

doi: 10.15936/j.cnki.1008-3758.2019.05.004

轨道交通运营的大气污染减排效应评估

——一个准自然实验设计

郭施宏¹, 陈丽强²

(1. 清华大学 公共管理学院, 北京 100084; 2. 福州大学 经济与管理学院, 福建 福州 350116)

摘 要: 基于断点回归的准实验设计,对北京市轨道交通开通的大气污染减排效应进行了实证分析,同时,通过带宽检验、断点处检验、控制变量检验等稳健性检验对结果进行了验证。回归结果表明:轨道交通的开通整体上促进了北京市的大气污染减排,轨道交通的开通降低了空气中的 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO、NO₂ 浓度,但并没有降低 O₃ 浓度,各项检验均验证了这一结果的稳健性。此外,基于全国样本检验了这一效应的外部有效性以及轨道交通的替代效应。拓展检验的结果表明,轨道交通运营对大气污染的减排效应依然显著,而这一效应主要是轨道交通替代私人汽车、出租车及公共汽车实现的。

关 键 词: 轨道交通; 空气质量; 断点回归分析; 大气污染

中图分类号: F 572.88 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-3758(2019)05-0462-08

An Assessment of Rail Transit Operation Effects on Air Pollution Reduction

—— A Quasi-experimentation

GUO Shi-hong¹, CHEN Li-qiang²

(1. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Based on the quasi-experimental design of regression discontinuity, an empirical analysis of the effects of the opening of Beijing Rail Transit on air pollution reduction is conducted. At the same time, the results are verified by robustness tests such as bandwidth check, discontinuity test, and control variable test. The regression result shows that the opening of rail transit has promoted air pollution reduction in Beijing as a whole and reduced the concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, CO and NO₂ with no reduction of O₃ concentration. The results are highly robust across a variety of estimation tests. The external validity and substitution effect of rail transit are verified based on a national sample. The extended tests show that rail transit still has a significant effect on improving air quality, which is mainly realized by the replacement of private cars, taxis and buses.

Key words: rail transit; air quality; regression discontinuity analysis; air pollution

一、问题的提出

2016 年世界卫生组织(WHO)公布的全球空气质量地图显示,中国是大气污染的重灾区。与此同时,2016 年中国空气质量报告指出,全国 385 个城市仅有 29.6%的城市的 PM_{2.5}年均浓度达标(35 微克/立方米),没有任何一个城市达到 WHO 的标准(10 微克/立方米)。交通排放物是城市大气污染的重要来源,且汽车尾气排放严重影响人们的健康状况^[1]。以北京市为例,根据北京市大气 PM_{2.5}污染源解析结果,在 PM_{2.5}的本地污染源贡献中,机动车排放占比为 31.1%。傅立新和郝吉明^[2]指出,汽车污染已成为北京市大气污染重要来源。由于小汽车使用量的迅速增长,其对城市道路交通与空气质量提出了巨大的挑战,若仅是通过车辆限行、限购等行政管制手段,这样的治污效果有限,还可能带来居民购车行为的扭曲^[3]。一些研究指出,对地面交通的限制可能不仅没有效果,而且会促使居民购买更多的车辆,从而增加更多的交通排放^[4-5]。因此,探究公共交通特别是轨道交通对大气污染物的减排效应对于城市大气污染治理政策制定和实施具有重要意义。为此,不少学者提出发展轨道交通为主的公共交通,并与限制私人汽车的使用相结合的交通发展模式^[6-7]。

但是,对于轨道交通是否能促进大气污染减排的研究结果尚不明确。一方面,以 Mohring 为代表的交通替代理论认为,轨道交通的运营可以改变原来路面交通的出行方式,尤其是可以减少私人汽车或出租车等非公共交通的使用量,从而产生了一种交通转移效应,减少了地面交通的大气污染物排放^[8]。有学者认为推动城市大力兴建轨道交通设施的原因之一,即是轨道交通的运营可以缓解城市交通拥堵现象,减少能源消耗量,进而降低大气污染程度,有望实现经济与环保双重效益^[9]。而另一种观点认为,轨道交通的建设刺激了更多的通勤需求,城市地价因轨道交通的开通而上升,迫使人们不得不向更郊区、房价更低的地方搬迁,从而创造出了更多的通勤者和通勤距离,这即是所谓的交通创造理论^[10]。而且,轨道交通建设与运营的巨额成本可能高于其收益,对于轨道交通收益过于乐观的看法有可能导致对其公共收益的高估^[11-12]。但目前来说,大多学者还

