

城市规模、基础设施 与二氧化碳排放研究

张自然

(中国社会科学院 经济研究所, 北京 100836)

摘要: 文章基于中国 284 个地级及地级以上城市的空间面板数据, 运用空间杜宾模型来分析中国的城市规模、基础设施对二氧化碳排放的影响。结果表明, 考虑空间权重后, 城市规模与二氧化碳排放的直接效应表现为倒 U 型曲线、间接效应和总的效应为 U 型曲线, 二者叠加变化, 此消彼长, 经历了城市规模扩大促使二氧化碳排放达到峰值后逐渐平稳下降的过程; 基础设施指数的直接效应为正, 间接效应和总效应显著为负, 基础设施指数对邻近地区存在外溢效应, 有利于邻近地区减排。文章据此提出继续扩大城市规模、加强基础设施建设、明确核算基础设施的投向、加大科学技术支出占财政支出的比重、扩大引进外商直接投资的建议。

关键词: 城市规模; 基础设施指数; 二氧化碳排放; 空间权重

中图分类号: F124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0257-0246 (2023) 12-0070-08

改革开放以来, 中国经济增长居于世界前列, 截至 2022 年, 中国人均 GDP 水平与世行高收入国家标准仅一步之遥。中国的经济增长多是靠投资拉动, 即新基建投资, 由此, 经济增长和基础设施投资带来的“碳”属性处于较高水平。实现碳达峰碳中和将是未来中国经济实现绿色转型的底色所在和最鲜明标签。多部委统筹提出了科技支撑 2030 年前实现碳达峰目标的创新行动和保障举措, 并要求为 2060 年前实现碳中和目标做好技术研发储备。不断扩大的城市规模和基础设施对社会经济发展起着支撑和保障作用, 但也是碳排放的重要来源。在经济的绿色转型时期, 分析城市规模、基础设施与二氧化碳排放的关系, 寻求城市发展与碳排放之间的平衡点, 是有重要意义的。

一、理论分析

20 世纪 70 年代以来, 关于温室气体排放并可能导致气候变化的研究逐渐增多, 但主要集中于自然科学或环境科学领域。^① Yoichi Kaya 提出了 Kaya 恒等式, 将碳排放的影响因子分解为能源消费结构、能源消耗强度、经济发展水平、社会规模, 确立了人类经济和社会活动对碳排放影响的路径。^②

基金项目: 国家社会科学基金重大招标项目 (22&ZD053); 广西高校人文社会科学重点研究基地北部湾海洋发展研究中心项目。

作者简介: 张自然, 中国社会科学院经济研究所研究员, 中国社会科学院大学经济学院教授, 研究方向: 城市化、技术进步与经济增长。

^① Shardul Agrawal, “Context and Early Origins of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” *Climatic Change*, Vol. 39, No. 4, 1998, pp. 605-620.

^② Y. Kaya, *Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios*, Paper Presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup, 1990.

现有研究大多围绕 Yoichi Kaya 提出的有关变量而展开。如在能源消费结构和能源消耗强度方面,林伯强等认为能源消费结构的调整是碳减排的重要战略,碳达峰进程受能源电力需求影响,但也取决于绿色能源发展,而碳中和目标的实现需要经济增长与化石能源、电力需求相脱钩,关键是实现绿色清洁能源的安全、稳定和长效供应;^① 史丹和李鹏通过构建区域动态可计算一般均衡模型分析发现,在“双碳”目标约束下多数制造行业会受到较大冲击,在大力推动能源效率提高和绿色技术创新的基础上,最重要的还是通过建立区域和不同层次的碳排放交易市场不断提高碳税来促进“双碳”目标实现。^② 在城市规模或者人口规模对二氧化碳排放的影响方面, Bargaoui 等把 1980—2010 年 214 个国家收入水平的时间序列横截面数据进行分组,利用 STIRPAT 模型分析了经济和人口增长、城镇化水平、能源强度和京都议定书协议对二氧化碳排放的影响,结果发现经济增长、人口增长、城镇化水平和京都议定书协议对二氧化碳排放的影响取决于收入水平;^③ Wang 等运用 STIRPAT 模型,分析中国 30 个省 1997—2012 年人口规模、人均消费、能源强度、城镇化和老龄化对二氧化碳排放的影响后认为,人口规模、人均消费量和能源强度对东部、中部和西部地区二氧化碳排放产生重要影响,城镇化水平对西部地区二氧化碳排放有促进作用,但对中部地区有抑制作用。^④ 在基础设施与二氧化碳排放的研究方面, Xie 等利用 2003—2013 年 283 个城市的面板数据,使用改进的 STIRPAT 模型,证实了交通基础设施的建设增加了城市二氧化碳排放。具体来说,交通基础设施的人口规模效应有利于减少二氧化碳排放,但交通基础设施的经济增长和技术创新效应增加了二氧化碳排放,在大中城市后者大于前者。^⑤

