

地铁网络发展的碳减排效应研究

高子茗¹, 王园园²

(1. 东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110167; 2. 太原理工大学 马克思主义学院, 山西 晋中 030600)

摘要:在建设交通强国与实现“双碳”目标的背景下,文章关注地铁网络发展对区域碳减排的影响,通过整合地铁线路规划及站点开通时序数据构建年度城市地铁网络拓扑结构,并运用复杂网络分析方法测算站点中心度指标,建立地铁网络通达性量化体系。文章结合 2011—2023 年区县面板数据,考察地铁网络发展对人均碳排放的实际效应,研究发现:区县层级地铁网络通达性指标每提升 1 个单位,当地人均碳排放平均减少 0.908 吨。文章机制分析发现:在生活端,地铁网络通过引导居民低碳出行、降低家庭交通支出和优化消费结构,助力在生活领域中实现碳减排;在生产端,地铁网络发展推动产业空间重组,形成服务业集聚与工业疏解的优化布局,这一减排效应受到地方低碳规制、土地价差、产业集聚度、绿色技术创新与能源效率的协同强化。进一步分析发现,城际地铁建设通过功能疏解与网络扩展效应提升了中心城市的低碳效能。文章的研究可为“十五五”时期轨道交通规划优化提供决策参考,为构建交通、产业与生活协同的低碳治理体系提供理论支撑,并对推进新型城镇化和绿色发展具有重要实践启示。

关键词: 地铁网络; 碳排放; 交通基础设施; 绿色发展

中图分类号: F572 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-9952(2026)06-0064-15

DOI: 10.16538/j.cnki.jfe.20260526.401

一、引言

在全球气候变化日益严峻、绿色低碳发展加速推进的背景下,城市作为碳减排的核心领域,其交通基础设施与空间结构的优化成为实现“双碳”目标的核心议题。“十五五”规划进一步强调,“以碳达峰碳中和为牵引,以健全生态文明制度体系为保障,协同推进降碳、减污、扩绿、增长”。当前,中国城镇化进程持续加快,特大城市群和都市圈加速形成,人口与各类资源不断向中心区域集聚,碳排放压力较大,所以交通方式绿色低碳转型成为必然选择。地铁网络作为绿色交通的核心载体,通过优化产业空间布局、引导居民低碳出行,对生产组织、生活方式、生态环境产生深远影响(邵帅等, 2024)。本文通过构建地铁空间链式拓扑网络,探讨站点通达性提升对地区碳排放的影响。本文的结论不仅为评估地铁网络发展及其经济影响提供理论和方法参考,还对城市交通格局的优化及“双碳”目标的实现具有重要的实践指导意义。

地铁网络的快速扩张改变了城市的空间形态与功能布局。现有研究主要集中在以下几个方面:一是经济效应,有学者考察了地铁对产业布局、资源配置的影响(范子英等, 2018; 冯国强和王天乐, 2024);二是社会效应,有学者研究了地铁在缩短居民通勤时间、完善城市公共服务、

收稿日期: 2025-12-26

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金(N25WPY016); 山西省哲学社会科学规划青年项目(2025QN052)

作者简介: 高子茗(2000—), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学工商管理学院副教授, 硕士生导师;

王园园(1996—)(通讯作者), 女, 山西高平人, 太原理工大学马克思主义学院讲师。

优化城市空间结构等方面的重要作用(王岳龙和袁旺平, 2023; 冯国强等, 2025); 三是环境效应, 有学者研究了地铁在降低交通领域碳排放、改善城市空气质量中的核心作用(邵帅等, 2024)。然而, 现有研究较多关注直接减排层面, 尚未深入探讨地铁空间网络演化对碳排放的影响和传导机制等问题。同时, 现有研究较少深入分析地铁的独特价值。相较于其他公共交通, 地铁不仅具有客运量大、节能环保、准时高效等优势, 还对周边产业布局、TOD(Transit-Oriented Development)建设具有积极影响, 具有区别于其他公共交通方式的独特机制(Su 等, 2022), 但现有研究尚未把此机制与碳减排效应联系起来。

在研究方法与研究对象上, 现有文献多采用双重差分法、断点回归等进行分析(邵帅等, 2024), 且研究对象局限于单一城市。这种做法难以反映地铁网络在不同城市、不同发展阶段的异质性影响, 限制了研究结论的有效性, 而且该研究模式忽视了地铁站点之间的差异化通达程度, 未能揭示地铁网络化发展对经济社会及碳排放影响的作用。

本文运用社会网络分析法, 通过整合地铁网络拓扑特征与多层级经济社会数据构建站点接近中心度, 以此衡量地铁网络通达性, 从生产端和生活端分析地铁网络发展对碳减排的影响机制。本文的边际贡献体现在以下三个方面: 其一, 拓展了地铁经济社会效应与碳减排相关领域的研究边界。本文以全国开通地铁的城市作为研究样本, 涵盖不同城市规模、发展阶段与网络特征, 能够更全面地探析地铁网络与碳减排之间的内在逻辑, 从而丰富了交通领域碳减排影响因素的研究, 为理解城市交通与碳排放的内在关联提供了新的经验证据。其二, 创新了地铁相关研究的指标测算方法。本文采用社会网络分析方法构建地铁网络通达性指标, 更精准、全面地刻画地铁网络的空间布局、换乘便捷度与运行效率, 有效弥补传统指标测算的不足, 为后续研究提供方法借鉴。其三, 通过构建多层次实证分析模型, 讨论地铁网络在生活端和生产端的作用机制。本文的研究结论对完善城市绿色交通体系规划、优化低碳导向的空间治理具有重要政策启示。

二、理论分析

(一)理论框架

本文假设地区碳排放总量 C 由生产端碳排放 C_p 和生活端碳排放 C_h 两部分构成。地铁网络发展 S 通过影响居民出行选择、消费结构以及产业区位选择对生产端和生活端碳排放产生作用。

家庭层面的生活碳排放可分解为交通出行碳排放与非交通消费隐含碳排放。本文设家庭 i 的总消费支出为 Y_i , 交通支出为 T_i , 非交通消费支出为 $Y_i - T_i$ 。将非交通消费进一步区分为生存型和发展型消费, 设生存型消费占比为 $1 - \theta_i$, 发展型消费占比为 θ_i 。设单位交通支出的碳排放强度为 α , 其数值随出行方式变化。设单位生存型、发展型消费的碳排放强度分别为 β_s 和 β_d , 由于两者通常不直接消耗化石燃料和电力, 满足 $\beta_d < \beta_s < \alpha$ 。生活端总碳排放可表示为:

$$C_h = \sum_i \{ \alpha(S) T_i(S) + \beta_s [1 - \theta_i(S)] [Y_i - T_i(S)] + \beta_d \theta_i(S) [Y_i - T_i(S)] \} \quad (1)$$

