

新质生产力对交通基础设施运营“碳解锁”的驱动效应分析

陈赟*, 孙戈, 雷昂

长沙理工大学 交通学院, 长沙 410114

摘要: 在我国发展持续处于高“碳锁定”状态的背景下, 新质生产力应运而生, 本文利用固定效应模型、中介效应模型、门槛效应模型探究新质生产力如何驱动交通基础设施运营“碳解锁”。本文利用2013—2022年长三角三省一市的面板数据解析新质生产力对交通基础设施碳运营解锁的驱动效应。结果表明: 新质生产力对交通基础设施运营“碳解锁”有正向驱动效应。新质生产力可以通过促进绿色技术创新, 继而推动交通基础设施运营“碳解锁”; 低碳专利对新质生产力驱动交通基础设施运营“碳解锁”具有单重门槛效应, 即当低碳专利水平跨过一定门槛值时, 新质生产力对交通基础设施运营“碳解锁”的影响呈现边际递增态势。本文建议构建创新引领与示范应用并重的技术驱动体系, 强化核心技术攻关与成果转化机制; 创建激励有效、适配新质生产要素的制度环境; 推动生产要素素质态升级与协同配置, 加快传统要素升级与新型要素培育。

关键词: 新质生产力; 交通基础设施; “碳解锁”; 固定效应; 中介效应; 门槛效应

中图分类号: F542

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(XXXX)XX-0001-15

引言

党的二十大立足国家发展全局, 进一步细化并强化了“双碳”目标的战略实施路径, 强调以经济社会发展全面绿色转型为引领, 构建绿色低碳的生产生活

体系。在向社会主义现代化强国迈进的进程中, 我国虽已开启低碳发展的快车道, 但受资源禀赋和发展阶段制约, 高“碳锁定”效应依然存在, 碳排放总量大、强度高的结构性矛盾依然突出, 绿色转型任重道远。根据国际能源署(IEA)的报告^[1], 2023年全球

收稿日期: 2025-10-22; 修回日期: 2025-12-26

基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目: 基于全寿命低碳理念的高速公路建造技术及应用研究(201419)

作者简介: *陈赟(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为交通基础设施管理工程。E-mail: chen@csust.edu.cn (通讯作者)

孙戈(2001—), 男, 硕士, 研究方向为交通基础设施管理工程。E-mail: 1345061864@qq.com

雷昂(2001—), 男, 硕士, 研究方向为交通基础设施管理工程。

引用格式: 陈赟, 孙戈, 雷昂. 新质生产力对交通基础设施运营“碳解锁”的驱动效应分析[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250146.

CHEN Yun, SUN Ge, LEI Ang. Analysis of the Driving Effect of New Quality Productive Forces on Carbon Lock-Out in Transportation Infrastructure Operation[J]. Journal of Engineering Studies, DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250146.

因能源活动产生的碳排放总量达到374亿t。其中,中国交通运输领域的碳排放总量约为13亿t,约占国内总排放量的10%。进一步分析显示,在这10%的排放中,有86%来源于公路运营。交通基础设施在建设、运营及维护阶段均会产生碳排放,而其中运营阶段的碳排放总量显著高于其他阶段。因此,深入研究交通基础设施绿色化发展对经济转型和落实可持续发展战略有着重要的现实意义。

“碳解锁”这一概念,是对“碳锁定”困境的积极回应与突破策略。其理论根基可追溯至Unruh^[2]的开创性研究,他定义“碳锁定”为一种由技术与制度的规模报酬递增效应所驱动的状态,导致经济发展长期受制于以化石燃料为主的高碳能源系统,实质上是一个“技术-制度综合体”。“碳锁定”的提出则是为了破解这种高碳发展的锁定状态,将经济、技术等的发展从依赖于高碳能源中解放出来,解锁该锁定状态。基于此,众多学者对“碳解锁”这一概念进行拓展。李宏伟^[3]等认为所谓“碳锁定”,本质上是依赖于特定碳基技术路径并趋于僵化的技术体制;Wen等^{[4][27][41]}在考虑了产业和社会层面后拓展了“碳锁定”的理论定义,认为城市发展水平、外商直接投资、能源强度也是衡量“碳锁定”程度的重要因素;陈赞等^{[5][13]}认为“碳锁定”是在技术、制度、经济3个维度上锁定的。还有很多研究从不同角度深入探讨并论证了摆脱“碳锁定”的有效路径。李宏伟^{[6][43]}从宏观角度分析解锁的成因,认为实现“碳解锁”需要社会技术景观、关联体质以及缝隙创新的冲击;汪中华等^[7]以碳超载效率作为衡量“碳解锁”程度的核心指标。研究发现,实现深度解锁面临的关键障碍在于技术与制度转型所伴随的高昂成本,构成了难以逾越的转型壁垒;刘备等^{[8][137]}认为技术进步具有能源偏向性,会阻碍“碳解锁”,而进行政策创新可以积极促进绿色倒逼效应;梁中等^[9]从微观视角切入,剖析区域“碳解锁”过程的内在驱动机制,对包含基础动力、发展动力和调节动力系统在内的微观主体行为进行博弈分析,构建了“碳解锁”的微观驱动机制;Bento^[10]认为“碳解锁”效应利于清洁能源的发展;Healy等^{[11][45]}从制度视角分析,发现减少化石能源的投资对“碳解锁”有积极效应;Unruh等^[12]发现“碳

锁定”效应造成的实际搁浅资产成本会更高;Janipour等^[13]的研究预测如果政府颁布的相关政策与低碳技术不兼容会导致“碳锁定”效应加深。基于上述学者对“碳锁定”现象的深入研究,可以看出,为摆脱“碳锁定”效应,既需依赖绿色创新技术的突破,又要求政府层面实施低碳政策。

新质生产力作为生产力演进的高级形态,其形成源于生产要素及其配置方式的根本性转变,标志着中国经济发展从规模扩张向质量提升的历史性飞跃^[14]。新质生产力的核心在于对传统增长路径的扬弃,体现在劳动者、劳动资料、劳动对象及其组合形态的全面跃升上。这种生产力的深刻变革并非新近现象。马克思曾一针见血地指出,工业革命后资产阶级在短暂时期内所创造的生产力,超越了以往所有时代的总和,生动地揭示了生产力在特定历史阶段能够爆发式增长的内在规律^[15]。然而,传统的工业发展模式仍高度依赖自然资源,长期且大规模的传统工业发展不仅加剧了人类与生态环境之间的紧张关系,还造成了传统工业发展中的“碳锁定”效应,使其变得根深蒂固且不可持续。

当前,众多学者均从各自独特的视角出发,对新质生产力进行了深入的研究与探讨。刘文祥等^[16]认为新质生产力的崛起会触发生产关系的系统性调整,并会催生经济发展方式的根本性转变,从而为高质量发展奠定坚实的结构性基础;徐政等^[17]认为以传统产业为发展基础,重构战略性新兴产业的发展方向,能够为新质生产力的跃升提供重要的平台;沈坤荣等^[18]发现,当有为政府和有效市场充分结合,可以促进核心技术难题的解决;贾若祥等^[19]认为新质生产力是驱动产业链向高级化转型升级的核心引擎;杜传忠等^[20]认为新质生产力的关键作用在于对传统生产要素进行重构,颠覆其内在属性,使其在生产过程中转化为一种新的投入,其边际产出甚至可能呈现递增趋势,从而突破既有规模报酬理论的预设;卢江等^[21]采用熵权-TOPSIS方法,从科技、绿色以及数字3大方面选取测度指标,对全国277个城市的新质生产力进行了赋权测度,从理论层面量化了新质生产力,为新质生产力的后续研究提供了一定参考;赵若男等^[22]从要素投入与劳动产出两个方面测度了新质生产力水平,并发现以新质生产力为战略支点,能够

