

【产业经济】

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

梁若冰， 席鹏辉

(厦门大学经济学院， 福建 厦门 361005)

[摘要] 兴建轨道交通被认为是解决当前城市交通拥堵与空气污染的一项有效措施，但传统研究往往受困于内生性所导致的估计偏误。本文利用 DID、RD 以及 RDID 等准实验方法估计了中国 14 个城市新开通的 45 条线路对空气污染的影响，发现轨道交通的开通具有显著且稳健的污染治理效应。此外，本文分别考察了轨道交通减排效应的城市异质性与污染物异质性。前者发现污染治理效应随人口规模、人口密度及污染程度的提升而增强；后者发现 CO、SO₂、NO₂ 及悬浮颗粒(PM)的减排效果比较显著，且在交通高峰与凌晨非高峰期存在显著差异。而且还发现轨道交通可以缓解较大规模城市的交通拥堵，而对二、三线城市的作用不显著；对不同交通出行工具的检验表明轨道交通的减排效应是通过出租车出行的替代实现的。最后，本文探讨了轨道交通的规模效应，发现累积开通里程越长，新开通线路的减排效果越强，而这一规律在人口密度较高的城市表现得较为明显，表明在网络正外部性作用下，当前的城市轨道交通仍未达到最优规模。

[关键词] 轨道交通； 空气污染； 异质性影响； RDID 方法

[中图分类号]F572 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1006-480X(2016)03-0083-16

一、问题提出

近年来，众多中国城市面临着日益严重的空气污染，不仅威胁居民的生命安全与身体健康，而且对城市可持续发展提出了严峻挑战。目前，恶化城市空气质量的主要污染物是细微颗粒物，即 PM_{2.5}。此类污染物不仅影响人体呼吸系统，而且可以通过呼吸系统进入血液循环，诱发心脑血管疾病。除了 PM_{2.5}，其他如 SO₂、NO_x、CO 与 HC 也是主要污染物，不仅直接危害人体健康，而且污染物之间通过物理化学反应形成的二次污染物对人体危害更大。在 PM_{2.5} 的主要污染源中，机动车贡献超过 20%，成为最大来源^①，而中国城市城区 74% 的 HC、63% 的 CO、37% 的 NO_x 也都来自汽车尾气^[1]。

[收稿日期] 2016-01-21

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目“交通设施的空间网络特征及其异质性产业集聚效应研究”(批准号 71573218)；教育部人文社会科学研究一般项目“基础设施产业集聚效应的微观基础：基于空间数据与方法的经验研究”(批准号 13YJA790061)；国家社会科学基金青年项目“新常态下促进区域经济发展的省以下财政分权政策研究”(批准号 15CGL014)。

[作者简介] 梁若冰(1972—)，男，山东蓬莱人，厦门大学经济学院教授，经济学博士；席鹏辉(1991—)，男，江西高安人，厦门大学经济学院博士研究生。通讯作者：席鹏辉，电子信箱：xph90322@163.com。

① 20%的数据来自北京市环境保护局的测算，也有研究发现北京市空气污染物只有 5.6%来自汽车尾气排放。事实上，两者采用了不同的分类方法，其中后者认为二次气溶胶是主要污染物(超过 50%)，而汽车排放是构成该污染物的重要来源。

尽管政府与学术界已经逐渐认识到机动车污染的严重性,但未来的空气污染控制前景并不乐观。究其原因,在于当前城市机动车保有量大幅度增长,而且这种增速在可预期的未来很难有所减缓。

一般而言,轨道交通的外部成本,包括噪声、交通事故以及空气污染成本,都远小于私人机动车。以欧洲国家的研究为例,轨道交通每乘客每公里的事成本仅为小汽车的 1/20,而 CO₂ 排放仅为后者的 1/25^[2]。因此,为缓解交通拥堵与空气污染,中国大中城市开始大规模兴建轨道交通。截至 2014 年末,全国有 22 个城市共开通了 3173 公里的轨道交通运营线路,其中地铁与轻轨共 2600 公里,单轨、有轨电车、磁悬浮、城际快轨等其他轨道交通共 573 公里。在这 22 个城市中,北京与上海的轨道交通运营里程均超过 600 公里,而广州、重庆、深圳、南京、成都、天津、大连和沈阳等八个城市也都超过了 100 公里。对于多数城市来说,轨道交通的快速发展主要在 2000 年,尤其是 2010 年之后。2010—2014 年全国共建成通车轨道交通线路超过 1500 公里,超过之前的总和。根据现有规划,目前仍不断有城市加入兴建轨道交通的队伍中,在可预期的未来将呈现井喷趋势。

既然各地兴建轨道交通的原因是为了缓解交通拥堵和改善空气质量,那么,对于评估该项政策的效果来说,准确识别与测量轨道交通的交通与空气效应就十分关键。就中国而言,城市轨道交通的大规模兴建遭受来自公众两方面的质疑:①没有证据支持中国城市轨道交通修建能有效缓解交通拥堵或空气污染;②尽管轨道交通的开通可能发挥一定作用,但其社会收益可能远低于巨额投入成本。在此背景下,科学严谨地获得中国城市轨道交通开通的污染治理效应具有一定的现实意义。然而,目前相关研究并不多见,主要原因是内生性问题难以处理:①兴建轨道交通的城市往往存在较严重的拥堵与空气污染,因而一般的 OLS 估计可能存在自选择与反向因果偏误;②影响空气污染的因素很多,若忽略与轨道交通相关的重要解释变量,可能造成遗漏变量偏误。就目前来看,双重差分(DID)与断点回归(RD)可以有效处理内生性,因而本文将采用上述方法以及综合两类方法优点而构造的 RDID 模型,对中国城市轨道交通建设进行评估。本文还将通过分析轨道交通减排效应的城市规模与污染程度异质性、污染物与污染时段异质性、轨道交通对不同城市规模拥堵的缓解及其对各类交通工具的替代效应,来推断污染减排的作用机制。因此,除了实践层面的贡献,本文在文献意义上也充实了环境经济学中替代性环境政策的讨论。目前讨论污染治理中行政管制与经济手段的文献相对较多,而分析替代性环境政策的研究则较为缺乏。不仅如此,在传统环境经济学研究中,只有补贴政策与替代性政策的原理相类似,但两者的补贴对象却又有所差异,前者是通过直接补贴,而后者是对替代性交通进行补贴,从而通过促使污染者转变出行方式来实现减排。因此,从增进社会福利角度分析,替代性政策显然优于补贴政策,更有必要予以深入讨论。

二、理论假说

根据环境经济学理论,城市污染问题源于企业与居民活动的负外部效应,由此导致的市场失灵亟需政府采取公共政策予以治理。一般而言,政策当局可以采用三种措施将外部性内部化为污染者的成本,即行政管制、庇古税费与排污权交易。就目前来看,前两种政策在治理城市空气污染中较为常见,而第三种由于需要成熟的交易市场,因而多出现在发达国家。事实上,城市地方政府在治理城市机动车排放时,多以前两类政策为主:①通过行政管制直接限制汽车的购买与使用,包括限购、限牌、限行、限号等;②通过征收庇古税费提高机动车使用成本,如提升油价、征收燃油税、施行道路收费等进行间接限制。由于这两类政策实施时间较长,为相关研究提供了充足的观察样本,因此,与城市环境治理相关的经验研究大多集中于上述政策。