地铁网络发展通过两条路径影响 C_h : 一是地铁网络发展及其绿色低碳属性降低居民出行直接成本, 即 $dT_i/dS < 0$ 和 $d\alpha/dS < 0$, 此为交通替代效应; 二是节约的交通成本相当于家庭实际可支配收入的增加, 依据消费理论, 这将导致消费结构从生存型向发展型转型, 此为消费升级效应。对 S 求导, 可得生活端边际减排效果:

$$\frac{dC_h}{dS} = \sum_i \{ \alpha \frac{dT_i}{dS} + T_i \frac{d\alpha}{dS} - (\beta_s - \beta_d) \frac{d\theta_i}{dS} (Y_i - T_i) - [\beta_s (1 - \theta_i) + \beta_d \theta_i] \frac{dT_i}{dS} \} \quad (2)$$

由于 $dT_i/dS < 0$ 、 $d\alpha/dS < 0$ 和 $d\theta_i/dS > 0$ ，且非交通消费的平均碳强度 $\beta_s(1-\theta_i) + \beta_d\theta_i$ 低于交通碳强度 α ，故公式(2)为负，存在 $dC_h/dS < 0$ 。

生产端碳排放由工业产出 Y_{ind} 和服务业产出 Y_{ser} 构成，短期内设定 $\bar{Y} = Y_{ind} + Y_{ser}$ 。生产端碳排放为：

$$C_p = e_{ind}(A_s) \times Y_{ind} + e_{ser} \times Y_{ser} \quad (3)$$

其中， e_{ind} 和 e_{ser} 分别为工业和服务业的单位产出碳排放系数，且 $e_{ind} > e_{ser}$ 。工业碳排放受工业集聚度 A_s 的影响，假设 $de_{ind}/dA_s < 0$ ，即工业企业向专业园区集中时，企业间可共享能源供应、污染治理设施，使得单位产出能耗与排放下降，此为集聚经济带来的减排效应。因此，地铁网络发展通过改变要素流动成本和产业区位选择来影响产业结构和集聚度。

对 S 求导，可得生产端边际减排效果：

$$\frac{dC_p}{dS} = \frac{de_{ind}}{dA_s} \times \frac{dA_s}{dS} \times Y_{ind} + (e_{ind} - e_{ser}) \frac{dY_{ind}}{dS} \quad (4)$$

地铁网络发展促使工业向郊区迁移，即 $dA_s/dS > 0$ 。服务业因交流成本降低而向中心区集聚，产业结构呈现服务化趋势，即 $dY_{ind}/dS < 0$ 。由于公式(4)两项均为负，可得 $dC_p/dS < 0$ 。综合生产端和生活端的分析结果，本文发现地铁网络通达性提升有助于降低碳排放。

(二)机理分析

根据上述理论框架可知，地铁网络对碳排放的影响并非简单替代关系，而是通过影响居民出行选择以及重构产业空间布局对生产端和生活端产生影响。网络通达效率提升意味着站点与全网其他站点的平均乘距缩短、换乘效率提高，这种网络属性的优化将从多个层面产生碳减排效应。

1. 网络拓扑结构优化的减排效应

地铁网络作为具有复杂拓扑结构的有机系统，其减排效应主要来源于结构的优化。当某区县各站点通达效率普遍提升时，该区域在整个网络中的时空压缩效应增强，这种拓扑优化将从三个相互关联的层面产生碳减排效应。第一，影响居民出行选择，实现交通领域的直接减排。地铁网络通达效率的提高不仅缩短了单次出行的距离，而且降低了整个网络的换乘次数与等待时间，从而提升了地铁系统的整体吸引力(王学渊等, 2020)。随着网络通达性的改善，地铁出行成本下降，居民出行方式的选择将逐渐从私家车、出租车等转向地铁，这种交通方式的替代效应构成了碳减排最直接的实现路径。第二，优化生产要素配置，推动产业结构低碳化演进。地铁网络的完善极大提高了劳动力的流动效率，企业也可以拓展更大规模的消费市场，吸纳更为丰富的人才资源(肖挺, 2022)。这种要素流动效率的提升，一方面为服务业在中心城区集聚创造了条件；另一方面，也为制造业企业向城市外围的疏解与再集聚提供了可能(代昀昊等, 2023)。这种由要素流动驱动的产业空间重组推动了产业结构向低碳化方向转变，是生产端实现结构性减排的关键。第三，强化网络外部性，加速绿色知识与技术的扩散。密集且高效的地铁网络增加了人们面对面交流的机会，有力推动了绿色技术、低碳管理经验等依赖人际互动的隐性知识在城市内部扩散(邵帅等, 2019)。因此，地铁网络不仅是人流、物流的通道，更是承载绿色创新活动、加速知识扩散的空间枢纽(肖挺, 2022; 代昀昊等, 2023)。创新人才在城市内部的自由流动为知识跨界融合与再创造提供了现实基础，而这种由网络外部性所激发的创新活力进一步助推全社会绿色转型。基于此，本文提出以下假说：

假说 1：地铁网络发展能够产生碳减排效果。

2. 生活端机制：交通替代与消费升级的双重路径

地铁网络发展对居民生活碳排放的影响体现为两条相互作用的路径，即交通方式替代与消

费结构升级。居民在选择出行方式时,会综合比较货币成本、时间成本、舒适性、可靠性以及目的地可达性等。地铁网络的通达性降低了居民的出行成本,使得乘坐地铁的效用上升(代昀昊等, 2023; 何慧华等, 2025)。当越来越多的居民发现地铁比私家车更快捷、比出租车更经济、能够覆盖更多目的地时,交通出行方式选择便发生转变。这种替代效应直接减少了高碳出行的次数,从而降低了碳排放。

消费结构升级的减排机制同样重要。交通支出的节约相当于家庭实际收入增加。依据消费经济学原理,收入增加将促使家庭将更多预算用于发展型消费,进而减少生存型消费的相对比重(吕洋和高子茗, 2024)。生存型消费主要包括食品、衣着、居住等项目,这些消费的生产和运输过程往往伴随相对较高的碳排放。食品消费涉及农业生产、食品加工、冷链物流等环节,衣着消费涉及纺织印染等高耗能产业,居住消费涉及建筑材料和家庭能耗。发展型消费主要包括文教娱乐、医疗保健等服务类消费,其碳排放相对较低。教育、文化、医疗等服务以人力资本投入为主,物质消耗较少,因此碳排放显著低于实物消费。消费结构从生存型向发展型升级意味着家庭总消费的平均碳排放下降。此外,地铁网络本身也创造了新的消费场景,站点周边的商业综合体、生活服务设施、文化娱乐场所的出现进一步引导居民消费向低碳化、服务化方向转型(冯国强和王天乐, 2024)。居民在通勤途中会进行购物、餐饮、娱乐等消费活动(Mei 等, 2024; Wang 等, 2024)。因此,地铁网络的发展通过节约交通成本、释放消费潜力、优化消费结构间接降低了生活碳排放。基于上述分析,本文提出以下假说:

