

治理绩效

城市轨道交通建设的碳减排效应

杨建国¹, 林若飞², 祁小兵¹, 黄珺珮³, 陈时俊⁴

(1. 福州地铁集团有限公司, 福州 350001; 2. 同济大学国际足球学院, 上海 200029;
3. 同济大学体育教学部, 上海 200029; 4. 同济大学碳中和研究院, 上海 200029)

摘要: 绿色低碳发展是当今城市建设的主题。轨道交通是城市重要的交通基础设施, 影响城市的交通碳排放。实证检验城市轨道交通对城市碳排放的影响。结果表明, 城市轨道交通建设对城市碳排放的降低有显著的作用, 影响效果存在着城市规模等级异质性。城市轨道交通产生了“交通替代”效应, 增加新的投资机会。增加绿色金融投入, 促进绿色技术创新, 进而降低城市碳排放。

关键词: 城市轨道交通; 城市碳排放; 金融约束; 交通替代; 绿色技术创新

中图分类号: F57 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)06-0275-09

城市轨道交通作为城市交通体系重要组成, 是大城市发展公共交通的重点方向, 相较私家车和传统公交, 轨道交通具有节能环保、大运量、高效安全、全天候运营等显著优势, 是缓解大中城市交通压力的有力途径。我国城市轨道交通起步较晚, 伴随经济快速发展和城市化进程, 城市轨道交通建设进入快车道。截至 2023 年底, 中国内地开通轨道交通城市达 59 个, 运营里程为 11 232.65 km, 完成客运量 294.4 亿人次, 客运周转量为 2 418 亿人次 km, 列车开行数和客运量均居世界首位, 城市轨道交通在缓解交通拥堵和推广绿色出行方面作用显著。

城市轨道交通建设一方面加强了城市中心对周边区域的辐射带动作用, 强化部分地区的中心地位, 促进城市各组团之间的联系。另外, 轨道交通联系不同功能区, 实现区域资源共享, 进而影响产业布局和用地结构。此外, 作为大运量公共交通工具, 轨道交通的开通对改变市民出行方式、缓解交通拥堵等均产生显著影响。鉴于城市人口规模、发展水平和交通形势的差异, 轨道交通对不同城市的影响可能存在异质性。在诸多影响因素影响下, 如何最大限度地发挥轨道交通优势, 更好地促进城市绿色低碳发展, 是轨道交通建设在新时代背景下亟须解决的重大课题。

推进绿色低碳发展是当今时代的主旋律, 而城市碳排放水平是衡量绿色低碳发展程度的重要指标。2021 年, 中国明确提出“30·60”双碳目标, 即力争二氧化碳排放于 2030 年前达峰, 2060 年前实现碳中和。“30·60”目标的提出, 对我国城市碳排放治理提出了更高要求。如何实现城市绿色低碳转型发展、有效降低碳排放水平, 成为当前学术界和决策层面亟须解决的重点课题。在诸多城市碳减排举措中, 发展城市轨道交通无疑是一项重要且具有深远影响的战略决策。近年来, 我国城市轨道交通建设取得长足进展, 已成为大中城市公共交通体系的重要组成部分。据统计, 2022 年在开通轨道交通的城市中, 我国城市轨道交通客运量占公共交通总量的 45.82%, 在上海、深圳、广州等 10 个城市, 该比例更是超过 50%。

从城市轨道交通对城市碳排放的影响方面来讲。首先, 城市轨道交通具有明显的交通替代效应, 在运营过程中对私家车的替代, 影响人们的日常出行方式选择, 这样会减少城市碳排放。其次, 城市轨道交通的建设必须要有资金支持, 从这个角度讲金融约束日益成为影响城市发展的关键因素。金融约束反映了城市获取资金的难易程度, 金融约束水平的变化会影响城市投资开发、创新支持、产

收稿日期: 2024-08-25

基金项目: 国家社会科学基金(23BJY039)

作者简介: 杨建国(1974—), 男, 福建漳浦人, 高级工程师, 研究方向为轨道交通; 林若飞(1995—), 男, 福建三明人, 博士, 助理教授, 研究方向为体育低碳经济; 祁小兵(1987—), 男, 福建莆田人, 高级工程师, 研究方向为弱电系统; 通信作者黄珺珮(1997—), 女, 广东惠州人, 博士, 助理教授, 研究方向为低碳经济; 陈时俊(1984—), 男, 福建福州人, 博士, 研究方向为碳排放与社会治理。

业发展和消费活动,这些都会对城市碳排放产生影响。最后,轨道交通的建设会显著改变城市金融约束,进而间接影响碳排放水平。城市轨道交通的开通提升了城市空间的连通性,方便了人们的出行,促进了本地区知识扩散和科技人才流动,进而推动城市绿色技术创新,促进城市经济低碳转型。

