

DOI: 10.20103/j.stxb.202211133271

颜建军, 冯君怡, 陈彬. 中国城市生态基础设施对碳排放量的影响. 生态学报, 2024, 44(2): 637-650.

Yan J J, Feng J Y, Chen B. Research on the impact of urban ecological infrastructure on carbon emissions in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 637-650.

中国城市生态基础设施对碳排放量的影响

颜建军¹, 冯君怡^{2,*}, 陈彬³

¹ 湖南工商大学经济与贸易学院, 长沙 410205

² 中南大学商学院, 长沙 410083

³ 北京师范大学环境学院, 北京 100875

摘要:在碳达峰、碳中和的时代背景下,探究城市生态基础设施的碳减排效应对实现城市的可持续性发展、现代化发展具有重要的现实意义。选用中国 2003—2019 年中国 214 个地级市为样本,采用熵权法量化中国城市生态基础设施发展水平,构建空间计量模型研究城市生态基础设施发展对碳排放量的影响及其空间溢出效应。研究发现:(1)中国城市碳排放总量整体呈上升趋势,并且碳排放量较高的地区是人口密度较大的城市,以及传统工业城市。城市生态基础设施发展水平总体呈先下降,后上升的趋势,发展较好的城市分布在东部沿海地区,西北城市,中部省会与直辖市。(2)城市生态基础设施发展显著促进了本地城市和邻地城市的碳排放量,该结果通过稳健性检验。并且,城市生态基础设施的碳减排效应存在滞后性,城市生态基础设施在发展至 12 期时,具有显著的碳减排效应。(3)城市第二产业发展具有集聚效应,降低了邻地城市的碳排放量;城市对外开放程度越高,地区间贸易加速流动,促进了邻地城市的碳排放量。(4)与其他城市相比,西部地区城市、非省会城市和直辖市,以及资源型城市的生态基础设施发展显著促进了城市碳排放。(5)政策制定上,一方面应全力推进城市生态基础设施发展和第二产业转型,重视城市绿化覆盖、垃圾废水处理等设施建设。另一方面需特别关注西部地区城市、非直辖市和非省会城市、以及资源型城市,因地制宜,激发其生态基础设施建设动力,助推碳达峰、碳中和目标的实现。

关键词:城市生态基础设施;碳排放;空间计量模型;熵权法

Research on the impact of urban ecological infrastructure on carbon emissions in China

YAN Jianjun¹, FENG Junyi^{2,*}, CHEN Bin³

¹ School of Economics and Trade, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

² Business School, Central South University, Changsha 410083, China

³ School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Under the background of carbon peaking and carbon neutrality, exploring the carbon emission reduction effect of urban ecological infrastructure is important for achieving sustainable development and modern development of cities. This article selected 214 prefecture level cities in China from 2003 to 2019 as samples. The entropy weight method was adopted to quantify the development level of urban ecological infrastructure development in China. A spatial econometric model was constructed to study the impact of urban ecological infrastructure development on carbon emissions and its spatial spillover effects. The research finds that: (1) By and large, the urban carbon emissions are on the rise, and the regions with high carbon emissions are cities with large population density, as well as the traditional industrial cities. The urban ecological

基金项目:国家社会科学基金项目(22BJY108);国家自然科学基金项目(72091511);湖南省哲学社会科学基金项目(21ZDB024)

收稿日期:2022-11-13; **网络出版日期:**2023-10-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fjj.high@163.com

#限于数据的可获取性,本研究尚未统计到中国港澳台地区数据。

infrastructure development level shows a trend of first decreasing and then increasing. High level cities are distributed in the eastern coastal areas, northwest cities, provincial capital cities in middle China, and municipalities directly under the central government. (2) The development of urban ecological infrastructure significantly promotes carbon emissions of local cities and neighboring cities, and this result passes the robustness test. Moreover, there is a lag in the carbon emission reduction effect of urban ecological infrastructure. Urban ecological infrastructure will have a significant carbon reduction effect after 12 years. (3) The development of urban secondary industry has an agglomeration effect, reducing the carbon emissions of neighboring cities. The higher the degree of opening to the outside world, the faster the flow of regional trade, which promotes the carbon emissions of neighboring cities. (4) Compared to other cities, the development of ecological infrastructure in the western cities, non-provincial capital cities, non-municipalities directly under the central government, and resource-based cities significantly promote urban carbon emissions. (5) In terms of policy development, on the one hand, efforts should be made to promote the development of urban ecological infrastructure and the transformation of the secondary industry, especially the construction of facilities such as urban greening facilities and garbage and wastewater treatment facilities. On the other hand, special attention should be paid to cities in the western region, non-provincial capital cities and non-municipalities directly under the central government, as well as resource-based cities. In order to stimulate these cities' momentum of ecological infrastructure construction and promote the realization of carbon peaking and carbon neutrality, the development of urban ecological infrastructure should be handled in the light of concrete circumstances.

Key Words: urban ecological infrastructure; carbon emissions; spatial econometric model; entropy weight method

城市作为人类生活和社会经济发展的重要载体,约有 70%以上的碳排放均来自城市^[1],现有研究表明过量碳排放引发的生态失衡等问题对人类生存造成了极大威胁^[2],包括城市热岛效应,洪涝灾害等。党的二十大报告指出:“中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化”。在“双碳”目标的大背景下,城市生态与经济的可持续发展是城市未来的发展方向,尤其是实现城市碳减排最为迫切。“十四五”规划指出,要统筹推进新型基础设施建设。城市生态基础设施作为城市可持续发展所依赖的自然系统,通过在城市建设公园、绿地和湿地,采取污染控制等措施^[3],实现城市防洪、提高城市宜居性等。城市基础设施不仅能为城市居民提供生态服务^[4],而且能实现城市生态系统修复和环境协同治理,不会增加外部系统生态负担^[4-5]。因此,探究生态基础设施对城市碳排放量的影响对实现城市“双碳”目标,城市可持续发展、现代化发展具有重要的意义。

作为新型基础设施,生态基础设施在建设过程中仍需要消耗大量的水泥等材料^[6],造成大量的碳排放,也就是在生态基础设施发展的前期,城市生态基础设施可能会增加城市碳排放,但发展到一定阶段后可能会起到城市碳减排的作用。那么中国城市生态基础设施发展到什么阶段了?可以实现碳减排了吗?在不同经济发展程度、资源禀赋、行政级别的城市,生态基础设施发展水平对城市碳排放的影响又有什么差异?将是本文接下来重点探讨的问题。

随着城市可持续发展的不断深化,相关学者已围绕城市生态基础设施的定义^[7-8],生态基础设施的效益评价体系^[9-10],以及生态基础设施的影响因素^[11-12]进行了广泛的研究。相关研究指出生态基础设施是保持改善和增加生态系统服务必备的一系列条件和组合^[13],其在城市适应气候变化^[14],提高城市防洪涝能力^[15],缓解热岛效应^[16]等,并且在社会经济效益上^[9,17]有着显著的作用。但是也有学者以流域生态基础设施为例,提出即使在对生态基础设施进行了大量长期投资的流域,也不能证实其效益^[18]。同时,生态基础设施也受政策因素和社会因素的影响,有学者指出政策因素^[11]和社会愿景^[12]是影响生态基础设施建设的重要因素。在生态基础设施与碳排放的关系上,很少有文献直接研究生态基础设施对碳排放的影响,较多的学者关注绿色基础设施的碳减排作用,并且发现绿色基础设施有着显著的固碳能力^[19],可在一定程度上减弱灰色基础设施对固碳量的影响^[20]。除固碳能力外,绿色基础设施可直接吸收大气中的二氧化碳,实现碳减排^[21]。

那么生态基础设施作为将绿色基础设施和灰色基础设施有机结合的支撑体系^[13],是否也具有类似的碳减排功能?

