

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

秦志龙 陈晓光*

摘要:我国城市空气污染问题严峻,高速铁路作为城市间的重要交通工具对空气污染的改善至关重要。本文使用国家生态环境部2011年的空气污染日值数据,采用断点回归的研究方法考察了2011年6月30日开通的京沪高铁对途经城市空气质量的影响。结果表明,京沪高铁的开通显著地改善了途经城市的空气质量。在改变断点回归的时间窗口和多项式阶次后,京沪高铁开通对空气质量的改善作用仍然稳健。此外,我们根据高铁与其他交通工具出行费用的比较,发现京沪高铁开通改善沿线城市空气质量的主要渠道可能包括替代私家车出行、减少航空出行需求及减少高能耗普通列车车次。本文的研究发现为我国政府大力发展高速铁路的政策提供了有力支撑。

关键词:京沪高铁;空气污染;断点回归设计;渠道分析

一、引言

空气污染是我国目前面临的重要环境问题之一,严重威胁着公众的身体健康和生命安全。《2017中国生态环境状况公报》指出,2017年我国城市空气质量超标比例达到70.7%,全国338个城市发生重度污染和严重污染分别为2311天和802天^①。大量的文献研究了空气污染对我国居民健康的影响。Chen等(2013)和Ebenstein等(2017)的研究发现淮河以北的空气污染使得当地居民的预期寿命减少了3.1~5.5年。以大气颗粒物为主的空气污染在2010年造成

*秦志龙,西南财经大学经济与管理研究院,邮政编码:610074,电子邮箱:qzl0713@smail.swufe.edu.cn;陈晓光(通讯作者),西南财经大学经济与管理研究院,邮政编码:610074,电子邮箱:cxcg@swufe.edu.cn。

本文系国家自然科学基金优秀青年科学基金项目“气候变化的影响及适应性策略研究”(71822302)和国家自然科学基金面上项目“我国农村生物质能供给潜力及生物质能发电对节能减排和能源安全的影响研究”(71673224)的阶段性成果。感谢匿名审稿人的有效意见,文责自负。

①资料来源:《2017中国生态环境状况公报》,中国政府网(2019),网址:<http://www.gov.cn>。

了我国约 120 万人的过早死亡,还造成了超过 2500 万健康预期寿命的损失(Yang et al., 2013)。经合组织预测,2060 年中国的过早死亡率将比 2010 年高出三倍,每年每百万人口中由于空气污染造成的死亡人数可能达到 2000 人,远高于其他国家^①。

交通运输业是我国城市空气污染的主要来源之一。中国生态环境部发布的《中国机动车环境管理年报(2017)》显示,机动车污染是我国空气污染的主要来源,是造成 PM_{2.5} 及光化学烟雾污染的重要原因^②。中国生态环境部发布的《大气污染防治工作简报》(2017 年第 7 期)中明确指出,全国应优化调整交通运输结构,加快加大铁路运输线路网络建设,调整公路运输向铁路运输转变^③。为优化调整交通运输结构,中国政府在过去十年大力发展高速铁路。与普通列车相比,高铁具备更快的运行速度、更大的客运能力、更好的安全性能、更高的经济效益及更小的环境污染(蓝伯雄、张力,2009)。国家统计局的相关数据显示,自 2008 年中国的第一条高铁诞生以来,截至 2016 年铁路客运量的年均增长率为 8.5%,在此期间高铁营业总里程数翻了近 5 番^④。如图 1 所示,在 2008-2016 年间,高铁营业里程数呈快速递增趋势,高铁营业里程数占铁路营业总里程数的比重由 0.8% 增长至 18.5%(图 1(a)折线);同时期内,高铁客运量翻了近 166 倍,高铁客运量占铁路总客运量的比重由 0.5% 增长至 43.4%(图 1(b)折线)。到 2030 年高铁网络预计将连接中国各省近 230 个城市(Dong et al., 2020)。

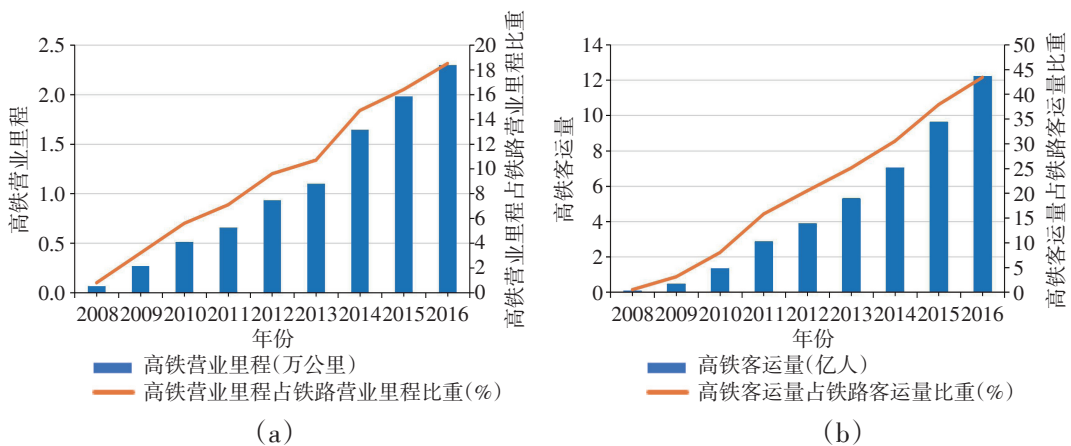


图 1 中国高铁开通里程和客运量情况

①资料来源:《到 2060 年,空气污染导致 600-900 万人过早死亡,成本为 GDP 的 1%》,经合组织(2016),网址: <http://www.oecd.org>。

②资料来源:《中国机动车环境管理年报(2017)》,中华人民共和国生态环境部(2017),网址: <http://www.mee.gov.cn>。

③资料来源:《大气污染防治工作简报 2017 年第 7 期(总第 148 期)》,中华人民共和国生态环境部(2017),网址: <http://www.mee.gov.cn>。

④数据来源:2017 年《中国统计年鉴》。

交通基础设施通常被认为是促进经济增长和国家发展的关键,特别是高铁的发展已经被广泛地认为是中国的伟大成就和国家名片。Zheng和Kahn(2013)的研究发现中国高铁的发展促进了区域经济的整合,降低了城市增长的成本。张俊(2017)的实证研究发现,高铁开通使得“高铁县”固定资产投资增加了37%,对“高铁县”经济增长的贡献率高达34.6%。周浩和郑筱婷(2012)的研究发现,铁路提速促进了沿途站点的经济增长,使得提速站点的人均GDP增长率提高了约3.7%。

严重的空气污染不仅危害公众的身体健康,同时还会影响人们的心理健康和经济发展。Chen等(2013)和Ebenstein等(2017)的研究发现淮河以北的空气污染使得当地居民的预期寿命减少了3.1~5.5年。Zhang等(2017)、Liu等(2018)和Zhang等(2018)发现空气污染会影响人们的心理健康和认知能力。此外,经济的发展也会受到空气污染的制约(陈诗一、陈登科,2018)。