因此,探究交通替代效应、金融约束、绿色技术创新在城市轨道交通影响碳排放过程中的作用机制,有助于全面认识轨道交通建设对城市绿色低碳发展的推动作用。本文将重点关注城市轨道交通、城市碳排放以及金融约束、绿色技术创新、交通出行替代之间的内在联系,并试图解答以下几个问题:城市轨道交通建设对城市碳排放会产生怎样的影响?城市规模大小的异质性是否会导致城市轨道交通对城市碳排放产生的影响存在差异?城市轨道交通是否会通过影响金融约束,绿色技术创新,产生交通替代效应进而影响城市碳排放?以上问题的回答对于优化城市轨道交通布局,降低城市碳排放,促进城市经济绿色低碳发展具有重要价值。

1 文献综述与理论假说

交通是城市碳排放的重要影响因素,清华大学互联网产业研究院发布的《城市零碳交通白皮书2022》显示交通领域碳排放约占我国碳排放总量的10%。城市轨道交通的运行对于降低城市碳排放具有重要作用,主要体现在以下三个方面。

首先,轨道交通具有交通替代效应。城市轨道交通的运营为市民提供了低碳、便利的出行工具,替代部分汽车需求,进而减少了城市碳排放^[1]。相关研究结果显示,轨道交通的建设和拓展会降低居民对私家车和出租车的需求和使用频率,尤其是在轨道交通覆盖区域内,私家车的使用率显著下降。相较于其他主要的城市客运交通工具,城市轨道交通的碳排放强度最低。其次,城市轨道交通系统的开通也会影响城市的空间结构和功能布局,进而影响人们的出行频次和出行距离,从而对城市碳排放产生影响^[2]。轨道交通的开通会促进人口向沿线地区集聚,进而推动沿线地区土地利用的多元化及强度提升,吸引生活服务功能集聚。例如,轨道交通站点的建设往往伴随着商业网点的集聚,从而减少了人们远距离开车前往商业中心区域采购的需求,进而降低城市碳排放水平。最后,轨道交通系统的开通运营有助于缓解城市交通拥堵,从而降低城市碳排放^[3-4]。作为一种大运量、高效率的客运系统,轨道交通的运能远高于常规道路交通工具。例如,

地铁的运载能力可达每小时数万人次,轻轨也可达数千人次。轨道交通系统与城市道路交通系统相互独立,能够显著改善城市交通拥堵状况。随着交通拥堵的减轻,私家车和出租车的行驶效率得以提高,从而降低了能源消耗和碳排放。因此,城市轨道交通系统的开通运营对于缓解城市交通拥堵,降低城市碳排放具有积极意义。^[5-6]。另外,城市轨道交通也可能通过创造更多交通需求从而增加城市碳排放。首先,轨道交通可能会促进产业和人口向沿线郊区集聚^[7]。这一趋势将加长城市居民的平均通勤距离,即便采用轨道交通出行,但由于总体出行距离的增加,整体交通能耗和碳排放可能会上升。其次,轨道交通的开通有利于缓解城市交通拥堵,提高了私家车出行的便利性^[8]。在一定程度上,这可能会刺激更多市民选择驾驶私家车出行,尤其是在轨道交通覆盖范围之外的城市区域。因此,尽管轨道交通减轻了拥堵状况,但由此产生的私家车使用增加,也将加重城市的碳排放负担。

总的来说,轨道交通对碳排放的净影响效果,取决于减排和增排两种作用力的相对大小,不同城市这两种作用力的大小可能存在较大差异。深入分析影响这两种作用力的决定性因素,对准确评估轨道交通的环境效益、制定合理政策具有重要意义。基于此,提出以下假说。

H1:城市轨道交通对减少城市碳排放具有显著影响;

H2:城市轨道交通存在交通替代效应,从而对城市碳排放产生影响,交通替代效应的强弱与城市规模的大小有关,存在明显异质性。

在参照前人研究成果的基础上进一步从金融约束角度看城市轨道交通对碳排放的影响,发现金融约束在城市轨道交通对碳排放的影响中起到中介作用。首先,轨道交通带动城市投资建设改变金融约束。大规模的轨道交通项目通常涉及政府和企业部门的合作,需要通过债务融资、股权投资等方式来筹集资金^[9]。这不仅为金融市场提供了更多的投资机会,还可以促进金融市场的创新和发展。其次,轨道交通建设还可以提升周边地区的土地价值^[10],而土地价值的提升则会通过增加土地抵押价值、吸引更多投资等方式吸引资金投入,改善城市金融约束。此外,城市轨道交通的开通可以通过提高交通效率、增强区域直接的联系来改善城市金融约束^[11]。而由城市轨道交通发展所改善的金融约束能通过产业结构升级影响碳排放。金融约束会

