

新能源汽车技术创新 何以提升地区碳排放效率?

——基于中国274个城市的实证分析

易 兰,田明甫,邹 凡,闫 帅

(西安交通大学 金禾经济研究中心,西安 710049)

摘要:基于2006—2022年274个中国城市的面板数据,采用CCR和超效率SBM模型测算了样本城市每年的碳排放效率,并运用双向固定效应模型实证分析了新能源汽车技术创新对地区碳排放效率的影响,研究发现:(1)新能源汽车技术创新水平的提高显著提升了地区碳排放效率。(2)机制分析发现,新能源汽车技术创新通过推动汽车产业升级和能源消费拉动两个渠道提高地区碳排放效率。(3)技术异质性分析发现,以三电系统(电池、电驱、电控)为代表的新能源汽车技术创新中,电池技术创新对于地区碳排放效率提升最为明显,而电驱动技术和电控技术的提升作用不明显。(4)地区异质性分析发现,在新能源汽车推广应用城市、低占有率城市和具有配套企业的城市中,新能源汽车技术创新的提升作用更为明显。

关键词:新能源汽车;技术创新;碳排放效率;超效率SBM模型

DOI:10.13956/j.issn.1001-8409.2025.07.11

中图分类号:F426.4;X321

文献标识码:A

文章编号:1001-8409(2025)07-0089-08

How does Technological Innovation in New Energy Vehicles Enhance Regional Carbon Emission Efficiency? Based on Empirical Analysis of 274 Cities in China

YI Lan, TIAN Ming-fu, ZOU Fan, YAN Shuai

(Jinhe Center for Economic Research, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Based on the panel data of 274 Chinese cities from 2006 to 2022, this paper uses CCR and super-efficiency SBM models to measure the annual carbon emission efficiency of the sample cities, and uses two-way fixed effect model to empirically analyze the impact of technological innovation of new energy vehicles on regional carbon emission efficiency. The results are as follows: (1) the improvement of technological innovation level of new energy vehicles has significantly improved the regional carbon emission efficiency. (2) Mechanism analysis found that the technological innovation of new energy vehicles improved regional carbon emission efficiency through two channels of promoting the upgrading of the automobile industry and promoting energy consumption. (3) The analysis of technological heterogeneity found that among the technological innovations of new energy vehicles represented by three electric systems (battery, electric drive and electronic control), battery technology innovation had the most significant effect on the improvement of regional carbon emission efficiency, while the improvement of electric drive technology and electronic control technology was not obvious. (4) The regional heterogeneity analysis found that in the cities where new energy vehicles are promoted and applied, the cities with low market share and the cities with supporting enterprises, the technological innovation of new energy vehicles has a more obvious role in promoting.

Key words: new energy vehicles; technological innovation; carbon emission efficiency; super-efficiency SBM model

引言

近年来,全球平均气温不断上升,极端天气事件频发,不仅对自然生态系统造成了不可逆的损害,也对人类社会的可持续发展带来了严峻威胁,这使得碳排放的

控制与碳排放效率的提升成为世界各国应对环境挑战的核心任务^[1]。在应对全球气候变化的共同努力下,碳达峰碳中和已成为中国政府明确的战略目标。实现这些目标的关键在于大幅提升碳排放效率,即通过减少单

收稿日期:2024-11-07

基金项目:国家社会科学基金项目(22FJYB046);陕西省自然科学基金研究计划杰出青年基金项目(2024JC-JCQN-12)

作者简介:易 兰(1980—),女,湖北麻城人,教授,研究方向为环境经济;田明甫(1998—),男,河南新乡人,博士研究生,研究方向为环境经济(通讯作者);邹 凡(1998—),女,上海人,博士研究生,研究方向为环境经济;闫 帅(1996—),男,陕西渭南人,博士研究生,研究方向为环境经济。

位经济产出所需的碳排放量,实现经济增长与碳减排的协同发展^[2]。对于中国这样一个以化石能源为主、经济体量巨大的国家而言,提升碳排放效率不仅关乎生态环境的保护,更是实现碳达峰碳中和目标的核心路径之一^[3]。

提升碳排放效率不仅仅依赖于能源结构的调整 and 传统产业的优化升级,更需要通过技术创新,如新能源汽车技术的突破来实现^[4]。交通运输行业是中国碳排放的重要来源之一,当前交通运输碳排放约占中国总体碳排放的10%以上^①,其中公路运输占到了交通运输碳排放的87%以上^②,传统燃油汽车的高排放特点使得这一行业的碳排放控制难度较大,新能源汽车的环保作用日益凸显。而新能源汽车的环保性能以及普及程度很大程度上取决于三电系统的技术进步^[5],在这一背景下,新能源汽车技术创新的作用愈发受到广泛关注^[6]。作为绿色低碳交通的代表,新能源汽车技术的进步,尤其是电池、电驱、电控等关键领域的突破^③,为提升交通领域乃至整个经济的碳排放效率提供了有力支撑。新能源汽车技术创新不仅在减少直接碳排放方面具有显著效果,更通过推动绿色交通的普及和推广,引领区域经济向更高效、更环保的方向转型^[7]。因此,深入研究新能源汽车技术创新对碳排放效率的影响,对于中国实现碳达峰碳中和目标具有重要的现实意义。这不仅能够为学术界提供新的研究视角,也能够为政策制定者在制定相关发展战略时提供经验依据。

