; 第二产业增加值的贡献从 0.304 下降到 0.210, 降幅最大, 说明受到空间相关性影响最大(见表2)。

表2 黄河流域城市二氧化碳排放空间滞后回归结果对比

	Intercept	ln(POPL)	ln(URBANR)	ln(SEC)	$\rho$
最小二乘回归	-2.4238*	0.4899***	1.4740***	0.3035**	
	(-1.720)	(3.101)	(4.003)	(2.293)	
Residual standard error: 0.7336 Adjusted R-squared: 0.7205					
空间滞后回归	-3.4671***	0.4510***	1.4102***	0.2100**	0.2620***
	(-2.6008)	(3.0960)	(4.2140)	(1.6938)	(7.3860)
AIC: 129.22 (AIC for lm: 134.6)					

注: \*、\*\*和\*\*\*分别表示10%、5%和1%的显著性水平, 最小二乘回归的括号中数值为t统计量, 空间滞后回归的括号中数值为Z统计量,  $\rho$ 的括号中数值为LR统计量。

## 五、黄河流域城市二氧化碳排放的空间异质性分析

固定参数回归模型难以反映出城市之间存在的空间差异性, 也不能反映出变量间尺度差别对回归结果的影响, 无法把黄河流域城市二氧化碳排放的空间异质性展示出来。对黄河流域城市二氧化碳排放进行地理加权回归和多尺度地理加权回归的F检验均具有显著性, 残差平方和依次降低, 拟合优度依次增加, 模型解释能力得到提高(见表3)。考虑空间权重的地理加权回归模型优于全局线性回归模型, 既考虑样本空间关系又考虑变量尺度差异的多尺度地理加权回归模型优于仅考虑样本空间关系的地理加权回归模型, 多尺度地理加权回归模型明显改进了黄河流域城市二氧化碳排放的结构分析效果, 更加贴切地反映出黄河流域城市二氧化碳排放特征。

在黄河流域城市二氧化碳排放全局线性回归中, 常住人口数量的参数为 0.376, 城市化率的参数为 0.354, 第二产业增加值的参数为 0.321。在地理加权回归中, 样本点为 65 个城市, 固定带宽为

59, 有效参数数为 7.689, 自由度水平为 57.311, 常住人口数量对二氧化碳排放的平均影响参数为 0.265, 城市化率的平均影响参数为 0.330, 第二产业增加值的平均影响参数为 0.322。在多尺度地理加权回归中, 样本点为 65 个城市, 有效参数数为 8.992, 自由度水平为 56.008, 常住人口数量对二氧化碳排放的平均影响参数为 0.288, 城市化率的平均影响参数为 0.289, 第二产业增加值的平均影响参数为 0.343。多尺度地理加权回归的常住人口数量带宽为 44, 有效参数数为 3.040; 城市化率带宽为 64, 有效参数数为 1.573; 第二产业增加值带宽为 64, 有效参数数为 1.496 (见表 3、表 4)。

表 3 黄河流域城市二氧化碳排放地理加权回归结果对比

	全局线性回归	地理加权回归	多尺度地理加权回归
Residual sum of squares	17.313	14.365	13.152
Sigma estimate		0.501	0.485
Log-likelihood	-49.237	-43.169	-40.302
AIC	106.473	103.715	100.587
AICc	109.490	106.759	104.654
BIC		122.608	122.313
R <sup>2</sup>	0.734	0.779	0.798
Adj R <sup>2</sup>	0.721	0.749	0.765
Intercept	-0.000	0.084	0.086
ln (POPL)	0.376**	0.265	0.288
ln (URBANR)	0.354***	0.330	0.289
ln (SEC)	0.324*	0.322	0.343