引导资金向特定产业集聚,进而改变城市产业结构,从而影响碳排放^[12-13]。绿色金融通过将资金引入环保产业、节能产业、可再生能源、清洁能源等绿色产业,引导资金从“三高”领域撤出,降低绿色产业投融资成本,重塑产业、能源和交通运输结构,进而降低城市碳排放。其次,由城市轨道交通发展所改善的金融约束能通过技术进步影响碳排放。金融约束的放宽让先进技术得以更快的落地,进而提高能源使用效率降低城市碳排放。金融发展吸引外商投资,外商直接投资会带来外国的先进技术和管理经验,提高碳排放效率。基于上述分析,提出以下假说。

H3:城市轨道交通通过改善城市金融约束,进而影响城市碳排放。

此外,城市轨道交通通过提高地区内部的空间连通性,能够促进知识交流,使得不同地区之间的人员流动更加便捷,这有助于学校、研究机构与企业之间的知识交流和合作,从而推动创新思想的产生和传播^[14-15]。而且城市轨道交通的建设和运营往往需要大量的技术和创新,这本身就会带动相关领域的研发投入,促进技术创新^[16]。轨道交通的便捷性吸引了更多的人才在城市内部或周边地区流动,这些人才的流动有助于知识和技能的传播,为创新提供人力资源。实际上,城市轨道交通本身作为一种低碳、环保的交通方式,它的发展有助于推动绿色技术的研发和应用,促进产业协调创新与城市低碳转型^[17]。基于上述分析,提出以下假说。

H4:城市轨道交通通过促进绿色技术创新,进而影响城市碳排放。

2 研究设计

2.1 模型设计

为实证检验城市轨道交通建设对城市碳排放水平的影响程度,通过计量经济模型,利用实证数据对模型中所包含的核心变量城市碳排放量、城市轨道交通之间的关系进行回归分析。

根据理论分析,城市轨道交通建设能够对城市碳排放产生直接影响,先考虑不存在中间机制的情况,设定计量模型设定如下:

$$\text{carbon}_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \text{rail}_{it} + \alpha_2 X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: i 和 t 分别为地级城市与年份; carbon_{it} 为城市碳排放的度量指标; rail_{it} 为虚拟变量,表示城市 i 在年份 t 时的城市轨道交通开通与否,开通则为1,未开通则为0; X_{it} 为一系列控制变量的集合; μ_i 为控

制了城市等级的固定效应; γ_t 为控制了时间固定效应; ε_{it} 为随机误差项。

2.2 变量说明与数据说明

主要被解释变量是城市碳排放(carbon_{it}),用城市当年的碳排放强度衡量,单位是万t。主要解释变量是城市轨道交通(rail_{it}),是一个衡量开通与否的虚拟变量,开通则为1,未开通则为0。机制变量包括交通替代、金融约束和绿色创新,其中,金融约束(fin_{it})用当年年末城市存贷款余额之和除以当年城市GDP测度,交通替代(trans_{it})用人均出租车拥有量测度,绿色技术创新(gt_{it})用绿色专利申请数刻画。控制变量包括人口规模、人均GDP、全市用电量、城市建成区面积、规上企业数量等。人口数量和建成区面积是衡量城市规模的重要指标,城市碳排放是由一系列人为活动产生的,因此城市规模大小必然会对城市碳排放产生显著影响。人均GDP的增加会增加城市碳排放。城市用电量和规上企业数量分别是城市能源和工业生产指标的代表,这些是碳排放的主要构成部分。碳排放量为根据能源转化系数计算得到,轨道交通数据来自中国轨道交通协会官网,其他数据均来源于2006—2018年的中国历年城市统计年鉴。

选取了2006—2018年240个城市作为研究样本,表1报告了主要变量的描述性统计结果。从表1中可以看出,城市碳排放的均值为8.62万t,最大值为14.1万t,最小值为0.25万t,不同规模城市之间碳排放存在较大差异。基于前文现状分析可发现,地铁是城市轨道交通的主要组成部分,运营里程占城市轨交总里程比例约为77.84%,是城市轨道交通的骨干运力。因此,以城市地铁数据作为城市轨道交通代表数据进行计量分析。城市轨道交通为虚拟变量,描述了城市轨道交通开通与否的情况。若当年城市已有轨道交通运行,则为1;若当年城市没有轨道交通开通运行,则为0。可以发现,该虚拟变量的平均值为0.06,说明在2006—2018年期间,多数城市是没有轨道交通运行的。

3 实证结果

3.1 平行趋势检验

首先进行平行趋势检验,参考刘冲等^[13]的做法,引入轨道交通开通前四年和后四年虚拟变量,并以轨道交通开通前一年为基准,构建动态双重差分模型如下:

$$\text{carbon}_{it} = \delta_0 + \eta_1 S_{it}^{-4} + \eta_2 S_{it}^{-3} + \dots + \eta_8 S_{it}^4 + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

