

公共充电基础设施对电动汽车购买的 异质性影响研究

吕 冉¹, 李博浩², 李 敏³, 莫阮清¹, 方思懿⁴, 郭明星¹, 陆 彬⁴, 傅 晨¹

(1. 国网上海市电力公司 经济技术研究院, 上海 200233; 2. 中国船舶集团有限公司 综合技术经济研究院, 北京 100081;
3. 国网人才交流服务中心有限公司, 北京 100761; 4. 北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081)

摘 要: 交通部门是中国最重要的碳排放源之一, 交通电动化对实现双碳目标至关重要。本文以中国纯电动汽车消费为例, 采集2017年1月至2020年11月中国31个省份(因数据缺失, 不包含港澳台地区)充电桩数量及电动汽车销量数据构建面板固定效应模型和门槛效应模型, 实证分析了不同类型公共充电基础设施对不同用途纯电动汽车购买的影响, 以及不同地区温度对销量影响的门槛效应。研究发现公共充电桩数量增加1%, 纯电动汽车购买量显著增加0.85%, 其中出租租赁用途纯电动汽车销量显著增加1.57%。直流公共充电桩对纯电动汽车购买的影响远大于交流公共充电桩, 并对不同用途的电动汽车存在异质性影响。此外, 在气温更低的地方公共充电桩对纯电动汽车购买的影响更大, 其显著门槛值为15摄氏度, 且气温对出租租赁汽车的影响比非营业用途更大。政策制定者应合理考虑公共充电桩等基础设施的增设布局以保障电动汽车的续航能力, 从而促进交通运输部门的脱碳进程。

关键词: 充电基础设施; 电动汽车销量; 面板门槛模型; 温度调节

中图分类号: F572; F426; X24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2023)2—0143—12

一、引言

交通脱碳是减缓气候变化的一个主要挑战(Creutzig, 2015)。交通运输行业约占全球能源相关二氧化碳排放量的四分之一, 其中私人车辆约占运输能源使用量和排放量的一半。发展以低碳电力为动力的新能源汽车、广泛取代传统化石燃料汽车被视为应对气候变化、推动绿色发展的基本特征, 这与将全球变暖控制在2摄氏度或更低的幅度一致。中国高度重视交通领域减排与新能源汽车推广工作, 国务院、生态环境部与发改委等部门相继出台一系列政策与指导意见(《新能源汽车产业发展规划(2021—2035)》《加快推进公路沿线充电基础设施建设行动方案》《国家发展改革委关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见》)推动全国车辆电动化、加快公共领域充电设施建设与保障服务任务落实。随着“碳达峰、碳中和”目标的提出, “优化产业结构和能源结构, 大力发展新能源”成为其中的重点。“十四五”规划中也强调, 要加快推进绿色低碳发展, 构建以新能源为基础的绿色电力系统。新能源汽车推广成为交通领域节能降耗实现“碳中和”的最优路径之一。

然而, 交通领域公共充电基础设施建设成为制约中国交通电动化发展的重要瓶颈。虽然政府和汽车制造商都在电动汽车方面设定了雄心勃勃的目标, 然而, 电动汽车行驶里程短是其推广的最关键障碍之一。截至2022年6月, 中国电动汽车保有量已达到1001万辆, 其中上半年新注册登记220.9万辆, 同比增长

投稿日期: 2022-09-17

基金项目: 国网上海经研院技术服务项目“面向碳中和目标的需求侧典型领域电力需求预测与调节潜力评估”(SGSHJY00ZN-JS2100233); 上海市智能电网需求响应重点实验室“面向碳中和目标的需求侧典型领域电力需求预测与调节潜力评估”(SGSHJY00ZNJS2100233)

作者简介: 吕冉, 硕士, 国网上海市电力公司经济技术研究院工程师, 研究方向: 需求侧管理, 能源和电力规划, 虚拟电厂; 李博浩, 硕士, 中国船舶集团有限公司综合技术经济研究院工程师, 研究方向: 市场营销; 李敏, 硕士, 国网人才交流服务中心有限公司开发部主任, 研究方向: 管理创新; 莫阮清, 国网上海市电力公司经济技术研究院高级工程师, 研究方向: 能源与电力经济; 方思懿, 北京理工大学管理与经济学院硕士研究生, 研究方向: 技术经济及管理; 郭明星, 硕士, 国网上海市经济技术研究院高级工程师, 研究方向: 电力需求侧管理; (通讯作者)陆彬, 北京理工大学管理与经济学院博士研究生, 研究方向: 能源系统建模和需求侧管理; 傅晨, 硕士, 国网上海市经济技术研究院助理工程师, 研究方向: 电力规划。

100.26%,创历史新高。但是与新能源汽车迅猛发展相比,截至 2021 年底,中国公共类充电桩共计 114.7 万台,2022 年上半年增量为 130.1 万台,桩车增量比为 1:2。新能源汽车充电基础设施设置总量不够、覆盖面不足等问题还较为突出,在一定程度上影响了用户体验,大力推行充换电网络基础设施建设至关重要。在储能和高功率充电方面取得进一步技术突破之前,建设大规模的充电基础设施可能是推动电动汽车采用的最有效方式(Gong et al, 2013)。

国内外学者通过构建仿真模型对不同情景下交通碳排放量进行预测,指出交通领域存在巨大的碳减排潜力(赵国涛等, 2021),以纯电动汽车为代表的新能源汽车是减少化石能源消耗、实现交通电气化转型的关键一环(陈湛清等, 2021;张全斌和周琼芳, 2022)。作为电动汽车出行的重要保障,中国不同时期、不同地域充电桩建设速度及分布密度具有较为明显的差异,关于其使用模式、选址规划的研究在一定程度上证实,以充电桩为代表的充电基础设施对于新能源汽车的购买的影响也有较多研究,但是在充电桩不同技术类型、电动汽车使用用途的异质性等方面的研究还亟待补充。

本文研究了电动汽车公共充电桩的部署及其对电动汽车购买的影响,基于 2017 年 1 月至 2020 年 11 月中国 31 个省份(不包含港澳台地区)的公共充电桩月度面板数据、纯电动汽车购买量数据,运用实证分析,在探究充电桩数量对纯电动车购买影响的基础上,深入分析了充电桩性质、充电桩技术类型对不同购买用途的电动汽车影响的异质性影响,并以气温为关键因素,研究充电桩建设和纯电动车关系的地域性差异,深入分析气温对充电桩与电动汽车购买关系的调节作用,并提出了基于气温的不同地区公共充电桩建设目标,从而为合理规划充电桩建设落地,实现经济绩效与环境绩效的双赢提供了参考。

本文研究可能的贡献有:首先,为其他国家,特别是日本、韩国、新加坡等人口密集、对公共充电桩依赖严重的国家,通过建设公共电动汽车充电桩来推广电动汽车提供实证参考。从有限的电动汽车早期采用数据中探索公共充电桩的发展规律,为未来的部署提供政策经验参考;其次,较为全面地分析了充电桩不同性质、技术类型对不同购买用途的电动汽车影响的异质性影响,并探究了气温在其中的调节作用;第三,考虑了公共充电桩和电动汽车销量之间的双向影响关系,使用格兰杰因果检验来描述发现的双向影响关系,而不是单向的效果,使用停车场数量通过交互构建了工具变量来避免可能存在的内生性问题,以更精确地识别公共充电桩部署对电动汽车扩散的影响,这是一个新的方法视角。

