

地铁开通与城市雾霾污染： 来自上海栅格数据的证据

邵 帅¹, 李嘉豪¹, 杨莉莉²

(1. 华东理工大学商学院, 上海 200237;
2. 上海立信会计金融学院国际经贸学院, 上海 201209)

摘 要:以地铁为代表的公共交通基础设施建设对城市空气质量具有深远的影响。在地铁开通对城市空气污染的潜在影响进行机理阐释的基础上,采用 2000—2020 年上海栅格层面的面板数据样本和双重差分方法,实证考察了地铁开通对城市雾霾污染的影响及其作用机制。研究发现,地铁开通存在显著的减霾效应,这一结论在通过一系列稳健性检验后依然成立。异质性分析表明,中转站点的开通会产生更强的减霾效应,在已有线路上扩建站点所产生的减霾效应相对较弱,同时地铁开通的减霾效应在雾霾污染水平越高、人口密度越大的栅格样本,以及处于非中心城区的样本中表现得更为明显。机制分析结果显示:地铁开通会更为显著地增加地铁站点周边,特别是位于非中心城区站点周边的人口密度,从而通过交通替代(人口分流)效应而减少雾霾污染;地铁开通还会在更大程度上提升站点周边区域商住用地的成交价格、降低工业用地的出让规模,从而吸引服务业企业进入、挤出制造业企业,促使站点周边地区的产业结构向清洁化与集约化发展,进而有利于缓解雾霾污染。

关键词:地铁;雾霾污染;栅格数据;双重差分模型;上海

中图分类号:F572 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0566(2024)09-0100-13

Metro and haze pollution: Evidence from Shanghai's raster data

SHAO Shuai¹, LI Jiahao¹, YANG Lili²

(1. East China University Science and Technology School of Business, Shanghai 200237, China;
2. Shanghai Lixin University of Accounting and Finance School of International Economics and Trade, Shanghai 201620, China)

Abstract: The construction of public transportation infrastructure represented by the metro has a profound impact on haze pollution. Based on the mechanism explanation of the potential impacts of metro opening on haze pollution, this paper empirically examines the impact of the metro opening on haze pollution and its mechanism by using geographic raster data in Shanghai from 2000 to 2020 and the difference-in-differences model. The results show that the metro opening has a significant emission reduction effect. This conclusion still holds after a series of robustness checks. Heterogeneity analyses show that the opening of metro stations produces a stronger abatement effect on haze pollution, and the abatement effect of expanding stations on existing lines is relatively weaker, while the reduction effect of metro opening on haze pollution is more obvious in the raster samples with higher levels of haze pollution, higher population densities, and samples located in non-central urban areas. Further mechanism identification results show that the metro

收稿日期:2024-06-15 修回日期:2024-07-04

基金项目:国家自然科学基金项目(72243004,72103125)。

作者简介:邵帅(1981—),男,黑龙江七台河人,华东理工大学商学院教授,博士,研究方向为能源与环境经济学。通信作者:杨莉莉。

opening significantly increases the population density near the metro stations, especially near the stations located in the non-central urban area. This indicates that the metro opening reduces the level of haze pollution in the surrounding areas through the transportation substitution effect. The metro opening not only enhances commercial and residential land prices around the station, but also reduces the size of industrial land concessions, thereby promoting the entry of service enterprises and squeezing out manufacturing enterprises. This indicates that the metro opening makes industrial cleaner and more intensive around the station, which reduces haze pollution.

Key words: metro; haze pollution; raster data; difference-in-differences model; shanghai

近年来,中国通过制定《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》并开展相应的实际行动,促使大气环境质量得到了明显改善。以上海市为例,2022年 $\text{PM}_{2.5}$ 达到“史上最低”的 $25\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,空气质量指数(AQI)优良率达到87.1%^①。2021年11月,中共中央及国务院发布了《深入打好污染防治攻坚战的意见》,指出要巩固拓展“十三五”时期污染防治攻坚战成果,继续深入打好污染防治攻坚战。一方面,以 $\text{PM}_{2.5}$ 为主要成分雾霾污染仍然是亟待解决的突出问题,秋冬季重污染天气仍时有发生^②,AQI超标天数中仍以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的天数最多^③,因雾霾等大气环境因素引发的慢性病也呈年轻化趋势^④。另一方面,随着城市化的持续推进和生活水平的不断提高,城市居民改善生态环境和健康安全的诉求也日益强烈,2022年全国受理转办群众信访举报共计1.18万件,其中与大气污染问题相关的举报占半数以上^⑤。因此,进一步有效解决以雾霾污染天气频发为代表的大气环境问题,是切实提升人民群众获得感、幸福感、安全感的应有之义与必然要求。

完善公共交通基础设施、构建绿色交通运输体系被普遍视为改善城市空气质量的有效途径。中国环境与发展国际合作委员会指出,地铁的人均能源消耗仅为公共汽车的一半左右,不足小汽

车的十分之一^⑥。在学术界,大量研究表明城市公共交通基础设施建设与环境质量之间存在紧密联系。然而,现有研究在探索城市绿色低碳转型路径时,往往更加关注重大项目和关键场景中的“绿色样本”,如高铁^[1]、交通路网^[2]等,但来自城市建设小场景点滴改变所提供的经验证据较为匮乏,而这些经验证据往往更具普遍性和推广性。地铁^⑦作为现代城市内部公共交通基础设施中“小场景”的代表,其对城市空气质量的改善无疑具有重要影响。但从我国地铁建设的实际情况来看,由于实际需求和供给能力不匹配、规划过度超前、建设规模过于集中、资金落实不到位等问题的存在,地铁开通对于城市空气污染治理的实际效果受到了一些质疑^⑧。现有相关研究也尚未就地铁开通对空气污染的影响达成共识:一方面可以通过交通替代效应而减少污染排放^[3],另一方面可以创造更多的交通需求而加剧污染排放^[4]。由此可见,深入探讨地铁开通对城市空气质量的影响,不仅可为地铁的环境效应提供文献和经验证据,还可为城市公共交通基础设施建设的优化提供决策参考,从而具有重要的学术探索价值和现实指导意义。

此外,关注地铁开通对城市空气污染影响的现有文献大多采用城市或空气监测站点层面的数据开展实证检验,对城市内部视角下地铁开通与

① 见《2022上海市生态环境状况公报》,“史上最低”指有监测记录以来的最低值。

② 见《深入打好重污染天气消除、臭氧污染防治和柴油货车污染治理攻坚战行动方案》。

③ 见《2022年12月全国城市空气质量报告》。

④ 见《2022年中国居民健康素养监测情况》。

⑤ 见《国务院关于2022年度环境状况和环境保护目标完成情况的报告》。

⑥ 见 <http://www.ceiced.net/zcyj/ndzcbg/202108/P020210805370110639357.pdf>。

⑦ 本文中的地铁主要指城市轨道交通,包含地下铁和地面轻轨。

⑧ 见《国务院办公厅关于进一步加强城市轨道交通规划建设管理的意见》。

城市空气污染之间关系的考察非常匮乏。基于此,本文首先就地铁开通对城市空气污染的潜在影响进行机理阐释,进而以世界范围内线路总长度最长的城市轨道交通系统——上海地铁为例,构造栅格层面的面板数据样本并采用双重差分方法(DID)实证考察了地铁开通对城市雾霾污染的影响及其作用机制。