假说 2: 地铁网络发展通过替代高碳出行方式、优化消费结构,在生活端降低碳排放。

3. 生产端机制: 产业空间重构与结构优化

地铁网络对生产端碳排放的影响源于其对产业区位结构的优化,这一过程可从服务业集聚与工业疏解两个维度阐释。服务业集聚机制主要是由于生产性服务业依赖面对面交流与信息溢出效应。地铁网络通过缩短通勤时间、降低交流成本,促使金融、设计、咨询等服务业向换乘枢纽周边集聚,形成专业化服务业集群(朱洪平等, 2021; 冯国强和王天乐, 2024),这不仅提升服务业生产效率,还通过产业关联带动本地服务业占比上升。由于服务业单位产出的碳排放低于工业,产业结构服务化直接降低生产端平均碳排放强度。同时,绿色技术与低碳管理经验在服务业集聚区更易传播与应用(Wang 等, 2024),这进一步强化碳减排效果。

工业疏解机制体现了地铁网络的空间筛选功能。地铁通达性提升使郊区与中心城区的连通更为紧密,工业企业可向土地价格较低、环境规制相对宽松的郊区迁移。这一过程包含两层效应:一是直接的迁移效应,中心城区高地价和高环境成本迫使低端制造业迁移,同时可以吸引服务业和高技术产业的企业,实现空间置换;二是集聚的规模效应,当工业企业向郊区专业园区集中时,企业间可共享能源供应、污染治理设施,实现单位产出能耗与排放下降,并产生技术溢出效应(Wang 等, 2024)。这种集聚经济带来的减排效应与服务业集聚的产业结构效应形成互补关系,共同推动生产端绿色转型。

在此基础上,地铁网络的生产端减排效应与地方低碳治理、土地市场机制、产业组织形态、技术创新能力等因素形成协同关系。从制度激励维度看,严格的低碳规制可以提高高碳产业本地运营成本,强化地铁网络的引导作用,同时使得中心区服务业采用更先进的节能技术,进而放大碳减排效果(宋弘等, 2019)。从市场激励维度看,土地价差是驱动工业向郊区迁移的核心市场因素。地铁开通引发的资本化效应扩大了市中心与郊区地价差异,高地价对工业形成“挤出”压力,激励工业向郊区转移。地铁为工业外迁提供通勤支撑,土地价差则提供市场激励,二者协同加速空间重构进程(饶映雪等, 2024)。从产业组织维度看,产业地理集中度直接影响集聚经

济的碳减排效应。当地铁网络引导同类企业集中时,共享污染治理设施、绿色技术外溢等效应将发挥作用,产业集中度越高,共享机制和溢出效应越明显,单位产出的碳排放越低(冯国强和王天乐,2024)。产业集中度既是地铁碳减排效应的结果,也是其进一步强化的条件,形成正向反馈。从技术创新维度看,绿色专利水平与能源效率构成地铁减排效应的技术基础。地铁网络有利于促进绿色专利传播与应用,促进技术研发、知识扩散,从而降低碳排放(邵帅等,2019)。另外,高效企业的人员可以通过地铁出行传播工作经验与节能技术,形成溢出效应,进一步增强地铁碳减排效果。基于此,本文提出以下假说:

假说 3: 地铁网络发展通过重构产业空间布局,在生产端降低碳排放,且这一效应受制度、市场、技术因素共同影响。

三、研究设计

(一)数据来源

本文研究的时间区间为 2011 年至 2023 年。地铁站点名称、规划线路、开通时间、所在区县等信息从中国城市轨道交通系统百科、中国城市轨道交通协会、轨道交通网公开数据综合整理而得。本文结合网络爬虫和手工整理的方式构建各城市各年份的地铁网络数据。

地区经济与社会发展状况变量所用基础数据包括多个层面:区县碳排放数据来源为 EDGAR 提取的碳排放信息,涉及能源消耗以及工业、交通、建筑等多领域的排放;地区经济社会数据,如区县层面的地区生产总值、年末总人口、规模以上工业企业数等均来源于《中国统计年鉴》《中国区域统计年鉴》;路网密度数据来源于 OSM 官网,经过 ArcGIS 提取和处理得到;地方轨道交通管理条例出台信息来源于北大法宝网;高程数据来源于中国地理国情监测云平台;省级轨道交通客运量、私人载客汽车拥有量、出租车客运量数据来源于《中国交通运输统计年鉴》《中国汽车工业年鉴》。

本文机制分析部分使用的家庭层面变量来源于“中国住户收入调查”(CHIP 数据库)中 2013 年、2018 年数据。各年调查样本按照东部、中部和西部进行分层抽样的方式,从国家统计局城乡一体化常规住户调查大样本库中随机抽取而得。为构建混合截面数据集,本文参考罗楚亮等(2021)的方法对各年调查问卷进行综合整理得到。在指标构建方面,本文通过家庭总收入、总消费、各细分项目消费等金额指标来统计家庭成员数量,并根据问卷的回答获得家庭成员是否有在校学生、最高受教育程度等指标。^①为进行后续回归分析,本文保留家庭总消费不小于 1000 元,其他变量不存在缺失的家庭样本。两个年份的有效样本数共 27487 个,2013 年、2018 年样本数分别为 12017 个和 15470 个。

(二)指标构建与模型设置

1. 地铁网络发展和节点中心性相关指标

本文采用复杂网络分析方法构建地铁系统的中心性测度体系。将下标 c 定义为城市,下标 m 定义为区县,下标 t 定义为年份,下标 i 定义为截至 t 年已经开通的地铁站点。针对“城市—年份”数据单元内各个路线各个站点,将线路内相邻站点(上下站)设定为 1,不直接相邻则为 0,便可将各“城市—年份”数据单元实际运营的地铁线路图转化为站点邻接矩阵。

^① 具体问题是“您 2013 年末或 2018 年末的就业或在学情况为:(1)就业(包括务农、离退休后再就业);(2)机关事业单位离退休人员;(3)企业及其他单位退休人员;(4)在校学生;(5)失业或待业;(6)家务劳动者;(7)在产假或哺乳假的妇女;(8)在长病假;(9)其他不工作、不上学成员”以及“受正规教育的年数”。

在此基础上,本文获取各地铁站点的接近中心度、点度中心度、中介中心度。其中,接近中心度反映特定站点与其他站点之间的最少乘车站数;点度中心度测算网络中特定站点与其他站点直接连接的路径数量;中介中心度可以表示特定站点在网络中的桥梁作用。

本文定义站点 i 和站点 j 间的距离 d_{ij} 为最少乘车站数。假设“城市—年份”数据单元内有 n 个站点,所有其他站点到站点 i 的平均距离公式为:

$$l_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (5)$$

站点 i 的接近中心度定义为平均距离的倒数,具体公式为:

$$CC_i = \frac{n-1}{\sum_{i \neq j} d_{ij}} \quad (6)$$

在地铁空间拓扑网络中,站点接近中心度表示节点通达效率。数值越高的站点通常位于网络结构的核心区位,具体包括空间布局上更接近线路交会区域以及在网络层级中处于中心位置、具有换乘枢纽功能的区域。

