

“双碳”目标下高铁开通影响城市碳排放的机制及效果

徐超¹, 徐振宇²

(1.华东师范大学 经济学院, 上海 200062; 2.南京审计大学 统计与数据科学学院, 南京 211815)

摘要:进入新世纪以来,中国大规模投资建设高速铁路,“八纵八横”高铁网络基本形成。文章分析高铁开通对城市碳排放的影响及其可能的影响机制,并采用2003—2015年中国283个地级及以上城市的面板数据,将高铁开通视为“准自然实验”,构建渐进DID模型和空间渐进DID模型进行回归分析。研究发现:高铁开通可以降低城市碳排放,且该作用是通过产业结构优化、经济集聚程度等机制产生的。高铁开通不仅会降低该城市的碳排放,还通过空间技术外溢降低邻近城市的碳排放。高铁开通对城市碳排放的影响与城市的地理位置和规模有关。

关键词:高铁开通;碳排放;空间溢出效应;碳达峰;碳中和;渐进DID模型;空间渐进DID模型

[中图分类号]F061.5 [文献标识码]A [文章编号]1672-934X(2023)01-0117-14

DOI:10.16573/j.cnki.1672-934x.2023.01.013

Mechanisms and Effects of the Influence of Opening High-speed Railway on Urban Carbon Emission under the Goal of "Carbon Peaking and Carbon Neutrality"

Xu Chao¹, Xu Zhenyu²

(1.School of Economics, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2.School of Statistics and Data Science, Nanjing Audit University, Nanjing, Jiangsu 211815, China;)

Abstract: Since the beginning of the new century, China has invested massively in the construction of high-speed railways, forming a basic "eight vertical and eight horizontal" high-speed railway networks. By analyzing the impact of opening high-speed railway on urban carbon emission and its possible impact mechanism, this paper regards high-speed railway opening as a "quasi natural experiment" with panel data of 283 cities at prefecture-level and above in China from 2003 to 2015 to construct a progressive DID model and a spatial progressive DID model for regression analysis. According to the results, the opening of high-speed railway can reduce urban carbon emission, which are generated through mechanisms such as industrial structure optimization and economic agglomeration. It reduces the carbon emission not only in the cities, but also in neighboring cities through spatial spillover. And the above effects are related to the geographical location and scale of cities.

Key words: high-speed railway opening; carbon emission; spatial spillover effect; carbon peak; carbon neutrality; progressive DID model; spatial progressive DID model

收稿日期:2022-11-21

基金项目:国家社会科学基金一般项目(20BJY062)

作者简介:徐超(1996—),男,博士研究生,研究方向为产业经济学;

徐振宇(1977—),男,博士,教授,主要从事产业经济、流通经济研究。

一、引言

随着工业化进程的加快,以公路、铁路(包括高速铁路,以下简称高铁)和航空运输为枢纽的现代都市快速兴起。高铁是铁路史上最重要的交通设施之一。中国既是高铁建设的“后来者”,也是高铁建设的“居上者”。近年来,中国持续加快包括高速公路、机场和高铁在内的交通基础设施建设,形成了沿交通干线分布的各类城市与城市群,加快了要素流动与人口产业集聚,实现了交通设施改良、人口产业集聚与城市发展间的正反馈^[1]。改革开放以来,以高能耗和高排放为代价,中国经济实现了持续快速增长。来自环境科学的研究证据表明,二氧化碳的大量排放导致的温室效应,会对人类赖以生存的环境造成严重破坏^[2-3]。根据 BP 世界能源统计,2020 年中国二氧化碳排放量已占全球 30.93%。作为世界第二大经济体,中国长期不遗余力支持碳减排相关工作,落实具体目标^[4]。2021 年 2 月,国务院在印发的《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》中指出,建立健全绿色低碳循环发展的经济体系,确保实现碳达峰、碳中和目标,推动我国绿色发展迈上新台阶^[5]。如何践行国家发展和低碳经济的并行之路,是当前中国需要直面的严峻问题^[6]。

高铁的开通具有明显的经济效应,它进一步巩固了中心地区与周边地区的联系,使中心地区对周边地区的优质要素产生很强的吸引力,加快了要素集聚,有利于该地区的经济发展。但对于非中心地区而言,情况可能有所不同,落后地区由于经济发展基础不佳^[7],生产要素出现流失现象,导致“马太陷阱”,故有学者认为高铁的开通显著扩大了地区间的经济差距^[8]。

高铁的开通也具有明显的环境影响。在高铁建成之初,它就有着“绿色交通”的美称^[9-10]。这是因为,高铁替代了一部分高速公路和航空交通,从而减少了环境污染^[11]。研究发现,城市高铁开通具有显著降低城市雾霾污染的作用,且在东中部地区这种减霾效应会更加显

著^[12];已开通高铁城市的 PM_{2.5} 值比未开通高铁城市更低,表明高铁开通改善了城市的环境^[13];高铁开通提高了居民对健康生活环境的要求,使得城市中污染型企业的数量明显减少,从而减少了环境污染^[14]。另外,高铁开通降低了城市的工业碳排放,而且主要是通过影响产业结构升级使得城市工业碳排放量变得更低^[15],对提高城市绿色全要素生产率^[16]、城市绿色发展效率^[17]都有显著的促进作用,但这种促进作用要随着时间的推移才能越来越明显。

作为中国碳排放的主要载体,城市碳排放是不可忽视的关键一环^[18],从城市层面落实碳减排指标是碳达峰、碳中和的优先选择^[19],对未来减排工作也具有很强的指导意义^[20]。研究发现,通过减少公共交通的能源浪费^[21]、提高工厂企业的能源利用效率^[22]、改善生态环境^[23],都能有效推进碳减排工作的落实。在实践中,政府减排政策的实施应充分考虑城市碳排放的阶段差异性^[24],即不同阶段实施不同的针对性政策,充分发挥重点城市群、都市圈在碳减排中的先导作用。

现有文献已在高铁开通与城市碳排放两方面做了不少工作,但仍有亟需完善之处:一是很少有专门研究高铁开通对城市碳排放影响的文献。已有关于高铁开通环境效应的研究,主要立足于环境相关变量的分析,如绿色全要素生产率、城市绿色效率和城市生态效率等,还有对工业碳排放的研究。二是尚未对高铁开通影响城市碳排放的机制进行深入分析。已有文献对高铁开通环境效应有比较细致的分析,对其影响机制也进行了研究,但仍缺乏比较系统的分析。因此,本文力图在以下方面有所贡献:其一,选择问题有新意。本文以全国 283 个地级及以上城市为样本,将高铁开通与“双碳”目标结合,专门研究高铁开通对城市碳排放的影响,问题的选择比较新颖。其二,机制分析与经验研究相结合,使问题研究更深入可靠。本文从产业结构、经济集聚与人口集聚等方面,对高铁开通影响城市碳排放的机制进行了分析与检