然而,现有研究关于交通基础设施对空气质量影响的文献却不多见。已有文献(Chen & Whalley, 2012; Li et al., 2016; 梁若冰、席鹏辉, 2016; 高明等, 2018; 孙传旺等, 2019)关注了地铁、电动汽车、快速公交系统和城市道路等市内交通基础设施建设对城市空气污染的影响。另外,还有研究表明道路密度越高则空气污染越低,主要的原因是道路越宽缓解了城市的交通拥堵,提高了机动车的移动速度和能源使用效率(Luo et al., 2018)。Yang等(2018)和Gu等(2018)分别用北京和全国的数据,考察了地铁开通对交通拥堵的影响,均发现地铁开通短期内可以改善交通拥堵及路面行车速度。同时,地铁的进一步扩建也能改善空气质量(Li et al., 2019)。在一项最新的研究中,Gendron-Carrier等(2018)检验了全球43个城市地铁开通对空气质量的影响,发现地铁的开通使距离城市中心10公里范围内颗粒物的浓度下降了4%。以上研究几乎都关注于地铁、电动汽车、快速公交系统和城市道路等市内交通的环境回报,缺少高铁这类长途城际或省际交通工具对空气质量影响的文献。

少数学者探讨了高速铁路对空气污染的影响。Lalive等(2018)研究了德国铁路里程数的增加对空气污染的影响,研究发现铁路里程数每增加10%,一氧化碳和氮氧化物的浓度分别减少1%和2%。国内学者研究了我国高速铁路开通对空气污染的影响,发现高铁的开通对空气污染的改善具有积极的作用(张华、冯烽, 2019; 祝树金等, 2019; 张明志等, 2019)。以上研究均使用年度数据和双重差分法来关注高铁开通的影响,而本文则采用更为细致的日值数据和断点回归的方法来研究高铁开通的影响。

本文的研究着眼于两个方面。首先,以京沪高速铁路为研究对象,估计京沪高速铁路的开通对沿线城市空气质量的影响;其次,探讨高铁开通影响沿线城市空气质量的可能渠道。本文采用断点回归(RD)的估计方法,RD是目前学术界利用微观数据进行政策评估的一个重要研究方法,它能在没有随机性的情况下识别出“政策”的效果。本文的主要研究贡献和创新

有以下两点:第一,本文补充了地铁、公路和铁路等交通基础设施建设对空气质量影响的相关研究;第二,基于更加微观的日值数据,本文丰富了高铁开通对空气质量影响的相关研究,并探究了影响渠道。

考察高铁开通对城市空气质量的影响具有重要的现实意义。2015年10月,中国共产党第十八届中央委员会第五次全体会议通过了《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》,明确提出中国将促进低碳交通发展,加强轨道交通建设^①。本文的研究将有助于为合理设计规划高速铁路的线路提供一定的科学依据。

本文其余部分安排如下:第二部分介绍京沪高铁开通的背景,并简要介绍RD方法在现有环境经济学相关文献的使用情况。第三部分是数据说明和估计模型。第四部分报告实证分析结果。第五部分进行渠道分析。最后,第六部分是结论和政策讨论。

二、背景介绍

(一)京沪高铁

作为我国“四纵四横”客运专线网的“四纵”之一,京沪高速铁路是《中长期铁路网规划》中投资规模较大、技术水平较高的重点工程。京沪高速铁路从1990年开始规划启动,至2011年6月30日建成通车,总投资约2209亿元,是能够同三峡大坝、青藏铁路、西气东输、南水北调相提并论的重大工程。京沪高铁运行线路由北京南站至上海虹桥站,全长1318公里,设计速度为380公里/小时,途经北京、天津、上海三大直辖市和冀、鲁、皖、苏四省,连接京津冀和长江三角洲两大城市群,途经人口规模百万以上的大城市11个,沿线地区分布人口占全国总人口26.7%。京沪高铁全程运行时间约4小时24分钟,两地飞行时间约2小时30分钟,若综合考虑机场交通的不便利性、较长的候机时间和较高的误点率等因素,京沪间飞行出行的时间优势不再明显。2014年京沪高铁首次实现盈利,客票收入300亿元,利润额高达12亿元,当年运送旅客超过1亿人次,运送的旅客人数占到全国高铁运输人数的1/8^②。

(二)断点回归在环境经济学的应用

RD的研究方法最早应用于心理学和教育学领域,随着高质量环境数据的可得性增加, RD方法在环境经济学的研究中逐渐得到了运用。曹静等(2014)、Viard和Fu(2015)考察了尾号限行政策的实施对北京市空气质量的影响,研究发现北京的空气质量在尾号限行政策实施的当日得到显著改善。Fu和Gu(2017)利用我国98个城市2011年和2012年每日空气污染数

^①资料来源:《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》,中央政府门户网站(2015),<http://www.gov.cn>。

^②资料来源:《京沪高铁首次实现盈利 发车已不能满足高峰需求》,人民网(2015)。网址:<http://politics.people.com.cn>。

据和断点回归的方法,考察了国庆节假期取消高速公路收费对我国城市空气质量的影响,研究发现取消高速公路收费后,样本城市的空气污染指数(API)和 PM_{10} 分别增长了20%和26%。Chen等(2012)、梁若冰和席鹏辉(2016)和Gendron-Carrier等(2018)分别以中国台北市、中国14个城市和全球43个城市的轨道交通开通为研究对象,发现轨道交通的开通会显著改善轨道交通开通城市的空气质量。

三、数据来源和模型设定

(一)数据来源

本文使用的空气污染数据来自国家生态环境部数据中心。API的测算主要依据二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_2)和直径小于或等于 $10\mu m$ 的可吸入颗粒物(PM_{10})这三类污染物的浓度。国家生态环境部在2013年前只公布我国120个主要城市的日均API和这些城市每天的主要污染物,并不报告具体污染物的浓度。在这120个主要城市中,12个城市为京沪高铁沿线城市,包括北京、天津、济南、泰安、枣庄、徐州、南京、镇江、常州、无锡、苏州、上海。我们按照Andrews(2008)使用的方法,推算出这12个样本城市的 PM_{10} 浓度^①。

天气数据来自于中国气象局气象数据共享平台,该平台报告了各气象站的日平均气温、降雨量、日照时数、最大风速风向、平均风速、平均相对湿度和平均大气压力等天气变量。由于本文研究的京沪高速铁路开通于2011年6月30日,本文考虑的最长时间窗口为京沪高铁开通前后各180天。因此,空气污染数据和天气数据均选取2011年的全年数据。

表1 京沪高铁沿线城市空气和天气变量的描述性统计

变量名	单位	全样本 (1)	开通后 (2)	开通前 (3)	均值差 (4)	多项式调整后的均值差 (5)
API	1	71.98 (31.02)	76.68 (35.03)	67.55 (25.92)	-9.12*** (0.96)	-11.82** (5.31)
PM_{10}	$\mu g/m^3$	94.93 (53.56)	103.31 (57.78)	87.03 (47.95)	-16.28*** (1.64)	-21.78** (9.85)
平均气温	$^{\circ}C$	15.09 (10.42)	12.20 (10.42)	17.81 (9.67)	5.61*** (0.31)	2.21*** (0.53)
降雨量	mm	2.73 (10.12)	1.76 (8.54)	3.65 (11.34)	1.89*** (0.31)	-1.22 (2.82)
日照时数	h	5.51 (4.05)	6.38 (4.11)	4.69 (3.81)	-1.68*** (0.12)	-2.18 (1.39)

^①Andrews(2008)、Fu和Gu(2017)均采用了类似的方法通过API推算 PM_{10} 。当 $0 \leq API \leq 50$, $PM_{10}=API$; 当 $50 \leq API \leq 200$, $PM_{10}=2 \times API-50$; 当 $200 \leq API \leq 300$, $PM_{10}=(7/10) \times API+210$; 当 $300 \leq API \leq 400$, $PM_{10}=(4/5) \times API+180$; 当 $400 \leq API \leq 500$, $PM_{10}=API+100$ 。