综上,虽然部分研究已涉及绿色基础设施的碳减排效应,但仍存在文献上的不足。一是鲜有针对生态基础设施和碳排放的研究,现有文献大多集中在对生态基础设施可行性、发展程度、协调性上的研究,也有少部分文献评估了生态基础设施的经济效益,但尚未有较多学者关注生态基础设施在碳减排上的作用。二是在新经济地理学理论下,较少有文献通过空间计量模型研究生态基础设施对碳排放的影响。三是基于城市层面,考虑城市异质性对生态基础设施碳减排影响的文献较少。因此,本文选用 2003—2019 年中国 214 个地级市,通过熵权法对城市生态基础设施发展水平进行度量,并采用空间计量模型评估城市生态基础设施发展水平对碳排放量的影响及其溢出效应,且对其直接效应和间接效应均做了进一步解释。最后,进行了异质性检验,分别进行了地理位置、资源禀赋和行政级别异质性的研究,以期可为我国城市生态基础设施建设与生态文明建设提供经验证据。

1 研究设计

1.1 变量选取与来源

1.1.1 核心变量

被解释变量:城市碳排放量。借鉴 Shan 等^[22]、林乐芬和杨倩文^[23]的研究,从中国碳核算数据库(CEADs)选取 2003—2019 年中国地级市的碳排放清单(百万吨),去除缺失数据较多的城市,共得到 214 个地级市为研究样本。

核心解释变量:城市生态基础设施发展水平(EIDL)。借鉴 Sun 等^[24]对生态基础设施的定义与量化,本文从绿化水平、土地利用和污染控制三类指标构建城市生态基础设施变量。三类指标分别包括:城市人居绿地面积($\text{hm}^2/\text{万人}$),人均生态用地面积($\text{m}^2/\text{人}$),城市生活垃圾无害化处理(%),工业固废综合利用率(%),城市污水处理率(%).为了消除异方差的影响,对上述指标均进行自然对数处理,指标构建如表 1 所示。数据来自 2004—2020 年中国城市统计年鉴和中国环境统计年鉴。

采用熵权法的处理方法如下:

由于绿化水平、土地利用和污染控制三类指标均为正向指标,故先通过式(1)进行数据的标准化处理

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (1)$$

式中, y_{ij} 为标准化后的数据, $\max x_j$ 和 $\min x_j$ 分别为指标 x_j 的最大值和最小值。

然后,计算上述指标的指标熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (2)$$

式中, $k = 1/\ln m$, m 为评价对象的个数, $p_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij}$ 。

然后,根据指标熵值 e_j 确定各指标的权重:

$$W_{ij} = \frac{1 - e_{ij}}{\sum_{i=1}^n (1 - e_{ij})} \quad (3)$$

指标熵值和权重计算结果如表 1 所示。

1.1.2 控制变量

为较准确地量化城市基础设施发展水平对城市碳排放的影响,进一步控制了可能会影响城市碳排放的变量^{[23][25]}。本文控制变量为经济发展(GDP):地区生产总值增长率,经济发展是影响城市碳排放的重要因素,经济发展越好,碳排放量越高;产业发展(IND):城市第二产业占 GDP 比重(%)的自然对数,工业产业比重越

高,碳排放量越高;对外交流(FDI):当年实际使用外资金额(万美元)的自然对数,外商投资有可能带来技术革新,实现碳减排,但也可能存在“污染天堂”效应,增加碳排放;研发投入(TEC):地方一般公共预算科学技术支出(万元)的自然对数,研发投入越高,意味着科技水平越高,碳排放越低。

表 1 生态基础设施发展水平指标体系和权重

Table 1 Index system and weight of ecological infrastructure development level

系统 Systems	一级指标 Primary indexes	二级指标 Secondary indexes	单位 Units	权重/% Weights
城市生态基础设施发展水平 Ecological infrastructure development level	绿化水平	城市人居绿地面积	hm ² /万人	33.359
	土地利用	人均生态用地面积	m ² /人	43.205
	污染控制	城市生活垃圾无害化处理率	%	10.913
		工业固废综合利用率	%	4.855
		城市污水处理率	%	7.669

最后,运用公式 $N_i = \sum W_{ij} \times y_{ij}$ 计算城市生态基础设施发展水平的得分。

1.2 模型设定

1.2.1 基准回归模型

本文设定基准回归模型如式(4)所示:

$$\text{carbon}_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \text{EIDL}_{it} + \alpha_2 \text{Controls}_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中, carbon_{it} 为城市碳排放量, EIDL_{it} 为城市生态基础设施发展水平, Controls_{it} 为控制变量,包括经济发展(GDP)、产业发展(IND)、对外交流(FDI)、研发投入(TEC)。 μ_i 为城市固定效应, γ_t 为时间固定效应, ε_{it} 为随机扰动项。

1.2.2 空间计量模型的设定

(1)空间权重矩阵。由于本文探讨的是生态基础设施对城市碳排放的影响,在地理距离上的溢出效应是本文着重考察的重点,相邻矩阵由于存在无法考察非邻接城市溢出影响的问题^[26]。故根据城市间的欧氏距离,构建如下地理距离空间权重矩阵(W_{ij}^d)进行空间计量模型回归:

$$W_{ij}^d = \frac{1}{d_{ij}}, (i \neq j) \quad (5)$$

式中, d_{ij} 为城市 i 和 j 的欧式距离。

(2)空间计量模型的设定。在选取了相应的空间权重矩阵后,进一步构建空间计量模型^[27-28],如式(6)所示。

$$\text{carbon}_{it} = \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{carbon}_{jt} + \beta_1 \text{EIDL}_{it} + \beta_2 \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{EIDL}_{jt} + \beta_3 \text{Controls}_{it} + \beta_4 \sum_{j=1}^n W_{ij} \text{Controls}_{jt} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式中, ε_{it} 是纳入空间溢出效应的随机扰动项, $\varepsilon_{it} = \lambda \sum_{j=1}^n W_{ij} \varepsilon_{jt} + \nu_{it}$, $\nu_{it} \sim N(0, \sigma^2)$; carbon_{it} 和 carbon_{jt} 均为被解释变量,分别表示区域 i 和区域 j 在 t 时的城市碳排放, W_{ij} 为空间权重矩阵,其他变量均不变。常见的空间计量模型有空间误差模型、空间滞后模型和空间杜宾模型^[29],当 $\rho \neq 0, \beta_2 = 0, \lambda = 0$ 时,为空间滞后模型;当 $\rho = 0, \beta_2 = 0, \lambda \neq 0$ 时,为空间误差模型,当 $\rho \neq 0, \beta_2 \neq 0, \lambda = 0$ 时,为空间杜宾模型。具体的模型选择将在下文通过检验选取。

