

李治国, 王杰. 高铁服务供给对碳减排的影响——基于空间溢出效应 [J]. 地理科学, 2024, 44(1): 121-129. [Li Zhiguo, Wang Jie. Impact of high-speed rail service supply on carbon emission reduction based on spatial spillover effects. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(1): 121-129.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20211588

高铁服务供给对碳减排的影响 ——基于空间溢出效应

李治国, 王杰

(中国石油大学 (华东) 经济管理学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 交通基础设施建设深刻影响环境质量, 却鲜有研究关注高铁发展对于碳排放的影响。本文基于直接环境效应和间接经济效应双重路径, 理论剖析高铁服务供给实现碳减排的内在机制, 进而将空间计量模型与连续型双重差分相结合, 基于高铁服务频次数据实证考察高铁服务供给如何影响城市碳排放, 及其在空间维度的溢出效应。研究发现, 高铁服务供给有助于减少本地碳排放, 同时具有碳减排空间溢出效应; 时间维度上, 高铁服务供给的本地减排效应立竿见影且渐趋强化, 而对于周边地区碳排放的影响则存在明显的时滞特征; 机制检验表明高铁服务供给能够基于交通工具替代发挥空间减排效应; 高铁服务供给的碳减排效应在资源禀赋维度和地理位置维度表现出异质特征。本文进一步丰富了高铁与碳减排研究内容, 既拓展了碳减排的交通基础设施建设路径, 亦为高铁发展的环境效应提供了有力佐证。

关键词: 高铁服务供给; 碳减排; 空间溢出效应; 连续型双重差分

中图分类号: F406 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2024)01-0121-09

2019 年中国交通运输领域碳排放总量 11 亿 t 左右, 占全国碳排放总量 10% 左右, 因此推进交通基础设施绿色低碳化建设改造、提供节能、环保和低碳的交通运输服务对于中国碳减排工作的推进至关重要^[1]。大量的经验证据表明^[2-4], 以节能汽车和公共交通等为代表的现代交通运输工具发展确有显著的污染减排效应。相较于城市轨道交通等短途工具, 高速铁路(下文简称“高铁”)作为新型长途轨道交通工具在中国取得尤为瞩目的发展成绩。现阶段中国“四横四纵”的高铁网络已经形成, 2016 年出台的《中长期铁路网规划》^[5]中进一步提出“八横八纵”的战略构想。无疑, 高铁服务供给渐已成为中国城市经济增长不可或缺的一环, 而高铁发展对城市环境污染的影响亦不容忽视^[6]。

理论上, 高铁发展有助于打破传统生产活动所面临的“时空壁垒”, 既能够通过缩短通勤时间和强化空间联系引致“时空压缩”效应^[6], 亦能够通过“边

界突破”实现劳动力等生产要素在城市空间范围内的再分配^[7], 进而重塑经济空间格局^[8], 因此高铁网络对经济活动的深刻影响将作用于城市污染。此外, 作为高速化、低耗能和高清洁的交通运输工具, 高铁能够实现传统交通运输工具的有效替代, 进而对交通尾气排放所诱发的环境污染产生影响^[9]。尽管现阶段对于高铁建设与碳减排的关注不足, 但高铁建设所带来的雾霾治理效应^[10]、二氧化硫和废水减排效应^[11]以及能源效率提升效应^[12]已得到验证。这也引发本文提出如下疑问: 高铁服务供给对高铁城市和周边城市的碳排放是否具有减排效应呢? 如果减排效应存在, 高铁服务供给又是通过怎样的具体机制影响城市碳排放呢? 针对上述一系列问题的回答有助于明晰高铁服务供给与城市碳减排的内在关联, 既能够拓展城市减排机制, 亦能为高铁服务供给的综合效益评估提供环境证据。因此, 本文将从内在机制分析和实证检验两个层面对高铁服务供

收稿日期: 2023-08-20; 修订日期: 2023-11-11

基金项目: 国家社会科学基金项目(22BJL056)资助。[Foundation: National Social Science Foundation of China (22BJL056).]

作者简介: 李治国(1977—), 男, 山东潍坊人, 副教授, 博士, 主要从事能源经济研究。E-mail: upcguo0316@126.com

通信作者: 王杰。E-mail: 978301103@qq.com

① https://www.nra.gov.cn/xwzx/xwxx/xwlb/202204/t20220405_279864.shtml [2016-07-21]

给的空间减排效应进行系统考察。具体地,本文一方面考察高铁服务供给对本地和邻地碳排放的影响,另一方面则基于交通替代效应和需求创造效应检验高铁服务供给影响碳排放的内在机制。

既有文献对高铁开通与环境污染的相关性及其作用机制予以一定的关注,但仍存在着如下研究不足:①虽然部分文献采用 DID 方法对高铁开通的环境效应进行评估,但却忽略了高铁开通引致的环境污染空间溢出效应,进而造成高铁开通的环境效应评估结果有所偏误;②多数研究对于城市间高铁服务供给强度的差异化关注不足,同样会降低评估结果的可靠性。针对上述研究缺陷与不足,本文构建连续型空间双重差分模型,采用高铁服务频次对高铁服务供给予以表征,进而实证考察高铁服务供给对于城市碳排放的影响及其空间溢出效应,以期高铁效益评估提供可靠的环境证据。