对于第一类政策,国内外城市出台的一系列清洁空气措施,包括车辆限行、限购等,为相关研究

提供了合适的政策冲击。例如,部分对北京奥运会期间实施的改善空气质量政策的研究发现,限行的确显著降低了空气污染指数(API)^[3,4],但同时也有研究发现这一效果并不显著^[5],而对墨西哥城的研究则发现限行甚至恶化了空气质量^[6,7]。上述研究说明严厉的环境管制存在局限性,由于其无法实现激励相容的制度设计,可能扭曲市场消费行为,在产生较大福利损失的同时,治污效果有限^[8]。一般而言,庇古税费也是激励消费者改变出行方式的有效手段,且对社会福利造成的冲击小于行政管制。此类政策中,最常见的是提高燃油价格或征收燃油税。对发达国家的研究发现燃油税可以有效改善空气质量,其途径或是降低燃油消费^[9],或是调整车辆结构,即购买更节油的车型,并加速对耗油旧车的折旧报废^[10]。然而,近期对中国城市的研究发现,通过提高燃油价格来改善城市空气质量的政策总体上并不可行^[11]。究其原因,主要是中国城市中把机动车视为消费品的使用者的油价需求弹性较小,因而其用车行为并不会随油价调整而调整。

上述传统环境政策往往集中于通过提高污染者成本来内部化污染外部性,其缺陷是可能会造成较高的治理成本与福利损失,从而无法实现帕累托最优。因此,以替代性政策为主的治理思路就成为现实可选项,其基本原理是:轨道交通的开通使出行者改变原来的路面交通出行方式,尤其是乘坐私人汽车或出租车等非公共交通,从而产生交通转移效应或 Mohring 效应^[12]。路面交通工具因使用者减少而导致其尾气排放下降,从而实现城市空气污染减排的目标。显然,交通替代的主要优点是,污染者主动选择更为清洁的轨道交通出行方式,这种低污染方式可能伴随着高效用而非高成本,因而其交通转移并不会导致效用或利润的降低,实现了帕累托改进。替代性城市环境政策主要包括促进公共交通与非机动交通等竞争性交通形式的发展,如兴建轨道交通、实施公交优先、设置非机动车道等,通过替代路面机动车交通方式来实现污染减排。由于替代性政策为消费者提供更多可行选择,能在不降低社会福利的前提下改善城市空气质量,因此,大力发展城市公共交通,尤其是轨道交通,就成为一项可望实现双赢的政策。

但是理论上,交通转移效应面临着交通创造理论^[13]的挑战,后者不仅认为公交的分流作用有限,而且它可能还会创造出新的需求。例如,轨道交通的兴建可能会导致居住在市中心的人搬到房价便宜的郊区,从而创造出新的通勤者与通勤需求。不过,就目前的经验研究看,显然交通转移说获得了更多的支持。Parry and Small^[14]通过估算美国华盛顿、洛杉矶与英国伦敦的参数,发现即便公共交通起始票价仅为运营成本的50%,对其进一步削减仍可带来可观的福利增加。Anderson^[15]采用RD方法考察洛杉矶地铁工人罢工这一外生冲击对交通拥堵的影响,发现地铁停运使路面交通拥堵程度平均提升了47%,表明公共交通比传统认识的影响更为显著。Chen and Whalley^[16]也发现中国台湾台北市轨道交通的开通显著降低了与汽车尾气直接相关的CO排放水平。可见,尽管城市化水平与人均收入水平仍大幅落后于发达国家,但后者面临的拥堵与环境问题在中国也日益严重。基于上述理论与经验研究,本文提出:

假设1:轨道交通能够有效降低中国城市空气污染排放水平,主要途径是通过替代路面交通中的机动车出行方式。

根据 Mohring^[12]的分析,轨道交通还具有显著的规模效应,乘坐率上升可提高车次频率,减少候车时间,从而进一步提高乘坐率。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,因此,更需要轨道交通等替代性交通方式,从而使此类城市中的轨道交通更易形成规模效应,并使其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。换言之,大城市居民较大的出行需求造成了较大的路面交通压力,此时轨道交通对于路面交通的替代作用最强。此外,由于轨道交通主要通过改变出行者的出行选择,即

替代传统的路面交通方式来实现污染减排, 因而应对机动车相关污染物具有显著效果。由此, 本文提出:

假设 2: 对于人口规模与密度较大、污染程度较高的城市, 轨道交通具有较强的污染减排效应与拥堵缓解效应。

假设 3: 轨道交通对机动车相关污染物, 如 PM、SO₂、NO_x 和 CO, 具有显著的减排效应, 且在机动车交通高峰期与交通密度较高地区具有较强的减排效应。

一般而言, 通勤者的路面交通选择主要包括私家车、公共汽车与出租车三种类型, 本文还需着重分析轨道交通究竟替代了上述哪类机动车的出行选择。此前研究发现, 以私家车或公共汽车作为主要交通工具的居民, 其出行需求的油价弹性较低, 而以出租车为主的则非常显著^[4], 因此, 本文可以推断轨道交通的替代效应可能主要出现在对出租车使用的替代。

三、计量模型设定与数据分析

1. 模型设定

为识别与测量中国城市轨道交通的开通对空气污染的影响, 本文分别采用 DID 与 RD 模型进行基准估计, 并在稳健性检验与异质性分析中采用 RDID 估计。首先, 固定效应(FE)面板与 DID 模型设定如下:

$$API_{imdy} = \beta subway_{imdy} + Z\gamma + \lambda_y + \rho_m + \theta_w + \delta_i + \mu_{imdy} \quad (1)$$

其中, API_{imdy} 为城市 i 在 y 年 m 月 d 日的空气污染指数; $subway_{imdy}$ 为轨道交通通车变量, 包括是否开通轨道交通的虚拟变量(0, 1)、轨道交通线路数量(条)与里程长短(公里)等; Z 为一组影响空气污染的气候变量向量, 包括每日的平均气温、风速和降水; λ_y 、 ρ_m 、 θ_w 、 δ_i 分别表示年份、月份、星期与地区固定效应, μ_{imdy} 为随机扰动项。此外, 本文还控制了断点效应, 以控制每条通车线路的固定效应。从公式设定可知, 当 $subway_{imdy}$ 为虚拟变量时, 模型是典型的 DID; 当该变量为线路或里程时, 模型是面板 FE 估计。

尽管 DID 与 FE 模型可以识别轨道交通开通的平均减排效应, 但其估计值可能会受其他因素影响而出现偏误, 因而本文进一步采用 RD 方法进行相关估计:

$$API_{imdy} = \alpha + \beta_1 subway_{imdy} + \beta_2 f(x) + \beta_3 subway_{imdy} f(x) + Z\gamma + \lambda_y + \rho_m + \theta_w + \delta_i + \mu_{imdy} \quad (2)$$

其中, $f(x)$ 是以 x 为自变量的多项式函数, x 为执行变量(Running Variable), 即距离轨道交通开通的天数, 开通当天设为 0, 之前为负值, 之后为正值, 其他变量含义同式(1)。在式(2)中, 本文关心的是 β_1 的估计值, 其恰好捕获了轨道交通开通前后的空气污染指数变动。RD 估计可以有效解决 DID 估计存在的处理组与控制组难匹配的问题, 因其处理组与控制组城市均为同一城市, 而且在较小的时间窗口设定下, 其他可能影响空气质量的变量不易发生大幅度变化, 因而也可以较好地解决遗漏变量问题。