点度中心度通过测度站点 i 在地铁网络中直接相邻的站点数量来衡量其在网络中的局部中心性,具体公式如下:

$$DC_i = \sum_j m(i, j) \quad (7)$$

其中,如果站点 i 和站点 j 相邻,则 $m(i, j) = 1$, 否则 $m(i, j) = 0$ 。

中介中心度用其他站点间的最少乘车路径中需通过站点 i 的比例来衡量,表明站点 i 在地铁网络中的相对重要性,具体公式为:

$$BC_i = \sum_{s \neq i \neq j} \frac{\sigma(i)_{sj}}{\sigma_{sj}} \quad (8)$$

其中, σ_{sj} 为站点 s 到站点 j 的最少乘车路径数目; $\sigma(i)_{sj}$ 为其中经过站点 i 的数目。

基于上述站点信息,以接近中心度为核心,本文构建区县地铁网络通达程度指标:

$$Subway_m = \sum CC_i \quad (9)$$

2. 研究设计

考虑到地铁网络发展对碳排放的影响,本文构建如下回归模型:

$$CO2_{mt} = \alpha + \beta Dis_Subway_{mt} + X_{mt} + \mu_m + \mu_t + \mu_{pt} + \varepsilon_{mt} \quad (10)$$

本文考虑到地铁发展主要服务于居民个体,将被解释变量 $CO2_{mt}$ 设定为人均碳排放量,采用区县二氧化碳排放总量除以年末人口总数衡量,单位为吨/人;解释变量 $Subway_{mt}$ 为区县地铁网络通达程度;本文控制各类固定效应,包括年份固定效应 μ_t 、区县固定效应 μ_m 和省份与年份交互固定效应 μ_{pt} ; X_{mt} 为一系列表示地区特征的控制变量,主要包括人均地区生产总值、第二产业增加值占比、规模以上工业企业数、出口总额、人口密度、路网密度; ε_{mt} 为随机误差项;系数 β 是本文关注的重点,预期显著为负。各变量的描述性统计结果见表 1。

表 1 主要指标的描述性统计

变量	说明	样本量	平均数	标准差	最小值	最大值
$CO2_{mt}$	人均碳排放量(吨/人)	34 793	9.661	21.330	0.163	723.500
$Subway_{mt}$	区县汇总的接近中心度	34 793	0.053	0.303	0	8.476

续表 1 主要指标的描述性统计

变量	说明	样本量	平均数	标准差	最小值	最大值
$\ln\text{pergdp}_{mt}$	人均地区生产总值(元/人)的对数	34 793	10.510	0.754	7.932	17.100
Industrial_{mt}	第二产业增加值占GDP比重	34 793	0.413	0.161	0.011	0.995
$\ln\text{number}_{mt}$	规模以上工业企业数(个)的对数	34 793	3.987	1.305	0.693	8.367
$\ln\text{export}_{mt}$	出口额(美元)的对数	34 793	9.154	1.529	0.693	17.800
Density_{mt}	人口密度(百人/平方公里)	34 793	6.671	24.290	0.001	500
Road_{mt}	路网密度(公里/平方公里)	34 793	0.973	1.826	0.014	73.490

四、实证分析结果

(一)基准回归结果

表 2 展示了基准回归结果。根据回归结果，核心指标 Subway_{mt} 持续显著为负。列(4)结果显示，区县层面的地铁网络通达性每提升 1 单位，当地人均碳排放总量平均减少 0.908 吨。无论是新建地铁站点、提升既有站点通达性，还是构建复合型换乘网络，均能有效促进地铁网络优化升级。基于基准回归结果，本文构建了地铁网络发展的碳减排理论框架，涵盖消费、生产和交通三个维度。从生产端看，地铁网络通达性提升通过产业地理重构效应，推动高碳工业外迁与低碳服务业协同发展，形成郊区规模经济减排与中心结构优化减排的空间分工格局；从生活端看，地铁运输的碳排放降幅显著高于传统交通工具，地铁网络能够将交通成本节约转化为服务消费升级，说明 TOD 商业生态系统具有碳减排效果。因此，通过完善服务业发展机制、健全现代化产业体系以及推进高效便捷的地铁网络建设均有助于实现“双碳”目标。

表 2 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	CO2_{mt}			
Subway_{mt}	-1.521*** (0.249)	-1.162*** (0.254)	-1.221*** (0.267)	-0.908*** (0.285)
控制变量			控制	控制
区县固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
省份和年份固定效应		控制		控制
样本量	34 793	34 793	34 793	34 793
R^2	0.893	0.899	0.894	0.900

注：本文检验发现被解释变量的方差膨胀因子(VIF)均值为1.32，表明多重共线性问题不会产生较大干扰；括号内为聚类稳健标准误，聚类到城市层面；***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平；下表同。

(二)内生性问题处理^①

本文采用工具变量估计法处理内生性问题。本文设定了两个工具变量：其一，构建基于地方轨道交通管理法规是否出台的虚拟变量 Regulation_{ct} ，若城市 c 在年份 t 及之后出台了相关规定，则取值为 1，否则为 0。在相关性方面，地方轨道交通管理规定通常涵盖规划、审批、验收与运营安全等环节，明确了项目的建设标准与流程，有助于降低制度性交易成本，为新建线路报批和既有线路延伸提供支持(董微和林雄斌, 2024)，从而推动地铁网络扩张。随着地铁网络复杂度的提高，城市面临的运营安全风险和部门协调难度也随之增加，地铁网络发达的城市将更有

① 限于篇幅，省略图表分析结果，留存备案。

动力出台专项法规,以规范运营秩序、明确责任边界。在排他性方面,地方轨道交通管理规定的核心内容,如工程建设标准、设施保护、客运服务与安全责任划分等属于专业技术领域,其目标并非规范企业生产活动或居民消费行为,也未直接涉及高耗能产业准入、能源价格调控或机动车限行等措施,故而满足外生性要求。其二,参考孙传旺等(2019)、陈太明等(2023)的思路,本文构建各区县高程标准差的倒数 $Elevation^{-1}_m$ 与区县是否成为人口稠密区的滞后一期虚拟变量 Dum_scale_m 的交互项。^①在相关性方面,该工具变量组成部分中,高程标准差直接反映城市地形复杂程度。高程差异大的地理条件会显著增加地铁施工的技术难度和建设成本,从而制约地铁网络的扩张。通过取倒数处理,该变量与地铁网络通达程度正相关。滞后一期人口稠密区虚拟变量反映地铁规划对人口集聚的响应机制(肖挺, 2021),即政府倾向于优先在已形成人口集聚的区域建设地铁(Zhang, 2020)。在排他性方面,自然地理属性具有高度外生性,与当代经济社会活动和碳排放无直接关系。由于地形、人口密度可能通过影响城市形态、集聚效应间接作用于经济活动,本文通过以下设计控制其他传导路径:第一,进行倒数处理,即将地理变量转换为建设与扩展难度的代理指标,聚焦其对地铁网络建设的约束,而非反映区域经济禀赋;第二,构建交互项,即地理变量仅在人口稠密区县产生影响,排除特殊地形地貌对经济社会发展的直接影响;第三,滞后一期的设定方式排除了当期经济活动的反向因果干扰;第四,基准回归控制了区县层面经济指标和各类固定效应。根据回归结果,模型不存在弱工具变量和过度识别问题。此外,本文还通过替换核心解释变量与被解释变量、改变样本选择、排除其他政策干扰等方法进行稳健性检验,结论依然成立。