验,还通过构建渐进 DID 模型和空间渐进 DID 模型,深入探讨高铁开通对邻近城市碳排放产生的影响,从而更加全面、更加深入地分析高铁开通对城市碳排放的影响。

二、理论分析和研究假设

(一)高铁开通对城市碳排放影响的理论分析

高铁开通对城市碳排放影响的直接效应。相比其他交通工具,高铁具有行驶速度快、运输效率高、乘坐环境舒适等优点,有利于显著增强城市间的各种联系,当城市间劳动力要素开始频繁流动时,高铁逐渐成为很多人的出行首选。从交通能耗看,以单位公里为标准,高铁的能耗仅为汽车的 40%,飞机的 35%^[25]。高铁开通后,人们增加了一种更优的出行选择,通过替代机动车辆和飞机,可以有效减少尾气排放和能源消耗,从而显著助力碳减排。

高铁开通对城市碳排放影响的间接效应。参考克鲁格曼的“中心—外围”模型^[26],要素究竟是否向中心区域集聚,在很大程度上取决于要素的流动性与市场覆盖面积大小等。首先,高铁开通会影响产业结构,尤其是对中心城市服务业集聚有显著的促进作用^[27-28],而服务业集聚也会拉动当地制造业集聚,通过正外部性共同提升生产效率,从而降低城市碳排放。其次,高铁开通使得人才、知识和技术的跨区域流动更加便利,沿线城市的大型企业、事业机关和科研机构可以借此更好地实现人才流动、知识互鉴和技术交流^[29],上述交互活动会助力城市的创新发展,从而降低城市碳排放。再次,高铁开通会促进城市经济发展、扩大城市经济规模,不平衡不协调的经济结构也将逐步趋于合理化,从而带动产业结构优化,最终降低城市碳排放。最后,伴随着城市经济发展水平的提高,居民收入也会随之提高,居民会更加关心其生活质量^[30],政府也将更加重视居民对环境质量的关切,更加严格落实环保措施,从而降低城市碳排放。

综上,本文提出假说 H1:高铁开通有助于减少城市碳排放。

(二)产业结构优化机制

高铁开通与产业结构优化之间的关系。高铁开通使得不同要素在空间格局上的固有关系发生变化,进而使得城市产业结构发生明显变化^[31]。高铁开通会使各种要素更快流入中心城市,自然而然提高了这些要素的利用率。由于供需关系发生变化,要素最初的相对价格以及投入比例也会随之变动,因而对各种生产要素的边际生产率产生影响。整体上看,要素在不同产业之间更快地交易或流动,优化了相关资源的有效配置,从而引起了产业结构的变化和调整^[32]。高铁开通不仅改变了要素的流通方式,也通过提供客运服务(即载客),输送着劳动力以及劳动力本身所携带的知识与技术,为中心区域的城市带去了更多的劳动力、更系统的知识和更先进的技术,为城市快速发展服务业提供了基础与便利。显然,相比第二产业,高铁开通更有利于第三产业的发展,尤其是对知识密集型和技术密集型的高端服务业有直接的影响,第三产业占比会逐渐升高,相应地第二产业占比会逐渐下降。不过,对第二产业占比下降这点,有文献从其他角度进行了分析,认为高铁开通一方面有利于城市的经济增长,另一方面也造成了房屋租金和物价水平的提高,一些制造业企业又对这些因素较为敏感,导致整个第二产业占比下降。总的来说,高铁开通降低第二产业占比,促进了城市产业结构的调整。

产业结构与城市碳排放之间的关系。一方面,因为大部分高能耗部门都属于第二产业范畴,这些部门在生产过程中会引起大量的二氧化碳排放。另一方面,因为在当前的工业化进程中,第二产业的布局不够合理,发展模式还属于低产高投及高污染,这些都会引起城市大量的碳排放。总之,产业结构的调整,特别是第二产业占比下降是降低城市碳排放的有效路径,这不仅关乎产业的发展,同时还影响着人们的生活环境^[33]。

本文从第二产业占比下降的角度提出假说 H2:高铁开通可以通过优化产业结构去降低城市碳排放。

(三)集聚机制一:经济集聚程度提高

高铁开通与经济集聚程度提高之间的关系。高铁的开通,极大地缩短了从外围城市到达中心城市的时间,减少了跨区域合作的时间成本,强化了中心城市与外围城市之间的经济联系,有利于人才集聚、信息交流和吸引企业前来投资。具体可以从企业与个人两个方面进行分析:其一,从企业角度来说,高铁的开通加强了企业间联系,使其能够以更快的速度、更合适的报价找到供应商,节约了时间成本,同时扩大了企业和员工互相选择的范围,有利于提高企业和员工之间的适配性,从而提高企业的生产率,鉴于以上原因,一些企业在选址时会优先选择已开通高铁的城市。其二,从个人角度来说,高铁作为优质公共品,在缩短通勤时间的同时,也会优化人们的差旅体验,还能扩大在中心城市求学、就业等方面的优势。高铁开通还使得人们洽谈业务和沟通学习更加便利,有利于信息交流和知识创新。因此,从整体上讲,高铁开通能够使得城市的经济集聚程度上升^[34]。

经济集聚与城市碳排放之间的关系。一方面,高铁开通会使经济主体在空间层面上产生集聚,这是发挥范围经济效应的先决条件。具体而言,城市内的经济集聚会提高原材料、基础设施和相关服务的利用率,降低了由于资源分配失衡、信息交流受阻等引起的浪费,从而减少城市碳排放。另一方面,经济集聚与环境规制程度在一定范围内呈现明显的正相关关系。当城市的经济集聚程度不高时,该城市的企业呈散点状分布,导致监管不仅难度大而且成本高,很难控制企业的碳排放。当城市的经济集聚程度较高时,该城市的企业会呈现集聚的分布状态,不仅便于宣传环境规制政策,也有利于监管部门统一管理,减少监管成本^[35]。另外,标准化的环境管理也会催生更严格的环境政策,使经济集聚可以通过环境规制来减少城市碳排放。

综上所述,经济集聚程度的提升有利于降低城市碳排放。

本文提出假说 H3:高铁开通可以通过提高经济集聚程度去降低城市碳排放。

(四)集聚机制二:影响人口集聚

从高铁开通影响人口外流角度看,高铁开通让人口流动更加便捷自由,使得人们出行更为方便,也使得人们外出务工具有更多的可能性。人们会沿着高铁沿线城市寻求工作,这将会改变人口的分布情况,降低城市中心人口的拥挤程度^[36]。从高铁开通与人口集聚的角度看,高铁开通让大城市更加成为人们集聚的中心,大城市的医疗、教育以及各种休闲设施都会吸引人口聚集。人口集聚是一个比较复杂的问题,而且城市间人口的外流与集聚几乎是同时进行的,所以,从理论上分析,这两种方式同时起作用,究竟谁占主导地位,需通过进一步的实证检验。另外,不同的城市,高铁开通对人口集聚的影响可能并不相同,这也有待进一步实证检验。