本文的边际贡献主要体现在如下 3 个方面。第一,在样本选取上,本文所使用的数据样本具有 3 个独有优势:一是客观性强,本文中的 $PM_{2.5}$ 浓度和人口密度两大核心变量指标均来源于卫星遥感数据,可以在很大程度上避免人为主观系统性偏差;二是颗粒度高,本文采用 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ (约 1 km^2) 的栅格数据样本,将上海全域细分为 3 047 个栅格单元,无论是样本精度还是样本量均远高于现有采用城市或站点观测站数据为样本的文献^[5],可为探究城市内部地铁的减霾效应及其作用机制提供更加微观、可靠的经验证据;三是观测期长,本文数据样本的时期跨度为 2000—2020 年,而其他文献普遍采用的 AQI 数据往往仅能覆盖 2013 年以后的情况,因此本文的研究结论更具时效性。第二,在研究设计上,本文不但基于地铁站点及城市内部区域的差异化特征,系统揭示了地铁开通对城市内部雾霾污染的异质性影响,而且还在机制变量的设计上进行了新尝试,即分别采用了栅格层面的人口密度、微观土地交易和企业工商登记注册信息数据构建潜在机制变量的度量指标,从而在较大程度上确保了城市内部地铁开通减霾效应的作用机制可以得到更加直观、准确的经验识别。第三,在研究方法上,本文在采用 DID 模型开展实证考察的基础上,还使用地面高程和土壤湿度作为地铁开通的工具变量,对地铁开通的内生性问题进行了有效控制,从而可以得到更加稳健可信的研究结果。

一、文献回顾与理论假说

近年来,交通基础设施的经济影响受到了区域经济学和城市经济学的广泛关注^[2,6],尤其对于作为城市内部重要公共交通方式的地铁,学者们给予了更加强烈的研究兴趣。现有文献就地铁开

通如何影响城市内部居民通勤出行特征^[7]、土地或住房价格^[8]等问题进行了丰富的讨论。但是,源于数据可得性等客观原因,在关于城市地铁开通的环境效应的既有文献中,仅有少数文献从城市内部视角对地铁开通与雾霾污染的因果关系开展了实证考察,并形成了 3 种基本观点:第一,城市地铁开通对雾霾污染存在显著的促降效应^[3];第二,城市地铁开通对雾霾污染的促降效应十分有限,甚至存在促增效应^[4];第三,城市地铁开通对雾霾污染的影响取决于作用方向相反的交通替代效应和交通创造效应的综合结果^[9]。

可见,现有文献尚未就地铁开通能否改善城市空气质量达成共识,并且至少存在以下 3 个方面的不足。其一,受限于数据的可得性,目前关于中国城市地铁开通对雾霾污染影响的研究大多以城市层面平均雾霾浓度为被解释变量,极少数研究尝试采用城市内部环境空气质量监测点位数据来表征雾霾污染程度^[5],但仍难以精准刻画地铁开通引致城市内部不同区域雾霾污染的变化情况。其二,既有文献普遍将地铁线路的首次开通作为关键解释变量,并采用断点回归(RD)方法考察地铁对城市空气污染的影响^[3]。但上述做法存在如下问题:一是城市地铁开通应包括首次开通和后续扩建,如果仅关注地铁首次开通,显然会导致估计结果产生偏误;二是目前采用 RD 方法的文献的研究窗口期普遍偏短,从而难以对地铁开通(扩建)带来的中长期环境效应予以准确识别。其三,现有文献对地铁开通的内生性问题重视不够。从地铁线路规划来看,地铁开通并非严格外生的随机变量且可能与被解释变量存在反向因果关系^[10]。此外,地铁开通对收入较高人群的影响较为有限^[11],并且地表太阳辐射可能会对雾霾浓度造成影响^[12],这些难以观测的个体和自然因素会对准确识别地铁开通的环境效应产生不利影响。

通常而言,粗放式的城市化发展会引发交通拥堵^[10]、城市蔓延^[13]等一系列问题,而这些问题是导致城市内部雾霾污染加剧的重要根源。其中,交通拥堵问题容易引致车辆燃料的不完全燃烧,从而导致车辆在道路拥堵时所产生的尾气排

放中的污染物含量比路况正常时高出2~3倍^[14];而城市蔓延既增加了民众的通勤成本及对私家车辆的需求,又不利于发挥经济集聚效应而实现节能增效^[13],进而引致更多污染物的排放。

根据交通替代理论和级差地租理论,城市地铁开通能够有效缓解交通拥堵和城市蔓延问题,减轻城市雾霾污染水平。其一,交通替代理论认为,城市地铁开通能够减少民众对作为空气污染排放主要来源的私人交通工具的需求,转而选择更为绿色的公共交通工具^[11]。随着私人交通工具逐渐被公共交通工具替代,城市的交通拥堵问题得以缓解,雾霾污染水平也会显著下降^[15]。其二,极差地租理论认为,城市地铁开通会显著提高地铁沿线的商住土地成交价格^[16],而土地成交价格的差异化会促使城市土地利用模式在市场机制的作用下由高污染、高排放的工业生产向污染水平较低、集聚程度更高的商住一体化服务业转变,进而有利于减少城市空气污染。据此,本文提出第一个理论假说:

假说1:地铁开通能够降低雾霾污染水平。

进一步地,根据交通创造理论,城市地铁开通引致的交通路况改善可能会进一步激发民众的出行需求,从而削弱甚至抵消地铁开通带来的减霾效应^[4]。然而,就目前的经验研究看,无论是从全球城市多条线路的全局视角出发^[17],还是深入到单个城市的内部视角^[3],交通替代理论获得了更多的支持。基于上述分析和现有文献的发现,本文认为尽管城市地铁开通对雾霾污染存在促降效应,但其影响可能存在显著的异质性。从城市层面来看,既有研究认为地铁开通减霾效应的异质性与城市的经济发展水平、人口及环境等因素密切相关。例如,梁若冰等^[18]发现城市人口规模和人口密度越大,以及初始污染程度越高,越容易促使地铁开通产生显著的减霾效应;Gendron-Carrier等^[17]发现,城市层面初始污染水平的异质性是造成全球范围内地铁开通对空气污染存在异质性影响的重要因素。进一步地,从城市内部视角来看,地铁开通的中长期减霾效应的异质性可能与站点特征及其周边区域特征两方面因素存在重要联

系。其一,就地铁站点特征而言,有研究发现地铁扩建对空气污染的改善作用显著强于地铁首次开通^[5]。其二,就地铁站点周边区域特征来讲,地铁开通引致的减霾效应也可能会因站点周边的建成环境特征及气候因素而产生差异^[7,19]。据此,本文提出第二个理论假说:

假说2:地铁开通会随着地铁站点的属性特征和区域特征的差异而对城市雾霾污染产生异质性减霾效应。

最后,基于经济学逻辑和现有文献,认为地铁开通对雾霾污染的减排机制可能至少体现在以下两个方面:首先,既有研究普遍认为城市地铁开通可能会减少民众对私人交通工具的需求,转而选择更为绿色环保的公共交通工具,进而缓解交通拥堵并产生显著的减霾效应,即“交通替代机制”^[4]。显然,囿于个人出行数据的可得性,直接证明这种交通替代效应的难度非常大^[11]。对此,本文基于地铁开通前后站点周边区域人口密度的变化情况,尝试为交通替代效应提供间接证据。具体而言,地铁开通会提高周边区域的生活交通便利性,吸引众多出行需求较大的民众定居在交通相对更便捷的地铁站点周边区域^[8],提高周边区域的人口密度,进而更大程度地减少民众对私人交通工具潜在需求,从而产生减霾效应。需要特别指出的是,中心城区人口密度的增加可能是城市道路结构、消费等多种因素共同作用的结果^[20-21],而位于非中心城区的地铁站点附近人口密度的增加,则往往意味着民众对地铁的主动选择。