2 城市生态基础设施与城市碳排放的空间格局和空间相关性

2.1 城市生态基础设施发展水平与城市碳排放的空间演变趋势

对 2003—2019 年 214 个地级市的碳排放量与生态基础设施发展水平进行空间可视化,如图 1—图 2 所

示。图 1 是 2003 年、2008 年、2013 年和 2019 年的中国城市碳排放量空间演变趋势图,图 2 是 2003 年、2008 年、2013 年和 2019 年的中国城市生态基础设施发展水平空间演变趋势图。

由图 1,我国东南部城市始终保持较低的碳排放量,但江苏上海一带城市碳排放量仍在高位。2003—2019 年我国城市碳排放量的高位区始终位于华北和东北平原城市,在 2003—2008 年间华北地区城市碳排放量显著增加,在 2008—2019 年间又呈下降趋势,但相对其他城市仍处于高位区。值得注意的是在中西部地区,重庆地区的碳排放量始终位于高位。总体来看,中国城市碳排放总量整体上呈上升趋势,并且碳排放量较高的地区是人口密度较大的城市,以及传统工业城市。

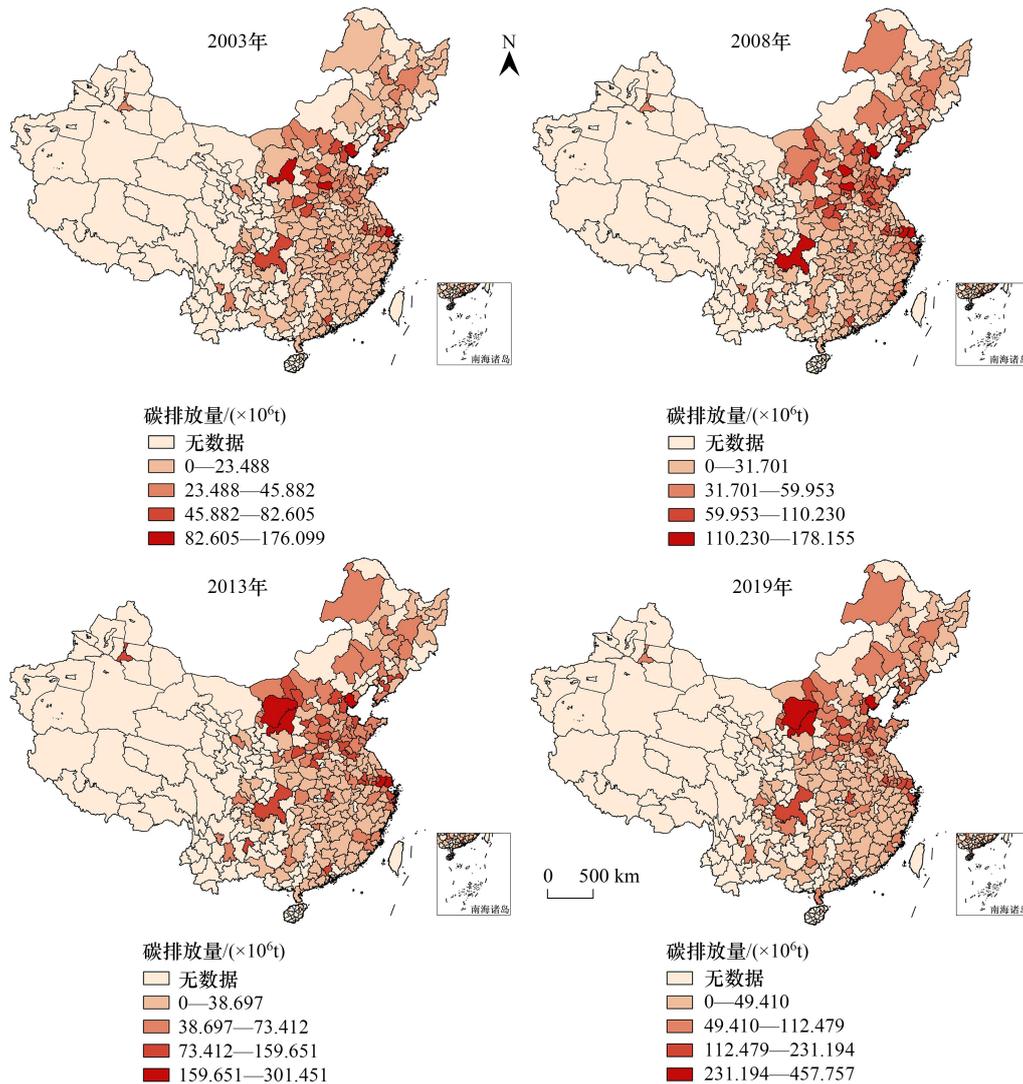


图 1 2003—2019 年中国城市碳排放量的空间演变趋势图

Fig.1 Spatial evolution trend of China's urban carbon emissions from 2003 to 2019

由图 2 可知,2003—2019 年中国城市的生态基础设施发展总体呈先下降,后上升的趋势。2003—2008 年,城市生态基础设施发展整体呈下降趋势,但在 2008—2019 年,生态基础设施发展水平又呈上升趋势。城市生态基础设施发展水平高位区始终分布在东部沿海地区,以及中部偏北城市,如内蒙古巴彦淖尔市、鄂尔多斯市,陕西榆林市等,均是人口密度较低的城市,以及中部省会,直辖市,如重庆市,湖北武汉市。

