

引用格式: 张晓昱, 李润楠, 秦玉婷, 等. 多维异质性视角下高铁建设对城市碳排放强度的影响及其机制: 基于281个地级及以上城市准自然实验[J]. 资源科学, 2023, 45(7): 1310–1323. [Zhang X Y, Li R N, Qin Y T, et al. The effect of high-speed railway construction on urban carbon emission intensity and mechanism under the perspective of multidimensional heterogeneity: A quasi natural experiment based on 281 cities at prefecture level and above in China[J]. Resources Science, 2023, 45(7): 1310–1323.] DOI: 10.18402/resci.2023.07.03

# 多维异质性视角下高铁建设对城市碳排放强度的影响及其机制

## ——基于281个地级及以上城市准自然实验

张晓昱<sup>1,3</sup>, 李润楠<sup>1</sup>, 秦玉婷<sup>1</sup>, 左其亭<sup>2,3</sup>, 郑鹏飞<sup>2</sup>

(1. 郑州大学商学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学水利与土木工程学院, 郑州 450001;  
3. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院, 郑州 450001)

**摘 要:**【目的】高速铁路的低碳优势有利于早日实现“碳中和、碳达峰”的战略目标, 因此从多维异质性视角探究高铁建设的低碳减排效应及其影响机制意义凸显。【方法】本文基于2006—2020年全国281个地级及以上城市面板数据, 将高铁建设视为一项准自然实验, 采用多期双重差分法、空间双重差分法和中介效应模型, 系统探究了高铁建设对城市碳排放强度的直接效应、空间溢出效应及其作用机制。【结果】研究发现: ①高铁建设对城市碳排放强度的降低有显著促进作用, 且该效应平均存在4年延迟期; ②高铁减排效应在西部城市、成长型和衰退型的资源型城市及非枢纽城市显著, 但在其他地区和类型的城市没有显著影响; ③机制检验结果表明高铁建设能通过提高城市经济聚集度和科技创新水平进而降低城市碳排放强度; ④空间双重差分结果显示, 高铁建设对邻近城市碳排放强度的负向“虹吸效应”大于正向“扩散效应”。【结论】因此, 对于高铁建设, 国家应保存量稳增量, 继续发挥其低碳减排作用, 各地方政府也应因地制宜, 统筹兼顾, 合理制定减排政策, 在实现城市碳减排目标的同时, 推动区域协调发展。

**关键词:** 高铁; 碳排放强度; 准自然实验; 双重差分模型; 中介效应模型

DOI: 10.18402/resci.2023.07.03

## 1 引言

高速铁路是中国交通运输史上的重大技术变革, 对沿线各城市的经济和社会发展都有着深远的影响。全国铁路营业里程从2012年的9.8万 km 增长到2022年的15.5万 km, 其中高铁从0.9万 km 增加到4.2万 km, 稳居世界第一, 高速铁路对百万人以上城市覆盖率超过95%<sup>①</sup>。作为促进经济社会发展的重要交通基础设施投资项目, 高铁建设已然成

为带动国家经济的新增长点。现有研究对高铁建设带来的经济效益颇为关注, 普遍认为高铁建设有利于推动沿线城市的经济发展。如宗刚等<sup>[1]</sup>提出高速铁路可以通过时空压缩效应, 提高城市间的交通可达性, 促进资本、技术、劳动力等要素的流动与集聚, 带动城市的经济发展; 刘勇政等<sup>[2]</sup>认为高铁开通的城市更容易获得经济高质量发展; 李金锴等<sup>[3]</sup>研究发现高铁开通可以通过提高沿线地区的交通通

收稿日期: 2023-03-09, 修订日期: 2023-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279027); 郑大经济学管理学新兴学科孵化研究基地项目(101/32610168); 郑州大学骨干教师培育计划项目(2021ZDGGJS034)。

作者简介: 张晓昱, 女, 河南商丘人, 讲师, 研究方向为区域可持续发展。E-mail: zhangxiaoyu@zzu.edu.cn

通讯作者: 郑鹏飞, 男, 河南洛阳人, 讲师, 研究方向为交通工程。E-mail: pfzhce15@zzu.edu.cn

① 数据来源: 中国中央人民政府网站: [http://www.gov.cn/xinwen/2022-11/22/content\\_5728187.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2022-11/22/content_5728187.htm)。

2023年7月

达度,促进区域间的劳动力流动<sup>[4]</sup>,推动信息传播和技术交流,进而带动地区的经济发展。学者们还对高铁开通对经济增长的异质性影响进行了研究,如宗刚等<sup>[1]</sup>从城市地理区位、城市规模、城市资源禀赋等多个角度进行异质性分析,证明高铁对东部城市、大规模城市、非资源型城市等的经济促进作用尤为明显。

随着国家对绿色发展和低碳经济建设的日益重视,有关高铁建设环境效应的研究也日益丰富。如陆铭等<sup>[5]</sup>考察了高铁开通对工业污染的影响,认为高铁发展会显著降低工业污染物的排放;杨思莹等<sup>[6]</sup>通过实证研究发现,高铁开通能够通过提升城市科技创新能力,进而抑制二氧化硫排放量;韩燕等<sup>[7]</sup>研究发现高铁发展可以通过促进服务业集聚和提高绿色创新水平缓解城市雾霾污染。关于高铁的碳减排效应,祝树金等<sup>[8]</sup>通过实证分析表明与其他交通运输方式相比,高速铁路本身具有绿色低碳的优良特性,有助于城市实现碳减排目标;张华等<sup>[9]</sup>的研究却发现高铁会通过创新效应增加居民的出行需求,从而增加城市碳排放量。虽然由于研究样本、方法等方面的差异,导致研究结论不尽一致,但大部分研究认为高铁建设可以降低城市碳排放量<sup>[10,11,12]</sup>。

已有研究同样关注了高铁建设对城市碳排放的影响机制:张汉斌<sup>[10]</sup>通过对比分析高速铁路与普通铁路的碳排放量发现,高铁开通可以通过交通替代效应实现城市碳减排;Yang等<sup>[13]</sup>采用双重差分的方法实证发现高铁建设会通过结构效应降低二氧化碳等污染物的排放量;张般若等<sup>[12]</sup>研究发现高铁开通可以通过促进城市产业结构升级,在一定程度上降低沿线城市的碳排放量<sup>[12,14]</sup>。现有研究关于高铁建设对城市碳排放的机制分析多从产业结构的视角展开,从其他角度的经济机制分析仍有欠缺。同时,现有文献较少涉及高铁建设对城市碳排放的空间溢出效应,但部分研究表明,伴随着高铁网络的不断发展,高铁可以通过同城化效应、虹吸效应等影响周边城市的生态效率、绿色全要素生产率等<sup>[15,16]</sup>。因此,本文认为高铁建设可能对城市碳排放强度存在空间外溢作用。

综上所述,现有研究多从单一视角出发,针对城市碳排放量进行考察,在机制分析方面侧重于产

业结构角度,对高铁减排效应的空间影响的探究尚有欠缺。据此,本文基于2006—2020年中国281个地级及以上城市面板数据,通过构建多期双重差分模型、空间双重差分模型和中介效应模型,从区域经济聚集和科技创新的角度探究高铁建设对沿线城市及其周边地区碳排放强度的影响,以期理清经济聚集和科技创新影响高铁减排的作用机制,全面考察高铁减排效应,为推进高铁建设、促进区域经济集聚提供理论依据。

