

地铁开通对城市空气质量的影响

王学渊 李婧薇 赵连阁

【摘要】文章从城市人口规模与房地产及商业市场动态变化的现实条件出发,阐释地铁开通的交通替代和交通创造效应的作用机理,基于2014~2018年中国21个城市194个空气质量监测站点的日度数据,利用断点回归方法系统考察新开通地铁线路对城市空气质量的影响。研究发现,在交通替代效应与交通创造效应的综合作用下,地铁开通对空气质量的影响呈现出明显的城市异质性:(1)在常住人口规模为400万~700万的城市,交通替代效应大于交通创造效应,地铁开通提升了空气质量;(2)当城市常住人口规模在700万~900万之间时,交通替代效应可能被交通创造效应抵消,地铁开通并未明显改善空气质量;(3)在常住人口规模大于900万的城市,交通创造效应超过交通替代效应,空气质量在地铁开通之后不升反降。因此,对于交通需求不断增加的特大型和超大型城市来说,推进城市公共交通枢纽周边的职住平衡,实施污染型交通方式的绿色化升级,激励居民的绿色出行,是治理交通污染的根本性举措。

【关键词】地铁 空气质量 交通替代 交通创造 断点回归

【作者】王学渊 浙江工商大学经济学院,教授;李婧薇 浙江工商大学经济学院,硕士研究生;赵连阁 浙江工商大学经济学院,教授。

一、引言

客运交通是中国城市空气污染的主要成因之一。自“可持续交通系统”概念提出后,由于容量大、低碳节能、安全准时等特性,轨道交通(尤其是地铁)被普遍认为是一项可以有效缓解城市交通拥堵和空气污染的绿色交通手段(Jeon等,2005)。中国轨道交通正步入快速发展阶段。截至2018年年末,中国大陆地区开通城轨的城市共有35个,城轨在建城市53个,运营线路总长度5761.4公里,其中地铁占75.6%,年建设投资5470.2亿元,同比增长14.9%^①。建造和运营成本高昂的地铁开通是否能有效改善城市空气质量?准确识别这一影响,对于中国城市现代交通系统建设与大气环境治理的规划及公共政策制定非常关键。

目前基于准实验计量模型估算轨道交通环境影响效应的经验研究不断涌现,但没

^①《城市轨道交通2018年度统计和分析报告》(<http://www.camet.org.cn>)。

有得出一致的结论,分歧主要归结于交通替代和交通创造两类相反的作用路径。交通替代效应的含义是,轨道交通的开通使出行者逐渐减少使用原来高污染排放的路面交通方式,从而改善城市空气质量(Mohring, 1972; 梁若冰、席鹏辉, 2016)。交通创造效应是指轨道交通的发展创造了新的路面交通出行需求,城市空气质量变化不大或发生下降(Vickrey, 1969; Duranton 等, 2011; Li 等, 2019)。

多数实证研究聚焦于轨道交通的交通替代效应对城市空气质量的改善效果。Chen 等(2012)发现,台北市新开通轨道交通后,汽车尾气 CO 排放减少了 5%~15%。张英杰等(2015)研究表明,轨道交通可达性的提高能显著降低站点附近居民私家车的拥有率。梁若冰、席鹏辉(2016)研究显示,2005~2013 年中国新开通的 45 条地铁线路显著减少了所在城市和汽车尾气相关的空气污染排放。Zheng 等(2019)发现,长沙市地铁开通的第一年,城区 CO 的浓度明显降低,且出行高峰期的 CO 浓度下降程度更大。杨小聪等(2017)研究显示,南京地铁三号线的开通有效缓解地面交通压力,在不同时间段和节假日均能有效提高空气质量。Yang 等(2018)研究发现,2009~2015 年北京 6 条新开通的地铁线路在短期内降低了路面交通拥堵程度。高明等(2018)研究表明,2014~2016 年全国 40 条轨道交通线路及 24 条 BRT 线路的开通都对空气质量有显著且稳健的改善作用。谌仁俊等(2018)指出,2013~2017 年武汉市开通的 6 条地铁线路能有效降低城市空气质量指数(AQI)。Li 等(2019)发现,2008~2016 年北京市地铁密度每增加 1 个标准差,空气质量提升 2%。冯国强、李菁(2019)研究表明,2014~2018 年在 600 万人以下和 1 200 万~1 500 万人的省会城市,轨道交通有显著的减排治污效应。

支持交通创造效应假说的研究更多地关注于轨道交通对城市路面交通条件的影响。庇古一奈特—当斯悖论表明,公共交通设施的扩建和交通网络的增加并未降低总体的私人汽车出行需求,甚至可能会加剧整体的路面交通拥堵(Ding 等, 2012)。Duranton 等(2011)认为,轨道交通引发的路面交通条件改善可以使私人驾驶更有吸引力,并诱导使用私家车的额外旅行需求。Zhang 等(2017)、李琬等(2017)的研究均未找到轨道交通会使购车者减少小汽车使用的证据。冯国强、李菁(2020)发现,在小于 600 万人和大于 900 万人的省会城市,轨道交通并未有效改善路面交通拥堵。另外,地铁等轨道交通的发展会影响城市房地产和商业市场,中心城区地铁线路周边的商业空间增加,住房价格上升,这可能会在一定程度上推进城市空间的职住失衡趋势,创造出新的通勤需求。马归民等(2016)发现,轨道交通带动了中心城区站点周边的商业活动。郑思齐等(2014)指出,高效绿色的城市轨道交通为周边土地带来溢价效应。张英杰等(2015)发现,随着居住地与最近地铁站点距离的增加,居民私家车拥有率不断提高。申犁帆等(2018)研究表明,北京轨道交通的发展带来了较高度度的职住失衡。郑思齐等(2016)研究显示,北京的职住失衡提升了高峰期交通拥堵指数。王卉彤等(2018)研究表明,交通拥堵的增加会显著