人口集聚与城市碳排放的关系。人口集聚有利于基础设施的共享,避免造成其闲置与浪费,进而引发规模经济效应,在充分利用资源的同时发挥集聚的优点,从而降低城市的碳排放。相反,人口外流不仅会使设施出现共享不便甚至是浪费,还使得资源分散,无法利用集聚经济的优势,造成城市的碳排放增加^[37]。如果从人口过度集中在市区角度考虑,日常生活可能会产生更多的碳排放。目前,国内外学者对这方面进行了分析,发现人口过度集中于市区带来的“增排”影响远远不及人口集聚带来的“减排”影响^[38-39]。

本文提出假说 H4:高铁开通可以通过影响人口集聚去影响城市碳排放。

三、计量模型选择、变量测度与数据来源

(一)基准计量模型的选择

本文将高铁开通视作一项“准自然实验”,类似于政策实施,通过对比已开通高铁城市与

未开通高铁城市之间的差异,来研究高铁开通对城市碳排放的实际影响。在本文中,区分已开通高铁的城市与未开通高铁的城市,将已开通高铁的城市视为处理组,将未开通高铁的城市视为对照组,进行反事实分析,其中处理组的反事实数据便是用对照组的数据代替,故实际的反事实则形成了较为合适的对照组。DID 估计方法主要是用来评价某一事件或者某个政策的影响,但是当事件发生或政策实施的时间点不一致、不能“一刀切”处理时,就需要使用渐进 DID 估计方法。由于各个城市开通高铁的时间点不一致,故基准回归使用渐进 DID 估计方法^[40],具体的渐进 DID 模型如下:

$$Lnco_{it} = \beta railway_{it} + \tau popp_{it} + \epsilon Ln podenp_{it} + \theta gdpp_{it} + \vartheta gdpp_{it}^2 + \mu fin_{it} + \rho road_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \epsilon_{it} \quad (1)$$

其中, $Lnco_{it}$ 表示城市 i 第 t 年的碳排放水平, $railway_{it}$ 为虚拟变量,如果城市 i 第 t 年开通了高铁,则取值为 1,否则取值为 0。 $popp_{it}$ 表示城市 i 第 t 年的年末总人口, $Ln podenp_{it}$ 表示城市 i 第 t 年人口密度的自然对数, $gdpp_{it}$ 表示城市 i 第 t 年的人均地区生产总值, $gdpp_{it}^2$ 表示其二次项, fin_{it} 表示城市 i 第 t 年的地方财政预算内支出, $road_{it}$ 表示城市 i 第 t 年的人均铺装道路面积。 β 、 τ 、 ϵ 、 θ 、 ϑ 、 μ 、 ρ 为待估计系数, α_i 表示城市固定效应, γ_t 表示时

间固定效应, ϵ_{it} 为随机干扰项。

(二)变量选取与指标测度

首先,选择城市二氧化碳总排放量的自然对数($Lnco$)作为被解释变量。其次,以作为研究对象的某城市当年是否开通高铁($railway$)作为标准,当年已开通高铁的城市取值为 1,否则取 0。需要特别注意的是,鉴于高铁给城市带来的影响存在一定时滞性,而部分城市高铁开通时间在下半年甚至靠近年底,故以每年的 7 月 1 日为界线,如果高铁在该日期前开通,则视为当年开通,如果在该日期之后开通,则视为次年开通。再次,参考已有研究^[6],用第二产业占地区生产总值的比例来表示产业结构($prop$),用城市建设用地占市区面积比重来衡量经济集聚($urcons$),用市区人口占全市人口比重的自然对数来衡量人口集聚($Ln crow$)。最后,综合已有相关文献,选取以下控制变量:(1)人口规模($popp$)用市区年末总人口表示;(2)人口密度($podenp$)是市区常住人口占市区土地面积的比重;(3)经济发展水平($gdpp$)用市区人均地区生产总值表示,并且引入其二次项($gdpp^2$),试图深入研究人均地区生产总值与碳排放之间的关系;(4)财政支出(fin)是市区地方财政预算内支出;(5)人均铺装道路面积($road$)用市区道路铺装面积与市区总人口比例表示。所有变量的描述性统计结果如表 1 所示。

表 1 所有变量的描述性统计

名称	变量	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
二氧化碳总排放量(百万吨)	<i>co</i>	3 679	23.990	22.476	1.529	230.712
高铁开通(开通取 1,否则取 0)	<i>railway</i>	3 679	0.241	0.428	0.000	1.000
人口规模(百万人)	<i>popp</i>	3 679	1.380	1.819	0.141	28.094
人口密度(人/平方公里)	<i>podenp</i>	3 679	981.708	983.342	13.000	14 052.410
经济发展水平(万元)	<i>gdpp</i>	3 679	4.155	3.377	0.153	46.775
财政支出(百亿元)	<i>fin</i>	3 679	1.929	3.615	0.033	61.916
人均铺装道路面积(平方米/人)	<i>road</i>	3 679	10.046	7.484	0.020	108.370
产业结构(%)	<i>prop</i>	3 679	50.566	12.436	8.050	90.970
经济集聚(%)	<i>urcons</i>	3 679	8.525	9.806	0.020	97.180
人口集聚(%)	<i>crow</i>	3 679	34.564	23.992	3.410	100.000

(三)数据来源说明

高铁是否开通的数据源于国家铁路局网站,城市层面的数据源于 2004—2016 年的《中国城市统计年鉴》,二氧化碳总排放量数据源于 2004—2016 年的《中国能源统计年鉴》。本文研究对象为 2003—2015 年中国 283 个地级及以上城市,考虑到数据的缺失问题,主动剔除了拉萨、巢湖、海东和普洱等地级及以上城市。

四、实证分析

(一)高铁开通对城市碳排放影响的基准实证结果及其分析

以城市二氧化碳排放作为被解释变量,高铁开通作为核心解释变量,通过渐进 DID 估计方法实证高铁开通对城市碳排放的影响,具体结果如表 2 所示。

表 2 高铁开通对城市碳排放影响的基准实证结果

	<i>Lnco</i>
<i>railway</i>	-0.020 3* (0.011 3)
<i>pop</i>	0.002 7 (0.002 1)
<i>Lnpopden</i>	0.016 9 (0.015 9)
<i>gdp</i>	0.009 9** (0.004 9)
<i>gdp²</i>	-0.000 3*** (0.002 2)
<i>fin</i>	-0.009 4*** (0.002 2)
<i>road</i>	0.003 5* (0.002 1)
<i>_cons</i>	2.147 4*** (0.103 6)
<i>N</i>	3 679
<i>R²</i>	0.918 1
城市固定效应	Yes
时间固定效应	Yes

