

Doi: 10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2022.09.001

欢迎按以下格式引用:张帆,姚树洁,汪锋.高速铁路与城市环境污染——基于中国285个城市面板数据的分析[J].重庆大学学报(社会科学版),2023(1):24-37. Doi:10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2022.09.001.



Citation Format: ZHANG Fan, YAO Shujie, WANG Feng. High-speed rail and urban environmental pollution: Analysis based on the panel data of 285 cities in China[J]. Journal of Chongqing University(Social Science Edition), 2023(1):24-37. Doi:10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2022.09.001.

高速铁路与城市环境污染

——基于中国285个城市面板数据的分析

张帆^{1,2}, 姚树洁², 汪锋²

(1. 山西财经大学 经济学院, 山西 太原 030006; 2. 重庆大学 经济与工商管理学院, 重庆 400044)

摘要:在中国城市化和工业化进程中,环境污染一直是最受关注的问题之一。习近平总书记在党的十九大报告中强调要聚焦蓝天保卫战等重点任务,持续推进污染防治,加强生态系统保护修复,壮大绿色环保产业,大力推动绿色发展,使生态环境质量继续得到改善。相比中国城市内部交通污染物带来严重的“城市病”问题,以电力驱动的高速铁路列车是最符合可持续性发展的绿色交通基础设施之一。文章通过构建新的高铁与环境污染关系的理论分析框架,利用广义空间二段最小二乘法及2010—2018年全国285个城市的面板数据对两者之间的关系进行实证分析。不仅系统地分析了高铁是否对空气污染、单位GDP工业氮氧化物排放量及单位GDP工业废水排放量产生重大影响,还分析了这种影响发生的传导机制。实证结果显示:我国城市环境污染存在显著的空间溢出效应,意味着环境污染治理要遵循区域联防联控的策略;高铁对环境污染有明显的抑制作用,相对于没有高铁的城市,高铁连通城市PM_{2.5}年均浓度、单位GDP工业氮氧化物排放量及单位GDP工业废水排放量分别降低1.5%、11.4%和12%;东部和西部地区高铁对环境污染的抑制作用显著,非中心城市高铁对环境污染的影响大于中心城市,表明高铁网络能够在一定程度上缩小城市生态效率不平衡,有助于环境协调发展;高铁通过显著提高中国城市全要素生产率,进而抑制环境污染。文章的研究为实现高铁发展对城市环境污染的抑制作用提供

基金项目:国家自然科学基金青年项目“新型基础设施建设对绿色创新的影响机制与实证研究”(72203027);国家社会科学基金重大项目“习近平总书记关于扶贫工作的重要论述的理论和实证基础及精准扶贫效果研究”(18ZDA005);国家自然科学基金项目“高铁对中国区域经济增长及趋同的影响研究”(71673033);国家自然科学基金项目“基于环境效用异质性的收入分配对雾霾污染的影响机制与治理研究”(71973019);教育部中央高校科研建设项目(2020CDJSK02ZH02, 2020CDJSK02PT26, 2021CDSKXYJG007)

作者简介:张帆,山西财经大学经济学院,Email:zhangfan514@hotmail.com;汪锋,重庆大学经济与工商管理学院教授,Email:wangfeng2008@cqu.edu.com。

通信作者:姚树洁,重庆大学经济与工商管理学院教授,长江学者特聘教授,辽宁大学李安民经济研究院院长,城市化与区域创新发展研究中心秘书长,Email:yaoshujie@cqu.edu.com。

了理论借鉴,为建设和发展高铁经济提供了以下政策参考:中国高铁是改变城市空间地理格局的重要基础设施,环境污染存在显著的空间溢出效应,因此从城市的空间地理视角思考环境污染的区域联防联控策略,特别是考虑在学术探讨和政策实践中均较少讨论的高铁网络布局对环境污染的作用具有重要的理论和实践价值;高铁开通对抑制城市环境污染的作用具有异质性,进一步在中西部地区和非中心城市推进新型交通基础设施建设,促进城际运输网络现代化和效率提升,不仅有助于当地经济发展,同时也有利于保护生态环境。

关键词: 高速铁路;环境污染;绿色全要素生产率;空间二段最小二乘法

中图分类号: F061.5; F124.3; X196 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-5831(2023)01-0024-14

党和政府高度关注环境污染治理问题。党的二十大报告提出,我们要推进美丽中国建设,坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,统筹产业结构调整、污染治理、生态保护、应对气候变化,协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展……加快推动产业结构、能源结构、交通运输结构等调整优化。习近平总书记在党的十九大报告中强调要聚焦蓝天保卫战等重点任务,持续推进污染防治,加强生态系统保护修复,壮大绿色环保产业,大力推动绿色发展,使生态环境质量继续得到改善。国务院分别于 2021 年、2018 年和 2013 年发布了《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》和《大气污染防治行动计划》,推动污染防治的措施之实、力度之大、成效之显著前所未有。交通污染物排放是中国各大城市污染的关键影响因素之一,带来严重的“城市病”问题^[1]。相较于高速公路、航空运输等城市外部交通基础设施,高铁更加适合中国幅员辽阔、人口众多的国情^[2]。以电力驱动的高铁列车具有低污染特征,被公认为是最符合可持续性发展的绿色交通基础设施^[3]。更为重要的是高铁通过改写城市之间的时空关系,提高城市间可达性,加速资本、劳动力、技术生产要素流通速度^[4],极大地促进城市经济系统的生产效率提高,进而能够有效抑制环境污染。我们利用最新的城市统计数据初步发现,最近几年中国城市的高铁发展与环境污染存在相关关系。目前,关于中国高铁对环境的影响研究大多使用双重差分法,而且对高铁的环境污染异质性产生的机制讨论不够深入。本文通过构建新的高铁与环境污染关系的理论分析框架,利用空间计量模型对两者之间的关系以及影响机制进行实证分析,为我国通过城市外部交通基础设施建设治理环境污染,实现经济绿色发展提供新的思路。