但是, 时间 RD 估计的一个重要问题是, 仍然无法彻底排除其他可能影响被解释变量在断点处发生骤变的可能性。针对这一问题, 本文采用两类处理方式进行安慰剂检验: ①检验可能影响空气污染的变量, 观察其在断点处是否发生显著变化, 估计式同式(2), 只是被解释变量换成安慰剂变量; ②进行 RDID 估计, 以某城市轨道交通开通时的断点为处理组, 以同一时间其他城市的断点作为控制组, 可写为如下完全饱和和回归(Fully Saturated Regression)方程:

$$API_{imdy} = \alpha + \beta_1 subway_{imdy} + \beta_2 f(x) + \beta_3 dd_i + \beta_4 subway_{imdy} dd_i + \beta_5 subway_{imdy} f(x) + \beta_6 dd_i f(x)$$

$$+\beta_7 subway_{imdy} dd_i f(x) + Z\gamma + \lambda_y + \rho_m + \theta_w + \delta_i + \mu_{imdy} \quad (3)$$

其中, dd_i 是区分断点为处理组还是控制组的虚拟变量, 即城市 i 在本市轨道交通开通时的断点为 1, 在其他城市轨道交通开通时的断点为 0。在这一设置下, 全体样本均为开通轨道交通的城市, 只是根据开通时间的差异设置处理组与控制组, 从而尽可能规避两组样本缺乏可比性以及出现不可观察变量断点的可能性。在式(3)中, 本文关心的是 β_4 的估计值, 其捕获了轨道交通实际开通时空气污染变动相对于未实际开通城市变动的差异, 本质上可被视为 DID 设定。

2. 数据分析

本文采用的空气污染数据主要有两类。第一类是全国 120 个城市的日度空气污染指数(API)^① 数据, 主要用来进行 FE(DID)、RD 估计以及城市异质性分析, 其中在 RD 估计时只采用 14 个城市新开通的 45 条线路进行分析。在 120 个城市的数据中, 本文采用了 2005—2013 年的日度 API, 数据来自中华人民共和国环境保护部网站; 主要解释变量为轨道交通开通与否及其线路与里程数, 数据来自百度百科; 主要控制变量包括日平均气温、降水量和风速, 数据来自中国气象科学数据共享服务网; 人均 GDP($pcgdp$)、工业化率($indu$)与城市化率($urban$)以及用于进行城市人口规模与密度分类的城市人口、建成区面积数据来自 CEIC 数据库, 其数据源为各年度的《中国城市统计年鉴》。第二类是北京市具体污染物实时排放数据, 主要用来分析污染物异质性。本文研究了北京轨道交通 7 号线在 2014 年 12 月 28 日开通前后 60 天内该市 35 个监测点的六类空气污染物排放 24 小时实时监测数据, 来自北京市空气质量历史数据网站。此外, 本文还考察了 2013 年 5 月 5 日开通的北京轨道交通 14 号线东、西两段对相关地区交通拥堵的影响, 其中拥堵指数来自四维交通指数分析平台。文中主要变量的描述性统计见表 1, 因篇幅所限, 表中并未列出北京市污染与交通数据的描述性统计量。

四、实证结果分析

1. 基准回归结果

在基准回归部分, 本文分别采用 FE 面板与 RD 模型估计。之所以进行 FE 估计, 有三方面原因: ①可以直接比较通轨道交通城市与未通城市, 考察轨道交通通车的空气改善效应; ②可以直接估计轨道交通线路与里程数的影响强度; ③由于 FE 估计是利用组内差分的方式剔除不随时间变化的固定效应, 因此, 其估计值反映的是轨道交通线路或里程数变动对空气污染变动的影响。对于 RD 估计来说, FE 估计的前两个优点是无法做到的, 但 RD 的优点也是 FE 估计无法达到的, 即处理组与控制组为同一城市, 且估计的是局部平均处理效应(LATE), 而非 FE 估计的平均处理效应(ATE)。而且, 当处理组与控制组样本在断点处无限接近时, 因样本选择非随机性或遗漏变量而造成的估计偏误就变得不严重, 因为此时的估计更接近于随机实验^[7]。因此, 本文采用了两种方法进行估计, 结果分别见表 2 和表 3。

表 2 为利用 FE 面板进行估计的结果, 本文采用三种指标表示轨道交通通车, 即是否通轨道交通的虚拟变量、通车的线路数量及通车里程, 第(1)—(3)列分别显示了未加控制变量的全样本估计结果, 无论轨道交通线路还是里程, 都有显著的空气治理效应。不过, 当加入控制变量与各种固定效

① API 的评价标准只包括三类污染物, 即 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} , 无法满足空气质量监测的需要, 因而 2012 年环保部公布了新的《环境空气质量标准》(GB3095-2012), 新标准与老标准相比主要有三项改进: 一是名称改为空气质量指数(AQI); 二是新增三类污染物, 即 $PM_{2.5}$ 、CO 及 O_3 ; 三是不仅有日报, 还增加了实时报, 即每小时报一次。总体而言, AQI 比 API 标准更严格、污染物指标更多、发布频次更高, 因而两者不具有可比性。

表 1 主要变量的描述性统计

DID/FE 变量	含义	单位	样本数	均值	标准差
<i>API</i>	空气污染指数		294333	69.4723	31.6912
<i>subway</i>	轨道交通(0,1)		294333	0.1102	0.3117
<i>numline</i>	轨道交通线路	条	294333	0.3219	1.3738
<i>length</i>	轨道交通里程	公里	294333	11.6654	51.2052
<i>temp</i>	温度	0.1℃	187386	146.9622	113.8826
<i>wind</i>	风速	0.1 米/秒	294333	69.4712	31.6915
<i>rain</i>	降雨量	10 厘米	294333	0.1132	0.3111

RD 变量	全体样本	开通前	开通后	差异 t 值
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>API</i>	71.902 [33.5976] N=1927	73.677 [33.0310] N=995	70.0084 [34.1082] N=932	-2.4017** (0.0171)
<i>temp</i>	144.4805 [118.5234] N=1266	151.5238 [111.2276] N=651	137.0241 [125.4453] N=615	-2.1826** (0.029)
<i>wind</i>	22.5911 [10.2672] N=1266	22.9601 [10.5854] N=651	22.2009 [9.9134] N=615	-1.3114 (0.1890)
<i>rain</i>	2.5573 [8.7352] N=1266	1.9344 [7.6667] N=651	3.2161 [9.7024] N=615	2.6213*** (0.0094)

注:方括号内为标准差,N为样本数;列(4)为 t 检验统计量,圆括号内为 p 值,原假设是(2)与(3)中的变量值相等。

资料来源:作者根据环境保护部网站、CEIC 数据库、百度百科以及中国气象科学数据共享服务网资料整理。

应时,是否通轨道交通变量的估计结果变得不显著,因而表 2 第(4)—(7)列只列出另外两项结果。从估计值看,每新开通一条线路,空气污染指数降低 1.991;每新开通一公里,指数降低 0.067。为提升样本可比性,第(6)、(7)列只对通轨道交通的城市样本进行估计,结果与全样本城市类似。不过,如前文所述,FE 或 DID 估计并未解决因遗漏变量而导致的内生性偏误,因而进一步利用式(2)估计了通轨道交通前后断点附近的处理效应,结果见表 3。