本文的边际创新在于:一方面,本文从空间地理维度就高铁服务供给影响碳排放的空间溢出效应展开分析,即关注高铁服务供给对周边城市碳排放的影响;另一方面,不同于以往研究中普遍采用的 0-1 虚拟变量,即高铁开通则为 1,反之则为 0,本文收集 2007—2016 年中国 276 个城市高铁经停频次,并利用这一连续型变量刻画高铁服务供给差异。

1 理论分析

以往的研究普遍关注高铁建设对经济发展的影响^[13-15],然而关于高铁服务供给影响碳排放的研究则相对较少。高铁服务对城市碳排放的直接环境效应主要来源于交通工具选择的替代效应和交通需求的创造效应

1.1 直接环境效应

相较于传统的公路交通运输,高铁具有准时率高、运行速度快、安全舒适性强以及清洁低能耗等诸多性能优势^[16-17],因此高铁服务能够改变个体出行工具选择进而形成对公路交通运输方式的有效替代^[18]。无疑,高铁服务的普及不仅有助于解决公路交通拥挤的城市“顽疾”,减少汽车尾气排放,从而形成直接的碳减排效应;同时,高铁网络的不断完善有助于优化区域运输交通结构,简化交通运输线路选择和提升运输效率,最终降低运输环节的污染排放总量^[19-20]。尽管多数研究对高铁建设的交通替代效应予以考虑,但却往往忽略了高铁对于出行需求的创造效应,即高铁开通使得出行时间缩短、出

行便捷性提升且出行成本降低,从而引致个体出行需求上升以及出行频次增加,这在一定程度上会增加高铁服务压力以及运输环节能耗总量,最终可能引致碳排放的增加。

1.2 空间溢出效应

考虑到高铁服务供给具有较强的空间网络属性,不仅作用于本地经济环境质量,对邻地经济发展和碳排放亦具有空间溢出效应。整体来看,高铁服务供给极大地缩短了地区间的时空距离,高铁网络内城际间人才流动、资源转移、技术溢出以及经验学习等更易发生^[21],从而引致集聚环境优化和创新水平提升等空间溢出效应^[22],这有助于局域范围内碳减排工作的协同推进。然而,受制于节点城市在高铁网络中的角色和地位不同,高铁服务供给所引致的产业结构转型和经济集聚等溢出效应在中心城市和边缘城市存在差异^[23],进而产生碳排放溢出的消极影响。具体地,高铁服务供给往往能够促进人力资本以及资金技术等要素向中心城市集聚,这一“极化效应”不仅抑制其他节点城市及周边地区的经济增长,对其服务业等第三产业发展形成阻碍^[24],同时也会加剧外围城市人才短缺、创新能力不足和绿色生产率低下等问题,进而诱发能耗浪费严重和碳减排水平相对低下等问题,最终加剧产业布局的碳排放空间溢出效应。与此同时,依托高铁发展所提供的运输便利,大量的制造业企业为降低经营成本,将生产环节转移至邻近中小型企业,这一“产销分离分工体制”使得部分边缘城市成为“污染承接地”,同样引致碳排放的空间溢出效应^[25]。

2 研究设计

2.1 模型选择

相较而言,普通的双重差分(Differences-in-Differences, DID)模型设定仅仅能够体现个体实行政策与未实行政策的区别,然而考虑到不同个体受政策影响的程度是不同的,需要采用连续型 DID 将地区或个体维度的政策分组虚拟变量替换为一个连续型变量,用以反映程度的变化。高铁服务供给为双重差分法提供了理想的“准自然实验”,考虑到城市间高铁服务供给强度存在较大差异^[26],为能够对高铁服务供给的异质特征予以准确刻画,参考相关研究^[27-29],本文基于城市层面的高铁服务频次建立连续型 DID 模型。考虑到高铁服务供给的碳减排效应存在空间溢出特征,本文将空间滞后项嵌入传

统的 DID 模型。相比空间误差模型(SEM)和空间滞后模型(SLM), 空间杜宾模型作为空间计量分析的基准框架能够有效兼顾被解释变量、解释变量以及误差项引致的空间相关性。本文以高铁年经停频次所表征的高铁服务供给作为核心解释变量, 从而构建如下基于 SDM 的连续型 SDID 模型作为基准回归模型:

$$CC_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 W.CC_{it} + \alpha_2 HSR_{it} + \alpha_3 W.HSR_{it} + \alpha_4 X_{it} + \alpha_5 W.X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中, i 和 t 分别表示城市和年份, α_0 表示截距项, α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 和 α_5 表示系数; CC 表示城市人均碳排放水平; HSR 表示高铁服务供给水平; W 表示高铁时间距离空间权重矩阵; X 表示影响城市碳排放的控制变量; μ_i 和 ν_t 分别表示个体和时间固定效应; ε_{it} 表示随机扰动项。