表 1 变量描述性统计

变量类型	变量名	符号	单位	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	城市碳排放	carbon	万 t	3 120	8.66	14.13	0.25	136.75
解释变量	城市轨道交通	rail	—	3 120	0.06	0.24	0.00	1.00
控制变量	人口数量	popu	百万人	3 120	4.65	3.37	0.24	32.90
	人均 GDP	pgdp	万元	3 120	4.31	3.27	0.01	46.77
	全市用电总量(市辖区)	elec	百亿 kWh	3 120	1.11	1.70	0.02	15.67
	城市建成区面积	builtup	百 km ²	3 120	1.40	1.92	0.07	33.71
	规上企业数量	lnfac	千个	3 120	1.34	1.81	0.19	18.79

式中: S 为虚拟变量; S_{it}^{-4} 为轨道交通开通前 4 年的虚拟变量; S_{it}^4 为轨道交通开通后第四年的虚拟变量,其他以此类推。该模型中重点关注的是系数 η , 其变化反映了轨道交通对城市碳排放影响的动态变化。若 η 显著不为 0,则表示本文构建的多时点双重差分模型满足平行趋势检验。

图 1 汇报了平行趋势检验的结果,在轨道交通开通前,城市碳排放在两组之间并不存在显著差异,在轨道交通开通之后,处理组和对照组有显著差别,表面轨道交通开通对城市碳排放有显著影响,平行趋势检验通过。

其次,进行豪斯曼检验。通过豪斯曼检验($P=0.00$)拒绝了混合回归的原假设(表 2),因此采用固定效应模型,并控制了城市等级固定效应。

3.2 基础回归结果

表 3 为基准回归结果,表 3 列(1)仅考虑了城市轨道交通对碳排放的直接影响,未控制其他变量,结果显示轨道交通与碳排放呈正相关。这可能是因为城市轨道交通更容易出现在规模较大的城市,而规模较大的城市往往在人口规模、建成区面积等方面会更大,这些因素会使得城市碳排放显著增加。因此,对这些变量进行控制,以排除城市碳排放的其他变量造成的影响。列(2)中,增加了城市规模的代理变量——城市建成区面积和人口数量。结果显示,在城市建成区面积和人口控制的情况下,轨道交通建设会显著降低城市碳排放水平。列(3)进一步控制了城市经济活动水平的替代变量,包括用电量、规上企业数。引入这些变量后,轨道交通的减排效应估计值进一步增加,说明在剔除经济活动差异的影响后,轨道交通的减排作用更加显著。列(4)在此基础上加入人均 GDP 作为城市发展水平的控制变量。在进一步控制了经济发展水平差异后,轨道交通的减排系数依旧显著,且绝对值更大,证实了本文发现的核心结论具有非常强的稳健性。

综上所述,通过逐步控制潜在的影响因素,包

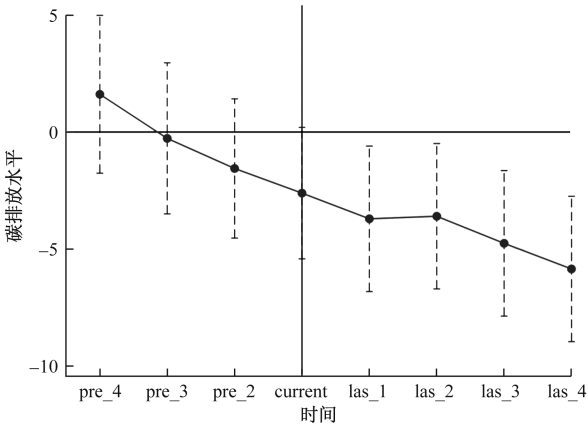


图 1 平行趋势检验

表 2 豪斯曼检验

变量	豪斯曼检验
P	0.00
Chi-sq	336.26

括城市规模、经济活动水平和发展水平等,回归结果显示城市轨道交通建设能够显著降低城市的碳排放水平,该发现在不同模型设置下都能保持一致,从而为本文的实证分析提供了有力支持。

控制变量的回归结果显示,人口规模、人均 GDP、城市用电量、城市建成区面积和规上企业数量对城市碳排放均产生显著的正向促进作用。人口规模和城市建成区面积反映了城市发展规模,两者的正向系数说明,随着城市规模扩大必然会导致碳排放水平的提高^[19-20]的研究结论一致。城市用电量是能源消费的主要体现,正向系数反映了能源消费规模与碳排放之间的正相关关系^[21]。规上企业数量是衡量城市工业化水平的指标,其正值系数说明,工业发展规模的扩大会加重城市的碳排放负担。人均 GDP 作为城市经济发展水平的代理变量,其正向系数意味着,我国当前的经济发展阶段总体上仍处于环境库兹涅茨曲线的上升区间,人均 GDP 的增长会加剧碳排放压力。这一结论同时也进一步明确了在我国当前阶段,经济发展水平的提升会促进城市碳排放^[22]。