一、文献回顾

(一) 交通基础设施与环境污染

交通问题已成为我国经济发达地区改善环境质量的重要障碍,汽车尾气是中国重点城市空气污染的主要来源之一^[5]。尤其在大都市地区,机动车尾气排放与其城市空气污染问题密切相关^[6]。对于人口规模较大的城市,路面交通资源因需求过大而较易出现供不应求,进而引发交通拥堵并恶化空气污染。机动车尾气排放导致公路系统环境效率低下^[7]。

相比机动车,轨道交通具有显著的规模效应,无论在降低路面交通拥堵程度,还是改善城市空气质量方面都具有较大优势^[8]。Li 等的研究表明,地铁密度提高 1 个标准差,可以使空气质量提高 2%^[9]。梁若冰和席鹏辉基于 RDID 方法估计中国 14 个城市新开通 45 条线路对空气污染的影响,发现轨道交通具有显著的污染治理效应^[10]。铁路运输对环境效率具有显著的积极影响^[11],在铁路

运输使用率较高的地区,这种影响还在增强^[12]。

高铁和其他传统运输方式相比,能耗量和温室气体排放量均为最低,是符合可持续性发展的绿色基础设施^[13-14]。在中短途路线上尽可能用高铁代替航空服务能够有效减少空气污染,对环境改善具有显著的正向作用^[15-16]。通过构建双重差分模型,祝树金等^[17]、范小敏和徐盈之^[18]证明高铁对西部地区环境污染的抑制效应比东中部更明显。而张华和冯烽则发现高铁的减霾效应在东中部、沿海、非资源型及创新水平高的城市更显著^[19]。张永庆和张金月运用倾向得分匹配倍差法发现,高铁开通后,长江经济带流域环境污染下降了4.2%^[20]。而孙学涛、张广胜的研究则认为,高铁开通减少富裕城市的污染排放,但加重了贫困城市的环境污染^[21]。

(二) 交通基础设施、全要素生产率与环境污染

交通基础设施改善加快人员流动、带动固定资产投资,从而引致更为充分的市场竞争,促使资源流向更具效率的地方,有利于细分市场,提高分工和专业化水平及经营规模,从而提高全要素生产率^[22]。铁路提速缩短地区之间人员交流时间,减少技术传输过程中不必要的损耗,降低传播过程中的内容失真和漏损^[23],对沿途企业技术进步和效率改进发挥积极作用,促进全要素生产率增长。刘秉镰等指出2001—2007年铁路基础设施对全要素生产率有着持续显著的正向影响,铁路和公路基础设施存量的增加共带动中国全要素生产率增长了11%,占全要素生产率整体增幅的59%^[24]。施震凯等发现铁路提速对沿途企业技术进步和效率改进发挥了积极作用,对非国有控股、沿海地区、出口型企业具有更为显著的生产率促进效应^[25]。孙广召和黄凯南的研究表明高铁开通对不同地区全要素生产率增长率影响存在差异,对区域中心城市地区和非中心城市地区有正向作用,对全国性中心城市地区为负向作用^[26]。而张梦婷等则认为,高铁开通产生了明显的虹吸效应,对外围城市企业生产率有负向影响^[27]。生产率提高对改善环境污染有显著正向影响^[28]。李国璋等利用1978—2007年相关数据,从全要素能源效率、产业结构和能源结构角度,通过逐步回归法探讨这些因素对环境污染的影响,研究结果表明要降低环境污染必须提高能源效率^[29]。于峰等发现生产率提高、环保技术创新与推广降低了我国环境污染^[30]。

(三) 边际贡献

总结已有文献我们发现,高铁对环境污染的影响研究尚存在可补充的空间。第一,对高铁及雾霾污染问题的探讨大多使用双重差分法。考虑到空气及水资源是流动的,如果不考虑其空间相关性,对环境污染的研究可能会有偏误,因此本文采用空间二段最小二乘法(Generalized Spatial Two-stage Least Square, GS2SLS),能够控制环境污染的空间溢出效应,并解决可能存在的遗漏变量、测量误差及双向因果问题。第二,本文不仅系统地分析了高铁是否对空气污染、单位GDP工业氮氧化物排放量及单位GDP工业废水排放量产生重大影响,还分析了这种影响发生的传导机制。

二、高铁对环境污染影响的理论分析

高铁对环境污染的主要影响为其环境外部性。一方面,它使劳动力、资源和技术等生产要素的市场与企业之间更加容易接近,扩大人力资本、物质资本和技术的选择范围,有利于获得各种优质廉价的生产要素,优化投资,提高资源配置效率,减少污染排放。另一方面,高铁使企业能够更快、更方便地接近销售市场,了解市场需求并生产适销产品,有利于提高资源利用和分配效率,减少资源浪费,从而减少污染物排放。

考察环境污染与经济产出之间的关系存在两种思路:其一是将环境污染的治理费用作为要素投入,直接将环境污染作为生产函数的投入要素纳入生产函数,但这种方法不利于厘清资本、劳动、技术等其他要素投入对环境污染和污染治理的作用,因此与现实社会生产过程存在脱节;另一种思路是将环境污染作为一种负效用产出,如果希望减少环境污染,就需要相应地减少期望产出,或者将一部分经济资源用于污染治理^[31]。本文构造要素资源投入与产出、污染之间的技术结构关系,并考察高铁是如何通过提高资源配置效率来减少环境污染的。用产出集合模拟环境技术:

$$P(\mathbf{x}) = \{(\mathbf{y}, \mathbf{b}) : \mathbf{x} \text{ can produce } (\mathbf{y}, \mathbf{b})\}, \mathbf{R}_+^N \quad (1)$$