其次,产业结构变动也会对城市雾霾污染产生影响。从要素视角看,产业结构与土地要素密切相关。现有研究发现,政府出于经济发展等目的,可能存在低价过度出让工业用地、高价限制性出让商住用地等行为,从而导致不合理的土地利用模式,严重阻碍了产业结构合理化和清洁化发展,并最终对环境质量产生不利影响^[22]。比如,上海市发布的《上海市自然资源利用和保护“十四五”规划》就强调,要加强继续推进存量工业用地改造升级,促进空间利用向集约紧凑、功能复合、低碳高效转变。同时,大量研究表明城市地铁的

通勤便利性及其商业潜力会显著提高地铁沿线的商住土地成交价格^[21],从而通过价格机制显著改变地铁站点周边区域的土地利用模式,促使地铁站点周边区域的土地利用模式由高污染、低密度的工业开发向低污染、高密度的商业化转变^[16],进而有利于缓解城市蔓延所引致的雾霾污染^[23]。从企业视角看,既有文献指出偏向资本密集型及知识密集型的产业结构会引发经济主体的空间再配置并产生相应的集聚效应,从而推动技术进步和要素生产率的提升^[24-25],进而改善城市空气质量。本文将这一机制渠道称为“产业结构变动机制”。据此,本文提出第三个理论假说:

假说 3:地铁开通主要通过引致交通替代机制和产业结构变动机制这两种渠道对雾霾污染产生抑制效应。

二、实证策略与数据说明

(一) 计量模型设定

参考 Li 等^[5]的做法,本文选取全球总长度最长的城市轨道交通系统——上海地铁为研究对象,采用双重差分模型考察地铁开通对城市内部雾霾污染的影响。本文将上海市行政区划矢量数据分解为 3 047 个 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ (约 1 km^2) 的栅格单元,并参考《城市轨道沿线地区规划设计导则》中关于轨道影响区的定义,将距离地铁站点出口 2 km 以内的栅格作为处理组^⑨;为了避免处理组与对照组距离过近而低估地铁开通的减霾效应,本文以 20 km 范围内不存在地铁站点的栅格作为对照组^[5]。本文构建的基准回归模型如下:

$$\ln PM_{2.5it} = \alpha_0 + \alpha_1 Treat_i \times Post_t + \rho X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中,下标 i 和 t 分别表示栅格和时期(以半年为单位)。 $\ln PM_{2.5it}$ 为被解释变量,表示栅格 i 在 t 时期的雾霾污染水平,由 $PM_{2.5}$ 浓度表征; $Treat_i \times Post_t$ 表示栅格 i 在 t 时期是否开通了地铁; X_{it} 为一组气候控制变量集,包括栅格 i 在 t 时期的平均气温、降水和风速; μ_i 和 ν_t 分别表示栅格和时间固定效应; ε_{it} 为随机扰动项。

(二) 变量指标和数据说明

(1) $PM_{2.5}$ 浓度数据。该数据来源于华盛顿大学圣路易斯分校提供的卫星遥感监测数据,本文在其报告的月度数据的基础上进行算术平均得到半年度数据。该数据与现有研究经常使用的空气污染指数(API)和 AQI 日度数据相比具有两方面的优势:一是精度更高,现有研究的精度一般为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,而本文的精度为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,能够更加准确地反映地铁开通所引致的周边空气质量变化情况;二是更加客观,因为即使是 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 精度下的 API 和 AQI 数据,仍需经过空间插值法进行估算后再以 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 精度的地理栅格数据呈现,该过程可能存在一定的人为主观系统性估计偏差。

(2) 上海地铁站点数据。如图 1 所示,自 1993 年上海市首条地铁开通以来,已有多达 20 条线路建成并投入运营(除金山铁路),为本文研究城市内部视角下地铁开通的减霾效应提供了极具代表性的样本。手工整理了截至 2020 年 12 月 31 日上海市所有地铁站点的经纬度坐标、开通和扩建日期等信息。特别地,还专门避免了中转站在不同线路中重复出现的问题,统一了处于不同线路下相同地铁站点的经纬度坐标,并手动识别了各地铁站点的首次开通日期。

(3) 控制变量。本文以平均气温、降水和风速作为控制变量,其数据主要来源于城市气候观测站提供的月度数据。

表 1 报告了上述变量的描述性统计情况。限于数据的可得性,本文选取研究样本的时间跨度为 2000—2020 年,时间间隔为半年。

三、实证结果

(一) 基准回归结果

从表 2 第(1)列报告的估计结果来看,地铁开通在 1% 的水平上显著降低了地铁站点 2 km 以内栅格范围内的 $PM_{2.5}$ 浓度。第(2)列和第(3)列在第(1)列基础上进一步加入了控制变量并改变了

⑨ 一般而言,行人步行 15 分钟的标准行进距离约为 1 km,骑行 15 分钟的标准行进距离约为 3 km,故本文以两者均值 2 km 作为处理组的判断标准。

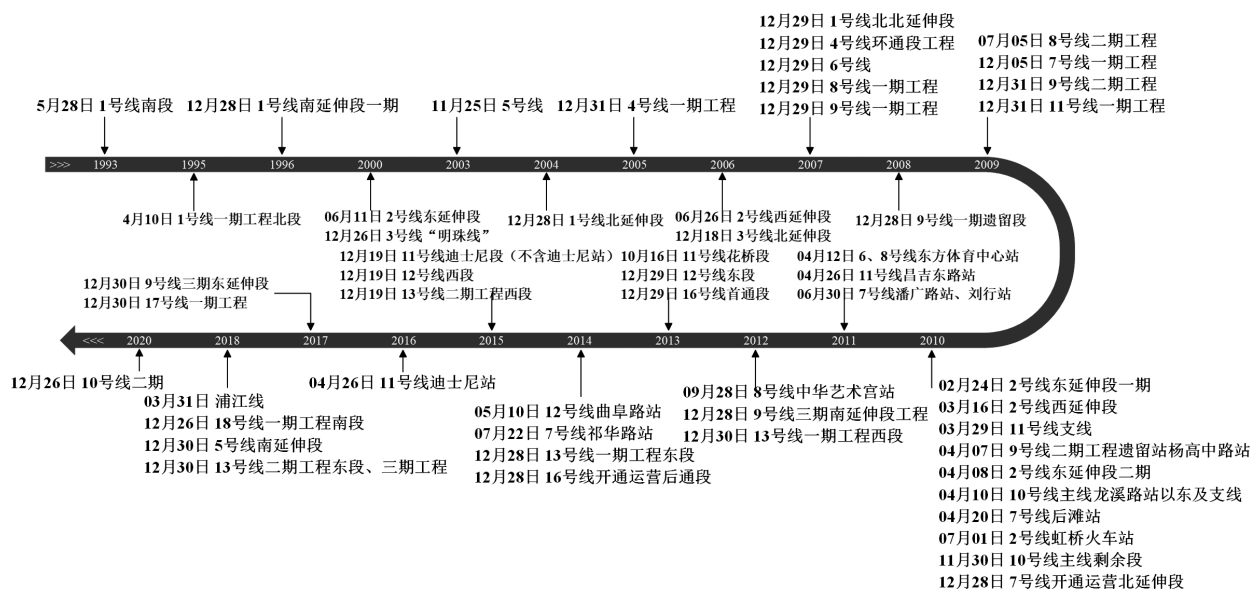


图1 上海地铁开通时空演变情况

表1 变量的描述性统计

变量	观测值	平均值	标准差	最小值	最大值
PM _{2.5} 浓度	127 974	41. 638	9. 466	21. 883	62. 483
地铁开通	127 974	0. 253	0. 435	0	1
气温	127 974	17. 156	3. 346	12. 092	21. 581
降水	127 974	3. 425	0. 767	1. 417	5. 759
风速	127 974	2. 881	0. 321	2. 049	4. 478