续表1 京沪高铁沿线城市空气和天气变量的描述性统计

变量名	单位	全样本 (1)	开通后 (2)	开通前 (3)	均值差 (4)	多项式调整后的均值差 (5)
最大风速风向	l	7.99 (4.76)	8.38 (4.76)	7.63 (4.73)	-0.75*** (0.15)	1.58 (0.99)
平均风速	m/s	0.35 (5.06)	0.46 (7.26)	0.25 (0.14)	-0.21 (0.16)	0.27 (0.31)
平均相对湿度	%	63.38 (18.94)	54.88 (19.59)	71.39 (14.24)	16.51*** (0.53)	13.05*** (2.99)
平均气压	hPa	998.30 (47.88)	998.43 (49.03)	998.18 (46.78)	-0.26 (1.48)	1.55* (0.85)

注:样本包含京沪高铁沿线的12个城市及高铁开通前后180天的时间窗口。样本总量为4197,高铁开通后样本为2160,开通前样本为2037(徐州、常州和无锡三个城市2011年1月1日至2月10日的数据缺失)。括号内的值为标准误差。在第(5)列中,我们使用了与基准结果类似的RD的估计方法,控制了二次时间趋势项和政策虚拟变量。*、**、***分别表示在10%、5%和1%的水平下显著。

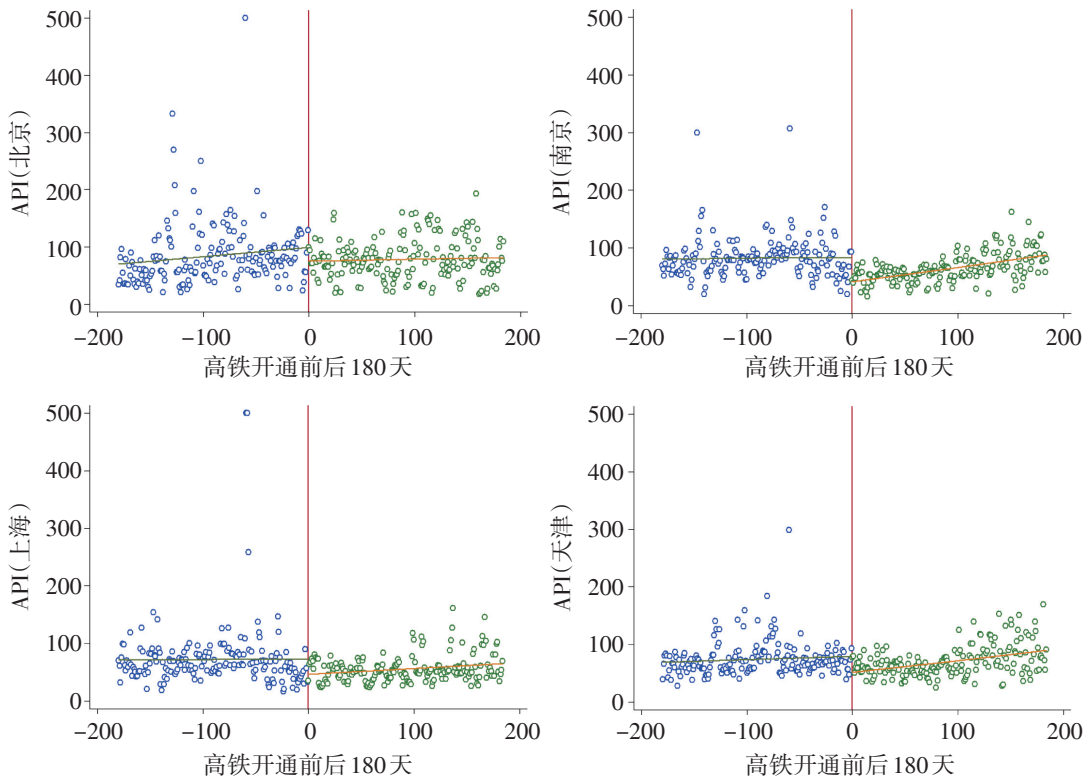


图2 京沪高铁开通前后4个主要城市的API断点图

表1报告了京沪高铁开通前后沿线城市的API、PM₁₀以及各种天气变量的描述性统计。表1的第(1)列报告了全样本的描述性统计,第(2)和(3)列分别报告了京沪高铁开通后和开通前的描述性统计。第(4)列报告了开通前后这些变量的均值差和标准误差。第(5)列报告

了多项式调整后的均值差和标准误差,但该列结果采用了RD的估计方法且控制了时间趋势项和政策虚拟变量。表1中第(4)和(5)列的结果提供了RD设计有效性的证据,即京沪高铁开通后空气质量发生了显著的改善表现为API和 PM_{10} 浓度的减低,但天气变量在开通前后不存在明显的跳跃。后续改变天气控制变量的结果也为本文采用RD研究方法的有效性提供了证据,即其他可能影响空气质量的天气因素变化是连续的或者对基准结果没有影响(Chen & Whalley, 2012; Ebenstein et al., 2017)。

此外,通过对京沪高铁开通前后沿线主要城市的空气污染情况进行分析,我们发现京沪高铁开通后,几乎所有沿线城市的空气污染均呈下降趋势。图2报告了京沪高铁开通前后沿线4个主要城市(北京、南京、上海、天津)API的散点图和线性拟合。图2中的线性拟合表明,在京沪高铁开通之后,这四个主要城市的API均有明显下降。具体而言,京沪高铁开通后当日,北京、南京、上海和天津的API分别下降了约23.4、42.9、27.2和27.6,且均在1%的水平下显著。

(二)模型设定

为了识别京沪高铁开通对沿线城市空气污染的影响,本文采用了断点回归的估计方法。断点回归的基本思想是,如果把高铁开通看作是一个突然改变的影响因素,则可以采取相应办法把高铁开通与其他可能影响空气质量且连续变化的变量的影响区别开,从而对高铁开通产生的影响加以识别(曹静等,2014)。具体地,如果我们能够发现京沪高铁开通后沿线城市空气污染情况发生突变,而其他影响空气质量的因素变化是连续的,则可以认为空气污染的突变是由高铁开通这一事件导致的,即高铁开通的“效应”是存在的;反过来,则不存在。

1. RD模型设计

在实证分析中,允许样本城市具有特定的时间多项式,且该时间多项式在高铁开通后可以发生变化。我们采用如下的RD模型设定:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 OPEN_{it} + \alpha_2 W_{it} + \alpha_3 X_{it} + \alpha_4 f_i(t) + \alpha_5 f_i(t) \times OPEN_{it} + c_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, Y_{it} 代表城市*i*在第*t*天的空气污染情况,我们分别使用API和 PM_{10} 的自然对数来衡量。 $OPEN_{it}$ 为虚拟变量,在京沪高铁开通(2011年6月30日)后设置为1,开通前则设置为0。 W_{it} 为天气变量,包括日平均气温、降雨总量、日照时数、最大风速风向、平均风速、平均相对湿度和平均气压。 X_{it} 为其他控制变量,包括法定假日、星期几和月份及其两两的交互作为时间上的固定效应,这些控制变量还可以解释一些样本城市实施的交通限行政策对空气污染的影响。 $f_i(t)$ 是一个向量,它包含城市特有的多项式时间趋势,以控制未观察到的空气污染决定因素的平稳变化,如经济活动、环境法规,其影响随着时间的推移而缓慢发生。此外,我们加入虚拟变量 $OPEN_{it}$ 和时间趋势函数 $f_i(t)$ 的交互项,以允许在高铁开通前后出现不同的时间