集合 $P(\mathbf{x})$ 是指 N 种要素投入 \mathbf{x} 所能生产的“好”产品与“坏”产品产量的所有组合。投入向量 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N) \in \mathbf{R}_+^N$; “好”产品向量 $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_M) \in \mathbf{R}_+^M$; “坏”产品 $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_J) \in \mathbf{R}_+^J$, 指生产过程中排放的污染物。假定投入产出向量为: $(x_{(K \times N)}^t, y_{(K \times M)}^t, b_{(K \times J)}^t)$, 可以构造满足上述条件的环境技术:

$$P(x^t) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^K z_k y_{im}^t \geq y_{k,m}^t, m = 1, \dots, M; \sum_{k=1}^K z_k b_{k,j}^t, j = 1, \dots, J; \\ \sum_{k=1}^K z_k x_{k,n}^t \geq x_{k,l}^t, n = 1, \dots, N; z_k \geq 0, k = 1, \dots, K \end{array} \right\} \quad (2)$$

高铁运行加快人员和信息流动速度,使沿线城市更加容易吸引人才,获得先进的管理方法和环境技术,从而体现在高铁开通前后资源配置效率的提高上,即:

$$\begin{cases} y_{(K \times M)}^{t_1} < y_{(K \times M)}^{t_2} \\ b_{(K \times J)}^{t_1} < b_{(K \times J)}^{t_2} \end{cases}$$

其中, t_1 代表开通高铁之前, t_2 代表开通高铁之后。

因此,开通高铁通过提高资源配置效率对环境影响包含两方面的含义:一是在产出不变情况下,开通高铁通过提高资源配置效率减少污染物排放量;二是当经济持续增长时,即使污染物排放总量仍然在增加,开通高铁通过提高资源配置效率,仍然可以降低单位产出污染物排放。

也有学者研究发现高铁对环境质量具有负向效应。比如,高铁的原材料,包括混凝土、钢铁等均产自高能耗生产部门,其生产过程会排放大量废水、废气和固体污染物。另外,高铁在运行过程中会对沿途居民区造成一定的噪声污染^[32]。但是,这些研究在很大程度上忽略了高铁在减少其他运输方式(如汽车、飞机和传统铁路系统)污染方面的替代作用。准确研究高铁对环境的影响必须考虑其对环境污染的直接效应和替代效应。如果替代效应大于直接效应,那么高铁将有利于改善环境质量,这正是本研究的重点。根据以上的理论分析,我们可以提出以下两个理论假设。

假设 1: 高铁对环境污染具有显著的负向作用,能够显著减低单位 GDP 环境污染量。

假设 2: 高铁能够提高绿色全要素生产率(GTFP),进而抑制环境污染。

三、实证模型

本文运用空间计量技术构造基于全国 285 个城市的地理距离空间权重矩阵,使用 GS2SLS 考察 2010—2018 年间高铁开通对环境污染的影响。我们采用以下基础模型:

$$\ln \text{Pol}_{it} = \beta_0 + \rho \mathbf{W} \cdot (\ln \text{Pol}_{it})' + \beta_1 \text{HSR}_{it} + \beta_2 X_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中:下标 i 和 t 分别代表城市和年份,Pol 表示环境污染,在实证中分别由 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度值

($PM_{2.5}$)、单位 GDP 工业氮氧化物排放量(NO_x)、单位 GDP 工业废水排放量(waw)表示。 W 为基于全国 285 个城市的地理与经济距离嵌套空间权重矩阵。 HSR 为是否开通高铁的哑元变量。若某城市某年开通了高铁, $HSR_{it}=1$,否则 $HSR_{it}=0$ 。如 HSR 的估计系数 β_1 显著为负,说明高铁城市比非高铁城市环境污染减小。 α_i 为与第 i 个城市特征相关的误差项, γ_i 为时间误差项, ε_i 为随机误差项。

X 为本文考虑的其他与高铁及环境污染相关的控制变量。参考孙传旺等^[1]、Yang等^[13]以及张明志等^[16],选择:(1)人均GDP($pgdp$)及其二次项($pgdp^2$),采用2010年不变价格处理。(2)绿化水平(gcr)——城市建成区绿化覆盖率。(3)城镇化率(urb),用城镇人口占总人口的比重来衡量。(4)就业人员密度(emp),用单位面积就业人员数来衡量。(5)机场($airport$),某城市是否拥有民用机场哑元变量。(6)汽车保有量(car),用每百人汽车保有量来衡量。

考虑到环境污染问题具有明显的空间溢出效应,我们运用空间计量技术进行模型估计以克服空间自相关问题。构造基于全国 285 个城市地理与经济距离嵌套权重矩阵(W)。 W 的计算公式为 $W=\lambda W_1+(1-\lambda)W_2$,其中 W_1 为地理距离空间权重矩阵, W_1 元素 w_{ij} 表示城市 i 与城市 j 距离的倒数。 λ 为地理距离空间权重矩阵的权重,令其取值为0.5。 W_2 为经济距离空间权重矩阵,其矩阵的构成元素 w'_{ij} 计算公式为:

$$w'_{ij} = \begin{cases} 1/|e|, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (4)$$

其中, e 为城市 i 与城市 j 之间人均GDP之差,以此表示经济距离。

首先进行初步的空间效应检验,判断地区变量间是否存在空间相关性,即计算莫兰 I 指数(Moran's I)。莫兰 I 指数本质上为空间自相关指数,可视为观测值与其空间滞后的相关系数。其取值一般介于-1到1之间,大于0表示正相关,小于0表示负相关。如果莫兰 I 指数显著不为0,则说明存在空间效应,需进一步进行空间计量分析。

估计方法使用GS2SLS,该方法选取各解释变量及其空间滞后项作为工具变量,并基于2SLS方法估计空间面板模型,能够对高铁或环境污染的空间溢出效应及内生性予以控制。即使在异方差与正态分布的情况下,依然是一致估计。本文在对基准回归估计时选择了最高三阶空间滞后项作为工具变量。

在样本量选择和时间跨度选择中,考虑到2009年12月26日全国第二条高速列车,也是第一条由字母G开头的高速列车武广高铁开通运营,结合可获得的数据,本文研究的时间区间定为2010—2018年。在样本筛选过程中,剔除了在研究区间内新设立的地级市(如海南省三沙市、贵州省铜仁市等),在研究区间内撤销的地级市(如安徽省巢湖市等),或是在研究区间内存在严重数据缺失情况的地级市(如西藏自治区各个城市),最终样本为包括四个直辖市在内的共285个地级及以上城市。