## 2 理论分析与研究假设

### 2.1 高铁建设与城市碳排放强度关系

城市碳排放强度是地区资源利用效率的重要衡量指标,反映了一个国家或地区的绿色经济发展水平。交通运输业是中国碳排放来源的主要部门之一,具有很大的减排潜力<sup>[17]</sup>。高铁发展改变了以往的交通运输结构,实现了对传统交通运输方式的有效替代。相比于普通铁路和公路交通,高铁采用了流线型车体和轻量化技术,大幅降低了列车的运行阻力和能耗,其次,高铁动车组列车采用电力牵引,减少了对燃油的消耗,具有明显的低碳排放特性。自开通以来,高速铁路就极大地改变了人们的日常出行选择,企业和居民主动选择更为清洁的交通出行方式,从而产生交通替代效应,优化了本地区整体的交通运输结构,降低了城市碳排放强度。基于上述分析,提出假设1。

假设1:高铁建设可以促进其沿线城市地区碳排放强度的降低。

### 2.2 高铁建设、经济聚集与城市碳排放强度关系

高铁建设能够促进周边经济要素的聚集,在一定程度上提高沿线地区的经济聚集程度。与非高铁城市相比,高铁节点城市在交通运输、技术交流、城市基础设施等方面均具有区位优势,会成为劳动力和企业选址的优先选择,人口和企业的集聚也带动了沿线城市经济集聚度的提高。

高铁建设带来经济聚集度的提高可以降低城市碳排放强度<sup>[18]</sup>。首先,人口集聚促进了城市化水平的提高,居民对美好生活环境的需求促使政府加强环境规制,硬性环境约束指标倒逼企业节能减排,从而降低城市碳排放强度。其次,企业集聚产生的规模经济效应提高了原材料、基础设施和相关

服务的利用效率,企业间的信息交流也促进了绿色生产技术的革新。同时,企业集聚也便利了监管部门的集中管制,推动降低城市碳排放强度。基于上述分析,提出假设2。

假设2:高铁建设对经济集聚产生直接效应,继而间接降低城市碳排放强度。

### 2.3 高铁建设、科技创新与城市碳排放强度关系

高铁建设能够促进节点城市的技术进步。首先,高铁建设促进了区域间生产要素的自由流动,通过吸引人力资本的不断流入推动节点城市的“人才储备池”建设,由此产生的知识溢出效应促进城市创新能力的提升<sup>[9]</sup>,并为城市的科技进步提供持续的智力支持。

高铁建设带来的科技创新水平提升能够在一定程度上降低节点城市的碳排放强度<sup>[20]</sup>。首先,高铁建设提升了交通便利性,推动了不同区域的企业、科学家等创新主体之间的交流与合作,产生了知识溢出效应。通过知识溢出,创新主体可以广泛涉猎多个领域的知识,深化对原专业领域的理解,从而有力推动节点城市环保生产技术和能源集约技术的创新,进而有效改善城市能源利用效率和能源消耗结构,降低城市碳排放强度<sup>[21]</sup>。其次,生产技术的创新可以通过技术替代效应有效降低企业绿色化转型的成本,激励企业节能减污降碳,走绿色高质量发展之路,进而降低城市碳排放强度。基于上述分析,提出假设3。

假设3:高铁建设对科技创新产生直接效应,继而间接降低城市碳排放强度。

### 2.4 高铁建设对城市碳排放强度的空间溢出效应

首先,高铁建设可能对周边地区的碳排放强度产生负向“虹吸效应”。高铁建设降低了劳动力、知识、资本等在区域间流动的壁垒,加快了生产要素向节点城市的富集,促进节点城市的产业结构升级。节点城市第三产业占比的提高促使其将高污染、高耗能产业转移至周边地区<sup>[22]</sup>,降低本地区的污染程度,从而对周边城市产生负向“虹吸效应”,不利于其经济的低碳健康发展。

其次,高铁建设对周边地区的碳排放强度也可能产生正向的“扩散效应”。高铁网络建设促进了城市群的发展,推动了城市间要素和商品市场的一

体化。在此基础上,节点城市强大的辐射带动功能推动技术、知识等要素向周边城市溢出,从而提升周边城市的生产技术水平 and 资源利用效率,推动其可持续发展,降低碳排放强度,产生正向“扩散效应”。基于上述分析,提出假设4。

假设4:高铁建设对城市碳排放强度的影响存在空间溢出效应。

## 3 模型设定与数据来源

### 3.1 模型设定

#### 3.1.1 基准模型

选择双重差分(DID)为主要研究方法。在样本观测期内,全国281个地级及以上城市中已有166个城市开通了高铁,故其可以被视为一项“准自然实验”来开展研究。在此基础上,将高铁已开通的城市作为实验组,高铁未开通的城市作为控制组,利用DID模型研究高铁开通对城市碳排放强度的净效应。鉴于各城市的高铁并非在同一时期开通,难以将某一年度作为该政策执行的年度,故采用能够应对政策执行时间存在先后差异的多期DID进行分析。多期DID模型设定如下:

$$CEI_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 HSR_{it} + \gamma X_{it} + \delta_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中:  $CEI_{it}$  表示  $i$  城市在  $t$  年的碳排放强度,由单位城市 GDP 的  $CO_2$  排放量的自然对数表示,其中  $CO_2$  排放量借鉴吴建新<sup>[23]</sup>的计算方法;  $HSR_{it}$  表示高铁建设虚拟变量,  $HSR_{it}=1$  表示  $i$  城市在  $t$  年高铁已开通,  $HSR_{it}=0$  表示  $i$  城市在  $t$  年高铁未开通。高铁开通时间界定参考卞元超等<sup>[24]</sup>的研究,若城市在上半年开通高铁,则看作是本年开通,若开通时间在下半年,则进行滞后一年处理,将其看作是下一年度开通;  $X_{it}$  为一系列控制变量,参考张般若等<sup>[13]</sup>、葛立宇等<sup>[25]</sup>、余群芝等<sup>[26]</sup>的研究,具体包括:①经济规模( $ES$ ),由各城市人均地区生产总值的自然对数表示;②对外开放程度( $FDI$ ),由实际使用外商资金与地区生产总值的比重表征;③二产占比( $IG$ ),使用第二产业产值在 GDP 中的占比表示;④三产占比( $SG$ ),使用第三产业产值在 GDP 中的占比进行测度;⑤行政区域面积( $Area$ ),以当地城市区划的土地面积(km)来表征;⑥技术水平( $TL$ ),由城市科技支出费用的自然对数表示(表1)。 $\alpha_0$  为常数项; $\alpha_1$  和  $\gamma$  为待估参数,系数  $\alpha_1$  即为重点关注的估计系数,表



2023年7月

示高铁建设对城市碳排放强度的净效应; $\delta_i$ 为城市固定效应,用于控制个体层面不随城市变化的固有影响因素; $\varphi_t$ 为年份固定效应,用于控制时间层面不随时间迁移影响的因素; $\varepsilon_{it}$ 为随机误差项。为避免可能存在的自相关和异方差问题,选择将标准误差聚类到城市层面。