是认为发展轨道交通有助于改善大气环境,Bauernschuster^[13]通过量化德国公共交通罢工事件对城市的影响发现,罢工期间交通事件发生率增加 34%,大气污染增加 14%。Zheng & Kahn^[14]、Goel & Sharma^[15]认为轨道交通减排效果是通过替代原有高耗能、高污染的出行方式而产生的,且这种减排效果具有一定的规模效应。Chen & Whalley^[16]基于我国台湾台北的轨道交通研究发现,台北地铁的的开通运营可以减少 5%~15%的 CO 排放。高玉冰^[17]指出,虽然轨道交通的减排成本较高,但其总体减排效果较好,发展轨道交通和引入快速公交等措施可以实现大气污染与温室气体的协同减排。在中国大陆,谌仁俊等^[18]以武汉市为案例,认为轨道交通的运营显著降低了 AQI、CO、PM₁₀和 PM_{2.5}浓度。梁若冰和席鹏辉^[19]作了较详尽的解释,他们认为轨道交通的开通具有显著且稳健的污染减排治理效应,同时,轨道交通的治污效应因人口规模、人口密度以及城市污染程度存在异质性,在二三线城市,轨道交通的开通对其空气质量的改善并无显著作用,对于采用兴建轨道交通以实现空气质量改善目标的政府应慎重。

相比以往研究,现有关于中国大陆城市轨道交通运营对空气质量影响的研究依然较少,尤其缺乏对城市层面的具体分析。北京市是中国轨道交通建设最发达的城市,根据北京市交通发展年报数据,2005 年以来,北京市轨道交通建设呈现快速增长的趋势,轨道交通运营里程数由 2005 年的 114 公里增长至 2015 年的 554 公里,年均增长率达 38.6%。从公众出行结构看,轨道交通占公众出行比重逐年稳步上升,在 2015 年达到了 25%。伴随着轨道交通的建设与运营,北京市 2006—2015 年的交通拥堵指数整体呈现波动下降的趋势,地面交通的拥堵程度得到了一定的缓解。因此,选择北京市作为主要的分析对象具有代表性。同时,为了保证实证结果的外部有效性,文章进一步基于全国样本进行了拓展检验。

具体来说,本研究采用断点回归(regression discontinuity,简称 RD)的准实验设计,以北京四条地铁路线开通日(2014 年 12 月 28 日)为断点,量化地铁开通前后的大气污染物浓度的差异,以检验轨道交通开通对空气质量影响的显著性。进而,本文进行全样本检验以及轨道交通的替代效应检验,回答的主要问题包括:轨道交通的开通运

营是否促进了大气污染的减排效应,轨道交通对不同大气污染物存在怎样的影响,这种减排效应的机制是什么,同时,文章采用多种稳健性检验方法对结果进行验证:第一,考虑不同带宽下的回归估计结果;第二,通过与其他城市对照检验估计结果,验证断点选择的随机性假设;第三,验证相关控制变量的平滑性排除竞争性因素。

二、研究思路与模型设定

1. 研究思路

为了检验轨道交通对空气质量的影响,本文参考 Chen & Whalley 一文的研究思路,采用断点回归方法,以北京市轨道交通开通日为断点,估计轨道交通开通对空气质量的影响并进行相应的稳健性检验对结果进行验证。断点回归方法能够较好地解决轨道交通通车的识别问题,将轨道交通开通看做是一个突变的因素,这一突变把同一城市分为处理组与控制组,估计局部平均处理效应。当处理组与控制组无限接近在样本断点处时被认为是随机分配的,因此断点估计可以有效解决处理组与控制组难匹配问题以及估计中遗漏变量的问题。