二、文献综述

(一)交通领域电气化转型及碳减排潜力研究

交通运输行业是仅次于发电和供热行业的第二大碳排放源,将环境目标纳入交通方式选择问题至关重要(史丹和叶云岭, 2022;赵继敏, 2021)。对交通领域可削减碳排放进行分解及研判有重要的应用价值(王靖添等, 2021;Chen and Wang, 2016),中国正在积极推进交通电气化,以此实现交通领域的碳减排目标。Ding 等(2013)基于对交通领域情景的分析预测,如果采取更大强度的减排措施,到 2015 年碳排放量将减少 3101 万吨,到 2020 年将减少 4881 万吨。Brenna 等(2014)研究了使用光伏系统作为电动汽车充电的能源供应商的技术优势。Fathabadi(2017)设计并建造了一种新型并网太阳能电动汽车充电站,实验结果表明,该充电站可以在晴天产生足够的电能为电动汽车充电,并在阴天平平衡电网中的负载需求。另外,由于充电和放电的灵活性,电动汽车是用作备用容量的良好候选者,并且可以在车辆到电网概念中提供辅助服务,电动汽车电池作为存储设备有助于适应间歇性太阳能和风能的调峰(Jargstorf and Wickert, 2013),从而通过促进电力使用的清洁化来降低碳排放。

现有研究中通过构建仿真模型对交通领域碳减排潜力进行核算的文献较为丰富,其中电动汽车的采用可以缓解传统能源消费带来的碳排放。Qian 等(2021)分析了各省不同运输方式的经济效益、碳排放强度和投入产出效率,基于生命周期评价理论构建了地铁全生命周期碳排放评价方法,对地铁的碳排放强度与碳减排水平进行了定量化分析。Lin 和 Wang(2022)从运输结构优化和运输方式转变的角度探讨运输结构调整的碳减排效应。Chai 等(2016)研究了道路通行能力如何影响燃油消耗,包括道路可达性和交通需求(“诱导效应”)、外源性效率政策和技术进步(“反弹效应”)如何影响废气排放,实证建立了道路交通需求、燃油消耗和废气排放的联立方程系统,讨论了道路通行能力和燃油效率政策造成的影响的传递机制,发现中国的反弹效应和诱导效应大于美国的大多数研究。

(二)公共充电基础设施研究现状

充电基础设施是电动汽车用户绿色出行的重要保障(王娜等,2021),是促进新能源汽车产业发展、推进新型电力系统建设、推动交通电气化和深入减排的重要支撑。Hardman等(2018)从不同角度对涉及电动汽车充电基础设施的文献进行了全面审查,如充电桩的数量、定价、成本和位置。充电基础设施可以大致分为充电桩、充电站和换电站。充电桩是指兼具停车和充电功能的设施,充电桩的布置灵活,占地面积较小。因此成为大部分汽车用户选择的电能补给方式,也是当前最为重点建设的充电基础设施。充电桩根据使用场景主要分为为社会车辆提供公共充电服务的公共充电桩和为私人用户提供充电服务的私人充电桩(Larson et al,2014)。公共充电桩可分为建设在公共停车场、为社会车辆提供服务的普通公共充电桩和建设在单位自有停车场、为单位内部人员或公共服务用车使用的专用充电桩。根据技术类型,充电桩可分为直流快充和交流慢充两类。交流充电桩一般安装在小区停车场、路边等场所,充电时间一般比较长,这种充电桩一般适用于普通私家车,停车后即开始充电的情景。直流充电桩一般安装在大型商场、高速公路服务区等,充电速度快,但同时也会给电网带来很大的瞬时负载,给电力系统带来挑战。

电动汽车充电基础设施的发展还处于起步阶段,关于这一主题的许多文章是从宏观和规划的角度出发的,主要包括充电基础设施的选址规划、使用模式等(Smith and Alan,2020;Wirges et al,2012)。充电基础设施的位置会极大地影响充电需求,Neubauer和Wood(2014)通过应用车辆电池寿命分析和模拟工具,研究了公共充电基础设施对不同充电基础设施场景的敏感性。电动汽车充电基础设施在减少碳排放方面的效果、将充电设施与电网相结合的车到网技术使得充电站的建设很有前景,但其经济表现也存在资金成本高、利用率低和盈利能力低等问题(Schroeder and Traber,2012)。为了促进充电基础设施的安装,学者们对充电基础设施的经济性进行了深入研究,考虑在电力规划和管理中匹配电动车用户需求是一个重点研究方向。微观视角的研究主要集中在消费者和投资者的偏好和决策上,研究优化电动汽车充电基础设施分布的方法是一个流行的研究领域,这需要考虑到电动汽车用户的行驶需求和充电模式。陈林晗(2017)基于电动汽车的大规模轨迹数据挖掘出出行模式如何为公共充电基础设施的发展提供信息,通过结合充电地点和移动模式的不同数据集,以描述充电基础设施的不同需求,并概述了潜在的不同技术选项。一个流行的研究问题涉及充电基础设施的地理密度分布。当充电基础设施的密度很高时,很难保持盈利,但它可能有助于缓解电动汽车用户的里程焦虑。但是如果建造过多的充电站,它们将得不到充分利用。因此无法经济地运营。充电基础设施的位置也会明显影响运维成本,这将进一步影响充电价格。Wang等(2021)使用自然语言处理技术,从公共社交媒体上发布的消费者评论中探索消费者对充电基础设施的偏好。

公共充电基础设施,特别是快速充电基础设施的不发达,是加速电动汽车普及的最大障碍(Shimin et al,2019)。一方面,充电基础设施的建设数量落后于新能源汽车发展,难以完全满足电动汽车的充电需求。许多有意愿购买纯电动汽车的消费者考虑到日常充电问题可能会放弃购买。Kihm和Trommer(2014)的研究证实了这一观点,他们发现充电基础设施是电动汽车渗透率的最佳预测指标。Dong和Lin(2012)证明公共快速充电基础设施的存在可以极大地提高驾驶更远距离的可能性,并降低与电动汽车相关的社会成本;另一方面,已建成的充电基础设施质量和利用率较低。许多充电桩建设时间较早,这些充电桩基本都是慢充桩,充电速度慢且停车费和电费高。因此使用率非常低。Funke等(2015)的研究也表明了公共充电基础设施的可用性对于电动汽车的大规模普及至关重要。考虑到这些不能用或不好用的僵尸桩和废桩,中国充电基础设施将进一步制约电动汽车发展。因此,中国的充电基础设施亟待提升质量的同时扩大新建容量,为了实现这个目标应该采取的措施也值得重点关注。

(三)充电基础设施对电动汽车采用的影响研究现状

充电基础设施一直是电动汽车采用的主要障碍。具有成本效益的充电基础设施对于支持未来的节能交通系统至关重要。先进公共充电技术的快速发展和部署,以及其他智能移动解决方案,如车网链接和共享汽车服务,将影响未来的车辆拥有和使用、发电和替代燃料能源市场。这将进一步导致替代交通方式的利用、能源消耗和经济活动发生重大变化。