可见,现有研究关注能源消费结构、能源消耗强度与城市规模、人口规模、基础设施对二氧化碳排放的影响,且聚焦于影响程度的大小上,在某些领域的结论也不完全一致。少有研究基于中国地级市层面数据,分析城市规模、基础设施和二氧化碳排放的关系。能源消耗是二氧化碳排放的直接表征,基础设施在设计、建设和运营中直接使用和消耗能源,同时排放二氧化碳。本文聚焦于基础设施对二氧化碳排放的影响机制,在中国 284 个地级及地级以上城市空间面板数据的基础上探讨城市规模、基础设施和二氧化碳排放的关系。

二氧化碳排放是城市规模的二次函数,二者的关系表现为倒 U 型曲线。人口规模可能是仅次于经济增长的影响二氧化碳排放的重要变量,随着城市人口规模的扩大,各种要素在城市聚集,形成空间聚集效应,促进了经济增长,与经济活动同时存在的“碳”的伴随物的排放逐渐增加。随着城市规模的进一步扩大,经济增长尤其人均 GDP 达到某个阈值后,产业结构、技术水平尤其绿色技术水平升级,二氧化碳排放达到峰值且不再随着人均 GDP 以及城市人口规模的增加而增加,反而开始下降,即碳达峰提出的原始理论根据。二氧化碳排放随着城市规模的扩大呈现先上升后下降的趋势,即倒 U 型曲线。

空间聚集对邻近城市产生外溢效应。地理经济学第一定律认为,相距较近的事物之间的关联性更强。这里我们引入空间计量来对中国 284 个地级及地级以上城市的城市规模、基础设施与二氧化碳排放进行研究。引入空间计量的前提是相关变量的 Moran's I 大于零,这一点将在后文得到验证。

随着基础设施建设的推进,二氧化碳排放逐渐增加,当基础设施进入运营期时,二氧化碳排放进

① 林伯强、姚昕、刘希颖 《节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整》,《中国社会科学》2010 年第 1 期; 林伯强 《碳中和进程中的中国经济高质量增长》,《经济研究》2022 年第 1 期。

② 史丹、李鹏 《“双碳”目标下工业碳排放结构模拟与政策冲击》,《改革》2021 年第 12 期。

③ Saoussen Bargaoui, Naoufel Liouane, Fethi Zouheir Nouri, “Environmental Impact Determinants: An Empirical Analysis based on the STIRPAT Model,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 109, 2014, pp. 449-458.

④ Yanan Wang, Yanqing Kang, Juan Wang, Linan Xu, “Panel Estimation for the Impacts of Population-related Factors on CO₂ Emissions: A Regional Analysis in China,” *Ecological Indicators*, Vol. 78, No. 6, 2017, pp. 322-330.

⑤ Rui Xie, Jiayu Fang, Cenjie Liu, “The Effects of Transportation Infrastructure on Urban Carbon Emissions,” *Applied Energy*, Vol. 196, 2017, pp. 199-207.