2014 年 12 月 28 日,北京市一次性开通了四条轨道交通线路,分别是 6 号线二期、7 号线、14 号线东段、15 号线一期西段等四条线路(段),总里程达到 62 公里,缓解了望京地区东三环、东五环北路地区交通拥堵的情况,由此北京的轨道交通四环内线网密度从 0.44 公里/平方公里提高到 0.65 公里/平方公里,基本实现了三环、四横、五纵、七放射的骨干线网。一方面,本次轨道交通开通的线路多、里程长,为断点回归估计提供了一个良好的检验轨道交通开通效应的断点。通过研究该断点前和断点后的大气污染物变化情况,可以进一步验证轨道交通对北京市空气质量的影响。

另一方面,带宽选择是断点回归中的重要环节,当样本与断点的距离越近时,其相关变量无差异性越容易成立,估计偏误越小;但带宽过窄容易导致信息损失,而带宽过宽时,可能会产生遗漏变量的问题。参考相关研究发现,在带宽选择上并未有共识,从 20 天到 2 年,但大多数研究取 60~200 天之间的带宽。本文考虑到长带宽和短带宽的优势与劣势,折中选取 100~160 天区间的不同

带宽对轨道交通开通的大气污染减排效应进行估计。

2. 模型设定与描述性统计

根据断点回归的设计思路,轨道交通开通日将开通日前和后的空气质量分为了控制组和处理组,另外,由于通车与否有明确的时间点分界线,而在此分界线两侧的短时间内,气候条件并不会存在系统差别(天气条件概率分布基本相同),唯一的差别为是否通车,从而能够较好地捕获轨道交通开通对空气质量的影响。假设轨道通车状况为 $D_t = \{0, 1\}$, 当 $D_t = 0$ 表示未通车, $D_t = 1$ 表示已通车,断点估计恰好捕获了 D_t 从 0 跳跃到 1 时给空气质量 y_t 的平均处理效应,通过比照处理组和控制组估计轨道交通开通对大气污染物浓度的影响。断点回归的模型如下所示:

$$y_t = \alpha_0 + \beta_1 \text{Metro}_t + \sum_{j=1}^k \beta_2 p(t)^j + \text{Metro}_t \sum_{j=1}^k \beta_3 p(t)^j + \beta_4 Z + \mu_t \quad (1)$$

其中, y_t 为第 t 天空气质量指数(AQI)以及 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 、 O_3 日均浓度数据的对数值; Metro_t 为是否开通轨道交通的虚拟变量(0,1); $p(t)$ 表示距离通车的天数差; β_1 表示通车前后的空气质量指数变动; β_2 、 β_3 、 β_4 表示变量系数;在 $p(t)$ 多项式选择上,本文采用 AIC(Akaike information criterion)方法进行多项式的优化选择; Z 为一系列的控制变量; μ_t 为随机扰动项。

本文分别选取北京市 2014 年 10 月 9 日至 2015 年 3 月 18 日的日度 AQI 和六类常见的大气污染物浓度($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 和 O_3) 作为被解释变量。本文关键的解释变量是否开通轨道交通(Metro),选取了在 2014 年 12 月 28 日轨道交通开通前的样本记为 0,开通后记为 1(下文详细说明选择该日作为断点的原因)。同时文章控制了一些可能影响日空气质量的变量,包括日均温(temperature)、风速(wind)、相对湿度(humidity)、是否为节假日(holiday)以及是否在供暖期(heating)。

本文的空气质量数据来自于中华人民共和国环境保护部网站,气象数据来自于中国气象数据网,交通数据来自于各政府网站,路面交通保有量数据来自于《北京市国民经济与社会发展统计公报》《中国城市统计年鉴》。文章主要变量的描述性统计如表 1 所示。