$PM_{2.5}$ 年均浓度数据来源于哥伦比亚大学社会经济数据和应用中心(SEDAC, <http://sedac.ciesin.columbia.edu/>)发布的基于光学卫星空间遥感获得的年全球 $PM_{2.5}$ 浓度年均值栅格地图,利用arcGIS软件将其解析为中国所有城市的年均 $PM_{2.5}$ 浓度数据。此数据更新至2016年,因此考察全国285个城市高铁对雾霾污染的影响时,时间区间定为2010—2016年,但后文稳健性检验中将根据可得数据补充2014—2018年全国112个环保重点城市中高铁对雾霾污染的影响。中国城市单位GDP工业氮氧化物排放量(NO_x)及单位GDP工业废水排放量(waw)数据通过《中国城市统计年

鉴》2011—2019 年获取并计算整理。实证中的其他控制变量, pgdp , gcr , urb , emp 数据来源于《中国城市统计年鉴》2011—2019 年,以及各省统计年鉴。 airport 数据来源于中国民航总局(CAAC)网站发布的“官方民用航空业发展统计公报(2010—2018)”。 car 数据来源于 CEIC 数据库。

在前文理论和实证研究基础上,还将深入讨论高铁对环境影响的作用机制,即高铁是否通过提高 GTFP 来减轻环境污染。借助中介效应模型^[33],构建如下三个回归方程来识别检验高铁对环境影响的作用机制:

$$\ln\text{Pol}_{it} = \theta_0 + \tau \mathbf{W} \cdot (\ln\text{Pol}_{it})' + \theta_1 \text{HSR}_{it} + \theta_2 X_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

$$\ln\text{GTFP}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{HSR}_{it} + \beta_2 X'_{it} + \alpha'_i + \gamma'_t + \varepsilon'_{it} \quad (6)$$

$$\ln\text{Pol}_{it} = \delta_0 + \xi \mathbf{W} \cdot (\ln\text{Pol}_{it})' + \delta_1 \text{HSR}_{it} + \delta_2 \text{GTFP}_{it} + \delta_3 X_{it} + \alpha''_i + \gamma''_t + \varepsilon''_{it} \quad (7)$$

Pol 与 HSR 定义同前文, GTFP 为绿色全要素生产率, X 为其他控制变量。 α_i 为与第 i 个城市特征相关的误差项, γ_t 为时间误差项, α_{it} 为随机误差项。依然使用基于空间权重矩阵 \mathbf{W} 的 GS2SLS 法进行回归。式(6)中, β_1 的期望估计系数为正。式(7)中, δ_1 和 δ_2 的期望估计系数为负。根据中介效应模型原理,若系数 θ_1 , β_1 , δ_2 均显著,且 δ_1 较 θ_1 的显著性或绝对值有所下降,则表明存在中介效应,即高铁通过提高 GTFP,进而抑制环境污染。

在计算 GTFP 时,考虑到投入产出的松弛问题, Tone^[34] 提出 SBM(Slack Based Measure)模型测量被评价决策单元(DMU, Decision Making Unit)的效率值。相较经典的径向 DEA 模型,SBM 模型中非有效 DMU 不必沿到原点的射线方向进行改进,即不需要同比例缩减投入或扩大产出,可以用于非期望产出存在下的经济效率测算。本文将每个城市都视为一个生产决策单元来构建生产性前沿,采用考虑非期望产出和松弛问题的非径向、非角度 SBM 模型来测算 2010—2018 年中国 285 个地级及以上城市的绿色全要素生产率。产出指标包括期望产出和非期望产出。投入要素包括资本 K 、劳动力 L 、表征资源消耗的工业用电量 EC 和表征环境污染的二氧化硫排放量 SO_2 四种要素。由于统计年鉴中并未直接公布各地的资本存量数据,因此需要进行估算。在计算中以永续盘存法为基础,参考张军等^[35]的方法,以 2010 年为基期,对我国 285 个城市资本存量进行估算。表 1 给出了 2010—2018 年全国 285 个城市面板数据的描述性统计。

表 1 变量描述性统计

变量	单位	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
$\ln\text{PM}_{2.5}$	颗粒物含量/立方米	1 995	3.780	0.468	1.480	4.721
$\ln\text{NO}_x$	吨/万元	2 399	-6.166	1.992	-6.289	-0.860
$\ln\text{waw}$	吨/万元	2 560	-8.074	1.326	-14.220	-2.319
HSR	—	2 565	0.387	0.487	0	1
$\ln\text{pgdp}$	元	2 565	12.325	0.380	10.362	15.675
$\ln\text{gcr}$	%	2 565	-0.943	0.382	-5.627	1.353
$\ln\text{urb}$	%	2 565	-0.028	0.080	-0.825	-0.001
$\ln\text{emp}$	万人/平方公里	2 559	-6.330	1.950	-14.565	-1.449
airport	—	2 565	0.357	0.479	0	1
$\ln\text{car}$	辆/百人	2 565	2.099	0.942	-1.295	6.942
$\ln\text{GTFP}$	—	2 549	-0.175	0.093	-0.449	0

四、高铁对城市环境污染影响的估计结果

(一) 基准回归结果

空间计量模型首先需要计算莫兰 I 指数,以检验空间计量分析是否适用于该模型。由表 2 各个年份中国城市雾霾污染的莫兰 I 检验结果可见,各个年份莫兰 I 值均通过 1% 水平下的显著性检验,且均为正值,证明我国城市雾霾污染在空间上存在明显的正自相关关系。而且莫兰 I 值的整体趋势是随着时间推移不断增加,这表明地区间雾霾污染的空间相关性在不断上升。2010—2018 年单位 GDP 氮氧化物排放量以及工业废水排放量变量的莫兰 I 检验结果,也显示出明显的空间相关性,由于篇幅原因不再列出。可以判断,本文运用空间计量模型检验我国高铁开通与环境污染关系较之传统计量方法更为合适。