2.2 变量说明与数据来源

2.2.1 数据来源

相较于高铁开通的 0-1 虚拟变量, 高铁服务供给这一连续型变量能够反映城市高铁发展的异质特征, 并准确刻画高铁服务供给对环境污染的动态边际影响^[30]。本文全国铁路旅客列车时刻表手工整理 2007—2016 年城市年均高铁经停频次, 其中根据中国《中长期铁路网规划》对于高速铁路运输种类的界定, 本文主要考虑动车组(D 字头)、高速动车组(G 字头)以及城际高速(C 字头)3 类。同时, 对于部分“一城多站”的城市, 本文将多站点高铁流进行加总处理。基于数据的可得性, 本文选取 2007—2016 年中国 276 个地级市及以上城市(暂缺港澳台和西藏数据)的面板数据作为研究样本, 相关数据主要来源于《中国城市统计年鉴》^[31] 等。其中货币数值变量均以 2007 年不变价格进行平减。

2.2.2 变量说明

1)被解释变量。借鉴任晓松等^[32] 研究, 本文将二氧化碳排放量分为液化石油气、煤气和全社会用电量 3 部分进行估计测算:

$$Q = C_1 + C_2 + C_3 = kE_1 + \nu E_2 + \varphi(\eta E_3) \quad (2)$$

式中, Q 表示二氧化碳排放总量; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为液化石油气、煤气和全社会用电量带来的二氧化碳排放量; k 为液化石油气的 CO_2 折算系数, E_1 为液化石油气消费量; ν 为煤气的 CO_2 折算系数, E_2 为煤气消费量; η 为煤电占总发电量的比重, φ 为煤电燃料链温室气体排放系数, E_3 为全社会用电量。

2)核心解释变量。高铁服务供给(HSR)采用时间虚拟变量($Time$)和高铁服务供给频次($HSRSI$)的乘积来表示。其中, 高铁服务供给前 $Time=0$, 反之为 1。同样的, 高铁服务供给前 $HSRSI=0$, 反之则对应具体的高铁服务供给频次。

3)控制变量。环境规制(ER)采用熵值法, 将工业 SO_2 去除率、工业 COD 去除率、工业固体废物综合利用率、生活污水处理率及生活垃圾无害化处理率等指标纳入环境规制评价体系测度得到; 人口集聚(POP)采用城市居住人口总数与城市行政面积之比来表示; 城市化水平(UR)采用城镇人口与总人口之比来表示; 外商投资(FDI)以实际利用外资额与城市 GDP 之比来表示; 能源利用效率(EE)采用数据包络分析方法, 将工业增加值、工业碳排放以及工业能源消费量作为投入产出要素测度得到。

3 实证结果分析

3.1 平行趋势检验与动态效应分析

在 DID 基准回归分析前, 需要检验实验组和对照组在政策实施前是否满足平行趋势假设。参考 Alder 等^[33] 研究, 本文引入高铁服务供给前与高铁服务供给后时间虚拟变量与对照组的交互项, 以此来检验平行趋势假设并识别高铁服务供给的碳减排效应的动态演化。为保证高铁服务冲击的充分外生性, 本文进一步采用倾向得分匹配法(PSM)进行可观测变量的匹配, 实现实验组样本与控制组样本的唯一对应, 进而通过匹配估计量来满足样本的平行趋势假设(表 1)。不难判断, 城市全样本难以满足平行趋势假设, 而倾向得分匹配样本则能够有效满足平行趋势假设, 因此后续分析主要基于倾向得分匹配样本展开。随着时间的推移, 高铁服务的碳减排效应和碳减排溢出效应均渐趋强化。不同的是, 高铁服务对于碳排放的抑制作用立竿见影, 即高铁服务后第 1 年的系数便显著为负, 然而其对于邻地碳排放的空间溢出效应则具有明显的迟滞, 高铁服务供给后第 3 年的系数才显著为负。

3.2 基准回归分析

考虑到基准回归模型中引入被解释变量的空间滞后项, 普通最小二乘法容易引致估计偏误, 因此本文采用极大似然法(MLE)对式(1)进行回归。进一步地, 为弱化碳排放在时间维度上的“锁定”特征对回归结果的影响, 本文同时列出采用偏误修正的准极大似然法(QMLE)所得到的结果, 如表 2 所

表 1 平行趋势检验与高铁服务的动态效应结果

Table 1 Parallel trend test and dynamic effect results of high-speed rail service