在进行 RD 估计之前,首先绘出了断点附近的散点图及其拟合曲线,见图 1。从非参的 LOWESS 拟合图可以看出,二项式函数较好地拟合了轨道交通开通前后 30 天的 API 指数,且在轨道交通开通附近出现了明显的断点,使得本文可以进一步利用 RD 估计出断点处的 LATE。表 3 的第(1)—(3)列与(4)—(6)列分别显示了不控制与控制相应变量与固定效应的估计结果。其中,线性式估计参数结果不太显著,而二项与三项式结果均为显著负值,且差异不大。根据图 1,本文主要选择二项式结果进行分析。与表 2 第(3)列相比,表 3 第(5)列中的轨道交通通车 LATE 远大于 ATE,污染治理效应由 API 均值的 5%跃升至 26%,而根据每条线路平均里程 34 公里,也可算出每公里 API 减排效应为 0.47,远大于表 2 中的 0.067,说明轨道交通对空气污染的短期治理效应大于其长期影响,这也可以从表 1 中的轨道交通开通前后 API 均值的比较中观察到。

表2 FE 估计结果

	API						
	全部城市				通轨道交通城市		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
<i>length</i>	-0.0515*** (0.0149)			-0.0674*** (0.0050)		-0.0603*** (0.0081)	
<i>numline</i>		-1.9131*** (0.2750)			-1.9912*** (0.1857)		-1.7558*** (0.2428)
<i>subway</i>			-3.5803*** (1.3565)				
<i>rain</i>				0.0134 (0.0152)	0.0136 (0.0152)	0.0071 (0.0241)	0.0078 (0.0241)
<i>wind</i>				-0.2911*** (0.0492)	-0.2913*** (0.0492)	-0.3660*** (0.0662)	-0.3666*** (0.0661)
<i>temp</i>				0.0522** (0.0205)	0.0522** (0.0205)	0.1350*** (0.0351)	0.1351*** (0.0351)
<i>pcgdp</i>				43.8820 (43.8370)	44.5970 (42.9910)	9.7784 (131.5600)	25.2440 (127.3200)
<i>indu</i>				0.2025 (0.1863)	0.2096 (0.1858)	-0.4402* (0.2093)	-0.4151* (0.2143)
<i>urban</i>				-0.1345 (0.1133)	-0.1327 (0.1142)	0.1132 (0.1303)	0.1183 (0.1388)
固定效应	N	N	N	Y	Y	Y	Y
年度效应	N	N	N	Y	Y	Y	Y
月度效应	N	N	N	Y	Y	Y	Y
星期效应	N	N	N	Y	Y	Y	Y
样本数	294333	294333	294333	115926	115926	1266	1266
组内 R ²	0.0012	0.0011	0.0001	0.1231	0.1230	0.1498	0.1494

注:括号内为市级聚类稳健标准误;*p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01。

资料来源:作者基于 Stata 软件估计。

2. 稳健性检验

上面的基准实证结果证实了轨道交通开通具有显著的环境治理效应,但 RD 分析结果的有效性可能受其他条件的限制,接下来将进行相关稳健性检验。

(1)带宽敏感性。上述 RD 估计结果的稳健性不仅依赖于曲线拟合形式,还可能受到选择的带宽(Bandwidth)影响,因而本文有必要将带宽进一步缩小,从而更准确地估计出临近断点处的处理效应。本文分别选择了轨道交通开通前后 25、20 和 15 天作为带宽进行估计,由于越趋近断点处,拟合曲线越接近线性形式,因而在带宽为 15 和 20 天处主要采用线性式进行曲线拟合,在 25 天处则进行二项式拟合,结果见表 4。从第(1)—(3)列中可知三类带宽的估计结果均为显著负值,支持了表 3 实证结论的稳健性。

表 3 断点估计: 通轨道交通的城市

	API					
	线性式	二项式	三项式	线性式	二项式	三项式
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>subway</i>	5.0081* (2.6542)	-10.0410** (3.9300)	-14.7101*** (5.4041)	1.6537 (3.1643)	-18.6199*** (4.9780)	-17.3403*** (6.3252)
<i>rain</i>				0.1668 (0.1603)	0.2004 (0.1612)	0.2002 (0.1614)
<i>wind</i>				-0.7491*** (0.0922)	-0.7361*** (0.0903)	-0.7336*** (0.0890)
<i>temp</i>				0.2745*** (0.0242)	0.2695*** (0.0243)	0.2712*** (0.0238)
样本数	1927	1927	1927	1266	1266	1266
R ²	0.0126	0.0235	0.0232	0.3178	0.3372	0.3371

注: 括号内为市级聚类稳健标准误; *p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01; 表中同时控制了固定效应、年度效应、月度效应、星期效应与断点效应。

资料来源: 作者基于 Stata 软件估计。

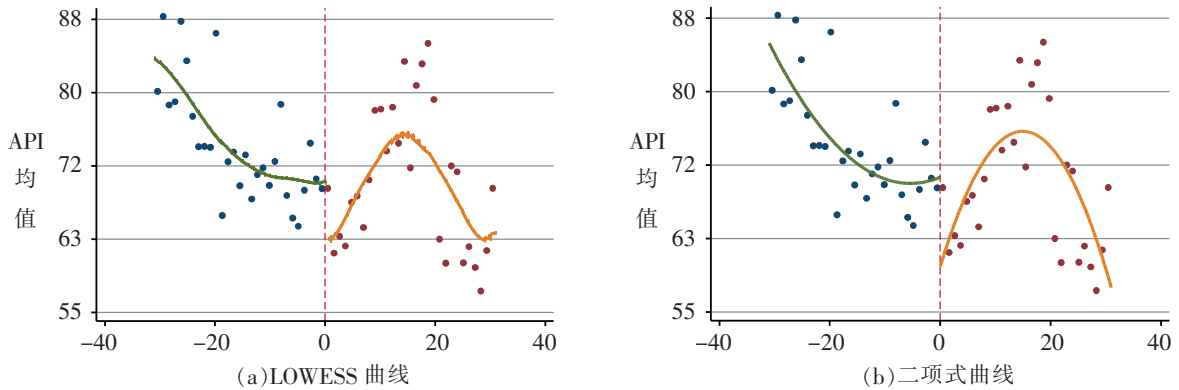


图 1 轨道交通通车前后 30 天空气质量拟合曲线

资料来源: 作者绘制。

表 4 带宽敏感性与节假日效应

	API				
	±15	±20	±25	±30	±30
	线性式	线性式	二项式	二项式	二项式
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>subway</i>	-11.7615** (5.1810)	-13.4727*** (4.1661)	-18.7736*** (5.4654)	-11.5136** (4.8320)	-15.7002*** (4.7881)
假日效应	N	N	N	剔除	控制
样本数	605	809	1009	838	1266
R ²	0.3232	0.3414	0.3155	0.4304	0.3667

注: 括号内为市级聚类稳健标准误; *p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01; 表中同时控制了控制变量、固定效应、年度效应、月度效应、星期效应与断点效应。