2.2 空间相关性检验

在进行空间计量检验前,先对数据进行空间相关性检验,常用的空间自相关检验一般采用 Moran's I 指数

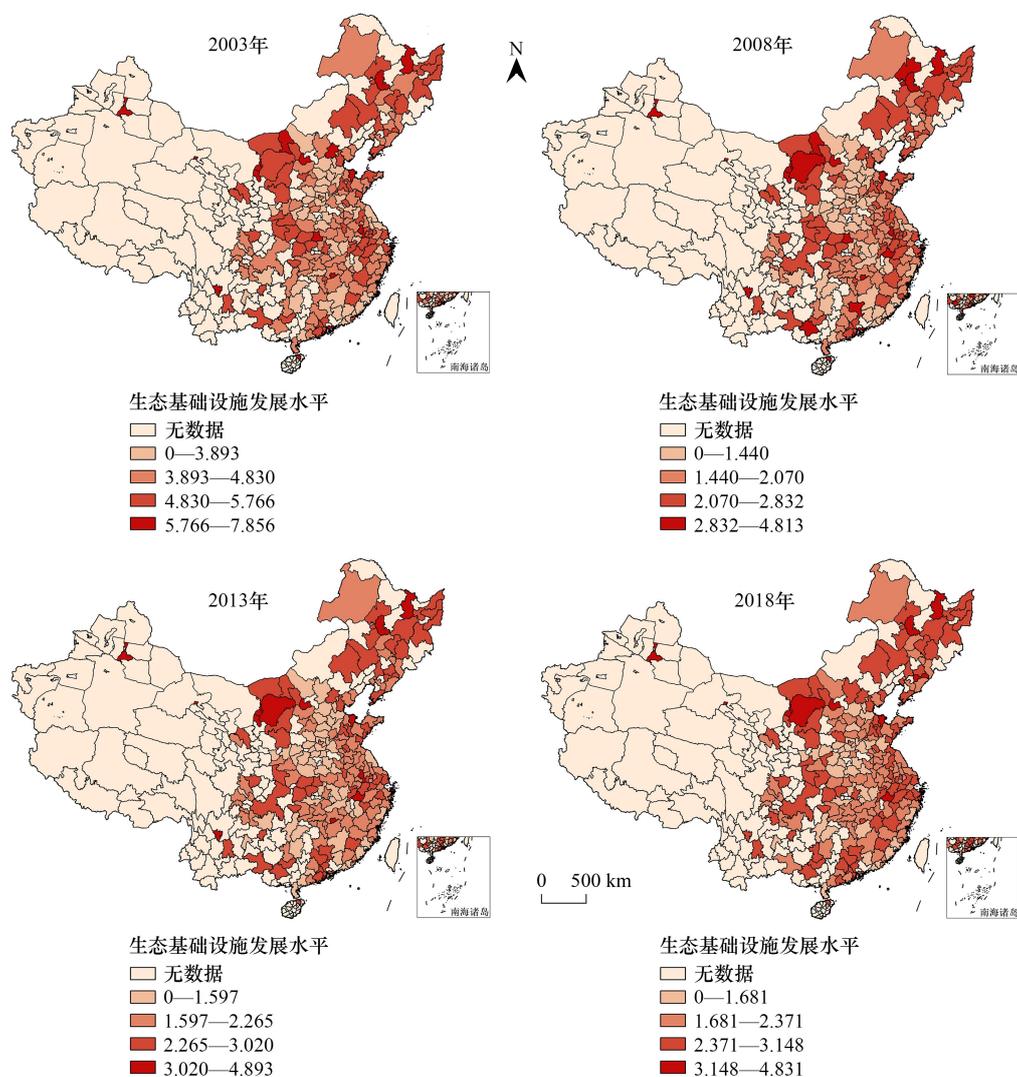


图 2 2003—2019 年中国城市生态基础设施发展水平的空间演变趋势图

Fig.2 Spatial evolution trend of China's urban ecological infrastructure development level from 2003 to 2019

进行计算^[30],由表 2 所示。进一步根据 Moran's I 指数散点图对地区间观测值进行刻画,由图 3 和图 4 所示。

表 2 2003—2019 年中国城市碳排放量和生态基础设施发展水平的全局 Moran 指数

Table 2 Global Moran index of China's urban carbon emissions and ecological infrastructure development level from 2003—2019

年份 Year	碳排放量 Carbon emissions	生态基础设施发展水平 Ecological infrastructure development level	年份 Year	碳排放量 Carbon emissions	生态基础设施发展水平 Ecological infrastructure development level
2003	0.031 ***	0.045 **	2012	0.050 ***	0.065 ***
2004	0.038 ***	0.051 ***	2013	0.047 ***	0.065 ***
2005	0.047 ***	0.054 ***	2014	0.051 ***	0.065 ***
2006	0.052 ***	0.054 ***	2015	0.045 ***	0.070 ***
2007	0.053 ***	0.056 ***	2016	0.051 ***	0.069 ***
2008	0.054 ***	0.057 ***	2017	0.045 ***	0.061 ***
2009	0.051 ***	0.059 ***	2018	0.040 ***	0.063 ***
2010	0.052 ***	0.063 ***	2019	0.039 ***	0.059 ***
2011	0.046 ***	0.064 ***			

*、**、*** 分别表示通过 10%、5% 和 1% 显著性水平检验

由表 2 可知,2003—2019 年城市碳排放量和城市生态基础设施的空间依赖随时间推移不断增强。由图 3 碳排放量的 Moran 指数散点图、图 4 生态基础设施发展水平的 Moran 指数散点图,我国城市碳排放量和生态基础设施发展的空间依赖性增强主要是因为样本向第一象限移动,并且均存在“高-高”聚集的现象,城市碳排放量和生态基础设施发展存在空间相关性。因此,在探究生态基础设施发展水平对碳排放量的影响时,应采用空间计量模型,以探究其溢出效应。

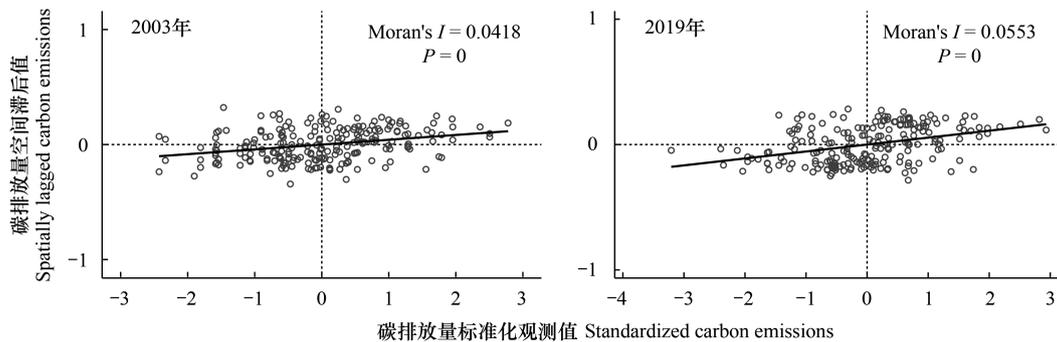


图 3 2003 年和 2019 年城市碳排放量的 Moran's I 指数散点图

Fig.3 Moran's I scatter plot of carbon emissions in 2003 and 2019

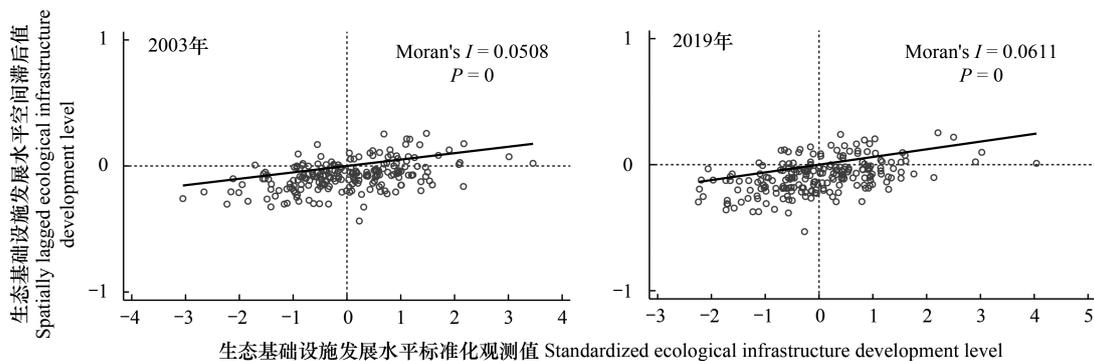


图 4 2003 年和 2019 年城市生态基础设施发展水平的 Moran's I 指数散点图

Fig.4 Moran's I scatter plot of ecological infrastructure development level in 2003 and 2019