降低职住平衡的减霾效应。

理论上,地铁开通后由于发生交通替代效应而提升空气质量,也可能同时创造更多的非绿色交通需求加剧污染。地铁开通的城市空气质量影响结果实际上取决于作用方向相反的交通替代和交通创造的综合效应。目前已有文献侧重于在经验研究的基础上探索地铁开通的交通替代效应带来的城市空气质量改善效果,这为本文提供了两方面可进一步拓展的研究方向。一是以往研究一般在人口分布和市场活动静态假设下展开,而地铁开通引致的路面交通条件、房地产市场和商业活动的动态变化,可能会带来城市居民经济活动和职住模式的转变,进而产生较为显著的非绿色交通需求创造效应。为此,本研究首先从城市人口分布和市场活动的动态变化出发,在理论层面探讨地铁开通带来的绿色与非绿色交通方式相对价格变化产生的交通替代与交通创造效应。二是基于个别城市案例或全国部分城市样本数据分析的相关经验文献大多证实地铁开通对非绿色交通需求的替代效应,有关交通创造效应的实证证据较少。本文利用断点回归方法估计2014~2018年中国21个城市新开通地铁线路对日均空气质量的影响,分析地铁开通环境影响效应的城市异质性,为地铁开通产生的交通替代和交通创造综合效应提供了更丰富稳健的实证支持。

二、机理分析与研究假说

地铁是现代城市绿色交通体系中一类重要的轨道交通方式。地铁开通的空气质量改善效应主要来自其对传统依赖化石燃料为能源的非绿色路面交通方式需求的替代效应。然而,这种替代效应的发生取决于人们对绿色交通方式与非绿色交通方式相对价格的考量。从图1可以看出,在原有交通总需求保持不变或变化很小的情况下,地铁开通增加绿色交通设施的供给。考虑地铁的准时性、便捷性和舒适性等特征,绿色交通方式与非绿色交通方式的相对价格将下降,人们出行会选择性价比更高的绿色交通方式,而非绿色路面交通量将下降。地铁开通的交通替代效应使客运交通污染排放减少,空气质量提升。

根据当斯定律,新建的交通设施会引致新的交通量,交通需求总是趋于超过交通供给(Ding等,2012)。如图1所示,城市是一个动态的复杂系统,城市交通需求受多种因素影响,而这些因素又和轨道交通的发展密切相关。一方面,地铁开通产生的交通需求可能会远超过其增加的绿色交通供给能力。在交通需求大增的情况下,地铁的拥挤会降低乘客出行的

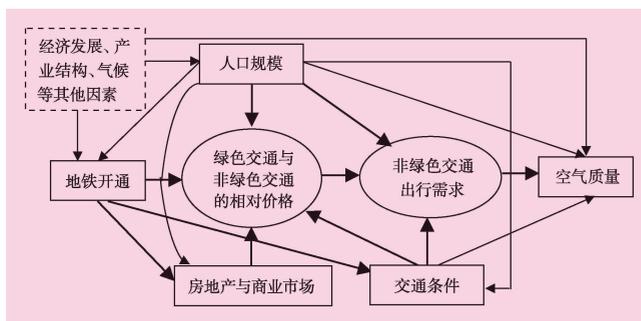


图1 地铁开通对空气质量的影响因果

舒适性和便捷性,而路面交通条件改善,私人驾车的拥堵度下降,地铁的性价比降低。另一方面,城市的人口规模、经济发展水平、产业结构和气候条件等因素决定了城市是否会建设地铁,而地铁建设与发展又会影响房地产和商业市场。住房成本在人们居住选址决策中的影响远大于通勤成本,如果中心城区地铁站附近的房价上涨过高,考虑到高昂的住房成本,私人汽车等非绿色交通方式的通勤成本会显得相对便宜,人们很可能选择在离中心城区地铁站较远的区域居住,并增加私人汽车使用量。

在城市动态系统中,地铁开通并不会导致绿色交通方式与非绿色交通方式间相对价格的必然下降,而是会引发相对价格的结构化变化,地铁开通的交通替代效应和交通创造效应将同时存在。对于和房地产及商业市场关联较小且私人汽车偏好不高的城市居民来说,地铁开通带来的绿色交通与非绿色交通间相对价格的下降,会使他们减少非绿色交通出行需求。而对与房地产及商业市场关联较大且私人汽车偏好较高的居民来说,地铁开通将会引致绿色交通与非绿色交通间相对价格不降反升,这类人群的非绿色交通出行需求会增加。

基于上述分析可知,地铁开通对城市空气质量产生的最终影响,是影响方向相反的交通替代与交通创造双重效应的合力结果。城市的人口规模是地铁开通与交通条件、房地产及商业市场关联度的关键性决定因素,同时在很大程度上影响交通需求结构的变动。不同人口规模城市的地铁开通所引致的绿色与非绿色交通方式间相对价格变化的结构性差异势必较大,进而产生影响程度不同的交通替代效应和交通创造效应。本文据此提出以下研究假设(见图2):(1)人口规模大且仍在不断扩张的城市,居民的交通出行需求增长较快。地铁开通后,由于中心城区地铁周边住房价格和商业活动会上升,非绿色交通与居住成本相比,相对价格下降,人们的职住分离选择意愿增强。从整个城市看,交通替代效应小于交通创造效应,绿色交通使用数量虽然有所增加,但非绿色交通使用数量会上涨更多。在此情景下,空气污染在地铁开通后可能会更加严重。(2)人口规模较小或有停滞和收缩趋势的城市,居民的交通出行需求变化不大。地铁开通后,绿色交通成本会更便宜,绿色交通与非绿色交通价格之比小于地铁开通前,交通替代效应带来非绿色交通使用数量的下降。虽然由于房地产市场和商业活动的变化,可能会存在交通创造效应,但小于交通替代效应。地铁开通可能会带来空气质量的明显提升。(3)人口规模及变迁状况介于前两种情况之间时,交通创造效应可能恰好抵消交通替代效应,人们非绿色交通使用数量变化不大,地铁开通对空气质量的影响不显著。