有效撬动新型工业化的跃升, 并以此通向更高质量的发展阶段。

综上所述, 尽管诸多学者已对“碳锁定”的内涵进行了深入的挖掘与规模的测度, 但鲜少有研究者以新质生产力为切入点, 针对交通基础设施运营阶段的“碳解锁”问题进行系统研究分析。因此, 本文拟以固定效应模型作为基准模型, 来探究新质生产力对交通基础设施“碳解锁”的驱动效应。同时, 通过中介模型来分析新质生产力驱动交通基础设施“碳解锁”的间接作用机制。最后, 利用门槛模型来探讨在不同新质生产力水平下, 交通基础设施“碳解锁”的变化情况, 以期为政府在制定相关政策及规制措施时提供量化的依据。

1 新质生产力驱动交通基础设施“碳解锁”的理论逻辑

1.1 驱动效应: 技术突破、制度演进与要素变革

在技术驱动的视角下, 新质生产力通过颠覆性技术突破, 为交通基础设施运营的减碳提供了根本动力。具体而言, 通过数字智能技术构建“感知-决策-控制”的闭环系统, 可显著提升交通运营效率。在能源供给侧, 新质生产力推动了清洁能源技术在交通基础设施中的规模化应用, 如光伏公路和分布式风电等新型能源基础设施, 使交通网络从单一的能源消费者转变为“产-储-消”一体化的综合能源系统^[23]。此外, 新质生产力还通过绿色材料与低碳工艺的创新, 降低了交通基础设施运营的隐含碳排放。例如, 温拌沥青技术可降低沥青混合料生产温度, 从而减少燃料消耗和温室气体排放^[24]。新质生产力驱动的技术发展将加速生产要素的质态变革, 为交通基础设施运营的减碳注入强劲动力。

此外, 新质生产力的推动所引发的质态变革, 是引导制度演进的关键力量, 而制度演进则成为解锁碳减排的关键风向标。为了适应生产要素的质态变革, 建立与之相匹配的治理体系显得尤为重要。在数据要素的流通方面, 完善的数据治理机制是必不可少的; 在新型基础设施的运营上, 需要创新监管模式; 而多

元主体的参与则要求构建协同治理框架。这些制度创新为“碳解锁”提供了坚实的保障。战略性政策框架通过设定明确的碳减排目标和实施路径, 为各类市场主体提供了稳定的预期。例如, 我国“双碳”目标的确立, 为交通领域的低碳转型提供了顶层设计。新的标准规范、政策体系和市场机制共同构建了有利于低碳技术应用的制度环境, 这一环境不仅激发了微观主体参与碳减排的内生动力, 还通过显性化碳排放成本, 促使交通运营企业通过技术创新和管理优化来降低碳配额成本。此外, 绿色电力交易机制以市场化方式促进了清洁能源的消纳, 为交通能源的清洁化转型提供了坚实的制度支撑。多元协同治理机制通过构建政府、企业、科研机构、公众等多方主体共同参与的治理网络, 形成“碳解锁”的合力。这种治理模式不仅有助于打破部门壁垒和政策孤岛, 更能通过信息共享、资源整合和行动协同, 提高“碳解锁”政策的执行效率和适配性。

最后, 新质生产力作为以技术创新为主导、要素高端化为特征的生产力新形态, 所带来的生产要素质态变革, 是推动交通基础设施运营实现“碳解锁”的根本驱动力。其核心在于通过生产力要素的质态变革, 不仅促进了经济社会发展的根本转型, 还催生了新兴业态与商业模式。这一进程通过优化资源配置效率, 最终推动经济向集约化发展模式跃迁^[25]。要素变革主要体现在以下三个层面: 劳动者要素由传统技能型向知识创新型转变, 劳动资料从机械化、自动化跃升至数字化、智能化, 劳动对象则从天然资源拓展至人工合成、数据等新型资源。这一系列质态变革, 不仅显著提升了全要素生产率, 更重要的是, 它打破了传统生产要素组合对高碳发展路径的依赖, 为交通基础设施运营的“碳解锁”提供了根本动力。在交通基础设施运营领域, 生产要素的质态变革具体表现为: 运营管理人员从传统的经验依赖型向数据驱动决策型转变, 养护设备从燃油机械向电动化、智能化装备升级, 运营管理的对象从单一的交通流扩展至能源流、信息流、碳流等多重要素。生产要素的质态提升, 使得“碳解锁”不再是通过末端治理的边际改进, 而是通过系统性重构实现根本性转变。

因此, 新质生产力的兴起将推动传统依赖高碳技

术的经济社会模式进行转型，这一转型又成为破解交通基础设施运营阶段“碳解锁”问题的关键因素。故提出研究假设H1。

H1：新质生产力可以推动交通基础设施运营阶段的“碳解锁”。

1.2 中介效应：绿色技术创新的中介传导机制

传统碳基技术与制度体系所构成的刚性约束，是“碳锁定”现象的核心障碍。这一障碍严重阻碍了低碳技术的迭代升级，使整个产业结构深陷于高碳化和低端化的转型泥潭^[26]。这导致交通基础设施体系展现出强烈的高碳路径依赖性，运营阶段的碳排放长期居高不下，展现出显著的刚性特征。然而，绿色技术创新能够助力交通基础设施减少对传统高碳排放技术的依赖，尤其是能够冲击“技术-经济-制度”这一“碳锁定”复合体^[27]，为打破高碳困境提供可能。

新质生产力以绿色技术创新为驱动，为交通基础设施“碳解锁”注入了新的动能，主要体现在以下几个方面。一是提升交通能源效率。新质生产力通过先进的绿色能源管理和智能调度系统，使得交通能源使用更加集约化、高效化，从而提高了能源利用效率。交通运营者能够实现对能源消耗的精准监控和智能调控，避免了能源浪费，有助于推进交通低碳化发展。例如，基于人工智能的充电调度系统能根据电网负荷和用电价格动态调整充电策略，实现削峰填谷，提高能源利用效率^[28]。二是促进绿色技术市场化。新质生产力的发展推动了绿色交通技术的创新和推广应用，促使碳减排更加市场化。在市场化的碳减排机制下，技术创新成果能够更好地流向高效率、高效益的交通运营场景，提高整个交通行业的碳减排效率和竞争力。这为交通基础设施运营的“碳解锁”提供了良好的市场环境。碳交易、绿色电力交易等市场化工具的完善，进一步激发了各类主体参与绿色技术创新的积极性。三是优化交通资源配置。交通运营者通过大数据分析和智能决策，能够更好地把握能源供需状况和基础设施运行状态，更加科学地安排运营维护活动，优化交通资源配置，提高运输服务的低碳水平和附加值，增强绿色交通的市场竞争力。数字孪生技术

的应用，使得在虚拟空间中模拟和优化交通系统运行成为可能，为资源配置决策提供了有力支撑。四是创新低碳运营模式。新质生产力的发展催生了新的低碳运营模式，如共享出行、需求响应型公交等。这些新型的运营模式使得交通资源得以更加灵活地配置和使用，提高了交通资源的利用效率和能源的流通效率，为交通基础设施运营碳解锁提供了新的路径和动力。基于此，提出研究假设H2。