注:*,**和***分别表示 10%、5% 和 1% 显著性水平,括号内为稳健标准误。下同。

从表 2 结果可以看出,*railway* 的估计系数在 10% 的水平上显著为负,这表示相比未开通高铁城市,已开通高铁城市的碳排放量出现了明显的下降。这直接验证了假说 H1 的合理性,即高铁开通有助于减少城市碳排放。

pop 的估计系数为正但不显著,说明人口规模对城市碳排放并没有太大影响,这可能是仅仅从人口角度分析,未能引入属于城市的其他特性,故与城市碳排放的因果关系不显著。*Lnpopden* 的估计系数也不显著,说明人口密度并不能影响城市的碳排放。*fin* 的估计结果在 1% 的水平上显著为负,表明随着地方政府财政支出的增加,会降低城市碳排放,这可能是因为地方政府出资引进的高技术产业和建造的绿地公园等基础设施,都会起到净化环境、减少碳排放的作用。*road* 的估计系数在 10% 的水平上显著为正,说明人均铺装道路面积的增加会促进城市碳排放,可能是因为人均铺装道路面积在一定程度上反映了人口拥挤程度,随着人口越来越拥挤,城市碳排放会增加。

gdp 的估计系数显著为正,而二次项 *gdp²* 的估计系数显著为负,这是计量经济学上一个非常经典的结果,即经济发展水平与城市碳排放之间的关系呈现倒“U”型。也就是说,最开始随着经济发展水平的提高,城市碳排放会逐渐增加,但当经济发展水平达到某个值时,城市碳排放达到最高峰,随着经济发展水平的继续增加,城市碳排放反而会逐渐下降。其可能的主要原因是:刚开始,城市经济发展需要以高排放、高污染为代价,随着城市经济的进一步发展,排放与污染呈现缓慢增长趋势,并且逐渐到达峰值,而随着城市经济的继续发展,环保意识的加强、清洁技术的提高和对美好环境的渴望,城市宁愿选择较慢的经济发展模式来降低排放,而中国众多城市近二十年的发展史无疑为这一点提供了很好的证据。

(二)高铁开通对城市碳排放影响的稳健性检验结果

本文从平行趋势检验及动态效果识别、安慰剂检验和剔除节点城市样本角度,就高铁开通对城市碳排放的影响进行稳健性检验。

1. 平行趋势检验及动态效果识别

渐进 DID 估计方法使用的前提是需要通过平行趋势检验。为检验平行趋势假设是否成立,采用反事实方法。首先,将高铁开通的时间提前 5 年,检验平行趋势假设;其次,在模型(1)中加入高铁开通的滞后项,考察高铁开通对城市碳排放的动态效果。具体模型如下:

$$\begin{aligned} Lnco_{it} = & \sum_{w=1}^5 \beta_{-w} railway_{i,t-w} + \beta railway_{it} \\ & + \sum_{w=1}^4 \beta_{+w} railway_{i,t+w} + \tau pop_{it} + \epsilon Ln poden p_{it} \\ & + \theta gdpp_{it} + \vartheta gdpp_{it}^2 + \mu fin_{it} + \rho road_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \epsilon_{it} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, β_{-w} 表示处理之前的影响,本文选择了 5 期; β_{+w} 表示处理之后的影响,本文选择了 4 期,其余变量含义与模型(1)一致。以当年为基期进行平行趋势检验,得到结果如图 1 所示。

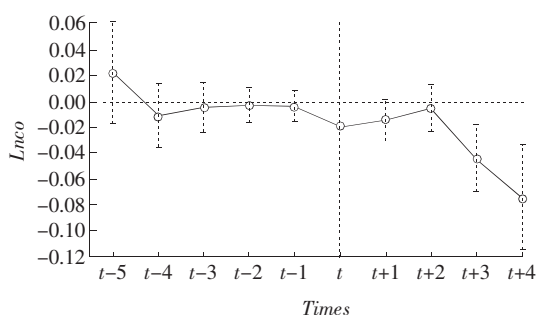


图 1 平行趋势检验

分析图 1 结果后发现,高铁开通前的核心解释变量估计系数均未通过显著性检验,处理效应的系数位于 0 值附近,表明两个小组不存在明显差异,平行趋势检验通过;而高铁开通后,除前两年系数不显著外,之后的处理效应均通过显著性检验且系数显著为负,说明高铁开

通能够减少城市碳排放,但是这个影响存在两年滞后,且其动态效果是随开通时间而变化。

2. 安慰剂检验

在基准研究的样本期内,很可能存在其他与高铁开通无关的外生因素对城市碳排放产生影响,为了识别是否存在外生因素的影响,本文利用 500 次独立重复实验进行安慰剂检验。结果如图 2 所示。

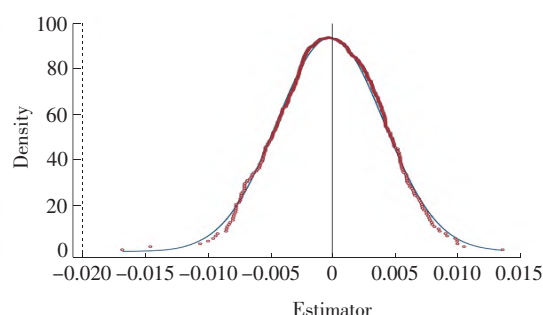


图 2 安慰剂检验

由图 2 估计系数的分布可知,基于随机样本得到的估计系数均值在 0 附近,且服从正态分布,表明基准估计结果不太可能是偶然得到的,说明高铁的碳减排效应并不是由于常规性的随机因素和不可观测因素导致的。

3. 剔除节点城市样本

运用渐进 DID 模型时,需要确保处理组和对照组具有较强的可比性,故将高铁刚刚开通那一年的城市(即节点城市)数据剔除,整合成新的样本数据,重新对模型(1)进行实证,得到的结果如表 3 所示。

从表 3 结果可以看出, $railway$ 的估计系数仍为负,且在 5% 的显著性水平上通过了检验,这表示,相比未开通高铁的城市,已开通高铁城市的碳排放量出现了明显下降,而且该估计系数的数值与表 1 的结果几乎一致,说明基准回归结果是稳健的。 $gdpp$ 的估计系数还是显著为正,二次项 $gdpp^2$ 的估计系数还是显著为负,说明经济发展水平与城市碳排放之间的关系呈现倒“U”型,这也与基准回归结果一样。

总的来说,剔除节点城市样本数据后的实证结果,无论是估计系数的显著性还是正负性,

都与基准回归结果保持高度一致,说明基准回归是稳健的。

表 3 剔除节点城市样本后的稳健性检验结果

	<i>Lncro</i>
<i>railway</i>	-0.025 0** (0.011 9)
<i>poppp</i>	0.002 8 (0.002 1)
<i>Lnpodenp</i>	0.014 9 (0.016 9)
<i>gdpp</i>	0.008 9* (0.005 0)
<i>gdpp²</i>	-0.000 3** (0.000 1)
<i>fin</i>	-0.009 2*** (0.002 2)
<i>road</i>	0.003 6* (0.002 1)
<i>_cons</i>	2.162 0*** (0.110 0)
<i>N</i>	3 369
<i>R²</i>	0.921 1
城市固定效应	Yes
时间固定效应	Yes