表 3 城市轨道交通基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	FE	FE	FE	FE
rail	1.048** (0.785)	-2.178*** (0.661)	-2.151*** (0.597)	-2.310*** (0.596)
builtup		3.855*** (0.125)	3.109*** (0.116)	2.998*** (0.117)
popu		1.997*** (0.581)	2.602*** (0.523)	3.860*** (0.572)
lnelec			4.292*** (0.160)	3.722*** (0.192)
lnfac			0.304** (0.116)	0.274 (0.115)
lnpgdp				1.556*** (0.293)
常数项	3.318*** (0.226)	-0.091 (0.548)	-55.590*** (2.177)	-63.060*** (2.642)
观测值	3 120	3 120	3 120	3 120
R ²	0.658	0.747	0.796	0.797
城市等级 固定效应	是	是	是	是
时间固定 效应	是	是	是	是

注：*、**、***分别 10%、5%、1%的显著性水平；括号中的数值为标准误。

上述实证结果证实,城市轨道交通的开通运营确实会产生减排效应,为缓解城市温室气体排放提供了一种有效途径,从而为制定相关减排政策提供了理论和经验依据。

3.3 内生性检验

以城市轨道交通和城市碳排放量作为解释变量与被解释变量,可能会存在潜在的内生性问题。内生性产生的原因一般来源于测量误差、遗漏变量与联立因果三个方面。在设定好模型后,引入工具变量对内生性进行检验,采用城市建成区范围内的高程极差作为城市轨道交通建设的工具变量。高程极差是城市高程的最大值与最小值之差,反映的是城市坡度起伏的变化情况。理论上,城市高程极差与城市规模大小无关,且不随时间变化而改变。城市高程极差越大,代表地形起伏越剧烈,轨道交通建设的困难度和成本就越高,因此高程极差与轨道交通建设呈显著负相关关系。但平均坡度对城市整体碳排放影响较小,满足工具变量的相关性和外生性条件。

表 4 中报告了两步法工具变量回归的结果。一阶段回归的 F 为 13 096,满足 F 大于 10 的经验值,说明变量选取是有效的。在考虑潜在内生性后,城市轨道交通建设的系数依旧显著为负,且系数绝对

表 4 内生性检验

变量	(1)	(2)
	First-stage	2SLS
高程极差	-0.002*** (0.000 7)	
rail		-31.268** (14.990)
控制变量	是	是
观测值	3 120	3 120
R ²	0.002 7	0.577 5
城市等级固定效应	是	是
时间固定效应	是	是
F	13 096	

注：*、**、***分别 10%、5%、1%的显著性水平；括号中的数值为标准误。

值略有增加。这进一步验证了本文的核心发现,即城市轨道交通建设对碳排放存在显著的抑制作用,结果具有很强的稳健性。

3.4 稳健性检验

实证结果表明,对于本文研究样本而言,城市轨道交通对城市碳排放产生了净减排作用。为确保该发现的可靠性,从三个方面进行了稳健性检验。

滞后解释变量。考虑到轨道交通可能存在一定滞后影响,将解释变量城市轨道交通滞后一期,回归结果如表 5 列(1)所示。滞后处理后,轨道交通仍然对碳排放产生显著的负向抑制作用,本文结论稳健可靠。

控制时间窗口。由于 2008 年之前中国开通轨道交通的城市数量有限,可能存在个体异常值影响。因此以 2009—2018 年为样本期进行单独回归,结果如表 5 列(2)所示。城市轨道交通的系数依旧显著为负,与基准结果一致,说明本文发现不受样本时间期限的影响。

剔除中小城市样本。本文核心关注城市轨道交通建设对碳排放的影响,因此剔除了人口规模制约其无法开通轨道交通的中小城市样本。根据国务院意见,申报建设地铁、轻轨的人口门槛分别为 300 万人、150 万人。考虑中国城镇化发展阶段,未来中小城市人口增长乏力,截至 2018 年常住人口不足 100 万人的城市,未来很难开通轨道交通系统。因此,剔除了常住人口不足 100 万人的城市,重新对核心模型进行估计,结果如表 5 列(3)所示。去除中小城市样本后,城市轨道交通对碳排放的抑制作用依然显著,估计值基本保持稳定。

综上所述,通过调整时间窗口、滞后解释变量和剔除异常样本等方式,本文发现城市轨道交通建

表 5 稳健性检验

变量	(1)	(2)	(3)
	滞后一期被解释变量	控制时间窗口	剔除中小城市
rail		-2.992*** (0.646)	-3.440*** (0.692)
l. rail	-2.310** (0.642)		
常数项	-63.600*** (2.845)	-69.300 (3.058)	-67.380*** (3.959)
观测值	2 880	2 640	1 924
R ²	0.798 1	0.798 5	0.816 3
城市等级固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是

注：*、**、*** 分别表示 10%、5%、1% 的显著性水平；括号中的数值为标准误。

设对碳排放存在抑制作用的结论表现出非常良好的稳健性，从而为相关政策制定提供了可靠的理论和实证支持。

3.5 异质性分析

基准回归的结果验证了城市轨道交通建设整体上能够抑制碳排放。然而，作为覆盖全国的大规模基础设施项目，轨道交通系统对不同城市的影响程度可能存在异质性。为深入探讨轨道交通减排机理的异质性，从城市规模等级异质性分析轨道交通建设与碳排放之间的关系差异。