充电基础设施支持与电动汽车采用之间的关系是一个经典而复杂的“鸡与蛋”问题。一方面,随着电动汽车市场的不断增长,需要更先进的公共充电基础设施来支持道路上大量电动汽车的需求;否则,充电拥堵甚至基础设施故障可能是不可避免的。另一方面,扩展的充电基础设施理论上可以通过扩大电动行驶里程

来减少消费者的里程焦虑,从而进一步提高电动汽车的接受度(Ma et al, 2019)。投资建设充电基础设施的目的是促进电动汽车的采用,但如果只考虑充电基础设施对电动汽车的单向影响会导致对这个问题的片面认识。在电动汽车推广的初期阶段,政府可能会在一些公共设施(如政府大楼、商场等)建设充电桩,以鼓励消费者购买电动汽车(Serradilla et al, 2017)。在激励政策的刺激下,更多的企业在更多可能产生充电需求的场所(如室外停车位、地下停车场、路边停车位等)建设充电桩(Madina et al, 2016)。此外,由于电动汽车增加带来的充电需求驱动了充电基础设施的进一步增长(Helmus et al, 2018),这与充电基础设施行业投资的技术和财务壁垒不高有关(Zhu et al, 2017)。

文献中的大多数研究都集中在评估需要多少公共充电基础设施来支持不断增长的电动汽车需求。Ma等(2019)通过问卷调查调查了中国消费者对替代性激励政策的支付意愿。他们发现,如果城市地区每5公里有一个充电站,消费者愿意额外支付21260元来购买电动汽车。另外一些研究使用间接数据[如全球定位系统(GPS)定位数据、历史行驶数据、实验室测试]或有限的充电数据,来推断估计未来的基础设施建设以满足电动汽车需求(Funke et al, 2019)。消费者对电动汽车的里程焦虑也会影响公共充电基础设施的建设密度及购买电动汽车的决定(Herberz et al, 2022)。消费者可能无法对电动汽车的生命周期成本做出合理估计,这种不合理性可能会影响他们的购买决策(Virender et al, 2020)。Springel(2016)将电动汽车市场建模为具有网络外部性的双边市场,并发现电动汽车购买量与充电基础设施补贴之间存在很强的正相关关系。Levinson和West(2017)根据加油站数量与加油站数量的比率模拟了公共充电对电动汽车市场的影响,研究发现建设直流快速充电站在增加电动汽车销量、增加电动里程和降低温室气体排放方面比普通充电站更有效。

三、研究设计

(一)数据来源及变量说明

本文公共充电桩数据(PCP)来源于中国充电联盟,总量数据时间范围为2017年1月至2020年11月,共47个时点,包含31个省市(因数据缺失,不包含港澳台地区)。其中,直流桩、交流桩、公共桩、专用桩数据受可得性限制,选择时间为2017年1月至2019年12月,共36个时点。纯电动汽车购买量(EVP)数据来源于国产乘用车销售数据,以此来匹配公共充电桩数据。由于本文考虑的是诸如新能源汽车这种清洁技术产品的采用,在早期发展阶段,消费者不太可能在产品属性(如方便性、可用性、价格、质量、性能)上做出妥协来购买绿色产品,新能源汽车行业面临着所谓的“先有鸡还是先有蛋”的困境:一方面,在足够的消费者采用电动汽车产品之前,企业不愿意进行充电桩建设的资本密集型投资;另一方面,在没有服务基础设施的情况下,消费者对采用电动汽车这类清洁技术产品犹豫不决。2017—2020年是中国电动汽车推广、充电桩部署快速发展的早期阶段,这样一个迅速增长和活跃的市场非常适合作为研究样本(何蛟和张谦然, 2021;冯乾隆等, 2021),图1展示了电动汽车销量和公共充电桩建设之间的关系。从公共充电桩总数上看,全国公共充电桩总数从2016年的14.1万个增加到了2021年的114.7万个,增长率达到713%,呈现出指数增长趋势(张勇等, 2014)。分不同类型的公共充电桩来看,2016—2019年直流充电桩增长率为449%,交流充电桩增长率为471%,公共充电桩的增长率为220%,专用充电桩的增长率为713%。分地区来看,不同省份的公共充电桩建设情况存在显著差异。广东、上海、江苏、浙江等东南沿海的经济发达地区公共充电桩建设速度明显更快,辽宁、黑龙江、甘肃、西藏等东北或西部地区,公共充电桩建设速度明显更加缓慢。

此外,本文参考该领域以往的研究(Wenig et al, 2019; Singh et al, 2020; Haustein et al, 2021)选取了多个可能影响到电动汽车购买的因素作为控制变量,包括人均可支配收入(*INC*)、人口密度(*POP*)、教育程度

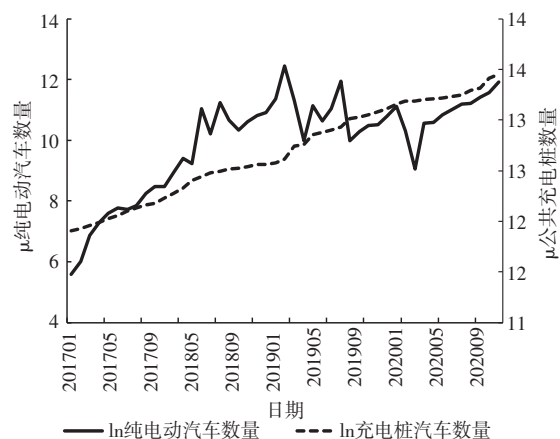


图1 电动汽车销量与公共充电桩建设的发展趋势

(*EDU*)、空气质量指数(*AQI*)和全年平均气温(*TEMP*)。人均可支配收入(*INC*)来源于中国统计年鉴中季度人均可支配收入;人口密度(*POP*)为地区人口数量和土地面积相除,其中人口数量由季度数据经过指数平滑得到,土地面积来源于中国统计年鉴,单位是人每平方千米;教育程度(*EDU*)为统计年鉴中抽样调查的大学本科及以上学历与被调查对象总数相除得到的占比;空气质量指数(*AQI*)是从空气质量在线监测分析平台获得的;全年平均气温(*TEMP*)来源于气象观测站点,单位为摄氏度。各变量描述性统计见表1。

表1 变量描述性统计

变量名称	变量符号	单位	均值	标准差	最小值	最大值
纯电动汽车购买量	<i>EVP</i>	辆	1786.508	3072.961	0	25550
公共充电桩数量	<i>PCP</i>	台	11586.420	15223.390	9	76051
人均可支配收入	<i>INC</i>	元	2423.290	1029.736	888.010	6603.740
人口密度	<i>POP</i>	人/平方千米	465.247	708.832	2.775	3948.280
教育程度	<i>EDU</i>	%	7.799	5.735	2.391	35.305
空气质量指数	<i>AQI</i>	微克每立方米($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	71.253	22.633	25	168
全年平均气温	<i>TEMP</i>	摄氏度	15.619	10.816	-19	31.5

(二)研究模型设计

1. 公共充电桩对纯电动汽车购买影响的基准模型

为研究公共充电桩对纯电动汽车购买的影响,本文构建如下面板固定效应模型:

$$EVP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 PCP_{it} + \sum_{j=1}^n \alpha_j X_{it} + \mu_{it} + \lambda_i + \gamma_t \quad (1)$$