H2：新质生产力通过加速绿色技术创新为交通基础设施运营阶段“碳解锁”注入动能。

1.3 门槛效应：基于低碳专利水平的门槛约束

在低碳技术发展的初级阶段，交通基础设施的运营主要依赖于传统技术体系，整体上低碳技术水平较为低下，同时面临创新资源稀缺、专业人才不足以及知识产权保护体系不健全等挑战。这导致市场对低碳技术的接受程度有限，新质生产力的引入与应用受到技术基础薄弱的严重制约，对推动交通基础设施运营“碳解锁”的积极作用并不明显。由于缺乏核心专利技术的支撑和完整的技术生态系统，新质生产力难以与传统的技术体系有效融合，其在提高能源效率、优化运营管理等方面的优势未能充分展现。此外，交通基础设施运营还面临着技术改造成本高昂、技术稳定性不足、投资回报周期长等现实问题。然而，随着低碳专利水平的不断提升和技术积累的日益深厚，当低碳专利水平跨越特定阈值时，新质生产力对交通基础设施运营“碳解锁”的驱动效应开始显现出显著的、非线性的增强趋势。

这一转变主要源于以下几个方面的变化。第一，专利数量的规模效应和知识溢出效应开始显现。当低碳专利储备达到一定规模后，形成了完整的技术知识库和创新网络，显著降低了新技术的研发成本和创新风险。此时，新质生产力中的数字化、智能化要素能够与成熟的低碳技术体系深度耦合，产生“1+1>2”的协同效应。例如，当新能源技术专利达到临界规模后，智能交通管理系统能够在此基础上实现更精准的能源调度和碳排放控制。第二，技术标准的形成和产业链的完善为新质生产力的规模化应用创造了条件。随着核心专利的积累，低碳技术领域开始形成统一的

技术标准和接口规范, 打破了不同技术系统之间的壁垒。这使得新质生产力能够以标准化、模块化的方式快速部署, 大幅降低了技术集成的复杂度和成本。同时, 完善的专利布局带动了整个产业链的成熟, 从技术研发、设备制造到运营维护各环节的专业化分工程度提高, 为新质生产力的应用提供了完整的产业支撑。第三, 创新生态系统进入自我强化的良性循环。跨越门槛值后, 低碳技术领域形成了包括研发机构、生产企业、运营单位、投资机构在内的创新共同体。丰富的专利储备不仅提供了持续创新的知识基础, 还通过专利许可、技术转让等方式促进了知识扩散和技术升级。这种良好的创新生态显著增强了新质生产力的渗透性和扩散力, 使其对“碳解锁”的驱动效应呈现加速增长态势。

此外, 随着专利水平的不断提升, 市场环境和政策支持也得到了优化。一个完善的专利布局不仅增强了投资者的信心, 还吸引了更多的社会资本涌入低碳交通领域。同时, 成熟的技术体系为政府制定精准有效的扶持政策提供了坚实依据。这些因素共同作用, 促使新质生产力驱动交通基础设施运营“碳解锁”的效率显著提升。基于以上分析, 提出研究假设H3。

H3: 当低碳专利水平跨越一定门槛值时, 新质生产力发展水平对交通基础设施运营阶段“碳解锁”的驱动效应会呈现非线性特征。

2 研究设计、变量测度与模型构建

2.1 核心变量选取与评价指标体系构建

2.1.1 解释变量 本文选取新质生产力作为核心解释变量。作为新兴概念, 新质生产力表征的是新劳动者、新劳动资料和新劳动对象的革命性演进与质变。新兴科技人才作为新质生产力的核心, 反映了劳动力队伍中知识结构与创新能力的重要变化。而新质生产力的关键工具则包括数字化、智能化以及绿色化基础设施, 这些构成了新劳动资料, 并区分了新工具与旧工具的差异。新劳动对象维度则强调对传统生产要素的绿色化改造, 以及新劳动对象的开发利用广度与深度, 这直接关系到生产过程的绿色可持续性。鉴于以上分析, 并考虑到相关数据的可获取性, 本文借鉴卢江等^[21]^[126]及曾鹏等^[29]的研究成果。表1为解释变量指标体系^[21,29-34]。

2.1.2 被解释变量 本文聚焦于交通基础设施运营阶段的“碳解锁”水平, 这一核心被解释变量反映了运营活动在多重动因驱动下成功摆脱高碳发展路径的复杂过程。为准确测度此水平, 本文从技术、制度和经济三个维度构建指标体系。

在技术解锁层面, 绿色专利技术的持续突破是推动企业大规模应用可持续性技术的关键。而通过多式联运策略, 非公路运输在总货物运输量中的比例上升, 则是解锁这一过程的重要表现形式之一。在制度解锁层面, 政府通过引导和激励各类主体采纳低碳技

表1 新质生产力评价解释变量指标体系构成
Table 1 Composition of indicator system for explanatory variables in new quality Productive Forces evaluation

一级指标	二级指标	指标说明	来源文献
新劳动者	科技人才	规模及以上工业企业R&D人员全时当量/(人·a)	[21,29,31]
		普通高等学校在校学生数/万人	[29,33-34]
	科技成果	有效发明专利数/件	[29,32]
新劳动资料	网络基础设施	长途光缆线路/万km	[21,31,34]
		固定互联网宽带接入用户/万户	[29,32]
	新能源基础设施	新能源(水、核、太阳、风)发电量/kWh	[30,32]
新劳动对象	低碳治理	建成区绿化覆盖率/%	[32-34]
	企业发展方向	规模以上企业的有R&D经费/万RMB	[29,33]
	环境污染	CO ₂ 排放总量/万t	[32-34]

术与实践，充当了高效燃料的作用。政府主导制定的可持续性市场发展机制以及社会监督，如同为解锁过程添加的“润滑油”，能够促进其顺畅进行。同时，政府自身的投资行动不仅稳固了绿色发展的舆论环境，还带动了企业和群众的广泛参与。在经济解锁层面，关键在于评估低碳转型过程中的资源配置效率与成本效益，旨在于揭示绿色投资、市场融资等经济要素向低碳领域集聚的态势，唯有形成可持续的商业模式与正向的经济激励，“碳解锁”方能获得持久的内生动力。

基于上述分析，考虑到相关数据的可获取性，本文参考了Hossain等^[35]与牛鸿蕾等^[36]的研究成果，通过理论分析与文献频次统计等方法，构建了表2所示的交通基础设施运营阶段“碳解锁”水平评价指标体系^[5-6,8-9,11,13,35-44]。随后，利用SPSS软件并采用CRITIC权重法对各项指标进行赋权，以量测交通基础设施运营阶段的“碳解锁”水平。

2.1.3 中介变量 本文选取绿色技术创新作为中介变量。沿袭郭丰等^[38]的研究方法，选取绿色发明专利授权数来评价绿色技术创新水平。

2.1.4 控制变量 为了规避因遗漏变量而引发的内生性问题，在控制变量的精心选取上，本研究聚焦于以下对新兴生产力与“碳解锁”现象具有重要影响的关键变量：经济发展水平是衡量地区整体发展阶段的重要指标，不同发展阶段对应着不同的交通需求规模和能源消费模式，存在系统性差异；人口密度反映了人

口集聚效应，高密度地区可能通过规模效应促进低碳交通发展，但也可能因交通拥堵而增加碳排放；公路发展水平体现了交通基础设施存量的结构特征，其网络密度直接影响对传统燃油车的依赖程度；产业结构则控制了工业化程度对货运需求强度和能源消费结构的影响。此外，货运结构还反映了运输体系内部的结构效率，不同运输方式的能源效率差异显著。因此，本文选取了经济发展水平、人口密度、公路发展水平、产业结构和货运结构作为控制变量，并分别使用人均GDP、当地常住人口与区域面积之比、区域公路里程、第三产业产值与第二产业产值的比值以及非公路货运量占总货运量比值来表征这些变量。