表 6 展示了按城市等级分析轨道交通对城市碳排放影响的异质性回归结果。列(1)~列(4)分别对应超大城市、特大城市、I 型大城市和 II 型大城市的回归分析。

研究发现，在超大城市，轨道交通建设能显著抑制城市碳排放，且抑制效应高于整体回归系数。特大城市的轨道交通的系数变为正值，对城市碳排放的抑制效应变为促进效应。而在 I 型大城市和

表 6 城市规模等级异质性分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	超大城市	特大城市	I 型大城市	II 型大城市
rail	-10.940*** (3.582)	3.914** (1.369)	3.395*** (0.913)	4.258*** (0.901)
常数项	-634.800*** (70.476)	159.800*** (24.358)	190.700*** (9.657)	47.500*** (1.883)
观测值	130	169	260	1 365
R ²	0.778 9	0.806 0	0.807 4	0.738 9
城市等级固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是

注：*、**、*** 分别表示 10%、5%、1% 的显著性水平；括号内为标准误。

II 型大城市，促进效应显著性增强，系数为正且绝对值增加。

分析表明，在城市规模更大时，轨道交通对碳排放的抑制效应更明显，对超大城市的抑制效果最为显著。在城市规模偏小时，轨道交通的抑制效应减弱，甚至可能转变为促进效应。

实际上，城市规模越大，轨道交通线路密度越高、服务人口比例也越大。王楠等^[23]利用百度通勤数据显示，大城市轨道交通 1 000 m 覆盖范围内居住和通勤人口比例更高。伍速峰^[24]、卢济威^[25]发现，城市拥堵程度与城市规模正相关。因此，规模更大的城市市民选择轨道交通出行的便利性和意愿更高，轨道交通对私家车的替代效应也更显著，从而使轨道交通对碳排放的抑制效果更强。在规模更小的城市，轨道交通的替代效应减弱，这时轨道交通的建设可能更多体现在对城市开发建设活动的影响上，进而增加了城市碳排放。

城市等级规模的异质性分析是对城市轨道交通对碳排放影响理论体系的细化与补充，以往学者在异质性分析方面多聚焦在区域层面，如东部、中部、西部地区，但城市规模等级的差异会比其所处区域带来的差异更加明显。

3.6 机制检验

为深入探讨交通替代、金融约束、绿色技术创新在城市轨道交通与碳排放关系中的作用，模型设定如下：

$$\text{mechanism}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{rail}_{it} + \beta_2 X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \epsilon_{it} \tag{3}$$

式中：mechanism_{it} 为影响机制，包括交通替代、金融约束和绿色技术创新。

表 7 报告了机制检验的实证回归结果。首先观察城市轨道交通对碳排放的影响系数。列(1)是轨道交通对城市机动车使用的影响，该系数为负值(-0.457)，表明轨道交通会减少出租车使用量，替代排放较高的交通方式；列(2)是轨道交通对金融约束的影响，该系数为正值 0.184，表明轨道交通会促进金融约束指标增加，放宽城市金融约束；列(3)是轨道交通对绿色创新的影响，系数为正(0.544 398)，表明轨道交通的开通促进城市绿色技术创新。

综上所述，回归结果支持了理论分析的研究假设，表明城市轨道交通对碳排放的抑制效应，是通过替代排放较高的交通方式、放宽金融约束、提升绿色技术创新水平来实现的。

表 7 金融约束中介机制检验

变量	(1)	(2)	(3)
	交通替代	金融约束	绿色技术创新
rail	-0.457 0*** (0.047)	0.184 0* (0.077)	0.544 3*** (0.074)
常数项	-8.941 (0.006)	3.899*** (0.342)	-1.532 (0.010)
观测值	3 120	3 120	3 120
R ²	0.681 6	0.368 6	
城市等级固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	否	是

注：*、**、*** 分别表示 10%、5%、1% 的显著性水平；括号内为标准误。

4 结论与展望

城市轨道交通建设对城市碳排放具有显著减排作用。作为城市重要的基础设施,轨道交通不仅改变了居民的出行方式和频率,还对城市空间布局、开发模式、产业结构等产生深远影响。本文综合考虑了轨道交通对城市碳排放影响的直接效应和间接效应,发现轨道交通对城市碳减排的贡献总体要高于对城市碳增加的贡献,城市轨道交通的交通替代效应更加明显。轨道交通不仅为市民提供绿色低碳出行选择,减少小汽车使用,降低城市拥堵;而且还通过 TOD (transit-oriented development) 的开发模式使得城市功能布局更加混合,城市人口向轨交站点附近进一步集聚,从而降低了市民的出行频次和距离,从而有利于减少城市碳排放。进一步实证研究表明,城市规模等级会对回归结果造成影响。具体而言,城市规模等级越高轨道交通抑制碳排放的效应就越显著。造成这一异质性的原因在于,轨道交通对城市碳排放的作用主要通过交通替代效应实现。等级较高的城市或同一城市样本时间较靠后,轨道交通网络往往会更加发达完善,市民使用轨道交通的可及性更高,因此私家车出行的替代效应以及对城市交通拥堵的缓解更为明显。