(三)高铁开通对城市碳排放影响机制的实证检验

中介效应源于心理学,随后被引入管理学,近两年在经济学中被用来进行机制分析。中介效应模型本是一种定量分析影响机制的方法,但诸多学者认为这种方法存在内生性问题,而且会将研究重点模糊化,产生很多不必要且难以解决的问题^[41],故本文不采用中介效应模型而是使用传统的经济学分析方法进行机制检验,具体模型建构如下:

$$prop_{it} = \beta railway_{it} + \tau poppp_{it} + \epsilon Ln podenp_{it} + \theta gdpp_{it} + \vartheta gdpp_{it}^2 + \mu fin_{it} + \rho road_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \epsilon_{it} \quad (3)$$

$$urcons_{it} = \beta railway_{it} + \tau poppp_{it} + \epsilon Ln podenp_{it} + \theta gdpp_{it} + \vartheta gdpp_{it}^2 + \mu fin_{it} + \rho$$

$$road_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \epsilon_{it} \quad (4)$$

$$Lncrow_{it} = \beta railway_{it} + \tau poppp_{it} + \epsilon Ln podenp_{it} + \theta gdpp_{it} + \vartheta gdpp_{it}^2 + \mu fin_{it} + \rho road_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \epsilon_{it} \quad (5)$$

其中, *prop_{it}* 表示城市 *i* 第 *t* 年的产业结构(即用第二产业占地区生产总值的比例), *urcons_{it}* 表示城市 *i* 第 *t* 年的经济聚集(即用城市建设用地占市区面积比重), *Lncrow_{it}* 表示城市 *i* 第 *t* 年的人口聚集(即用市区人口占全市人口比重的自然对数)。其余变量含义均与模型(1)相同。

模型(2)一(4)仍旧以高铁开通作为核心解释变量,控制变量保持不变,只是被解释变量换为第二产业占地区生产总值的比例、城市建设用地占市区面积比重和市区人口占全市人口比重的自然对数,分别代表产业结构、经济集聚和人口集聚三种机制。使用渐进 DID 估计方法得到的回归结果如表 4 所示。

表 4 高铁开通对城市碳排放影响机制的实证检验结果

	(1)	(2)	(3)
	<i>prop</i>	<i>urcons</i>	<i>Lncrow</i>
<i>railway</i>	-1.955 0*** (0.604 0)	0.698 2** (0.323 9)	-0.031 0* (0.016 3)
<i>poppp</i>	-0.035 3 (0.109 3)	-0.250 9 (0.161 2)	0.078 4** (0.035 2)
<i>Ln podenp</i>	-0.365 5 (0.871 0)	13.167 7*** (1.726 5)	-0.225 7*** (0.062 8)
<i>gdpp</i>	0.861 5** (0.335 8)	0.151 3 (0.148 8)	-0.005 7 (0.005 9)
<i>gdpp²</i>	-0.027 0** (0.011 4)	-0.005 0 (0.003 7)	0.000 2 (0.000 2)
<i>fin</i>	-0.283 2*** (0.080 0)	0.183 1*** (0.063 7)	-0.004 1 (0.003 1)
<i>road</i>	-0.054 1 (0.039 7)	0.123 6** (0.057 7)	-0.003 9*** (0.001 5)
<i>_cons</i>	51.024 4*** (5.844 8)	-79.250 0*** (11.251 0)	4.667 2*** (0.419 8)
<i>N</i>	3 679	3 679	3 679
<i>R²</i>	0.128 9	0.344 0	0.196 5
城市固定效应	Yes	Yes	Yes
时间固定效应	Yes	Yes	Yes

分析表 4 列(1)结果后发现, *railway* 的估计系数在 1% 水平上显著为负, 这表示高铁开通会显著降低城市第二产业占比, 从而降低城市碳排放, 这直接验证了假说 H2, 即高铁开通可以通过优化产业结构去降低城市碳排放。而优化产业结构会降低城市碳排放的可能原因是: 第二产业是碳排放的主要来源, 这在理论分析部分进行过详细的经济学论证。 *fin* 的估计参数也在 1% 的水平上显著为负, 说明随着地方财政支出的提高, 也会降低第二产业占比, 从而降低城市的碳排放。

表 4 列(2)显示, *railway* 的估计系数在 5% 的水平上显著为正, 意味着高铁开通会显著提高城市的经济集聚程度, 从而降低碳排放, 这直接验证了假说 H3, 即高铁开通可以通过提高经济集聚程度去降低城市碳排放。经济集聚会充分发挥范围经济的优势, 提高相关服务的利用率, 减少由于资源分配不均衡、信息交流不顺畅等造成的浪费, 从而降低单位产值所需的资源, 并且经济集聚还利于提高环境规制, 这些都说明经济集聚会降低城市碳排放。 *Lnpopdenp* 的估计参数也在 1% 的水平上显著为正, 说明人口密度越高, 经济集聚程度越高, 从而降低城市碳排放。 *fin* 的估计参数同样在 1% 的水平上显著为正, 说明财政支出的提高也会增加城市经济集聚程度, 从而降低城市碳排放。

观察表 4 列(3)后发现, *railway* 的估计系数在 10% 的水平上显著为负, 这表示高铁开通会显著降低城市人口集聚程度, 从而增加城市碳排放, 这也验证了假说 H4, 高铁开通可以通过影响人口集聚去影响城市碳排放。只不过高铁开通通过人口集聚这条路径会使城市碳排放增加, 但这并不妨碍进行经济学分析, 高铁的开通既会带来人口的集聚, 同时也会带来人员的外流, 在向心力与离心力的相互作用下, 实证检验表明, 最终离心力获胜, 即高铁开通可以显著

降低城市人口集聚程度, 而随着人口集聚的下降, 集聚经济的优势得不到体现, 资源更加分散, 导致城市碳排放增加。对 *pop* 来说, 其估计系数在 5% 的水平上显著为正, 说明人口规模的增加, 会显著提高城市人口集聚, 进而降低城市碳排放。而 *road* 的估计系数在 1% 的水平上显著为负, 说明人均铺装道路面积的增加会降低人口集聚程度, 进而增加城市碳排放。

表 4 结果显示, 优化产业结构机制、提高经济集聚程度机制、影响城市人口集聚机制均显著, 而优化产业结构和提高经济集聚程度这两条路径都会降低城市碳排放, 而影响人口集聚这条路径反而会增加城市碳排放。这三条路径的共同作用并不影响整体回归结果, 即高铁开通使城市碳排放降低, 也说明人口集聚带来的碳排放增加程度不如另外两条路径带来的碳排放降低程度。

五、进一步分析

(一)空间技术外溢分析

根据前文理论分析, 高铁开通会引起城市空间格局的变化, 且对沿线城市的影响更大, 这些变化也会影响城市碳排放, 所以有必要从空间角度分析高铁开通对城市碳排放的影响。此时, 空间计量是不可或缺的方法, 当既要引入空间计量方法又要顾及渐进 DID 的政策效应时, 结合渐进 DID 的空间滞后解释变量模型(即 SLX-DID 模型)便是最优方法。