2.1.5 门槛变量 本文选取低碳专利发展水平作为门槛变量。在中外专利信息服务平台中使用“低碳”关键词进行搜索，人工记录各区域各年份的相关专利情况，并进行标准化处理。

2.2 计量模型构建与研究假设

2.2.1 固定效应模型 为验证假设H1，并考虑到遗漏变量可能引发的内生性问题，依据第1节中关于新质生产力对交通基础设施运营“碳解锁”驱动效应的理论分析，以及控制变量的筛选原则，构建了面板数据固定效应回归模型，以实证分析新质生产力对交通基础设施运营“碳解锁”的驱动作用。

$$CUL_{it} = \theta_0 + \theta_1 NQP_{it} + \theta_2 CV_{it} + P_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中， CUL_{it} 为省份*i*在*t*时期的交通基础设施运

表2 交通基础设施运营阶段“碳解锁”水平评价被解释变量指标体系

Table 2 Indicator system of the explanatory variable for the evaluation of "Carbon Unlock" level in the operation stage of transportation infrastructure

一级指标	指标说明	指标来源
技术解锁层面	绿色技术市场成交额/亿RMB	[37-39]
	绿色专利技术占比/%	[40-41]
	低碳运输货运量/万t	[6]45[8]143
制度解锁层面	环境保护支出/亿RMB	[36,44]
	省级公众环境关注度（指数）关键词：环境污染	[11]456[13]7
	地方政府出台推进低碳发展政策占比/%	[36-37]
经济解锁层面	企业工业污染治理完成投资额/万RMB	[41,43]
	CO ₂ /交通运输、仓储和邮政业增加值/（t/亿RMB）	[5]1130[35]
	低碳投资技术占比/%	[9]133[42]

营阶段“碳解锁”水平; NQP_{it} 为省份 i 在 t 时期的新质生产力水平; θ_0 、 θ_1 、 θ_2 为待估系数; CV_{it} 为系列控制变量; P_i 为个体效应; ε_{it} 为随机扰动项。

2.2.2 中介效应模型 为进一步验证研究假设 H2, 依据 1.2 节关于中介效应的理论分析, 新质生产力对绿色技术创新水平的发展具有正向影响, 并且绿色技术创新为交通基础设施运营的“碳解锁”提供了驱动力。因此, 选择绿色技术创新发展水平作为中介变量, 构建以下中介效应回归模型:

$$GTL_{it} = \beta_0 + \beta_1 NQP_{it} + \beta_2 CV_{it} + P_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$CUL_{it} = \theta_0 + \theta_1 NQP_{it} + \theta_2 GTL_{it} + \theta_3 CV_{it} + P_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中, GTL_{it} 为省份 i 在 t 时期的绿色技术创新发展水平; β_0 、 β_1 、 β_2 为待估系数; CV_{it} 为系列控制变量; P_i 为个体固定效应; ε 为随机扰动项。

2.2.3 门槛效应模型 为验证在低碳专利的不同发展水平下, 新质生产是否会对交通基础设施运营的“碳解锁”效应展现出非线性的驱动特征, 基于门槛效应的假设, 采用面板门槛模型进行非线性机制的考察。选定低碳专利发展水平作为门槛变量, 对假设 H3 进行验证。模型的具体设定如下:

$$CUL_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 NQP_{it} \tau(LCP_{it} < \omega_1) + \alpha_2 NQP_{it} \tau(LCP_{it} \geq \omega_1) + \alpha_3 CV_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中, α_0 、 α_1 、 α_2 、 α_3 为待估系数; ω_1 为门槛估计值; τ 为示性函数, 括号内条件满足时为 1, 否则为 0; LCP_{it} 为门槛变量。

3 新质生产力驱动效应的实证检验

3.1 数据来源、样本选择与描述性统计

本文以 2013—2022 年中国长三角地区的三省一市为研究样本, 数据主要来源于多个渠道, 包括《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国能源统计年鉴》, 以及全球统计数据平台数据库和中国研究

数据服务平台。此外, 还引用了江苏省、浙江省、安徽省和上海市 2013—2022 年的统计年鉴, 以及《中国区域创新能力评价报告》中的绿色发明专利授权数。这些专利数据均来源于国家知识产权局。为了衡量省级公众对环境问题的关注度, 本研究采用了百度环境污染搜索指数, 以关键词“环境污染”为依据, 在百度中文搜索引擎上根据搜索的频次及方位进行统计。为了确保数据的完整性和可靠性, 对于序列中出现的缺失值, 采用了线性插补均值法进行估算。表 3 中列出了部分样本数据来源。

3.2 基准回归: 新质生产力的直接驱动效应检验

根据式(1)的固定效应模型, 利用 Stata 软件进行回归分析, 得出表 4。从表 4 的基准回归结果中可以观察到, 无论在何种模型设定下, 新质生产力的系数均显著为正。这一稳健的结果明确地指出了新质生产力作为驱动交通基础设施运营“碳解锁”的关键因素, 从而验证了研究假设 H1。

究其缘由, 新质生产力水平的持续提升, 从技术、制度以及生产要素变革三个维度, 驱动了交通基础设施运营的“碳解锁”进程。在技术解锁层面, 智能化运营系统的深度应用实现了交通基础设施的精细化管理, 这得益于实时数据采集与分析对能源配置效率的优化。同时, 清洁能源技术的创新应用推动了交通能源系统的结构性变革, 显著降低了运营环节对化石能源的依赖。在制度解锁层面, 完善的碳排放监管体系与市场化的激励机制相结合, 为低碳转型创造了良好的政策环境; 多元主体参与的协同治理模式则有效提升了政策执行效能。在生产要素解锁层面, 专业化人才队伍的培育为运营管理提供了智力支持, 智能化设备的普及提升了设施运维效率, 数据要素的深度开发利用则为决策优化提供了科学依据。

表3 主要变量数据来源与统计说明

Table 3 Data sources and statistical description of main variables

数据名称	指标来源	网址
规模及以上工业企业 R&D 人员 全时当量/(人·a)	《中国统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01
普通高等学校在校学生数/万人	《中国统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01