### 3.1.2 机制检验模型

为研究高铁建设影响碳排放强度的传导机制,借鉴Baron等<sup>[27]</sup>、温忠麟等<sup>[28]</sup>、胡浩志等<sup>[4]</sup>的研究,运用逐步回归的方法,采用中介效应模型进行实证检验,具体形式为:

$$Med_{it} = \beta_0 + \beta_1 HSR_{it} + \gamma X_{it} + \delta_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$CEI_{it} = \lambda_0 + \lambda_1 HSR_{it} + \lambda_2 Med_{it} + \gamma X_{it} + \delta_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中: $Med$ 为中介变量; $\beta_0$ 和 $\lambda_0$ 为常数项; $\beta_1$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 和 $\gamma$ 为待估参数,其中 $\lambda_1$ 为考虑中介变量的效果后高铁建设对城市碳排放强度的影响。将经济聚集和科技创新水平作为中介变量,参照张华明等<sup>[29]</sup>的研究,就业密度衡量的经济聚集( $AG_1$ )使用城市单位土地面积内就业人口数量来测度;产出密度衡量的经济聚集( $AG_2$ )使用第二、三产值之和与城市行政区划土地面积之比来测度。科技创新水平( $PAT$ )参照曹清峰<sup>[30]</sup>的做法,采用城市每万人专利授权数表示(表1)。

### 3.1.3 空间溢出效应模型

从高铁网络建设的角度分析,高铁建设不仅会

对本地区的碳排放强度产生直接影响,也可能间接作用于周边地区的碳排放强度。空间双重差分模型(SDID)可以同时考虑地区间的关联性与政策特点,有效弥补多期DID对高铁网络连通性观测的不足,因此采用其进行空间溢出效应的估计。

选取地理邻接矩阵作为空间权重矩阵,即相邻的城市之间存在相互影响( $W=1$ ),不相邻的城市之间不存在相互影响( $W=0$ )。采用全局Moran's  $I$ 指数检验城市碳排放强度的空间相关性。表2结果显示,Moran's  $I$ 指数均大于0,且在5%水平上显著,说明城市碳排放强度间存在空间关联性。

在此基础上,通过LM和LR检验来确定最优的空间计量模型。如表3所示,空间误差检验的 $p$ 值并不完全显著,空间滞后检验的 $p$ 值均显著,因此采用空间滞后模型(SAR)估计高铁建设对城市碳排放强度的溢出效应。

基于式(1),建立如下空间计量模型:

$$CEI_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 W \times CEI_{it} + \alpha_2 HSR_{it} + \gamma X_{it} + \delta_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中: $W$ 为空间邻接权重矩阵; $\alpha_1$ 为城市碳排放强度空间滞后项的估计系数; $\alpha_2$ 为考虑空间溢出效应后的高铁建设对城市碳排放强度的影响。

## 3.2 数据来源及处理

鉴于2020年全国经济受疫情影响较大,为得到高铁建设对城市碳排放强度的净效应,减少由这一因素导致的估计偏误,最终将2006—2019年作为研究区间,获得中国281个地级及以上城市的均衡面

表1 各变量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of variables

变量	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
$CEI$ /万t,取对数	3934	-1.093	0.777	-2.841	1.000
$HSR$	3934	0.280	0.449	0.000	1.000
$AG_1$ /(万人/ $km^2$ )	3934	0.528	0.784	0.018	5.139
$AG_2$ /%	3934	11.398	1.358	8.151	14.623
$PAT$ /个	3934	7.394	14.959	0.064	93.916
$ES$ /元,取对数	3934	10.418	0.710	8.687	11.969
$FDI$ /%	3934	0.018	0.018	0.000	0.087
$IG$ /%	3934	47.829	10.669	19.800	75.500
$SG$ /%	3934	39.168	9.523	18.200	68.700
$Area$ / $km^2$ ,取对数	3934	9.342	0.790	7.374	11.408
$TL$ /万元,取对数	3934	9.828	1.572	6.182	14.031

表2 空间相关性检验结果

Table 2 Spatial correlation test results

年份	Moran's $I$	Z值	$p$ 值
2006	0.013	2.473	0.007
2007	0.014	2.689	0.004
2008	0.012	2.375	0.009
2009	0.010	1.975	0.024
2010	0.017	2.999	0.001
2011	0.016	2.921	0.002
2012	0.017	3.036	0.001
2013	0.019	3.402	0.000
2014	0.018	3.181	0.001
2015	0.018	3.249	0.001
2016	0.018	3.157	0.001
2017	0.018	3.195	0.001
2018	0.018	3.203	0.001
2019	0.014	2.821	0.002

表3 空间计量模型检验结果

Table 3 Test results of the spatial econometric model

检验类型	统计量值	$P$ 值
LM_error	100.083	0.000
LM_error_robust	0.509	0.475
LM_lag	144.255	0.000

板数据。被解释变量碳排放强度的原始数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和《城市建设统计年鉴》(2007—2020年),核心解释变量高铁开通数据来自于《中国铁道年鉴》、中国铁路总公司官网和中国铁路网,对于缺失数据,采取在各省市便民公众号、新闻网站等进行查找核对补充,其他变量均取自《中国城市统计年鉴》和部分地级市统计年报,个别缺失数据通过KNN均值法予以补齐。为避免由异常值引起的估计偏差,对所有的连续变量进行首尾1%的缩尾处理。各变量的描述性统计见表1。

## 4 结果与分析

### 4.1 高铁建设对城市碳排放强度的基准回归结果分析

表4为高铁建设对城市碳排放强度影响的基准回归结果,模型(1)为未加入控制变量和个体、年份固定效应的估计结果,列(2)–(4)加入了控制变量,列(3)、(4)分别加入了个体固定效应和双向固定效应。

模型(1)未考虑控制变量影响和个体、年份效

应,估计结果中可能混杂了其他影响因素, $R^2$ 较小也说明模型(1)偏差较大;模型(2)–(4)在逐步加入控制变量影响和控制个体、年份固定效应的情况下,高铁开通对城市碳排放强度的净效应逐渐明晰,变量( $HSR$ )的系数趋于稳定。综合4种模型的回归结果来看,无论是否考虑控制变量或是否控制个体年份效应,核心解释变量( $HSR$ )的系数均显著为负,初步表明高铁建设能显著促进城市实现碳排放强度的降低,假设1得到验证。高铁建设推动了人才、资本等要素的自由流动,使区域间资源配置得到了优化,提高了城市的资源利用效率,进而减少了城市单位产出所需的资源,促进二氧化碳排放强度的降低。

### 4.2 稳健性检验

#### 4.2.1 平行趋势检验及动态效应分析

使用双重差分方法进行政策评估前,需要验证在城市高铁建设前,实验组和控制组的发展趋势并无显著差异,即满足平行趋势假设。借鉴Beck等<sup>[31]</sup>的方法检验平行趋势假设,具体模型设定如下:

$$CEI_{it} = \alpha_0 + \sum_{s=-6}^7 \alpha_s D_s + \alpha_1 X_{it} + \delta_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式中: $D_s$ 为高铁建设的虚拟变量,是平行趋势检验中的核心解释变量,下标 $s$ 表示高铁建设前6年和后7年,当 $s < 0$ 时,表示高铁建设前 $s$ 期;当 $s > 0$ 时,表示高铁建设后 $s$ 期。

图1结果显示,在高铁建设前6年,各年份虚拟变量的回归系数均不显著,且基本位于0左右,表明处理组和控制组城市碳排放强度的演进趋势在高铁建设前无显著差异,支持了平行趋势假设。图1还展示了高铁建设后的动态效应,可以看出自高铁建设后的第5年起,回归系数显著为负,说明此时高铁对城市碳排放强度的降低开始有显著促进作用,且这一作用在接下来的两年内越来越强。高铁对城市碳排放强度的影响有一定的延迟,造成这一现象的原因在于:高铁建设引致交通通达性的改善对劳动力等要素配置的优化需要一定的调整周期,经济聚集和产业结构的升级也需要一个较长的过程。