其中: EVP_{it} 为纯电动汽车购买量; PCP_{it} 为公共充电桩数量; X_{it} 为控制变量,包括人均可支配收入(*INC*)、人口密度(*POP*)、教育程度(*EDU*)、空气质量指数(*AQI*)和全年平均气温(*TEMP*)等影响因素; n 为控制变量个数; λ_i 为个体固定效应,捕捉了不同省份间的不随时间而变的个体异质性,如省份的资源禀赋、地形、气候等因素; γ_t 为月度时间固定效应,控制了不同省份共同经历的政策变化、市场环境变化及受疫情影响等宏观层面的影响因素; μ_{it} 为随机误差项,包含随时间变化且特定于省份的未观察到的需求冲击; α 为待估系数。

2. 气温对公共充电桩与纯电动车购买关系的调节效应检验模型

为了研究气温的调节效应,本文构建如下调节效应检验模型:

$$EVP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 PCP_{it} + \alpha_2 TEMP_{it} + \alpha_3 PCP_{it} \times TEMP_{it} + \sum_{j=1}^n \alpha_j X_{it} + \mu_{it} + \lambda_i + \gamma_t \quad (2)$$

其中: $TEMP_{it}$ 为全年平均气温; $PCP_{it} \times TEMP_{it}$ 为公共充电桩数量与全年平均气温的交互项。

3. 公共充电桩与纯电动车购买的温度门槛效应模型

根据 Hansen 关于门槛效应模型的研究,本文进一步考虑温度引起的门槛效应,将温度作为门槛变量探究公共充电桩对纯电动汽车购买的影响,模型如式(3)所示:

$$EVP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 PCP_{it} + I(TEMP < \phi) + \alpha_2 PCP_{it} I(TEMP < \phi) + \sum_{j=1}^n \alpha_j X_{it} + \mu_{it} \quad (3)$$

其中: $TEMP_{it}$ 为门槛变量; $I(\cdot)$ 表示指示函数,当括号内条件成立时该函数取值为1,否则为0; ϕ 为门槛阈值。

四、实证分析

(一)公共充电桩对纯电动汽车销量的影响及异质性分析

1. 充电桩对纯电动汽车销量的整体影响

利用面板固定效应模型可以得到公共充电桩对纯电动汽车购买影响的基准模型估计结果,见表2。

列(1)中没有加入控制变量,列(2)中加入了控制变量,回归结果表明,公共充电桩数量对纯电动汽车购买量的影响显著为正。每增加一个公共充电桩,会使纯电动汽车的购买量增加0.111个。列(3)和列(4)对自变量和因变量同时取对数,结果发现公共充电桩的数量每增加1%,纯电动汽车购买量将会增加0.851%,且在1%显著性水平上显著,说明随着公共充电桩数量的增加,居民购买新能源汽车的意愿显著加强。

表 2 公共充电桩对纯电动汽车购买影响的基准模型

变量	(1)EVP	(2)EVP	(3)lnEVP	(4)lnEVP
PCP	0.108*** (10.39)	0.111*** (8.29)		
lnPCP			1.280*** (23.73)	0.851*** (14.85)
Constant	540.129*** (4.50)	-1520.812*** (-2.97)	-5.065*** (-11.33)	-6.045*** (-2.71)
样本数	1457	1457	1457	1457
R ²	0.349	0.395	0.632	0.684
控制变量	否	是	否	是
省份固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是

注:括号中为 t 值;***表示在 1% 的显著性水平上显著。

2. 充电桩对不同用途的纯电动汽车销量影响

为探究公共充电桩数量对不同用途纯电动汽车购买影响的差异,本文将纯电动汽车划分为出租租赁用途纯电动汽车和非营业纯电动汽车两大类。出租租赁纯电动汽车是指纯电动出租车、纯电动网约车、纯电动租赁汽车等以运营为目的的纯电动汽车;非营业纯电动汽车是指不以运营为目的,个人或企业使用的纯电动汽车。回归结果见表 3。

回归结果显示,公共充电桩对两类用途的纯电动汽车均有显著影响。公共充电桩的数量每增加 1%,对出租租赁用途纯电动汽车销量和非营业用途纯电动汽车销量分别增加 1.574% 和 0.739%,且在 1% 显著性水平上显著,这说明公共充电桩对出租租赁用途的电动汽车销量比非营业用途电动汽车销量更加重要。

从实际使用场景上看,出租租赁用途的纯电动汽车日平均行驶里程远高于非营业纯电动汽车,为了保证行驶里程,需要不定时在不同地区的公共充电桩进行充电,而大部分非营业电动汽车更习惯在家中的私人充电桩充电,仅在超出日常续航里程的时候才会使用公共充电桩充电。因此,公共充电桩数量对出租租赁纯电动汽车的影响显著大于非营业纯电动汽车。

3. 充电桩技术类型对纯电动汽车销量影响

为了探究公共充电桩的不同技术类型对纯电动汽车购买的影响,本文将公共充电桩划分为交流桩(ACP)和直流桩(DCP)两大类,分别探究其影响的异质性,回归结果见表 4。

回归结果显示,交流桩对纯电动汽车购买的影响系数为 0.130,而直流桩对纯电动汽车购买的影响系数为 0.414,二者分别在 5% 和 1% 的显著性水平下显著。因此,直流充电桩对纯电动汽车购买的影响远大于交流桩。

交流桩对出租租赁用途纯电动汽车购买的影响系数为 0.682,而直流桩对出租租赁用途纯电动汽车购买的影响系数为 0.367,二者均在 1% 的显著性水平下显著。因此,对于出租租赁用途纯电动汽车来说交流充电桩对纯电动汽车购买的影响远大于直流桩,这与交流充电桩充电成本更加低廉有关。

交流桩对非营业用途纯电动汽车购买的影响并不显著,而直流桩对非营业用途纯电动汽车购买的影响显著,影响系数为 0.369。因此,对于非营业用途的纯电动汽车来说直流充电桩是更为重要的。

上述结果出现的原因可能是,大部分非营业纯电动汽车的使用场景为夜晚在家中的私人充电桩充电,以满足第二天使用需求,使用场景中可能存在较少的长途使用需求。而长距离行驶对纯电动汽车的充电速度和充电时间要求较高,公共交流充电桩难以满足快速充电需求,而直流充电桩则能借助功率优势,更快地为汽车补充电能,增加续航里程。因此,直流桩对非营业纯电动汽车更加重要。

表 3 充电桩对不同购买用途纯电动影响的回归结果

变量	(1)出租租赁 lnEVP	(2)非营业 lnEVP
lnPCP	1.574*** (12.64)	0.739*** (12.73)
Constant	-15.190*** (-4.25)	-6.905*** (-2.96)
样本数	1457	1457
R ²	0.396	0.688
控制变量	是	是
省份固定效应	是	是
时间固定效应	是	是

注:括号中为 t 值;***表示在 1% 的显著性水平上显著。

表 4 不同技术类型充电桩对纯电动影响的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	全样本 lnEVP	全样本 lnEVP	出租租赁 lnEVP	出租租赁 lnEVP	非营业 lnEVP	非营业 lnEVP
lnACP	0.130** (2.17)		0.682*** (6.86)		0.084 (1.52)	
lnDCP		0.414*** (7.60)		0.367*** (3.78)		0.369*** (7.08)
Constant	-8.761*** (-2.53)	-8.071*** (-3.20)	-17.678*** (-3.70)	-25.410*** (-5.28)	-9.341** (-2.66)	-8.256*** (-3.16)
样本数	1116	1116	1116	1116	1116	1116
R ²	0.623	0.671	0.336	0.304	0.634	0.673
控制变量	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是