3 城市生态基础设施对城市碳排放影响的实证研究

3.1 城市生态基础设施发展对城市碳排放量影响的空间计量研究

为选用最适合本文的空间计量模型,首先对空间计量模型进行拉格朗日乘数(LM)检验、豪斯曼(Hausman)检验、似然比(LR)检验和沃尔德(Wald)检验,检验结果如表 3 所示。LM 检验的统计量均在 1% 的水平上显著,均拒绝了空间滞后模型和空间误差模型的假设。其次,Hausman 检验显著,拒绝原假设,模型应使用固定效应模型。最后进行 LR 检验和 Wald 检验,LR 检验和 Wald 检验的统计量均在 1% 的水平上显著,也即空间滞后模型和空间误差模型均不能简化为空间杜宾模型。因此,本文最优的空间计量模型即为固定效应空间杜宾模型。

进一步使用固定效应的空间杜宾模型,检验城市生态基础设施发展水平对城市碳排放量的直接效应和空间溢出效应,并且控制了时间效应和固定效应。同时,为了保证空间杜宾模型结果的稳健,列出了空间滞后模型和空间误差模型的回归结果。回归结果如表 4 所示。

表 3 模型选取检验结果

Table 3 Results of model selection test

检验方法 Inspection methods	特征值 Eigen values	P 值 P statistic	检验方法 Inspection methods	特征值 Eigen values	P 值 P statistic
LM_Lag	22.97 ***	0.000	LR_Lag	67.53 ***	0.000
Robust LM_Lag	129.94 ***	0.000	LR_Error	67.46 ***	0.000
LM_Error	735.68 ***	0.000	Wald_Lag	67.08 ***	0.000
Robust LM_Error	842.65 ***	0.000	Wald_Error	64.95 ***	0.000
Hausman	35.37 ***	0.000			

*、**、*** 分别表示通过 10%、5% 和 1% 显著性水平检验; LM_Lag: 空间滞后模型的拉格朗日乘数检验 Lagrange Multiplier test for spatial lag model; Robust LM_Lag: 空间滞后模型的拉格朗日乘数稳健性检验 Robust Lagrange Multiplier test for spatial lag model; LM_Error: 空间误差模型的拉格朗日乘数检验 Lagrange Multiplier test for spatial error model; Robust LM_Error: 空间误差模型的拉格朗日乘数稳健性检验 Robust Lagrange Multiplier test for spatial error model; Hausman: 豪斯曼检验 Hausman test; LR_Lag: 空间滞后模型的似然比检验 Likelihood Ratio test for spatial lag model; LR_Error: 空间误差模型的似然比检验 Likelihood Ratio test for spatial error model; Wald_Lag: 空间滞后模型的沃尔德检验 Wald test for spatial lag model; Wald_Error: 空间误差模型的沃尔德检验 Wald test for spatial error model

表 4 城市生态基础设施发展水平对城市碳排放量的回归结果

Table 4 Regression results of urban ecological infrastructure development level on carbon emissions

变量 Variables	普通最小二乘法 OLS model	空间杜宾模型 Spatial Dubin Model	空间滞后模型 Spatial Lagged Model	空间误差模型 Spatial Error Model
EIDL	4.218 *** (1.227)	3.498 *** (1.173)	3.874 *** (1.175)	3.741 *** (1.178)
GDP	0.029 *** (0.002)	0.030 *** (0.002)	0.028 *** (0.002)	0.030 *** (0.002)
IND	7.911 *** (2.512)	1.990 (2.643)	-5.802 ** (2.413)	-4.414 * (2.515)
FDI	0.315 (0.353)	0.125 (0.366)	0.241 (0.338)	0.144 (0.350)
TEC	-1.216 ** (0.525)	0.222 (0.578)	-1.023 ** (0.503)	-0.798 (0.532)
W×EIDL		55.549 *** (17.773)		
W×GDP		-0.026 (0.018)		
W×IND		-121.052 *** (20.277)		
W×FDI		6.265 ** (2.562)		
W×TEC		-4.782 (3.555)		
ρ		0.526 *** (0.093)	0.674 *** (0.069)	
λ				0.682 *** (0.068)
σ^2		237.665 *** (5.584)	241.389 *** (5.677)	241.307 *** (5.676)
R^2	0.843	0.219	0.107	0.170
N	3638	3638	3638	3638

括号内为标准误; *、**、*** 分别表示通过 10%、5% 和 1% 显著性水平检验; OLS: 最小二乘法 Ordinary least squares; EIDL: 城市生态基础设施发展水平 Urban ecological infrastructure development level; GDP: 经济发展 Economic development; IND: 产业发展 Industrial development; FDI: 对外交流 External communication; TEC: 研发投入 R&D investment; W×EIDL: 城市生态基础设施发展水平的空间滞后项 Spatial lag term of urban ecological infrastructure development level; W×GDP: 经济发展的空间滞后项 Spatial lag term of economic development; W×IND: 产业发展的空间滞后项 Spatial lag term of industrial development; W×FDI: 对外交流的空间滞后项 Spatial lag term of external communication; W×TEC: 研发投入的空间滞后项 Spatial lag term of R&D investment; ρ : 空间自回归系数 Spatial autoregressive coefficient; λ : 空间误差项系数 Spatial error coefficient; σ^2 : 方差 Variance; R^2 : 拟合度 Coefficient of determination; N: 样本量 Number of samples

由表 4 可知,在 OLS 回归模型中同时控制了时间效应和个体效应,生态基础设施的回归系数为正且显著,生态基础设施仍处于促进碳排放的阶段,说明现阶段的城市生态基础设施水平仍较低,还未能达到不增加外部系统生态负担的地步^[4]。控制变量中,城市生产总值增速越快,城市第二产业占 GDP 的比重越高,城市碳排放越高,经济发展和城市工业的发展导致了城市碳排放量的增加。而研发投入与碳排放呈显著的负向关系,也即城市财政公共预算内科技支出的增加会降低其碳排放。

由空间杜宾模型,现阶段城市生态基础设施不仅促进了本地城市的碳排放,并且对邻地城市的碳排放也有显著的促进作用。这是因为现阶段城市生态基础设施发展水平还较低,仍在建设阶段,且作为改善民生的社会性基础设施,其建设过程中会消耗大量的水泥等材料,造成碳排放量的增加^[31]。并且空间滞后模型和空间误差模型均得出了类似的结论。从控制变量的溢出效应看,城市经济发展促进了本地城市的碳排放,但对邻地城市的碳排放影响不显著;此外,本地城市第二产业发展越好,会对邻地城市碳排放产生负溢出效应,产业发展存在集聚效应,邻地第二产业向本地城市集聚^[32];对外开放程度越高,区域间商品流动程度越高,显著增加了邻地的碳排放。