表 1 描述性统计

变量	含义/单位	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
AQI	空气质量指数	161	124.870	85.499	22.0	380.0
PM _{2.5}	微克/立方米	161	90.310	75.182	5.2	330.6
PM ₁₀	微克/立方米	161	121.812	84.035	8.9	375.5
NO ₂	微克/立方米	161	60.366	28.506	10.3	135.9
SO ₂	微克/立方米	161	23.415	17.792	2.2	79.0
CO	毫克/立方米	161	1.559	0.984	0.2	4.8
O ₃	微克/立方米	161	28.845	16.229	2.0	71.0
temperature	日均温/℃	161	3.857	5.320	−4.0	18.0
wind	风速(0.1 米/秒)	161	21.366	10.954	6.0	66.0
humidity	相对湿度/%	161	44.280	20.306	11.0	97.0
Metro	是否开通地铁(0,1)	161	—	—	0	1
holiday	是否节假日(0,1)	161	—	—	0	1
heating	是否供暖期(0,1)	161	—	—	0	1

三、实证分析

1. 断点回归估计结果

表 2 报告了 8 阶多项式拟合时间趋势时的断点回归估计结果。在控制了天气因素、节假日效应以及供暖期的影响后,文章分别选取了 2014 年 12 月 28 日的轨道交通开通断点前后的 80 天、70

天、60 天和 50 天作为带宽,不同的带宽估计得出了基本一致的结果,即北京市 2014 年 12 月 28 日轨道交通的开通对大气污染整体上产生了显著的负向影响,轨道交通的运营有助于提升空气质量。具体而言,轨道交通的开通运营显著降低了城市可吸入颗粒物(PM_{2.5}和 PM₁₀)、NO₂、SO₂ 和 CO 浓度水平。汽车尾气是氮氧化物、可吸入颗粒物等的主要来源^[20],氮氧化物、可吸入颗粒物浓度的

表 2 轨道交通开通的污染减排效应估计结果:北京

被解释变量	解释变量	带宽±80 天	带宽±70 天	带宽±60 天	带宽±50 天
ln(AQI)	Metro	−1.124 3*** (0.390 7)	−1.351 7*** (0.426 3)	−1.328 6*** (0.435 0)	−1.670 4*** (0.514 6)
	R ²	0.733 7	0.707 2	0.695 2	0.734 9
ln(PM _{2.5})	Metro	−1.556 9*** (0.535 1)	−1.824 3*** (0.582 8)	−1.779 6*** (0.582 9)	−1.986 8*** (0.687 2)
	R ²	0.806 2	0.790 4	0.785 7	0.817 6
ln(PM ₁₀)	Metro	−1.254 7** (0.476 3)	−1.354 9** (0.488 2)	−1.435 4** (0.558 4)	−1.551 9*** (0.584 0)
	R ²	0.634 0	0.601 6	0.578 4	0.700 2
ln(NO ₂)	Metro	−0.784 2*** (0.239 8)	−1.145 1*** (0.285 9)	−0.983 2** (0.281 8)	−1.007 7*** (0.320 8)
	R ²	0.838 4	0.844 1	0.848 7	0.879 7
ln(SO ₂)	Metro	−1.252 5*** (0.440 6)	−1.446 4*** (0.501 9)	−1.102 7** (0.4551)	−1.469 3** (0.562 7)
	R ²	0.737 3	0.735 4	0.7523	0.797 4
ln(CO)	Metro	−1.088 7*** (0.381 2)	−1.177 1*** (0.413 2)	−1.060 6*** (0.400 9)	−1.625 1*** (0.500 6)
	R ²	0.799 0	0.778 6	0.785 4	0.824 3
ln(O ₃)	Metro	1.386 2*** (0.500 7)	1.958 1*** (0.427 0)	2.127 1*** (0.419 4)	2.226 0*** (0.619 2)
	R ²	0.714 8	0.742 5	0.795 2	0.772 5
控制变量	天气因素	是	是	是	是
	节假日效应	是	是	是	是
	供暖期	是	是	是	是

注: 括号内为聚类稳健标准误; *、**、*** 分别表示变量在 0.1、0.05、0.01 水平上显著,下同

下降说明北京市轨道交通的开通产生了一定的 Mohring 效应。但回归结果显示,轨道交通的开通并没有降低 O_3 的浓度,甚至出现显著的正相关关系。这很可能是由于 O_3 浓度受人为排放源、天然源等的交互影响,呈高度非线性特性,污染源贡献分析过程复杂,当前大气科学研究对于 O_3 的生成机制并不明晰^[21]。因此,轨道交通开通对 O_3 浓度产生的影响性质实际上并不确定,统计上的正向关系并不意味着二者存在简单的线性关系。