资料来源: 作者基于 Stata 软件估计。

(2)节假日效应。除了带宽敏感度之外,威胁本文 RD 估计稳健性的另一个因素是节假日效应。例如,若轨道交通通车时间选择在元旦、国庆等节日之前,则可能会因通车效应恰好捕获了节假日效应而导致估计结果向上偏误,因而本文采用两种方法分别对节假日效应进行剔除与控制。表 4 中的第(4)与第(5)列分别为剔除与控制节假日效应的估计结果,其数值符号与显著性均未产生较大变化。除此之外,另一个可能影响稳健性的因素是“处理前下降”(Ashenfelter’s Dip)^[18],即在修建轨道交通时会造成交通拥堵和空气质量下降,而在建成通车后这种拥堵与污染会有所缓解,因而轨道交通通车可能因捕获停工导致的排放下降而造成估计结果向下偏误。不过,这个问题应不会影响上述结论,原因在于:按照规定,轨道交通建成后要经历验收、试运行和试运营三个阶段才能正式通车,一般试运行阶段不售票、不载客,时间不能少于三个月,而本文的时间范围选择在通车前后 30 天,不会受到上述因素的影响。

(3)安慰剂检验。时间 RD 估计面临的最大挑战是遗漏变量问题,因其很可能捕获其他相关影响因子的效应,尽管可以通过缩小带宽的方法降低,但无法消除这种可能性。例如,轨道交通可能恰好捕获了经济下滑导致的工业污染减排,或可能影响空气污染的其他因素的作用,如风速、气温等,都可能导致估计的处理效应被高估。因此,本文采用两种方法进行安慰剂检验(Placebo Test):①利用公式(3)进行 RDID 估计,在通轨道交通城市中以当期未开通轨道交通的城市在断点处的处理效应作对照组,估计当期开通城市的处理效应,结果列于表 5 的第(1)–(3)列;②利用风速与气温作被解释变量,估计轨道交通开通是否捕获了该变量的断点,列于第(4)、(5)列。

表 5 安慰剂检验

	API			Wind	Temp
	线性式	二项式	三项式	二项式	二项式
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
subway	-1.9871** (1.0140)	-7.3067*** (1.5130)	-6.2211*** (2.0840)	1.1075 (1.6720)	3.1767 (5.0210)
subway×dd	3.5350 (2.5850)	-10.8082*** (3.9140)	-11.8744** (5.2730)		
样本数	19267	19267	19267	1266	1266
R ²	0.1720	0.1770	0.1770	0.2420	0.9300

注:括号内为市级聚类稳健标准误;*p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01;表中同时控制了控制变量、固定效应、年度效应、月度效应、星期效应、断点效应与假日效应。

资料来源:作者基于 Stata 软件估计。

从表 5 的估计结果可知,在加入控制组断点后,轨道交通开通的处理效应有所下降,表明其他无法观察的因素可能造成了一定影响,如轨道交通开通的时点恰好捕获了工业污染排放下降的效应,或者各城市的空气污染存在一个总体下降的时间趋势,从而使轨道交通减排效应产生向上的估计偏误^①。不过,第(2)、(3)列的估计结果仍然显著为负,表明上述可能存在的减排效应并未抵消轨道交通效应。此外,从表中第(4)、(5)列的结果可以看出,轨道交通断点并未捕获风速与气温等可能影响污染变量的处理效应。

① 此处有可能低估了轨道交通的实际减排效应,原因在于:本文将其他兴建轨道交通而未在断点处开通的城市都视为控制组,但由于某些城市可能在断点前后 60 天的时间窗口内开通,造成控制组也出现了显著的减排效应。

3. 异质性影响分析

(1)城市异质性。不同于 Chen and Whalley^[16]只关注台北轨道交通的一条新开通线路,本文考察了中国大陆 14 个城市的 45 条新开通线路,有必要进一步了解这些城市的异质性特征对减排效应的影响,此处主要关注市区人口规模、人口密度及开通前后空气污染程度差异对轨道交通减排效应的异质性影响。上述指标的估计结果汇总到表 6 中,首先是第一行第(1)、(2)列的人口规模分组与第(3)、(4)列人口密度分组的估计结果,可知轨道交通的减排效应随人口规模与密度的增大而提高,具有规模收益递增的特点。究其原因,由于人口规模较大或密度较高的城市具有较大的交通需求,若供给不足,将会导致交通拥堵,并恶化由尾气排放造成的空气污染,而轨道交通通过增大交通供给实现对路面交通的替代,从而达成污染减排。相反,人口规模或密度较小城市并不会出现交通资源的严重不足,因而轨道交通的替代效应与减排效应就不显著了。

表 6 城市异质性分析

	API			
	(1)	(2)	(3)	(4)
人口规模/密度	>1500 万人	<1500 万人	>1 万人/公里 ²	<1 万人/公里 ²
<i>subway</i>	-12.9220*** (1.7651)	-1.3547 (1.7718)	-12.0337*** (4.4965)	3.6546 (7.4190)
污染程度(API)	<80	80—90	>90	>80/<80
<i>subway</i>	-2.0376 (3.6498)	-4.4990 (5.6844)	-35.3524** (13.8762)	-32.8144*** (10.9443)

注:括号内为市级聚类稳健标准误;*p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01;RD 回归采用了二项式估计;表中同时控制了控制变量、固定效应、年度效应、月度效应、星期效应、断点效应与假日效应。

资料来源:作者基于 Stata 软件估计。

另一个值得关注的问题是空气污染程度对轨道交通减排效应的影响,为此本文依据每个断点前后 30 日范围内的平均 API 水平进行了城市分组。总体而言,14 个城市在轨道交通通车前后 API 均值的均值为 72.2,其中除大连 R3 线与深圳轨道交通 5 号线通车断点处的 API 均值为优(API<50),其他线路通车时 API 均值都为良。从结果可知,当 API 均值大于 90 时,轨道交通通车的空气净化效应最显著,而随着 API 均值下降,该效应也逐渐降低且变得不显著。由此可见,轨道交通的减排效应随污染程度的上升而增强,其原因在于,污染较重城市的汽车尾气排放较多,由交通替代而引发的轨道交通减排效应也就较为明显;相反地,低污染城市中由交通替代引发的减排效应较弱。事实上,这反映出人们对交通需求与污染程度较低的城市兴建轨道交通的担忧不无道理。

(2)污染物异质性。除了城市异质性外,轨道交通空气净化效应的污染物异质性也应引起重视,本文接下来主要围绕不同污染物与不同时间段进行分析。这里考察的对象为 2014 年 12 月 28 日开通的北京轨道交通 7 号线,选择该样本的原因有两个:①2014 年之后才有更细致的构成 AQI 的六类污染物的 24 小时实时排放数据;②可以利用观察点数据分析轨道交通对交通高峰期(上午 7 点—9 点与下午 17 点—19 点)与非高峰期(0 点—6 点)的不同距离观察点的影响。7 号线全长 23.7 公里,共有 19 个车站,周围 2 公里以内有 4 个污染物监测点。从表 7 的估计结果可知,轨道交通开通对总体空气质量有显著的提升作用,尤其对 SO₂、NO₂、CO 与悬浮颗粒物具有显著遏制作用,但却促进了 O₃ 的生成。之所以出现这一现象,应当与 O₃ 的二次污染物属性相关,因而使轨道交通污染净化效应出现了滞后。从排放时间看,RDID 估计结果显示出交通高峰与非高峰期存在显著差异,这