LeSage 和 Pace^[33] 建议用“直接效应”和“间接效应”来衡量解释变量对因变量的影响程度,故进一步给出空间杜宾模型的直接效应、间接效应与总效应以分析城市生态基础设施对城市碳排放的边际影响,见表 5。

表 5 城市生态基础设施发展水平对城市碳排放的空间效应分解估计

Table 5 Decomposition estimation of spatial effects of urban ecological infrastructure development level on carbon emissions

变量 Variables	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect
EIDL	4.011 *** (1.225)	125.404 *** (44.432)	129.415 *** (44.677)
GDP	0.030 *** (0.002)	-0.020 (0.038)	0.010 (0.038)
IND	1.269 (2.473)	-260.116 *** (60.800)	-258.847 *** (60.396)
FDI	0.171 (0.348)	14.026 ** (5.828)	14.197 ** (5.747)
TEC	0.193 (0.546)	-9.956 (7.916)	-9.763 (7.790)

由表 5 可知,城市生态基础设施的直接效应和间接效应系数分别为 4.011 和 125.404,且均在 1% 的水平上显著,进一步验证了城市生态基础设施对本地城市和邻地城市的碳排放均存在显著的促进作用,同时也说明现阶段生态基础设施发展水平仍较低。控制变量中,城市经济发展显著促进了本地城市的碳排放,但对邻地城市的碳排放没有显著作用;第二产业的集聚效应显著降低了邻地城市的碳排放,城市更高的对外开放程度显著促进了邻地的碳排放。

3.2 城市生态基础设施对城市碳排放直接效应的进一步研究

由前文表 4 和表 5,现阶段生态基础设施发展对城市碳排放量存在显著的促进作用。因此,进一步研究在生态基础设施发展至一定阶段后,是否能实现城市碳减排效果。构建方程如式(7)所示。

$$\text{carbon}_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \text{EIDL}_{it+n} + \alpha_2 \text{Controls}_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

式中, n 为后置期数($n \geq 0$),其他变量均不变。

生态基础设施的回归系数图及置信区间等如图 5 所示。1 期与 2 期的生态基础设施发展对当地城市碳排放有显著的促进效应;从 3 期至 11 期,生态基础设施发展对城市碳排放没有显著作用。当生态基础设施发展到 12 期时,生态基础设施具有显著的碳减排作用,这也论证了在前文基准回归结果中的分析,现阶段的城市生态基础设施发展仍处于较低水平,在发展了 12 期后,可起到碳减排的效果。

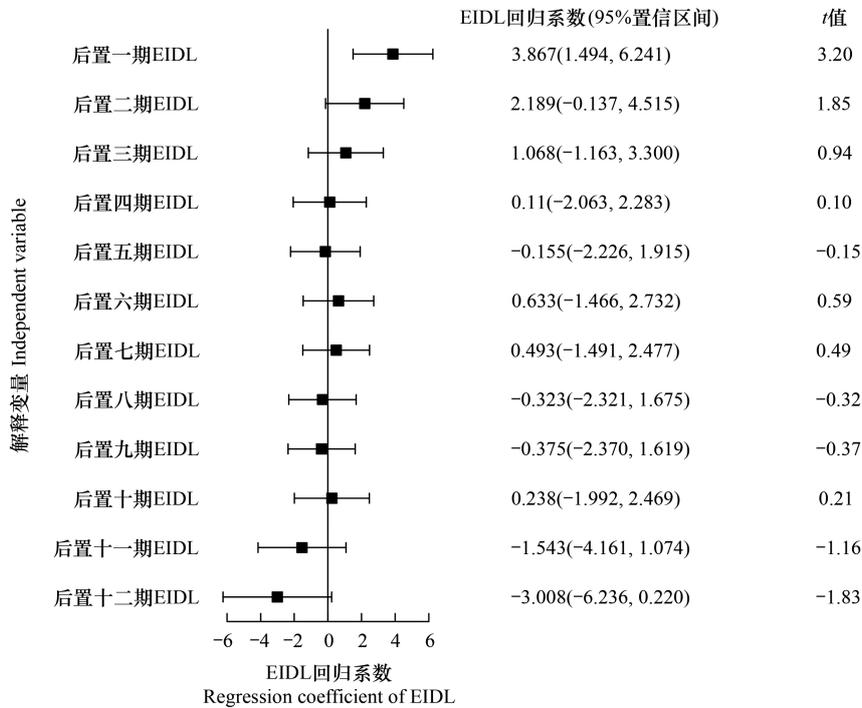


图5 城市生态基础设施发展水平回归系数森林图

Fig.5 Forest map of regression coefficient of urban ecological infrastructure development level

EIDL: 城市生态基础设施发展水平

3.3 稳健性检验

为验证本文结论的可靠性,通过如下方法进行稳健性检验,表6给出了稳健性检验的空间效应分解估计。一是考虑到城市行政级别影响生态基础设施对城市碳排放的效应,故剔除样本内北京、天津、上海和重庆等直辖市^[34]。其次,为了解决样本中异常值对结果的影响,对样本进行1%的缩尾处理。三是为避免空间权重矩阵选择偏误,更换空间权重矩阵为经济距离空间权重矩阵^[35],计算公式为 $W_{ij}^e = \frac{1}{|Y_i - Y_j|}$, (i ≠ j), 其中, \bar{Y}_i

和 \bar{Y}_j 分别表示城市 i 和 j 在样本期间的人均实际 GDP 平均值。

由表6,稳健性检验中生态基础设施的直接效应和间接效应均为正且显著,与基准回归一致,验证了结论的稳健。此外,在更换空间权重矩阵为经济距离空间权重矩阵后,生态基础设施的系数均存在下降,这表明城市间地理距离的远近影响了生态基础设施对城市碳排放的空间效应,本文在基准回归选用地理距离空间权重矩阵合理性较强。

3.4 异质性检验

3.4.1 地理位置

由于我国东中西部地区存在经济基础差异,在经济发达地区,其生态基础设施水平更高,碳排放也更高,在生态基础设施发展对城市碳排放的影响上也存在异质性。根据国家统计局对中国地区的划分,本文将研究样本分为东部城市、东北部城市、中部城市和西部城市,分别用空间杜宾模型进行检验,结果如表7所示。

由表7可知,东北部地区模型的ρ系数不显著,说明东北部城市碳排放对周边地区的空间溢出作用不明显。在空间效应分解中,东部地区和中部地区的生态基础设施对本地的碳排放和邻地的碳排放均没有显著的影响,而西部地区城市生态基础设施显著促进了当地的碳排放,降低了邻地碳排放。这是因为西部地区生态基础设施发展水平相较于其他地区更低。

表 6 城市生态基础设施发展对城市碳排放量影响的稳健性检验

Table 6 Robustness test of the impact of urban ecological infrastructure development level on carbon emissions