一步增加,到中后期逐渐进入稳定排放阶段,这是基础设施给本地区带来的直接效应。同时基础设施对其他城市存在空间外溢,即本地区的基础设施建设和运营能减少临近城市的二氧化碳排放,即基础设施的间接效应。基础设施对本地区和邻近地区的影响加总即是基础设施产生的二氧化碳排放的全部效应。

二、模型构建及检验

1. 空间计量模型的构建

本文选用空间杜宾模型(SDM),表达式为:

$$y_{i,t} = \alpha_i + \lambda_t + \rho \sum_{j=1}^N \omega_{i,j} y_{j,t} + x_{i,t} \beta + \sum_{j=1}^N \omega_{i,j} x_{j,t} \theta + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

SDM 向量模型为:

$$y_t = \rho W y_t + x_t \beta + W x_t \theta + \alpha + \lambda_t t_n + \varepsilon_t \quad (2)$$

W 为空间权重矩阵, $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2 I_n)$, $\alpha = [a_1, a_2, \dots, a_n]$, I_n 是 $(n \times 1)$ 的列向量,各元素均为 1。

$$y_t = \begin{bmatrix} y_{1t} \\ y_{2t} \\ \dots \\ y_{nt} \end{bmatrix}, x_t = \begin{bmatrix} 1 & x_{21t} & \dots & x_{k1t} \\ 1 & x_{22t} & \dots & x_{k2t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1t} & \dots & x_{knt} \end{bmatrix}$$

$$\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]', \theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]'$$

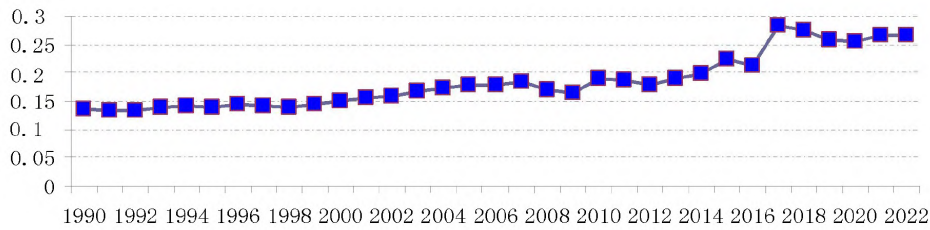
ρ 是空间回归系数,表示相邻城市观测值对本城市观测值的影响程度, λ 是空间误差系数,是相邻城市由于因变量的误差对本城市观测值的影响程度。 ε_{it} 是随机误差项,并服从正态分布, $y_{i,t}$ 表示 $\log(CO_2Emss)$,为城市 i 在 t 时期的二氧化碳排放量; $x_{i,t}$ 是城市 i 在 t 时期的解释变量的值, j 是第 j 个解释变量,分别为城市规模、城市规模的平方、基础设施指数、全要素生产率增长指数、科学技术支出、政府效率、人力资本、外国直接投资、财政收入。

2. 描述性统计分析

本文采用全国 284 个地级市 1990—2022 年的数据来分析城市规模、基础设施与二氧化碳排放的关系。数据均来自历年《中国城市统计年鉴》、各省区市统计年鉴、各城市国民经济和社会发展统计公报、中国统计年鉴等。描述性统计分析结果见表 1。由于邻近空间权重矩阵只能反映邻近地级市之间的影响,而忽略了不同距离的地级市之间的相互作用,而反距离空间权重矩阵更能体现不同距离地级市之间的空间依赖和相互影响,本文选择反距离空间权重矩阵来进行空间计量分析。

3. 模型适用性相关检验

(1) 全局空间自相关分析: Moran's I 检验。空间计量分析的前提是二氧化碳排放存在全局空间自相关,通过 Moran's I 指数可以检验全局空间自相关性。下图显示,1990—2022 年二氧化碳排放的 Moran's I 指数全部大于零,且均在 1% 的条件下显著,说明中国地级及地级以上城市的二氧化碳排放存在显著的空间依赖性,空间自相关系数为正。二氧化碳排放量较大的城市,其周边城市的二氧化碳排放量也较大。由于空间相关性的存在,传统分析的面板数据得出的计量结果是有偏差的,不能真实反映二氧化碳排放现状,也不能反映城市各变量对二氧化碳排放的影响,因此本文采用地级市层面的空间计量来进行分析。