也从侧面反映出轨道交通是通过替代路面交通的途径来改善空气质量的。

在上述分析基础上,本文可以大致测算出空气污染降低对人均预期寿命的影响,并对轨道交通进行简单的成本—收益分析。根据 He et al.^[9]的估算,PM₁₀ 每降低 10 微克/立方米,全国城市人口年均死亡减少 19.6 万人,若本文选取的北京具有代表性,那么,根据列(5)的估计值计算出,轨道交通开通的污染净化效应可使中国城市死亡人数每年减少 25.5 万人。同时,利用条件价值评估法,根据中国城市居民的支付意愿(WTP)估计出的人均生命价值介于 24 万—384 万元,从而可算出每年的经济收益为 612 亿—9792 亿元。以北京为例,2010—2012 年间每年平均开通轨道交通 64 公里,单位建造成本大致为 10 亿元/公里,若不考虑历史投入,则每年兴建与运营成本合计约为 686 亿元。而根据北京 2000 万人口规模,可测算出每年因轨道交通的减排效应而减少死亡的人口规模约为 3900 人,其 WTP 价值为 10 亿—150 亿元。由此可见,尽管轨道交通的修建与运营成本价值不菲,但由其空气净化效应带来的收益可在最短 10 年内收回成本。

表 7 污染物异质性分析

	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
全市/全天	-18.7647*** (1.5821)	-30.7405*** (1.4990)	-1.0712*** (0.0667)	13.6045*** (1.4554)	-13.0836*** (4.4831)	-37.3947*** (3.2163)
<2 公里	-23.4745*** (3.7382)	-29.3334*** (1.144)	-0.8171*** (0.0564)	17.34*** (1.0043)	6.1781 (6.6272)	-24.05* (8.0546)
高峰期	-19.5198*** (1.968)	-29.1449*** (1.5300)	-0.9890*** (0.0749)	10.7845*** (1.6354)	-12.5647** (5.0443)	-41.6737*** (4.0812)
高峰/非高峰	-15.6501*** (2.1900)	-7.5763** (3.5265)	-0.1592 (0.1883)	-1.5167 (1.5735)	-23.9423** (9.9495)	-33.2847*** (9.5182)
<2 公里/>50 公里	-12.0433** (3.8635)	0.3714 (7.5736)	-0.1202 (0.1541)	-5.1171 (3.4260)	24.137 (14.2490)	5.4901 (10.3435)

注:括号内为观察点聚类稳健标准误;*p<0.1,**p<0.05,***p<0.01;RD 回归采用了二项式估计;表中同时控制了固定效应、年度效应、月度效应、星期效应、断点效应、假日效应与小时效应。

资料来源:作者基于 Stata 软件估计。

4. 减排机制分析:机动车替代

一般而言,若轨道交通具有减排效应,较符合逻辑的一个途径应是通过改变私人出行选择而减少路面交通需求,这不仅能够减少机动车尾气排放,也可以减少交通拥堵^[15]。因此,在中国城市机动车呈爆发式增长的趋势背景下,若能观察到轨道交通显著缓解了交通拥堵,就可以推断轨道交通对路面交通的使用具有显著的替代效应,这也正是轨道交通治理空气污染的主要途径。作为集中关注轨道交通减排效应的研究,这里将分析这一作用机制在中国城市的存在性。基于交通拥堵数据的可得性原因,本文选择了 2013 年 5 月 5 日开通的北京轨道交通 14 号线东段与西段作为考察对象。东、西两段分别长 12.4 公里与 14.8 公里,各拥有 7 个和 10 个站点,尽管其并未完全联通,但恰好分别位于朝阳区和丰台区,可以观察其对这两个区交通拥堵的直接影响,并利用相邻的海淀区与东城、西城两个城市中心区作为控制组,剔除无法观察的相关因素的可能影响。

本文将式(2)的估计结果列于表 8,其中分别包含了线性式与二项式估计的结果,而且将交通拥堵指数分为全天拥堵指数(traffic)、早高峰拥堵指数(mpttraffic)和晚高峰拥堵指数(epttraffic)三种类

型。从结果可知,14号线的开通对丰台区和朝阳区交通拥堵有显著的缓解作用,尤其对早高峰拥堵的缓解是显著且稳健的。相对而言,该线开通对市中心与海淀区的交通则无显著影响。当本文利用公式(3)中的RDID方法,将丰台区和朝阳区视为处理组、市中心与海淀区作为控制组时,发现早高峰时的处理组仍然出现显著的拥堵下降,表明轨道交通可能通过替代了路面交通的使用而减少拥堵。

不过,对于北京的研究是否具有普遍意义值得怀疑,其原因在于:北京是中国人口规模最大、机动车数量最多的城市,轨道交通显著缓解了该市的交通拥堵,并不意味着也一定会对人口规模较小城市产生相同效果。因此,本文对国内其他城市进行了补充分析,主要关注一线城市中的上海和广州、二线城市的南京、宁波,以及三线城市的长沙与无锡。从表9的结果可知,上海、广州与南京的轨道交通对交通拥堵均有显著缓解作用,而对其他三个城市则效应不显著。从人口规模的角度分析,上海与广州人口分别超过2000万和1000万,南京超过800万,而其他三个城市则均低于800万,介于600—800万之间。这一结果与表6中的异质性讨论一致,不同人口规模的城市轨道交通确实存在异质性效应。由此,本文可做一个粗浅的推断,即轨道交通的拥堵缓解效应存在的人口规模临界点应位于800万附近,若低于该规模,则其缓解作用将不明显。

表8 轨道交通与交通拥堵:北京市

	线性式			二项式		
	<i>traffic</i>	<i>mptraffic</i>	<i>eptraffic</i>	<i>traffic</i>	<i>mptraffic</i>	<i>eptraffic</i>
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
丰台 & 朝阳	-0.2881** (0.1291)	-0.5775*** (0.2096)	-0.3777 (0.3373)	-0.05161 (0.2890)	-1.2142*** (0.4353)	0.2639 (0.7181)
市中心 & 海淀	-0.0733 (0.2665)	0.0304 (0.3441)	0.2300 (0.5240)	0.6070 (0.5524)	0.7028 (0.7544)	1.9782* (1.0201)
丰台 & 朝阳/市中心 & 海淀	-0.2151 (0.2457)	-0.6070* (0.3473)	-0.6075 (0.4612)	-0.6581 (0.4785)	-1.9161*** (0.6636)	-1.7142** (0.8460)

注:括号内为稳健标准误;* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$;表中同时控制了固定效应、月度效应、星期效应与假日效应。

资料来源:作者基于Stata软件估计。

表9 轨道交通与交通拥堵:其他城市

	<i>traffic</i>					
	上海	广州	南京	长沙	宁波	无锡
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>subway</i>	-0.4304** (0.2044)	-0.2212*** (0.0593)	-0.1854** (0.0706)	-0.1437 (0.1345)	-0.0518 (0.1180)	-0.0916 (0.1159)

注:括号内为稳健标准误;* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$;RD回归采用了二项式估计;表中同时控制了固定效应、月度效应、星期效应与假日效应。

资料来源:作者基于Stata软件估计。

关于轨道交通对路面交通的替代,另一个值得关注的问题是哪类出行方式受到更大的影响。这里用各城市的机动车保有量数据,分别测算私人汽车、非私人汽车、出租车与公共汽车在高和低保有量的情形下轨道交通的污染减排效应差异。之所以这样处理,在于若轨道交通对路面交通的替代来自某种出行方式,那么,该交通工具在城市间的数量差异将体现到轨道交通的减排效应上,使保有量较多城市具有较高的轨道交通减排效应。从表10中RD估计的结果可知,轨道交通对于私人