1. 空间权重矩阵

本文构建了地理距离空间权重矩阵(W_d)来反映 283 个地级及以上城市之间的空间相关性。该矩阵以距离平方的倒数为权重, 矩阵中的元素可表示为:

$$W_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^2}, i \neq j; W_{ij} = 0, i = j \quad (6)$$

其中, d_{ij} 是使用城市经纬度数据计算得到的城市间距离。

2. 结合渐进 DID 的空间滞后解释变量模型 (SLX-DID)

$$\begin{aligned} Lnco_{it} = & \alpha + \beta_1 railway_{it} + \beta_2 popp_{it} + \beta_3 \\ & Ln podenp_{it} + \beta_4 gdp_{it} + \beta_5 gdp_{it}^2 + \beta_6 fin_{it} \\ & + \beta_7 road_{it} + \lambda_1 \sum_{j \neq i, j=1}^N w_{ij} railway_{jt} + \lambda_2 \sum_{j \neq i, j=1}^N w_{ij} \\ & popp_{jt} + \lambda_3 \sum_{j \neq i, j=1}^N w_{ij} Ln podenp_{jt} + \lambda_4 \sum_{j \neq i, j=1}^N w_{ij} \\ & gdp_{jt} + \lambda_5 \sum_{j \neq i, j=1}^N w_{ij} gdp_{jt}^2 + \lambda_6 \sum_{j \neq i, j=1}^N w_{ij} fin_{jt} \\ & + \lambda_7 \sum_{j \neq i, j=1}^N w_{ij} road_{jt} + v_t + \sigma_i + \varepsilon_{it} \quad (7) \end{aligned}$$

其中, W_{ij} 为空间权重矩阵, $\beta_1 - \beta_7$ 和 $\lambda_1 - \lambda_7$ 为高铁开通、人口密度等变量及其空间滞后项的估计系数, v_t 为不随空间个体而变的时间特定效应, σ_i 为不随时间而变的个体特定效应, ε_{it} 为随机干扰项。

3. 回归结果与分析

为考虑空间层面的影响,本文引入的空间滞后解释变量模型(SLX),是不同于空间杜宾模型(SDM),这种模型的优势在于能够结合面板数据进行计量分析,能结合渐进 DID 模型形成新的空间渐进 DID 模型(SLX-DID)。空间渐进 DID 模型既考虑了空间的要素,又结合了政策的特点。本文以城市二氧化碳排放作为被解释变量,高铁开通作为核心解释变量,将控制变量分两组进行回归,得到的实证结果如表 5 所示。

从表 5 结果可以看出,高铁开通的直接效应与间接效应均在 5% 的水平上显著为负,这表明本城市高铁开通不仅会降低该城市碳排放,还会通过空间技术外溢效应降低邻近城市的碳排放。这进一步验证假说 H1 和基准回归结果的同时,还拓宽了视野,即高铁开通对邻近城市的碳排放也会有降低效果。而且,在直接效应里, gdp 和二次项 gdp^2 分别在 1% 的水平上显著为正和负,再次核对了基准回归结果,说明倒“U”型图像依旧成立。另外, $popp$ 与

$Ln podenp$ 的间接效应皆显著为正,说明本城市的高铁开通也会促进邻近城市的人口规模和人口密度的增长,进而增加邻近城市的碳排放。

表 5 高铁开通对城市碳排放影响的实证结果

	SLX-DID
	<i>Lnco</i>
<i>railway</i>	-0.013 9** (0.006 0)
<i>popp</i>	-0.003 3 (0.002 1)
<i>Ln podenp</i>	0.008 4 (0.006 9)
<i>gdp</i>	0.007 2*** (0.002 2)
<i>gdp²</i>	-0.000 2*** (0.000 1)
<i>fin</i>	-0.007 4*** (0.000 8)
<i>road</i>	0.003 9*** (0.000 4)
$W * railway$	-0.126 1** (0.051 8)
$W * popp$	0.014 9* (0.007 7)
$W * Ln podenp$	1.017 0*** (0.090 7)
$W * gdp$	0.001 6 (0.002 7)
$W * gdp^2$	-0.088 9*** (0.014 8)
$W * fin$	-0.014 1 (0.014 5)
$W * road$	-0.005 3*** (0.002 0)
<i>_cons</i>	-6.412 2*** (0.706 3)
<i>N</i>	3 679
<i>R²</i>	0.919 1
城市固定效应	Yes
时间固定效应	Yes

(二) 异质性分析

前文是针对总体大样本进行的研究,实际上,城市群内部是有异质性的,所以,本文将从两个维度对 283 个地级及以上城市进行分类:一个是基于区域层面分为东部城市、中部城市、西部城市;另一个是按照城市规模分为超大城市、特大城市、大城市、中等城市、小城市。两种分类方法各有特点,都有必要进行分析。从东部城市、中部城市、西部城市角度进行分析,是由于我国高铁开通最早是在东部城市,直到现在,东部城市、中部城市拥有的高铁站仍是西部城市不能比拟的。从城市规模角度进行分析,是因为高铁开通给大城市与中小城市带来的影响应该是有区别的,二者的经济体量、地理位置和发展水平等方面完全不同。

1.城市区域层面

在本文中,东部城市、中部城市、西部城市的划分,是参照 2003 年公布的《中国统计年鉴》标准。东部地级及以上城市有北京市、天津市、上海市以及河北省、山东省等省份下辖的地级及以上城市。中部地级及以上城市有山西省、河南省、安徽省等省份下辖的地级及以上城市。西部地级及以上城市有重庆市、陕西省、四川省、西藏自治区等省份及自治区下辖的地级及以上城市。仍旧以城市二氧化碳排放作为被解释变量,高铁开通作为核心解释变量,结合甄选出的其他控制变量,运用渐进 DID 估计方法,得到的实证结果如表 6 所示。

表 6 列(1)结果显示,东部城市 *railway* 的估计系数在 10%的水平上显著为负,说明东部城市有着更高的经济水平,它们的经济发展已走向可持续发展,东部城市的高铁开通会显著降低城市碳排放。观察 *gdp* 和二次项 *gdp*² 的估计系数,仍保持 1%水平上的一正一负,说明倒“U”型图像依然成立。分析表 6 列(2)和列(3)结果后发现,在中部城市和西部城市,*railway* 的估计系数并不显著,说明中部城市与西部城市的高铁开通并不能很好地降低城市碳排放,这验证了高铁开通对城市碳排放的影