从现有关于新能源汽车对碳排放的研究来看,绝大部分集中于新能源汽车的普及对地区污染排放的影响,就其减排效果也存在争议。部分持正面观点的学者认为新能源汽车的推广,在地区减排上具有明显的促进作用。赵小磊等^[8]从空间溢出的角度考察新能源汽车推广对地区碳排放的影响,研究发现新能源汽车推广具有明显的正向溢出效应。Wang等^[9]研究显示,在新能源汽车推广示范城市,新能源汽车的推广使城市碳强度降低了约4.5%。而部分持负面观点的学者则认为新能源汽车在节能减排上并无明显作用。李雪娇等^[10]研究认为中国现有的电力结构未能对新能源汽车的减排效果提供有力支持,新能源汽车在使用端将碳排放转移到发电部门。Su等^[11]分析发现新能源汽车对于地区PM2.5的减少并未有明显效果,新能源汽车不能被视为缓解空气问题的主要措施。

无论是何种观点,大多研究都只停留在新能源汽车推广对于碳排放的影响,对于减排效果的争议本质上还是新能源汽车动力来源问题,新能源汽车能否切实实现减排目标,很大程度上取决于三电系统的技术提升。本文基于2006至2022年间中国274个城市的面板数据,采用双向固定效应模型,并结合CCR和SBM模型测算城市碳排放效率,系统地探讨了新能源汽车技术创新对

地区碳排放效率的影响。本文的边际贡献如下:在理论分析上,就新能源汽车技术创新如何影响区域碳排放效率提供了一体化的解释逻辑。在经验研究上,丰富了区域性碳排放效率的评估,为区域性减排的机理研究提供了新的微观证据。在实践层面上,为发展新质生产力、促进新能源汽车产业绿色发展提供了政策启发,为政策制定者在应对气候变化、推动经济绿色转型方面提供了有益的参考和指导。

1 理论分析与研究假设

1.1 汽车产业升级

新能源汽车技术的发展不仅改变了传统汽车的制造流程,还带动了电池技术、电机制造、智能网联技术等关键领域的突破,促使汽车产业从传统燃油驱动模式转向电动、智能、互联的新模式。这些技术创新推动汽车制造向更高技术含量、更高附加值方向转型升级,形成了新的产业结构,并促进了汽车产业结构向绿色、高效方向发展。同时,新能源汽车技术创新带来了显著的技术溢出效应,不仅推动了新能源汽车本身的性能提升,还改进了传统燃油汽车的技术水平,例如,电池技术的进步提升了新能源汽车续航能力的同时,也推动了混合动力车型的发展;智能网联技术促进了自动驾驶和车联网的应用,提升了汽车整体能效,减少了能源消耗和碳排放^[12]。

此外,新能源汽车技术创新优化了汽车产业的资源配置,企业将更多研发和生产资源投入新技术,高科技含量和高技能劳动力需求增加,促使传统高污染制造环节向低碳、绿色方向转型,提高了资源利用效率,加速了产业整体升级。基于上述分析,提出如下研究假设:

H1:新能源汽车技术创新通过促进汽车产业升级提高碳排放效率。

1.2 能源消费拉动

新能源汽车的核心驱动力来自电能,相较于传统内燃机汽车依赖的化石燃料,电力作为能源载体具有显著的低碳优势,尽管电网尚未完全清洁化,但从生命周期来看,电动汽车整体碳排放更低,且电网清洁化趋势与集中排放治理确保了长期环保潜力^[13]。

三电系统(电池、电机、电控)的技术突破不仅提升了新能源汽车的能效,还优化了电力消费模式,通过“车联网互动”(Vehicle-to-Grid, V2G)技术,新能源汽车在低负荷时储能、高负荷时返还电能至电网,有效缓解电力供需压力,减少对化石能源发电的依赖,同时推动电网运行效率提升。此外,新能源汽车的大规模普及带动了储能技术与充电基础设施的快速发展,如退役电池梯次利用储能系统缓解新能源发电波动性,超充与智能充电技术提升充电效率并优化电网负荷曲线,推动了“源-网-荷-储”一体化能源管理模式的形成。随着电力

①数据来源: https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/14/content_5668085.htm。

②数据来源: https://m.thepaper.cn/baijiahao_23307959。

③资料来源: <https://www.automotiveworld.cn/zh-cn.html#>。

消费的增加,新能源汽车对电力行业产生“倒逼效应”,加速风能、太阳能等可再生能源替代煤炭等高碳能源,并结合智能电网与分布式能源系统,降低了发电端和用电端的碳排放强度,为新能源汽车的清洁运营提供保障。通过电力消费的持续增长与清洁化转型,新能源汽车在推动电网和能源系统优化升级的同时,实现了双向减排效益,全面提升了地区碳排放效率,为低碳发展目标

提供了重要支撑。基于上述分析,提出如下研究假设:

H2:新能源汽车技术创新通过促进电力消费拉动提高碳排放效率。

综上所述,新能源汽车技术创新对于碳排放效率的影响可能存在以下影响路径,下文将通过实证检验分析技术创新对于碳排放效率是否具有提升作用,接着进行机制检验来探究其作用机制。