变量	城市全样本		倾向得分匹配样本	
	HSR	W.HSR	HSR	W.HSR
<i>Before_3</i>	0.0126 ^{**} (2.01)	0.0311(1.52)	0.0159(1.36)	0.0257(1.39)
<i>Before_2</i>	-0.0117(-1.09)	-0.0089(-1.37)	-0.0215(-1.00)	0.0094(0.75)
<i>Before_1</i>	-0.0133 ^{**} (-2.50)	0.0181 [*] (1.90)	-0.0159(-1.47)	-0.0157(-1.62)
<i>After_1</i>	-0.0128 [*] (-1.81)	-0.0206(-1.43)	-0.0112 ^{**} (-2.33)	-0.0104(-1.19)
<i>After_2</i>	-0.0094(-0.93)	-0.0227(-0.82)	-0.0129 ^{**} (-2.08)	-0.0158(-1.20)
<i>After_3</i>	-0.0077 ^{**} (-2.15)	-0.0120 ^{**} (-2.08)	-0.0120 ^{**} (-1.99)	-0.0084 [*] (-1.81)
控制变量	控制	控制	控制	控制
地区、时间固定效应	控制	控制	控制	控制
R^2	0.4207		0.3915	

注：^{**}和^{*}分别表示在5%和10%的显著性水平下通过检验，括号内为*t*值；HSR表示高铁服务供给变量，W.HSR表示高铁服务供给空间溢出项变量；*Before_n*表示高铁服务供给前*n*年，*After_n*表示高铁服务供给后*n*年；暂缺港澳台和西藏数据。

示。空间维度上，碳排放具有显著的正向溢出特征，即本地碳排放增加亦能够诱发周边碳排放的同步增加，从而导致地区间碳减排陷于整体增加的“逐底”困境。分析其可能的原因，经济互动和产业集聚发展使得局域范围内经济发展具有较强的示范效应和竞争效应，地区间的“发展竞赛”和环境治理“搭便车”行为使得碳排放增加。另外，碳排放的扩散特征和跨区域传输亦是导致碳排放空间溢出的成因。因此，碳减排工作并非“单打独斗”之工程，而需要强化区域间的联防联控和协同治理。不难发现，高铁服务供给及其空间滞后项的估计系数均显著为负，即高铁服务供给对于本地和邻地碳排放均具有显著的抑制效应。因此，既有研究中普遍忽视高铁服务供给在空间维度上的溢出表现，可能导致高铁的经济环境效应评估结果存在较大偏差。

表 3 为高铁服务供给的碳减排效应的分解结

果，本文进一步考察直接效应和间接效应在长期内和短期内的不同表现。其中，短期效应表示高铁服务供给对碳排放的即时性影响，而长期效应则是将高铁服务供给滞后性特征考虑在内，考察高铁服务供给对碳排放的长效影响。不难看出，短期内高铁服务供给的直接效应在 10% 的水平下显著为负，而长期内高铁服务供给的直接效应同样显著为负，且作用强度明显增加，这意味着高铁服务供给对碳排放的抑制效应存在较强的时滞性。高铁服务供给间接效应为负且在短期内并不显著，但在长期内却变为显著，表明高铁服务供给能够在长期内对周边地区碳排放产生抑制效应，且这一抑制效应在时间维度上渐趋增强。高铁服务供给的直接效应明显高于间接效应，即高铁服务供给虽然能够抑制周边地区碳排放，但其溢出效应明显小于对本地碳排放的抑制效应。

3.3 稳健性检验

为保证上述研究结论的可靠性，本文进行了一系列的稳健性检验，包括剔除直辖市和省会城市数据、样本滞后两期处理、排除碳交易试点政策干扰、排除“碳转移”干扰和更换空间权重矩阵等(表 4)。① 剔除直辖市和省会城市样本。相较于普通的地级市，以北京和上海等为代表的直辖市以及其他省会城市具有特殊的经济和政治地位，使之在高铁建设选择中独具优势，从而可能对回归结果产生影响，因此本文将直辖市和省会城市一并剔除后再次进行回归分析。结果表明，高铁服务供给在地级市及以上城市层面具有普遍的空间减排效应。② 解释变

表 2 基准回归结果

Table 2 Benchmark regression results

变量	模型1(MLE)	模型2(QMLE)
<i>W.CC</i>	1.5295 ^{***} (3.61)	1.4721 ^{***} (3.29)
<i>HSR</i>	-0.0122 ^{**} (-2.13)	-0.0205 ^{**} (-2.49)
<i>W.HSR</i>	-0.0137 [*] (-1.72)	-0.0103 [*] (-1.89)
控制变量	控制	控制
地区、时间固定效应	控制	控制
R^2	0.4993	0.5024

注：^{***}、^{**}和^{*}分别表示在1%、5%和10%的显著性水平下通过检验，括号内为*t*值；*W.CC*表示邻地碳排放；*HSR*表示高铁服务供给变量，*W.HSR*表示高铁服务供给空间溢出项变量；暂缺港澳台和西藏数据。

表3 直接效应与间接效应分解结果

Table 3 Decomposition results of direct effect and indirect effect

变量	短期效应		长期效应	
	直接效应	间接效应	直接效应	间接效应
<i>HSR</i>	-0.0136 [*] (-1.90)	-0.0095(-1.55)	-0.0157 ^{**} (-2.40)	-0.0112 ^{**} (-1.98)