#### 4.2.2 安慰剂检验

考虑到城市和年份层面可能存在不可观测的遗漏控制变量,这些变量可能对高铁建设与碳排放

2023年7月

表4 基准回归结果

Table 4 Benchmark regression results

	(1)	(2)	(3)	(4)
	lnCEI	lnCEI	lnCEI	lnCEI
HSR	-0.399*** (0.016)	-0.085*** (0.016)	-0.081*** (0.016)	-0.067** (0.034)
ES	—	-0.528*** (0.023)	-0.564*** (0.024)	-0.449*** (0.100)
FDI	—	-0.653 (0.447)	-0.877** (0.445)	-1.142 (0.715)
IG	—	0.016*** (0.002)	0.011*** (0.002)	0.009 (0.006)
SG	—	0.022*** (0.003)	0.017*** (0.003)	0.015** (0.006)
Area	—	-0.325*** (0.041)	-0.266*** (0.094)	-0.207** (0.101)
TL	—	-0.040*** (0.009)	-0.022*** (0.009)	-0.046** (0.021)
城市固定效应	否	否	是	是
年份固定效应	否	否	否	是
常数项	-0.982*** (0.041)	6.236*** (0.448)	6.360*** (0.915)	4.998*** (1.333)
N	3934	3934	3934	3934
R <sup>2</sup>	0.147	0.460	0.462	0.472

注: 括号内的值为聚类到城市层面的标准误,\*、\*\*、\*\*\*分别表示在10%、5%、1%的水平上显著。下同。

强度产生干扰,为了进一步确认城市碳排放强度的下降并非由这些变量造成,而是由高铁建设所致,利用独立重复实验进行安慰剂检验。具体做法为:以每年开通高铁的城市个数为依据,从所有城市样本中随机抽取对应数量并将其作为高铁建设城市,并对模型系数进行回归分析。为了保证结果的可

靠性,进行了500次随机抽样,按照式(1)进行回归得到图2,显示回归系数在500次随机抽样后集中分布在0附近,且其均值几乎为0,说明高铁能够促进城市碳排放强度的降低并不是由于某些不可观测因素导致的,高铁建设的碳减排效应并未受到非观测遗漏变量的影响,结果具有较强的稳健性。

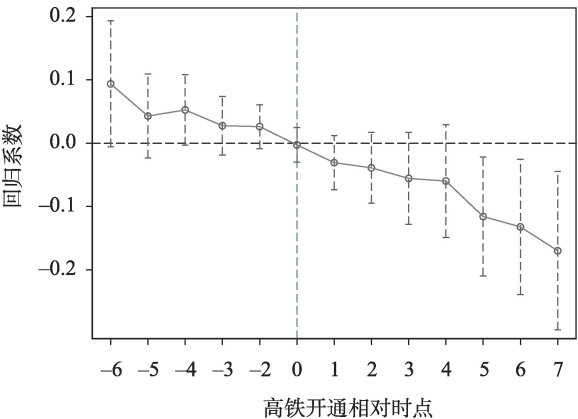


图1 平行趋势检验  
Figure 1 Parallel trend test

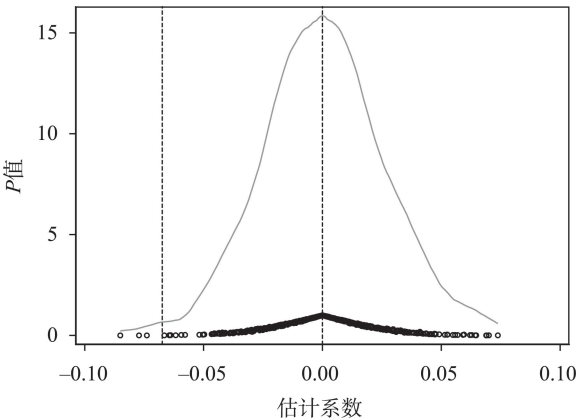


图2 安慰剂检验  
Figure 2 Placebo test

4.2.3 内生性检验

为了进一步降低内生性估计偏误,避免一些非观测因素同时影响高铁建设和城市碳排放强度,采用工具变量法解决这一问题。参考卞元超等<sup>[24]</sup>,将各地级市的地理坡度作为工具变量,其依据在于:①地理坡度反映了城市的地貌情况,其大小对高铁是否修建和高铁建设成本有很大的影响,因此这一指标满足相关性要求;②地理坡度是在漫长历史进程中形成的自然地理环境,与当期城市碳排放强度没有明显的相关关系,故满足外生性要求<sup>[12]</sup>。由于样本期间地理坡度不会随着时间的推移而改变,因此将其与每年度各地级市所在省份开通高铁城市的总数相乘。

采用两阶段最小二乘法进行估计,估计结果见表5。第一阶段回归结果表明,在1%显著性水平上,工具变量即地理坡度与核心解释变量(*HSR*)之间具有显著正相关关系,且Cragg-Donald Wald *F*统计量为35.563,大于10%水平上统计量的值,说明了选择的工具变量的有效性。列(2)估计结果显示,在1%显著性水平上,高铁建设对城市的碳排放强度有明显的负向影响,表明高铁建设可以显著促进城市碳排放强度的降低,与式(1)回归结果一致。因此,在对内生性问题处理后,研究结果仍具有较强的稳健性。

4.2.4 剔除其他试点政策的干扰

高铁对城市碳排放强度的影响可能同样受到

其他试点政策的影响,因此搜集了2006年以后城市层面关于碳排放的重要试点政策。①为了积极应对气候变化,实现经济可持续发展,中国政府分别于2010年、2014年和2017年开展了三批低碳试点城市建设,显著促进了城市碳排放强度的降低<sup>[32]</sup>。②在使用政策手段的同时,中央政府也寻求以市场化手段解决环境问题,于2013年在北京、上海、重庆、广东等7个省市展开碳排放权交易试点工作,相关研究表明,在碳排放权交易试点城市,二氧化碳排放强度明显低于未试点城市<sup>[33]</sup>,因此,该政策也会对城市碳排放强度有一定影响,从而对研究结果产生干扰。

为得到高铁建设对城市碳排放强度的净影响效应,需剔除低碳试点和碳排放权交易试点政策对研究结果的干扰。因此,在模型(1)基础上,分别加入两类政策虚拟变量与获批时间交互项,以控制两类政策对碳排放强度的影响,具体模型设定如下:

$$CEI_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 HSR_{it} + \alpha_2 DID1_{it} + \alpha_3 DID2_{it} + \gamma X_{it} + \delta_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式中:*DID1<sub>it</sub>*为低碳试点政策虚拟变量,若*i*城市在*t*年是低碳试点城市,*DID1<sub>it</sub>*=1,否则*DID1<sub>it</sub>*=0;同理,若*i*城市在*t*年是碳交易权试点城市,*DID2<sub>it</sub>*=1,否则*DID2<sub>it</sub>*=0;*α<sub>2</sub>*、*α<sub>3</sub>*分别代表低碳试点政策和碳交易权试点政策对城市碳排放强度的影响。回归结果如表6所示,表明高铁建设对节点城市的碳减