2. 稳健性检验

(1) 断点处检验

利用断点回归估计不同带宽下轨道交通对大气污染物浓度的影响,虽然可以较好地解决遗漏变量的问题,但仍无法完全排除其他可能导致断点突变的影响因素。因此,本文通过比较其他城市在该断点处是否也存在这种污染减排效应来增加估计结果的稳健性。如果参与稳健性检验的城市在断点处并没有产生显著的大气污染减排效应,说明北京地铁开通这一断点是对北京空气质量产生变化的关键因素,即上述结果具有稳健性,

反之则结果不具有稳健性。在参与稳健性检验城市的选择上,一方面,本文选取在断点处未开通轨道交通,且与北京市自然条件相似的天津市进行对比;另一方面,选取与北京人口、经济因素较为相近的上海市进行断点处检验。依据 AIC 值的优化选择,表 3、表 4 报告了 9 阶多项式拟合时间趋势时的断点回归估计结果,天津样本在相应的带宽检验下基本不显著,表明北京轨道交通开通并未对天津空气质量产生显著影响,也进一步说明 2014 年 12 月 28 日并未有其他因素显著影响了空气质量。表 4 报告了上海的断点回归估计结果,上海在断点处具有显著的大气污染加剧影响,与北京市的估计结果相异,同样验证了北京市轨道交通开通是解释其大气污染减排效应的显著因素。

同时,为了检验结果变量在断点处的不连续是由轨道交通的开通引起的,而非由该日期的其他相关因素引起的,本文检验了以 2015 年 12 月 28 日为断点的回归结果^①。从回归结果来看,在新断点处,结果变量在不同带宽检验下基本不显著,排除了日期因素的干扰效应。

表 3 其他城市断点处检验:天津

被解释变量	解释变量	带宽±80 天	带宽±70 天	带宽±60 天	带宽±50 天
ln(AQI)	Metro	-0.053 9 (0.351 4)	-0.026 7 (0.389 3)	-0.188 2 (0.419 8)	0.438 0* (0.263 0)
	R ²	0.628 9	0.614 7	0.636 4	0.677 4
ln(PM _{2.5})	Metro	-0.207 3 (0.354 4)	-0.102 9 (0.359 1)	-0.105 3 (0.408 5)	0.461 3* (0.255 5)
	R ²	0.751 1	0.756 3	0.767 6	0.768 1
ln(PM ₁₀)	Metro	0.053 5 (0.391 1)	0.102 0 (0.435 9)	-0.272 7 (0.422 3)	0.510 1* (0.284 9)
	R ²	0.585 4	0.570 7	0.614 6	0.650 6
ln(NO ₂)	Metro	-0.368 3** (0.184 5)	-0.148 1 (0.168 5)	-0.134 7 (0.180 8)	0.075 8 (0.147 4)
	R ²	0.787 3	0.806 2	0.841 3	0.781 4
ln(SO ₂)	Metro	-0.774 1*** (0.286 4)	-0.454 0 (0.350 1)	-0.355 2 (0.395 1)	0.054 2 (0.238 0)
	R ²	0.813 4	0.807 3	0.798 9	0.764 6
ln(CO)	Metro	-0.388 0* (0.221 4)	-0.279 5 (0.219 2)	-0.434 1 (0.262 2)	0.201 0 (0.142 5)
	R ²	0.723 1	0.713 6	0.747 1	0.751 3
ln(O ₃)	Metro	0.932 0** (0.396 1)	0.631 8 (0.517 0)	0.834 0 (0.546 1)	0.185 7 (0.296 9)
	R ²	0.731 5	0.741 6	0.745 4	0.737 2
控制变量	天气因素	是	是	是	是
	节假日效应	是	是	是	是
	供暖期	是	是	是	是