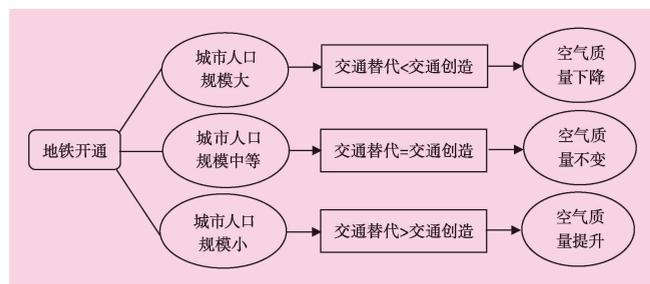


图2 地铁开通的交通替代和交通创造综合效应

三、计量模型设定与变量说明

(一) 模型设定

地铁开通与城市空气质量间的因果链条中存在许多的混杂因子(人口规模、房地产与商业市场、交通条件、经济发展水平、产业结构等),为准确识别与测量地铁开通对城市空气质量的影响效应,本文参照梁若冰、席鹏辉(2016)的研究,选择断点回归(RD)方法。该方法是准实验计量方法中的一种,将同一样本视为处理组与控制组,估计的是局部平均处理效应(LATE),当两组样本在断点处无限接近时,可以避免因遗漏变量和样本选择非随机性而造成的估计偏误(Lee等,2010)。由于各城市地铁开通时间为具体日期^①,不同的开通时间可以被视为一项政策性变量,由此产生明显的时间分界值。在分界值前后较短时间内,同一城市的气候条件、经济发展水平和产业结构等变量均不会发生较大变化^②,如果空气质量在分界值处产生跳跃式变化,那么造成这种差异的原因很大可能是城市内地铁线路的开通。本文设定的断点回归模型为:

$$AQI_{idmy} = \alpha_0 + \beta_1 open_{idmy} + \beta_2 f(x) + \beta_3 open_{idmy} \cdot f(x) + Z\gamma + \lambda_y + \rho_m + \theta_w + \mu_h + \sigma_i + \varepsilon_{idmy}$$

其中,被解释变量 AQI_{idmy} 为城市空气质量监测站点 i 在 y 年 m 月 d 日的空气质量状况; $open_{idmy}$ 为地铁是否开通的虚拟变量,开通日期之前该变量为 0,开通当日及之后为 1; x 表示距离地铁开通的第 x 天,是断点回归模型中的执行变量,在开通当日该值为 0,开通之前为负数,开通之后为正数; $f(x)$ 是 x 的多项式函数; Z 代表一系列影响城市空气质量的控制变量,包括主要的气候条件等变量, γ 为待估参数向量。 λ_y 、 ρ_m 、 θ_w 、 μ_h 、 σ_i 分别表示年份效应、月份效应、工作日效应、节假日效应和固定效应, ε_{idmy} 为随机扰动项。模型中,地铁开通前后的空气质量的变动由 β_1 的估计值反映。

(二) 变量说明与数据来源

断点回归模型中的被解释变量为城市空气质量。基于数据的可获得性,本文选取使用 2014 年 5 月至 2018 年 12 月中国 21 个城市^③194 个空气质量监测站点的日均空气质

① 地铁开通日期是指地铁投入载客运营的日期。《城市轨道交通试运行基本条件 GB30013-2013》规定,在城市轨道设施建设完成后,轨道交通工程冷、热滑试验成功,系统联调结束,还必须得有不少于 3 个月的不载客试运行期。在试运行期,对运营组织管理和设施设备系统的可用性、安全性和可靠性进行检验,全部检验合格后,才能开始从事载客运营。因此,本文断点回归模型的研究期间远离地铁建设完成日期,避免“建设期内污染增加,建设停止污染立即减少”问题对估计结果的干扰。

② 在地铁开通前后一段时间内,各项指标的具体数值可能有所差异,但概率分布基本相同。

③ 为保证断点日期前后有足够的观测期,本文选择 2014 年 7 月至 2018 年 7 月间有新开通地铁线路的 21 个城市为研究对象,包括北京、天津、石家庄、南京、杭州、福州、南昌、合肥、武汉、长沙、成都、西安、南宁、大连、青岛、深圳、宁波、无锡、厦门、贵阳、东莞等。特别说明的是,由于上海、广州的空气质量数据收集不全,没有包含在样本中。

量指数(AQI)^①和六类空气污染物的排放浓度,数据来自中国空气质量历史数据网站^②。核心解释变量为各城市地铁开通日期和距开通日期的天数,数据来自历年《城市轨道交通统计和分析报告》及百度百科。主要控制变量为气候条件,包括城市日均气压、风速、

气温、降水等,数据来自国家气象科学数据共享服务平台^③。模型控制了节假日固定效应,设定节假日虚拟变量(0,1),处于节假日时为1,非节假日时为0,数据来自历年《国务院办公厅关于节假日安排的通知》。主要变量的描述性统计如表1所示。

表1 主要变量描述性统计

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
AQI 指数	317542	76.690	48.972	1	500
CO(mg/m ³)	317320	0.980	0.624	0.001	90
NO ₂ (μg/m ³)	316991	39.349	22.256	1	474.696
O ₃ (μg/m ³)	317168	59.034	33.333	1	451.846
PM10(μg/m ³)	314614	83.748	61.032	1	1435.350
SO ₂ (μg/m ³)	317143	15.774	15.939	1	800
PM2.5(μg/m ³)	316738	49.976	41.648	1	698.652
气压(0.1hpa)	316930	9967.923	362.943	0	10434
风速(0.1m/s)	316910	22.285	13.129	0	751
气温(0.1℃)	316930	175.848	93.348	-177	360
降水(0.1mm)	313900	23.686	427.672	0	32766