表5 内生性检验结果

Table 5 Endogeneity test results

	(1)	(2)
	第一阶段	第二阶段
	<i>HSR</i>	<i>lnCEI</i>
Prob( <i>HSR</i> )	—	-0.292***
	—	(0.098)
<i>IV</i>	0.002***	—
	(0.000)	—
控制变量	是	是
城市固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
<i>N</i>	3934	3934
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.647	0.876
<i>F</i>	35.563	—

表6 剔除其他试点政策的回归结果

Table 6 Regression results excluding other pilot policies

	(1)	(2)	(3)
<i>HSR</i>	-0.067**	-0.068**	-0.067**
	(0.034)	(0.034)	(0.034)
<i>DID1</i>	-0.023	—	-0.022
	(0.032)	—	(0.031)
<i>DID2</i>	—	-0.014	-0.008
	—	(0.056)	(0.056)
控制变量	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
常数项	5.055***	5.023***	5.066***
	(1.337)	(1.333)	(1.337)
<i>N</i>	3934	3934	3934
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.473	0.472	0.473



2023年7月

排促进作用依然显著,再次证明研究结果的稳健性。

#### 4.3 高铁建设对城市碳排放强度的影响机制

为探究高铁建设对城市碳排放强度的影响机制,从经济聚集和科技创新的角度进行机制分析,运用逐步检验法验证高铁建设是否通过经济聚集或者科技创新影响碳排放强度(表7)。

列(1)中 $HSR$ 的系数显著为负值,说明高铁建设对城市碳排放强度的降低起到了积极的促进作用;列(2)以就业密度衡量的经济聚集作为因变量, $HSR$ 的系数在1%水平上显著为正,说明高铁建设能够促进该城市就业人口的聚集;列(3)将高铁建设( $HSR$ )和以就业密度衡量的经济集聚( $AG_1$ )同时进行回归, $HSR$ 和就业密度的系数均在10%的水平上显著为负,说明就业密度的提高能有效抑制碳排放强度,以就业密度衡量的经济聚集对高铁建设与碳排放强度间的影响起到部分中介作用。

列(4)显示,将以经济密度衡量的经济聚集作为因变量后, $HSR$ 的系数在5%水平上显著为正,说明高铁建设能够提高城市的经济产出密度;列(5)将高铁建设( $HSR$ )和以经济密度衡量的经济集聚( $AG_2$ )同时进行回归, $HSR$ 的系数在10%水平上显著为负,经济密度系数在1%水平上显著为负,说明城市经济产出密度的提高能有效抑制碳排放强度,以经济密度衡量的经济聚集起到了部分中介作用。

以上两种经济聚集中介效应的检验结论具有

一致性,即无论以何种方式测度经济聚集,高铁建设均能通过经济聚集有效促进城市碳排放强度的降低。在假设2得以验证的同时,也表明高铁通过经济聚集发挥积极碳减排效应的研究结论具有稳健性。

列(6)以科技创新水平作为因变量, $HSR$ 的系数在1%水平上显著为正,说明高铁建设能够促进节点城市的科技进步;列(7)将高铁建设( $HSR$ )和科技创新水平( $PAT$ )同时进行回归, $HSR$ 的系数在10%的水平上显著为负,科技创新水平的系数在5%水平上显著为负,说明高铁建设可以通过促进科技创新对城市碳排放强度起到抑制作用。假设3得以验证。

#### 4.4 高铁建设对城市碳排放强度的空间溢出效应

表8报告了高铁建设对城市碳排放强度的空间回归模型结果。列(1)为整体回归结果,空间自回归系数 $Spa-rho$ 在1%的水平上显著为负,表明城市碳排放强度间存在显著的负向空间依赖性,进一步验证了引入空间因素进行分析的合理性。但这一回归系数并不能直接反映解释变量对被解释变量的影响程度,需要采用偏微分方法将其分解为直接效应、间接效应和总效应。估计结果如表8列(2)–(4)所示,直接效应和总效应的结果表明高铁建设对降低城市碳排放强度具有显著的促进作用,这与基准回归结果一致。间接效应结果显示高铁建设对邻近城市的碳排放强度有促进提升作用,原因在

表7 高铁建设对城市碳排放强度的影响机制结果

Table 7 Results of the mechanism of action analysis

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	$\ln CEI$	$AG_1$	$\ln CEI$	$AG_2$	$\ln CEI$	$PAT$	$\ln CEI$
$HSR$	-0.067**(-1.99)	0.080*** (0.030)	-0.062*(0.034)	0.017** (0.009)	-0.062*(0.034)	2.288*** (0.733)	-0.061*(0.034)
$AG_1$	—	—	-0.055*(0.030)	—	—	—	—
$AG_2$	—	—	—	—	-0.298*** (0.107)	—	—
$PAT$	—	—	—	—	—	—	-0.003** (0.001)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是
常数项	5.066*** (1.337)	5.013** (1.999)	5.275*** (1.381)	6.969*** (0.787)	7.076*** (1.709)	66.999 (56.187)	5.183*** (1.381)
$N$	3934	3934	3934	3934	3934	3934	3934
$R^2$	0.473	0.189	0.473	0.972	0.476	0.396	0.474



表8 空间计量估计及分解结果

Table 8 Results of estimation and decomposition of the spatial econometric model

	(1) Main	(2) LR_Direct	(3) LR_Indirect	(4) LR_Total
<i>HSR</i>	-0.066*** (0.016)	-0.066*** (0.016)	0.019*** (0.006)	-0.046*** (0.012)
<i>Spa-rho</i>	-0.425*** (0.141)	—	—	—
<i>Sigma<sup>2</sup></i>	0.071*** (0.002)	—	—	—
控制变量	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
<i>N</i>	3934	3934	3934	3934
<i>R<sup>2</sup></i>	0.446	0.446	0.446	0.446

于高铁节点城市依靠更便捷的客运交通能力,吸引周边地区生产要素的流入<sup>[20]</sup>,受到虹吸效应的制约,周边地区的城市服务水平和经济活力下降,产业绿色化转型动力不足,进而影响了城市碳减排目标的实现。

#### 4.5 异质性分析

##### 4.5.1 城市地理区位异质性

考虑到中国东、中、西部地区在经济发展水平、人力资本和技术水平等方面存在较大差异,因此基于地理区位将样本观测期内的城市分为3组,以研究高铁建设对不同低于城市碳排放强度的影响(表9)。结果显示,西部地区城市高铁的建设能够显著降低碳排放强度,而高铁建设对中部地区城市起到了不显著的低碳减排作用,对东部地区则起到了不显著的抑制作用,表明高铁建设对不同区域城市的碳排放强度的影响具有差异性。造成这一差异性

结果的主要原因可能在于,与西部地区相比,东部和中部城市拥有更高的经济发展水平和更优越的市场环境及自然地理条件,城市碳排放强度的降低主要依赖于政府的环境规制政策、企业绿色化转型等软环境的改善,与其他影响因素相比,高铁建设对城市低碳减排的边际效用较小,而西部地区由于地理位置偏远以及城市交通便利性本身较差,高铁建设为其带来的低碳减排效应更为明显,减少了其向东、中部地区学习先进管理经验、引进人才和技术等的障碍,推动了西部地区沿线城市的产业结构升级和科技创新水平的提升,产生集聚效应,推动降低西部地区城市单位产出能源消耗,最终助力西部地区城市降低碳排放强度。