(三)异质性分析^②

首先,本文考察经济规模产生的效应差异。本文以区县地区生产总值的年度中位数为界限,将全部样本划分为经济发展规模较高组与规模较小组。回归结果显示,在经济发展规模较小的地区, $Subway_m$ 在统计上显著为负;在经济发展规模较大的地区,该系数不显著。这一差异可从以下两个层面加以阐释:其一,边际减排空间存在差异。经济规模较大的城市通常已建成相对成熟的地铁网络,站点密度与网络通达性均处于较高水平,此时进一步提升网络通达性所能获得的边际改善空间较为有限。规模较小的城市大多处于地铁网络建设的初期或成长期,新开通站点或延伸线路对区域整体通达性的提升幅度更为显著。其二,碳排放来源的复杂性存在差异。大城市的碳排放结构呈现高度多元化特征,工业、建筑、交通及居民生活等各个部门均贡献显著,地铁的减排效应容易被其他因素影响,而规模较小城市的碳排放结构相对单一。

其次,本文考察居民生活能源消耗水平所产生的效应差异。本文以区县居民生活用电量的年度中位数为界限,将样本划分为用电量消耗较高组与消耗较低组。根据回归结果,在用电量消耗较低的地区, $Subway_m$ 显著为负;在用电量消耗较高的地区,该系数不显著。这是因为在用电量消耗较高的地区居民对私家车的依赖较强,且整体生活方式呈现高碳特征,这些行为难以通过地铁通达性的优化而直接改变。用电量消耗较低地区的居民尚未形成高碳生活方式,地铁通达性改善后,能有效吸引居民从私家车、出租车等高碳出行转向地铁,产生明显的替代效应。

再次,从生产端考察产业结构所带来的效应差异。本文以第二产业增加值占比的年度中位数为界限,将样本划分为高工业占比组与低工业占比组。根据回归结果,在高工业占比地区, $Subway_m$ 系数显著为负;在低工业占比地区,该系数不显著。这是因为高工业占比地区产业结构偏重,工业碳排放基数较大,地铁网络通过推动工业向郊区迁移,从而产生显著的结构性减排效应。低工业占比地区以农业为主导,即便地铁建设改善了区域交通条件,减排效果较小。

① 人口稠密区定义为超过 100 万人口的区县。

② 限于篇幅,省略图表分析结果,留存备案。

最后, 检验城市空间形态对地铁减排效果的影响。本文以区县多中心度的年度中位数为界限, 将样本划分为高多中心组与低多中心组。多中心度的测算参考方颖与白秀叶(2022)、刘秉镰与高子茗(2023)的方法, 本文利用 ArcGIS 9.2 软件统计各年度各区县的经济活动区块数量。根据回归结果, 在多中心程度较低的地区, $Subway_{mt}$ 显著为负; 在多中心程度较高的地区, 该系数并不显著。这是因为低多中心空间结构意味着经济活动高度集中于少数区域, 人口与产业密度较高, 这为地铁网络发挥规模经济与网络效应提供了有利条件。地铁线路能够高效覆盖主要活动区域, 单位运营成本较低, 从而产生突出的碳减排效果。高多中心地区经济活动空间分布较为分散, 这使得地铁投资与运营效率较低, 因此碳减排效果较小。

五、机制检验

(一)生活端机制

1. 家庭交通支出缩减、消费结构优化和碳排放

本文为了探究地铁网络发展在生活端的作用机制, 检验其是否有助于缩减交通支出并优化家庭消费结构, 从而减少消费碳排放, 构建如下家庭层面的识别方程:

$$Y_{ht} = \alpha + \beta' Dis_Subway_{mt} + X_{ht} + X_{mt} + X_{ct} + \mu_c + \mu_t + \mu_{pt} + \varepsilon_{ht} \quad (11)$$

其中, 下标 h 表示家庭, 被解释变量为家庭消费碳排放 $LnHouse_CO2_{ht}$ 、消费结构系数 $Structure_{ht}$ 、交通通信消费水平 $Lntraffic_{ht}$ 。在指标构建方面, 根据程名望和张家平(2019)、Hu 等(2023)的研究, 本文基于 CHIP 问卷披露信息, 将发展型消费项目设置为文教娱乐消费与医疗保健消费, 进而将二者之和与总消费水平相除获得消费结构系数。

本文参考童玉芬和周文(2020)、王军等(2022)的研究, 用 CHIP 数据中公开的 8 类细分消费项目分别乘以其碳排放系数并进行加总来衡量家庭消费碳排放量, 公式如下:

$$House_CO2_{ht} = \sum_{s=1}^8 (CI_s \times Cost_{sh}) \quad (12)$$

其中, CI_s 为第 s 类消费项目的碳排放系数; $Cost_{sh}$ 为家庭 h 在年份 t 的第 s 类消费支出, 包括食品烟酒、衣着、居住、生活用品及服务、交通通信、教育文化娱乐、医疗保健、其他用品和服务; CI_s 计算方法为: 第 s 类行业经居民生活能耗按行业能耗占比分摊后, 每单位增加值的隐含碳排放强度; 家庭层面控制变量 X_{ht} 包括家庭消费总量、收入总量、成员规模、债务总量、是否有在校学生、是否有残疾成员、成员最高受教育程度; 核心解释变量、区县层面控制变量、固定效应设置方法与基准回归方程(10)一致; ε_{ht} 为误差项; 本文预期当被解释变量为家庭消费碳排放和交通消费量时, β 显著为负; 被解释变量为消费结构时, β 显著为正, 即地铁网络发展将有助于减少居民交通消费支出, 进而减少家庭消费碳排放。

表 3 列示了公式(11)的回归结果。在列(1)和列(3)中, $Subway_{mt}$ 显著为负, 在列(2)中, $Subway_{mt}$ 系数显著为正。机制检验结果表明, 地铁网络发展对居民消费模式转型和碳减排具有积极影响。区县层面的地铁网络通达性每提升 1 单位, 家庭交通支出平均缩减约 3%, 消费结构系数平均提升约 1%, 表明地铁对私人交通的替代效应以及家庭将节约的成本转向消费升级。这种结构性调整为碳减排提供了新路径, 其原因在于发展型消费相较其他消费具有更低的碳排放水平, 而且地铁具有正外部性, 从而使得家庭碳排放平均下降 2.9%。这说明地铁网络发展节约了居民的交通成本, 升级了居民的消费结构, 并促进居民出行向低碳转型。

表 3 机制检验:家庭消费碳排放和交通支出缩减

	(1)	(2)	(3)
变量	Lntraffic_{it}	Structure_{it}	LnHouse_CO2_{it}
Subway_{mt}	-0.030* (0.017)	0.010** (0.004)	-0.029** (0.014)
控制变量	控制	控制	控制
区县固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
省份和年份固定效应	控制	控制	控制
样本量	27 487	27 487	27 487
R^2	0.771	0.157	0.451