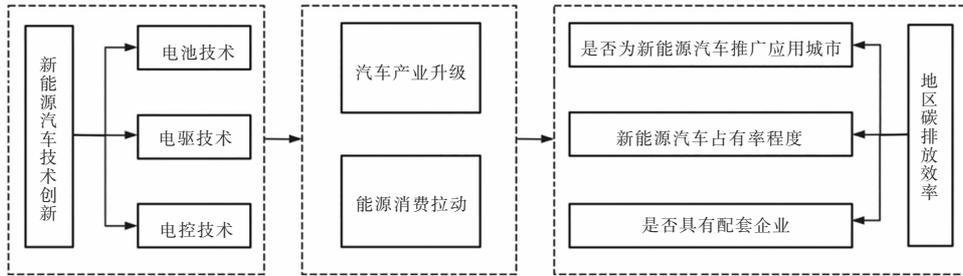


图1 机制分析示意图

2 研究设计

2.1 研究样本

考虑到2006年中国新能源汽车步入产业准备阶段^[14],次年《新能源汽车生产准入管理规则》正式实施,对于新能源汽车生产技术门槛进行了限制,所以本文选取2006年为样本起始时期,选取2022年为样本终止日期是因为各地方统计局尚未公布2023年的地方数据,基于数据可得性选取2006—2022年为研究的时间区间。在研究样本上选择274个城市为样本(包括直辖市、地级市),剔除部分在研究区间内数据缺失严重的城市,最终形成了274个地级市2006—2022年的面板数据。

2.2 模型设定

在模型设定上本文选择双向固定效应模型,模型设定如式(1),其中 $SBM(CCR)_{it}$ 为根据CCR和SBM模型

所测算的城市碳排放效率, $innovation_{it}$ 为核心解释变量,表示所在城市当地新能源汽车技术创新水平。其系数 β_1 的正负与大小表示对碳排放效率的影响效果, i,t 分别表示城市和年份, X_{it} 表示一系列控制变量, γ_t 为时间固定效应, μ_i 为城市固定效应, ε_{it} 为随机扰动项。

$$SBM(CCR)_{it} = \beta_0 + \beta_1 innovation_{it} + \theta X_{it} + \gamma_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

2.3 变量说明

被解释变量:在碳排放效率的测算上,不同于全要素生产率的测算,必须要考虑到碳排放的影响,所以在投入和产出指标上要充分考量。借鉴Fare等^[15]构建的环境生产函数,重点对能源消费进行考察,非期望产出选择碳排放。劳动、资本、能源、期望和非期望产出为所选择的所有指标^[16]。选取指标的具体说明见表1。

表1 指标选取

一级指标	二级指标	三级指标
投入指标	劳动	各城市从业人数
	资本	在资本衡量上以永续盘存法衡量的资本存量表示,具体计算公式为: $K_{i,t} = K_{i,t-1}(1 - \delta_{i,t}) + I_{i,t}$ 。变量 $K_{i,t}$ 表示i城市t的资本量;变量 $\delta_{i,t}$ 为资本折旧率,参考张军等 ^[17] 的做法,折旧率9.6%来衡量;变量 $I_{i,t}$ 表示i城市t的资本量,资本单位为亿元
期望产出	能源	城市能源消耗主要为石油、天然气和用电量。为方便统一单位均以万吨标准煤来进行折算。按照《综合能耗计算通则》中的折算标准,选取折算系数分别为1.33 kg tec/m ³ 、1.7143 kg tec/kg、0.1229 kg tec/(kW · h)
	GDP	以2006年为基期进行平减处理
非期望产出	城市碳排放	参照吴建新等 ^[18] 的做法,选择包括天然气、液化石油气、电能、热能等直接或间接产生的碳排放

在测算方式的选择上,为确保估计结果的稳健性,本文选择CCR(Charnes, Cooper, and Rhodes Model)模型和超效率SBM(Super Efficiency Slacks - Based Measure Model)模型两种方式对城市碳排放效率进行测算。两种模型的计算公式如下。

投入导向的CCR模型:假设共有n个决策单元(DMUs),每个DMU使用三类投入(劳动力、资本、能

源)来生产期望产出(城市GDP)和非期望产出(CO₂)。对于第0个DMU,其效率值可以通过以下模型测度:

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\lambda, \theta} \theta & (2) \\ \text{s. t. } & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{i0}, i = 1, 2, \dots, m; (m \text{ 种投入}) \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{r0}, r = 1, 2, \dots, q; (q \text{ 种期望产出}) \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j b_{kj} \leq b_{k0}, k = 1, 2, \dots, h; (h \text{ 种非期望产出}) \\ & \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

在进行超效率 SBM 测算前,先识别有效 DMU,非角度当期标准效率 SBM:

$$Min_{\lambda, s^+, s^-} P = \frac{(1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{i0}^-}{x_{i0}})}{1 + \frac{1}{q+n} (\sum_{r=1}^q \frac{s_{r0}^+}{y_{r0}} + \sum_{k=1}^h \frac{s_{k0}^-}{b_{k0}})} \quad (3)$$

s. t. $\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_{i0}^- = x_{i0}, i=1, 2, \dots, m;$ (m 种投入)
 $\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_{r0}^+ = y_{r0}, r=1, 2, \dots, q;$ (q 种期望产出)
 $\sum_{j=1}^n \lambda_j b_{kj} + s_{k0}^- = b_{k0}, k=1, 2, \dots, h;$ (h 种非期望产出)