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

在传统回归模型和空间滞后回归模型中, 城市化率对黄河流域城市二氧化碳排放的影响系数均大于 1.4, 远高于常住人口数量的影响系数 0.4899 和 0.4510, 以及第二产业增加值的影响系数 0.3035 和 0.2100, 城市化水平表现为黄河流域城市二氧化碳排放的最大影响因素。然而, 当考虑黄河流域空间异质性影响后, 城市化水平对二氧化碳排放影响的突出作用明显降低: 尽管在地理加权回归中城市化率的影响系数 0.330 仍然略高于常住人口数量的影响系数 0.265 和第二产业增加值的影响系数 0.322, 但是已经非常接近; 多尺度地理加权回归进一步降低了城市化水平的影响, 城市化率的影响系数 0.289 明显小于第二产业增加值的影响系数 0.343 (见表 4)。分析认为, 在传统回归模型和空间滞后回归模型中, 因为忽略了空间异质性, 内生空间效应强化了城市化率对黄河流域城市二氧化碳排放的影响, 导致城市化率对黄河流域城市二氧化碳排放的贡献虚高, 与实际排放情景相比产生了失真。地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型把空间异质性两次分离了出来, 使得黄河流域城市二氧化碳排放的城市化率贡献趋于收敛。

表 4 黄河流域城市二氧化碳排放回归参数对比

变量	传统回归	空间滞后回归	地理加权回归	多尺度地理加权回归	带宽	有效参数数
Intercept	-2.4238*	-3.4671***	0.084	0.086	44	2.883
ln (POPL)	0.4899***	0.4510***	0.265	0.288	44	3.040
ln (URBANR)	1.4740***	1.4102***	0.330	0.289	64	1.573
ln (SEC)	0.3035**	0.2100**	0.322	0.343	64	1.496

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

空间异质性分析表明,传统回归模型和空间滞后回归模型都只能从流域整体上观察解释变量对二氧化碳排放的影响,回归模型的估计参数是样本拟合总体的唯一值,而空间异质性模型根据尺度和带宽划定了每个城市的回归样本范围,使得每个城市都具有各自的回归参数,可以根据参数变化分析影响因素在不同城市间的变化情况,极大地扩充了回归分析的研究内涵,这也是多尺度地理加权回归模型的独特价值所在。

## 六、总结与建议

传统回归模型的变量选择结果显示出黄河流域城市二氧化碳排放主要受到人口规模、城市化水平和工业化水平的影响,呈现明显的工业化阶段排放特征。对于正处在工业化发展阶段的的城市,二氧化碳排放刚性是发展与减排矛盾的焦点,控制人口规模、减少城市排放和减少工业排放都极具挑战性。在空间相关性分析中,黄河流域城市二氧化碳排放的全局莫兰指数达到0.531,城市排放水平处于非随机分布状态,具有明显的空间自相关特征。

在空间相关性滞后回归模型中,空间关系被外生为空间滞后项,与人口规模、城市化水平和工业化水平共同作用于黄河流域城市二氧化碳排放。空间滞后参数为0.262,城市间相互影响显著,人口规模、城市化水平和工业化水平的作用相对降低。从空间相关性分析可以看出,黄河流域每一个城市的减排努力都不是独立的,都会对周边城市产生明显的带动作用,二氧化碳减排的治理和评价除了要从人口规模、城市化水平和工业化水平入手,还要致力于控制城市间相互作用,既要鼓励先进,通过空间相互作用产生示范带动作用,又要整体推进,避免落后城市对其他城市产生消极影响。

在地理加权空间异质性回归模型中,黄河流域城市间的异质性特征被圈定在各自的带宽中,通过局部城市簇回归把城市空间信息纳入回归参数,呈现黄河流域不同流域段城市的排放异质性。从回归模型看,黄河流域城市二氧化碳排放地理加权回归模型的影响因子固定带宽为59,接近全流域城市数量,空间异质性水平不高。从回归结果看,地理加权回归模型的参数作用与传统回归模型相比有明显变化,其中城市化作用与其他因素作用的差别显著缩小。由此可见,空间作用在传统回归模型中干扰了参数影响水平,引入空间异质性因素后剥离了这种假象,使得回归结果更加接近排放现实。进一步引入变量间多尺度空间异质性后,在多尺度地理加权空间异质性回归模型中,不同变量具有各自的尺度范围,变量间的空间差异性被蕴含在多尺度权重中参与回归,回归参数反映出差异化的变量空间异质性特征。其中,城市化水平对黄河流域城市二氧化碳排放的影响程度明显降低,而人口规模和工业化水平对排放的影响程度有所加强,即空间异质性推高了人口规模和工业化水平对排放的影响。此外,城市化水平和工业化水平带宽为64,接近全流域城市数量,呈现全局特征;人口规模带宽为44,具有相对明显的异质性空间特征。