注: **和* 分别表示在5%和10%的显著性水平下通过检验; 括号内为*t*值; *HSR* 表示高铁服务供给变量; 暂缺港澳台和西藏数据。

表4 稳健性检验结果

Table 4 Robustness test results

变量	解释变量 滞后两期	剔除省会城市 与直辖市样本	排除碳交易 政策干扰	更换空间 权重矩阵
<i>HSR</i>	-0.0141 ^{***} (-2.75)	-0.0128 ^{**} (-2.33)	-0.0084 ^{**} (-2.02)	-0.0155 ^{**} (-2.01)
<i>W.HSR</i>	-0.0133 [*] (-1.76)	-0.0104(-1.09)	-0.0071 [*] (-1.82)	-0.0138 [*] (-1.77)
控制变量	控制	控制	控制	控制
地区、时间固定效应	控制	控制	控制	控制
观测值	2208	2450	2190	2760
R^2	0.5231	0.5408	0.4872	0.5021

注: ***、**和* 分别表示在1%、5%和10%的显著性水平下通过检验; 括号内为*t*值; *HSR* 表示高铁服务供给变量, *W.HSR* 表示高铁服务供给空间溢出项变量; 暂缺港澳台和西藏数据。

量滞后两期处理。考虑到高铁服务供给的经济环境效应普遍存在时滞特征, 本文对高铁服务供给变量做滞后两期处理。同时, 为了避免新的估计偏误, 对所有的控制变量亦做同步的滞后两期处理。同样的, 高铁服务供给的碳减排效应及其空间溢出效应依然稳健。③ 排除碳交易政策干扰。尽管双重差分法可以判断高铁服务供给的确对城市碳排放具有影响, 但却难以排除同时段内其他环境政策所带来的影响, 这也是既有研究中普遍忽略的一点。考虑到碳排放权交易等环境政策实施能够形成大气污染与温室气体的协同减排效应, 本文选择将碳交易试点城市剔除。不难发现, 即便是排除碳交易政策的影响后, 高铁服务供给的减排效应依然显著。④ 更换空间权重矩阵。事实上, 空间关联并非仅仅体现在地理距离维度, 经济距离亦是反映地区空间相关性的重要内容。本文以城市间 GDP 差值的倒数作为经济距离权重矩阵元素, 并以经济距离权重矩阵与地理距离权重矩阵的乘积构造经济地理复合权重矩阵并进行回归。结果表明, 经济与地理复合关联维度上, 高铁服务供给的碳减排空间溢出效应同样稳健。

3.4 异质性分析

尽管高铁服务供给在城市层面表现为显著且稳健的碳减排效应, 但鉴于城市发展质量、经济水平以及城市规模等方面存在较大差距, 高铁服务供

给的减排效应可能存在异质特征, 因此本文从资源禀赋维度和地理区位维度予以考察。具体地, 资源型城市选取自国务院 2013 年印发的《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)》(https://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2547140.htm), 共包含 115 个地级市层面的资源型城市; 对于东中西部地区的划分与参考文献 [34] 一致。连续型 SDID 模型估计如表 5 所示。从资源禀赋维度来看, 高铁服务供给对于非资源型城市碳排放具有显著的抑制效应, 而对于资源型城市的影响系数虽然同样为负但并不显著。究其原因, 资源型城市依托丰富的资源储量, 产业结构中往往资源密集型产业占比较高, 粗放型经济发展模式占据主导地位, 同时环境治理对策和环保意识亦相对落后, 导致高铁服务短期内难以使之环境污染状况发生有效改观。从地理区位维度来看, 高铁服务供给对东部和中西部城市的碳排放具有截然相反的影响。对于东部城市而言, 高铁服务供给有助于碳减排, 但却呈现增加碳排放的溢出效应, 然而对于中西部城市而言, 高铁服务供给则会引致碳排放增加, 同时具有抑制碳排放的溢出效应。

3.5 高铁服务供给的减排路径分析

高铁与传统的公路交通具有互补与替代关系, 短途运输中公路交通具有快捷灵活的优势, 而中长

表 5 异质性分析结果

Table 5 Heterogeneity analysis results

变量	非资源型城市	东部地区城市	资源型城市	中西部地区城市
<i>HSR</i>	-0.0126 ^{**} (-2.32)	-0.0135 ^{***} (-2.68)	-0.0169(-1.03)	0.0088(1.29)
<i>W.HSR</i>	-0.0071 [*] (-1.85)	0.0095 [*] (1.76)	0.0098(0.94)	-0.0075(-0.87)
控制变量	控制	控制	控制	控制
地区、时间固定效应	控制	控制	控制	控制
观测值	1 610	940	1 150	1 820
R^2	0.6219	0.5886	0.6127	0.6911

注:***、**和*分别表示在1%、5%和10%的显著性水平下通过检验,括号内为*t*值;*HSR*表示高铁服务供给变量,*W.HSR*表示高铁服务供给空间溢出项变量;暂缺港澳台和西藏数据。