① 鉴于篇幅限制,文中并没有报告这一检验的具体结果,有需要的读者可向作者索取。

表 4 其他城市断点处检验：上海

被解释变量	解释变量	带宽±80 天	带宽±70 天	带宽±60 天	带宽±50 天
ln(AQI)	Metro	1.882 7*** (0.422 9)	2.114 3*** (0.511 1)	2.256 3*** (0.710 8)	1.911 5*** (0.639 9)
	R ²	0.285 2	0.299 8	0.270 5	0.362 2
ln(PM _{2.5})	Metro	2.208 6*** (0.514 8)	2.405 8*** (0.593 8)	2.547 8*** (0.726 3)	2.135 6*** (0.758 8)
	R ²	0.281 9	0.286 7	0.284 8	0.335 1
ln(PM ₁₀)	Metro	1.821 0*** (0.414 5)	2.035 5*** (0.509 5)	1.733 8*** (0.617 4)	1.959 7*** (0.692 6)
	R ²	0.389 7	0.393 3	0.367 9	0.431 5
ln(NO ₂)	Metro	0.739 1*** (0.267 4)	0.662 0** (0.316 8)	0.497 8 (0.366 3)	0.389 7 (0.470 0)
	R ²	0.672 9	0.683 8	0.702 4	0.645 1
ln(SO ₂)	Metro	1.441 2*** (0.435 6)	1.388 0*** (0.481 1)	0.800 7 (0.494 1)	0.869 2 (0.607 6)
	R ²	0.654 7	0.660 8	0.661 9	0.610 3
ln(CO)	Metro	1.218 8*** (0.294 5)	1.043 0*** (0.330 0)	0.755 5* (0.414 0)	1.383 7*** (0.469 4)
	R ²	0.324 7	0.317 4	0.289 7	0.392 3
ln(O ₃)	Metro	−0.467 1 (0.292 2)	−0.450 6 (0.388 1)	−0.018 2 (0.495 9)	−0.496 1 (0.689 7)
	R ²	0.735 7	0.709 8	0.714 2	0.670 2
控制变量	天气因素	是	是	是	是
	节假日效应	是	是	是	是
	供暖期	是	是	是	是

(2) 控制变量检验

尽管通过选取不同带宽可以尽可能降低估计偏误,但时间断点估计仍可能捕获其他影响因素的效应(如天气因素),导致估计的处理效应被高估。因此,需要检验天气变量是否在断点处存在突变。本文将日均温、风速以及相对湿度作为被解释变量,在控制了节假日效应和供暖期后,观察

其在断点处是否发生显著变化。表 5 报告了 8 阶多项式的估计结果,日均温、风速与相对湿度的显著性均不显著,说明在北京市轨道交通通车日附近并不存在天气变量的断点突变效应。综上,断点处检验和控制变量检验均验证了本文主要结论的可靠性,即北京市轨道交通的开通促进了大气污染的减排效应。

表 5 控制变量的连续性检验

变 量	温 度	风 速	湿 度
Metro	1.551 9(1.646 4)	12.036 6(8.831 7)	−20.830 6(13.143 2)
R ²	0.897 4	0.169 0	0.355 9

四、一个全样本的拓展检验

1. 全样本拓展检验

北京是中国轨道交通发展最成熟的城市之一,2005 年以来,北京市轨道交通建设快速增长,运营里程数由 2005 年的 114 公里增长至 2015 年的 554 公里,年均增长率达 38.6%。基于北京的实证分析证明,轨道交通的开通与运营显著改善

了城市的空气质量。尽管北京的单案例检验具有典型性,但外部有效性存在缺陷。为此,本研究基于全国样本继续对轨道交通运营的大气污染减排效应进行拓展检验。具体而言,本研究选取 2014 年至 2016 年全国范围内新开通轨道交通线路的 20 个城市,包括北京、天津、大连、武汉、深圳、南京、成都、西安、苏州、昆明、杭州、郑州、长沙、宁波、无锡、南昌、福州、东莞、南宁和青岛,拓展检验城市轨道交通对大气污染的减排效应。研究设计

与北京市的准实验设计相似,不予赘述。根据 AIC 的优化选择,表 6 报告了 9 阶多项式拟合时间趋势时的轨道交通通车对大气污染影响的断点回归估计结果,同时也分别显示了不同控制变量组合下的估计结果。全样本的估计结果显示,轨道交通开通显著降低了空气质量指数(AQI),即