变量 Variables	地理距离空间权重矩阵 Geographic distance weight matrix						经济距离空间权重矩阵 Economic distance weight matrix		
	去掉直辖市 Exclude municipalities			1%缩尾处理 Winsorized at the 1st percentiles			全样本 Full sample		
	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect
EIDL	2.291 *	194.018 ***	196.309 ***	2.743 ***	88.237 ***	90.980 ***	3.585 ***	8.779 *	12.363 **
	(1.80)	(3.51)	(3.53)	(3.00)	(2.83)	(2.90)	(2.95)	(1.78)	(2.35)
GDP	-60.584 ***	-156.774	-217.358	0.027 ***	0.014	0.041	0.029 ***	0.003	0.032 ***
	(-6.78)	(-0.90)	(-1.25)	(14.58)	(0.46)	(1.35)	(14.13)	(0.66)	(6.14)
IND	0.995	-225.077 ***	-224.081 ***	-4.214 **	-171.077 ***	-175.291 ***	0.300	-32.405 ***	-32.105 ***
	(0.39)	(-3.55)	(-3.56)	(-2.23)	(-4.25)	(-4.39)	(0.12)	(-4.52)	(-4.51)
FDI	0.286	14.530 **	14.816 **	-0.606 **	12.444 ***	11.838 ***	0.485	1.049	1.534
	(0.80)	(2.30)	(2.37)	(-2.25)	(2.85)	(2.75)	(1.40)	(1.02)	(1.50)
TEC	1.329 **	0.854	2.184	0.900 **	-10.907 *	-10.007 *	-0.051	-5.577 ***	-5.627 ***
	(2.39)	(0.11)	(0.30)	(2.11)	(-1.81)	(-1.69)	(-0.10)	(-3.39)	(-3.51)

表 7 城市生态基础设施发展对城市碳排放量影响的地区异质性检验

Table 7 Regional heterogeneity test of the impact of ecological infrastructure development level on carbon emissions

变量 Variables	地区 Regions			
	东部 East	东北部 Northeast	中部 Centre	西部 West
EIDL	-1.770	-0.779	-0.351	11.170 ***
	(1.641)	(2.525)	(1.124)	(4.212)
控制变量 Control variables	是	是	是	是
W×EIDL	-1.267	-0.854	-0.396	-14.374 ***
	(2.034)	(2.798)	(1.362)	(4.900)
W×控制变量 W×Control variables	是	是	是	是
ρ	0.190 *	0.041	0.205 *	0.482 ***
	(0.110)	(0.133)	(0.118)	(0.095)
σ^2	243.229 ***	96.752 ***	56.993 ***	645.612 ***
	(9.576)	(7.303)	(2.427)	(35.451)
R^2	0.322	0.299	0.350	0.249
N	1377	374	1173	714
直接效应 Direct effect				
EIDL	-1.720	-0.688	-0.313	11.024 ***
	(1.678)	(2.587)	(1.148)	(4.264)
控制变量 Control variables	是	是	是	是
间接效应 Indirect effect				
EIDL	-2.124	-1.048	-0.623	-17.560 ***
	(2.220)	(2.820)	(1.512)	(6.733)
控制变量 Control variables	是	是	是	是
总效应 Total effect				
EIDL	-3.844 **	-1.736	-0.936	-6.537
	(1.580)	(1.536)	(1.083)	(5.639)
控制变量 Control variables	是	是	是	是

3.4.2 行政级别

由于不同行政级别的城市在经济发展、基础设施建设、产业结构等均存在显著差异^[34],城市生态基础设施对碳排放的影响也存在异质性。因此,根据城市是否为省会城市和直辖市,将研究样本分为中心城市和非中心城市,中心城市即为省会城市和直辖市,非中心城市为其他城市。回归结果如表 8 所示。

表 8 城市生态基础设施发展对城市碳排放量影响的行政级别异质性检验

Table 8 Administrative heterogeneity test of the impact of ecological infrastructure development level on carbon emissions

变量 Variables	行政级别 Administrative level		变量 Variables	行政级别 Administrative level	
	中心城市 Central cities	非中心城市 Non-central cities		中心城市 Central cities	非中心城市 Non-central cities
EIDL	-2.559 (2.932)	2.466* (1.293)	直接效应 Direct effect EIDL	0.503 (2.890)	3.415** (1.370)
控制变量 Control variables	是	是	控制变量 Control variables	是	是
W×EIDL	-62.670*** (23.309)	105.139*** (18.055)	间接效应 Indirect effect EIDL	-23.799*** (9.218)	216.659*** (53.764)
W×控制变量 W×Control variables	是	是	控制变量 Control variables	是	是
ρ	-1.730*** (0.219)	0.495*** (0.099)	总效应 Total effect EIDL	-23.296** (9.347)	220.074*** (54.124)
σ^2	125.504*** (8.526)	257.095*** (6.497)	控制变量 Control variables	是	是
R^2	0.432	0.208			
N	493	3145			

由表 8,城市碳排放的空间溢出效应均存在,中心城市生态基础设施对本地碳排放影响不显著,但显著降低了邻地城市碳排放,并且对城市碳排放的总效应显著为负,这表明中心城市生态基础设施发展水平较高。而非中心城市生态基础设施发展水平较低,并且仍处于提高本地和邻地城市碳排放的阶段,总效应也为正。

3.4.3 资源禀赋

由于城市之间存在资源禀赋差异,资源型城市的发展主要依赖资源开采和加工^[34],相对于非资源型城市,其碳排放量相对较高。为探究生态基础设施对资源型城市和非资源型城市的碳排放量的异质性影响,参考国务院印发的《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》,将本文的样本分为资源型城市和非资源型城市,并进行回归,结果如表 9 所示。

表 9 的回归结果显示,非资源型城市的碳排放不存在空间溢出效应。资源型城市的生态基础设施显著提高了本地城市和邻地城市的碳排放,同时也说明了资源型城市的生态基础设施发展水平相对较低。

4 结论

本文选用 2003—2019 年中国 214 个地级市作为研究样本,在构建城市生态基础设施发展水平指标的基础上,评估城市生态基础设施对城市碳排放量的影响及其溢出效应。研究发现,城市碳排放和生态基础设施均存在显著的空间自相关性,城市生态基础设施发展显著促进了本地城市和邻地城市的碳排放,说明现阶段城市生态基础设施发展水平仍较低,可能仍处于建设阶段,并且该结论通过了稳健性检验。此外,当生态基础设施发展至 12 期时,其碳减排作用显著。城市经济发展会促进本地城市的碳排放,城市第二产业的发展通过产业集聚效应显著降低了邻地城市的碳排放,城市更高的对外开放水平通过加速区域间的贸易流动,促进了邻地城市的碳排放。从异质性分析看,西部地区城市、非中心城市和资源型城市的生态基础设施发展水平相对与其他城市,处于较低的水平。

为此,本文提出了如下政策建议:一是全力推进加快本地生态基础设施建设,加快城市绿化覆盖面积、垃

圾废水处理等生态基础设施建设,加大生态基础设施投资,缩短城市生态基础设施建设时间,尽快使城市生态基础设施发展至较高的水平,发挥其为居民提供综合生态服务,且不增加生态系统负担的作用,实现碳减排。二是加快第二产业的转型发展,尽管第二产业的发展推动了邻地城市的碳减排,但其碳排放总效应仍为正,为降低碳排放总量,应推动产业结构高级化。三是不同城市,尤其是西部地区城市、非直辖市和非省会城市、以及资源型城市应针对自身城市不同的实际情况,因地制宜,有针对性地实施生态基础设施建设。