$\lambda_j \geq 0; s_{i0}^-, s_{r0}^+, s_{k0}^- \geq 0, j=1, 2, \dots, n$
 非角度的超效率 SBM, 包含投入和产出导向:

$$Min_{\lambda, s^+, s^-} P = \frac{(1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{i0}^-}{x_{i0}})}{1 + \frac{1}{q+n} (\sum_{r=1}^q \frac{s_{r0}^+}{y_{r0}} + \sum_{k=1}^h \frac{s_{k0}^-}{b_{k0}})} \quad (4)$$

s. t. $\sum_{j=1, i \neq 0}^n \lambda_j x_{ij} - s_{i0}^- \geq x_{i0}, i=1, 2, \dots, m;$ (m 种投入)
 $\sum_{j=1, i \neq 0}^n \lambda_j y_{rj} + s_{r0}^+ \leq y_{r0}, r=1, 2, \dots, q;$ (q 种期望产出)
 $\sum_{j=1, i \neq 0}^n \lambda_j b_{kj} - s_{k0}^- \geq b_{k0}, k=1, 2, \dots, h;$ (h 种非期望产出)

$1 + \frac{1}{q+n} (\sum_{r=1}^q \frac{s_{r0}^+}{y_{r0}} + \sum_{k=1}^h \frac{s_{k0}^-}{b_{k0}}) \geq \varepsilon;$
 $\lambda_j \geq 0; s_{i0}^-, s_{r0}^+, s_{k0}^- \geq 0, j=1, 2, \dots, n (j \neq 0)$
 解释变量: 本文以 incoPat 全球专利数据库为数据

源,参考李晓敏等^[5]的研究,以各城市的新能源汽车三电系统的专利申请量为地区新能源汽车技术创新水平的代理变量。借鉴其他学者常用的高频词统计方法,对新能源汽车专利注册中的主要技术方向进行分析,以识别推动新能源汽车产业发展的核心技术。具体步骤如下:首先,在中国期刊网搜索与新能源汽车相关的高频词汇,然后在国家知识产权局网站上检索相关内容,对实用新型专利和发明专利进行筛选,初步获得样本城市中新能源汽车相关专利申请数据。通过数据库中的系统分析,基于国际专利分类号(IPC号),发现新能源汽车领域的基本电器元件(H01)、发电和变电(H02)、一般车辆(B60)等类别,在2000—2022年间的专利注册中占据领先地位,这三种专利在新能源汽车相关专利申请中的占比超过了70%。此外参考前人的研究成果,最终确定新能源汽车核心技术为三电系统,即电池(分类号:H01M、H02J)、电驱(分类号:B60L、B60K)与电控(分类号:H02P)。明确了相关专利的分类号后,本文利用 incoPat 全球专利数据库获取了各类专利技术的量化指标,避免了专利重复计数,最终得到了274个城市在2006—2022年间电池、电驱动和电控技术方面的专利数据,作为本文的研究基础。

控制变量:选取地区GDP总值、第二产业增加值、地区环境规制强度、地区能源消耗量、R&D研发投入和外商直接投资额为控制变量。各变量符号、单位、测量方式以及数据来源见表2。

表2 各变量说明

变量名	变量符号	测量方式	数据来源
碳排放效率	CCR SBM	采用CCR和超效率SBM模型进行测算,具体测算过程见上文	《中国城市统计年鉴》 《中国环境统计年鉴》
新能源汽车技术创新	innovation	所在城市当年新能源汽车三电系统专利申请量+1取对数	incoPat全球专利数据库
地区GDP总值	gdp	以2006年为基期进行平减处理	《中国城市统计年鉴》
第二产业增加值	ivalue	以2006年为基期进行平减处理	《中国城市统计年鉴》
R&D研发投入	rd	以2006年为基期进行平减处理	《中国城市统计年鉴》
外商直接投资额	fdi	以2006年为基期进行平减处理	《中国城市统计年鉴》
能源消耗量	energy	以煤炭、石油、天然气、电力等能源量折算成万吨标准煤来表示	《中国环境统计年鉴》
环境规制强度	er	参考陈诗一等 ^[19] 的做法以各地政府工作报告中与环保相关的词语数量来衡量	通过python爬取各城市政府工作报告得出

3 实证分析

3.1 描述性统计

表3展示了各变量定义及描述性统计,其中小部分缺失值采用自回归移动平均法补齐,处理软件为Stata17和Excel。所有变量均通过了VIF检验,各系数均远小于10,说明变量间不存在多重共线性,为下文实证研究提供了依据。

3.2 基础回归

为考察新能源汽车技术创新对于地区碳排放效率的影响,借助模型(1)对样本城市碳排放效率进行实证检验,基础回归结果如表4所示,为确保结果可靠性,列(1)、列(2)中采用混合OLS估计。列(3)、列(4)中加入