##### 4.5.2 城市资源禀赋异质性

与非资源型城市相比,资源型城市是以矿产、森林等自然资源为主导产业的的城市类型,这类城市为了经济增长,容易过度依赖当地资源禀赋,从而导致产业转型升级困难,影响城市碳排放强度。以《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》的分类标准为依据,将样本城市分为非资源型城市与资源型城市进行分组回归,回归结果如表10所示。列(1)、(2)显示,HSR估计系数在10%的水平下均不显著,但估计系数为负,证明高铁建设能够促进资源型和非资源型城市的碳排放强度的降低,但影响效果有限。

将资源型城市细分为成长型、成熟型、衰退型以及再生型,进一步探究高铁建设对不同类型的资源型城市碳排放强度的影响(表10)。列(3)–(6)结果表明,高铁建设对成长型和衰退型资源城市的碳

表9 城市地理区位异质性分析结果

Table 9 Results of heterogeneity analysis of the geographical location of cities

	(1) 东部	(2) 中部	(3) 西部
<i>HSR</i>	0.012 (0.051)	-0.027 (0.052)	-0.156* (0.083)
控制变量	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
常数项	6.524 (4.326)	6.373** (2.487)	-0.575 (3.856)
<i>N</i>	1162	1120	1134
<i>R<sup>2</sup></i>	0.457	0.670	0.385

2023年7月

表10 资源型城市与非资源型城市异质性分析结果

Table 10 Results of heterogeneity analysis between resource-based and non-resource-based cities

	(1) 非资源型	(2) 资源型	资源型			
			(3) 成长型	(4) 成熟型	(5) 衰退型	(6) 再生型
HSR	-0.054 (0.037)	-0.098 (0.065)	-0.555** (0.243)	-0.040 (0.079)	-0.117** (0.056)	0.060 (0.246)
控制变量	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
常数项	3.362* (1.84)	6.494*** (2.011)	-13.008 (44.246)	8.744*** (2.428)	9.178*** (2.095)	3.721 (5.067)
N	2352	1582	196	868	322	196
R <sup>2</sup>	0.522	0.425	0.274	0.468	0.796	0.507

减排具有显著促进作用,但对成熟型资源城市促进作用不显著,对再生型资源城市具有不显著的抑制作用。原因在于成长型资源城市自然资源开发正处于上升阶段,城市发展潜力足,高铁建设促进当地绿色产业的发展<sup>[4]</sup>,形成集聚效应,另外高铁建设也可能导致该类城市产业结构趋向第三产业,低碳排放强度的GDP产出拉动城市整体碳排放强度的降低。成熟型资源城市尚处于资源稳定开发阶段,产业结构以矿产资源开采加工的重工业为主,但政府高度重视生态环境问题,因此高铁建设虽然促进了该类城市碳排放强度的降低,但发挥的作用有限<sup>[34]</sup>。衰退型城市资源趋于枯竭,产业结构落后,社会发展问题突出,城市绿色转型困难,而高铁作为一种高效环保的交通方式,可以减少对传统能源的依赖,降低碳排放强度;此外,高铁建设还可以带动相关产业的发展,减少对传统资源的开采和利用,促进城市经济的转型,进一步降低城市碳排放。再生型城市基本已经进入可持续发展的轨道,城市建设和产业发展绿色化水平提高,此时高铁带来的人口大量流入会造成碳排放角度下资源利用非有效<sup>[35]</sup>,产生集聚阴影,从而导致城市碳排放强度的提升。

#### 4.5.3 城市网络中心度异质性

交通网络中城市自身的功能定位与网络中心度有所差异,这种差异可导致城市交通定位的不同,使得高铁建设带来的要素转移出现“中心-外围”差距。考虑城市网络中心度所导致的城市发展差异,按照《中长期铁路网规划(2016)》将样本城市

分为枢纽城市与非枢纽城市,进行分组回归(表11)。针对枢纽城市,列(1)的结果显示高铁建设对其二氧化碳排放并无显著影响( $HSR=0.089$ ,  $t=0.062$ ),而针对非枢纽城市,列(2)的结果显示高铁开通对当地的二氧化碳排放有显著的负向边际效应( $HSR=-0.070^*$ ,  $t=0.070$ ),即非枢纽城市开通高铁对当地碳排放强度的降低起到了积极促进作用。

产生这种异质性结果的原因在于,非枢纽城市由于原本交通基础较为薄弱,高铁建设后客运能力提升的程度更高,通过加快高素质劳动力流入和提升市场潜力,促进产业结构升级,降低城市碳排放强度<sup>[36]</sup>,而对枢纽城市而言,高铁带来的要素流入一定程度上加剧了城市拥挤,从而推动了城市碳排放强度的提高。

表11 城市网络中心度异质性分析结果

Table 11 Results of heterogeneity analysis of urban network centrality

	(1) 枢纽城市	(2) 非枢纽城市
HSR	0.089 (0.062)	-0.070* (0.037)
控制变量	是	是
城市固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
常数项	0.129 (3.057)	5.282*** (1.433)
N	266	3668
R <sup>2</sup>	0.824	0.453

## 5 结论与政策建议

### 5.1 结论

本文通过分析2006—2019年全国281个地级及以上城市的面板数据,将高铁建设视为“准自然实验”,采用多期DID模型和空间DID模型从多维异质性视角探究高铁建设对沿线城市碳排放强度的影响机制,并从经济聚集和科技创新两个角度,对其作用机制进行中介效应检验。主要结论如下:

(1)高铁建设可显著促进城市碳排放强度的降低,且平均而言,该效应存在4年延迟期,即在高铁建设5年后,城市的二氧化碳排放强度显著降低,并且下降趋势会逐步扩大,这一结论在经过稳健性检验和内生性检验后仍然成立。

(2)机制检验结果显示,以就业密度和经济密度衡量的经济聚集和科技创新水平在高铁建设对城市碳排放强度的影响中发挥了部分中介作用。高铁建设通过促进沿线城市经济聚集和科技创新水平的提升,间接作用于碳排放强度的降低。

(3)空间双重差分结果表明,高铁建设对本地产生了显著的减排效应,但也显著提升了周边城市的碳排放强度,形成负向“虹吸效应”,推动碳排放量在高铁网络中实现空间转移。

(4)为更加准确识别高铁建设对不同城市碳排放强度的影响,分别对城市地理区位、资源禀赋等差异性因素进行考察,发现高铁对碳排放强度的影响具有较强异质性。从城市地理区位来看,高铁建设对西部地区城市碳排放强度的降低有显著拉动效应,但这一作用在中东部地区并不显著。从城市资源禀赋的视角来看,总体上,高铁建设对资源型城市和非资源型城市的碳排放强度并无显著影响,但将资源型城市细分,高铁建设显著促进了成长型资源型城市和衰退型资源型城市的碳排放强度降低,对成熟型资源型城市的作用不显著,对再生型资源型城市则产生了不显著的碳减排抑制作用。从城市网络中心度的视角来看,高铁建设对非枢纽城市的碳减排效应显著,而对枢纽城市的碳排放强度没有显著影响。

### 5.2 政策建议

在上述研究结论的基础上,提出如下政策建议:

(1)从国家角度来讲,需要进一步推动高铁建设,既要保存量,也要提增量,充分发挥高铁建设的降碳作用和对经济高质量发展的推动作用。一方面,中国需要进一步巩固东中部地区发展成果和降碳成就。另一方面,中国应进一步减少西部城市与东中部城市之间的交通障碍和要素流通限制,推动技术、人才、信息等要素向西部城市转移,通过扩散效应引领西部城市产业绿色化、智能化转型。