续表

数据名称	指标来源	网址
有效发明专利数/件	《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》 《上海市统计年鉴》《江苏省统计年鉴》 《浙江省统计年鉴》《安徽省统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01 ; https://www.sts.org.cn/html/index.html ; https://tjj.sh.gov.cn/tjnj/index.html ; https://tj.jiangsu.gov.cn/col/col89815/index.html ; https://tjj.zj.gov.cn/col/col1525563/index.html ; https://tjj.ah.gov.cn/ssah/qwfbjd/tjnj/index.html
长途光缆线路/万 km	《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01 ; https://www.sts.org.cn/html/index.html
固定互联网宽带接入用户/万户	《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01 ; https://www.sts.org.cn/html/index.html
新能源（水，核，太阳，风）发电量/kWh	《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》 《上海统计年鉴》《江苏省统计年鉴》 《浙江省统计年鉴》《安徽省统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01 ; http://60.16.24.131/CSYDMirror/area/Yearbook/Single/N2024050932_z=D15 ;
建成区绿化覆盖率/%	《中国统计年鉴》、中国研究数据服务平台	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01 ; https://www.cnrds.com/Home/Login
规模以上企业的有 R&D 经费/RMB	《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01
CO ₂ 排放总量/万 t	全球统计数据平台数据库、中国研究数据服务平台	https://tsgvpn2.csust.edu.cn/vpn/96/https/P75YPLUFPB3X63LVF3SX85JPMNYA/index.html#/Index ; https://www.cnrds.com/Home/Login
绿色技术市场成交额/RMB	《中国科技统计年鉴》、中国研究数据服务平台	https://www.sts.org.cn/html/index.html ; https://www.cnrds.com/Home/Login
绿色专利技术占比/%	《中国区域创新能力评价报告》、国家知识产权局	https://www.most.gov.cn/zxgz/cxdc/ ; https://www.cnipa.gov.cn/col/col61/index.html
低碳运输货运量/万 t	《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01 ; http://60.16.24.131/CSYDMirror/area/Yearbook/Single/N2024050932_z=D15
环境保护支出/RMB	《中国统计年鉴》《上海统计年鉴》《江苏省统计年鉴》《浙江省统计年鉴》《安徽省统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01 ; https://tjj.sh.gov.cn/tjnj/index.html ; https://tj.jiangsu.gov.cn/col/col89815/index.html ; https://tjj.zj.gov.cn/col/col1525563/index.html ; https://tjj.ah.gov.cn/ssah/qwfbjd/tjnj/index.html
省级公众环境关注度（指数）关键词：环境污染	使用关键词“环境污染”，百度中文搜索引擎根据搜索的频次及方位统计	
地方政府出台推进低碳发展政策占比/%	《上海统计年鉴》《江苏省统计年鉴》 《浙江省统计年鉴》《安徽省统计年鉴》 《中国统计年鉴》	https://tjj.sh.gov.cn/tjnj/index.html ; https://tj.jiangsu.gov.cn/col/col89815/index.html ; https://tjj.zj.gov.cn/col/col1525563/index.html ; https://tjj.ah.gov.cn/ssah/qwfbjd/tjnj/index.html ; https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01
企业工业污染治理完成投资额/RMB	《中国统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01
CO ₂ /交通运输、仓储和邮政业增加值/万 RMB	《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01
低碳投资技术占比/%	《中国科技统计年鉴》、中国研究数据服务平台	https://www.sts.org.cn/html/index.html ; https://www.cnrds.com/Home/Login
绿色阀门专利授权数/个	《中国区域创新能力评价报告》	https://www.most.gov.cn/zxgz/cxdc/
专利数据	国家知识产权局	https://www.cnipa.gov.cn/col/col61/index.html

3.3 中介效应检验：绿色技术创新的中介效应分析

为进一步研究绿色技术创新在以新质生产力驱动的交通基础设施运营阶段中，对“碳解锁”进程的促进效果，基于式(2)~式(3)利用 Stata 软件对各变量进行了测算。检验结果详见表 5。表 5 的统计分析显示，新质生产力对绿色技术创新有显著的正面影响（系数=1.317， $p<0.01$ ）。这进一步证实了绿色技术创新在“碳解锁”进程中存在部分中介效应，研究假设 H2 获得支持。

原因可能是创新成果的持续涌现为解决传统高碳技术路径依赖提供了可行的方案。这得益于数字化工具的广泛应用，它不仅加速了技术研发进程，还显著降低了创新试错成本。此外，健全的创新保护制度保障了研发主体的合法权益，多元化的激励机制有效调动了创新积极性。标准化的技术规范体系为成果转化提供了明确的导向，确保了技术转化的规范性和有效

表 4 新质生产力对交通基础设施“碳解锁”影响的基准回归结果
Table 4 Baseline regression results of the impact of new quality Productive Forces on "Carbon Lock-out" in transportation infrastructure

变量	“碳解锁”水平 (1)	“碳解锁”水平 (2)	“碳解锁”水平 (3)
新质生产力水平	0.256*** (4.91)	0.232*** (4.11)	0.137** (3.58)
人均 GDP			-0.136 (-2.18)
人口密度			3.368** (5.74)
公路里程			0.135** (11.7)
产业结构			0.164* (4.22)
非公路货运量			-0.119 (-1.78)
常数项	0.323*** (-10.58)	0.358*** (-14.98)	-0.678* (-4.71)
控制变量	无	无	是
个体效应	无	是	是
观测值	40	40	40
拟合度	0.689	0.697	0.643

注：() 内为 t 值；***、**、* 分别表示通过 1%、5%、10% 水平上的显著性检验。

表 5 绿色技术创新的中介效应检验结果
Table 5 Results of mediation effect test for green technology innovation

变量	绿色技术创新
新质生产力水平	1.317*** (8.29)
常数项	2.426* (2.94)
控制变量	是
个体效应	是
观测值	40
拟合度	0.949

性。同时，优质创新资源的持续投入为研发奠定了坚实的基础，跨领域人才的协同攻关促进了知识的融合与交流。完善的实验平台则加速了技术的迭代，推动了创新链与产业链的良性互动，形成了互促共进的良好局面。

3.4 门槛效应：低碳专利的门槛效应识别

为了验证新质生产力发展水平在交通基础设施运营阶段对“碳解锁”的驱动效应是否会因低碳专利的不同发展水平而出现跨越式增长，采用了式(4)进行检验。根据表 6 的门槛效应检验结果，可以观察到，在不同低碳专利发展水平下，新质生产力对交通基础设施运营阶段“碳解锁”的驱动效应在 1% 的显著性水平上呈现出单一的门槛效应，其单一门槛值为 0.271。

表 6 低碳专利水平的门槛效应估计结果
Table 6 Estimation results of threshold effect based on low-carbon patent level

门槛数	门槛值	P 值
单一门槛	0.271	0.001***
双重门槛		0.24
三重门槛		0.43

注： P 值采用 Bootstrap 法模拟抽样 300 次估计得到；***表示在 1% 的水平上显著。

表 7 展示了门槛效应回归结果，表明不论低碳专利存量处于低水平还是高水平区间，新质生产力的驱动效应均显著为正。值得注意的是，在高水平区间内，回归系数更大，这揭示了一个关键结构特征：绿色技术创新水平越高，新质生产力对“碳解锁”的促

进作用越强，即两者之间存在一种协同强化作用。这表明新质生产力的发展水平在交通基础设施运营阶段对“碳解锁”的驱动效应会受到低碳专利发展水平的制约。具体而言，在低碳专利发展水平低于0.271的地区，新质生产力发展水平对交通基础设施运营阶段“碳解锁”的边际影响较小；而当低碳专利发展水平超过这一界限时，新质生产力发展水平对交通基础设施运营阶段“碳解锁”的边际影响同样较小。然而，当低碳专利发展水平达到一个特定界限值时，新质生产力发展水平对交通基础设施运营阶段“碳解锁”的驱动效应会呈现跨越式的提升，从而验证了假设H3的成立。

在专利积累达到临界规模时，技术间的协同效应显著增强，这促进了创新网络的形成，从而降低了后续研发成本。标准化技术体系的建立更是极大地提升了技术集成的效率。随着技术成熟度的提升，创新政策的精准性和适配性也得到了增强，为技术推广应用提供了坚实的制度保障。多元化的融资机制有效缓解了创新过程中的资金压力，确保了研发活动的顺利进行。同时，专业人才储备的日益丰富为技术深度研发提供了有力支撑，产业链配套体系的不断完善则促进了创新成果的规模化应用。此外，市场需求的持续释放为技术创新注入了内生动力，共同推动了驱动效应在跨越门槛后的加速提升。

表7 基于低碳专利的新质生产力驱动的门槛效应回归结果
Table 7 Threshold effect regression results driven by new quality Productive Forces based on low-carbon patents