表3 描述性统计

Variable	N	Mean	SD	Min	Max
CCR	4638	0.522	0.148	0.0420	1.432
SBM	4638	0.330	0.125	0.0200	1.178
innovation	4638	3.338	1.974	0	9.830
gdp	4638	306.8	193.2	51.06	3608
ivalue	4638	297.5	218.4	32.00	5127
er	4412	37.27	21.18	1	139
energy	4638	13.748	1.265	9.419	17.544
rd	4638	710.5	5734	0	171681
fdi	4638	357.0	1051	0	20398

表4 基础回归

VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)
	CCR	SBM	CCR	SBM
innovation	0.00307** (0.001)	0.00266** (0.001)	0.00947*** (0.003)	0.00780*** (0.003)
gdp	0.00001 (0.000)	0.00001 (0.000)	-0.00002 (0.000)	-0.00003** (0.000)
ivalue	-0.00002** (0.000)	-0.00001* (0.000)	0.00001 (0.000)	0.00002** (0.000)
er	-0.00008 (0.000)	-0.00010 (0.000)	-0.00000 (0.000)	-0.00002 (0.000)
energy	-0.00688** (0.003)	-0.00551** (0.002)	-0.01471** (0.006)	-0.00889* (0.005)
rd	-0.00000*** (0.000)	-0.00000*** (0.000)	-0.00000** (0.000)	-0.00000 (0.000)
fdi	0.00000*** (0.000)	0.00000** (0.000)	0.00000 (0.000)	-0.00000 (0.000)
Observations	4412	4412	4412	4412
R-squared	0.011	0.006	0.450	0.442
Cons	YES	YES	YES	YES
City	NO	NO	YES	YES
Year	NO	NO	YES	YES

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平上显著,括号内为标准误,下同

时间、城市固定效应。结果显示,无论采用哪种估计,核心解释变量 innovation 的系数均在5%的显著性水平上显著为正,说明新能源汽车技术创新显著促进了地区碳排放效率。

3.3 内生性检验

基础回归中虽然已经对时间和城市进行了双向固定,然而新能源汽车技术创新仍可能与无法观测的影响因素有关,如当地实行的能源政策等,所以在本节将采用工具变量法进行两阶段最小二乘回归来克服内生性影响。在工具变量的选取上,本文选择城市的年平均气温为工具变量,这样选择有以下两点原因。

从与内生变量的相关性来看:在低温环境下,电池的性能会受到显著影响,包括能量密度降低、充电效率下降和续航里程缩短等^[20]。这就要求新能源汽车的电池技术必须进行创新,以提高在低温条件下的表现。这种技术需求直接推动了对电池材料、管理系统和热管理技术的研发,促进了新能源汽车技术的整体进步^[21],气温越低,新能源汽车在冷启动和加热系统方面的需求也越高。例如,在低温条件下,新能源汽车需要有效的加热系统来保持车内舒适度,这可能会增加能耗。因此,汽车制造商必须创新设计和技术,以提高车辆在寒冷气候中的能效。这种适应性要求推动了新能源汽车相关技术的不断革新。

从与不可观测变量的无关性来看:年平均气温通常被视为一个随机因素,其变化不受人控制或政策影响。因为气温的变化主要受自然环境因素影响,与新能源汽车技术创新和城市碳排放效率之间的关系是间接的。气温的变化通常不受社会经济因素、政策变化或市

场动态的直接影响,因此更可能独立于不可观测变量。

上文从相关性、无关性两个角度论述了选择地区气温为工具变量的合理性。下文将通过2SLS进行工具变量回归来验证基础回归中的结论,地区气温以城市年平均气温值来表示。数据基于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下属国家环境信息中心(NCEI)提供的原始数据编制而成。利用气象观测站点的这些栅格图和全国地级市的行政边界数据,计算出每个地级市的逐日平均气温。最终,基于这些日均值,进一步统计各城市每年的平均气温。回归结果如表5所示,第一阶段的回归结果如列(1)、列(3)所示,可以看出城市气温的回归系数均在1%的显著性水平上显著为负,说明地区气温与新能源汽车技术创新具有明显的负相关关系。其次第二阶段回归结果如列(2)、列(4)所示,核心解释变量 innovation 的系数均在10%的显著性水平上显著为正,表明新能源汽车技术创新确实提高了地区碳排放效率。此外第一阶段回归的F值为9.1784表明不存在弱工具变量问题,Wu-Hausman F值为3.179和4.104表明 innovation 具有内生性,符合工具变量的使用条件。

3.4 稳健性检验

本文接下来还进行了以下稳健性检验,包括滞后控制变量、系统GMM估计、排除地区政策影响以及调整样本观测区间。由于超效率SBM模型相比CCR模型在考虑松弛变量、区分有效决策单元、处理不可行解以及提供更全面的效率评估方面具有明显的优势,所以下文在进行回归时只汇报超效率SBM模型的回归。具体回归结果限于篇幅不再汇报,具体细节可联系作者获取。