表2 地铁开通前后主要变量差异的t检验结果

变量	地铁开通前 50 天		地铁开通后 50 天		均值差异 t 值
	样本量	均值	样本量	均值	
AQI 指数	8409	83.484	9102	90.233	6.749*** (0.848)
CO(mg/m ³)	8409	1.007	9102	1.112	0.104*** (0.010)
NO ₂ (μg/m ³)	8409	42.903	9102	41.450	-1.454*** (0.363)
O ₃ (μg/m ³)	8409	56.126	9102	51.812	-4.315*** (0.521)
PM10(μg/m ³)	8409	92.133	9102	96.049	3.916*** (0.999)
SO ₂ (μg/m ³)	8409	17.872	9102	19.679	1.807*** (0.224)
PM2.5(μg/m ³)	8409	56.483	9102	62.923	6.441*** (0.724)
气压(0.1hpa)	8409	9931.242	9102	9935.719	4.477 (5.523)
风速(0.1m/s)	8409	22.458	9102	20.984	-1.473*** (0.153)
气温(0.1℃)	8409	164.240	9102	155.173	-9.066*** (1.516)
降水(0.1mm)	8409	17.777	9102	20.565	2.787** (1.111)

注:括号内数据为标准误;**、*** 分别表示在 5%、1%的水平上显著。

此外,本文截取了地铁开通日期前后各 50 天的主要变量数据进行样本均值 t 检验(见表 2)。从表 2 可以看出,被解释变量中,除 NO₂、O₃ 外,日均 AQI 和 CO、PM10、SO₂、PM2.5 排放浓度在地铁开通后均有上升,且均在 1%的水平上显著。在主要控制变量中,地铁

① 环保部公布的现行《环境空气质量标准 GB3095-2012》与《环境空气质量指数(AQI)技术规定 HJ633-2012》定义空气质量指数为定量描述空气质量的无量纲指数,参与评价的污染物有六类,即二氧化硫 SO₂、二氧化氮 NO₂、粒径小于 10μm 的颗粒物 PM10、一氧化碳 CO、臭氧 O₃ 和粒径小于 2.5μm 的颗粒物 PM2.5。AQI 数值越大,表示空气污染状况越严重。

② 网址: <http://beijingair.sinaapp.com>。

③ 网址: <http://data.cma.cn>。

开通后日均风速、日均气温在 1% 的水平上显著降低,日均降水量在 5% 的水平上显著增加。气候条件变量的差异 t 值符号与梁若冰、席鹏辉(2016)的研究结果一致,但空气质量变量的差异 t 值符号却大部分与其相反。这可能是由于梁若冰、席鹏辉(2016)使用的是 2005~2013 年城市轨道交通建设和空气污染日度数据,而本文研究的时间范围是 2014~2018 年^①。2013 年之后,随着户籍制度改革的深化和交通基础设施的完善,大城市和区域中心城市人口集聚态势增强(袁冬梅等,2019)。在人口规模不断扩大的城市,人们的交通需求迅猛增长,轨道交通设施与房地产及商业市场的联系愈加紧密,这为本文基于人口分布和市场活动动态变化的现实条件,揭示地铁开通对城市空气质量的影响机理,提供了不同层面和不同角度的经验证据。

四、实证结果

(一) 总体样本估计结果

图 3 显示了地铁开通前后 50 天总体样本城市站点 AQI 均值在断点附近的散点图及其二项式拟合曲线。如图 3 所示,AQI 均值在地铁开通日期附近出现了明显的断点,其在地铁开通后发生了跳跃式上升。

本文基于该断点图进一步利用 RD 方法对断点处的 LATE 进行估计,结果如表 3 所示。从表 3 可见,加入控制变量和固定效应之后模型的组内 R^2 提升到 0.48 左右。除模型 3 的估计结果外,其他模型的核心解释变量(地铁开通与否)的参数估计结果均在 1% 和 5% 的水平上显著为正。对于总体样本的 21 个城市来说,空气质量指数在地铁开通后的短期内大约上升了 7.44%~21.08%。控制变量的估计结果均在 1% 的水平上显著,各变量估计参数不仅符号一致,差异也非常微小。气压、风速、降水的增加都会带来 AQI 的下降,而气温的增加会带来 AQI 的上升^②。

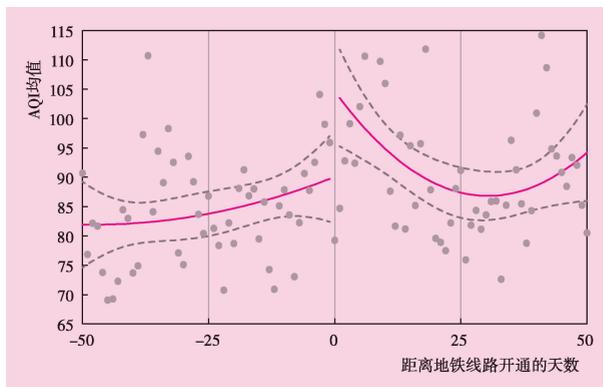


图 3 总体样本地铁开通前后 50 天空气质量指数的二项式拟合曲线

注:图中虚线表示 95% 置信区间的上限和下限。

- ① 从 2014 年开始,中国公开的环境质量指数由 API 变为 AQI。AQI 核算的污染物指标比 API 增加了三类,标准更为严格,二者不具可比性。
- ② 此估计结果与梁若冰、席鹏辉(2016)的断点模型估计结果基本一致。当气温升高时,细颗粒物(PM)与臭氧(O₃)生成的反应会加速,从而使空气质量变差,这一现象在温暖的季节更为明显(Ikram 等,2015)。

表3 总体样本断点回归估计结果(N=17760)