趋势。 c_i 代表城市固定效应,用来控制不可观测且不随时间变化的城市异质性。最后, ε_{it} 为残差项。我们主要关注的是虚拟变量 $OPEN_t$ 的系数估计 α_1 ,这个系数衡量了京沪高铁开通对沿线城市空气质量的影响。

2. 时间多项式阶次的选择

在断点回归的现有文献中,学者们讨论最多的是时间多项式阶数的选择。Gelman和Imbens(2019)指出,如果使用高阶(三阶及以上)的时间多项式可能会产生过度拟合的问题,建议使用基于线性或二次多项式的时间多项式。Gelman和Zelizer(2015)也发现RD结果估计对高阶多项式非常敏感。Fu和Gu(2017)也建议用线性和二次时间多项式。

图3绘制了北京、南京、上海和天津这四个城市在京沪高铁开通前后三十天窗口的API残差变化。

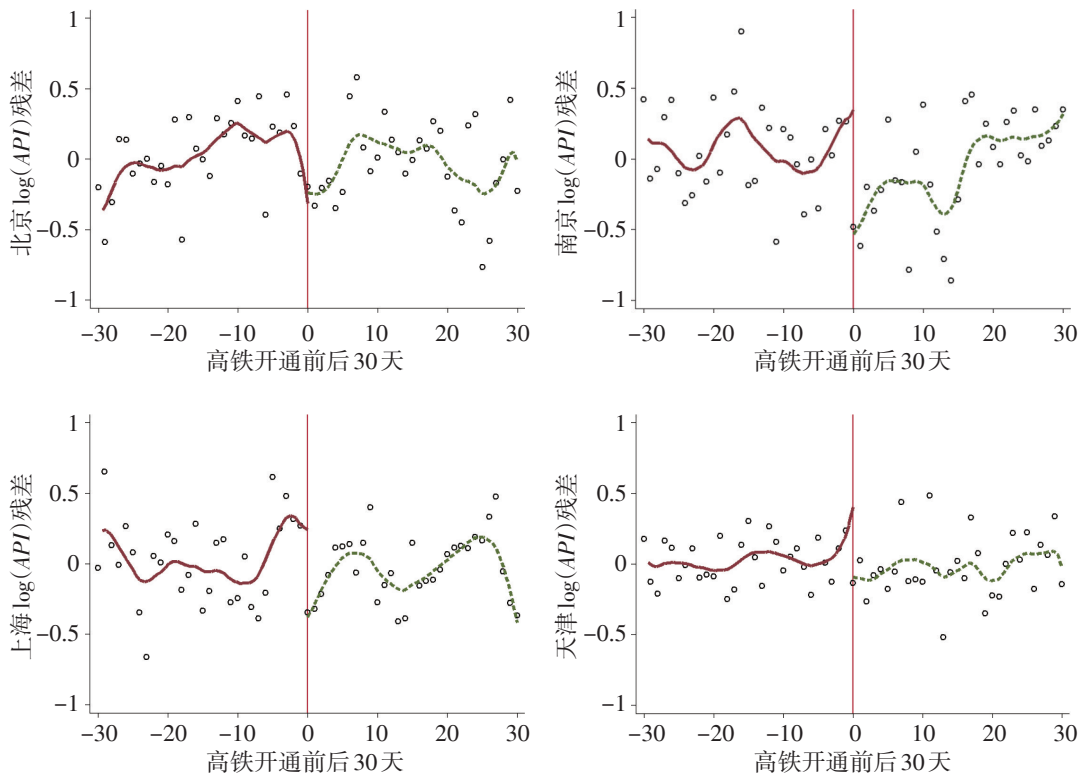


图3 京沪高铁开通后4个主要城市的log(API)残差图

在绘制图3时,我们控制了天气变量和一系列固定效应,生成log(API)的残差,进一步得到残差非参数局部线性回归的拟合值。从图3中,我们可以看出,除北京外,其余3个城市log(API)的残差拟合趋势线在京沪高铁开通后当日均有明显的下降。具体地,高铁开通第一天,南京、上海和天津这三个城市残差拟合线的下降幅度分别为0.88、0.50、0.62,且均在1%的水平下显著。基于Gelman和Imbens(2019)、Gelman和Zelizer(2015)以及Fu和Gu(2017)的建

议,结合图3的残差图,我们在进行断点回归时将多项式阶数限制为3阶以内。

四、实证结果

(一)基准回归结果

表2报告了基于模型(1)以 $\log(API)$ 和 $\log(PM_{10})$ 为被解释变量的断点回归估计结果。在进行断点回归分析时,我们的基准回归设定为使用二阶时间趋势多项式方程,且设定时间窗口为京沪高铁线开通前后各180天。基准回归结果如下表所示:

表2报告了京沪高铁开通对空气质量影响的基准估计,第1列和第2列分别以 $\log(API)$ 和 $\log(PM_{10})$ 作为因变量。第1列的结果表明,高铁的开通降低了20.7%的API;而第2列的估计表明,高铁的开通降低了29.7%的 PM_{10} 污染。这两个系数的估计结果在5%的水平下显著。因此,我们在表2中的基准估计表明,京沪高铁的开通显著改善了高铁沿线城市的空气质量。尽管表2的基准结果和图1均表明京沪高铁开通减少了空气污染,但我们对上述识别假设的有效性仍存在担忧。后续本文将检验识别假设的有效性并检验回归结果的稳健性。

表2 京沪高铁开通对空气质量的影响(基准回归)

	$\log(API)$	$\log(PM_{10})$
$OPEN_t$	-0.207** (0.083)	-0.297** (0.124)
样本量	4,197	4,197
R^2	0.308	0.322

注:该表报告的是基于模型(1)且时间窗口为180天的结果,回归控制天气变量和一系列固定效应。括号中的数值表示在“城市-时间”层面上聚类的标准差。样本量为4197。*、**、***分别表示在10%、5%和1%的水平下显著。

(二)稳健性检验

接下来,我们将进行一系列的稳健性检验来验证上述基准结果的可靠性。在进行稳健性检验时,我们均使用模型(1)来进行断点回归分析,并且选择与基准相同的时间窗口和时间趋势。

1. 识别假设的有效性检验

描述性统计表1的第5列结果提供了RD设计有效性的证据,即京沪高铁开通后空气质量发生了显著的改善,表现为API和 PM_{10} 浓度的减低,除温度和湿度外,其它天气变量在开通前后不存在明显跳跃。我们根据Dell等(2018)的研究方法,对这两个变量的重要性进行判断。具体地,Dell等(2018)指出,在使用RD进行实证分析时,当某一变量变化的绝对值与均值相比较小时,尽管这一变量在统计上存在显著变化,RD分析结果并不会受该变量变化的影响。本文样本中温度和湿度的变化满足这个条件。然而,我们对RD的有效性条件仍然存在担忧,

因此我们考虑改变天气控制变量来进行进一步检验,为本文采用RD的研究方法的有效性提供更多的证据。本文认为以下两个原因可以解释RD识别假设不太可能受到这两个天气变量非平稳变化的威胁。首先,大量文献发现降水和风速对空气质量的影响大于温度和湿度(Arya, 1999)。其次,本文的基线结果对排除温度和湿度变量不敏感。