二氧化碳排放的 Moran's I 指数检验图

表 1 变量描述性统计分析

变量	变量名称	变量解释	平均值	标准差	最小值	最大值
$\log(CO_2E_{mss})$	二氧化碳排放	煤气、天然气、液化石油气、总用电量、原煤的总热量产生的 CO_2 ，单位万吨，为二氧化碳排放量取对数	5.366	1.618	-0.721	9.888
$\log(P)$	城市规模	全市常住人口总数	5.802	0.699	2.383	8.075
$\log(P)^2$	城市规模平方	城市规模对数的平方，用 $\log(P)^2$ 表示	34.152	7.944	5.679	65.202
<i>infra</i>	基础设施指数	教育基础设施指数、交通基础设施指数、公共基础设施指数、电信基础设施指数的几何平均值 ^①	4.864	2.402	0.196	14.155
<i>TFP</i>	全要素生产率增长指数	由 DEA Malmquist 指数法得到的 <i>TFP</i> 指数	1.043	0.065	0.742	1.36
<i>sciFin</i>	科学技术支出	地方财政支出中科学技术支出的比重	0.001	0.002	0	0.028
<i>govEff</i>	政府效率	又称为政府管理模式，为评价中国城市可持续发展的一级指标	0.066	0.539	-0.83	2.207
$\log(HC)$	人力资本	用小学、中学和大学的受教育支出成本比来表示，具体指标为人力资本的对数	0.954	0.503	0.001	2.63
<i>FDI</i>	外国直接投资	外国直接投资占 GDP 现价比重，外国直接投资以美元为单位，用当年人民币对美元汇率换算成人民币，并除以当年各城市 GDP 现价	0.017	0.029	0	0.593
<i>revGDP</i>	财政收入	地方财政收入占 GDP 的比重	0.064	0.033	0.002	0.268

说明：样本量为 9372 个。其中 $\log(prod)$ 为劳动生产率，单位为每万人/亿元，故其对数存在为负的情况。

(2) 模型适用性检验。本文采用 Wald 检验和 LR 检验来选择合适的空间计量模型，Wald SAR 和 SEM 检验说明 SDM 不会退化为 SAR 或 SEM (见表 2 和表 3)。LR 检验拒绝了原假设 (见表 4)，结果表明不应该用 SAR 模型和 SEM 模型进行估计，应该选择空间杜宾模型 (SDM)。通过豪斯曼检验得到卡方值为 136.07，大于 0。本文的空间面板数据仍然可以采用固定效应进行分析。通过 Levin-Lin-Chu test 和 Im-Pesaran-Shin test 两种方式检验，所有解释变量和被解释变量的一阶差分均平稳。

表 2 Wald SAR 检验结果

赤池信息量准则 (AIC) 和贝叶斯信息准则 (BIC) N	ll (null)	ll (model)	df	AIC	BIC
9372		-4403.254	26	8858.509	9044.291

说明：N 为样本个数。chi2 (12) = 22.63, Prob>chi2=0.0311

① 参见《1990—2022 年中国城市可持续发展评价》。

表3 Wald SEM 检验结果

赤池信息量准则 (AIC) 和贝叶斯信息准则 (BIC) N	ll (null)	ll (model)	df	AIC	BIC
9.37E+03		-4517.46	15.00	9064.91	9172.10

说明: N 为样本个数。chi2 (12) = 25.07, Prob>chi2=0.0145

表4 LR tag 和 error 检验结果

LR 检验	值
Likelihood-ratio test LR chi2 (13)	341.85
(Assumption: sar_ varDev nested in sdm_ varDev) Prob > chi2	0.0000
Likelihood-ratio test LR chi2 (13)	395.71
(Assumption: sem_ varDev nested in sdm_ varDev) Prob>chi2	0.0000

4. 模型稳健性检验

本文采用了改变样本范围和改变固定效应和随机效应分析方法来检验模型的稳健性。

本文将样本范围从1990—2022年调整为2000—2022年,并保持模型的变量不变来检验稳健性。样本范围调整前后的对比显示,变量系数的正负性和显著性基本保持不变。考虑空间权重前 *govEff* 的系数发生变化, *sciFin* 的直接效应系数发生变化, $\log(P)$ 的总效应系数发生变化;考虑空间权重后变量系数和间接效应变量系数正负性未发生变化,其他变量的正负性和显著性基本保持不变,这说明模型具有较强的稳健性。