响具有区域异质性。

表 6 异质性检验结果:城市区域层面

	(1)	(2)	(3)
	东部城市	中部城市	西部城市
	<i>Lnco</i>	<i>Lnco</i>	<i>Lnco</i>
<i>railway</i>	-0.016 2*	-0.005 6	-0.016 0
	(0.009 7)	(0.007 7)	(0.016 6)
<i>pop</i>	0.000 4	0.002 3	-0.025 4*
	(0.004 4)	(0.002 3)	(0.013 3)
<i>Lnpodenp</i>	-0.015 9	-0.026 4**	-0.003 1
	(0.010 7)	(0.011 3)	(0.029 5)
<i>gdp</i>	0.012 1***	0.000 7	0.006 1
	(0.003 7)	(0.005 8)	(0.006 0)
<i>gdp</i> ²	-0.000 3***	0.000 1	-0.000 2
	(0.000 1)	(0.000 3)	(0.000 2)
<i>fin</i>	-0.010 8***	0.008 4***	-0.003 8
	(0.000 9)	(0.003 2)	(0.003 0)
<i>road</i>	-0.000 5	0.004 5***	0.007 5***
	(0.000 7)	(0.000 9)	(0.000 9)
<i>_cons</i>	2.763 1***	2.397 2***	1.859 0***
	(0.075 1)	(0.077 1)	(0.178 3)
<i>N</i>	1 313	1 300	1 066
<i>R</i> ²	0.941 2	0.967 1	0.926 3
城市固定效应	Yes	Yes	Yes
时间固定效应	Yes	Yes	Yes

综上,高铁开通对城市碳排放的降低作用在东部城市表现最为突出,而在中部城市与西部城市则没有明显的降低效果,这说明在全国层面降低碳排放的效果主要是东部城市贡献的。其中的原因是东部城市高铁开通的规模大小和时间长短都超过中部以及西部城市,在前面稳健性检验中也看到了高铁开通的动态效果。另外,本文的样本数据是 2003—2015 年,而中西部城市的高铁是最近几年才大规模建设,所以高铁开通对城市碳排放的降低作用在东部城市表现得更加强烈。不难推断,随着数据年限的延长,中部城市乃至西部城市高铁开通的碳减排效应也会逐渐显著。

2.城市规模层面

本文城市规模的划分是参照国务院于 2014 年 10 月 29 日发布的《关于调整城市规模划分标准的通知》,将城市划分为五类:城区常住人口 50 万以下的城市为小城市,50 万以上 100 万以下的城市为中等城市,100 万以上 500 万以下的城市为大城市,500 万以上 1 000 万以

下的城市为特大城市,1 000 万以上的城市为超大城市。仍旧以城市二氧化碳排放作为被解释变量,高铁开通作为核心解释变量,结合甄选出的其他控制变量,运用渐进 DID 估计方法,得到的实证结果如表 7 所示。

表 7 异质性检验结果:城市规模层面

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	超大城市	特大城市	大城市	中等城市	小城市
	<i>Lnco</i>	<i>Lnco</i>	<i>Lnco</i>	<i>Lnco</i>	<i>Lnco</i>
<i>railway</i>	-0.051 3** (0.019 1)	-0.034 9 (0.032 5)	0.002 7 (0.013 6)	-0.002 7 (0.018 5)	-0.091 0*** (0.033 1)
<i>pop</i>	0.046 4** (0.017 6)	0.010 7 (0.012 6)	0.018 5 (0.017 7)	0.239 2** (0.096 2)	0.745 3 (0.509 2)
<i>Lnpopden</i>	0.210 7** (0.061 5)	-0.028 4 (0.045 1)	-0.026 5 (0.019 5)	0.118 1*** (0.031 1)	0.001 9 (0.037 5)
<i>gdpp</i>	-0.045 2* (0.019 4)	0.011 5 (0.010 4)	0.010 8* (0.006 3)	0.016 0* (0.009 3)	-0.017 1 (0.018 9)
<i>gdpp</i> ²	-0.000 1 (0.000 1)	-0.000 8*** (0.000 2)	-0.000 3** (0.000 2)	-0.000 5* (0.000 3)	0.000 6 (0.000 6)
<i>fin</i>	-0.005 7 (0.006 5)	0.000 9 (0.002 6)	-0.005 5 (0.001 2)	0.028 8* (0.015 3)	0.040 0 (0.041 1)
<i>road</i>	-0.000 9 (0.003 0)	0.005 8 (0.004 9)	0.000 5 (0.001 2)	0.000 8 (0.002 4)	0.004 3 (0.003 1)
<i>_cons</i>	2.397 2*** (0.640 0)	3.557 9*** (0.388 5)	2.660 7*** (0.145 9)	1.190 4*** (0.219 6)	1.529 4*** (0.290 7)
<i>N</i>	44	96	1 464	1 377	698
<i>R</i> ²	0.967 6	0.983 7	0.929 4	0.925 8	0.910 7
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

由表 7 列(1)结果可知,超大城市高铁开通的估计系数在 5% 的水平上显著为负,说明在超大城市,高铁开通能够很好地降低碳排放。而由表 7 列(2)至列(4)结果可知,特大城市、大城市和中等城市的高铁开通并不是很显著,说明在特大城市、大城市和中等城市的高铁开通未能显著降低其碳排放。分析表 7 列(5)结果后发现,小城市高铁开通在 1% 的水平上显著为负,说明在小城市,高铁开通也能显著减少碳

排放。对比表 7 列(1)和列(5)高铁开通估计系数与基准回归结果的绝对值后发现,前者的绝对值都比基准回归要大。也就是说,在超大城市和小城市,高铁开通对减少城市碳排放的力度要比全国平均力度要大,表明高铁开通的减排效果主要体现在超大城市和小城市。

因为超大城市一直就拥有更多的人才、更为先进的技术和更吸引人的生活方式,高铁开通后,这些优势更加突出,从而降低城市碳排

放。而对小城市来说,本来人就不多,高铁的开通,人员流失更加严重,在没有多少工业污染的小城市,随着人员流失会带来生产活动的减少,进而出现明显的碳排放降低。

六、结论与政策建议

经过持续投资建设,中国“八纵八横”高铁网络基本形成,高铁在对经济发展产生显著促进作用的同时,对产业结构、经济集聚和人口集聚的影响也不容忽视,这将对城市碳排放产生复杂的影响。本文将高铁开通作为“准自然实验”,采用2003—2015年中国283个地级及以上城市的面板数据,聚焦高铁开通与城市碳排放之间的关系进行理论与实证分析。通过理论与实证检验发现:第一,高铁开通确实会降低城市碳排放,而且人均地区生产总值与城市碳排放之间存在显著的倒“U”型关系。第二,高铁开通会通过产业结构优化去降低城市碳排放,也会通过提高城市经济集聚程度去降低碳排放,但通过降低人口集聚却增加了城市碳排放。第三,高铁开通不仅能降低本城市的碳排放,还会通过空间技术外溢显著降低邻近城市的碳排放。第四,在东部城市的高铁开通会显著降低城市碳排放,而在中部与西部城市的碳排放降低效果并不显著。第五,在超大城市和小城市,高铁开通会显著降低城市碳排放,但在特大城市、大城市和中等城市,这种降低碳排放的效果却并不显著。