干扰项的聚类维度,结果显示关键解释变量的系数依然在1%的显著性水平上为负,初步表明地铁开通对雾霾污染存在显著的减排效应。

表2 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
地铁开通	-0. 005 3 *** (0. 000 6)	-0. 009 1 *** (0. 000 6)	-0. 009 1 *** (0. 002 2)
气温	—	0. 172 0 *** (0. 029 1)	0. 172 0 (0. 105 6)
降水	—	0. 018 9 *** (0. 001 3)	0. 018 9 *** (0. 004 8)
风速	—	-0. 156 9 *** (0. 003 9)	-0. 156 9 *** (0. 015 8)
常数项	3. 702 9 *** (0. 000 1)	3. 360 6 *** (0. 082 6)	3. 360 6 *** (0. 294 7)
固定效应	是		
聚类维度	栅格/经度/纬度		
观测值	127 974	127 974	127 974
R ²	0. 981	0. 982	0. 982

注:***、**、* 分别表示在 $p < 0. 01$ 、 $p < 0. 05$ 、 $p < 0. 1$ 时有统计学意义;所有模型均控制了栅格和时间固定效应;括号中数值为聚类稳健标准误;下表同。

(二) 稳健性检验

本小节将进一步采用平行趋势检验、倾向

得分匹配 (PSM) -DID、安慰剂检验及工具变量等方法和思路来对基准回归结果的稳健性进行检验。

1. 平行趋势检验

采用 DID 方法评估政策效果需要满足平行趋势的前提假设,即在地铁开通以前,处理组和对照组栅格的 PM_{2.5} 浓度的变化趋势应该不存在显著差别。为了检验这一关键前提条件是否成立,本文参考 Beck 等^[26]做法,构建了如下模型:

$$\ln PM_{2.5it} = \alpha_0' + \sum_{p=-6^+}^{6^+} \alpha_p' Treat_i \times Post_t \times dum_p + \rho' X_{it} + \mu_i' + \nu_t' + \varepsilon_{it}' \quad (2)$$

式(2)中,下标 p 表示地铁开通的第 p 年,取值分别为 -6^+ 、 $-5, \dots, 0, 1, \dots, 6^+$, 负值、0 和正值分别表示地铁开通前、开通当年和开通后, -6^+ 表示地铁开通前第 6 年及之前, 6^+ 表示地铁开通后第 6 年及之后。 dum_p 为地铁开通第 p 年的虚拟变量。

图 2 所示的平行趋势检验结果表明,地铁开通前处理组和对照组之间的 PM_{2.5} 浓度不存在显著差别,从而表明本文的数据样本满足平行趋势这一前提条件^⑩。

⑩ 本文还分别进行了平行趋势敏感性检验和异质性处理效应检验,结果表明地铁开通依然对雾霾污染存在显著的减排效应,检验结果留存备案。

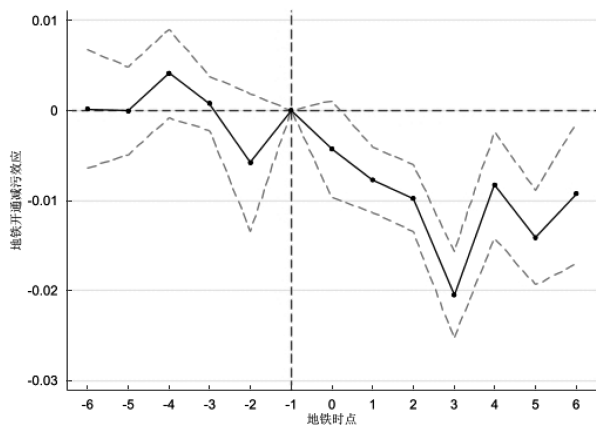


图2 地铁开通对雾霾污染的动态影响

2. PSM-DID 估计

考虑到地铁站点的选址并非完全随机的,地铁站点周围的处理组栅格样本可能在其他某些因素上与对照组栅格存在系统性差异。而采用PSM方法为处理组栅格挑选特征相似的对照组,可以在一定程度上纠正栅格样本的自选择偏误^[27]。表3第(1)和(2)列报告了采用卡尺匹配方法得到的结果,第(3)和(4)列则报告了采用一对一匹配方法得到的结果。可以看出,PSM-DID估计结果与基准回归结果无实质性差别,进一步证明了基准回归结果的稳健性。

表3 PSM-DID 回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
地铁开通	-0.005 *** (0.002)	-0.008 *** (0.002)	-0.005 ** (0.002)	-0.009 *** (0.002)
气温	—	0.145 (0.111)	—	0.112 (0.102)
降水	—	0.036 *** (0.007)	—	0.038 *** (0.008)
风速	—	-0.167 *** (0.015)	—	-0.180 *** (0.018)
常数项	3.715 *** (0.001)	3.435 *** (0.312)	3.711 *** (0.001)	3.540 *** (0.285)
固定效应	是			
聚类维度	栅格/经度/纬度			
观测值	97 255	97 255	71 291	71 291
R ²	0.982	0.983	0.980	0.981

3. 安慰剂检验

为排除地铁开通时间与选址不随机对估计结果产生的偏差性影响,本文参考余永泽等^[28]的做法,采用同时虚构实验组和开通时间的方式检验

基准回归结果的稳健性。如图3所示,基准回归中得到的系数估计值明显独立于随机样本得到的系数估计值之外,从而说明安慰剂检验结果进一步验证了前文基准回归结果的可信性。

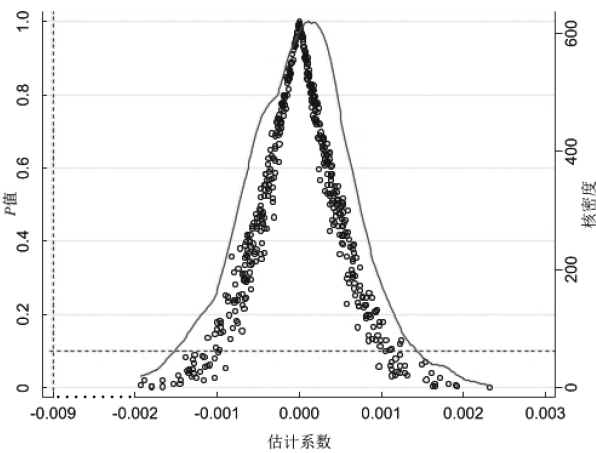


图3 安慰剂检验结果

4. 内生性问题

前文的基准回归与稳健性检验结果均表明地铁开通产生的减霾效应是稳健的。但是,地铁的建设规划往往会受到城市雾霾污染情况的影响^[10],从而导致反向因果的问题。同时,城市雾霾污染水平也可能受到城市人口密度、居民收入等变量的干扰,从而产生遗漏变量的问题。因此,我们进一步以地面高程^①与时间趋势的交互项,以及地铁站点所在区域的土壤湿度^②作为工具变量对基准模型重新进行了参数估计。就相关性而言,地铁站点周边的地面高程越高或土壤湿度越大往往容易引致地面沉降,从而会对上海这类地势低平且地层松软地区的地铁线路安全性和稳定性产生影响^[29-30],进而影响地铁站点的选址。就外生性而言,地面高程和土壤湿度作为地理变量,其本身不会对雾霾污染产生直接影响。

表4第(1)~第(4)列分别报告了以地面高程与时间趋势的交互项及土壤湿度为工具变量的加入控制变量前后的两阶段最小二乘估计结果。可以看到,Stock-Yogo弱工具变量检验结果表明不存