途运输中高铁则具有低成本和高速度特征。理论上,高铁服务供给对于公路交通具有替代效应,通过降低私家车使用数量进而减少汽车尾气排放,但高铁的便捷化服务会在一定程度上提升公众出行意愿从而增加运输能耗。为了检验高铁服务供给如何通过其交通替代效应和出行需求扩张效应直接影响城市碳排放,本文构建高铁服务供给与公路客运占比(*Road*)的交互项,并就高铁服务供给对铁路客运量(*Numb*)的影响进行实证考察,结果如表 6 所示。高铁服务供给的替代效应,即高铁服务与公路客运占比的交互项对于碳排放的影响显著为负,且空间溢出项的系数显著为负,这表明公路交通替代效应是高铁服务供给实现空间减排的重要作用路径和溢出机制。另外,高铁服务供给造成铁路客运量显著增加,这意味着高铁服务供给的确具有一定的出行需求扩张效应,然而高铁客运量的增加并未促增碳排放。尽管现阶段中这种污染促增作用尚不显著,但随着高铁规模的不断增加和服务强度的不断提升,使得未来高铁服务增加碳排放的风险增加,这意味着高铁发展应循序渐进、合理有度原则,过快过量

的高铁建设反而可能会成为碳减排的新阻碍。

4 结论和政策建议

聚焦高铁服务供给与城市碳减排的内在关联机制,本文利用 2007—2016 年城市层面的高铁服务供给频次数据与碳排放数据,通过实证分析检验高铁服务供给对空间减排的动态影响及其传导机制。具体结论如下:① 高铁服务供给对于本地碳排放存在显著的抑制效应,同时具有显著的碳减排空间溢出效应;② 高铁服务供给对于碳排放的影响在资源禀赋维度和地理区位维度具有典型的异质特征;③ 机制检验结果表明,高铁服务供给能够通过直接环境效应实现碳减排,交通替代有助于高铁服务供给降低碳排放。

本文将高铁发展研究内容从经济领域延伸至环境领域,并从空间维度考察高铁服务供给对于城市碳排放的综合影响,进一步丰富了中国城市高铁发展的环境证据,同时也拓展了城市碳减排的研究视角,从而能够为相关经济环境政策的制定提供经验依据。首先,高铁服务供给显著的空间减排效应

表 6 高铁服务供给的减排机制分析

Table 6 Analysis of emission reduction mechanism of high-speed rail service supply

	<i>CC</i>	<i>Numb</i>	<i>W.CC</i>	<i>W.Numb</i>
<i>HSR</i> × <i>Road</i>	-0.0158 ^{**} (-2.07)		-0.0255 [*] (-1.90)	
<i>Numb</i>	0.1124(1.40)		0.0317(0.36)	
<i>HSR</i>		1.2714 ^{***} (3.06)		1.0251 ^{**} (2.12)
控制变量	控制	控制	控制	控制
地区、时间固定效应	控制	控制	控制	控制
观测值	2 760	2 760	2 760	2 760
R^2	0.6115	0.5824	0.6781	0.6460

注:***、**和*分别表示在1%、5%和10%的显著性水平下通过检验,括号内为*t*值;*CC*表示碳排放,*Numb*为铁路客运量,*W.CC*和*W.Numb*分别为邻地碳排放和铁路客运量,*HSR*为高铁服务供给变量,*Road*为公路客运占比;空白处即未涉及此项;暂缺港澳台和西藏数据。

为继续增加高铁建设投资和高铁网络布局提供了有力支持。应充分发挥中国高铁建设的技术优势, 提高高铁覆盖度, 依托高铁建设助推高质量发展。其次, 高铁服务供给的碳减排空间溢出效应进一步强调了区域协同治理和联防联控的现实意义。地区间应不断加强经济交流、技术共享和市场一体化推进, 形成步调一致的减排对策, 避免“以邻为壑”的治理乱象。进而, 高铁发展应统筹全局, 既要注重区域协调发展, 也要明确现阶段的高铁发展重点。基于东中西部地区的高铁不均匀发展现状, 应注意对中西部地区高铁建设的资源倾斜和政策扶持。然而, 考虑到高铁建设这一基础设施投资具有投资大、成本回收慢等诸多特征, 不同城市应采取差异化的发展策略, 对于规模较小的城市而言应谨慎投资。最后, 通过高铁发展的不断提速提质, 有效发挥其交通替代效应。

参考文献(References):