本文将样本范围从1990—2022年调整为2010—2022年,并保持模型的变量不变来检验稳健性。样本范围调整前后对比显示,变量系数的正负性和显著性基本保持不变。考虑空间权重前 *sciFin*、 $\log(HC)$ 、*FDI* 的系数发生变化;考虑空间权重后 $\log(P)$ 、*sciFin*、*revGDP* 的系数发生变化; $\log(HC)$ 、*FDI* 的直接效应系数发生变化; $\log(P)$ 、 $\log(P)^2$ 、*sciFin* 的间接效应系数和总效应系数发生变化。其他变量的正负性和显著性基本保持不变,这说明模型仍具有一定的稳健性。

采用随机效应进行分析。模型不变,用随机效应分析1990—2022年的SDM模型,*sciFin* 的直接效应系数发生变化,考虑空间权重前后及间接效应系数的正负性均未发生变化。采用随机效应的分析结果说明,SDM模型具有足够的稳健性,采用固定效应或随机效应对结果没有根本性的影响。

三、实证分析结果

1. 考虑空间权重前后结果的变化

表5中4个模型都基于空间杜宾模型(SDM)。模型1的 $\log(P)$ 、 $\log(P)^2$ 、*infra*、*TFP*、*sciFin*、*govEff*、 $\log(HC)$ 为基本变量。模型1-4的空间滞后项系数均显著。模型2在基本变量的基础上增加*FDI*变量;模型3在基本变量的基础上增加*FDI*、*revGDP*变量。模型4在模型3的基础上去掉解释变量基础设施指数(*infra*)。

从空间滞后项来看,城市规模与二氧化碳排放的关系由倒U型曲线转为U型曲线且系数都显著。考虑空间权重后,全要素生产率增长指数、政府效率、人力资本、外国直接投资的系数为正且显著;基础设施指数、科学技术支出、财政收入的系数为负且显著。模型4比模型3少一个解释变量基础设施指数(*infra*),可以发现,减少解释变量基础设施指数(*infra*)及考虑空间权重后,*FDI*变量变得不显著,其他变量的正负和显著性基本不变,经济含义基本一致。由此可知,模型3是最合适的。

表 5 固定效应的实证结果 (1990—2022 年)

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
$\log(P)$	0.764 ^{***}	0.814 ^{***}	0.784 ^{***}	0.809 ^{***}
$\log(P)^2$	-0.095 ^{***}	-0.098 ^{***}	-0.095 ^{***}	-0.1 ^{***}
<i>infra</i>	0.021 ^{***}	0.021 ^{***}	0.022 ^{***}	
<i>TFP</i>	0.22 ^{**}	0.224 ^{**}	0.217 ^{**}	0.216 ^{**}
<i>sciFin</i>	6.027	6.594 [*]	6.995 [*]	8.297 ^{**}
<i>govEff</i>	0.062 ^{**}	0.068 ^{**}	0.064 ^{**}	0.07 ^{***}
$\log(HC)$	-0.31 ^{***}	-0.304 ^{***}	-0.304 ^{***}	-0.297 ^{***}
<i>FDI</i>		0.334	0.351	0.387 [*]
<i>revGDP</i>			-0.439 ^{**}	-0.345 [*]
<i>Wx</i>				
$w^* \log(P)$	-1.128 ^{***}	-1.231 ^{***}	-1.121 ^{***}	-1.259 ^{***}
$w^* \log(P)^2$	0.261 ^{***}	0.279 ^{***}	0.263 ^{***}	0.264 ^{***}
$w^* \textit{infra}$	-0.053 ^{***}	-0.055 ^{***}	-0.057 ^{***}	
$w^* \textit{TFP}$	0.405 ^{**}	0.415 ^{**}	0.347 ^{**}	0.475 ^{***}
$w^* \textit{sciFin}$	-55.355 ^{***}	-55.653 ^{***}	-42.429 ^{***}	-41.838 ^{***}
$w^* \textit{govEff}$	0.355 ^{***}	0.374 ^{***}	0.422 ^{***}	0.409 ^{***}
$w^* \log(HC)$	0.778 ^{***}	0.725 ^{***}	0.753 ^{***}	0.603 ^{***}
$w^* \textit{FDI}$		1.248 ^{**}	0.914 [*]	0.732
$w^* \textit{revGDP}$	-0.892 ^{**}		-1.474 ^{***}	-1.55 ^{***}
<i>Spatial</i>				
ρ	0.72 ^{***}	0.715 ^{***}	0.694 ^{***}	0.696 ^{***}
<i>Variance</i>				
θ				
σ	0.16 ^{***}	0.16 ^{***}	0.16 ^{***}	0.16 ^{***}