① 地面高程数据来源于 <https://earthdata.nasa.gov/>。

② 土壤湿度数据来源于 <https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=434a6fad0daa4c32a7396dc7db575fc8#p2>。

在弱工具变量的问题,同时 LM 检验结果表明不存在识别不足的问题,从而说明本文对工具变量的选取是合理有效的。在控制内生性问题后,地铁开通对雾霾污染仍然存在显著的减排效应。据此,假说 1 得到了验证。

表 4 工具变量法回归结果

变量	地面高程		土壤湿度	
	(1)	(2)	(3)	(4)
地铁开通	-0.017 *** (0.001)	-0.020 *** (0.001)	-0.009 *** (0.002)	-0.011 *** (0.002)
控制变量	否	是	否	是
固定效应	是	是	是	是
聚类维度	栅格/经度/纬度			
观测值	127 974	127 974	61 678	61 678
识别不足检验				
LM 检验值	68.023	68.456	44.423	43.899
P 值	0.000	0.000	0.000	0.000
弱工具变量检验				
第一阶段 F 检验值	1 319.320	1 328.554	8.1e+06	8.2e+05

注:第一阶段 F 检验值为 KP Wald F 检验值;第(3)列和第(4)列的观测值减少是由于部分栅格的土壤湿度数据缺失所导致的。

(三)异质性分析

前文的分析结果表明,地铁开通对雾霾污染存在稳健的减排效应,本小节将考察在地铁站点及其周边环境的不同特征条件下地铁开通的异质性减霾效应,从而对假说 2 进行检验。

1. 站点异质性

首先,将地铁站点划分为中转站和非中转站以考察地铁站点是否因站点属性不同而产生异质性减霾效应。表 5 第(1)列报告的结果表明,地铁中转站开通所产生的减霾效应显著强于非中转站开通。其原因是中转站周边往往会形成商业中心或交通枢纽^⑬,进而在显著提高附近的人口密度的同时,减少人们对于私人交通工具的需求^[20],从而地铁中转站的开通相较于非中转站开通表现出更强的减霾效应。表 5 列(2)报告的结果表明,上海地铁交通地铁线路的延伸和扩建产生了减霾弱化效应。由此可见,与其在原有的线路上继续扩建新的地铁站点,通过提高地铁线路密度的方式实现减霾,进一步完善中转站点便捷换乘等基本功能并挖掘中转站点周边的商业潜力应该是更优之选。

2. 区域异质性

除地铁站点的属性特征可能对雾霾污染产生异质性影响外,区域(栅格)之间的特征差异也可能产生不同的影响结果,因此本文还有必要从区域(栅格)异质性的角度来考察地铁开通是否存在异质性减霾效应。首先,以所有处理组栅格样本的 PM_{2.5} 平均浓度作为划分标准,将栅格样本分为高污染水平和低污染水平两组。表 6 第(1)列报告的结果表明,高污染水平和低污染水平区域的地铁开通均会产生显著的减霾效应,但位于高污染水平区域的地铁开通会产生更强的减霾效应,这一结论与 Gendron - Carrier 等^[17]的研究结论一致。其次,基于人口密度栅格数据计算得到了所有栅格样本年均人口密度的平均数,并以此为基准将栅格样本划分为两组,以考察初始人口密度的差异是否会引致异质性减霾效应。表 6 第(2)列报告的结果表明,初始人口密度更高区域的地铁开通会产生更强的减霾效应。其可能的原因在于:其一,初始人口密度更高的区域更易引发交通拥堵等问题,对于地铁这类公共交通基础设施的需求更大,因此地铁开通也更易于对该区域的民众产生交通替代效应;其二,初始人口密度越高,越可能推动该区域商住用地面积及其比重增大,从而使地铁开通所产生的减污效应更强。最后,考察处理组栅格所处区位特征的差异能否带来异质性减霾效应。根据《上海市城市总体规划(2017—2035 年)》中对中心城区的划定,本文将位于闵行区、宝山区、嘉定区、金山区、松江区、青浦区、奉贤区、崇明区共计 8 个区所有栅格样本划分为非中心城区,其他为中心城区。表 6 第(3)列报告的结果表明,非中心城区的地铁开通相较于中心城区会产生更为显著的减霾效应。其可能的原因在于:一是中心城区居民通勤出行距离普遍小于非中心城区居民^[31],因此地铁开通对非中心城区居民会产生更强的交通替代效应,从而减霾效应更强;二是中心城区的生活成本普遍高于非中心城区,而地铁开通将显著改善非中心城区的通

⑬ 见《上海市城市总体规划(2017—2035 年)》。

勤条件,此时生活成本更低的非中心城区地铁站点周边区域势必会成为民众新的居住地选择,从而产生更强的减霾效应。对于中心城区而言,本文发现进一步扩建地铁站点所产生的减霾效应相较于首次开通的地铁站点更弱,而中转站点的开通则能够发挥更强的减霾效应,这表明需要进一步加强中心城区中转站点的接驳中转能力。上述结果表明,地铁开通会因地铁站点及其周边环境不同而表现出异质性减霾效应,从而证明了假说 2 的成立。

四、机制识别

根据假说 3,地铁开通会通过交通替代(人口分流)和产业结构变动(土地利用模式和初创企业类型变化)这两种机制渠道抑制雾霾污染,而这也可能是引致地铁站点开通产生异质性减霾效应的主要原因,本节将专门对其进行检验。

(一)交通替代机制

前文分析表明,地铁中转站点或周边人口密度更大的地铁站点开通会产生更为显著的减霾效应,同时位于非中心城区的地铁站点开通相较于中心城区也会产生更强的减霾效应。对上述结果的一个比较直观的解释是地铁开通吸引居民向地铁站点附近聚集,尤其是向非中心城区的地铁站点附近集聚,从而使得居民的出行方式更趋向于公共交通而非私人交通,进而减少污染排放。为了验证这一猜想,本文以栅格层面的人口密度数据为潜在机制变量,构造如下三重差分模型来检验地铁开通对地铁站点 2 km 范围内人口密度的影响:

$$\ln Pop_{it} = \alpha_0'' + \alpha_1'' Treat_i \times Post_t \times Region_i + \alpha_2'' Treat_i \times Post_t + \rho'' C_{it} + \mu_i'' + \nu_t'' + \varepsilon_{it}'' \quad (3)$$

式(3)中, $\ln Pop_{it}$ 表示栅格 i 在 t 年的人口密度。该栅格层面的人口密度数据来源于分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 的 Landscan 全球人口密度栅格数据^[32]。由于 Landscan 全球人口密度数据为年度数据,为保持数据时间单位的一致性, $Treat_i \times Post_t \times Region_i$ 表示位于中心城区栅格 i 在 t 年时地铁是否开通, C_{it} 表示栅格 i 及其所属市辖区在 t 年可能影响人口密度的经济、环境和气候因素,

具体包括栅格 i 在 t 年的夜间灯光指数、绿色植被指数、气温、降水、风速,以及栅格所属市辖区在 t 年的中小学数量、市内迁入人数、居住房屋面积、财政支出和规模以上工业企业总产值。 μ_i'' 表示栅格 i 的个体固定效应, ν_t'' 表示时间固定效应, ε_{it}'' 为随机扰动项。以栅格层面的人口密度为被解释变量,就地铁开通对周围栅格人口密度的影响进行考察。从表 7 报告的结果来看,地铁开通显著增加了周边 2 km 范围内的人口密度,且这一结论在加入了控制变量并改变了聚类维度后依然成立。