注:括号中为 t 值;**、***表示在 5%、1% 的显著性水平上显著。

对于出租租赁用途纯电动汽车来说,其使用场景更加复杂,一般并没有固定的充电场所,存在非常多的不确定性。因此必须使用公共充电桩。而交流桩因建设要求和建设成本低,数量较多,分布广泛,而且对各类车型的兼容性好,所以对于出租租赁用途的纯电动汽车来说更加重要。

4. 充电桩性质对纯电动汽车销量影响

为了探究不同性质公共充电桩对纯电动汽车购买的影响,本文将公共充电桩划分为普通公共桩(*OPCP*)和专用充电桩(*SPCP*)两类。其中,普通公共充电桩是指为社会车辆提供公共充电服务的充电桩,专用充电桩是指企业为内部人员建设或公共事业用车专用的公共充电桩。回归结果见表5。

表5 不同性质充电桩对纯电动影响的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	lnEVP	lnEVP	出租租赁 lnEVP	出租租赁 lnEVP	非营业 lnEVP	非营业 lnEVP
lnOPCP	0.474**(7.15)		1.036*** (11.52)		0.388*** (5.80)	
lnSPCP		0.388*** (6.63)		0.400*** (4.45)		0.361*** (6.34)
Constant	-7.120***(-2.43)	-8.367***(-3.17)	-19.955***(-4.38)	-25.342***(-5.45)	-7.664**(-2.52)	-8.430***(-3.10)
样本数	1116	1116	1116	1116	1116	1116
R ²	0.661	0.656	0.369	0.304	0.660	0.664
控制变量	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是

注:括号中为*t*值; **、***表示在5%、1%的显著性水平上显著。

回归结果显示,普通公共桩和专用充电桩在促进纯电动汽车购买方面差异并不大,普通公共桩影响系数为0.474,而专用充电桩影响系数为0.388,普通公共桩在促进作用方面稍强于专用充电桩。

值得注意的是,对于出租租赁用途纯电动汽车来说,普通公共充电桩要明显更加重要,这也再次证明了目前出租租赁用途纯电动汽车存在充电地点不规律和时间不固定的问题,建立专用充电桩也难以满足其充电需求。对于非营业用途纯电动汽车来说,两类充电桩的影响并不存在显著差异,这也说明其在公共充电中既有在单位专用充电桩充电行为又有普通公共桩充电的行为。

(二)温度对公共充电桩与纯电动汽车购买关系的调节作用和门槛效应

在之前的研究中发现公共充电桩的建设具有非常明显的地区分布差异。东部地区公共充电桩的建设速度领先全国,而西部地区和东北地区公共充电桩的建设速度则落后全国平均水平。除经济发展水平差异外,各地区最为明显的差异就是地区气候,主要体现在气温的差异上。为了研究不同地区充电桩与纯电动车购买之间的关系,本文在控制了各地区经济水平因素后,以气温作为地区差异的代表指标,认为气温是影响二者关系的重要调节变量,本节将深入探讨该问题。

1. 气温对充电桩与纯电动车购买关系的调节作用

为了研究气温的调节效应,构建调节效应检验模型,其检验结果见表6。

调节效应检验结果显示,气温与公共充电桩数量的交互项不显著,证明气温对公共充电桩与纯电动汽车购买关系的调节作用并不显著。

2. 充电桩与纯电动车购买的温度门槛效应模型检验

本文采用Bootstrap自抽样法对气温门槛效应进行显著性检验,以存在单一门槛、双重门槛为假设进行门槛效应检验。见表7,气温存在1%的置信水平下显著的单一门槛。

门槛效应模型的阈值和置信区间估计结果见图2和表8,气温的门槛阈值估计为15摄氏度,其上下界限分别为15.5和13.5。

公共充电桩数量与纯电动汽车购买之间的门槛效应结果见表9。当全年平均气温低于15摄氏度时,公共充电桩对纯电动汽车购买的影响系数为0.09,从数值上看比较接近基准回归结果;当全年平均温度高于15摄氏度时,公共充电桩

表6 气温对公共充电桩与纯电动汽车购买关系的调节作用检验结果

被解释变量	EVP
PCP	0.093*(1.71)
PCP×TEMP	0.023(0.37)
TEMP	4195.953*** (4.49)
Constant	-3108.697*** (-3.78)
样本数	1457
R ²	0.395
控制变量	是
省份固定效应	是
时间固定效应	是

注:括号中为*t*值; *、**、***表示在10%、5%、1%的显著性水平上显著。

表7 气温的门槛效应检验

门槛数量	F统计量	P	BS次数
单一门槛	14.42	0.010	300
双重门槛	7.25	0.147	300

对纯电动汽车购买的影响系数为 0.06。可以发现,气温更低的地方,公共充电桩对纯电动汽车购买的影响更大。因此,气温更低的地方,公共充电桩对纯电动汽车购买更重要。

降低外部环境温度会导致纯电动汽车能耗增加,在寒冷条件下变化更大。气温越低,纯电动汽车续航能力差距越大,同时也就更需要公共充电桩来拓展其续航里程。相反,气温较高时家用充电桩完全可以满足纯电动汽车日常的续航需求,公共充电桩对纯电动汽车购买行为的影响也相应降低。在门槛模型中存在一个显著的门槛为全年平均气温 15 摄氏度,应该对全年平均气温低于 15 摄氏度的地区加大公共充电桩的建设力度,这样才能更好地促进消费者的购买和纯电动汽车在这些地区的发展和普及。

此外,通过进一步研究气温对充电桩与纯电动车购买在不同用途汽车的异质性,可以发现出租租赁用途汽车的气温门槛值为 -0.5 摄氏度,气温低于 -0.5 摄氏度时,充电桩对纯电动汽车购买的影响系数为 0.037,气温高于 -0.5 摄氏度时,充电桩对纯电动汽车购买的影响系数为 0.009;发现非营业用途汽车的气温门槛值为 16.5 摄氏度,气温低于 16.5 摄氏度时,充电桩对纯电动汽车购买的影响系数为 0.075,气温高于 16.5 摄氏度时,充电桩对纯电动汽车购买的影响系数为 0.053。因此,气温对出租租赁汽车的影响比非营业更大,这是因为出租租赁汽车的使用强度高,在低温条件下充电频率高。因此对公共充电桩的依赖程度明显高于非营业汽车。

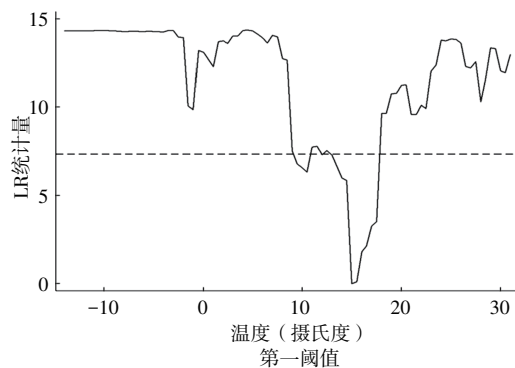


图 2 单一门槛 LR 统计量结果

表 8 门槛估计值和置信区间

门槛参数	门槛估计值	95% 置信区间
Th-1	15	(13.5, 15.5)