2. 居民绿色出行和交通方式转变

为了探究地铁网络发展是否能够在生活端影响居民交通出行选择,本文分别以轨道交通客运量 Tr_sub_{mt} (单位:百万人次)、出租车客运量 Tr_taxi_{mt} (单位:百万人次)、私人载客汽车拥有量 Tr_car_{mt} (单位:万辆)为核心解释变量,^①并将三者分别纳入基准方程进行检验。有私人驾车出行需求的居民会被相对便宜、环保的公共交通出行方式所吸引。出租车、私人汽车等相对高碳的出行方式将被替代。在表 4 列(1)中, Subway_{mt} 系数显著为正;在列(2)中, Tr_sub_{mt} 系数显著为负;在列(3)和列(5)中, Subway_{mt} 系数均显著为负;在列(4)和列(6)中, Tr_taxi_{mt} 和 Tr_car_{mt} 系数均显著为正。上述结果表明地铁网络发展通过双重路径来实现交通碳减排效应:一方面,地铁通达性通过规模效应降低居民单位出行能耗,每增加 1 单位通达性可吸纳 175.7 万人次的轨道出行需求,这是对高碳交通方式的直接替代;另一方面,其产生的网络外部性改变了居民出行选择偏好,使出租车选择和私家车使用分别减少 80.6 万人次和 2.224 万辆,验证了居民出行成本降低和低碳交通模式转换的作用机制。

表 4 机制检验:居民绿色出行和交通方式转变

	(1)	(2)		(3)	(4)		(5)	(6)
	轨道交通客运量			出租车客运量			私人载客汽车	
变量	Tr_sub_{mt}	$CO2_{mt}$	变量	Tr_taxi_{mt}	$CO2_{mt}$	变量	Tr_car_{mt}	$CO2_{mt}$
Subway_{mt}	1.757* (0.945)	-0.885*** (0.289)	Subway_{mt}	-0.806*** (0.201)	-0.728*** (0.278)	Subway_{mt}	-2.224*** (0.488)	-0.370 (0.263)
Tr_sub_{mt}		-0.013*** (0.003)	Tr_taxi_{mt}		0.224*** (0.052)	Tr_car_{mt}		0.242*** (0.040)
控制变量	控制	控制	控制变量	控制	控制	控制变量	控制	控制
区县固定效应	控制	控制	区县固定效应	控制	控制	区县固定效应	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	年份固定效应	控制	控制	年份固定效应	控制	控制
省份和年份固定效应	控制	控制	省份和年份固定效应	控制	控制	省份和年份固定效应	控制	控制
样本量	34 793	34 793	样本量	34 793	34 793	样本量	34 793	34 793
R^2	0.986	0.900	R^2	0.998	0.900	R^2	0.993	0.900

(二)生产端机制

1. 服务业邻近发展与产业结构优化

地铁网络通过改变城市内部时空距离对服务业和工业产生差异化的空间重塑效应。对于

① 省份层面数据按照区县 GDP 比重进行加权。

服务业, 地铁网络显著降低了面对面交流的时间成本与知识溢出的空间摩擦成本, 促使金融、法律、设计等生产性服务业向换乘枢纽节点集聚, 产生创新溢出效应; 同时, 便民商业、生活服务等业态通过共享客流实现规模经济(朱洪平等, 2021)。对于工业制造业, 地铁网络的空间筛选效应加速了高能耗企业向城市外围迁移, 有助于在郊区形成专业化产业园区, 通过集聚经济实现单位能耗降低与环境治理的规模效应。这一双重过程本质上是城市产业结构绿色化升级的空间表现。

表 5 机制分析: 服务业邻近发展与产业结构优化

	(1)	(2)
变量	第三产业从业人员数	第二产业从业人员数
$Subway_{it}$	1.277** (0.513)	-0.129 (0.194)
控制变量	控制	控制
区县固定效应	控制	控制
年份固定效应	控制	控制
省份和年份固定效应	控制	控制
样本量	34 793	34 793
R^2	0.867	0.939

表 5 的回归结果为上述理论逻辑提供了经验证据。列(1)结果显示, 区县地铁的网络通达性每提升 1 个单位, 第三产业从业人员数量显著增加 1.277 万人, 表明地铁网络发展推动服务业本地集聚。列(2)中 $Subway_{it}$ 对第二产业从业人员的影响为负但不显著, 说明地铁网络并未直接导致工业从业人员同步增长, 反而可能产生“挤出效应”。这证明地铁网络对不同产业具有异质性作用, 即服务业因依赖面对面交流与消费市场而向站点周边集聚, 工业则因土地成本与环保约束而向外围迁移。

2. 制度激励、市场机制与技术创新的协同强化

产业结构重塑是生产端碳减排的前提。地铁网络的碳减排效应能否充分释放取决于其与地方低碳治理、市场机制、产业组织、技术创新等因素的动态交互情况。本文检验地铁网络的通达性与五类调节变量的联合效应, 结果汇总于表 6。可以发现, 所有交互项系数均显著为负, 表明地铁网络与这些因素之间存在双向增强机制, 即地铁发展增强了各因素的减排效果, 而这些因素反过来又为地铁碳减排效应的充分发挥提供了制度、市场、组织与技术基础。

低碳规制与土地价差构成了放大地铁碳减排效应的外部驱动机制, 其核心在于地铁发展与环保制度激励、土地市场力量之间的双向强化。参考佟岩和李鑫(2024)的方法, 本文构建地方政府低碳规制强度 $Policy_{it}$, 即基于各地政府工作报告提取“减碳”“低碳”等关键词的词频来度量地方政府对低碳发展的关注度。表 6 列(1)中交互项系数显著为负。这是因为: 一方面, 地铁网络发展提升了城市空间连通性, 使低碳规制政策能有效地传导至市场主体, 降低企业外迁和职工的交通成本, 从而增强环境准入标准的约束力; 另一方面, 低碳规制为地铁网络的空间引导功能提供制度保障。本文参考高子茗和陈建奎(2026)的研究, 基于土地市场交易数据, 获取协议出让或挂牌出让的土地单价(元/公顷), 计算城市内土地价格差异基尼系数 $Gini_price_{it}$, 其数值越大表明中心与边缘地区的地价差异越大。表 6 列(2)中交互项显著为负, 表明地铁开通引发的站点周边资本化效应会扩大中心与边缘地区的土地价差, 这构成了工业外迁的市场激励, 即高土地成本使得低附加值工业向郊区转移, 而地铁网络可为这种空间重组提供通勤支撑。

产业地理集中度体现了集聚经济对地铁碳减排效应的影响。本文参考 Aiginger 和 Davies(2004)的方法测算第二产业地理集中度 $Cone_{it}$, 即基于区县第二产业增加值占城市工业总产值的份额计算集中程度。表 6 列(3)中交互项系数显著为负。这是因为: 一方面, 地铁网络降低了要素流动成本, 直接促使工业向城市外围集中, 从而提升地理集中度; 另一方面, 当工业集聚到一定规模后, 企业间共享污染治理设施、绿色技术等, 从而使得单位产出碳排放下降。