表 5 站点异质性检验结果

变量	(1)	(2)
	是否为中转站点	是否为扩建站点
地铁开通	-0.009 *** (0.002)	-0.016 *** (0.004)
地铁开通 × 是否为中转站点	-0.009 * (0.005)	
地铁开通 × 是否为扩建站点	—	0.011 *** (0.004)
常数项	3.365 *** (0.294)	3.324 *** (0.291)
控制变量	是	是
固定效应	是	是
聚类维度	栅格/经度/纬度	
观测值	127 974	127 974
R ²	0.982	0.982

表 6 区域异质性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)
	是否高于 平均污染水平	是否高于 平均人口密度	是否为 非中心城区
地铁开通	-0.008 ** (0.003)	-0.007 *** (0.002)	-0.014 *** (0.003)
地铁开通 × 是否高于平均 污染水平	-0.013 *** (0.004)	—	—
地铁开通 × 是否高于 平均人口密度	—	-0.020 *** (0.003)	—
地铁开通 × 是否为 非中心城区	—	—	-0.015 *** (0.004)
常数项	3.636 *** (0.703)	3.734 *** (0.706)	3.571 *** (0.702)
控制变量	是	是	是
固定效应	是	是	是
聚类维度	栅格/经度/纬度		
观测值	126 672	126 672	126 672
R ²	0.993	0.993	0.993

注:第(1)列和第(2)列中虚拟变量“是否高于平均污染水平”“是否高于平均人口密度”定义为,若高于平均水平则为 1,反之则为 0;第(3)列中虚拟变量“是否为非中心城区”定义为,若栅格样本位于非中心城区为 1,反之则为 0。

表7 机制识别结果:交通替代(人口分流)效应

变量	(1)	(2)	(3)
地铁开通	0.681*** (0.031)	0.301*** (0.032)	0.301*** (0.065)
地铁开通 × 是否为中心城区	-0.194*** (0.042)	-0.156*** (0.041)	-0.156*** (0.057)
常数项	6.345*** (0.007)	24.645*** (3.933)	24.645*** (8.808)
控制变量	否	是	是
固定效应	是	是	是
聚类维度	栅格	栅格	栅格/经度/纬度
观测值	55 629	55 629	55 629
R ²	0.921	0.928	0.928

注:是否为中心城区为虚拟变量,若栅格处于中心城区则为1,反之则为0。

此外,为了更加严谨地证明地铁开通对中心城区地铁站点邻近区域雾霾污染的促降效应是交通替代(人口分流)机制的结果,本文还对表7报告的三重差分模型估计结果进行了平行趋势检验。图4所示的结果表明,地铁开通前,位于中心城区和非中心城区地铁站点邻近区域的人口密度并无明显差异,说明地铁开通对不同区域地铁站点邻近区域人口密度的影响并非事前组间差异所致。由此可见,交通替代(人口分流)机制确实是地铁开通的减霾机制渠道之一。

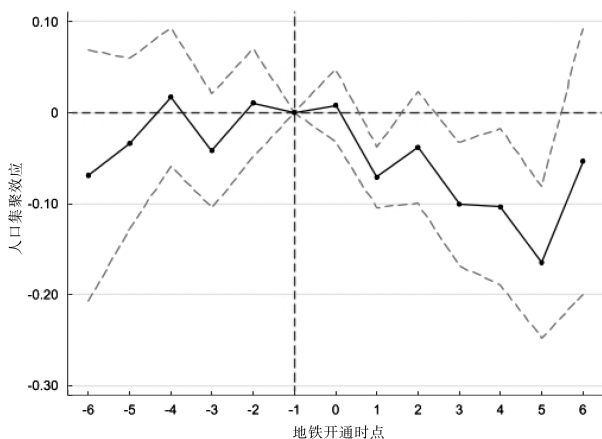


图4 地铁开通对非中心城区周边区域人口密度影响的事件分析法检验

(二)产业结构变动机制

既有研究表明,地铁开通会促进周边土地的资本化,直观表现为土地成交价格的显著上升^[16]。

而土地资本化会促进周边区域的土地利用模式由高污染、低密度的工业开发向低污染、高密度的商业化转变,从而对周边区域的雾霾污染产生促降作用^[33]。对此,本文基于微观土地出让数据,采用空间 DID 模型^[32],将地铁站点周围0~1 km、1~2 km、2~3 km 以及3~4 km 内的出让土地作为处理组,4 km 外的出让土地作为对照组,检验地铁开通对其站点周边土地利用模式的影响:

$$\ln LP_{jt} = \beta_0 + \sum_{p=1}^4 \beta_p Treat_j \times Post_t \times D_{jp} + \theta C'_{jt} + \lambda_j + \eta_t + \varepsilon_{jt} \quad (4)$$

$$\ln LA_{jt} = \beta'_0 + \sum_{p=1}^4 \beta'_p Treat_j \times Post_t \times D_{jp} + \theta' C'_{jt} + \lambda'_j + \eta'_t + \varepsilon'_{jt} \quad (5)$$

式(4)、式(5)中, LP_{jt} 和 LA_{jt} 分别表示出让土地 j 在 t 年的成交价格和出让面积; D_{jp} 为虚拟变量,表示出让土地 j 与其最近地铁站点的地理距离是否在 $(p-1, p]$ 千米之间, $p=1, 2, 3, 4$;控制变量 C'_{jt} 包括出让土地 j 的出让方式及是否位于中心城区^⑭; λ_j 和 λ'_j 表示出让土地的个体固定效应, η_t 和 η'_t 表示时间固定效应, ε_{jt} 和 ε'_{jt} 为随机扰动项。

本小节中使用的与土地相关的数据来源于中国土地市场网。本文手动收集了该网站上海市2007—2020年所有出让土地的公示信息,并删除了关键字段存在缺失或面积价格等于0的样本^⑮。

表8列示了相应的回归结果。可以看出,地铁开通后,地铁站点周边4 km范围内的土地成交价格均显著上升。在列(1)的基础上,按照土地用途将出让土地进一步划分为工业用地和商住用地两类进行比较分析,结果分别报告于表8列(2)和列(3)。可以看出,地铁开通后,地铁站点周边2 km范围内的商住用地成交价格均显著提升,且提升幅度显著大于工业用地,这意味着地铁开通会促进站点周边土地利用模式向商业化转变而挤出工业用地,即改变了土地利用模式。这是因为,地铁

⑭ 出让方式变量为虚拟变量,为1时表示出让方式为“划拨”或“协议出让”,反之为0;是否位于中心城区与前文定义一致。

⑮ 需要指出的是,中国土地市场网中上海市土地出让数据实际开始年份为2007年,这可能是由于2007年起工业和经营性用地招拍挂出让由国家政策上升为国家法律。

开通所带来的出行便利性会增加出行需求较强群体的购房需求,进而在市场机制的作用下增加住宅用地的供给^[8],从而降低地铁站点附近区域的雾霾浓度。其中,住宅用地的增加还会推动周边区域的商业化发展,进一步促进工业用地转为商业用地^[24],进而降低雾霾浓度。