- [1] 邵海琴, 王兆峰. 中国交通碳排放效率的空间关联网络结构及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 34(4): 32-41. [Shao Haiqin, Wang Zhao Feng. Spatial network structure of transportation carbon emissions efficiency in China and its influencing factors. China Population, Resources and Environment, 2021, 34(4): 32-41.]
- [2] Li N, Chen J P, Tsai I C et al. Potential impacts of electric vehicles on air quality in Taiwan[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566: 919-928.
- [3] 梁若冰, 席鹏辉. 轨道交通对空气污染的异质性影响——基于RDID方法的经验研究[J]. 中国工业经济, 2016(3): 83-98. [Liang Ruobing, Xi Penghui. Heterogeneous effects of rail transit on air pollution—An empirical study with RDID. China Industrial Economics, 2016(3): 83-98.]
- [4] 高明, 陈丽强, 郭施宏. 轨道交通、BRT与空气质量——一个城市异质性的视角[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 28(6): 73-79. [Gao Ming, Chen Liqiang, Guo Shihong. Rail transit, BRT and air quality: A view of urban heterogeneity. Resources and Environment, 2021, 28(6): 73-79.]
- [5] 周玉龙, 杨继东, 黄阳华, 等. 高铁对城市地价的影响及其机制研究——来自微观土地交易的证据[J]. 中国工业经济, 2018(5): 118-136. [Zhou Yulong, Yang Jidong, Huang Yanghua et al. Study on the impact of high speed rail on land price and its mechanism: Evidence from micro land transactions. China Industrial Economics, 2018(5): 118-136.]
- [6] 王金杰, 李启航, 刘金铃. 高铁开通与企业经营空间的地理扩张——基于2004—2018年上市公司子公司地理信息的实证分析[J]. 经济地理, 2020, 40(8): 114-122. [Wang Jinjie, Li Qihang, Liu Jinling. High-speed rail and the expansion of enterprises business space: An empirical study based on the geographical information of listed companies in 2004-2018. Economic Geography, 2020, 40(8): 114-122.]
- [7] 何天祥, 黄琳雅. 高铁网络对湖南区域经济协同发展影响[J]. 地理科学, 2020, 40(9): 1439-1449. [He Tianxiang, Huang Linya. Impact of high-speed rail network on regional economic coordinated development in Hunan Province based on empirical analysis. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(9): 1439-1449.]
- [8] 牛方曲, 辛钟龄. 中国高铁站的溢出效应及其空间分异——基于夜间灯光数据的实证分析[J]. 地理研究, 2021, 40(10): 2796-2807. [Niu Fangqu, Xin Zhongling. Spillover effect of China's high-speed railway stations and its spatial differentiation: An empirical study based on night-time light datasets. *Geographical Research*, 2021, 40(10): 2796-2807.]
- [9] 李建明, 罗能生. 高铁开通改善了城市空气污染水平吗?[J]. 经济学(季刊), 2020, 19(4): 1335-1354. [Li Jianming, Luo Nengsheng. Has the opening of high-speed rail improved the level of urban air pollution?. China Economic Quarterly, 2020, 19(4): 1335-1354.]
- [10] 范建双, 周琳, 虞晓芬. 高速铁路和城市蔓延对雾霾污染的异质性影响[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1146-1164. [Fan Jianshuang, Zhou Lin, Yu Xiaofen. The heterogeneity effect of high-speed railway and urban sprawl on haze pollution. *Geographical Research*, 2021, 40(4): 1146-1164.]
- [11] 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 Siying, Lu Jingjing. Green high-speed railway: Emission reduction effect and mechanism of high-speed railway. Financial Science, 2020(8): 93-105.]
- [12] 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, 38(2): 29-44. [Wang Qunyong, Lu Fengzhi. Economic effects of high-speed rail: Emission reduction and efficiency enhancement. Statistical Research, 2021, 38(2): 29-44.]
- [13] Ortega E, Lopez E, Monzon A. Territorial cohesion impacts of high-speed rail at different planning levels[J]. *Journal of Transport Geography*, 2012, 24: 130-141.
- [14] Chen Z, Xue J, Rose A Z et al. The impact of high-speed rail investment on economic and environmental change in China: A dynamic CGE analysis[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016, 92: 232-245.
- [15] Ke X, Chen H, Hong Y et al. Do China's high-speed-rail projects promote local economy? —New evidence from a panel data approach[J]. *China Economic Review*, 2017, 44: 203-226.
- [16] Chester M V, Ryerson M S. Grand challenges for high-speed rail environmental assessment in the United States[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 61: 15-26.
- [17] Yue Y, Wang T, Liang S et al. Life cycle assessment of high speed rail in China[J]. *Transportation Research Part D Transport and Environment*, 2015, 41: 367-376.
- [18] Anderson M L. Subways, strikes, and slowdowns: The impacts of public transit on traffic congestion[J]. *American Economic*