变量	“碳解锁”水平
低碳专利 (≤0.271)	0.131* (4.1)
低碳专利 (>0.271)	0.217** (8.73)
常数项	-0.248(-1.07)
控制变量	是
拟合度	0.645

注：() 内为t值；**、*分别表示通过5%、10%水平上的显著性检验。

4 结论

本文以2013—2022年我国长三角区域的三省一市为样本，实证分析新质生产力发展水平对交通基础

设施运营阶段“碳解锁”的驱动效应。结果显示：（1）新质生产力发展水平对交通基础设施运营阶段“碳解锁”具有显著正向驱动效应，说明提升新质生产力可直接促进交通运营碳排放的降低，是实现交通领域“碳解锁”的重要路径；（2）新质生产力能够通过推动绿色技术创新赋能交通基础设施运营阶段“碳解锁”，表明绿色技术是新质生产力促进“碳解锁”的关键传导渠道；（3）新质生产力对“碳解锁”的驱动效应受到低碳专利发展水平的调节，在不同专利水平下呈现显著差异的边际影响，提示技术积累门槛与专利布局是影响该效应发挥的重要边界条件。据此，提出如下三点对策建议：

第一，创建激励有效、适配新质要素的制度环境。健全市场化激励机制，将新质生产力对交通基础设施运营“碳解锁”的直接驱动效应转化为持续动力。基于结果（1）发现的显著直接驱动效应，需通过制度设计将这一潜力转化为可持续动力：一是建立交通行业碳排放权交易机制，将运营阶段碳排放纳入全国碳市场，推行绿色交通项目优先审批，创新碳减排专项贷款、碳中和债券等绿色金融产品；二是构建标准化约束体系，制定交通基础设施全生命周期碳核算标准、绿色技术认证规范等强制性标准，建立分级分类监管机制和碳排放预警机制；三是建立区域协同发展机制，设立区域协同技术攻关基金，加强相邻地区在人才培养、技术研发等方面的合作，最大化新质生产力的区域协同效益。

第二，构建创新引领与示范应用并重的技术驱动体系，强化核心技术攻关与成果转化机制。针对结果（2）揭示的绿色技术创新中介机制，政策设计应聚焦破解技术转化阻碍点：一是深化数字技术与低碳技术融合，开发基于数字孪生的交通碳排放监测平台，建立智慧能源管理系统，强化技术创新的协同效应；二是构建多层次示范应用网络，在国家层面布局智慧公路等重大示范工程，在区域层面推进城市级交通能源融合示范区，在企业层面推广智能运维等技术应用，加速技术成果扩散；三是重点支持接近专利门槛的关键技术研发，设立交通低碳技术专项基金，支持高校、科研机构与企业联合攻关高能量密度储能、绿色氢能制备等核心技术，为突破结果（3）所示的技术

门槛提供持续支撑。

第三, 推动要素质态升级与协同配置, 加快传统要素升级与新型要素培育。新质生产力对“碳解锁”的驱动作用最终要通过生产要素的质态变革来实现。鉴于结果(3)表明的要素门槛效应, 需加快传统要素升级与新型要素培育: 一是培育新质劳动者, 在高校设立智慧交通与低碳技术交叉学科, 建立实训基地并实施在岗技能提升计划, 打造具备数字素养和低碳技能的专业人才队伍; 二是升级新型劳动资料, 制定传统基础设施数字化改造路线图, 设立装备更新专项基金, 重点支持智能传感设备、新能源装备应用推广, 建立设备能效标准体系; 三是释放数据要素价值, 建立交通能源大数据平台并制定数据安全使用规范, 推动数据在智能调度、碳足迹追溯等场景的深度学习, 充分发挥其放大、叠加和倍增作用。

此外, 本研究存在如下局限: 仅以长三角地区为

案例, 开展了新质生产力对交通基础设施运营“碳解锁”驱动分析。鉴于中西部部分地区的发展水平与长三角地区存在差异, 本研究结论的推广范围仅限于发展水平与长三角地区具有相似特征的区域。基于本研究结论, 在未来学术研究中, 可将研究范围拓展至京津冀、珠三角、中西部等具有差异化的区域, 比较新质生产力驱动“碳解锁”的路径与强度是否因区域发展水平、产业结构和资源禀赋的不同而有所差异, 进而构建更具普适性和细分化的理论框架。随着新质生产力培育体系与“双碳”战略的深度融合, 未来应重点关注绿色技术从研发到规模化应用的全链条支持。从长远来看, 通过持续推进技术、制度和要素三位一体的系统性变革, 新质生产力有望成为引领交通基础设施乃至更广泛社会经济领域实现“碳解锁”和绿色转型的核心驱动力, 为我国应对高“碳锁定”挑战和实现高质量发展提供重要支撑。

参考文献

- [1] 刘玲玲. 国际能源署: 2024年全球煤炭需求量将创历史新高[N]. 中国煤炭报, 2024-12-24(007).
Liu L L. International Energy Agency: Global coal demand will reach a record high in 2024 [N]. China Coal News, 2024-12-24(007).
- [2] Unruh G C. Understanding Carbon Lock-In[J]. Energy Policy, 2000, 28(12): 817-830.
- [3] 李宏伟, 谢楠, 赵丹. 行动者网络, 规则体系与社会嵌入: “碳锁定”的制度化[J]. 生态经济, 2018(10): 40-46.
Li H W, Xie N, Zhao D. Actor networks, rule system and social embeddedness: A study on institutionalization of "Carbon Lock-In"[J]. Ecological Economy, 2018(10): 40-46.
- [4] Wen L, Shao H Y. Analysis of influencing factors of the carbon dioxide emissions in China's commercial department based on the STIRPAT model and ridge regression[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(26): 27138-27147.
- [5] 陈赞, 石梦怡, 马崇森. 省域交通基础设施“碳锁定”系统耦合效应时空演化[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(3): 1127-1138.
Chen Y, Shi M Y, Ma C S. Spatial and temporal evolution of coupling effect of Carbon Locking system in provincial transportation infrastructure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(3): 1127-1138.
- [6] 李宏伟. “碳锁定”与“碳解锁”研究: 技术体制的视角[J]. 中国软科学, 2013(4): 39-49.
Li H W. Carbon Lock-In and carbon unlocking: A perspective of technological regime evolution[J]. China Soft Science, 2013(4): 39-49.
- [7] 汪中华, 成鹏飞. 中国碳超载下碳锁定与解锁路径实证研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 909-917.
Wang Z H, Cheng P F. China's Carbon Lock-In and Unlocking in the context of carbon loading[J]. Resources Science, 2016, 38(5): 909-917.
- [8] 刘备, 董直庆. 技术进步的能源偏向诱发“碳锁定效应”了吗[J]. 产经评论, 2020, 11(4): 133-148.
Liu B, Dong Z Q. Has the energy bias of technological progress induced Carbon Lock-In[J]. Industrial Economic Review, 2020, 11(4): 133-148.
- [9] 梁中, 昂昊, 胡登峰. “区域碳解锁”的微观驱动机制研究[J]. 中国软科学, 2020(4): 132-141.
Liang Z, Ang H, Hu D F. Study on micro-driving mechanism of "Regional Carbon Unlocking"[J]. China Soft Science, 2020(4): 132-141.
- [10] Bento N. Is Carbon Lock-In blocking investments in the hydrogen economy A survey of actors' strategies[J]. Energy Policy, 2010, 38(11): 7189-7199.