表 2 全国 285 个城市雾霾污染的莫兰 I 值计算结果

	莫兰 I 值	标准差	P 值
2010	0.191	0.007	0.000
2011	0.192	0.006	0.000
2012	0.188	0.006	0.000
2013	0.195	0.007	0.000
2014	0.189	0.008	0.000
2015	0.219	0.007	0.000
2016	0.213	0.007	0.000

表 3 报告了全国 285 个城市基于空间权重矩阵 W 模型(3)的 GS2SLS 估计结果,由表中 $W \times \ln Pol$ 的估计系数可以看到,被解释变量空间滞后项的系数始终在 1% 的水平上显著,验证了环境污染存在显著的空间溢出效应,意味着环境污染治理要遵循区域联防联控的策略。

其中第 2 列 HSR 的估计系数(-0.015)在 5% 的水平上显著为负,表明高铁能改善城市环境质量。相对没有高铁的城市,全国高铁城市的 $PM_{2.5}$ 年均值降低了 1.5%。第 3 列和第 4 列 HSR 的估计系数显著为负,同样表明高铁有利于减少工业氮氧化物及工业废水排放量。相对非高铁城市,高铁城市单位 GDP 工业氮氧化物及单位 GDP 工业废水排放量分别减少 11.4% 和 12%。城市绿化和城市化水平对抑制环境污染也有积极作用,但其作用没有高铁那么明显。汽车拥有量增加一定程度上会加剧环境污染,但对不同污染物的影响程度有明显差异。

(二) 异质性分析结果

表 4 报告了东、中、西部地区基于空间权重矩阵 W 模型(3)的 GS2SLS 估计结果。表中结果表明,各地区被解释变量空间滞后项的系数显著为正,验证了环境污染在各地存在空间溢出效应。

第 2—第 4 列中 HSR 的估计系数都显著为负,表明我国东部地区高铁能够有效抑制雾霾污染、减少工业氮氧化物及工业废水排放量。东部地区开通高铁的城市相对于没有开通高铁的城市, $PM_{2.5}$ 年均浓度、单位 GDP 工业氮氧化物排放量和单位 GDP 工业废水排放量分别降低了 1.5%, 47.8% 和 32.1%。中部地区高铁使单位 GDP 工业废水排放量明显降低 7.3%,而对雾霾污染及工业氮氧化物排放量的影响不明显。西部地区开通高铁的城市, $PM_{2.5}$ 年均浓度和单位 GDP 工业氮氧

化物排放量分别降低了 1.5% 和 43.2%。

表 3 高铁对环境污染影响的回归结果(全国 285 个城市)

DV = lnPol	PM _{2.5} (2010—2016) ^①	NO _x (2010—2018)	废水 (2010—2018)
W×lnPol	2.347 *** (0.049)	2.500 *** (0.195)	2.365 *** (0.120)
HSR	-0.015 ** (0.008)	-0.114 ** (0.061)	-0.120 ** (0.054)
lnpgdp	-0.010 * (0.006)	-0.036 (0.112)	-0.197 *** (0.048)
(lnpgdp) ²	0.001 * (0.0004)	0.002 (0.007)	0.011 *** (0.003)
lngcr	-0.006 * (0.003)	-0.068 ** (0.036)	-0.035 * (0.020)
lnurb	0.117 (0.080)	0.386 (1.300)	-0.629 (0.558)
lnemp	0.001 (0.001)	0.017 (0.024)	0.012 (0.010)
airport	-0.013 * (0.008)	-0.065 (0.130)	-0.002 (0.056)
car	-0.010 *** (0.004)	-0.005 (0.058)	-0.003 * (0.002)
constant	0.333 *** (0.080)	0.225 (0.697)	0.099 (0.454)
adj. R ²	0.448	0.284	0.338
Hausman test	1050.422 (0.000)	-29.837 (0.000)	576.360 (0.000)
Wald test	686.499 (0.000)	230.799 (0.000)	600.229 (0.000)

注: 括号中的统计量为标准误。***, ** 和 * 分别表示在 1%, 5% 和 10% 的水平显著。DV = 因变量。

此外,我们将所有城市分为中心城市(33 个)和非中心城市(249 个)^②,基于模型(3)进行回归。结果表明对于非中心城市,高铁显著抑制了环境污染。而对于 36 个国家及地区中心城市子样本,高铁能够抑制雾霾污染,但对工业氮氧化物及工业废水排放的影响不显著。非中心城市高铁带来的污染减轻表明高铁网络能够在一定程度上缩小城市生态效率不平衡,有助于环境协调发展。在中心城市,高铁未能对污染产生显著影响可以这样解释:因为中心城市一般都是全国性或区域性经济增长和人口集聚中心,其内部污染很难受到外部交通基础设施变化的影响。然而,高铁的出现一般来说会增加外部人口流入中心城市的数量,在这样的情况下并没有增加中心城市的污染,说明高铁发展对这些城市的污染排放作用是中性的。考虑到大多数城市(非中心城市比中心城市多得多)污

①PM_{2.5} 年均浓度数据来源于哥伦比亚大学社会经济数据和应用中心(SEDAC),此数据更新至 2016 年。

②将《国家城市系统规划(2010—2020 年)》(由住建部、国家发展和改革委员会、卫生健康委员会以及教育部等 19 个中央部委共同制定)中确定的 9 个国家中心城市,包括北京、天津、上海、广州、重庆、成都、武汉、郑州和西安,以及《国家社会和经济发展规划》中规定的 27 个具有独立规划地位的城市以及省会城市,包括石家庄、沈阳、大连、长春、太原、呼和浩特、哈尔滨、济南、青岛、南京、杭州、厦门、深圳、苏州、宁波、合肥、福州、南昌、长沙、南宁、海口、贵阳、昆明、兰州、西宁、银川和乌鲁木齐,共同定义为中心城市。其余 249 个城市定义为非中心城市。