表 9 城市生态基础设施发展对城市碳排放量影响的资源禀赋异质性检验

Table 9 Endowment heterogeneity test of the impact of ecological infrastructure development level on carbon emissions

变量 Variables	资源禀赋 Endowments	
	资源型城市 Resource-based city	非资源型城市 Non-resource-based city
EIDL	10.727 *** (3.005)	0.186 (0.969)
控制变量 Control variables	是	是
W×EIDL	87.749 *** (31.130)	49.610 *** (12.311)
W×控制变量 W×Control variables	是	是
ρ	0.398 *** (0.111)	-0.083 (0.145)
σ^2	477.783 *** (18.737)	108.956 *** (3.193)
R^2	0.135	0.101
N	1309	2329
直接效应 Direct effect		
EIDL	12.195 *** (3.255)	0.164 (0.997)
控制变量 Control variables	是	是
间接效应 Indirect effect		
EIDL	157.439 *** (58.481)	46.744 *** (11.958)
控制变量 Control variables	是	是
总效应 Total effect		
EIDL	169.634 *** (59.802)	46.909 *** (12.082)
控制变量 Control variables	是	是

参考文献 (References):

- [1] Ramaswami A, Russell A G, Culligan P J, Sharma K R, Kumar E. Meta-principles for developing smart, sustainable, and healthy cities. *Science*, 2016, 352(6288): 940-943.
- [2] Liu Y J, Zhang J, Qin Y. How global warming alters future maize yield and water use efficiency in China. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 160: 120229.
- [3] Lee G, Hong I. Measuring spatial accessibility in the context of spatial disparity between demand and supply of urban park service. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 119: 85-90.
- [4] Li F, Wang R S, Huisingh D. Call for papers for a special volume of the *Journal of Cleaner Production* on urban ecological infrastructure for healthier cities: governance, management and engineering. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 83: 1-4.
- [5] 廖振珍, 杨萌, 尚晓琪, 石龙宇. 城市小尺度生态基础设施的设计方法——以雄安新区启动区为例. *生态学报*, 2021, 41(17): 7037-7048.

- [6] Doyle M W, Havlick D G. Infrastructure and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 2009, 34: 349-373.
- [7] Bryant M M. Urban landscape conservation and the role of ecological greenways at local and metropolitan scales. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 76(1/2/3/4): 23-44.
- [8] 徐翀崎, 李锋, 韩宝龙. 城市生态基础设施管理研究进展. *生态学报*, 2016, 36(11): 3146-3155.
- [9] Rasmussen L V, Fold N, Olesen R S, Shackleton S. Socio-economic outcomes of ecological infrastructure investments. *Ecosystem Services*, 2021, 47: 101242.
- [10] 石龙宇, 郑巧雅, 廖振珍. 雄安新区生态基础设施建设与城市发展协同度评价. *生态学报*, 2022, 42(12): 4968-4977.
- [11] Tempelhoff J W N, Jaka H, Mahabir S, Ginster M, Kruger A, Mthembu N, Nkomo L. The Anthropocene and the hydrosphere: a case study of sanitation governance in Emfuleni Local Municipality (2018-19). *CuDyWat Report*, 2019, No. 2/2019.
- [12] Meissner R. eThekweni's green and ecological infrastructure policy landscape: research paradigms, theories and epistocrats. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 2022, 22(3): 543-560.
- [13] 韩林桅, 张森, 石龙宇. 生态基础设施的定义、内涵及其服务能力研究进展. *生态学报*, 2019, 39(19): 7311-7321.
- [14] Matthews T, Lo A Y, Byrne J A. Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 138: 155-163.
- [15] 李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望. *生态学报*, 2014, 34(1): 190-200.
- [16] Wang J X, Banzhaf E. Towards a better understanding of Green Infrastructure: a critical review. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 758-772.
- [17] Zhou Q. Linking ecological infrastructure and tourism development through environmental governance: evidence from cities of China. *Environment, Development and Sustainability*, 2022: 1-23.
- [18] Rebelo A J, Holden P B, Esler K, New M G. Benefits of water-related ecological infrastructure investments to support sustainable land-use: a review of evidence from critically water-stressed catchments in South Africa. *Royal Society Open Science*, 2021, 8(4): 201402.
- [19] Coskun-Hepcan C, Hepcan S. Assessing ecosystem services of Bornova's greeninfrastructure, Izmir (Turkey). *Fresenius Environmental Bulletin*, 2018, 27(5A): 3530-3541.
- [20] Wang W X, Deng X Z, Wang Y F, Peng L, Yu Z Y. Impacts of infrastructure construction on ecosystem services in new-type urbanization area of North China Plain. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 185: 106376.
- [21] Gómez-Villarino M T, Gómez Villarino M, Ruiz-García L. Implementation of urban green infrastructures in peri-urban areas: a case study of climate change mitigation in Madrid. *Agronomy*, 2021, 11(1): 31.
- [22] Shan Y L, Guan Y R, Hang Y, Zheng H R, Li Y X, Guan D B, Li J S, Zhou Y, Li L, Hubacek K. City-level emission peak and drivers in China. *Science Bulletin*, 2022, 67(18): 1910-1920.
- [23] 林乐芬, 杨倩文. 绿色基础设施投资降低了碳排放吗. *现代经济探讨*, 2022(12): 29-37.
- [24] Sun X, Liu X S, Li F, Tao Y, Song Y S. Comprehensive evaluation of different scale cities' sustainable development for economy, society, and ecological infrastructure in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: S329-S337.
- [25] 韦彦汀, 李思佳, 张华. 成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4807-4816.
- [26] 韩峰, 谢锐. 生产性服务业集聚降低碳排放了吗? ——对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析. *数量经济技术经济研究*, 2017, 34(3): 40-58.
- [27] Lee L F. Consistency and efficiency of least squares estimation for mixed regressive, spatial autoregressive models. *Econometric Theory*, 2002, 18(2): 252-277.
- [28] Elhorst J P. Specification and estimation of spatial panel data models. *International Regional Science Review*, 2003, 26(3): 244-268.
- [29] LeSage J, Pace R K. *Introduction to spatial econometrics* (1st ed.). Chapman and Hall/CRC, 2009.
- [30] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [31] 宋金昭, 张雯雯. 基础设施投资对区域碳排放的影响研究. *中国物价*, 2023(4): 21-25.
- [32] 苗建军, 华潮, 丰俊超. 产业协同集聚的升级效应与碳排放——基于空间计量模型的实证分析. *生态经济*, 2020, 36(2): 28-33.
- [33] LeSage J P, Pace R K. Spatial econometric modeling of origin-destination flows. *Journal of Regional Science*, 2008, 48(5): 941-967.
- [34] 赫国胜, 燕佳妮. 数字金融对城市经济韧性的影响——基于空间计量模型的实证分析. *经济问题探索*, 2023(3): 97-110.
- [35] 朱泳丽, 丁利杰. 长三角城市群碳排放强度的空间效应及影响因素——基于产业转移视角. *资源科学*, 2022, 44(7): 1373-1387.