绿色专利与能源效率揭示了技术创新、能效升级在地铁碳减排效应中的核心地位。一方

面,本文基于国家知识产权局信息,测算城市当年绿色专利申请量占全部专利申请量的百分比,构建绿色技术创新水平 $Patent_rate_{ct}$ 。表6列(4)中交互项系数显著为负。地铁网络可以促进人员流动,加速知识溢出,促进绿色专利的传播和应用,而绿色专利研发也会使知识交流转化为生产工艺改进。另一方面,本文采用SBM-GML指数测度绿色全要素生产率 $Efficiency_{ct}$,其综合考察了资本、劳动、能源投入与期望产出、非期望产出,数值越大表明能源利用效率与绿色技术水平越高(湛泳和李珊,2022)。表6列(5)中交互项系数显著为负。这是因为:高能源效率企业可通过人员往来、供应链关联向周边输出管理经验与节能技术,从而产生溢出效应,而能源效率整体提升会使地铁经济活动更加低碳化,从而进一步增强地铁碳减排效果。

表6 机制分析:多维调节效应

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	低碳规制	土地价差	产业集中	绿色专利	生产效率
变量	$CO2_{mt}$				
$Policy_{ct} \times Subway_{mt}$	-0.022** (0.010)				
$Gini_price_{ct} \times Subway_{mt}$		-1.026*** (0.369)			
$Cone_{ct} \times Subway_{mt}$			-0.766** (0.363)		
$Patent_rate_{ct} \times Subway_{mt}$				-0.139** (0.059)	
$Efficiency_{ct} \times Subway_{mt}$					-1.195* (0.696)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
区县固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
省份和年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	34 793	34 793	34 793	34 793	34 793
R^2	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900

六、进一步分析:城市间地下联通的网络扩展效应^①

为进一步说明地铁网络建设的影响,本文设置城际联通城市指标 $Inter_sub_{ct}$,并构建其与地铁网络通达程度的交互项,加入基准方程。若城市 c 在 t 年有已经开通的城际地铁站,则 $Inter_sub_{ct}$ 设置为1,否则为0。本文在基准方程基础上,进一步控制人均民用航空、铁路、公路和水运客运量,并沿用前文工具变量法以排除潜在遗漏变量的影响。根据回归结果,跨城轨交具有更强的网络扩展效应,地铁网络的延展与站点通达性的提升能够产生碳减排的协同增效作用。

在城际联通城市中存在主动扩散型和被动承接型城市。主动扩散型城市(如上海、广州)通过行政协议与跨区财政共担机制,将交通枢纽、产业园区等节点嵌入卫星城,形成规划协同、要素共享的建设模式。而廊坊市、镇江市、嘉兴市等被动承接型城市呈现“站点孤岛化”现象,其地铁发展是超大城市通勤需求外溢、地铁网络向外扩张的结果。因此,为了准确衡量地铁网络

^① 限于篇幅,省略图表分析结果,留存备案。

扩展效应,本文设置扩张城市指标 $Spread_{it}$ 和承接城市指标 $Absorb_{it}$ 进行回归。根据回归结果,中心城市通过行政协议与跨区规划主动延伸地铁网络能够显著强化碳减排效果。此类城市通过枢纽节点嵌入、产业协同布局和要素共享机制,实现了地铁网络完善、大城市功能疏解与周边城市功能承接之间的有效整合。这不仅提升了通勤效率,而且通过优化城际交通结构、改变居民生活方式以及重塑产业布局,形成了交通、产业、生活协同的碳减排效应。而被动承接型城市缺乏本地的地铁网络,难以产生独立的碳减排效应,且城际站点与本地交通衔接不足,跨城地铁主要服务于居民单向通勤,当地生产与生活端的低碳协同作用较弱。这一结论为城市群交通一体化、绿色生态一体化发展提供了重要的政策启示。

七、研究结论与政策建议

基于 2011—2023 年中国地区经济社会数据与地铁开通信息,本文运用复杂网络分析方法构建地铁拓扑结构,考察了地铁网络发展对区域碳排放的影响效应与作用机制。主要结论如下:(1)地铁网络发展具有显著的碳减排效应。区县层面地铁网络通达性每提升 1 个单位,当地人均碳排放量平均减少 0.908 吨。(2)地铁网络通过生活端与生产端的双重机制实现碳减排。在生活端,地铁网络通过交通替代与消费升级两条路径降低家庭消费碳排放;在生产端,地铁网络通过重塑产业空间布局,推动服务业集聚与工业迁移,且这一效应受到地方低碳规制、土地价差、产业集聚度、绿色技术创新与能源效率的协同强化。(3)异质性分析表明,地铁的减排效应在经济规模较小、居民生活能耗较低、工业占比较大以及单中心空间结构的地区更为突出。(4)进一步分析表明,城际地铁建设通过疏解中心城市功能和拓展网络覆盖范围能够产生额外的碳减排效益。这揭示了跨区域交通一体化在更大空间尺度上实现协同减排的巨大潜力。

本文的研究结论可为“十五五”规划期间优化城市地铁规划、推动交通领域低碳转型提供如下政策启示:第一,将地铁网络通达性纳入低碳城市规划,充分发挥直接减排效能。地方政府在制定轨道交通规划时,不仅应关注运营里程增长,而且应重视网络结构完善与节点通达效率提升。应将站点接近中心性、网络换乘系数等指标纳入规划评估体系,优先建设填补网络空白、提升整体连通性的关键站点。第二,激活生活端碳减排潜力,构建以轨道交通为核心的绿色生活行为引导体系。应持续优化地铁与公交、共享单车的换乘衔接,通过票价优惠、联程优惠等经济手段强化地铁对私人汽车和出租车的替代效应,降低交通出行的碳排放。在地铁站点周边特别是换乘枢纽上盖及周边区域,鼓励布局文化、教育、体育、医疗等发展型消费业态。第三,利用地铁网络空间重塑功能,推动生产端结构性降碳。中心城区高通达性站点区域可通过容积率奖励、地价优惠等政策,吸引金融、研发、设计等知识密集型服务业集聚,打造绿色商务区,提升单位土地产出的经济和生态效益。城市外围地铁沿线及末端站点应统筹规划建设绿色工业园区,引导制造业企业集中入园,通过共享能源供应、污染治理设施实现规模经济。第四,应鼓励城际地铁主动网络化延伸,放大城市群层面的协同减排效应。同时,应鼓励北京、上海、广州等中心城市发挥辐射带动作用,建立跨行政区的轨道规划协调与财税分享机制,将网络向周边延伸。被动承接城市应完善本地交通与产业配套设施,在都市圈层面实现交通、产业与生活的协同减排。

主要参考文献:

- [1]陈太明,齐鹰飞,杜两省. 交通网络密度、国内市场一体化与家庭消费过度敏感性[J]. 财贸经济, 2023, (12): 99-119.
- [2]程名望,张家平. 新时代背景下互联网发展与城乡居民消费差距[J]. 数量经济技术经济研究, 2019, (7): 22-41.