大气污染物浓度有显著降低,且均在 1%显著性的水平上通过检验。全样本的回归结果显示,轨道交通的开通至少降低了 11%的大气污染水平,虽然降幅不如北京市的降幅大,但拓展检验的结果依然表明城市开通轨道交通能产生显著的大气污染减排效应。

表 6 轨道交通开通的污染减排效应估计结果:全样本

变 量	ln(AQI)			
	(1)	(2)	(3)	(4)
Metro	-0.134 0*** (0.033 4)	-0.114 2*** (0.031 2)	-0.115 1*** (0.031 1)	-0.116 7*** (0.031 1)
R ²	0.050 1	0.172 1	0.172 0	0.192 3
天气因素	否	是	是	是
节假日效应	否	否	是	是
供暖期	否	否	否	是
样本数	33 823	33 749	33 749	33 749

2. 污染减排机制检验

轨道交通的污染减排机制被认为是通过替代路面交通和缓解交通拥堵而减少大气污染物排放实现的^[22]。为了验证轨道交通是通过对机动车的替代实现减排效应的,文章将全样本分为高机动车保有量城市和低机动车保有量城市两类样本,然后分别对这两类样本进行回归估计,再通过比较其结果来检验这一减排机制是否成立。这一检验设计的原理在于:如果高机动车保有量城市的减排效应明显高于低机动车保有量城市的减排效应的话,说明轨道交通开通是通过对机动车出行方式的替代产生作用的^①。因此,文章基于

2014—2016 年新开通轨道交通线路的 20 个城市的机动车(包括私人汽车、出租车以及公共汽车)保有量数据,分别测算了在高、低机动车保有量两组样本下的估计结果。从表 7 估计结果可知,轨道交通的开通对机动车高保有量城市的私人汽车、出租车以及公共汽车使用均产生显著的减排效应,且与低机动车保有量的城市估计结果形成明显差异,即较高保有量组的减排效应大于较低保有量组的减排效应,且两组系数值差异较大。这一结果证明了轨道交通是通过替代私人汽车、出租车及公共汽车三种出行方式达到污染减排的目标的。

表 7 轨道交通运营的机动车减排效应:全样本

变 量	ln(AQI)					
	私人汽车		出租车		公共汽车	
	保有量低	保有量高	保有量低	保有量高	保有量低	保有量高
Metro	-0.025 0 (0.049 4)	-0.135 2*** (0.040 1)	-0.075 1* (0.045 2)	-0.126 3*** (0.042 2)	-0.082 3* (0.048 3)	-0.110 4*** (0.040 1)
R ²	0.229 1	0.187 7	0.246 8	0.174 5	0.296 1	0.172 0
天气因素	是	是	是	是	是	是
节假日效应	是	是	是	是	是	是
供暖期	是	是	是	是	是	是
样本数	11 983	21 766	14 104	19 645	10 861	22 888

五、结论与展望

北京市在 2005—2015 年期间,轨道交通运营里程以年均 38.6%的速度快速增长,轨道交通在

公众出行结构中的比重也逐年提升,达到 25%。本文采用断点回归的准实验设计,以 2014 年 12 月 28 日北京市大范围开通轨道交通为断点,对轨道交通开通的大气污染减排效应进行实证分析,同时,通过带宽检验、断点处检验、控制变量检验

① 若一城市的机动车保有量高于所有样本城市机动车保有量均值则被认为该城市为高机动车保有量,反之则为低机动车保有量。

等对估计结果进行稳健性验证。断点回归的结果表明,北京市轨道交通的开通对大部分的大气污染物浓度产生了显著的负向影响,但轨道交通开通并没有降低空气中 O_3 浓度,各种稳健性检验也验证了上述结论。鉴于外部有效性的考虑,本文基于全国样本进行了一个拓展的检验以及减排机制的分析。全样本的结果表明,轨道交通的开通运营能降低至少 11% 的大气污染水平,其减排效应主要来自于对私人汽车、出租车与公共汽车使用的替代。