根据研究结论,提出如下政策建议:第一,在考虑财务可持续前提下合理推进高铁网络建设。高铁建设的区域布局可以进一步优化,可考虑在经济发达地区和东部地区加密高铁网络,确保这些地区更多小城市有更高水平的可达性。第二,充分发挥高铁开通对产业结构、经济集聚及人口集聚的影响,促进城市碳排放稳步下降。高铁沿线城市应借助区位优势,促进现代信息技术与服务业有机融合,加快服务业的发展,优化产业结构;持续优化城市基础设施建设与营商环境,促进人口集聚,促进资源集约与产

业集聚集群发展。第三,充分发挥高铁开通对降低城市碳排放的空间外溢效应,落实以点带面方针,与周边城市协同推进城市绿色发展。

参考文献

- [1] 戴翔,沈佳倩,占丽.扩大服务业开放与制造业全要素生产率提升[J].长沙理工大学学报(社会科学版),2022(5):36-48.
- [2] 陈诗一.节能减排与中国工业的双赢发展:2009—2049[J].经济研究,2010(3):129-143.
- [3] 陈诗一.中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释[J].世界经济,2011(4):124-143.
- [4] 彭水军,张文城,孙传旺.中国生产侧和消费侧碳排放量测算及影响因素研究[J].经济研究,2015(1):168-182.
- [5] 申萌,李凯杰,曲如晓.技术进步、经济增长与二氧化碳排放:理论和经验研究[J].世界经济,2012(7):83-100.
- [6] 孙鹏博,葛力铭.通向低碳之路:高铁开通对工业碳排放的影响[J].世界经济,2021(10):201-224.
- [7] 颜银根,倪鹏飞,刘学良.高铁开通、地区特定要素与边缘地区的发展[J].中国工业经济,2020(8):118-136.
- [8] 卞元超,吴利华,白俊红.高铁开通、要素流动与区域经济差距[J].财贸经济,2018(6):147-161.
- [9] Zheng L F, Feng J. Ghost town or city of hope? the spatial spillover effects of high-speed railway stations in China[J]. Transport Policy, 2019, 81(07):230-241.
- [10] Wang Y P, Xu Z Y. The scale boundary of urbanized population with peaking PM 2.5 concentration: a spatial panel econometric analysis of China's prefecture-level and above cities [J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2021, 65(01):126-149.
- [11] Chai J, Zhou Y H, Zhou X Y, et al. Analysis on shock effect of China's high-speed railway on aviation transport[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2021, 108(02):35-44.
- [12] 罗能生,田梦迪,杨钧,等.高铁网络对城市生态效率的影响:基于中国277个地级市的空间计量研究[J].中国人口·资源与环境,2019(11):1-10.
- [13] 王锋,吴丽华,杨超.中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J].经济研究,2010(2):123-136.
- [14] 蔡宏波,钟超,韩金铭.交通基础设施升级与污染型企业选址[J].中国工业经济,2021(10):136-155.
- [15] 饶贵贵,王得力,李晓溪.高铁开通与供应商分布决策[J].中国工业经济,2019(10):137-154.

- [16] 汪克亮, 庞素勤, 张福琴. 高铁开通能提升城市绿色全要素生产率吗? [J]. 产业经济研究, 2021(3): 112-127.
- [17] 李斌, 彭星, 欧阳铭珂. 环境规制、绿色全要素生产率与中国工业发展方式转变: 基于 36 个工业行业数据的实证研究[J]. 中国工业经济, 2013(4): 56-68.
- [18] 樊纲, 苏铭, 曹静. 最终消费与碳减排责任的经济学分析[J]. 经济研究, 2010(1): 4-14.
- [19] 林伯强, 刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放: 影响因素和减排策略[J]. 经济研究, 2010(8): 66-78.
- [20] 王群伟, 周鹏, 周德群. 我国二氧化碳碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J]. 中国工业经济, 2010(1): 45-54.
- [21] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. 地理学报, 2021(12): 3103-3118.
- [22] 张友国. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响[J]. 经济研究, 2010(4): 120-133.
- [23] 林伯强, 孙传旺. 如何在保障中国经济增长前提下完成碳减排目标[J]. 中国社会科学, 2011(1): 64-76.
- [24] 张艳, 郑贺允, 葛力铭. 资源型城市可持续发展政策对碳排放的影响[J]. 财经研究, 2022(1): 49-63.
- [25] 韩峰, 黄敏. 数字普惠金融发展对城乡收入差距的影响研究[J]. 长沙理工大学学报(社会科学版), 2022(4): 98-110.
- [26] Krugman P. Increasing returns and economic geography[J]. Journal of Political Economy, 1991, 99(03): 483-499.
- [27] 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[J]. 数量经济技术经济研究, 2017(3): 40-58.
- [28] 宣烨, 陆静, 余泳泽. 高铁开通对高端服务业空间集聚的影响[J]. 财贸经济, 2019(9): 117-131.
- [29] 李兰冰, 阎丽, 黄玖立. 交通基础设施通达性与非中心城市制造业成长: 市场势力、生产率及其配置效率[J]. 经济研究, 2019(12): 182-197.
- [30] 李铭, 赵天宇, 徐振宇. 能源价格对能源效率的影响: 基于中国省际面板数据[J]. 经济研究参考, 2018(37): 38-53.
- [31] 马光荣, 程小萌, 杨恩艳. 交通基础设施如何促进资本流动: 基于高铁开通和上市公司异地投资的研究[J]. 中国工业经济, 2020(6): 5-23.
- [32] 王群勇, 陆凤芝. 高铁开通的经济效应: “减排”与“增效”[J]. 统计研究, 2021(2): 29-44.
- [33] 孙佳, 杨洒洒, 王林辉. 中国制造业产品质量: 基于技术含量视角的实证分析[J]. 宏观质量研究, 2022(2): 47-61.
- [34] 杨思莹, 路京京. 绿色高铁: 高铁开通的减排效应及作用机制[J]. 财经科学, 2020(8): 93-105.
- [35] 邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验[J]. 管理世界, 2019(1): 36-60, 226.
- [36] Vickerman R. Can high-speed rail have a transformative effect on the economy? [J]. Transport Policy, 2018, 62(02): 31-37.
- [37] Zheng Y T, Yang H D, Huang J Y, et al. Industrial agglomeration measured by plants' distance and CO₂ emissions: evidence from 268 Chinese prefecture-level cities[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 176(02): 121-134.
- [38] 何文举, 张华峰, 陈雄超, 等. 中国省域人口密度、产业集聚与碳排放的实证研究: 基于集聚经济、拥挤效应及空间效应的视角[J]. 南开经济研究, 2019(2): 207-225.
- [39] Xu G T, Lv Y, Sun H J, et al. Mobility and evaluation of intercity freight CO₂ emissions in an urban agglomeration[J]. Transportation Research Part D, 2021, 91(03): 102-121.
- [40] Brack T, Levine R, Levkov A. Big bad banks? the winners and losers from bank deregulation in the United States[J]. The Journal of Finance, 2010, 65(05): 1637-1667.
- [41] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济, 2022(5): 100-120.