说明: ***表示 1% 的显著性, **表示 5% 的显著性, * 表示 10% 的显著性。以下表同。

2. 三大空间效应 (直接效应、间接效应和总的效应) 的情况

表 6 显示了三大空间效应的实证结果。从模型 1—4 可以看出:

城市规模与二氧化碳排放的直接效应表现为倒 U 型曲线, 间接效应和总的效应都为 U 型曲线, 间接效应不显著, 但直接效应和总效应显著。

基础设施指数和科学技术支出的直接效应为正、间接效应和总的效应都为负且显著。这一结果验证了理论机制分析中的基础设施的作用机理, 即随着基础设施指数的提升, 二氧化碳排放也逐步增加, 给本地区带来直接效应, 同时基础设施建设存在空间外溢, 对邻近城市的二氧化碳排放存在间接效应, 在本地区基础设施建设和运营的影响下, 邻近城市能适当减少二氧化碳排放。科学技术支出中涉及绿色转型的技术研发成果外溢到邻近地区, 有助于邻近地区降低二氧化碳排放量, 即间接效应显著。总体看, 基础设施和科学技术支出有利于二氧化碳排放量的降低。

人力资本的直接效应为负、间接效应和总的效应都为正, 三大效应的系数都达到显著性标准。人力资本是促进经济增长的核心要素, 人力资本投入的增加能够促进技术进步进而减少二氧化碳排放, 即直接效应为负。本地区人力资本水平的提升对邻近地区的二氧化碳排放存在外溢机制, 可能的原因在于产业结构的调整, 但这一机制仍需进一步验证和探讨。

全要素生产率增长指数、政府效率和外国直接投资的直接效应、间接效应和总的效应都为正且显著。财政收入的直接效应、间接效应和总的效应都为负且显著。由此可见, 生产力发展、投资增加的同时伴随着二氧化碳排放的增加, 而财政收入占 GDP 比重的提高, 势必打压各方面生产的积极性,

进而减少二氧化碳排放。财政收入占 GDP 的比重如何提高降低邻近地区的二氧化碳排放量及其机理,值得今后进一步探讨。

表 6 固定效应的直接效应、间接效应和总的效应 (1990—2022 年)

LR_ Direct	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
$\log(P)$	0.716***	0.764***	0.743***	0.758***
$\log(P)^2$	-0.077***	-0.079***	-0.078***	-0.083***
<i>infra</i>	0.017***	0.018***	0.019***	
<i>TFP</i>	0.275***	0.279***	0.26***	0.281***
<i>sciFin</i>	1.087	1.707	3.725	5.106
<i>govEff</i>	0.102***	0.111***	0.107***	0.111***
$\log(HC)$	-0.256***	-0.255***	-0.255***	-0.26***
<i>FDI</i>		0.472**	0.45**	0.477**
<i>revGDP</i>			-0.584***	-0.513***
LR_ Indirect	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
$\log(P)$	-2.024	-2.066	-1.764	-2.101
$\log(P)^2$	0.67***	0.701***	0.619***	0.612***
<i>infra</i>	-0.132***	-0.139***	-0.132***	
<i>TFP</i>	1.947***	1.995***	1.565***	1.982***
<i>sciFin</i>	-176.795***	-174.882***	-118.447***	-114.048***
<i>govEff</i>	1.38***	1.454***	1.475***	1.458***
$\log(HC)$	1.922***	1.733***	1.716***	1.271***
<i>FDI</i>		5.155***	3.828**	3.128**
<i>revGDP</i>			-5.682***	-5.726***
LR_ Total	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
$\log(P)$	-1.308	-1.302	-1.021	-1.343
$\log(P)^2$	0.593***	0.622***	0.541***	0.529***
<i>infra</i>	-0.115***	-0.121***	-0.113***	
<i>TFP</i>	2.222***	2.275***	1.825***	2.263***
<i>sciFin</i>	-175.707***	-173.175***	-114.722***	-108.941***
<i>govEff</i>	1.482***	1.565***	1.582***	1.57***
$\log(HC)$	1.666***	1.478***	1.461***	1.011***
<i>FDI</i>		5.628***	4.278***	3.604**
<i>revGDP</i>			-6.266***	-6.238***