本文的结论证明了轨道交通的运营有助于大气污染的减排,这丰富了公共交通运营的环境效应研究,并在一定程度上对于城市兴建轨道交通提供了参考意义。但诚如梁若冰和席鹏辉的研究所言,兴建轨道交通对不同规模的城市存在不同的效应。对于轨道交通网络较为发达和初建轨道交通的城市而言,轨道交通的运营可能对不同的路网基础的城市具有不同影响结果。同时,轨道交通建设与运营对大气质量影响的边际效应也是未来值得探讨的问题,如何实现轨道交通建设的经济效益和社会效益对于城市可持续发展具有重要意义。在近期的研究成果中,研究团队也对上述一些问题进行了进一步探究发现,对于大城市而言,轨道交通的环境效应更为明显;而在中小城市,从环境效益与经济效益的角度来说,快速公交系统(BRT)是更优的选择^[23]。

参考文献：

[1] Colville R N, Hutchinson E J, Mindell J S, et al. The Transport Sector as a Source of Air Pollution[J]. Atmospheric Environment, 2001,35(9):1537-1565.

[2] 傅立新,郝吉明,何东全,等. 北京市机动车污染物排放特征[J]. 环境科学, 2000,21(3):68-70.

[3] 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(2):1091-1126.

[4] Eskeland G S, Feyzioglu T. Rationing can Backfire: The “Day Without a Car” in Mexico City[J]. World Bank Economic Review, 1997,11(3):383-408.

[5] Davis L W. The Effect of Driving Restrictions on Air Quality in Mexico City[J]. Journal of Political Economy, 2008,116(1):38-81.

[6] 陈飞,诸大建,许琨. 城市低碳交通发展模型、现状问题及目标策略——以上海市实证分析为例[J]. 城市规划学刊, 2009(6):39-46.

[7] 蔡博峰,曹东,刘兰翠,等. 中国交通二氧化碳排放研究

[J]. 气候变化研究进展, 2011,7(3):197-203.

[8] Mohring H. Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation[J]. The American Economic Review, 1972,62(4):591-604.

[9] Kain J F. Housing Segregation, Negro Unemployment, and Metropolitan Decentralization[J]. Quarterly Journal of Economics, 1968,82:175-197.

[10] Vickrey W S. Congestion Theory and Transport Investment[J]. The American Economic Review, 1969, 59(2):251-260.

[11] Allport R J, Thomson J M. Study of Mass Rapid Transit in Developing Countries[R]. Berkshire: Transport and Road Research Laboratory, 1990.

[12] Kain J F. Cost-effective Alternatives to Atlanta’s Rail Rapid Transit System [J]. Journal of Transport Economics and Policy, 1997,31(1):25-49.

[13] Bauernschuster S, Hener T, Rainer H. When Labor Disputes Bring Cities to a Standstill: the Impact of Public Transit Strikes on Traffic, Accidents, Air Pollution, and Health [J]. American Economic Journal: Economic Policy, 2017,9(1):1-37.

[14] Zheng S, Kahn M E. Understanding China’s Urban Pollution Dynamics[J]. Journal of Economic Literature, 2013,51(3):731-772.

[15] Goel D, Sharma S. The Effect of Metro Rail on Air Pollution in Delhi [R]. New Delhi: University of Delhi, 2014.

[16] 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.

[17] 高玉冰,毛显强, Gabriel C, 等. 城市交通大气污染物与温室气体协同控制效应评价——以乌鲁木齐市为例[J]. 中国环境科学, 2014,34(11):2985-2992.

[18] 谌仁俊,谢欢艳,林宇聪. 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[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2018,18(4):95-110.

[19] 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.

[20] Zegras C. The Costs of Transportation in Santiago de Chile: Analysis and Policy [J] Implications Transport Policy, 1998,5(1):9-21.

[21] 盛叶文,朱云,陶谨,等. 典型城市臭氧污染源贡献及控制策略费效评估[J]. 环境科学学报, 2017(9):3306-3315.

[22] Anderson M L. Subways, Strikes, and Slowdowns: The Impacts of Public Transit on Traffic Congestion [J]. American Economic Review, 2014,104(9):2763-96.

[23] 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(6):73-79.