金融约束在轨道交通对碳排放的影响中起到中介作用,城市轨道交通能够显著改善金融约束,而金融约束的改善则会降低城市碳排放水平。城市轨道交通的建设会带动大量资金需求,轨道交通的运营会极大促进城市要素流通效率的提升,这些均有助于城市金融约束的改善。金融约束的改善又会通过推动技术进步、城市产业结构调整 and 居民消费的改变等方式影响城市碳排放。实证研究结果表明,城市轨道交通对城市碳排放的抑制效应有一部分是通过改善城市金融约束来实现的,金融约

束在城市轨道交通与城市碳排放之间发挥了部分中介效应。

绿色技术创新在轨道交通对碳排放的影响中也起到了中介作用。城市轨道交通作为一种绿色低碳的交通出行方式,对绿色技术创新的需求就很高,此外,城市轨道交通改变了交通可达性,促进了科研人才的流动与技术的创新,这有利于促进城市的低碳发展,促进城市的碳减排。

基于主要研究结论,结合我国发展现状,本文从轨道交通的资源分布、轨道交通与 TOD 的综合开发建设和绿色金融以及绿色技术创新等多方面对轨道交通建设提出如下政策建议。

(1)优化轨道交通资源分布,加快超大与特大城市轨道交通基础设施建设,控制中小城市轨道交通的布局。轨道交通的建设对不同城市的影响存在规模异质性。规模等级越大的城市,轨道交通对其碳排放的降低效果越为显著。超大城市和特大城市人口规模庞大,疏解交通拥堵和碳减排压力较大,发展轨道交通可有效缓解城市交通压力,显著降低碳排放。因此,针对这些城市的实际需求,持续推进新线路开通,不断完善轨道交通网络布局。对于中小城市,合理控制轨道交通建设规模。实证研究发现,中小城市发展轨道交通系统对减排效应不显著,甚至可能因系统建设和运营的能耗增加而加重城市碳排放压力。因此,中小城市宜根据人口规模、发展阶段等因素,审慎考虑轨道交通建设的必要性和适度性。

(2)将轨道交通建设作为系统性工程打造,加强轨道交通建设与 TOD 开发的统筹发展。轨道交通对碳排放的影响不仅体现在对交通的直接影响方面,也体现在对城市综合开发建设的间接影响方面。将轨道交通建设和 TOD 开发布局相结合,有利于轨道交通站点周边的开发强度的提升、产业与人口集聚和站点周边土地功能的多样化布局。人口、产业和多元化功能向轨交站点的集聚会进一步引导人们更多选择公共交通出行,从而充分发挥轨道交通的节能减碳的作用。

(3)加强绿色金融对城市轨道交通开发建设的支持,为大城市轨道交通建设提供融资便利性。金融约束在轨道交通对城市碳排放影响中发挥着重要中介作用,融资约束的放宽有助于充分发挥轨道交通的减碳、降碳作用,更好地推动城市低碳、绿色发展。城市轨道交通的开发建设是系统性工程,不仅仅在于线路开发建设本身,而且还在于由此带来

的 TOD 的开发、城市结构功能的调整、其他交通设施的衔接布局等,需要的资金体量巨大。加强绿色金融对城市轨道交通系统的开发建设有助于缓解相关建设的资金压力,有利于城市按绿色、低碳的理想蓝图建设,更好地释放轨道交通的低碳绿色效益。

(4)促进绿色技术创新,助力城市轨道交通绿色低碳运行。推动城市轨道交通系统使用太阳能、风能等可再生能源,减少对化石燃料的依赖。安装智能能源管理系统,实时监控和优化能源使用效率。采用轻量化材料制造车辆,减少能耗。推广使用电动或混合动力列车,减少碳排放。研发和应用更高效的牵引和制动系统,提高能效。此外要加强与高校和研究机构的合作,共同研发新技术。设立相关领域的专业课程和培训项目,培养绿色技术创新人才。

本文从交通替代、金融约束、绿色技术创新的视角出发,针对城市轨道交通对城市碳排放的影响路径和机理展开了研究,但受到数据可得性、研究期限等相关条件限制,未来将进一步将研究视角深入到站点层面,探究其他可能影响城市轨道交通的碳减排的机制的路径。