表3报告了改变天气控制变量的RD估计结果。为了便于比较,Panel A报告了我们的基准结果。Panel B的结果显示,排除湿度后的估计结果几乎与基准结果相同。Panel C报告不包括温度和湿度作为天气控制变量的结果,我们发现API和PM₁₀的估计结果在5%的水平下显著,其影响程度仅略低于基准估计结果。表3的Panel D结果没有考虑任何天气控制变量,结果表明京沪高铁的开通导致API和PM₁₀在1%的水平下显著下降。总的来说,如果不包括部分(或全部)天气控制变量,高铁开通对空气污染的估计结果在统计上仍然是显著的。

表3 京沪线高铁开通对空气质量的影响(天气变量的调整)

	log(API)	log(PM ₁₀)
Panel A 基准回归结果		
$OPEN_t$	-0.207** (0.083)	-0.297** (0.124)
样本量	4,197	4,197
R ²	0.308	0.322
Panel B 不包括湿度变量		
$OPEN_t$	-0.215*** (0.083)	-0.309** (0.123)
样本量	4,197	4,197
R ²	0.308	0.321
Panel C 不包括温度和湿度变量		
$OPEN_t$	-0.168** (0.082)	-0.243** (0.122)
样本量	4,197	4,197
R ²	0.298	0.310
Panel D 不包括所有天气变量		
$OPEN_t$	-0.121*** (0.011)	-0.175*** (0.015)
样本量	4,197	4,197
R ²	0.028	0.031

注:本表报告了在高铁开通前后的180天内京沪高铁开通对空气污染影响的估计结果。所有回归控制变量如公式(1)所述包括二次时间趋势、天气变量和一系列固定效应。括号中的数值表示在“城市-时间”层面上聚类的标准差。*、**、***分别表示在10%、5%和1%的水平下显著。

2. 考虑高阶时间多项式的RD回归

Lee和Lemieux(2010)认为考虑不同观察时间窗口的大小和时间趋势的阶数对于检验结果的稳健性是必不可少的步骤。为了检验表2中估计结果的稳健性,我们进一步考虑了线性、二次和三次时间趋势多项式的估计结果与30天、60天、120天和180天时间窗口的估计结果,如表4所示。

表4 京沪线高铁开通对空气质量的影响(调整时间趋势和时间窗口的RD回归)

	$\log(API)$	$\log(PM_{10})$
Panel A 调整时间趋势多项式		
线性	-0.208** (0.085)	-0.308** (0.127)
二次	-0.207** (0.083)	-0.297** (0.124)
三次	-0.143* (0.076)	-0.204* (0.115)
Panel B 调整时间窗口大小		
30 天	-0.225** (0.099)	-0.310** (0.142)
60 天	-0.235** (0.094)	-0.318** (0.136)
120 天	-0.224*** (0.087)	-0.323** (0.130)
180 天	-0.207** (0.083)	-0.297** (0.124)

注:此表考虑了时间趋势函数和时间窗口变化的RD估计结果。Panel A 报告了高铁开通日期前后180天窗口内不同时间趋势函数的回归估计结果。Panel B 报告了高铁开通前后不同窗口的回归估计结果。所有回归控制如公式(1)所述,包括二次时间趋势(除非另有说明)、天气变量、一系列固定效应。括号中的数值表示在“城市-时间”层面上聚类的标准差。*、**、***分别表示在10%、5%和1%的水平下显著。下表同。

我们的第一组稳健性检验是使用了不同的时间趋势函数。如前所述,在RD分析中如何选择最优时间趋势函数,研究人员尚未达成共识(Gelman & Imbens, 2019; Lee & Lemieux, 2010)。在控制时间趋势时,高阶多项式比低阶多项式更灵活,但可能导致在不连续处的过度拟合。时间趋势的高阶多项式的使用也增加了获得有偏估计的风险。尽管如此,我们用线性和三次时间趋势函数探讨了研究结果的稳健性,并在表4的Panel A中报告了估计结果。我们发现,线性时间趋势的估计结果与我们的基准结果基本一致。基于三次时间趋势函数的估计结果小于基准结果,仅在10%的水平上显著。

然后,我们将重点放在高铁开通日期前后时间窗口的大小上。表4的Panel B结果显示,在考虑的其他三个时间窗口即30天、60天和120天的时间窗口中,高铁开通对空气污染的影响估计结果与我们的基准RD估计几乎相同。

(三)安慰剂检验

前文的研究结果表明,京沪高铁的开通显著地降低了沿线城市的空气污染,但是空气污染的减少是否真的归因于京沪高铁的开通呢?在京沪高铁开通期间,有可能在全国范围内发生了其他影响空气质量但不可观测的一些事件,这些事件不仅影响了京沪高铁沿线城市的空气质量,也影响了其它城市的空气质量。为了排除这个可能性,本文进行了安慰剂检验。具

体地,通过虚拟一个伪事件或政策的发生,我们检验其它铁路沿线城市的空气质量在2011年6月30日是否发生了显著的变化。如果安慰剂检验的结果表明其它铁路沿线城市的空气质量在2011年6月30日并没有发生显著改变,则可以证明本文研究结论的可靠性。

表5 安慰剂检验

	log(API)			log(PM ₁₀)		
	(1) Z128	(2) K488	(3) K1398	(4) Z128	(5) K488	(6) K1398
$OPEN_t$	-0.034 (0.073)	-0.119 (0.090)	-0.153 (0.111)	-0.058 (0.097)	-0.160 (0.116)	-0.206 (0.154)
样本量	2479	2797	2,160	2,479	2797	2,160
R ²	0.426	0.425	0.390	0.437	0.423	0.401

注:窗口设定为京沪高铁开通前后各180天,所有回归控制如公式(1)所述,包括二次时间趋势(除非另有说明)、天气变量、一系列固定效应。括号中的数值表示在“城市-时间”层面上聚类的标准差。

具体地,我们选择不经过京沪高铁沿线城市的普通列车为分析样本,以京沪高铁开通为断点。为了增加研究的可靠性,我们选择了三条运输需求水平与京沪高铁相当的主要铁路线,分别是太原至温州的K1398号线、兰州至厦门的Z128号线和成都至深圳的K488号线。这些铁路线在地理上并不靠近京沪高铁,因此,如果京沪高铁开通不影响京沪高铁沿线城市的空气质量,而是受到全国旅行模式或影响污染的经济政策变化的影响,那么这三条铁路线的空气污染也会受到显著的影响。安慰剂检验的估计方法与模型(1)相同,并使用京沪高铁开通前后180天内的每日空气污染数据来检验空气质量是否存在不连续变化。表5给出了回归的估计结果,几乎没有发现这些城市的污染发生统计上显著的不连续变化的证据。这些结果提供了有力的证据,证明表2中所报告的估计结果完全是由于京沪高铁的开通所带来的。