变 量	被解释变量为 AQI					
	模型 1 (线性)	模型 2 (二项式)	模型 3 (三项式)	模型 4 (线性)	模型 5 (二项式)	模型 6 (三项式)
地铁开通与否	6.210** (2.767)	10.497*** (3.060)	-3.011 (3.923)	11.753*** (2.840)	17.602*** (3.235)	9.237** (4.207)
开通天数	0.160*** (0.057)	0.338* (0.180)	2.694*** (0.633)	-0.060 (0.096)	-0.148 (0.191)	1.619*** (0.474)
开通与否 # 天数	-0.306*** (0.086)	-1.192*** (0.242)	-2.788*** (0.967)	0.049 (0.080)	-0.545** (0.251)	-2.292*** (0.798)
天数平方		0.004 (0.003)	0.118*** (0.029)		-0.002 (0.003)	0.087*** (0.021)
开通与否 # 天数平方		0.011** (0.005)	-0.142*** (0.042)		0.016*** (0.005)	-0.076** (0.034)
天数三次方			0.002*** (0.000)			0.001*** (0.000)
开通与否 # 天数三次方			-0.001* (0.001)			-0.001** (0.000)
气压				-0.124*** (0.030)	-0.123*** (0.030)	-0.124*** (0.030)
风速				-1.184*** (0.079)	-1.184*** (0.080)	-1.182*** (0.079)
气温				0.148*** (0.030)	0.149*** (0.030)	0.142*** (0.031)
降水				-0.045*** (0.005)	-0.045*** (0.005)	-0.044*** (0.005)
组内 R ²	0.005	0.006	0.008	0.479	0.480	0.481

注:模型 1 至模型 3 未控制固定效应、年份效应、月份效应、工作日效应和节假日效应,模型 4 至模型 6 控制了上述效应。括号内数据为站点层面聚类稳健标准误。**、*** 分别表示在 5%、1%的水平上显著。

需要指出的是,时间断点回归估计仍然可能没有办法完全排除被解释变量受其他因素影响在断点处发生显著变化的可能性。为此,本文继续进行模型估计的稳健性检验和安慰剂检验(见表 4、表 5)。表 4 中被解释变量设定为六大类污染物的排放浓度。除 O₃ 外,其他五类污染物的排放浓度均在地铁开通后显著增加。其中,CO 浓度的提升幅度为 15.29%,NO₂ 浓度增加了 12.84%,PM10 浓度提高了 26.60%,SO₂ 浓度增长了 13.79%,PM2.5 浓度上升了 20.59%。表 5 中被解释变量设为气候条件变量,检验空气质量的其它影响变量是否也在断点处发生跳跃,表 5 的估计结果显示,气候条件变量均未因地铁开通而发生显著变化,表明空气质量在地铁开通日期前后发生断点的真实性。此外,断点回归参数估计的局部多项式回归结果依赖于带宽的选择,在带宽敏感性检验中,本文

表 4 总体样本估计的稳健性检验

变 量	CO	NO ₂	O ₃	PM10	SO ₂	PM2.5
地铁开通与否	0.154 ^{***} (0.029)	5.507 ^{***} (1.135)	-0.648(1.390)	24.504 ^{***} (3.772)	2.464 ^{***} (0.848)	11.630 ^{***} (2.790)
组内 R ²	0.555	0.605	0.609	0.492	0.508	0.463
样本量	17755	17754	17755	17539	17751	17751

注：括号内数据为站点层面聚类稳健标准误。表中全部为断点回归二项式估计结果，同时控制气候条件等控制变量、固定效应、年度效应、月度效应、工作日效应和节假日效应。*** 表示在 1%的水平上显著。

表 5 安慰剂检验和敏感性分析

变 量	被解释变量为气候条件				被解释变量为 AQI		
	气压	风速	气温	降水	15 天	25 天	35 天
地铁开通与否	-1.509 (3.696)	0.544 (0.354)	-1.052 (2.649)	-4.155 (2.742)	11.723 ^{***} (3.933)	16.596 ^{***} (3.790)	22.020 ^{***} (3.621)
组内 R ²	0.986	0.287	0.069	0.918	0.568	0.525	0.500
样本量	18435	18435	18435	18435	5439	8908	12475

注：同表 4。

选择地铁线路开通前后 15 天、25 天和 35 天作为不同带宽进行模型估计，表 5 显示核心解释变量的系数均显著为正，进一步验证了表 3 中估计结果的一致性。

（二）城市异质性估计结果

上述总体样本断点回归估计结果与以往大部分重点关注交通替代效应的研究结论完全相反，地铁开通不仅没有带来空气质量的改善，空气质量在地铁开通之后还发生了显著下降。基于机理分析可知，交通替代与交通创造双重效应的合力最终决定了地铁开通对空气质量的影响方向。在不同人口规模的城市，两类效应的力度各不相同，综合效应也表现各异。为验证本文的研究假说，下面将分析地铁开通对空气质量影响的城市异质性。

本文选取 2018 年各城市市辖区常住人口数^①作为人口规模的衡量指标。在 21 个样本城市中，各城市市辖区常住人口均在 400 万人以上，且常住人口在 500 万人以上的特大和超大城市就有 19 个^②。为保证城市分类有效的样本量，本文选取辖区常住人口数的 1/4 分位数、中位数（取整）作为划分城市类型的标准，将样本城市按人口规模大致分为 900 万人以上、700 万~900 万人和 400 万~700 万人三类^③。

① 数据来自各省统计局网站公开的 2019 年统计年鉴。

② 《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》规定：申报建设地铁的城市一般公共财政预算收入应在 300 亿元以上，地区生产总值在 3 000 亿元以上，市区常住人口在 300 万人以上。

③ 900 万人以上的城市包括北京、成都、天津、深圳、武汉、石家庄、西安、杭州和青岛；700 万~900 万人的城市包括南京、东莞、宁波、长沙、合肥、福州和南宁；400 万~700 万人的城市包括大连、无锡、南昌、贵阳和厦门。

从图4可以看出,三类城市的断点图差异很大。900万人以上城市的断点图与总体样本相似,AQI均值在地铁开通日期附近出现的跳跃式上升趋势更为明显;700万~900万人的城市AQI均值在分界点附近没有出现明显的断裂;400万~700万人的城市AQI均值在地铁开通之后发生了明显的截断式下降。