染下降显著得利于高铁的发展,说明高铁不仅有利于全国环境的改善,也有利于从中心城市分流人口及环境压力^③。

表4 高铁影响环境污染的区域差异敏感性分析

DV=lnPol	东部			中部			西部		
	PM _{2.5}	NO _x	废水	PM _{2.5}	NO _x	废水	PM _{2.5}	NO _x	废水
W×lnPol	3.986*** (0.102)	4.431*** (0.488)	3.528*** (0.330)	3.630*** (0.128)	3.605*** (0.355)	3.806*** (0.304)	6.458*** (0.299)	6.926*** (0.647)	6.961*** (0.638)
HSR	-0.015** (0.007)	-0.478** (0.201)	-0.321*** (0.083)	-0.018 (0.013)	-0.244 (0.199)	-0.073* (0.040)	-0.015** (0.008)	-0.432* (0.236)	-0.071 (0.135)
constant	0.619*** (0.090)	0.111 (0.996)	-0.336 (0.679)	0.927 (0.132)	-0.149 1.271)	-1.513** (0.686)	0.183 (0.163)	-1.529 (1.167)	-0.091 (0.956)
CV	是	是	是	是	是	是	是	是	是
adj. R ²	0.319	0.415	0.345	0.292	0.392	0.133	0.458	0.396	0.295
Hausman test	3868.27 (0.000)	43.355 (0.000)	213.557 (0.000)	626.668 (0.000)	196.980 (0.000)	135.145 (0.000)	250.865 (0.000)	137.250 (0.000)	177.367 (0.000)
Wald test	595.56 (0.000)	142.491 (0.000)	272.298 (0.000)	243.066 (0.000)	161.075 (0.00)	272.566 (0.000)	1355.663 (0.000)	143.002 (0.000)	157.571 (0.000)

注:括号中的统计量为标准误。***, **和*分别表示在1%, 5%和10%的水平显著。DV=因变量, CV=控制变量。

(三) 机制检验结果

表5报告了全国层面基于中介效应模型(5)一(7)的估计结果。第2列HSR的回归系数显著为正,表明高铁能够促进GTFP增长。第3、5、7列HSR对雾霾污染、工业氮氧化物排放量及工业废水排放量影响的估计系数即表3中对应的基准估计系数。第4、6、8列的结果为公式(7),同时加入HSR及GTFP变量后,考察其对雾霾污染、工业氮氧化物排放量及工业废水排放量影响的估计系数。其中,HSR估计系数的绝对值及显著性大幅度下降,GTFP的估计系数均显著为负,符合中介变量的判断标准。因此可以得出如下结论,高铁促进了GTFP提高,进而有效抑制环境污染,即GTFP是高铁抑制环境污染的作用机制。

表5 高铁影响环境污染的作用机制检验结果(全国285个城市)

	DV=lnGTFP	DV=lnPM _{2.5}		DV=lnNO _x		DV=lnwaw	
HSR	0.009*** (0.003)	-0.015** (0.008)	-0.005 (0.009)	-0.114** (0.061)	-0.026 (0.074)	-0.120** (0.054)	-0.089 (0.101)
lnGTFP	—	—	-0.264*** (0.097)	—	-3.997*** (1.441)	—	-2.402*** (0.663)
CV	是	是	是	是	是	是	是
adj. R ²	0.344	0.448	0.403	0.284	0.294	0.338	0.305
Haus test	298.175 (0.000)	1050.422 (0.000)	927.854 (0.000)	-29.837 (0.000)	593.347 (0.000)	576.360 (0.000)	492.893 (0.000)
Wald test	1175.268 (0.000)	686.499 (0.000)	712.619 (0.000)	230.799 (0.000)	267.853 (0.000)	600.229 (0.000)	621.786 (0.000)

注:括号中的统计量为标准误。***, **和*分别表示在1%, 5%和10%的水平显著。DV=因变量, CV=控制变量。

③由于文章篇幅原因,此部分回归结果未列出,可以发邮件索要。

表 6 上半部分报告了东部地区高铁影响环境污染的作用机制检验结果。第 2 列 HSR 的估计系数在 1% 的水平上显著为正,表明高铁对 GTFP 有显著的正向影响。第 4、6、8 列为同时加入 HSR 及 GTFP 变量后的估计结果,HSR 估计系数的绝对值及显著性大幅度下降,GTFP 的估计系数均显著为负。东部地区高铁通过促进 GTFP 提高,进而有效抑制环境污染。表 6 下半部分的回归结果也表明,西部地区高铁通过促进 GTFP 提高,有效抑制了环境污染。

表 6 高铁影响环境污染的作用机制的区域差异敏感性分析(东部地区 115 个城市,西部地区 61 个城市)

	DV = lnGTFP	DV = lnPM _{2.5}		DV = lnNO _x		DV = lnwaw	
东部							
HSR	0.010*** (0.004)	-0.015** (0.007)	-0.004* (0.002)	-0.478** (0.201)	-0.175 (0.261)	-0.321*** (0.083)	-0.235 (0.309)
lnGTFP	—	—	-1.841*** (0.614)	—	-6.807*** (1.862)	—	-4.166*** (1.942)
CV	是	是	是	是	是	是	是
adj. R ²	0.319	0.319	0.382	0.415	0.319	0.345	0.388
Haus test	298.499 (0.000)	3 868.271 (0.000)	2 564.423 (0.000)	43.355 (0.000)	134.457 (0.000)	144.501 (0.000)	213.557 (0.000)
Wald test	496.276 (0.000)	595.560 (0.000)	573.916 (0.000)	142.491 (0.000)	189.523 (0.000)	272.298 (0.000)	278.617 (0.000)
西部							
HSR	0.004** (0.002)	-0.015** (0.008)	-0.014 (0.018)	-0.432* (0.236)	-0.231 (0.262)	-0.071 (0.135)	-0.062 (0.083)
lnGTFP	—	—	-1.956*** (0.876)	—	-3.244* (1.716)	—	-0.736 (0.906)
CV	是	是	是	是	是	是	是
adj. R ²	0.299	0.458	0.495	0.396	0.349	0.295	0.290
Haus test	145.522 (0.000)	250.865 (0.000)	265.468 (0.000)	137.250 (0.000)	197.644 (0.000)	177.367 (0.000)	206.540 (0.000)
Wald test	589.652 (0.000)	1 355.663 (0.000)	1 598.798 (0.000)	143.002 (0.000)	249.456 (0.003)	157.571 (0.000)	190.703 (0.000)