表5 内生性检验

VARIABLES	(1) CCR_first stage	(2) CCR_second stage	(3) SBM_first stage	(4) SBM_second stage
temperature	-0.03744 *** (0.012)		-0.03744 *** (0.012)	
innovation		0.12860 * (0.076)		0.12106 * (0.066)
F		9.1784		9.1784
Wu - Hausman F		3.17927		4.10491
Observations	4349	4349	4349	4349
R - squared	0.931	0.283	0.931	0.217
Controls	YES	YES	YES	YES
Cons	YES	YES	YES	YES
City	YES	YES	YES	YES
Year	YES	YES	YES	YES

4 机制检验

上文得到了新能源汽车技术创新对地区碳排放效率的经验性证据,本节将基于理论分析,从产业升级和能源消费两个维度来阐释其作用机制。参考江艇^[22]的研究,构建以下模型,其中 M_it 为机制变量,包括产业升级(Upgrade)和能源消费(Electricity)两部分,其余变量设置同基础回归:

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 innovation_{it} + \theta X_{it} + \gamma_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

4.1 汽车产业升级

在汽车产业结构升级的指标选取上,参考袁航等^[23]的研究,具体测算公式如式(6)所示。其中 $y_{i,t}$ 表示城市 i 的汽车产业产值 t 年份在城市 GDP 中的占比; $Lp_{i,t}$ 表示城市 i 的汽车产业产值在 t 年的劳动生产率, $Lp_{i,t}$ 具体计算公式如式(7)所示,其中 $Y_{i,t}$ 和 $L_{i,t}$ 分别表示城市 i 汽车产业在 t 年的 GDP(单位:亿元)和城市从业人员数(单位:万人),数据来源自 EPS 数据库、《中国工业统计年鉴》和《中国城市统计年鉴》。

$$Upgrade_{i,t} = y_{i,t} \times Lp_{i,t} \quad (6)$$

$$Lp_{i,t} = Y_{i,t} / L_{i,t} \quad (7)$$

根据模型(5)对碳排放效率的影响机制进行考察,机制分析结果如表6列(1)所示,其中核心解释变量 innovation 的系数均在 1% 的显著性水平上显著为正,表明新能源汽车技术创新可以通过汽车产业升级来提高地区碳排放效率,由此 H1 得证。

4.2 能源消费拉动

电能消耗的增长被认为是新能源汽车技术的优化过程。在新能源汽车推广应用的背景下,电力作为主要驱动能源,与传统化石燃料相比,具有明显的环保优势。随着电力驱动的普及,新能源汽车在减少碳排放和降低空气污染方面发挥着重要作用,而这一过程也伴随着技术的不断优化和提升。在能源消费的指标选取上参考 Sun 等^[24]的研究,选取城市当年用电总量的对数值来衡量,数据来源为《中国城市统计年鉴》。

根据模型(6)对碳排放效率的影响机制进行考察,机制分析结果如表6列(2)所示,其中核心解释变量 in-

novation 的系数分别在 1% 的显著性水平上显著为正,表明新能源汽车技术创新可以通过电力消费拉动来提高地区碳排放效率,由此 H2 得证。

表6 机制分析

VARIABLES	(1) Upgrade	(2) Electricity
innovation	0.00531 *** (0.001)	0.01902 *** (0.006)
Observations	4412	4412
R - squared	0.904	0.959
Controls	YES	YES
Cons	YES	YES
City	YES	YES
Year	YES	YES

5 异质性分析

5.1 技术异质性

在基础回归部分,本文以新能源汽车在电池、电驱和电控系统上的专利申请量之和的对数值为解释变量,讨论了新能源汽车技术创新对地区碳排放效率的影响效果。本节将进一步根据新能源汽车三类主要技术(电池、电驱和电控)进行回归。技术异质性分析的回归结果如表7所示,可以看出碳排放效率对电池技术创新的回归系数 battery 在 5% 的显著性水平上显著为正,而电驱和电控的回归系数 drive 和 control 均不显著,表明电池技术的创新对于地区碳排放效率的提升作用最大。

可能的原因如下:首先,电池技术直接影响能源效率和续航能力。电池是新能源汽车的核心部件,其技术水平直接决定了车辆的能量密度、续航能力和充电效率。电池技术的提升,如高能量密度电池和快速充电技术的发展,不仅能够显著提高单次充电的续航里程,还能够减少充电时间和频率。高效的电池技术意味着新能源汽车在同样的能源消耗下能够行驶更长的距离,从而提高能源利用效率,减少单位里程的碳排放。这种直接的能效提升对碳排放效率的提高作用最为显著。

5.2 区域异质性

接下来本文将从是否为新能源汽车推广应用城市、

新能源汽车占有率程度以及当地是否具有配套企业三方面考察样本城市的地区异质性。

表7 技术异质性

VARIABLES	(1) SBM	(2) SBM	(3) SBM
battery	0.00581 ** (0.003)		
drive		0.00385 (0.002)	
control			0.00359 (0.003)
Observations	4412	4412	4412
R - squared	0.442	0.442	0.441
Controls	YES	YES	YES
Cons	YES	YES	YES
City	YES	YES	YES
Year	YES	YES	YES