-
- [11] Healy N, Barry J. Politicizing energy justice and energy system transitions: Fossil fuel divestment and a "just transition"[J]. *Energy Policy*, 2017, 108: 451-459.
- [12] Unruh G C. The real stranded assets of Carbon Lock-In[J]. *One Earth*, 2019, 1(4): 399-401.
- [13] Janipour Z, de Nooij R, Scholten P, et al. What are sources of Carbon Lock-In in energy-intensive industry: A case study into Dutch chemicals production[J]. *Energy Research & Social Science*, 2020, 60: 101320.
- [14] 韩喜平, 马丽娟. 发展新质生产力与推动高质量发展[J]. *思想理论教育*, 2024(4): 4-11.
Han X P, Ma L J. Develop new quality productive forces and promote high-quality development[J]. *Ideological & Theoretical Education*, 2024(4): 4-11.
- [15] 马克思, 恩格斯. 共产党宣言[M]. 中央编译出版社: 202309: 207.
Marx K, Engels F. The Communist Manifesto [M]. Central Compilation and Translation Press: 202309:207
- [16] 刘文祥, 赵庆寺. 习近平关于新质生产力重要论述的深刻内涵, 重大意义与实践要求[J]. *江西财经大学学报*, 2024(4): 13-23.
Liu W X, Zhao Q S. The profound connotation, great significance, and practical requirements of Xi Jinping's important discourse on new quality productivity[J]. *Journal of Jiangxi University of Finance and Economics*, 2024(4): 13-23.
- [17] 徐政, 郑霖豪, 程梦瑶. 新质生产力赋能高质量发展的内在逻辑与实践构想[J]. *当代经济研究*, 2023(11): 51-58, F0003.
Xu Z, Zheng L H, Cheng M Y. The internal logic and practical concept of new quality productivity empowering high-quality development [J]. *Contemporary Economic Research*, 2023(11): 51-58, F0003.
- [18] 沈坤荣, 金童谣, 赵倩. 以新质生产力赋能高质量发展[J]. *南京社会科学*, 2024(1): 37-42.
Shen K R, Jin T Y, Zhao Q. To energize high-quality development by new quality productivity[J]. *Nanjing Journal of Social Sciences*, 2024 (1): 37-42.
- [19] 贾若祥, 王继源, 窦红涛. 以新质生产力推动区域高质量发展[J]. *改革*, 2024(3): 38-47.
Jia R X, Wang J Y, Dou H T. Promoting high-quality regional development by new quality productive forces[J]. *Reform*, 2024(3): 38-47.
- [20] 杜传忠, 疏爽, 李泽浩. 新质生产力促进经济高质量发展的机制分析与实现路径[J]. *经济纵横*, 2023(12): 20-28.
Du C Z, Shu S, Li Z H. Mechanism and path of new quality productivity in promoting high-quality economic development[J]. *Economic Review Journal*, 2023(12): 20-28.
- [21] 卢江, 郭子昂. 区域新质生产力: 水平测度、时空演化与影响因素: 基于2012—2021年全国277个城市面板数据的研究[J]. *社会科学辑刊*, 2024(4): 124-133.
Lu J, Guo Z A. Regional new quality productivity: Level measurement, temporal and spatial evolution and influencing factors: based on the panel data of 277 cities in china from 2012 to 2021[J]. *Social Science Journal*, 2024(4): 124-133.
- [22] 赵若男, 宋香荣, 陈海龙. 新质生产力, 新型工业化与高质量发展[J]. *金融与经济*, 2024(6): 1-14, 25.
Zhao R N, Song X R, Chen H L. New quality productivity, new industrialization and high-quality development[J]. *Finance and Economy*, 2024(6): 1-14, 25.
- [23] 付婷, 魏鑫鑫. 光伏赋能高速公路: 融合高效组件、长效耐久与智能运维的关键技术探究[J]. *中国公路*, 2026,(01):100-101.
Fu T ,Wei X X. Photovoltaic empowerment of highways: Exploring key technologies for integrating high-efficiency components, long-term durability, and intelligent operation and maintenance [J]. *China Highway*, 2026, (01): 100-101
- [24] Ahmed S ,Baig G M . Warm mix asphalt for low carbon road construction: A systematic review of technologies, performance and sustainability impacts[J].*Innovative Infrastructure Solutions*,2026,11(3):138-138.
- [25] 贾丽民, 郭潞蓉. 唯物史观视域下"新质生产力"的主体动力源探析[J]. *理论探讨*, 2024(2): 86-94.
Jia L M, Guo L R. An analysis of the subjective impetus source of "New Quality Productive Forces" from the perspective of historical materialism[J]. *Theoretical Investigation*, 2024(2): 86-94.
- [26] 程娜, 桑一铭, 李博文. "双碳"目标下中国"碳解锁"发展研究[J]. *改革*, 2023(12): 151-162.
Cheng N, Sang Y M, Li B W. Study on the development of "Carbon Unlocking" in China under "Double Carbon" targets[J]. *Reform*, 2023 (12): 151-162.
- [27] 陈赞, 陈先俊, 石晓雅, 等. 交通基础设施碳锁定破解障碍度分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(10): 4277-4287.
Chen Y, Chen X J, Shi X Y, et al. Analysis on obstacles of carbon locking in transportation infrastructure[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(10): 4277-4287.
- [28] 陈艳林. 基于人工智能的电动汽车充电调度策略研究[J]. *信息技术与信息化*, 2024, (09): 213-216.

- Chen Y L. Research on electric vehicle charging scheduling strategy based on artificial intelligence[J]. Information Technology and Informatization, 2024, (09): 213-216
- [29] 曾鹏, 覃意晗, 周联超, 等. 中国城市新质生产力水平的测算及时空格局[J]. 地理科学进展, 2024, 43(6): 1102-1117.
- Zeng P, Qin Y H, Zhou L C, et al. Calculation and spatio-temporal pattern of urban new quality productivity in China[J]. Progress in Geography, 2024, 43(6): 1102-1117.
- [30] 韩文龙, 张瑞生, 赵峰. 新质生产力水平测算与中国经济增长新动能[J]. 数量经济技术经济研究, 2024, 41(6): 5-25.
- Han W L, Zhang R S, Zhao F. The measurement of new quality productivity and new driving force of the Chinese economy[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2024, 41(6): 5-25.
- [31] 李光勤, 李梦娇. 中国省域新质生产力水平评价、空间格局及其演化特征[J]. 经济地理, 2024, 44(8): 116-125.
- Li G Q, Li M J. Evaluation, spatial pattern and evolution characteristics of new quality productivity in China province[J]. Economic Geography, 2024, 44(8): 116-125.
- [32] 陈雪. 新质生产力、全国统一大市场与中国式产业链现代化[J]. 工业技术经济, 2024, 43(9): 14-23.
- Chen X. New quality productivity, national unified large market and Chinese style industrial chain modernization[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2024, 43(9): 14-23.
- [33] 贺正楚, 李玉洁, 任宇新. 从生产力到新质生产力: 基于新中国经济发展进程的考察[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 2024, 27(3): 94-103.
- He Z C, Li Y J, Ren Y X. From productivity to new quality productivity: An examination based on the economic development process of new China[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Social Science Edition), 2024, 27(3): 94-103.
- [34] 赵君阳, 费宇. 数字经济对新质生产力的影响及空间溢出效应[J]. 学术探索, 2024(11): 121-131.
- Zhao J Y, Fei Y. The impact and spatial spillover effects of the digital economy on new quality productivity[J]. Academic Exploration, 2024 (11): 121-131.
- [35] Hossain M A, Chen S S, Khan A G. Decomposition study of energy-related CO₂ emissions from Bangladesh's transport sector development [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(4): 4676-4690.
- [36] 牛鸿蕾, 刘志勇. 中国碳锁定效应的测度指标体系构建与实证分析[J]. 生态经济, 2021(2): 22-27.
- Niu H L, Liu Z Y. Construction of measurement indicator system of China's Carbon Lock-In effect and its empirical analysis[J]. Ecological Economy, 2021(2): 22-27.
- [37] 李刚, 马羽洁, 牛冲槐. 煤炭资源型地区技术锁定效应测度研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(12): 147-153.
- Li G, Ma Y J, Niu C H. Study on technology lock-in effect in coal resource-based areas[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(12): 147-153.
- [38] 郭丰, 任毅, 柴泽阳. "双碳"目标下数字基础设施建设与城市碳排放: 基于"宽带中国"试点政策的准自然实验[J]. 中国经济问题, 2023 (5): 164-180.
- Guo F, Ren Y, Chai Z Y. Digital infrastructure construction and urban carbon emissions under the "carbon peaking and carbon neutrality goal": A quasi-natural experiment of "broadband China" pilot policy[J]. China Economic Studies, 2023(5): 164-180.
- [39] Li H N, Mu H L, Zhang M, et al. Analysis on influence factors of China's CO₂ emissions based on Path - STIRPAT model[J]. Energy Policy, 2011, 39(11): 6906-6911.
- [40] 李栋梁. 中国省域建筑业碳解锁效率的时空演变与提升策略研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2023.
- Li D L. Spatio-temporal evolution and improvement strategy of provincial construction industry Carbon Unlocking efficiency in china[D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2023.
- [41] Guo L, Wang Y. How does government environmental regulation "unlock" carbon emission effect Evidence from China[J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2018, 16(3): 232-241.
- [42] 孙丽文, 赵鹏, 李少帅, 等. 中国省域碳锁定空间溢出效应及影响因素分析: 基于空间面板模型的实证检验[J]. 科技管理研究, 2020, 40 (3): 225-232.
- Sun L W, Zhao P, Li S S, et al. Analysis of spatial spill over effects and influencing factors of Carbon Lock-In of China's Provinces: Empirical test based on spatial panel model[J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40(3): 225-232.
- [43] 洪竞科, 刘禹彤, 陈雨欣, 等. 中国省域建筑业碳锁定效应时空演进[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1388-1404.
- Hong J K, Liu Y T, Chen Y X, et al. Temporal and spatial evolution of Carbon Locking effect of construction industry in China province