注:括号中的统计量为标准误。***, **和*分别表示在1%, 5%和10%的水平显著。DV=因变量, CV=控制变量。

(四) 稳健性检验结果

为进一步确保研究结论的可靠性,我们进行了一系列稳健性检验。首先,利用系统 GMM 方法,修正遗漏变量偏差并进一步避免潜在的内生性问题。模型设定如下:

$$\ln\text{Pol}_{it} = \beta_0 + \beta_1(\ln\text{Pol}_{i,t-1}) + \varphi_1\text{HSR}_{it} + \varphi_2X_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

其中, $\text{Pol}_{i,t-1}$ 表示环境污染滞后一期,其他变量如上文定义。

由表 7 结果可知,各模型中被解释变量的一阶滞后项系数在 1% 水平上显著,表明前期环境污

染对当期环境污染有显著的影响。由 HSR 的回归系数显著为负可得,高铁对雾霾污染、工业氮氧化物排放量以及工业废水排放量均有显著的抑制作用。AR(2)的估计系数不显著,表明不存在二阶序列相关。Sargan 检验的估计系数不显著,因此,系统 GMM 估计中的工具变量不存在过度识别问题,模型设定是合理的。

其次,基于模型(3),将地理与经济距离嵌套空间权重矩阵 W 替换为地理距离权重矩阵 W_1 进行第二项稳健性检验。最后,利用《中国统计年鉴》2015—2019年公布的全国112个环保重点城市^④的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度数据,考察最近5年高铁对雾霾污染的影响及其作用机制。同样考察了这112个城市高铁对工业氮氧化物排放量及工业废水排放量的影响及其作用机制。各项检验结果依然是稳健的^⑤。

表7 稳健性检验结果:系统 GMM 方法(全国 285 个城市)

DV = lnPol	$PM_{2.5}$ (2010—2016)	NO_x (2010—2018)	废水(2010—2018)
L1. lnPol	0.324*** (0.039)	0.060* (0.034)	0.131* (0.070)
HSR	-0.188*** (0.037)	-0.911*** (0.277)	-0.946*** (0.197)
constant	3.266*** (0.345)	-3.651*** (1.290)	-4.054** (1.953)
CV	是	是	是
Arellano-Bond AR(1)	-9.054***	-7.433***	-3.799***
Arellano-Bond AR(2)	-1.285	0.253	1.282
Sargan 检验	263.741	153.744	205.010

注:括号中的统计量为标准误。***, **和*分别表示在1%,5%和10%的水平显著。DV=因变量,CV=控制变量。

五、结论

在中国城市化和工业化进程中,环境污染一直是备受关注的问题之一。本文选择近年来中国基础设施建设的亮点高速铁路作为研究对象,研究了城际交通基础设施对城市环境质量的影响及其背后的作用机制。本文的理论探索和实证分析发现高铁开通能够有效改善城市环境质量,相对没有高铁的城市,高铁连通城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度、单位 GDP 工业氮氧化物排放量及单位 GDP 工业废水排放量分别降低 1.5%、11.4%和 12%。但高铁对环境污染的影响具有明显的区域异质性,东、中、西部地区和中心城市、非中心城市高铁带来的环境改善各不相同,东部地区非中心城市在前期的城际交通基础设施投资中获得的环境改善回报最大。进一步基于中介效应模型的实证探索发现,中国高铁主要通过新技术的引入和资源配置效率的提高,促进城市 GTFP 提高,进而有效抑制城市环境污染。

本文的研究结论为通过进一步加强高铁网络建设,促进高质量发展和有效抑制环境污染提供

^④包括 51 个东部城市、34 个中部城市和 27 个西部城市。

^⑤由于文章篇幅原因,此部分回归结果未列出,可以发邮件索要。

了理论支撑:(1)中国高铁是改变城市空间地理格局的重要基础设施,环境污染存在显著的空间溢出效应,因此从城市的空间地理视角思考环境污染的区域联防联控策略,特别是考虑在学术探讨和政策实践中均较少讨论的高铁网络布局对环境污染的作用具有重要的理论和实践价值;(2)高铁开通对抑制城市环境污染的作用具有异质性,进一步在中西部地区和非中心城市推进新型交通基础设施建设,促进城际运输网络现代化和效率提升,不仅有助于当地经济发展,同时也有利于保护生态环境。

参考文献:

- [1] 孙传旺,罗源,姚昕. 交通基础设施与城市空气污染:来自中国的经验证据[J]. 经济研究,2019(8):136-151.
- [2] YAO S J,ZHANG F,WANG F,et al. High-speed rail and urban economic growth in China after the global financial crisis[J]. *China & World Economy*,2019,27(2):44-65.
- [3] GIVONI M. Environmental benefits from mode substitution: Comparison of the environmental impact from aircraft and high-speed train operations[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*,2007,1(4):209-230.
- [4] ZHANG F,WANG F,OU J H,et al. Role of high-speed rail on social fixed assets investments in China[J]. *Journal of Chinese Economic and Business Studies*,2019,17(3):221-244.
- [5] WALSH M. Can China control the side effects of motor vehicle growth?[J]. *Natural Resources Forum*,2007,31(1):21-34.
- [6] FU L,HAO J,HE D,et al. Assessment of vehicular pollution in China[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*,2001,51(5):658-668.
- [7] FU S H,GU Y Z. Highway toll and air pollution:Evidence from Chinese cities[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*,2017,83:32-49.
- [8] MOHRING H. Optimization and scale economics in urban bus transportation[J]. *American Economic Review*,1972,62(4):591-604.
- [9] LI S J,LIU Y Y,PUREVJAV A O,et al. Does subway expansion improve air quality?[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*,2019,96:213-235.
- [10] 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.
- [11] DOBRUSZKES F. High-speed rail and air transport competition in Western Europe: A supply-oriented perspective[J]. *Transport Policy*,2011,18(6):870-879.
- [12] SONG M L,ZHANG G J,ZENG W X,et al. Railway transportation and environmental efficiency in China[J]. *Transportation Research Part D:Transport and Environment*,2016,48:488-498.
- [13] 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*,2019,239:118135.
- [14] 秦志龙,陈晓光. 高铁开通改善了沿线城市的空气质量吗:基于断点回归设计的分析[J]. *环境经济研究*,2020(2):76-94.
- [15] ZHANG F,WANG F,YAO S J. High-speed rail accessibility and haze pollution in China:A spatial econometrics perspective [J]. *Transportation Research Part D:Transport and Environment*,2021,94:102802.
- [16] 张明志,余东华,孙婷. 高铁开通对城市生产体系绿色重构的影响[J]. *中国人口·资源与环境*,2019(7):41-49.
- [17] 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(3):52-57.
- [18] 范小敏,徐盈之. 交通基础设施建设是否具有减排效应:来自中国高铁开通的证据[J]. *山西财经大学学报*,2020(8):56-70.
- [19] 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(3):114-147.

- [20]张永庆,张金月.长江经济带高铁开通对环境污染的影响研究[J].当代经济管理,2019(10):54-61.
- [21]孙学涛,张广胜.高铁开通、环境污染与城市经济发展[J].软科学,2021(6):103-108.
- [22]KRUGMAN P. Scale economies, product differentiation, and the pattern of trade[J]. American Economic Review, 1980, 70:950-959.
- [23]龙玉,赵海龙,张新德,等.时空压缩下的风险投资:高铁通车与风险投资区域变化[J].经济研究,2017(4):195-208.
- [24]刘秉镰,武鹏,刘玉海.交通基础设施与中国全要素生产率增长:基于省域数据的空间面板计量分析[J].中国工业经济,2010(3):54-64.
- [25]施震凯,邵军,浦正宁.交通基础设施改善与生产率增长:来自铁路大提速的证据[J].世界经济,2018(6):127-151.
- [26]孙广召,黄凯南.高铁开通对全要素生产率增长率的异质性影响分析[J].财经研究,2019(5):84-98.
- [27]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.
- [28]黄菁.环境污染与工业结构:基于 Divisia 指数分解法的研究[J].统计研究,2009(12):68-73.
- [29]李国璋,江金荣,周彩云.转型时期的中国环境污染影响因素分析:基于全要素能源效率视角[J].山西财经大学学报,2009(12):32-39.
- [30]于峰,齐建国,田晓林.经济发展对环境质量影响的实证分析:基于1999—2004年间各省市的面板数据[J].中国工业经济,2006(8):36-44.
- [31]涂正革.环境、资源与工业增长的协调性[J].经济研究,2008(2):93-105.
- [32]王玉红,张林,曹亚丽,等.高速铁路建设的环境影响分析及环保策略建议:以沪宁城际铁路为例[J].环境科学与管理,2016(6):179-183.
- [33]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.
- [34]TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3):498-509.
- [35]张军,吴桂英,张吉鹏.中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J].经济研究,2004(10):35-44.

High-speed rail and urban environmental pollution: Analysis based on the panel data of 285 cities in China

ZHANG Fan^{1,2}, YAO Shujie², WANG Feng²

(1. School of Economics, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006,

P. R. China; 2. School of Economics and Business Administration,

Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In the process of urbanization and industrialization in China, environmental pollution has always been one of the most concerned issues. In the report of the 19th National Congress of the Communist Party of China, General Secretary Xi Jinping emphasized that we should focus on key tasks such as the defense of the blue sky, continue to promote pollution prevention and control, strengthen the protection and restoration of ecosystems, expand green environmental protection industries, vigorously promote green development, and continue to improve the quality of the ecological environment. Compared with the serious “urban disease” caused by traffic pollutants in Chinese cities, high-speed rail (HSR) is one of the most sustainable green transportation infrastructures. This paper studies the impact of HSR on the environmental pollution and its mechanism by employing a spatial econometric model and an intermediary effect model with the panel data of

285 cities in 2010–2018. The empirical results show that: 1) The urban environmental pollution in China has significant spatial spillover effects, which means that environmental pollution control should follow the strategy of regional joint prevention and control. 2) HSR can reduce environmental pollution. Compared with cities without HSR, the annual average $PM_{2.5}$ concentration, nitrogen oxide emissions per unit of GDP, and industrial wastewater discharge per unit of GDP in HSR cities are reduced by 1.5%, 11.4%, and 12%, respectively. 3) HSR's reduction effect on the environmental pollution is significant in the eastern and western regions, while that in non-central cities is greater than in central cities, indicating that HSR network can reduce the imbalance of urban ecological efficiency to a certain extent and contribute to the coordinated development of the environment. 4) HSR reduce the environmental pollution by increasing the total factor productivity. This paper provides a theoretical reference for realizing the inhibitory effect of HSR on urban environmental pollution, and provides the following policy references for the construction and development of HSR: 1) China's high-speed rail is an important infrastructure that changes the spatial and geographical pattern of cities, and environmental pollution has significant spatial spillover effects. Therefore, the regional joint prevention and control strategies for environmental pollution should be considered from the perspective of urban spatial geography, especially considering academic discussions and policies. The effect of HSR network layout on environmental pollution, which is rarely discussed in practice, has important theoretical and practical value. 2) The opening of high-speed rail has a heterogeneous effect on restraining urban environmental pollution. Further promoting the construction of new transportation infrastructure in the central and western regions and non-central cities, and promoting the modernization and efficiency improvement of the intercity transportation network, will not only help the local economic development, but also be conducive to the protection of the ecological environment.

Key words: high-speed rail; environmental pollution; green total factor productivity; generalized spatial two-stage least square

(责任编辑 傅旭东)