新能源汽车推广应用城市对于新能源汽车技术创新以及碳排放效率可能存在明显影响,接下来按照所在地区是否为新能源汽车推广应用城市^①进行分组回归。在进行分组回归前通过了 Fisher 组间差异检验,表明不同分组之间确实存在显著差异。回归结果如表 8 列(1)、列(2)所示,可以看出在推广应用城市中的 innovation 系数在 1% 的显著性水平上显著为正,而非推广应用城市中的 innovation 系数不显著,表明在新能源汽车推广应用城市,新能源汽车技术创新对于地区碳排放效率的提升作用更为明显。可能的原因是,在新能源汽车推广应用城市,市场对新能源汽车的需求较为旺盛,这种强劲的市场需求为技术创新提供了实践的土壤。随着推广应用的深入,消费者的使用反馈直接推动了技术的持续优化。

新能源汽车技术创新水平可能很大程度上取决于当地新能源汽车的占有率以及相关企业,所以本文接下来对样本城市分组,划分为高新能源汽车占有率组和低

占有率组,具有相关配套企业城市组和不具有相关配套企业城市组。

具体来说,根据 2016—2022 年所有样本城市新能源汽车销量取平均数,若某城市 2016—2022 年新能源汽车平均销量高于该值则划分为高占有率组,若低于该值则划分为低占有率组。数据来源为中国银保监会交强险上险数据,之所以是选取 2016 年而不是样本观测年份 2006 年是因为,基于数据可得性尚能找到的最早年份为 2016 年。

接下来选择 439 家 A 股新能源汽车企业作为相关配套企业,之所以选择这 439 家企业是因为这些企业基本上涵盖了新能源汽车上中下游产业链,同时这些企业在相关产业链中具有领先地位。若城市与上述企业的注册地一致,那么就划分为配套企业城市组,否则划分到非配套企业城市组。

根据以上划分进行分组回归,在进行分组回归前通过了 Fisher 组间差异检验,回归结果如表 8 所示。其中列(3) innovation 系数不显著,列(4) innovation 系数在 1% 的显著性水平上显著为正,由此说明新能源汽车技术创新在低占有率城市中的促进效果较明显,而高占有率城市中效果不明显。可能的原因是:低占有率城市对新能源汽车的市场潜力相对较大,消费者对新技术的接受度可能更高,地区企业因此更有动力进行技术创新。技术创新带来的新产品能够迅速满足市场需求,从而提升碳排放效率。

根据表 8 列(5)、列(6)所示,列(5) innovation 系数在 1% 的显著性水平上显著为正,列(6) innovation 系数不显著,由此说明新能源汽车技术创新在具有配套企业城市中的促进效果较明显,而非配套企业城市中效果不明显。可能的原因是:在具有配套企业的城市,完整的产业链能够促进各环节之间的协同创新。这种协同效应使得新能源汽车技术的研发、生产和应用更加高效,进而推动碳排放效率的提升^[25]。

表8 地区异质性

VARIABLES	(1) 推广应用城市 SBM	(2) 非推广应用城市 SBM	(3) 高占有率城市 SBM	(4) 低占有率城市 SBM	(5) 配套企业城市 SBM	(6) 非配套企业城市 SBM
innovation	0.01868 *** (0.007)	0.00395 (0.003)	0.01697 (0.012)	0.00734 *** (0.003)	0.02182 *** (0.007)	0.00433 (0.003)
Observations	1270	3127	995	3417	1765	2647
R - squared	0.417	0.466	0.330	0.483	0.411	0.482
Controls	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Cons	YES	YES	YES	YES	YES	YES
City	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Year	YES	YES	YES	YES	YES	YES

6 研究结论与政策建议

6.1 研究结论

基于对 2006—2022 年 274 个中国城市面板数据的

分析,本文得出以下结论:第一,新能源汽车技术创新显著提高了地区碳排放效率。通过 CCR 和 SBM 模型测算碳排放效率,并利用双向固定效应模型和 2SLS 估计进

①新能源汽车推广城市分为两批进行,具体名单见: https://www.ndrc.gov.cn/fgsj/tjsj/cy/fz/zz/fz/201312/t20131202_1149748.html 和 https://www.gov.cn/gzdt/2014-02/08/content_2581798.htm。

行实证分析,结果表明技术创新对碳排放效率有显著提升作用,且通过多项稳健性检验进一步验证。第二,新能源汽车技术创新通过推动汽车产业升级和能源消费拉动两个渠道提升碳排放效率。第三,技术异质性分析显示,三电系统中电池技术创新对碳排放效率的提升作用最为显著,而电驱动和电控技术作用较弱,表明电池技术进步是关键。第四,地区异质性分析表明,新能源汽车推广应用城市、低占有率城市及具有配套企业的城市中,技术创新的促进效果更为明显。

6.2 政策建议

依据上述分析,本文提出以下三点政策建议。

首先,从政府层面来看,相关部门应建立新能源汽车技术创新的“区域示范计划”。研究结果表明,不同地区在碳排放效率提升方面存在显著的异质性。因此,建议相关部门重点关注区域示范项目,选择具有较高碳排放效率潜力的城市作为示范区,鼓励以城市群为试点集中资源开展新能源汽车技术创新的试点工作,以建立示范效应。此外,应设立相应的评估机制,定期对示范区的技术创新和碳排放效率提升进行评估,并分享成功经验与教训,以供其他地区借鉴。