空间关系研究显示,黄河流域城市二氧化碳排放相关性模型和异质性模型的回归结果都与传统回归模型有很大差异。究其原因,黄河流域城市二氧化碳排放的研究对象是人为划定的城市行政空间,与流域自然地理特征存在巨大的空间交错和包容关系,传统回归模型直接对城市行政区进行分析,空间因素内生在残差项中无法测量,使得解释变量的回归参数存在失真,常住人口数量、城市化率和第二产业增加值的回归参数值偏高。事实上,虽然黄河流域城市是行政区划的结果,但是相邻城市间存在跨越行政边界的河流贯穿、山体相连、森林湖泊湿地共享、野生动物迁徙、风霜雨雪覆盖等情况;同时,在源远流长的人文发展历史中,黄河流域城市间存在超越行政边界的语言风格、民俗习惯和地域认同,城市之间还会通过人员和资本流动、信息和技术交流等产生学习、仿效、合作、追赶、竞争等相互作用,多种多样的生态地理和人文社会状况会在城市间产生错综复杂的实质

性空间作用，使得黄河流域城市二氧化碳排放相关性模型和异质性模型的回归结果与传统回归模型存在差异。

黄河流域城市二氧化碳排放的空间关系研究从相关性和异质性两个方面表明，黄河流域城市二氧化碳排放除了受到人口规模、城市化水平和工业化水平的影响，还受到空间效应的影响，即黄河流域城市二氧化碳排放存在明显的空间效应。因此，黄河流域城市二氧化碳减排和加快碳达峰进程必须考虑黄河流域空间效应。一方面，有必要在统筹自然生态状况、人口集聚状况、城市化水平、工业化水平等多种因素基础上综合考虑排放的城市间影响，把其他城市排放的空间滞后效应纳入城市碳达峰目标和评价的考量范围，充分利用城市间的排放空间相关效应，形成城市间节能减排的学习、模仿、追赶、争先局面，带动全流域城市减排水平的整体提高。另一方面，有必要基于流域的异质性效应制定差别化的各城市碳达峰目标和减排政策。首先，黄河源头地区地广人稀，生态脆弱但又承担着重要的生态功能，增加人口、提升城市化水平和发展工业都会明显刺激排放增加，因此要强化国土空间功能区规划管理，保持原生态，采取生态移民、生态补偿等措施把人类活动对生态环境的影响降低到最低限度；其次，在黄河流域西部资源富集地区，推动呼包鄂榆、关中—天水、兰州—西宁、宁夏沿黄经济区的绿色低碳发展，尤其要在国家重要能源、战略资源基地建设中强化低碳减排任务，在满足国家能源和原材料战略需求的同时，严格执行节能减排和循环经济政策，加快减排技术创新和升级，以减少工业排放为主，重点打造工业增长与二氧化碳排放脱钩的示范城市；再次，在黄河流域中部和东部地区，在太原城市群、中原经济区、山东半岛蓝色经济区的发展中，强化低碳城市建设，秉承“绿水青山就是金山银山”的理念，坚持生态优先、绿色发展，重点打造城市化进程与二氧化碳排放脱钩的示范城市，形成具有低碳高质量发展特征的人口聚集区。

（责任编辑：任朝旺）

## A Study on the Spatial Relationship of the Urban Carbon Dioxide Emission in the Yellow River Basin

*Li Qing*

**Abstract:** The spatial effects in the development of the urban economy and society, the carbon dioxide emission and the ecological environment in the Yellow River basin cannot be overlooked. This paper studies the spatial effects of the urban carbon dioxide emission in the region, and uses Moran's  $I$ , spatial lag model, geographically weighted model and multi-scale geographic weighted model to make quantitative analysis on the spatial interdependence and spatial heterogeneity characteristics of the urban carbon dioxide emission in the region. Based on this, some suggestions are made to optimize the reduction policy of the urban carbon dioxide emission in the Yellow River basin and to accelerate the process of peaking carbon dioxide emissions.

**Keywords:** Yellow River basin; carbon dioxide emission; spatial effect