- Review, 2014, 104(9): 2763-2796.
- [19] Chester M, Horvath A. Life-cycle assessment of high-speed rail: The case of California[J]. Environmental Research Letters, 2010, 136(1): 123-129.
- [20] 祝树金, 尹诗妹, 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 Shujin, Yin Shishu, Zhong Tenglong. Does the opening of high-speed railway inhibit urban environmental pollution?. East China Economic Management, 2019, 33(3): 52-57.]
- [21] 王丽, 曹有挥, 仇方道. 高铁开通前后站区产业空间格局变动及驱动机制——以沪宁城际南京站为例[J]. 地理科学, 2017, 37(1): 19-27. [Wang Li, Cao Youhui, Qiu Fangdao. Spatial change and driving mechanism of the industry in regions of HSR stations before and after the opening: A case study of Nanjing HSR station. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(1): 19-27.]
- [22] 李新光, 黄安民. 高铁对县域经济增长溢出效应的影响研究——以福建省为例[J]. 地理科学, 2018, 38(2): 233-241. [Li Xinguang, Huang Anmin. Spillovers effect of the high-speed railway on counties' economic growth: Taking Fujian Province as an example. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(2): 233-241.]
- [23] 张梦婷, 俞峰, 钟昌标, 等. 高铁网络、市场准入与企业生产率[J]. 中国工业经济, 2018(5): 137-156. [Zhang Mengting, Yu Feng, Zhong Changbiao et al. High-speed railways, market access and enterprises' productivity. China Industrial Economics, 2018(5): 137-156.]
- [24] 邓涛涛, 王丹丹, 程少勇. 高速铁路对城市服务业集聚的影响[J]. 财经研究, 2017, 43(7): 119-132. [Deng Taotao, Wang Dandan, Cheng Shaoyong. The impact of high speed railway on urban service industry agglomeration. Journal of Finance and Economics, 2017, 43(7): 119-132.]
- [25] Zheng S, Kahn M E. China's bullet trains facilitate market integration and mitigate the cost of megacity growth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(1): E1248-E1253.
- [26] Nancy Q. Missing women and the price of tea in China: The effect of sex-specific earnings on sex imbalance[J]. The Quarterly Journal of Economics, 2008, 123(3): 1251-1285.
- [27] Nathan N, Nancy Q. The potato's contribution to population and urbanization: Evidence from a historical experiment[J]. The Quarterly Journal of Economics, 2011, 126(2): 593-650.
- [28] 范子英, 张航, 陈杰. 公共交通对住房市场的溢出效应与虹吸效应: 以地铁为例[J]. 中国工业经济, 2018(5): 99-117. [Fan Ziyang, Zhang Hang, Chen Jie. The spillover effects and siphon effects of public transportation on housing market: A case study of subway. China Industrial Economics, 2018(5): 99-117.]
- [29] Jia R, Shao S, Yang L. High-speed rail and CO₂ emissions in urban China: A spatial difference-in-differences approach[J]. Energy Economics, 2021, 99: 105271.
- [30] 朱文涛. 高铁服务供给对省域制造业空间集聚的影响研究[J]. 产业经济研究, 2019(3): 27-39. [Zhu Wentao. Impact of high-speed rail service supply on spatial agglomeration of provincial manufacturing industry. Industrial Economic Research, 2019(3): 27-39.]
- [31] 国家统计局. 中国城市统计年鉴[M]. 2008—2017. 北京: 中国统计出版社, 2008—2017. [National Bureau of Statistics of China. China city statistical yearbook. 2008—2017. Beijing: China Statistics Press, 2008—2017.]
- [32] 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 Xiaosong, Liu Yujia, Zhao Guohao. The impact and transmission mechanism of economic agglomeration on carbon intensity. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(4): 95-106.]
- [33] Alder S, Shao L, Zilibotti F. Economic reforms and industrial policy in a panel of Chinese cities[J]. Journal of Economic Growth, 2013, 21(4): 1-45.
- [34] 李治国, 王杰, 车帅. 土地城市化推进的空间减排效应: 内在机制与中国经验[J]. 统计研究, 2021, 38(12): 89-104. [Li Zhiguo, Wang Jie, Che Shuai. Spatial emission reduction effect of land urbanization: Internal mechanism and China experience. Statistical Research, 2021, 38(12): 89-104.]

Impact of high-speed rail service supply on carbon emission reduction based on spatial spillover effects

Li Zhiguo, Wang Jie

(College of Economics and Management, China University of Petroleum (East), Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: Traffic infrastructure construction has a profound impact on environmental quality. However, most studies mainly focus on the economic and innovative effects of high-speed rail construction, few studies have paid attention to the impact of high-speed rail development on carbon emissions. Under the current constraints of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality, it is of great practical significance to understand how the development of high-speed rail affects carbon emissions. Based on the dual paths of direct environmental effect and indirect economic effect, this paper theoretically analyzes the internal mechanism of carbon emission reduction by high-speed rail service supply. Furthermore, the spatial econometric model is combined with continuous double difference. Based on the high-speed rail service frequency data, this paper empirically investigates how the high-speed rail service supply affects urban carbon emissions and its spillover effect in the spatial dimension. The results show that the supply of high-speed rail service helps to reduce local carbon emissions, and at the same time has a spatial spillover effect on carbon emission reduction in surrounding areas, which is also beneficial to the carbon emission reduction of surrounding cities. In the time dimension, the emission reduction effect of high-speed rail service supply is immediate and gradually strengthened. However, the impact of high-speed rail service supply on carbon emissions in the surrounding areas has obvious time lag characteristics. The mechanism test shows that high-speed rail service supply can play a role in spatial emission reduction based on vehicle substitution. The carbon emission reduction effect of high-speed rail service supply shows heterogeneous characteristics in the dimensions of resource endowment and geographical location. This paper further enriches the research content of high-speed rail and carbon emission reduction, not only expands the transportation infrastructure construction path of carbon emission reduction, clarifies the positive role of high-speed rail construction in promoting regional coordinated emission reduction, but also provides strong evidence for the environmental effects of high-speed rail construction.

Key words: high-speed rail service; carbon emission reduction; spatial spillover effect; continuous differences-in-differences