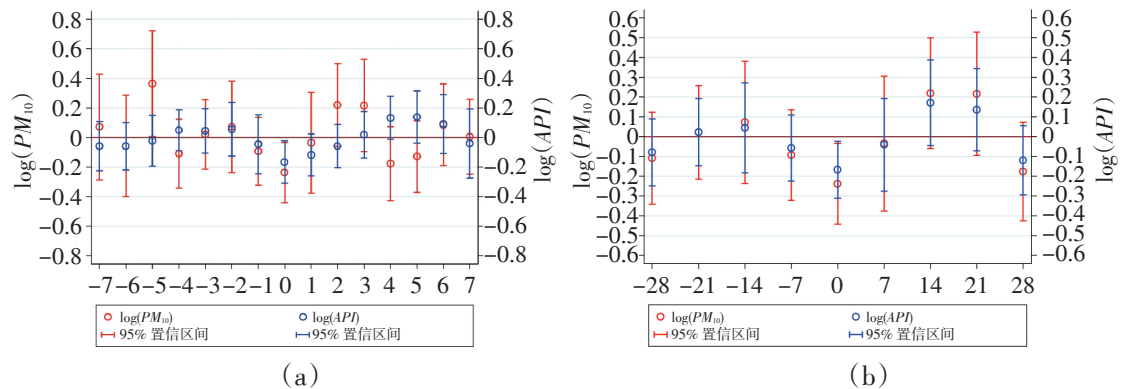


图4 不同的时间间隔RD估计

此外,本文还进行了时间上的安慰剂检验,以确定是否在相同的研究区域但在不同的日期观察到空气质量变化的不连续。图4(a)和图4(b)分别报告了京沪高铁开通前后1天和7

天的API和PM₁₀的估计不连续,实际开通日期为图中的0点。在这两幅图中,只有在京沪高铁实际开通当天,API和PM₁₀出现了统计上显著的不连续变化。在其他情况下,估计的影响在统计上并不显著。这些发现为我们的识别假设的有效性提供了进一步的保证。

(四)异质性分析

京沪高铁的开通对沿线城市空气质量的影响可能存在城市异质性。为了对此进行检验,我们分别对每一个样本城市进行单独的断点回归。在进行异质性分析时,我们选择log(API)为被解释变量。

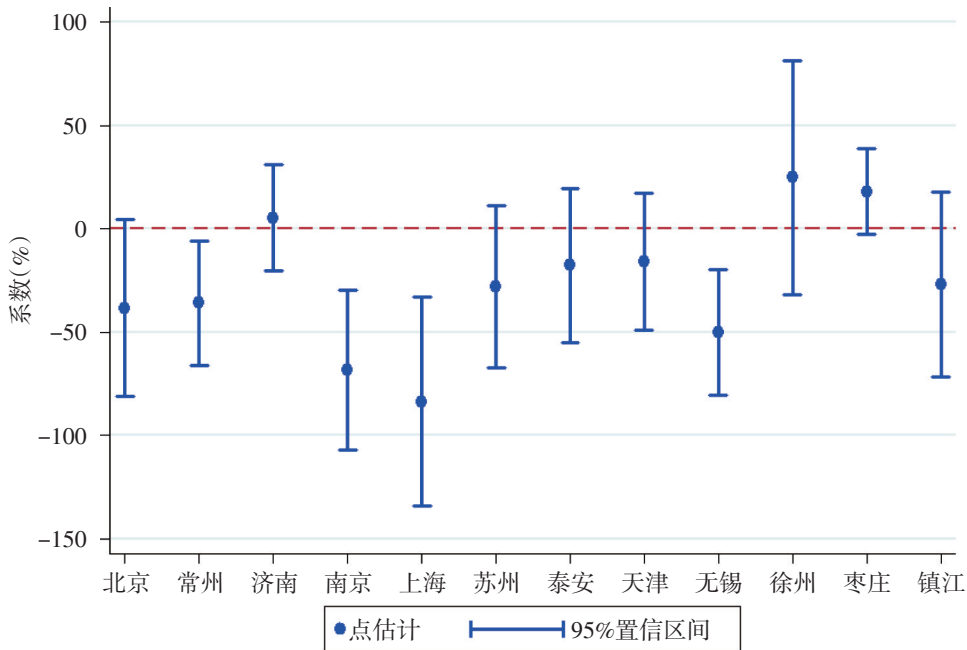


图5 京沪高铁开通对沿线城市空气影响的异质性分析

图5报告了异质性分析的结果。可以发现,京沪高铁的开通对沿线城市空气质量的影响存在城市异质性。具体地,京沪高铁开通后,北京、常州、南京、上海和无锡这5个城市的空气质量得到明显改善,而济南、苏州、泰安、天津、徐州、枣庄和镇江这7个城市的空气质量并没有得到显著的变化。产生这些结果的一个可能原因是铁路密度在不同城市间的空间差异。我们发现,在2010年全国主要省份铁路密度(铁路运营里程数/人口)排名中,上海和江苏的排名较低,即人均铁路里程数较少。京沪高铁的开通可能直接替代了其它高能耗和高污染的出行方式,从而改善了这些城市的空气质量,并且在铁路密度较低的大城市效果更加明显。

(五)DID估计结果

在最后的稳健性检验中,我们使用DID的方法来检验估计结果的可靠性。本文使用京沪高铁沿线的12个样本城市作为处理组,将京沪高铁经过的七个省或直辖市的其他25个城市(但不包括京沪高铁沿线城市)作为对照组。具体的估计模型与Zheng等(2019)的设定保持

一致:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 W_{it} + \beta_2 X_t + \beta_3 f_i(t) + \beta_4 HSR_City_i \times OPEN_t + c_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中, HSR_City_i 是一个虚拟变量, 如果城市 i 是京沪高铁经过的城市, 则其值为 1, 否则为 0。其他变量的定义与模型(1)一致。在这里我们感兴趣的是系数 β_4 , 它衡量的是京沪高铁开通对空气污染的影响。

表 6 京沪线高铁开通对空气质量的影响(DID 估计)

	$\log(API)$	$\log(PM_{10})$
$HSR_City_i \times OPEN_t$	-0.074** (0.026)	-0.124*** (0.035)
样本量	8,708	8,708
R ²	0.274	0.284

表 6 报告了基于 180 天时间窗口的高铁开通对空气污染影响的 DID 估计^①。这些估计结果分别在 5% 和 1% 的水平下显著, 表明高铁的开通对空气污染具有显著的影响。这些估计结果略小于表 2 报告的基准估计结果。基于 DID 的分析结果表明, 高铁开通后 API 和 PM_{10} 分别下降了 7.4% 和 12.4%。

五、渠道分析

高铁的开通如何影响空气质量呢? 通过提供一种新的交通出行方式, 高铁的开通可能会替代传统的高能耗出行方式。本节将分析京沪高铁的开通通过何种渠道来改善其沿线城市的空气质量。

新铁路线路的开通会显著降低其它出行方式的市场份额。在法国, 巴黎到马赛铁路开通使沿线民航市场的占有率从 45%~55% 下降到 35%~45%; 在西班牙, 马德里到塞尔维亚的铁路开通后, 其沿线的民航客运份额从 40% 下降到 13%; 在韩国, 首尔到大邱铁路的开通使得沿线民航市场的份额下降了 72% (Park & Ha, 2006)。

图 6 给出了京沪高铁开通后, 其沿线城市高铁出行费用分别与私家车和航空出行费用的比值。由于京沪高铁沿线城市间彼此具有直飞航线的城市比较少, 所以图 6 只报告了具有直飞航线的城市组。在计算不同出行方式的费用时, 我们考虑了直接成本(如高铁车票费用、航空出行时机票费用、私家车出行时的汽油费和过路费)和时间成本, 并假设两地市政府所在地分别为出发地和目的地。