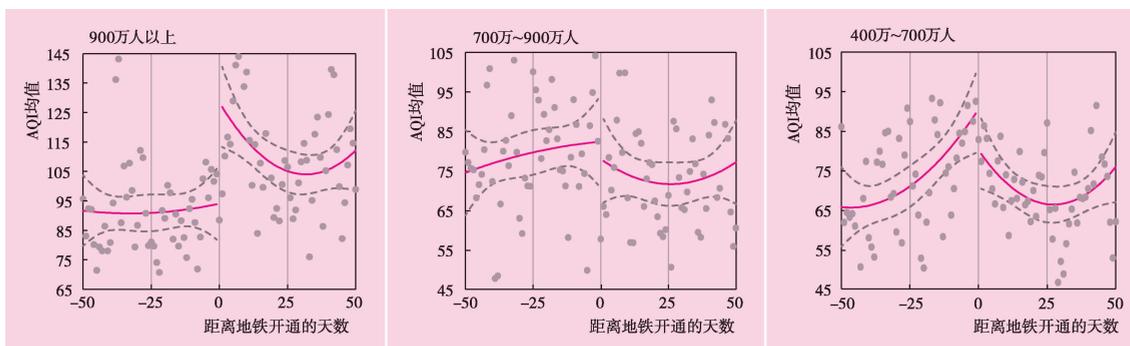


图4 分类城市样本地铁开通前后50天空气质量指数的二项式拟合曲线

注:图中虚线表示95%置信区间的上限和下限。

表6对三类城市样本给出了被解释变量分别为AQI和PM_{2.5}浓度的断点回归估计结果。对于900万人以上城市来说,两个模型的核心解释变量参数估计结果符号都为正,且均在1%的水平上显著,表明空气污染排放浓度在地铁开通后明显上升,AQI和PM_{2.5}浓度的增加幅度分别为38.63%和35.05%。对于700万~900万人的城市来说,两个模型的核心解释变量参数估计结果均不显著,说明城市空气质量并未受到地铁开通的影响。对于400万~700万人的城市来说,两个模型的核心解释变量参数估计结果均在1%和5%的水平上显著为负,表明空气质量可能由于地铁开通而得到明显改善,AQI和PM_{2.5}浓度的下降幅度分别为16.84%和15.86%。另外,气压、风速、降水和气温等气候条件控制变量的大部分参数估计结果符号和显著性均与总体样本估计结果一致。以上结果较好地印证了本文的研究假设。

(三) 作用机制估计结果

基于城市异质性估计结果可以发现,在人口规模相对较小的城市,交通创造效应较小,交通替代效应更为明显,地铁开通将改善城市空气质量;随着城市人口规模的不断扩张,交通创造效应将会不断增加,逐渐抵消交通替代效应,地铁开通的环境质量提升效果不明显;当城市人口增长到一定规模时,地铁开通带来房地产及商业市场和交通需求的结构动态变化,交通创造效应远超过交通替代效应,环境质量在地铁开通后显著下降。为了进一步揭示交通替代效应与交通创造效应的作用机制,本文基于非绿色交通出行工具保有量和房价水平在不同类型城市内部进行分组,比较各分组城市样本的地

表 6 按人口规模分类的城市样本断点回归估计结果

变 量	被解释变量为 AQI			被解释变量为 PM2.5		
	900 万人 以上	700 万~ 900 万人	400 万~ 700 万人	900 万人 以上	700 万~ 900 万人	400 万~ 700 万人
地铁开通与否	35.388** (5.012)	4.959 (3.374)	-12.302** (3.435)	22.088** (4.830)	4.621 (2.716)	-7.549** (2.926)
开通天数	-0.732** (0.316)	-0.655** (0.226)	1.233** (0.333)	-0.539** (0.255)	-0.516** (0.183)	1.177** (0.267)
开通与否 × 天数	-0.009** (0.004)	-0.008 (0.004)	0.015** (0.005)	-0.008** (0.003)	-0.007 (0.004)	0.016** (0.004)
天数平方	0.044 (0.491)	-0.731** (0.266)	-0.356 (0.284)	0.456 (0.451)	-0.765** (0.236)	-0.661** (0.228)
开通与否 × 天数平方	0.024** (0.009)	0.031** (0.008)	-0.040** (0.007)	0.015 (0.008)	0.029** (0.006)	-0.032** (0.006)
气压	-0.231** (0.044)	0.021 (0.017)	0.066** (0.017)	-0.210** (0.038)	-0.004 (0.014)	0.024 (0.013)
风速	-1.378** (0.109)	-1.056** (0.082)	-0.774** (0.099)	-1.357** (0.111)	-0.879** (0.061)	-0.696** (0.077)
降水	-0.056** (0.011)	-0.022** (0.005)	-0.030** (0.006)	-0.041** (0.009)	-0.015** (0.003)	-0.022** (0.005)
气温	0.082 (0.051)	0.343** (0.049)	0.222** (0.021)	0.034 (0.043)	0.252** (0.040)	0.133** (0.016)
组内 R ²	0.460	0.588	0.412	0.438	0.604	0.405
样本量	9221	4618	3921	9216	4614	3921

注：括号内数据为站点层面聚类稳健标准误；表中为断点回归二项式估计结果，同时控制了固定效应、年度效应、月度效应、工作日效应和节假日效应；由于篇幅限制，其他五类污染物排放量作为被解释变量的模型估计结果没有展示，除 O₃ 外，结果符号方向和统计显著性基本一致。*、**、*** 分别表示在 5%、1% 的水平上显著。

铁开通空气质量影响效应差异。

表 7 给出了根据 2018 年城市公交车、出租车和私家车保有量^①中位值分组的各类城市样本断点回归估计结果。地铁开通的交通替代效应主要是通过替代其他非绿色交通工具的出行需求而产生污染减排效果。那么，在非绿色交通工具保有量较多的地区，地铁开通发挥的交通替代效应可能会大于非绿色交通工具保有量较少的地区，非绿色交通工具保有量较多城市将具有更好的空气污染减排效果。表 7 显示，在 400 万~700 万人的城市样本中，出租车与私家车保有量较多的城市空气污染减排效应明显高于保