(2)从地方政府角度来讲,各个地方政府需要充分发挥经济聚集的降碳作用和把握高铁开通带来的发展契机,根据城市的不同资源禀赋和人文地理区位特点,因地制宜,推行适合城市定位的碳减排方案和经济发展模式。例如,规划特色旅游景区、建设高新产业园区等,发挥当地特色和优势,实现对高能耗、高污染产业的转型升级。同时,有针对性地制定优惠政策,吸引人才、技术等要素聚集,通过经济聚集和科技创新推动环境规制政策的顺利实施,从而降低城市碳排放强度,推进城市绿色低碳经济发展,助力实现“双碳”目标。

(3)从区域发展角度来讲,高铁建设的负向“虹吸”效应大于正向“扩散”效应,为了促进区域的协调可持续发展,高铁建设在推动城市发展的过程中也应统筹考虑,协同推进。对虹吸效应过强的城市,应采取适当措施,有序推进各类要素向周边城市转移,一方面缓解城市功能的过度集中,另一方面带动周边城市的整体发展,提高区域间资源配置效率,推动各城市能源集约利用,从而实现城市碳减排目标和区域的高质量协调可持续发展。

### 参考文献(References):

- [1] 宗刚, 张雪薇. 高速铁路、技术创新与经济高质量发展: 实证检验与机制研究[J]. 山西财经大学学报, 2020, 42(12): 1-14. [Zong G, Zhang X W. High-speed railway, technological innovation and high-quality economic development: Empirical test and mechanism research[J]. Journal of Shanxi University of Finance and Economics, 2020, 42(12): 1-14.]
- [2] 刘勇政, 李岩. 中国的高速铁路建设与城市经济增长[J]. 金融研究, 2018, (11): 18-33. [Liu Y Z, Li Y. High-speed rails and city economic growth in China[J]. Journal of Financial Research, 2018, (11): 18-33.]
- [3] 李金锴, 钟昌标. 高铁开通、城市可达性与就业机会[J]. 软科学,



2023年7月

- 2020, 34(11): 21–26. [Li J K, Zhong C B. High-speed rail opened, urban accessibility and employment[J]. *Soft Science*, 2020, 34(11): 21–26.]
- [4] 胡浩志, 孙立雪. 高铁开通促进了城市绿色转型吗[J]. *财贸研究*, 2022, 33(9): 29–43. [Hu H Z, Sun L X. Has opening of high-speed rail promote green transformation?[J]. *Finance and Trade Research*, 2022, 33(9): 29–43.]
- [5] 陆铭, 冯皓. 集聚与减排: 城市规模差距影响工业污染强度的经验研究[J]. *世界经济*, 2014, (7): 86–114. [Lu M, Feng H. Agglomeration and emission reduction: An empirical study of urban size disparity affecting industrial pollution intensity[J]. *The Journal of World Economy*, 2014, (7): 86–114.]
- [6] 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. [Yang S Y, Lu J J. Green high-speed railway: Emission reduction effect and mechanism of high-speed railway[J]. *Finance and Economics*, 2020, (8): 93–105.]
- [7] 韩燕, 李衡, 王巍. 高铁发展对城市雾霾污染的影响研究[J]. *软科学*, 2021, 35(12): 50–55. [Han Y, Li H, Wang W. Research on the influence of high-speed railway development on urban haze pollution[J]. *Soft Science*, 2021, 35(12): 50–55.]
- [8] 祝树金, 尹诗姝, 钟腾龙. 高铁开通抑制了城市环境污染吗[J]. *华东经济管理*, 2019, 33(3): 52–57. [Zhu S J, Yin S S, Zhong T L. Does the opening of high-speed railway inhibit urban environmental pollution?[J]. *East China Economic Management*, 2019, 33(3): 52–57.]
- [9] 张华, 冯烽. 绿色高铁: 高铁开通能降低雾霾污染吗[J]. *经济学报*, 2019, 6(3): 114–147. [Zhang H, Feng F. Green high-speed railway: Does high-speed railway reduce haze pollution[J]. *Journal of Economics*, 2019, 6(3): 114–147.]
- [10] 张汉斌. 我国高速铁路的低碳比较优势研究[J]. *宏观经济研究*, 2011, (7): 17–19. [Zhang H B. Research on low-carbon comparative advantage of high-speed railway in China[J]. *Macroeconomics*, 2011, (7): 17–19.]
- [11] Yang X H, Lin S L, Li Y, et al. Can high-speed rail reduce environmental pollution? Evidence from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118135.
- [12] Wang L Q, Zhao Z B, Xue X L, et al. Spillover effects of railway and road on CO<sub>2</sub> emission in China: A spatio temporal analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 797–809.
- [13] 张般若, 李自杰. 高铁能促进低碳经济吗? 高铁开通对城市碳排放强度的影响及机制研究[J]. *华中科技大学学报(社会科学版)*, 2021, 35(1): 131–140. [Zhang B R, Li Z J. Can high-speed rail promote low-carbon economy? The effect and mechanism of the opening of high-speed railway on urban carbon emission intensity[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Social Science Edition)*, 2021, 35(1): 131–140.]
- [14] Huang Y, Wang Y B. How does high-speed railway affect green innovation efficiency? A perspective of innovation fact or mobility[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121623.
- [15] 邓荣荣, 张翔祥, 陈鸣. 长江经济带高铁开通对城市生态效率的影响: 基于DID与SDID的实证分析[J]. *华东经济管理*, 2021, 35(5): 1–11. [Deng R R, Zhang A X, Chen M. Impact of high-speed rail on urban ecological efficiency in the Yangtze River Economic Belt: Empirical analysis based on DID and SDID[J]. *East China Economic Management*, 2021, 35(5): 1–11.]
- [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. [Wang K L, Pang S Q, Zhang F Q. Can the opening of high-speed rail improve urban green total factor productivity?[J]. *Industrial Economics Research*, 2021, (3): 112–127.]
- [17] 王绍博, 段伟, 秦娅风, 等. 高铁网络空间组织模式及其脆弱性评估: 以长三角为例[J]. *资源科学*, 2022, 44(5): 1079–1089. [Wang S B, Duan W, Qin Y F, et al. Spatial organization model and its vulnerability assessment of high-speed rail network: Taking the Yangtze River Delta as an example[J]. *Resources Science*, 2022, 44(5): 1079–1089.]
- [18] 任晓松, 刘宇佳, 赵国浩. 经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(4): 95–106. [Ren X S, Liu Y J, Zhao G H. The impact and transmission mechanism of economic agglomeration on carbon intensity[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(4): 95–106.]
- [19] 杜兴强, 彭妙薇. 高铁开通会促进企业高级人才的流动吗[J]. *经济管理*, 2017, 39(12): 89–107. [Du X Q, Peng M W. Do high-speed trains motivate the flow of corporate highly educated talents?[J]. *Business and Management Journal*, 2017, 39(12): 89–107.]
- [20] 邓荣荣, 张翔祥, 陈鸣. 高铁网络、城市碳排放强度及空间溢出效应: 来自长三角地区的证据[J]. *技术经济*, 2022, 41(1): 43–52. [Deng R R, Zhang A X, Chen M. Impact of high speed rail network on urban carbon emission intensity and spatial spillover effect[J]. *Journal of Technology and Economics*, 2022, 41(1): 43–52.]
- [21] 及添正, 邓宏兵, 张天铃. 生产性服务业集聚对碳排放效率的影响: 基于长江经济带108个城市企业数据的分析[J]. *资源科学*, 2023, 45(1): 31–47. [Ji T Z, Deng H B, Zhang T L. Impact of Beijing-Shanghai high-speed railway on the economy of cities along the route: An empirical analysis based on the theory of space economics[J]. *Resources Science*, 2023, 45(1): 31–47.]
- [22] 黄振宇, 吴立春. 京沪高铁对沿线城市经济的影响: 基于空间经济学理论的实证分析[J]. *宏观经济研究*, 2020, (2): 165–175. [Huang Z Y, Wu L C. Impact of Beijing-Shanghai high-speed railway on urban economy: An empirical analysis based on spatial economics theory[J]. *Macroeconomics*, 2020, (2): 165–175.]
- [23] 吴建新, 郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛

- 分析[J]. 统计研究, 2016, 33(1): 54–60. [Wu J X, Guo Z Y. Research on the convergence of carbon dioxide emissions in China: A continuous dynamic distribution approach[J]. Statistical Research, 2016, 33(1): 54–60.]
- [24] 卞元超, 吴利华, 白俊红. 高铁开通是否促进了区域创新?[J]. 金融研究, 2019, (6): 132–149. [Bian Y C, Wu L H, Bai J H. Does high-speed rail improve regional innovation in China?[J]. Journal of Financial Research, 2019, (6): 132–149.]
- [25] 葛立宇, 莫龙炯, 黄念兵. 数字经济发展、产业结构升级与城市碳排放[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2022, 42(10): 20–37. [Ge L Y, Mo L J, Huang N B. Development of digital economy, upgrading of industrial structure and urban carbon emission[J]. Modern Finance and Economics (Journal of Tianjin University of Finance and Economics), 2022, 42(10): 20–37.]
- [26] 余群芝, 吴柳, 郑洁. 数字经济、经济聚集与碳排放[J]. 统计与决策, 2022, 38(21): 5–10. [She Q Z, Wu L, Zheng J. Digital economy, economic agglomeration and carbon emission[J]. Statistics & Decision, 2022, 38(21): 5–10.]
- [27] 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.
- [28] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014, 22(5): 731–745. [Wen Z L, Ye B J. Analyses of mediating effects: The development of methods and models[J]. Advances in Psychological Science, 2014, 22(5): 731–745.]
- [29] 张华明, 元鹏飞, 朱治双. 中国城市人口规模、产业集聚与碳排放[J]. 中国环境科学, 2021, 41(5): 2459–2470. [Zhang H M, Yuan P F, Zhu Z S. City population size, industrial agglomeration and CO<sub>2</sub> emissions in Chinese prefectures[J]. China Environmental Science, 2021, 41(5): 2459–2470.]
- [30] 曹清峰. 国家级新区对区域经济增长的带动效应: 基于70大中城市的经验证据[J]. 中国工业经济, 2020, (7): 43–60. [Cao Q F. Driving effects of national new zone on regional economic growth: Evidence from 70 cities of China[J]. China Industrial Economics, 2020, (7): 43–60.]
- [31] Beck T, Levine R, Levkov A. Big bad banks? The winners and losers from bank deregulation in the United States[J]. Journal of Finance, 2010, 65(5): 1637–1667.
- [32] 周迪, 周丰年, 王雪芹. 低碳试点政策对城市碳排放绩效的影响评估及机制分析[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 546–556. [Zhou D, Zhou F N, Wang X Q. Impact of low-carbon pilot policy on the performance of urban carbon emissions and its mechanism[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 546–556.]
- [33] 李胜兰, 林沛娜. 我国碳排放权交易政策完善与促进地区污染减排效应研究: 基于省级面板数据的双重差分分析[J]. 中山大学学报(社会科学版), 2020, 60(5): 182–194. [Li S L, Lin P N. Regional emission reduction promoted by China's carbon emission trading scheme: A difference-in-differences analysis with evidence from provincial panel data[J]. Journal of Sun Yat-sen University (Social Science Edition), 2020, 60(5): 182–194.]
- [34] 黄寰, 何广, 肖义. 低碳城市试点政策的碳减排效应[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 1044–1058. [Huang H, He G, Xiao Y. Carbon emission reduction effect of the low-carbon city construction pilot program[J]. Resources Science, 2023, 45(5): 1044–1058.]
- [35] 彭小辉, 王静怡. 高铁建设与绿色全要素生产率: 基于要素配置扭曲视角[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(11): 11–19. [Peng X H, Wang J Y. High-speed railway construction and green total factor productivity: Based on factor allocation distortion[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(11): 11–19.]
- [36] 许丽萍, 吴玉鸣, 马为彪. 高铁建设促进制造业与生产性服务业协同集聚了吗?[J]. 产业经济研究, 2023(1): 1–14. [Xu L P, Wu Y M, Ma W B. Does the construction of high-speed rail promote the co-agglomeration of manufacturing and producer services industries?[J]. Industrial Economics Research, 2023(1): 1–14.]

# The effect of high-speed railway construction on urban carbon emission intensity and mechanism under the perspective of multidimensional heterogeneity: A quasi natural experiment based on 281 cities at prefecture level and above in China

ZHANG Xiaoyu<sup>1,3</sup>, LI Runnan<sup>1</sup>, QIN Yuting<sup>1</sup>, ZUO Qiting<sup>2,3</sup>, ZHENG Pengfei<sup>2</sup>

(1. Business School, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** [Objective] As the low-carbon advantage of high-speed railway is conducive to the early realisation of the strategic goal of “carbon neutrality and carbon peaking”, it is of great significance to explore the low-carbon emission reduction effect of high-speed railway construction and its influencing mechanism from a multi-dimensional heterogeneity perspective. [Methods] Based on the panel data of 281 prefecture-level and above cities in China from 2006 to 2020, this study considered the construction of high-speed railway as a quasi-natural experiment, and adopted the multi-period difference-in-differences method, spatial difference-in-differences method, and mediation effect model to systematically investigate the direct effect and spatial spillover effect of the construction of high-speed railway on the intensity of carbon emission in cities and mechanism. [Results] The study found that: (1) The construction of high-speed railway made a significant contribution to the reduction of urban carbon emission intensity, and there was a four-year delay period in this effect on average; (2) The emission reduction effect of high-speed railway was significant in western cities, growing and declining resource cities, and non-hub cities, but not in other regions and types of cities; (3) The results of mechanism test show that the construction of high-speed railway can reduce the carbon emission intensity of cities by increasing the level of urban economic agglomeration and scientific and technological innovation; (4) The results of spatial difference-in-differences analysis show that the negative “siphoning effect” of high-speed railway construction on the carbon emission intensity of neighboring cities was greater than the positive “diffusion effect”. [Conclusion] Therefore, for the construction of high-speed railway, the state should keep the existing stock and maintain the constant growth so that high-speed railway can continue to play a role in low-carbon development and emission reduction, and local governments should also take into account local conditions, formulate emission reduction policies reasonably, and promote the coordinated development of regions while realizing the carbon emission reduction target of cities.

**Key words:** high-speed rail; carbon emission intensity; quasi-natural experiment; difference-in-differences model; mediation effect model