- [3]代昀昊, 安铮, 王砾. 通勤成本与制造业企业生产率[J]. 经济学动态, 2023, (8): 63–81.
- [4]董微, 林雄斌. 中国城市 TOD 的地方化政策与实践: 政策工具的视角[J]. 城市规划学刊, 2024, (2): 49–57.
- [5]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.
- [6]方颖, 白秀叶. 城市空间形态、公共服务空间均等化与居民满意度[J]. 经济学(季刊), 2022, (4): 1405–1424.
- [7]冯国强, 王天乐. 地铁开通与服务业企业选址及其集聚效应研究——以北京市为例[J]. 城市问题, 2024, (3): 79–90.
- [8]冯国强, 王天乐, 时佳琦. 地铁开通对城市结构与边界的塑造——基于北京市夜间灯光数据与多维度微观大数据分析[J]. 城市问题, 2025, (2): 82–92.
- [9]高子茗, 陈建奎. 过犹不及: 城乡接合部公共用地出让与城乡人口社会保障待遇[J]. 财贸经济, 2026, (3): 59–78.
- [10]何慧华, 于雪航, 方军雄. 城市交通拥堵与企业全要素生产率耗损[J]. 经济理论与经济管理, 2025, (3): 113–130.
- [11]刘秉镰, 高子茗. 城市群空间结构视角下中国式城镇化的内涵、机制与路径[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2023, (4): 11–22.
- [12]罗楚亮, 李实, 岳希明. 中国居民收入差距变动分析(2013–2018)[J]. 中国社会科学, 2021, (1): 33–54.
- [13]吕洋, 高子茗. 城市空间形态对家庭消费储蓄的影响[J]. 财经科学, 2024, (7): 121–137.
- [14]饶映雪, 钟意, 吴晨羲. 城市交通网络对工业用地隐性转型的影响机理研究——以武汉市为例[J]. 中国土地科学, 2024, (5): 91–102.
- [15]邵帅, 李嘉豪, 杨莉莉. 地铁开通与城市雾霾污染: 来自上海栅格数据的证据[J]. 中国软科学, 2024, (9): 100–112.
- [16]邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验[J]. 管理世界, 2019, (1): 36–60.
- [17]宋弘, 孙雅洁, 陈登科. 政府空气污染治理效应评估——来自中国“低碳城市”建设的经验研究[J]. 管理世界, 2019, (6): 95–108.
- [18]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, (8): 136–151.
- [19]佟岩, 李鑫, 徐国铨. 企业集团碳减排压力与债务分布——来自高耗能上市公司的经验证据[J]. 管理评论, 2024, (2): 210–221.
- [20]童玉芬, 周文. 家庭人口老化对碳排放的影响——基于家庭微观视角的实证研究[J]. 人口学刊, 2020, (3): 78–88.
- [21]王军, 王杰, 王叶薇. 数字金融发展如何影响制造业碳强度?[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, (7): 1–11.
- [22]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.
- [23]王岳龙, 袁旺平. 地铁开通、协同合作与企业创新[J]. 经济评论, 2023, (6): 140–158.
- [24]肖挺. 地铁发展对城市人口规模和空间分布的影响[J]. 中国人口科学, 2021, (1): 79–90.
- [25]肖挺. 公共基础设施建设对城市产业效率的影响: 以地铁为例[J]. 中国经济问题, 2022, (1): 107–122.
- [26]湛泳, 李珊. 智慧城市建设、创业活力与经济高质量发展——基于绿色全要素生产率视角的分析[J]. 财经研究, 2022, (1): 4–18.
- [27]朱洪平, 朱文涛, 郑荣宝. 地铁对服务业集聚的影响——以广州市为例[J]. 热带地理, 2021, (1): 114–123.
- [28]Aiginger K, Davies S W. Industrial specialisation and geographic concentration: Two sides of the same coin? Not for the European union[J]. Journal of Applied Economics, 2004, 7(2): 231–248.
- [29]Hu D B, Zhai C Z, Zhao S B. Does digital finance promote household consumption upgrading? An analysis based on data from the China family panel studies[J]. Economic Modelling, 2023, 125: 106377.
- [30]Mei Z Y, Gong J R, Feng C, et al. Assessment of carbon emissions from TOD subway first/last mile trips based on level classification[J]. Travel Behaviour and Society, 2024, 36: 100792.
- [31]Su S L, Zhao C, Zhou H, et al. Unraveling the relative contribution of TOD structural factors to metro ridership: A novel localized modeling approach with implications on spatial planning[J]. Journal of Transport Geography, 2022, 100: 103308.

- [32]Wang J, Tan W W, Huang J. Extending TOD through the interrelationship between transport and land use: A case study of Beijing[J]. *Land Use Policy*, 2024, 144: 107257.
- [33]Zhang H R. Metro and urban growth: Evidence from China[J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, 85: 102732.

A Study on the Carbon Emission Reduction Effect of Subway Network Development

Gao Ziming¹, Wang Yuanyuan²

(1. *School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110167, China*; 2. *School of Marxism, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China*)

Summary: Under the background of the coordinated advancement of the strategy for building a strong transportation nation and the “dual carbon” goals, this paper focuses on the impact of subway network development on regional carbon emission reduction. By integrating data on subway line planning and the opening sequence of stations, the topological structure of urban subway networks is constructed on an annual basis. The complex network analysis method is employed to calculate the station centrality index, and a quantitative system for subway network accessibility is established. Further matching with county-level panel data from 2011 to 2023, this paper empirically investigates the impact of subway network development on per capita carbon emissions. The empirical results show that at the district and county level, each one-unit increase in subway network accessibility is associated with an average reduction of 0.908 tons in local per capita carbon emissions. Mechanism testing reveals a dual-driven pathway: On the consumption side, subway networks guide residents towards low-carbon travel modes, reduce household transportation expenditures, and optimize consumption structures, thereby contributing to household carbon reduction; on the production side, subway networks promote industrial spatial restructuring, forming an optimized layout characterized by service industry agglomeration and industrial decentralization. Furthermore, this emission reduction effect is synergistically amplified by local low-carbon regulations, land price differentials, industrial agglomeration, green technology innovation, and energy efficiency. Further analysis indicates that intercity subway construction, through its functional decentralization and network expansion effects, can amplify the low-carbon efficacy of central cities.

The marginal contributions of this paper are threefold: First, using a sample of cities with operational subway systems across China, it covers different city sizes, development stages, and network characteristics, exploring the intrinsic logic between subway network development and carbon emission reduction, thereby enhancing the generalizability and external validity of the findings. Second, in terms of indicator measurement, it employs social network analysis to construct a subway network accessibility index, capturing network layout, transfer convenience, and operational efficiency, thus addressing the shortcomings of traditional indicators. Third, by building a multi-level analytical framework that integrates consumption-based, production-based, and transportation carbon emissions, it reveals the unique emission reduction pathways of subway networks.

Key words: subway networks; carbon emissions; transportation infrastructure; green development

(责任编辑 顾 坚)