① 数据来自中国交通运输部官网(<http://www.mot.gov.cn/>)和中国公安部交通管理局公众号(zgitaq)。

表7 交通替代效应的作用机制估计结果

地铁开通与否	被解释变量为AQI					
	公交车		出租车		私家车	
	高保有量	低保有量	高保有量	低保有量	高保有量	低保有量
900万人以上	22.727*** (7.981)	46.775*** (6.033)	43.458*** (8.625)	6.695 (5.869)	7.352** (3.272)	67.380*** (8.271)
组内 R ²	0.408	0.502	0.448	0.469	0.423	0.505
样本量	5187	4034	5123	4098	5288	3933
700万~900万人	20.219*** (4.452)	-8.945*** (2.284)	21.869*** (4.434)	-17.593*** (1.741)	12.638*** (4.048)	1.679 (3.018)
组内 R ²	0.558	0.591	0.534	0.489	0.574	0.624
样本量	2332	2286	3003	1615	2836	1782
400万~700万人	-10.627*** (2.005)	-10.798** (5.173)	-32.657*** (3.623)	6.589 (5.911)	-26.410*** (4.009)	3.246 (6.777)
组内 R ²	0.443	0.437	0.411	0.492	0.414	0.455
样本量	1365	2556	2020	1901	2375	1546

注：括号内数据为站点层面聚类稳健标准误；表中全部为断点回归二项式估计结果，同时控制气候条件等控制变量、固定效应、年度效应、月度效应、工作日效应和节假日效应。**、*** 分别表示在 5%、1% 的水平上显著。

有量较少城市，保有量较少的城市参数估计结果均不显著；公交车保有量较高城市组与较低城市组的参数估计结果符号为负，且在 1% 的水平上显著，二者系数值非常接近。可见，对于 400 万~700 万人的城市样本来说，地铁开通可能是通过对出租车和私家车交通需求的替代而实现空气质量改善。在 900 万人以上的城市样本中，私家车和公交车保有量较高城市的污染增排效应均显著小于保有量较低的城市，而出租车保有量较高城市组的污染增排效应显著高于保有量较低组。也就是说，一方面，虽然这类城市地铁开通的交通创造效应引致的污染增排效果更为明显，但地铁开通的交通替代效应还是实现了对私家车和公交车交通需求的显著替代和转移，从而在一定程度上缓解了空气质量的恶化；另一方面，这类城市的私家车购买和交通管制措施严格，出租车的交通需求呈现刚性特征，因此地铁开通很难实现对这部分刚性交通需求的替代。在 700 万~900 万人的城市样本中，公交车、出租车和私家车保有量较高的城市参数估计结果均在 1% 的水平上显著为正，而公交车、出租车保有量较低城市组的参数估计结果均在 1% 的水平上显著为负，私家车保有量较低城市组的参数估计结果不显著。这类城市地铁开通的交通替代效应不显著的原因可能是保有量较高的城市各类交通工具服务供给能力均难以满足迅速增长的居民交通出行需求，交通创造效应抵消甚至超过交通替代效应；而保有量较低组的居民交通出行需求还在城市交通工具服务供给能力之内，地铁开通的交通替代效应更加显著。

表 8 给出了根据 2018 年城市月均房价水平^①分组的各类城市样本断点回归估计结果。地铁开通导致的非绿色交通需求结构性变动主要和其线路周边房地产及商业市场的动态变化密切相关,地铁开通在房价较高地区的交通创造效应可能会大于房价较低地区,污染增排效应将更明显。在 900 万人以上的城市样本中,房价较高城市组的 AQI 上升效应显著高于低房价组,低房价组的参数估计结果不显著。在人口 700 万~900 万城市样本中,高房价城市组的参数估计结果在 1%的水平上显著为正,而低房价组的估计结果在 1%的水平上显著为负。在 400 万~700 万人的城市样本中,高房价城市组和低房价城市组的参数估计结果分别在 1%和 5%的统计水平上显著为负,高房价组的系数绝对值偏小。

表 8 交通创造效应的作用机制估计结果

变 量	被解释变量为 AQI					
	人口 900 万以上城市		人口 700 万~900 万城市		人口 400 万~700 万城市	
	高房价	低房价	高房价	低房价	高房价	低房价
地铁开通与否	38.737*** (6.477)	2.899 (5.681)	19.221*** (4.095)	-8.529*** (1.400)	-11.167*** (2.521)	-14.624** (5.814)
组内 R ²	0.413	0.620	0.570	0.601	0.435	0.549
样本量	7105	2116	2433	2185	2274	1647

注:括号内数据为站点层面聚类稳健标准误;表中全部为断点回归二项式估计结果,同时控制气候条件等控制变量、固定效应、年度效应、月度效应、工作日效应和节假日效应。**、*** 分别表示在 5%、1%的水平上显著。

综合来看,城市人口规模扩张之下的地铁开通与房地产及商业市场关联性扩大了交通创造效应。人口规模越大的高房价地区,交通创造效应的作用越强,地铁开通对空气质量的影响最终表现为交通创造效应的污染增排效果;人口规模越小的低房价地区,交通创造效应的作用越弱,地铁开通对空气质量的影响最终表现为交通替代效应的污染减排效果。

五、结论与启示

本文基于城市人口分布与房地产及商业市场动态波动的现实背景,阐释交通替代效应和交通创造效应在地铁开通对城市空气质量影响的综合作用机理。基于 2014~2018 年中国 21 个城市 194 个空气监测站点的每日空气质量数据,利用断点回归方法系统研究新开通地铁线路对空气质量的异质性影响。主要研究结论包括:(1)在市辖区

① 数据来自 58 安居客房产研究院网站(<https://ai.anjuke.com>)。其中,900 万人以下两类城市的分组标准是根据月均房价的中位值,由于 900 万人以上城市月均房价离散程度较大,分组标准设定为月均房价的 1/4 分位值。