参考文献

- [1] 胡金东,拓娇娇.城市绿色交通发展路径研究——以西安市为例[J].重庆交通大学学报(社会科学版),2020,20(5):31.
- [2] 余辉,王莹颖,余嘉珊,等.“建轨道就是建城市”理念下的重庆 TOD 综合开发规划实践[J].规划师,2022,38(2):32-39.
- [3] 何玉宏,谢逢春,郝忠娜.国内外城市交通拥堵治理分析及借鉴[J].城市观察,2013(2):136-144.
- [4] 袁振洲,袁晓敬,杨洋,等.城市轨道交通低碳效应研究综述[J].铁道运输与经济,2024,46(8):8-23.
- [5] 周琪,梁肖,黄俊生,等.城市轨道交通碳排放效率与影响因素研究[J].交通运输系统工程与信息,2023,23(1):30-38.
- [6] 吴龙恩,林欣燕,刘智勇,等.城市轨道交通对我国城市空间的影响研究[J].建设科技,2019(21):27-30.
- [7] HARPER C D, HENDRICKSON C T, MANGONES S, et al. Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 72: 1-9.
- [8] 王梓利,林晓言.交通基础设施如何促进区域金融发展——基于广义运输成本传导机制的检验[J].江西财经大学学报,2021(1):43-54.
- [9] 徐涛,张明.地区发展条件对轨道交通线路溢价效应的影响[J].城市问题,2016(9):48-57.
- [10] 陈婧,方军雄.高铁开通、经理人市场竞争与高管薪酬激励[J].财贸经济,2020,41(12):132-146.
- [11] 魏景赋,徐政,田文举.经济增长、能源消耗、金融发展对碳排放的影响——基于金砖四国的实证研究[J].重庆工商大学学报:社会科学版,2018,35(1):42-49.
- [12] TAMAZIAN A, CHOUSA J P, VADLAMANNATI K C. Does higher economic and financial development lead to environmental degradation: evidence from BRIC countries[J]. Energy Policy, 2009, 37(1): 246-253.
- [13] 刘冲,刘晨冉,孙腾.交通基础设施、金融约束与县域产业发展——基于“国道主干线系统”自然实验的证据[J].管理世界,2019,35(7):78-88.
- [14] 鲁靖,牛子昂,张雨.城市轨道交通与城市经济低碳转型实证研究[J].城市轨道交通研究,2024,27(1):11-16.
- [15] 付明卫,丛正龙.地铁开通与城市绿色全要素生产率[J].产业经济评论,2023(2):167-182.
- [16] 梁建英.探索更绿色、更智慧的轨道交通技术[J].城市轨道交通研究,2024,27(6):3.
- [17] 李中会,张思敏,王哲润,等.城市轨道交通产业协同创新投机行为治理——基于复杂网络博弈的仿真分析[J].科技和产业,2024,24(2):254-260.
- [18] 潘海啸,任春洋.轨道交通与城市公共活动中心体系的空间耦合关系——以上海市为例[J].城市规划学刊,2005(4):76-82.
- [19] 卢济威,于奕.现代城市设计方法概论[J].城市规划,2009(2):66-71.
- [20] 孙兴,刘熙.中国城市碳排放效率的时空演变及影响因素——基于异质性空间随机前沿模型[J].地理研究,2023,42(12):3182-3201.
- [21] 唐李伟,胡宗义,苏静,等.城镇化对生活碳排放影响的门槛特征与地区差异[J].管理学报,2015,12(2):291.
- [22] SHAHBAZ M, VAN HOANG T H, MAHALIK M K, et al. Energy consumption, financial development and economic growth in India: new evidence from a nonlinear and asymmetric analysis[J]. Energy Economics, 2017, 63: 199-212.
- [23] 王楠,杨少辉,付凌峰,等.中国主要城市轨道交通覆盖通勤空间特征研究[J].城市交通,2021,19(5):91-99.
- [24] 伍速锋.应用第一性原理思维探索未来城市交通变革[J].城市交通,2017,15(4):84-90.
- [25] 卢济威,于奕.现代城市设计方法概论[J].城市规划,2009(2):66-71.

Carbon Emission Reduction Effect of Urban Rail Transit Construction

YANG Jianguo¹, LIN Ruofei², QI Xiaobing¹, HUANG Junpei³, CHEN Shijun⁴

(1. Fuzhou Metro Collective Co. Ltd., Fuzhou 350001, China;

2. International College of Football, Tongji University, Shanghai 200029, China;

3. Department of Physical Education, Tongji University, Shanghai 200029, China;

4. Institute of Carbon Neutrality, Tongji University, Shanghai 200029, China)

Abstract: Green and low-carbon development is the theme of today's urban construction. Rail transit is an important transport infrastructure in cities, which affects urban transport carbon emissions. The impact of urban rail transport on urban carbon emissions was empirically examined. The results show that the construction of urban rail transport has a significant effect on the reduction of urban carbon emissions, and there is heterogeneity in the effect of urban scale. Urban rail transport has produced the "transport substitution" effect, increased new investment opportunities, increased green financial inputs, promoted green technological innovation, and thus reduced urban carbon emissions.

Keywords: urban rail transport; carbon emissions; financial constraints; transport substitution; green technological innovation