^①由于篇幅的限制, 平行趋势检验的公式和图形已在审稿人的回复意见中报告, 感兴趣的读者可以向作者索取。

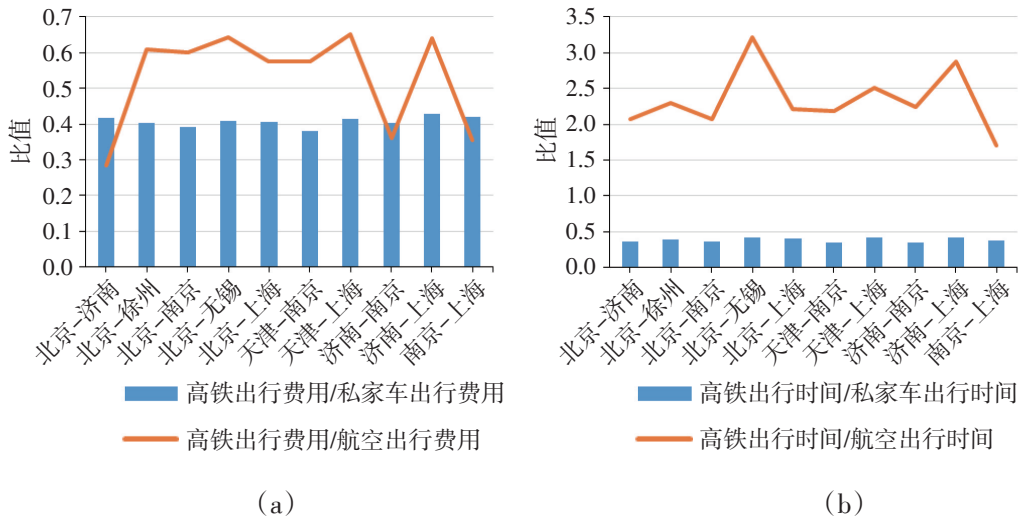


图6 高铁、私家车和航空出行费用和时间的比较

我们采取的步骤和数据来源如下所述:第一,私家车出行时间(基于驾车最短线路)和高速过路费数据来自百度地图,假设私家车每百公里油耗为9升油,2011年全国汽油均价为7.64元/升。第二,高铁出行费用和时间数据来自于中国铁路官网和携程网,票价为二等座价格,其中高铁运行时间取京沪所有高铁线路的平均运行时间。第三,航空出行费用和时间数据来自携程网,并考虑基建、保险和燃油等费用(150元)。第四,根据相关文献,我们假设从出发地至目的地私家车平均堵车时间为2小时,出发地前往高铁站、高铁候车时间和高铁站前往目的地的总时间为1.5小时,出发地前往机场、机场候机时间和目的地机场前往目的地的总时间为2.5小时。最后,根据2011年城市居民人均收入,我们计算高铁沿线城市居民的年人均收入,并进一步假设全年工作时间为2000小时(扣除法定节假日全年工作250天,每天按8小时工作制)来计算乘客的人均小时成本。

从图6(a)可以看出,京沪高铁沿线城市间的高铁出行费用显著低于私家车和航空出行这两种出行方式的费用。高铁出行费用是私家车出行费用的40%左右。从高铁与航空出行费用的比较来看,对于北京—济南、济南—南京和南京—上海等距离较近的城市组,这两种出行方式成本的比值为30%~40%;对于其它距离较远的城市组来说,二者之间的比值为60%左右。这说明高铁对航空的替代性会因城市距离的不同而有所差异,城市之间的距离越近,高铁对航空的替代作用会越明显。

图6(b)报告了高铁出行与私家车和航空出行时间的比值,这里的出行时间仅考虑这三种交通出行方式的实际运行时间,没有考虑从出发地至火车站或机场、堵车和候机时间。从图6(b)可以看出,对于京沪高铁沿线的城市来说,高铁出行时间是私家车出行时间的40%左右。与航空出行相比,高铁出行并没有时间上的优势。但综合考虑等待时间和购票成本等因素

后,我们发现相较于航空出行而言,高铁是一种低成本的出行方式(如图6(a)所示)。

高铁的人均百公里的能耗仅为3.64度电,相当于客运飞机的1/12,小轿车的1/8、中型客车的1/3^①。通过上述对高铁、私家车以及航空出行方式的成本和时间比较,本文认为,京沪高铁的开通有可能会通过减少沿线城市私家车出行数量、航班线路和高能耗的传统火车车次而改善沿线城市的空气质量。由于数据的不可获得性,我们无法收集到2011年京沪高铁沿线城市间私家车出行数量和航班线路的相关数据。然而,通过分析2011年7月1日实行的全国列车运行图,我们发现京沪高铁开通后,京沪沿线停运了19个高能耗传统列车次,北京南到上海虹桥的动卧列车也被停运^②。

六、结论与启示

在过去十年,在全国范围内兴起了大规模建设高速铁路的高潮,部分学者研究了高铁建设对我国经济发展的影响,但鲜有文献研究高铁建设对沿线城市空气质量的影响。本文以京沪高铁为例,试图回答高铁的开通能够在多大程度上改善沿线城市的空气质量,以及高铁开通通过何种渠道改善空气质量。断点回归的研究结果表明,京沪高铁的开通显著地改善了沿线城市的空气质量,京沪高铁开通后其沿线城市的API和PM₁₀分别下降约20.7%和29.7%。通过包括改变断点回归的时间窗口和时间趋势的一系列稳定性检验,结合两组安慰剂检验的结果,我们发现上述研究结论仍然成立。进一步的渠道分析表明,京沪高铁开通之所以能够改善沿线城市的空气质量,主要是通过替代私家车出行、减少高能耗普通列车车次,以及减少航空出行需求这三个方面来实现的。

本文的主要政策启示有以下几点。第一,高铁开通主要是通过替代传统高能耗的交通出行方式来改善空气质量,因此若以改善空气质量为目的的高速铁路建设,可优先考虑铁路和高速路网密度低但交通出行需求高的地区。第二,相较于私家车出行,无论从出行费用还是出行时间等方面考虑,高铁的优势明显。但与远距离航空出行相比,结合现有高铁票价,高铁出行的优势不再明显。为了吸引更多乘客选择高铁出行,铁路部门可以在考虑旅行时间的基础上,适当降低远距离高铁出行的票价。

虽然这篇论文检验了关于高速铁路开通对环境影响的新证据,但仍有一些问题有待进一

①资料来源:《京沪高铁列车人均百公里能耗相当于飞机的1/12》,人民网(2011),网址:<http://society.people.com.cn>。

②京沪高铁开通停运列车为:徐州-北京,K108/7;徐州-南京,K8471/2、T7799/7800;徐州-上海,D5473;济南-上海/杭州,T105/6、T177/8;青岛-上海,K296/3、K294/5;镇江-北京,1477/8;北京-上海,T103/4;天津-杭州,T33/4;北京-南京西,K161/2;北京南-上海,D29/30、D31/2、D71/2;青岛-上海,D78/5、D76/7;沈阳北-上海,D198/5、D196/7以及北京南到上海虹桥的动车卧铺。

步研究。第一,本文的研究结果是否能推广到其他高速铁路线路甚至其他交通基础设施。当然,其他高速铁路线路或者交通基础设施对环境的确切效果取决于许多因素,这些因素可能存在一些地区差异。第二,API是根据多个监测站的多种污染物的城市日平均值计算出来的,研究表明API会在某些重要的临界值处存在不连续的现象,从而可能影响结果的真实性。因此,在未来的研究中可采用来自于美国宇航局的卫星数据——气溶胶光厚度(AOD),期望能够捕捉到更加精确的基础设施溢出效应。

参考文献:

- [1] 曹静,王鑫,钟笑寒. 限行政策是否改善了北京市的空气质量?[J]. 经济学(季刊), 2014, 13(03): 1091-1126.
- [2] 陈诗一,陈登科. 雾霾污染、政府治理与经济高质量发展[J]. 经济研究, 2018, 53(02): 20-34.
- [3] 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, 2018, 28(06): 73-79.
- [4] 蓝伯雄,张力. 高速铁路客运专线的收益管理模型[J]. 中国管理科学, 2009, 17(04): 52-59.
- [5] 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, (03): 83-98.
- [6] 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, 54(08): 136-151.
- [7] 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(03): 114-147.
- [8] 张俊. 高铁建设与县域经济发展——基于卫星灯光数据的研究[J]. 经济学(季刊), 2017, (04): 1533-1562.
- [9] 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, 29(07): 41-49.
- [10] 周浩,郑筱婷. 交通基础设施质量与经济增长:来自中国铁路提速的证据[J]. 世界经济, 2012, (01): 78-97.
- [11] 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(03): 52-57.
- [12] Andrews, S. Q. Inconsistencies in Air Quality Metrics: 'Blue Sky' Days and PM₁₀ Concentrations in Beijing [J]. *Environmental Research Letters*, 2008, 3(3): 1-14.
- [13] Arya, S. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*[M]. US: Oxford University Press, 1999.
- [14] Chen, Y., A. Ebenstein, M. Greenstone, et al. Evidence on the Impact of Sustained Exposure to Air Pollution on Life Expectancy from China's Huai River Policy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(32): 12936-12941.
- [15] Chen, Y., G. Z. Jin, N. Kumar, et al. Gaming in Air Pollution Data? Lessons from China[J]. *B. E. Journal of Economic Analysis & Policy*, 2012, 12(3): 1-43.
- [16] Chen, Y. and A. Whalley. Green Infrastructure: The Effects of Urban Rail Transit on Air Quality[J]. *American Economic Journal: Economic Policy*, 2012, 4(1): 58-97.
- [17] Dell, M., N. Lane, and P. Querubin. The Historical State, Local Collective Action, and Economic Development in Vietnam[J]. *Econometrica*, 2018, 86(6): 2083-2121.
- [18] Dong, X., S. Zheng, and M. E. Kahn. The Role of Transportation Speed in Facilitating High Skilled Team-

work Across Cities[J]. *Journal of Urban Economics*, 2020, 115.

[19] Ebenstein, A., M. Fan, M. Greenstone, et al. New Evidence on the Impact of Sustained Exposure to Air Pollution on Life Expectancy from China's Huai River Policy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(39): 10384–10389.

[20] Fu, S. and Y. Gu. Highway Toll and Air Pollution: Evidence from Chinese Cities[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017, 83: 32–49.

[21] Gelman, A. and G. Imbens. Why High-order Polynomials Should Not Be Used in Regression Discontinuity Designs[J]. *Journal of Business & Economic Statistics*, 2019, 37(3): 447–456.

[22] Gelman, A. and A. Zelizer. Evidence on the Deleterious Impact of Sustained Use of Polynomial Regression on Causal Inference[J]. *Research & Politics*, 2015, 2(1): 1–7.

[23] Gendron-Carrier, N., M. Gonzalez-Navarro, S. Polloni, et al. Subways and Urban Air Pollution[R]. 2018.

[24] Gu, Y., J. Zhang, and B. Zou. Subway and Road Congestion[R]. 2018.

[25] Lalive, R., S. Luechinger, and A. Schmutzler. Does Expanding Regional Train Service Reduce Air Pollution? [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2018, 98: 744–764.

[26] Lee, D. S. and T. Lemieux. Regression Discontinuity Designs in Economics[J]. *Journal of Economic Literature*, 2010, 48(2): 281–355.

[27] Li, N., J. Chen, I. Tsai, Q. He, S. Chi, Y. Lin, and T. Fu. Potential Impacts of Electric Vehicles on Air Quality in Taiwan[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566–567: 919–928.

[28] Li, S., Y. Liu, A. Purevjav, and L. Yang. Does Subway Expansion Improve Air Quality[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2019, 96: 213–235.

[29] Liu, W., H. Sun, X. Zhang, Q. Chen, Y. Xu, X. Chen, and Z. Ding. Air Pollution Associated with Non-suicidal Self-injury in Chinese Adolescent Students: A Cross-sectional Study[J]. *Chemosphere*, 2018, 209: 944–949.

[30] Luo, Z., G. Wan, C. Wang, and X. Zhang. Urban Pollution and Road Infrastructure: A Case Study of China [J]. *China Economic Review*, 2018, 49: 171–183.

[31] Park, Y. and H. K. Ha. Analysis of the Impact of High-speed Railroad Service on Air Transport Demand[J]. *Transportation Research Part E: logistics and Transportation Review*, 2006, 42(2): 95–104.

[32] Viard, V. B. and S. Fu. The Effect of Beijing's Driving Restrictions on Pollution and Economic Activity[J]. *Journal of Public Economics*, 2015, 125: 98–115.

[33] Yang, G., Y. Wang, Y. Zeng, et al. Rapid Health Transition in China, 1990–2010: Findings from the Global Burden of Disease Study 2010[J]. *The Lancet*, 2013, 381(9882): 1987–2015.

[34] Yang, J., S. Chen, P. Qin, F. Lu, and A. A. Liu. The Effect of Subway Expansions on Vehicle Congestion: Evidence from Beijing[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2018, 88: 114–133.

[35] Zhang, X., X. Chen, and X. Zhang. The Impact of Exposure to Air Pollution on Cognitive Performance[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(37): 9193–9197.

[36] Zhang, X., X. Zhang, and X. Chen. Happiness in the Air: How Does a Dirty Sky Affect Mental Health and Subjective Well-being?[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017, 85: 81–94.

[37] Zheng, S. and M. E. Kahn. China's Bullet Trains Facilitate Market Integration and Mitigate the Cost of Megacity Growth[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(14): E1248–E1253.

[38] Zheng, S., X. Zhang, W. Sun, and J. Wang. The Effect of a New Subway Line on Local Air Quality: A Case Study in Changsha[J]. *Transportation Research Part D—transport and Environment*, 2019, 68: 26–38.

Has the Opening of the High-speed Railway Improved Air Quality? An Empirical Analysis Based on Regression Discontinuity Design

Qin Zhilong and Chen Xiaoguang

(Research Institute of Economics and Management, Southwestern University of Finance and Economics)

Abstract: China's urban air pollution problem is serious. As an important means of transportation between cities, high-speed railway is crucial to improve air quality. Using the daily air pollution data of the Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China in 2011 and the regression discontinuity design, we investigate the impact of the Beijing-Shanghai high-speed rail which opened on June 30, 2011 on the air quality of passing cities. The results show that the opening of the Beijing-Shanghai high-speed rail has significantly improved the air quality of the passing cities. After changing the time window and polynomial order of the regression discontinuity design, the effect of the opening of the Beijing-Shanghai high-speed rail remains robust. Furthermore, based on the comparison of travel costs between high-speed rail and other means of transportation, we find that the main channels of Beijing-Shanghai high-speed rail to improve air quality of passing cities may include the replacement of private cars travel, reducing the demand for air travel and reducing the number of high-energy ordinary trains. In summary, this paper provides strong support to the government's policy on developing high-speed rail.

Keywords: Beijing-Shanghai High-speed Railway; Air Pollution; Regression Discontinuity Design; Channel Analysis

JEL Classification: H54, Q53, H41

(责任编辑:卢 玲)