表 9 门槛效应模型结果

变量	EVP
$PCP(TEMP < 15)$	0.090*** (6.97)
$PCP(TEMP > 15)$	0.061*** (5.30)
Constant	-24359.38*** (-3.36)
样本数	1457
控制变量	是

注:括号中为 t 值;*,**,***表示在 10%、5%、1% 的显著性水平上显著。

五、稳健性检验

(一)公共充电桩和纯电动汽车购买的格兰杰因果关系检验

格兰杰因果关系将时间流引入了因果关系的讨论中,本文假设公共充电桩和纯电动汽车购买是两个平稳的序列,在控制纯电动汽车购买的滞后项的情况下,如果公共充电桩的滞后项仍然有助于解释纯电动汽车购买的当期值的变动,则认为公共充电桩对纯电动汽车购买产生因果关系。本文采用 Dumitrescu-Hurlin (DH) 格兰杰因果关系检验方法(Dumitrescu et al, 2012; Paramati et al, 2016)验证了公共充电桩和纯电动汽车购买之间互为因果关系的可能性,潜在的回归模型为

$$EVP_{i,t} = \alpha_i + \sum_{k=1}^K \gamma_{i,k} EVP_{i,t-k} + \sum_{k=1}^K \beta_{i,k} EVPCP_{i,t-k} + \mu_{i,t} \quad (4)$$

其中: EVP_{it} 为纯电动汽车购买量; $EVPCP_{it}$ 为各类公共充电桩数量,包括公共充电桩总量(PCP)交流桩(ACP)、直流桩(DCP)、普通公共桩(OPCP)、专用充电桩(SPCP); k 为滞后阶数; μ_{it} 为随机误差项,包含随时间变化且特定于省份的未观察到的需求冲击; α_i 为截距项; $\gamma_{i,k}$ 和 $\beta_{i,k}$ 分别为不同滞后期的纯电动汽车购买量和公共充电桩对当期纯电动汽车购买量的影响系数。

允许每个截面单元的回归系数是可变的,即在同一时间上,系数在省份之间不同。假设滞后阶数 k 对于所有省份是相同的,并且面板是平稳的。结果如表 10 所示,在 1% 的接受水平下,电动汽车销量与公共充电桩数量之间存在双向格兰杰因果关系,这也支持了在文献综述部分的推测,一些政策可以吸引公众的注意力,从而间接刺激电动汽车的购买和公共充电桩的建设。

(二)公共充电桩和纯电动汽车购买关系的工具变量法检验

尽管包含了一组丰富的控制变量,但未观察到的随时间变化和市场特定的需求冲击可能会影响公共充电桩投资决策,从而影响公共充电桩的存量。为了处理内生性,本文使用工具变量策略,有效的工具变量需要与模型中的公共充电桩数量(内生变量)相关,但与未观察到的影响电动汽车销量的混杂因素无关。借助

表 10 格兰杰因果关系 DH 检验结果

零假设	WbarWald统计量	Z-bar统计量	P
lnPCP不是lnEVP的格兰杰原因	4.3635	13.6359***	0.0000
lnACP不是lnEVP的格兰杰原因	5.3164	16.9938***	0.0000
lnDCP不是lnEVP的格兰杰原因	2.7622	6.9379***	0.0000
lnOPCP不是lnEVP的格兰杰原因	3.7224	10.7182***	0.0000
lnSPCP不是lnEVP的格兰杰原因	6.3545	21.0807***	0.0000
lnEVP不是lnPCP的格兰杰原因	2.6299	6.4171***	0.0000
lnEVP不是lnACP的格兰杰原因	1.7604	2.9936***	0.0028
lnEVP不是lnDCP的格兰杰原因	15.3050	56.3189***	0.0000
lnEVP不是lnOPCP的格兰杰原因	8.8993	31.0994***	0.0000
lnEVP不是lnSPCP的格兰杰原因	1.8532	3.3589***	0.0008

注：*、**、***表示在10%、5%、1%的显著性水平上显著。

Bartik等(1991)的研究思路,采用的工具变量是2020年各省份停车场与对应的除所在省以外的其余省份中的滞后一期公共充电桩数量之间的交互,构建的模型如下所示:

$$\ln PCP_{it} = \pi_0 + \pi_1 \ln Parking_i \times \ln L \ln PCP_{it} + \sum_{j=1}^n \pi_j X_{it} + \mu_{it} + \lambda_i + \gamma_t \quad (5)$$

$$\ln EVP_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln PCP_{it} + \sum_{j=1}^n \pi_j X_{it} + \mu_{it} + \lambda_i + \gamma_t \quad (6)$$

其中: $\ln Parking_i$ 表示2020年各省份停车场数量的对数; $\ln L \ln PCP_{it}$ 表示除所在省以外的其余省份中的滞后一期公共充电桩数量的对数; $\ln EVP_{it}$ 表示纯电动汽车购买量的对数; $\ln PCP_{it}$ 表示公共充电桩数量的对数; π_j 表示工具变量交互项的系数大小; X_{it} 为控制变量; n 为控制变量个数; λ_i 表示个体固定效应; γ_t 表示月度时间固定效应; μ_{it} 为随机误差项。本文认为该工具变量应满足外生性假设。停车场的数量不太可能直接影响电动汽车的销售。虽然可能存在影响电动汽车销售和停车场数量的常见不可观察因素,然而,模型已经控制了省级个体固定效应,并且应该捕获这些时间不变的不可观测值。在样本期间,停车场的数量不随时间变化,因为它被省级个体固定效应所吸收。为了引入时间变化,将其乘以除所在省以外的其余省份中现有公共充电桩的滞后一期数量,这可以捕捉到由于成本的时间变化等总体冲击而导致的省级公共充电桩投资趋势、投资者信心和激励计划。工具变量的时间变化排除所在省份的公共充电桩也消除了某一个省份建设有大量公共充电桩可能过度影响估计结果的担忧。工具变量策略背后的基本原理是,不同的省份具有不同的资源禀赋条件和经济发展能力来吸收对充电桩建设投资的冲击,例如宏观经济条件和成本的变化。表11中的第一阶段结果表明,交互项对充电桩投资具有积极且显著统计意义的影响。此外,第二阶段的结果显示,公共充电桩的数量每增加1%,纯电动汽车购买量将会增加0.682%,且在1%显著性水平上显著,这与文章主体的结论一致,证明了结果的稳健性。

表 11 公共充电桩和纯电动汽车购买关系的工具变量法检验结果

变量	第一阶段	第二阶段
lnPCP		0.682*** (0.04)
lnparking×lnLlnPCP	0.047*** (0.00)	
Constant	0.539 (3.02)	-11.741 (4.47)
样本数	1380	1380
R ²	0.362	0.483
控制变量	是	是
省份固定效应	是	是
时间固定效应	是	是

注:括号中为标准误值;*、**、***表示在10%、5%、1%的显著性水平上显著。

六、结论

中国新能源汽车产业高速发展,纯电动汽车已经成为新能源汽车消费的主要目标及保有量增长的主要动力,配套的公共充电基础设施的数量、类型、技术差异与纯电动汽车进一步推广密切相关。