其次,从企业层面来看,应在碳交易市场中实施“碳交易+技术创新”机制,设立专项激励措施,鼓励企业在新能源汽车技术创新方面的投资。企业通过研发和应用新技术可获得额外的碳配额或减排奖励,从而激励其加大技术创新投入,特别是加大对于新能源汽车电池技术的资金投入。此外,企业应建立技术创新信用体系,使其在技术研发中取得的成就能够转化为市场信用,提升其融资能力和市场竞争力。

最后,从个人层面来看,鼓励个人参与技术创新和再培训。一方面,相关部门应建立技术创新众包平台,鼓励公民提交与汽车能源效率、排放降低相关的创意和解决方案,并为选出的优秀方案提供资金支持或技术指导。另一方面,应重视高校和职业院校合作,开设新能源汽车及可再生能源技术相关的培训课程,通过“岗课证赛创”五个维度提升个人技能和知识。

参考文献:

- [1] Xu J, Guan Y, Oldfield J, et al. China Carbon Emission Accounts 2020–2021[J]. *Applied Energy*, 2024, 360:122837.
- [2] Xu A, Song M, Wu Y, et al. Effects of New Urbanization on China's Carbon Emissions: A Quasi-Natural Experiment Based on the Improved PSM-DID Model[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2024, 200:123164.
- [3] Liu Y, Zhang X, Shen Y. Technology-Driven Carbon Reduction: Analyzing the Impact of Digital Technology on China's Carbon Emission and Its Mechanism[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2024, 200:123124.
- [4] Shi Z, Cheng J. How do Government Subsidies and Consumers' Low-Carbon Preference Promote New Energy Vehicle Diffusion? A Tripartite Evolutionary Game Based on Energy Vehicle Manufacturers, the Government and Consumers[J]. *Heliyon*, 2023, 9(3).
- [5] 李晓敏, 杨娇娇, 刘毅然. 技术进步对新能源汽车需求的影响——来自15个国家的经验证据[J]. *软科学*, 2020, 34(10):12-17.

- [6] Zhao M, Sun T. Dynamic Spatial Spillover Effect of New Energy Vehicle Industry Policies on Carbon Emission of Transportation Sector in China[J]. *Energy Policy*, 2022, 165:112991.
- [7] Liu M, Yang X, Wen J, et al. Drivers of China's Carbon Dioxide Emissions: Based on the Combination Model of Structural Decomposition Analysis and Input-Output Subsystem Method[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 100:107043.
- [8] 赵小磊, 李雪梅, 赵庆先. 新能源汽车推广降低了碳排放吗?——基于空间溢出效应的视角[J]. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(2):1-8.
- [9] Wang K, Zheng L J, Zhang J Z, et al. The Impact of Promoting New Energy Vehicles on Carbon Intensity: Causal Evidence from China[J]. *Energy Economics*, 2022, 114:106255.
- [10] 李雪娇, 安梦天. “用煤开车”: 新能源汽车真的减少了碳排放吗[J]. *财经科学*, 2023(6):88-105.
- [11] Su C-W, Yuan X, Tao R, et al. Can New Energy Vehicles Help to Achieve Carbon Neutrality Targets? [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297:113348.
- [12] Liu Z, Deng Z, He G, et al. Challenges and Opportunities for Carbon Neutrality in China[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(2):141-155.
- [13] 王永培, 马丁, 单葆国, 等. 电网发展、清洁能源接入与地区能源效率[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(3):39-48.
- [14] 李肆, 战建华. 中国新能源汽车产业的政策变迁与政策工具选择[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(10):198-208.
- [15] Färe R, Grosskopf S, Pasurka Jr C A. Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions[J]. *Energy*, 2007, 32(7):1055-1066.
- [16] 郭沛, 梁栋. 低碳试点政策是否提高了城市碳排放效率——基于低碳试点城市的准自然实验研究[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(7):1876-1892.
- [17] 张军 吴, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J]. *经济研究*, 2004(10):35-44.
- [18] 吴建新, 郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析[J]. *统计研究*, 2016, 33(1):54-60.
- [19] 陈诗一, 陈登科. 雾霾污染、政府治理与经济高质量发展[J]. *经济研究*, 2018, 53(2):20-34.
- [20] Song Z, Pan Y, Chen H, et al. Effects of Temperature on the Performance of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles: A Review[J]. *Applied Energy*, 2021, 302:117572.
- [21] Zhao X, Li X, Wu Y, et al. Assessment of the Effects of China's New Energy Vehicle Industry Policies: from the Perspective of Moderating Effect of Consumer Characteristics[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023:1-22.
- [22] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. *中国工业经济*, 2022(5):100-120.
- [23] 袁航, 朱承亮. 国家高新区推动了中国产业结构转型升级吗[J]. *中国工业经济*, 2018(8):60-77.
- [24] Sun H, Chen F. The Impact of Green Finance on China's Regional Energy Consumption Structure Based on System GMM[J]. *Resources Policy*, 2022, 76:102588.
- [25] 孙建国, 田明甫. 双积分政策是否促进了新能源汽车企业创新的“量质齐升”[J]. *软科学*, 2024, 38(5):79-84.

(责任编辑:何 敏)