汽车、非私人汽车以及公共汽车均有一定的替代作用,即保有量较高组的减排效应高于较低组,不过两组的差异不是很大,而 RDID 估计结果也说明这种替代效应并不显著。相反地,在出租车高低分组中,轨道交通的替代效应存在显著差异,可知轨道交通是通过替代出租车出行实现污染减排的。这一结果类似于油价提升的污染减排效应^[11],即在中国城市,出租车是价格弹性与替代弹性最大的路面交通方式,而私人汽车则较为缺乏弹性。

表 10 轨道交通对路面交通的替代

	API							
	私人汽车		非私人汽车		出租车		公共汽车	
	低	高	低	高	低	高	低	高
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
<i>subway</i>	-15.8314*** (5.8594)	-16.8518** (6.9205)	-12.1285** (4.7030)	-15.6203** (6.8380)	-2.4043 (6.6342)	-19.8935*** (6.3543)	-14.6429** (7.2197)	-17.7826*** (5.9566)
<i>subway×aa</i>	-5.8079 (8.8059)		-10.5723 (8.4718)		-23.6645*** (8.7860)		-6.6090 (8.9921)	

注:括号内为市级聚类稳健标准误;*p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01;RD 回归采用了二项式估计;各类机动车保有量高、低分组是根据是否高于或低于城市中位数确定的;表中的 *aa* 表示各类机动车的保有量高、低分组,若保有量高就为 1,低则为 0;表中同时控制了控制变量、固定效应、年度效应、月度效应、星期效应、断点效应与假日效应。

资料来源:作者基于 Stata 软件估计。

五、轨道交通的规模效应分析

轨道交通项目投资成本高且盈利能力弱,这不可避免给地方政府带来了巨大的财政压力,从而可能降低其他城市公共品的供给水平。因此,一个亟需讨论的重要问题是:从空气污染治理角度看,在于轨道交通的建设是否存在最优规模?这不仅有助于从宏观角度理解中国城市轨道交通促进污染减排的基本规律,而且更有助于各城市政府正确评估当地轨道交通建设水平,并依据各自特点制定具有针对性的公共政策。当然,解答该问题的最终目标仍是在保证减排效果的前提下,尽量节约财政资源,从而优化支出结构,提高支出效率。理论上,轨道交通并不必然存在最优规模。究其原因,在于轨道交通网络具有很强的正外部性,主要包括两个方面^①:①轨道交通具有公共交通的正外部性,即可以通过降低交通拥堵来提高路面交通通行效率;②轨道交通还具有正的网络外部性,即随着路网建设的日益完善,新建线路开通在使沿线居民获益的同时,也改善了与该线联网的其他线路沿线乘客的出行效率,从而实现帕累托改进^[20]。为准确评估轨道交通污染减排的规模效应,这里将进行分样本回归,考察已建成轨道交通线路累积里程在 0—50 公里、50—200 公里以及大于 200 公里时新开通线路的异质性影响,实证结果见表 11。

从表 11 第一行的结果可知,总体上,现有轨道交通累积里程越长,新建线路的治污效果越强。当累积线路长度小于 50 公里时,其环保效应并不显著。这意味着对于一个城市而言,规模过小的城市轨道交通系统难以大规模替代路面交通出行方式,可能是由于少量的轨道交通线路无法产生足够的网络外部性,从而未能有效替代原有私人出行方式。当轨道交通累积线路里程介于 50—200 公里之间时,新建线路的减排效果有所提高,并变得显著。当累积里程超过 200 公里时,轨道交通的环

① 轨道交通还可以促进沿线土地价格的上涨,从而使土地所有者获益,但由于这一外部性并非本文关注的问题,此处并不展开讨论。

表 11 轨道交通减排作用的规模效应

	API			
	(1)	(2)	(3)	(4)
累积里程	0—50 公里	50—200 公里	>200 公里	>200/<50
<i>subway</i>	-8.3194 (5.5568)	-13.1447** (6.4209)	-20.8637** (10.5452)	-17.9631 (12.4421)
人口密度	<1 万人/公里 ²		>1 万人/公里 ²	
累积里程	0—50 公里	>200 公里	0—50 公里	>200 公里
<i>subway</i>	-13.3641 (9.0953)	-24.6066 (27.6874)	-18.6096** (8.0158)	-54.8944* (28.5467)

注: 括号内为市级聚类稳健标准误; * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$; RD 回归采用了二项式估计; 由于线路数量与里程数高度相关, 即 0—1 条、2—5 条和大于 5 条线路分别对应于 0—50 公里、50—200 公里及大于 200 公里, 因而表中只列出里程数估计结果; 本文还利用人口规模进行了分组回归, 但估计结果并不存在明显规律, 此表并未列出; 表中同时控制了固定效应、年度效应、月度效应、星期效应、断点效应与假日效应。

资料来源: 作者基于 Stata 软件估计。

保效应达到最大, 这意味着当前中国城市的轨道交通仍然处于规模报酬递增阶段, 更加健全的轨道交通体系对路面交通的出行方式具有更强的替代作用, 因此, 其环保效应更大。总体而言, 当前中国城市的轨道交通并没有达到最优规模, 仍然能够受益于该交通模式的网络正外部性, 从而验证了前述的理论分析。

当然, 轨道交通网络存在正外部性必须满足一个前提条件, 即当前运量并未达到饱和。如果现有系统已不堪重负, 那么, 在未能提高旧线路运力的情况下, 贸然联入新的线路, 增长的需求将会恶化轨道交通运营效率。在此情况下, 只有同时开通新线并改造旧线, 才能实现轨道交通网络的正外部性。基于此, 本文又进一步利用不同人口密度进行城市分组, 考察两方面问题: ①在人口密度较低的城市是否存在轨道交通资源的浪费? ②在人口密度较高的城市是否存在轨道交通运力的饱和? 从表 11 中第二行的估计结果可知, 在人口密度低于 1 万人/平方公里的城市中, 无论累积开通的轨道交通线路小于 50 公里还是大于 200 公里, 新开线路的减排效果均不显著。相反, 人口密度高于 1 万人/平方公里城市的新开线路, 无论其距离长短, 均存在显著的减排效应, 且估计值显著大于低密度城市。上述结果至少说明三方面问题: ①之前估计结果中, 累积线路小于 50 公里样本的不显著可能来自低密度城市; ②高密度城市并未出现现有线路运力饱和的情况; ③累积里程大于 200 公里的低密度城市可能出现了资源浪费的情况, 因其不显著的减排效应源于运力饱和的可能性较小。产生上述结果的原因易于理解: 低密度城市的轨道交通对路面交通替代能力较弱, 因而其减排效应不显著, 而高密度城市由于其运力并未达到饱和, 因而网络正外部性使其仍处于规模收益递增阶段。由此可见, 在当前中国城市建设中, 高人口密度城市的轨道交通远未达到最优规模, 地方政府仍需进一步投入资源对其加以完善; 而对于低密度城市, 兴建轨道交通的时机可能并不成熟, 其通过交通替代改善环境的潜力十分有限。

六、结论与启示

近年来, 中国大中城市兴起了大规模兴建轨道交通的热潮, 其目的在于解决日益严重的城市交通拥堵与空气污染。本文利用准实验方法对上述问题进行分析后发现: ①城市轨道交通开通对空气