本文基于2017年1月至2020年11月的中国公共充电桩数据及纯电动汽车购买量建立面板固定效应模型,并引入人均可支配收入、空气质量指数、全年平均气温等作为控制变量进行实证分析和异质性分析。得出以下主要结论。

(1)公共充电桩数量对纯电动汽车购买量的影响显著为正。随着公共充电桩数量的增加,居民购买新能源汽车的意愿显著加强。

(2)公共充电桩数量对于不同购买用途的纯电动汽车购买影响均显著为正:公共充电桩对出租租赁用

途、非营业用途的纯电动汽车均有显著影响,对出租租赁用途的电动汽车销量影响更大,这是因为出租租赁用途纯电动汽车充电时间和地点不固定,导致其对公共充电桩依赖程度较高。

(3)不同技术类型的公共充电桩对于纯电动汽车购买影响均显著为正且差异明显,对不同购买用途的纯电动汽车的影响存在异质性:直流公共充电桩对纯电动汽车购买的影响远大于交流公共充电桩,纯电动汽车车主只有在超出续航范围的旅途才会使用公共充电桩,其目的是尽快恢复续航里程以完成其剩余旅程。因此直流充电桩充电速度快的优势对其更加重要。对于出租租赁用途的纯电动汽车来说交流充电桩的影响远大于直流充电桩,对出租租赁用途的纯电动汽车来说,其充电时间地点的不确定性导致其对充电桩普及率要求高,交流桩比直流桩普及率更高,更能满足出租租赁用途的纯电动汽车随时随地充电的需求。

(4)不同性质的公共充电桩对于纯电动汽车购买影响均显著为正且差异较小,对不同购买用途的纯电动汽车的影响存在异质性:普通公共桩和专用充电桩在促进纯电动汽车购买方面差异不大。对于出租租赁用途纯电动汽车来说,普通公共桩比专用桩更重要,证明目前出租租赁用途纯电动汽车存在充电地点不规律和时间不固定的问题;对于非营业的纯电动汽车来说,公共充电桩和专用桩的影响不存在显著差异,这说明普通家用车同时存在在专用充电桩和普通公共桩的充电行为。

(5)以气温为代表地区差异在公共充电桩与纯电动汽车购买关系间的调节效应不显著。经门槛效应模型检验发现,气温更低的地方公共充电桩对纯电动汽车购买的影响更大,其显著门槛值为 15 摄氏度,且气温对出租租赁汽车的影响比非营业更大。因此为保证低气温地区的纯电动汽车能保持续航,应对全年平均气温低于 15 摄氏度的地区加大公共充电桩的建设力度,以更好地促进纯电动汽车在这些地区的普及与发展。

基于以上实证研究结果,本文提出以下政策建议:第一,政府应大力进行普通交流公共充电桩的增设布局,为出租租赁用途纯电动汽车提供出行保障,从而带动公共交通的向新能源转型;第二,对于年平均气温较低的地区,政府可通过给予一定的补助或融资等政策支持的方式提高公共充电桩铺设密度,促进纯电动汽车在当地的普及,保障出行的安全与便捷;第三,对于非营业用途的家用纯电动汽车,需结合充电效率、建设成本、选址规划及环境效益等综合评估其专用充电桩的技术类型及设置位置。

参考文献

- [1] 陈林晗, 2017. 中国电动汽车充电基础设施运营效率研究[D]. 厦门: 厦门大学.
- [2] 陈湛清, 金敏燕, 王志威, 等, 2021. 新能源汽车充电基础设施建设现状与发展问题研究——以湛江市为例[J]. 汽车实用技术, 46(20): 234-236.
- [3] 冯乾隆, 康凯, 王军雷, 等, 2021. 充电基础设施全生命周期经济性研究——以海南省为例[J]. 汽车文摘, (7): 7-11.
- [4] 何蛟, 张谦然, 2021. “双碳”背景下电动汽车充电基础设施软硬件发展趋势研究[J]. 科技与创新, (18): 92-93, 96.
- [5] 史丹, 叶云岭, 2022. 城市交通碳排放趋势与减排对策研究——以上海市为例[J]. 现代管理科学, (4): 3-14.
- [6] 王靖添, 闫琰, 黄全胜, 等, 2021. 中国交通运输碳减排潜力分析[J]. 科技管理研究, 41(2): 200-210.
- [7] 王娜, 梁韵琳, 2021. 新基建背景下新能源汽车充电基础设施政策分析及展望[J]. 汽车工业研究, (1): 8-15.
- [8] 张全斌, 周琼芳, 2022. “双碳”目标下中国能源 CO₂ 减排路径研究[J]. 中国国土资源经济, 35(4): 22-30.
- [9] 张勇, 蒲勇健, 史乐峰, 2014. 电动汽车充电基础设施建设与政府策略分析[J]. 中国软科学, (6): 167-181.
- [10] 赵国涛, 钱国明, 王盛, 2021. “双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J]. 华电技术, 43(6): 11-20.
- [11] 赵继敏, 2021. 超大城市交通碳减排的激励机制与实现途径[J]. 生态经济, 37(9): 34-39.
- [12] BARTIK T J, 1993. Who benefits from state and local economic development policies[J]. Regional Science and Urban Economics, 23(1): 145-148.
- [13] BRENNAN M, DOLARA A, FOIADELLI F, et al, 2014. Urban scale photovoltaic charging stations for electric vehicles[J]. IEEE Trans. Sustain Energy, 5: 1234-1241.
- [14] CHAI J, YANG Y, WANG S, et al, 2016. Fuel efficiency and emission in China's road transport sector: Induced effect and rebound effect[J]. Technological Forecasting and Social Change, 112: 188-197.
- [15] CHEN X, WANG X, 2016. Effects of carbon emission reduction policies on transportation mode selections with stochastic demand[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 90: 196-205.
- [16] CREUTZIG F, JOCHEM P, EDELENBOSCH O, et al, 2015. Transport: A roadblock to climate change mitigation?[J] Science, 350: 911-912.
- [17] DING J, JIN F, LI Y, 2013. Analysis of transportation carbon emissions and its potential for reduction in China[J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 11(1): 17-25.
- [18] DONG J, LIN Z, 2012. Within-day recharge of plug-in hybrid electric vehicles: Energy impact of public charging infrastructure[J]. Transportation Research Part D, 17: 405-412.