[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1388-1404.

[44] 董碧滢, 徐盈之, 孙文远. "调结构"视角下绿色技术创新的碳解锁路径研究: 环境规制的调节效应[J]. 研究与发展管理, 2023, 35(4): 34-49.

Dong B Y, Xu Y Z, Sun W Y. Research on the carbon unlocking path of green technology innovation from the perspective of "economic restructuring": Moderating effect of environmental regulation[J]. R&D Management, 2023, 35(4): 34-49.

Analysis of the Driving Effect of New Quality Productive Forces on Carbon Lock-Out in Transportation Infrastructure Operation

CHEN Yun*, SUN Ge, LEI Ang

Institute of Transportation, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

Highlights

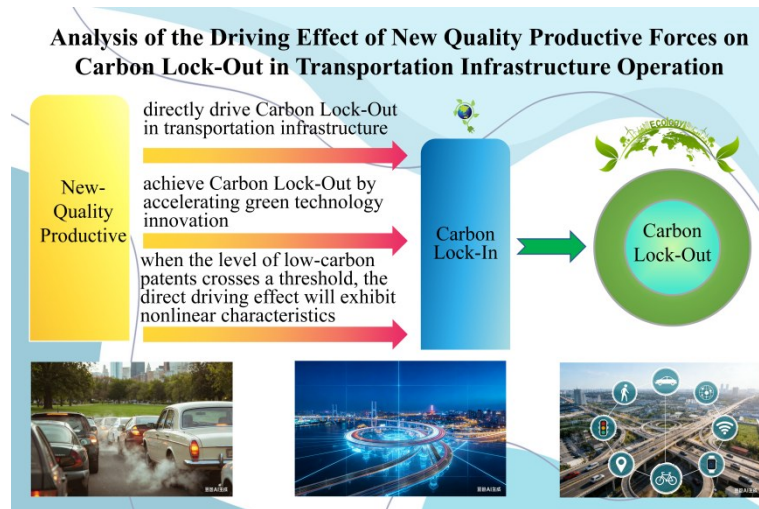
Focusing on transportation infrastructure operation, explore the driving mechanism of new quality productive forces on its carbon unlocking.

Using the fixed effect, mediating effect, and threshold effect models, this study analyzes 2013—2022 panel data for the Yangtze River Delta's three provinces and one municipality.

Using the fixed effect, mediating effect, and threshold effect models, this study analyzes 2013—2022 panel data for the Yangtze River Delta's three provinces and one municipality.

Based on the findings, this study offers suggestions on focusing on new quality productive forces development and strengthening green technology industry-university-research cooperation for long-term planning.

Graphical Abstract



Abstract: This study takes new quality productive forces as the core entry point, focusing on the field of transportation infrastructure operation—a sector with high carbon emissions. Its primary objective is to explore the driving mechanism through which new quality productive forces promote carbon lock-out in the operation of transportation infrastructure. By clarifying the internal logical relationship between new quality productive forces and the low-carbon transformation of transportation infrastructure operation, this study aims to provide theoretical support for breaking the high-Carbon Lock-In of this sector, thereby aligning with China's "Dual Carbon" goals (peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality) and the requirements of high-quality development.

To achieve the aforementioned research objectives, an integrated econometric analysis framework is adopted, combining three models: the fixed effects model, the mediating effect model, and the threshold effect model. The empirical research is conducted based on panel data covering three provinces (Jiangsu, Zhejiang, Anhui) and one municipality (Shanghai) in the Yangtze River Delta region, with a time span from 2013 to 2022. This regional scope is selected due to the Yangtze River Delta's advanced

economic development, mature transportation infrastructure system, and early practice in low-carbon development, which ensures the representativeness and reliability of the research sample.

The empirical results of this study reveal three key findings: First, new quality productive forces exert a significant positive driving effect on Carbon Lock-Out in the operation of transportation infrastructure, indicating that the development of new quality productive forces can effectively promote the reduction of carbon emissions in this sector. Second, new quality productive forces facilitate Carbon Lock-Out by advancing the research and development (R&D) and application of green technologies, where green technological innovation serves as a critical intermediary channel linking new quality productive forces to carbon lock-out. Third, low-carbon patents exhibit a single threshold characteristic: when the development level of low-carbon patents is below the threshold, the driving effect of new quality productive forces on Carbon Lock-Out is relatively weak; once the threshold is crossed, the driving effect of new quality productive forces shows a marginal increasing trend.

This study makes two main contributions. Theoretically, it constructs a systematic analytical framework of "driving force-intermediary path-threshold condition", which comprehensively reveals the multi-dimensional influence mechanism of new quality productive forces on carbon lock-out in transportation infrastructure operation and fills the theoretical gap in the research on the connection between new quality productive forces and low-carbon operation of infrastructure. Practically, it puts forward targeted policy suggestions for long-term planning: first, focus on the development of new quality productive forces to enhance the core driving force for carbon lock-out; second, strengthen industry-university-research cooperation in green technologies to smooth the intermediary transmission path; third, promote the dissemination of low-carbon patent technologies to give full play to the threshold role of low-carbon innovation and sustain the driving effect of new quality productive forces on carbon lock-out.

Keywords: new quality productive; transportation infrastructure; carbon lock-out; fixed effects; mediating effect; threshold effect