污染具有显著的减排效应,而且这一结果在考虑节假日、不同带宽以及存在遗漏变量的情况下仍然稳健;②在异质性分析中,发现轨道交通减排效应随城市人口规模、密度、污染程度的上升而增大,表明其具有城市规模收益递增的特点;③轨道交通主要降低了与机动车相关的PM、SO₂、NO₂和CO排放,且在交通高峰期体现出高于非高峰期的减排效应,表明其主要途径是替代路面交通;④通过分析北京交通拥堵数据,发现轨道交通联通对周边地区的早高峰时期的拥堵有显著缓解作用;⑤在对其他城市进行分析时,发现轨道交通在人口超过800万的城市显示出较强的缓解作用,而低于800万的二、三线城市则不显著;⑥通过对不同交通工具的分析,发现轨道交通减排效应在出租车保有量上存在显著异质性,表明其空气改善效应主要来自对出租车出行方式的替代;⑦通过对轨道交通兴建最优规模的分析,发现当前中国城市轨道交通建设仍处于规模报酬递增阶段,且人口密度越高的城市这一特征越明显。

本文的实证结论对中国城市的轨道交通兴建具有一定的参考意义,可为今后相关政策制定提供借鉴。①总体而言,中国城市轨道交通的开通具有显著的空气治理效应,能够有效缓解城市空气污染,从而显著提高社会净效益。在本文对当前北京轨道交通减排效应的价值测算中发现,从社会福利角度观察,尽管其兴建与运营成本高昂,但考虑到因拥堵缓解与空气改善为城市居民带来的福利增进,兴建轨道交通总体上仍是有利可图的。②若考虑轨道交通影响的异质性,对于人口规模与密度较低或者污染较轻城市,基于改善空气质量的目的是兴建轨道交通的地方政府应审慎对待这一基础设施投资。具体而言,人口规模低于1500万、人口密度低于1万人/平方公里或年均空气污染指数低于90的城市,其轨道交通的污染减排效应是不显著的。③若考虑轨道交通的拥堵缓解作用,人口规模低于800万的二、三线城市也是不显著的。而且,若城市机动车中出租车的比重较小,通过轨道交通替代路面交通的方式来改善空气质量的政策效果也将大打折扣。相反,若人口规模较大、密度较高或者城市出租车的数量较多,轨道交通将有显著的交通缓解与污染减排效应,而且这种效应将随其兴建规模的扩大而呈现规模效应,其主要机制就在于很大程度上替代了路面交通的出行方式。④从轨道交通网络外部性角度分析,更完善的轨道交通网络更加有利于实现对路面交通出行方式的替代,而对于开发初期的轨道交通系统,由于其网络外部性较弱,人们转变出行方式的意愿并不强烈。这一规模效应在较高人口密度城市中表现得尤为明显,而在人口密度较低的城市,盲目发展轨道交通可能导致财政资源的浪费。总体而言,城市规模对于轨道交通的拥堵缓解及污染减排效应均有显著影响,因而地方政府在实施该项政策时应对其成本与收益进行充分评估。

[参考文献]

- [1]李文兴,尹帅.城市轨道交通成本构成分析[J].交通运输系统工程与信息,2012,(2):9-14.
- [2]Zheng, S., and M. E. Kahn. Understanding China's Urban Pollution Dynamic [J]. *Journal of Economic Literature*, 2013,51(3):731-772.
- [3]Chen, Y., G. Z. Jin, N. Kumar, and G. Shi. The Promise of Beijing: Evaluating the Impact of the 2008 Olympic Games on Air Quality[J]. *Journal of Environment Economics and Management*, 2013,66(3):424-443.
- [4]Viard, B., and S. Fu. The Effect of Beijing's Driving Restrictions on Pollution and Economic Activity[J]. *Journal of Public Economics*, 2015,125(2):98-115.
- [5]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(3):1091-1126.
- [6]Eskeland, G. S., and T. Feyzioglu. Rationing Can Backfire: The "Day without a Car" in Mexico City[J]. *World Bank Economic Review*, 1997,11(3):383-408.
- [7]Davis, L. The Effect of Driving Restrictions on Air Quality in Mexico City [J]. *Journal of Political Economy*, 2008,116(1):38-81.

- [8]赵峰侠, 徐明, 齐晔. 北京市汽车限行的环境和经济效益分析[J]. 生态经济, 2010, (12):40-44.
- [9]Li, S., J. Linn, and E. Muehlegger. Gasoline Taxes and Consumer Behavior [J]. *American Economic Journal: Economic Policy*, 2014, 6(4):302-342.
- [10]Li, S., C. Timmins, and R. H. von Haefen. How Do Gasoline Prices Affect Fleet Fuel Economy [J]. *American Economic Journal: Economic Policy*, 2009, 1(2):113-137.
- [11]席鹏辉, 梁若冰. 油价变动对空气污染的影响: 以机动车使用为传导途径[J]. 中国工业经济, 2015, (10):100-114.
- [12]Mohring, H. Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation [J]. *American Economic Review*, 1972, 62(4):591-604.
- [13]Vickery, W. Congestion Theory and Transport Investment[J]. *American Economic Review*, 1969, 59(2):251-260.
- [14]Parry, I. W. H., and K. A. Small. Should Urban Transit Subsidies Be Reduced [J]. *American Economic Review*, 2009, 99(3):700-724.
- [15]Anderson, M. L. Subways, Strikes, and Slowdowns: The Impacts of Public Transit on Traffic Congestion[J]. *American Economic Review*, 2014, 104(9):2763-96.
- [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]Lee, D., and T. Lemieux. Regression Discontinuity Design in Economics [J]. *Journal of Economic Literature*, 2010, 48:281-355.
- [18]Heckman, J. J., R. J. LaLonde, and J. A. Smith. The Economics and Econometrics of Active Labor Market Programs[A]. Ashenfelter O., and D. Card. *Handbook of Labor Economics*[C]. Amsterdam: Elsevier, 1999.
- [19]He, G., M. Fan, and M. Zhou. The Effect of Air Pollution on Mortality in China: Evidence from the 2008 Beijing Olympic Games[R]. HKUST IEMS Working Paper, 2015.
- [20]张学良. 中国交通基础设施促进了区域经济增长吗——兼论交通基础设施的空间溢出效应[J]. 中国社会科学, 2012, (3):60-77.

Heterogeneous Effects of Rail Transit on Air Pollution: An Empirical Study with RDID

LIANG Ruo-bing, XI Peng-hui

(School of Economics of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Urban rail transit system is regarded as an effective measure to solve the problem of traffic congestion and air pollution. This paper employs quasi-experimental methods, namely DID, RD and RDID to estimate the impact of 45 newly opened rail lines of 14 cities on air pollution. These estimation, which control endogeneity and show robustness, prove that rail transit can significantly reduce air pollution. Moreover, we discuss the heterogeneous effects of rail transit and find that the pollution abatement effect enhances with increase of population scale and density, as well as air pollution severity. We also discover that abatement effect is particularly notable in terms of the vehicle related emission of SO₂, NO₂, and PMs. In the mechanism analysis, the subway is found to be effective on the alleviation of morning peak-hour traffic congestion, which suggests that traffic substitution is the main channel of pollution alleviation. Due to positive network externality, finally, we find that it appears scale effect in pollution alleviation of rail transit. More mileage of built rail transit lines means more pollution abatement, especially in those cities with high population density.

Kew Words: rail transit; air pollution; heterogeneous effects; RDID method

JEL Classification: H41 H54 Q53

[责任编辑: 覃毅]