- [19] DUMITRESCU E I, HURLIN C, 2012. Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels[J]. *Economic Modelling*, 29: 1450-1460.
- [20] FATHABADI H, 2017. Novel solar powered electric vehicle charging station with the capability of vehicle-to-grid[J]. *Solar Energy*, 142: 136-143.
- [21] FUNKE S Á, GNANN T, PLÖTZ P, 2015. Addressing the different needs for charging infrastructure: An analysis of some criteria for charging infrastructure set-up[J]. *Green Energy and Technology*, 2015: 73-90.
- [22] FUNKE S Á, SPREI F, GNANN T, et al, 2019. How much charging infrastructure do electric vehicles need? A review of the evidence and international comparison[J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 77: 224-242.
- [23] GONG H, WANG M Q, WANG H, 2013. New energy vehicles in China: Policies, demonstration, and progress. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 18(2): 207-228.
- [24] HARDMAN S, JENN A, TAL G, et al, 2018. A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure[J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 62: 508-523.
- [25] HAUSTEIN S, JENSEN A, CHERCHI E, 2021. Battery electric vehicle adoption in Denmark and Sweden: Recent changes, related factors and policy implications[J]. *Energy Policy*, 149: 112096.
- [26] HELMUS J R, SPOELSTRA J C, REFA N, et al, 2018. Assessment of public charging infrastructure push and pull rollout strategies: The case of the Netherlands[J]. *Energy Policy*, 121: 35-47.
- [27] HERBERZ M, HAHNEL U J, BROSCHE T, 2022. Counteracting electric vehicle range concern with a scalable behavioural intervention[J]. *Nature Energy*, 7: 503-510.
- [28] JARGSTORF J, WICKERT M, 2013. Offer of secondary reserve with a pool of electric vehicles on the German market[J]. *Energy Policy*, 62: 185-195.
- [29] KIHM A, TROMMER S, 2014. The new car market for electric vehicles and the potential for fuel substitution[J]. *Energy Policy*, 73: 147-157.
- [30] LARSON P, VI'AFARA J, PARSONS R, et al, 2014. Consumer attitudes about electric cars: Pricing analysis and policy implications[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 69: 299-314.
- [31] LE M, HAIYAN C, 2021. Study on transportation energy carbon emission based on system dynamics[C]//9th International Conference on Traffic and Logistic Engineering(ICTLE). New York, USA: IEEE, 102-107.
- [32] LEVINSON R S, WEST T H, 2018. Impact of public electric vehicle charging infrastructure[J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 64: 158-177.
- [33] LIN B Q, WU W, 2018. Why people want to buy electric vehicle: An empirical study in first-tier cities of China[J]. *Energy Policy*, 112: 233-241.
- [34] LIN S, WANG J, 2022. Carbon emission reduction effect of transportation structure adjustment in China: An approach on multi-objective optimization model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(4): 6166-6183.
- [35] MADINA C, ZAMORA I, ZABALA E, 2016. Methodology for assessing electric vehicle charging infrastructure business models[J]. *Energy Policy*, 89: 284-293.
- [36] MA G R, MICHAEL K L, MAK H Y, et al, 2019. Promoting clean technology adoption: To subsidize products or service infrastructure?[J]. *Service Science*, 11(2): 75-95.
- [37] MA S C, FAN Y, FENG L, 2017. An evaluation of government incentives for new energy vehicles in China focusing on vehicle purchasing restrictions[J]. *Energy Policy*, 110: 609-618.
- [38] MA S C, XU J H, FAN Y, 2019. Willingness to pay and preferences for alternative incentives to EV purchase subsidies: An empirical study in China[J]. *Energy Economics*, 81: 197-215.
- [39] NEUBAUER J, WOOD E, 2014. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility[J]. *Journal of Power Sources*, 257(7): 12-20.
- [40] PARAMATI S R, UMMALLA M, APERGIS N, 2016. The effect of foreign direct investment and stock market growth on clean energy use across a panel of emerging market economies[J]. *Energy Economics*, 56: 29-41.
- [41] QIAN Q, LI D, GAN M, 2021. Decision analysis of the optimal freight structure at provincial level in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(39): 54972-54985.
- [42] SCHROEDER A, TRABER T, 2012. The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles[J]. *Energy Policy*, 43: 136-144.
- [43] SERRADILLA J, WARDLE J, BLYTHE P, et al, 2017. An evidence-based approach for investment in rapid-charging infrastructure[J]. *Energy Policy*, 106: 514-524.
- [44] SHIMIN Y, YUNLIAN S, XIAODI Z, et al, 2019. Location and capacity planning of electric vehicles charging piles[C]//Guangzhou, China. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 533(1): 012031.
- [45] SINGH V, SINGH V, VAIBHAV S, 2020. A review and simple meta-analysis of factors influencing adoption of electric vehicles[J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 86, 102436.
- [46] SMITH, ALAN D, 2020. Online vehicle purchase behaviour and analytics among supply chain professionals: An exploratory

- study[J]. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 9(3): 264-296.
- [47] SPRINGEL K, 2021. Network externality and subsidy structure in two-sided markets: Evidence from electric vehicle incentives[J]. *American Economic Journal: Economic Policy*, 13(4): 393-432.
- [48] VIRENDER S, VEDANT S, VAIBHAV S, 2020. A review and simple meta-analysis of factors influencing adoption of electric vehicles[J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 86: 102436.
- [49] WANG Y Y, CHI Y Y, XU J H, et al, 2021. Consumer preferences for electric vehicle charging infrastructure based on the text mining method[J]. *Energies*, 14(15): 4598.
- [50] WENIG J, SODENKAMP M, STAAKE T, 2019. Battery versus infrastructure: Tradeoffs between battery capacity and charging infrastructure for plug-in hybrid electric vehicles[J]. *Applied Energy*, 255, 113787.
- [51] WIRGES J, LINDER S, KESSLER A, 2012. Modelling the development of a regional charging infrastructure for electric vehicles in time and space[J]. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 12: 391-416.
- [52] ZHU L, ZHANG Q, LU H, et al, 2017. Study on crowdfunding's promoting effect on the expansion of electric vehicle charging piles based on game theory analysis[J]. *Applied Energy*, 196: 238-248.

Heterogeneous Impact of Public Charging Infrastructure on Electric Vehicle Purchases

Lü Ran¹, Li Bohao², Li Min³, Mo Ruanqing¹, Fang Siyi⁴, Guo Mingxing¹, Lu Bin⁴, Fu Chen¹

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200233, China;

2. Comprehensive Technological and Economic Research Institute of China Shipbuilding Corporation, Beijing 100081, China;

3. State Grid Talent Exchange Service Center Co., Ltd., Beijing 1000761, China;

4. Beijing School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The transportation sector is one of the most important sources of carbon emissions in China, and electrification of transportation is critical to achieving the “3060” goals. The data on the number of charging piles and electric vehicle sales in 31 provinces (Due to the lack of data, the statistical data mentioned here do not include the Tibet Autonomous Region, the Hong Kong Special Administrative Region, the Macao Special Administrative Region and Taiwan Province.) in China from January 2017 to November 2020 was collected to construct a panel fixed effect model and a threshold benefit model, and the impact of different types of public charging infrastructure on the purchase of pure electric vehicles for different purposes, and the threshold effect of the impact of temperature on sales in different regions was empirically analyzed. The study found that the number of public charging piles increased by 1%, and the purchase of pure electric vehicles increased significantly by 0.85%, of which the sales of pure electric vehicles for rental purposes increased significantly by 1.57%. The impact of DC public charging piles on the purchase of pure electric vehicles is much greater than that of AC public charging piles, and there is a heterogeneous impact on electric vehicles for different purposes. In addition, public charging piles have a greater impact on the purchase of pure electric vehicles in places with lower temperatures, with a significant threshold value of 15°C, and the impact of temperature on rental cars is greater than for non-commercial purposes. Policy makers should rationally consider the deployment of infrastructure such as public charging piles to ensure the battery life of electric vehicles, thereby promoting the decarbonization of the transportation sector.

Keywords: charging infrastructure; electric vehicle sales; panel threshold models; temperature regulation