表 8 机制识别结果:产业结构变动
(土地利用模式优化)效应

变量	成交价格			出让面积		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	全样本	工业用地	商住用地	全样本	工业用地	商住用地
0 km < D ≤ 1 km	0.754 *** (0.053)	0.177 *** (0.038)	0.783 *** (0.075)	-0.094 ** (0.042)	-0.084 (0.058)	-0.100 (0.061)
1 km < D ≤ 2 km	0.777 *** (0.096)	0.053 (0.079)	0.632 *** (0.124)	0.131 * (0.076)	-0.051 (0.119)	0.134 (0.103)
2 km < D ≤ 3 km	-0.145 (0.096)	0.039 (0.059)	-0.065 (0.156)	0.016 (0.076)	0.058 (0.089)	-0.053 (0.128)
3 km < D ≤ 4 km	0.237 ** (0.109)	-0.143 * (0.077)	0.072 (0.154)	0.168 * (0.087)	-0.031 (0.117)	0.217 * (0.127)
出让方式	-0.999 *** (0.058)	-0.252 *** (0.041)	-1.846 *** (0.085)	-0.452 *** (0.046)	-0.214 *** (0.062)	-0.540 *** (0.070)
是否中心城区	2.692 *** (0.231)	-0.676 (0.598)	2.281 *** (0.246)	-0.447 ** (0.183)	0.426 (0.905)	-0.537 *** (0.203)
常数项	6.585 *** (1.267)	5.466 *** (0.598)	6.939 *** (0.130)	-0.181 (1.004)	-0.318 (0.904)	1.334 *** (0.107)
固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
观测值	6 002	3 210	2 792	6 002	3 210	2 792
R ²	0.463	0.449	0.453	0.074	0.079	0.119

注:D 为出让土地与其最近地铁站点的地理距离;所有模型均控制了土地的个体和时间固定效应;括号中数值为稳健标准误。

同时,还考察了地铁开通对周边土地出让面积的影响,相应的回归结果报告于表 8 第(4)列~第(6)列。从表 8 列(4)报告的结果来看,受到地铁站点设施自身占地及邻避效应^⑩的影响,地铁开通后地铁站点周边 1 km 范围内的土地出让面积显著下降。在区分土地用途后,发现仅地铁站点周边 3~4 km 范围内的商住用地,其出让面积在 3 km 至 4 km 此范围内呈现出显著上升态势,这表明地铁开通会在更大程度上挤出工业用地,促使周边区域的土地利用模式由高污染、低密度的工业开发向低污染、高密度的商业化转变,进而有利于缓解雾霾污染。上述结果表明假说 3 是成立的。

此外,基于 2000—2016 年企业工商登记注册信息数据,本文首次统计了栅格层面 2000—2016 年每半年的初创企业数量、制造业及服务业初创企业数量,并以上述变量为机制变量,为地铁开通引致的产业结构变动机制提供更加直接的微观证据:

$$\ln entry_{it}^{type} = \alpha_0''' + \alpha_1''' Treat_i \times Post_t + \mu_i''' + \nu_t''' + \varepsilon_{it}''' \quad (7)$$

式(7)中,下标 i 和 t 分别表示栅格和时期。 $Treat_i \times Post_t$ 表示栅格 i 在 t 时期是否开通了地铁。 $entry_{it}^{type}$ 表示栅格 i 在 t 时期的初创企业数量,其中 $type$ 分别表示初创企业、制造业初创企业以及服务业初创企业。 μ_i''' 表示栅格 i 的个体固定效应, ν_t''' 表示时间固定效应, ε_{it}''' 为随机扰动项,其他变量含义与前文相同。

从表 9 列(1)和列(2)报告的结果来看,地铁开通显著增加了地铁站点周边 2 km 范围内栅格中的初创企业数量。进一步地,列(3)和列(4)的结果表明,地铁开通显著降低了地铁站点周边 2 km 范围内栅格中的制造业初创企业数量,但提高了服务业初创企业数量。上述结果表明,地铁开通会挤出污染排放相对较高的劳动密集型的制造业企业,转而吸引更多的资本和知识密集型的服务业企业,最终通过改变产业结构以产生减霾效应。为对上述结论提供更加严谨地证据,我们以事前一期为基期,对表 9 第(2)~第(4)列中报告的估计结果进行了平行趋势检验。图 5 所示的结果表明,在地铁开通前,处理组栅格和控制组栅格中的全行业及服务业企业的新成立数并无明显差异,说明地铁开通对企业进入的影响并非事前组间差异所致。由此可见,产业结构变动确实是地铁开通的一个减霾机制渠道。

表 9 机制识别结果:产业结构变动
(初创企业类型变化)效应

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	全样本		制造业	服务业
地铁开通	0.054 9 ** (0.022 6)	0.054 9 ** (0.025 5)	-0.278 6 *** (0.029 6)	0.150 0 *** (0.025 6)
常数项	1.043 5 *** (0.004 7)	1.043 5 *** (0.005 2)	0.294 2 *** (0.006 1)	0.939 7 *** (0.005 3)
固定效应	是	是	是	是
聚类维度	栅格	栅格/经度/ 纬度	栅格/经度/ 纬度	栅格/经度/ 纬度
观测值	103 598	103 598	103 598	103 598
R ²	0.850 3	0.850 3	0.520 5	0.849 9

⑩ 地铁邻避效应是指,由于地铁带来的噪声污染和人流过多等因素,离地铁很近住房的需求反而可能会下降^[34]。

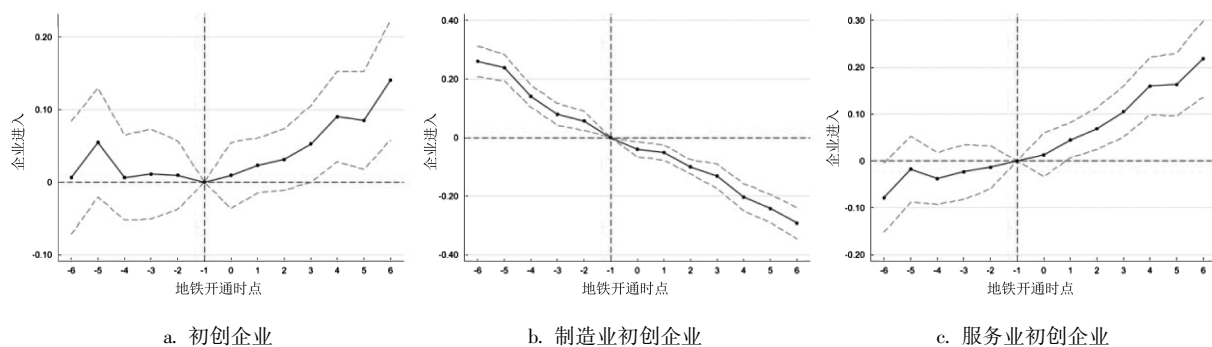


图5 地铁开通对周边区域初创企业数量影响的动态效应

五、结论与政策启示

“十四五”以来,污染防治攻坚战进入新阶段,我国的治理雾霾污染工作仍然面临着重大挑战。同时,随着人民生活水平的不断提高,其对改善生态环境和健康安全的诉求也日益强烈。由于兼具绿色低碳、准时性高等优点,推动以地铁为代表的城市公共交通建设被视为改善城市空气质量的重要举措。然而,在城市内部视角下,学界并未就地铁开通能否有效减霾达成共识,更未就城市内部可能的减霾机制进行实证考察。本文以世界范围内线路总长度最长的城市轨道交通系统——上海地铁为例,采用栅格数据样本和双重差分方法实证检验了地铁开通对城市雾霾污染的影响,并基于地铁站点与周边区域的差异化特征考察了地铁开通的异质性减霾效应,进而识别了地铁开通影响城市雾霾污染的作用机制,得到了如下主要结论。首先,地铁开通对雾霾污染存在显著的减排效应,并且这一结论在通过一系列稳健性检验后被证明是可信的。此外,当地铁站点为中转站点或非扩建站点时会产生更强的减霾效应,并且当地铁站点周边区域的平均雾霾污染水平越高、平均人口密度越大及站点处于非中心城区时,地铁开通所产生的减霾效应更强。最后,相较于中心城区,地铁开通会更加显著地增加非中心城区的人口密度,从而通过交通替代机制而降低雾霾污染水平。同时,地铁开通还会提升站点周边区域商住用地的成交价格、降低工业用地的出让规模,从而促进服务业企业进入、挤出制造业企业,促使站点周边地区的产业结构愈发清洁化与集约化,进而有利于缓解雾霾污染。