常住人口 900 万以上的城市样本中,地铁开通与周边房地产及商业市场强关联性所引致的交通需求增加量,显著大于其对公交车、出租车等其他交通需求的替代效应,人口集聚效应下的交通需求结构变化引致城市总体非绿色交通出行量不减反增,交通污染排放量相应增加,空气质量在地铁开通后发生明显下降。(2)在市辖区常住人口为 700 万~900 万人的城市样本中,地铁开通的交通创造效应和交通替代效应都比较显著,二者相互抵消,城市总体非绿色交通需求增长不明显,地铁开通对城市空气质量影响不显著。(3)在市辖区常住人口 400 万~700 万的城市样本中,地铁开通的交通替代效应所引致的出租车、私家车等其他非绿色路面交通需求减少量,明显大于其与周边房地产及商业市场弱关联性所创造的交通需求增加量,城市总体非绿色交通出行量减少,地铁开通改善了城市空气质量。

超大规模的交通路网建设是中国城市建设的主要方向之一。已有研究对交通创造效应的关注较少,在一定程度上高估了地铁开通的环境收益,从而在城市客运交通污染治理中更强调于增加地铁等绿色交通设施供给的决定性作用。然而,本文研究发现,环保型公共交通设施的供给必须与公众交通需求的绿色化转型相结合才是实现交通污染减排的关键。由此本文得出以下政策启示:(1)地铁等轨道交通设施发展的交通创造效应可能更大程度上来自城市职住空间分离的扩大。在中国特大型和超大型城市以公共交通为导向的开发(TOD)模式下,优化商业区、就业区和居住区的空间配置,多举措有序促进各公共交通枢纽周边的职住平衡,将会有效降低人们的交通需求。(2)地铁等轨道交通设施发展的交通替代效应是通过增加低污染型的交通服务供给去分流原有的高污染型交通需求。加大技术和运营模式创新力度,实施污染型交通方式的绿色化升级,推动多种交通手段的绿色发展,提升绿色交通服务供给能力,降低绿色交通成本,是抑制高污染型交通需求的有力举措。(3)相对价格是人们交通方式选择的决定性因素。人口集聚是未来城市化发展的必然,对于交通需求不断增加的大中型城市来说,除加强各类环保宣传、增强居民的绿色交通偏好外,还应采取旨在降低绿色交通方式与非绿色交通方式相对价格的各类经济措施和管理手段,全方位激励城市居民交通需求的绿色化转变。

参考文献:

1. 谌仁俊等(2018):《推行共享单车和轨道交通是否改善了空气质量:以武汉为例》,《中国地质大学学报(社会科学版)》,第4期。
2. 冯国强、李菁(2019):《城市轨道交通减排治污效应评估》,《中国人口·资源与环境》,第10期。
3. 冯国强、李菁(2020):《人口规模与城市轨道交通的治堵效应》,《城市问题》,第2期。
4. 高明等(2018):《轨道交通、BRT与空气质量——一个城市异质性的视角》,《中国人口·资源与环境》,第6期。
5. 李琬等(2017):《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》,《地理研究》,第5期。

6. 梁若冰、席鹏辉(2016):《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》,《中国工业经济》,第 3 期。
7. 马归民等(2016):《基于轨道交通站点协同开发的地下商业空间活力研究——天津市津汇广场地下商业空间分析》,《现代城市研究》,第 8 期。
8. 申犁帆等(2018):《大城市通勤方式与职住失衡的相互关系》,《地理科学进展》,第 9 期。
9. 王卉彤等(2018):《交通拥堵与雾霾污染:基于职住平衡的新视角》,《财贸经济》,第 1 期。
10. 杨小聪等(2017):《绿色地铁:轨道交通对空气污染的净化效果评估——基于南京地铁 3 号线的实证研究》,《甘肃行政学院学报》,第 4 期。
11. 袁冬梅等(2019):《产业集聚模式选择与城市人口规模变化——来自 285 个地级及以上城市的经验证据》,《中国人口科学》,第 6 期。
12. 张英杰等(2015):《轨道交通建设能否真正促进“绿色”出行?——基于北京市微观调查样本的实证研究》,《世界经济文汇》,第 3 期。
13. 郑思齐等(2014):《城市轨道交通的溢价回收:从理论到现实》,《城市发展研究》,第 2 期。
14. 郑思齐等(2016):《城市空间失配与交通拥堵——对北京市“职住失衡”和公共服务过度集中的实证研究》,《经济体制改革》,第 3 期。
15. Chen Y., Whalley A. (2012), Green infrastructure: The Effects of Urban Rail Transit on Air Quality. *American Economic Journal: Economic Policy*. 4(1):58-97.
16. Ding C., Song S. (2012), Traffic Paradoxes and Economic Solutions. *Journal of Urban Management*. 1(1):63-76.
17. Duranton G., Turner M.A. (2011), The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities. *American Economic Review*. 101(6):2616-2652.
18. Ikram M., Yan Z., Liu Y., Qu W. (2015), Seasonal Effects of Temperature Fluctuations on Air Quality and Respiratory Disease: A Study in Beijing. *Natural Hazards*. 79(2):833-853.
19. Jeon C.M., Amekudzi A. (2005), Addressing Sustainability in Transportation Systems: Definitions, Indicators, and Metrics. *Journal of infrastructure systems*. 11(1):31-50.
20. Lee D.S., and Lemieux T. (2010), Regression Discontinuity Designs in Economics. *Journal of Economic Literature*. 48(2):281-355.
21. Li S., Liu Y., Purevjav A.O., Yang L. (2019), Does Subway Expansion Improve Air Quality?. *Journal of Environmental Economics and Management*. 96(1):213-235.
22. Mohring H. (1972), Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation. *The American Economic Review*. 62(4):591-604.
23. Vickrey W.S. (1969), Congestion Theory and Transport Investment. *The American Economic Review*. 59(2):251-260.
24. Yang J., Chen S., Qin P., et al. (2018), The Effect of Subway Expansions on Vehicle Congestion: Evidence from Beijing. *Journal of Environmental Economics and Management*. 88(1):114-133.
25. Zhang Y., Zheng S., Sun C., Wang R. (2017), Does Subway Proximity Discourage Automobility? Evidence from Beijing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 52(B):506-517.
26. Zheng S., Zhang X., Sun W., Wang J. (2019), The Effect of a New Subway Line on Local Air Quality: A Case Study in Changsha. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 68(1):26-38.

(责任编辑:朱 犁)