说明: LR_ Direct 表示直接效应, LR_ Indirect 表示间接效应, LR_ Total 表示总的效应。

3. 变量空间效应的进一步讨论

本文将 1990 年、2000 年、2010 年设定为起点,分别探讨 1990 年后、2000 年后和 2010 年后的模型数据。^① 根据三个时间段的结果且考虑空间权重后可以得到如下结果:

基础设施指数的直接效应为正,间接效应和总的效应为负,三大效应均显著。随着时间推移基础设施的直接效应系数逐年增大,间接效应系数越来越小,总效应系数由大转小再变大。

科学技术支出的直接效应由正转负再转正但始终不显著,间接效应和总效应的变化趋势一致,在 1990 年后和 2000 年后均显著为负且变大,2010 年后转正。

全要素生产率增长指数、政府效率和外国直接投资的系数都为正。其中,全要素生产率增长指数

^① 没有选择 1990—1999 年、2000—2009 年、2010 年三个时段进行分析,是由于年份周期短的模型计量效果有限,而且以现有年份为基础的长周期模型不影响最后结果及方向。

的三大效应系数逐年增大，均显著；政府效率直接效应的系数呈现由大变小再变大的趋势，在 2000 年后和 2010 年后并不显著，而间接效应和总效应系数均逐年增大且显著；外国直接投资的直接效应在 2000 年后和 2010 年后不显著，且在 2010 年后由正转负，其他年份的效应系数均显著为正且逐年增大。

人力资本的直接效应系数在 1990 年后、2000 年后显著为负，其他年份的效应均显著为正，间接效应由小变大再转小，总效应逐年增大。

财政收入的三大效应均为负，除 2000 年后、2010 年后间接效应不显著外其他均显著。

四、结语

本文基于中国 284 个地级及地级以上城市的空间面板数据，引入基础设施指数作为解释变量，在考虑空间权重后，分析城市规模等变量对二氧化碳排放的影响，得到如下结论和启示：

城市规模与二氧化碳排放的直接效应表现为倒 U 型曲线、间接效应和总的效应都为 U 型曲线，二者叠加变化，此消彼长，经历了城市规模扩大促使二氧化碳排放达到峰值后逐渐平稳下降的过程。因此，应该继续扩大城市规模，提高城市规模对地区经济的带动作用以及对邻近地区的辐射作用。

基础设施指数的直接效应为正，间接效应和总效应为负，说明基础设施的建设和运营增加了本地区的二氧化碳排放，但是总体来看有助于经济增长和减排。因此，在“双碳”目标约束范围内应继续扩大基础设施建设，明确核算基础设施的投向对本地经济增长和二氧化碳排放的作用以及对邻近地区的经济增长和减排的贡献，把经济和社会外溢性作为衡量基础设施投资的一个重要方面，但也不能忽视基础设施的布局问题。

应当继续加大科学技术支出占财政支出的比重，提高科技支出中绿色转型的研发比重。从 1990 年之后的数据看，科技支出对邻近地区减排发挥了巨大的正向外溢作用，但从 2010 年的结果来看，科技支出的正向作用受限。这提示我们要关注科技支出投向结构问题，使其在提升科技水平的同时发挥减排作用。

坚持改革开放，扩大引进外商直接投资。近些年来出现一些外资转移至东南亚的情况，对中国供应链的完整性造成了一定的损害。应当关注外商直接投资的绿色转型和绿电使用，以促进本地的减碳和绿色转型发展。

限于篇幅，本文主要探讨了城市规模、基础设施与二氧化碳排放的关系，其中基础设施指数由教育基础设施指数、交通基础设施指数、公共基础设施指数、电信基础设施指数得到，下一步可以分析教育基础设施、交通基础设施、公共基础设施和电信基础设施与二氧化碳排放的关系，进一步明晰基础设施的具体细项对二氧化碳排放的作用，从而更好地促进减排。

责任编辑：孙中博