上述结论为地铁的环境效应提供了新的文献和经验证据,并为城市地铁建设的必要性提供了学理支持,同时也可作为以上海为代表的特大城市如何更

好地发展绿色公共交通体系提供一定的决策依据。

第一,既然城市地铁建设的减霾效应与地铁站点的特征及选址高度相关,那么政府在积极推动以地铁为代表的城市公共交通基础有序开工建设的同时,还应该进一步优化城市轨道交通的规划与布局,坚决避免“面子工程”和超前规划。同时,本文研究发现地铁中转站与扩建站点的减霾效应存在进一步发掘的空间,因此应以《城市轨道交通沿线地区规划设计导则》为重要参考,进一步完善站内路径引导,尽可能提高换乘、出站效率,同时做好地铁站点交通衔接、步行空间及出入口等要素的设计引导。

第二,发现地铁开通可以通过交通替代机制而实现减霾效应,这意味着对于上海这类特大城市而言,首先要进一步加强中心城外围地区、中心区和重点转型地区协调发展的轨交服务,提高地铁的服务覆盖率;其次要进一步提高地铁服务质量,具体包括针对实时客流变化丰富轨道交通制式、维护车站及车厢环境等。最后政府要加大对地铁站点及周边区域的综合开发建设力度,为因地铁选择居住在周边的民众创造完善的基础设施条件和生活环境。

第三,政府需要就地铁开通后周边土地的去工业化趋势进行充分预案。首先,政府不应迁离的相关企业“不闻不问”,而需及时对其进行资产评估并制定相应的迁离引导方案,为企业后续迁离创造便利条件;其次,政府可以积极吸引民间投资参与城市轨道交通项目的开发建设,鼓励社会资本参与投资,提高城市轨道交通的开发和运营绩效;最后,虽然地铁开通引致的土地利用模式优化有助于改善空气质量,但仍需警惕土地去工业化后出现过密、过密开发的情况,以避免引发同质化竞争及噪声污染等其他新问题。

参考文献:

- [1] 贾锐宁, 邵帅, 郑英杰, 等. 中国高铁建设与城市减霾绩效: 基于空间双重差分模型的经验考察[J]. 中国软科学, 2023(11): 109-121.
- [2] 刘冲, 吴群峰, 刘青. 交通基础设施、市场可达性与企业生产率: 基于竞争和资源配置的视角[J]. 经济研究, 2020, 55(7): 140-158.
- [3] CHEN Y, WHALLEY A. Green infrastructure: the effects of urban rail transit on air quality[J]. American economic journal: economic policy, 2012, 4(1): 58-97.
- [4] DURANTON G, TURNER M A. The fundamental law of road congestion: evidence from US cities[J]. American economic review, 2011, 101(6): 2616-2652.
- [5] LI S, LIU Y, PUREVJAV A O, et al. Does subway expansion improve air quality? [J]. Journal of environmental economics and management, 2019, 96: 213-235.
- [6] 文雁兵, 张梦婷, 俞峰. 中国交通基础设施的资源再配置效应[J]. 经济研究, 2022, 57(1): 155-171.
- [7] 杨文越, 梁斐雯, 曹小曙. 多尺度建成环境对居民通勤出行碳排放的影响: 来自广州的实证研究[J]. 地理研究, 2020, 39(7): 1625-1639.
- [8] 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.
- [9] 王学渊, 李婧薇, 赵连阁. 地铁开通对城市空气质量的影响[J]. 中国人口科学, 2020(3): 89-103.
- [10] 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(8): 136-151.
- [11] 李琬, 但波, 孙斌栋, 等. 轨道交通对出行方式选择的影响研究: 基于上海市 80 后微观调查样本的实证分析[J]. 地理研究, 2017, 36(5): 945-956.
- [12] LIN C, YANG K, HUANG J, et al. Impacts of wind stilling on solar radiation variability in China[J]. Scientific reports, 2015, 5(1): 15135.
- [13] 邵帅, 李欣, 曹建华. 中国的城市化推进与雾霾治理[J]. 经济研究, 2019, 54(2): 148-165.
- [14] WROBEL A, ROKITA E, MAENHAUT W. Transport of traffic-related aerosols in urban areas[J]. Science of the total environment, 2000, 257(2): 199-211.
- [15] GU Y, JIANG C, ZHANG J, et al. Subways and road congestion[J]. American economic journal: applied economics, 2021, 13(2): 83-115.
- [16] 踪家峰, 淦振宇. 地铁促进了城市资本化吗[J]. 财经科学, 2019(5): 41-55.
- [17] GENDRON-CARRIER N, GONZALEZ-NAVARRO M, POLLONI S, et al. Subways and urban air pollution[J]. American economic journal: applied economics, 2022, 14(1): 164-196.
- [18] 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.
- [19] ZHENG S, ZHANG X, SUN W, et al. 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.
- [20] 彭冲, 金培振. 消费型街道: 道路密度与消费活力的微观证据[J]. 经济学(季刊), 2022, 22(4): 1361-1382.
- [21] 甄峰, 李哲睿, 谢智敏. 基于人口流动的城市内部空间结构特征及其影响因素分析: 以南京市为例[J]. 地理研究, 2022, 41(6): 1525-1539.
- [22] 陈恭军. 土地资源错配、产业结构与雾霾污染: 基于空间计量和动态面板门槛模型的实证分析[J]. 中国软科学, 2022(12): 143-152.
- [23] 欧维新, 张振, 陶宇. 长三角城市土地利用格局与 PM2.5 浓度的多尺度关联分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(7): 11-18.
- [24] 谭章智, 李少英, 黎夏, 等. 城市轨道交通对土地利用变化的时空效应[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 850-862.
- [25] 林雄斌, 杨家文, 段阳, 等. 轨道交通周边土地溢价捕获的制度安排与实施机制: 全球经验及其中国启示[J]. 中国软科学, 2022(5): 87-97.
- [26] BECK T, LEVINE R, LEVKOV A. Big bad banks? the winners and losers from bank deregulation in the United States[J]. The journal of finance, 2010, 65(5): 1637-1667.
- [27] 于亚卓, 张惠琳, 张平淡. 非对称性环境规制的标尺现象及其机制研究[J]. 管理世界, 2021, 37(9): 134-147.
- [28] 余泳泽, 唐孝妍. 高校基础研究与创新知识溢出: 来自高校设立技术转移机构的证据[J]. 中国软科学, 2024(3): 162-173.
- [29] 张阿根. 上海城市地质工作发展与展望[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(1): 5-12.
- [30] 于广. 上海地铁建设的历史考察(1953—1993 年)[J]. 当代中国史研究, 2023, 30(5): 121-132.
- [31] 刘涛, 曹广忠. 大都市区外来人口居住地选择的区域差异与尺度效应: 基于北京市村级数据的实证分析[J]. 管理世界, 2015(1): 30-40.
- [32] 李松林, 刘修岩, 王峤. 集聚与创新: 来自摩天大楼建设的证据[J]. 经济学(季刊), 2023, 23(2): 517-531.
- [33] 黄志基, 宋澜, 高菠阳, 等. 工业用地出让、产业选择与城市空气质量[J]. 地理研究, 2022, 41(1): 229-250.
- [34] 王佃利, 王铮. 交通类邻避设施冲突的衍生逻辑及其治理: 基于设施属性的多案例分析[J]. 中国行政管理, 2018(9): 130-136.

(本文责编: 润 泽)