

# 北京市出租汽车电气化综合效益比较分析等研究动态

陆圣澜

(同济大学交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 选取来自国际学术期刊的论文, 以概述形式对城市交通理论方法、实证分析等学术研究成果进行总结性介绍, 旨在增强城市交通业界和学界对国际学术动向和研究热点的关注, 促进学术交流。本期共选取3篇论文加以介绍, 包含北京市出租汽车电气化综合效益比较分析、中国电动汽车碳排放省际转移研究、基于CGE分析需求侧政策对中国私人交通电气化和低碳化的影响等内容。

**关键词:** 出租汽车; 电气化; 充电站; 换电站; 碳排放转移; 电动汽车

Comparative Analysis of the Comprehensive Benefits of Taxi Electrification in Beijing and Summary of Other Selected Research Topics

LU Shenglan

(College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A review of selected articles from international academic journals is presented to summarize academic research findings, theoretical approaches, and empirical analyses of urban transportation. The aim is to enhance the communication between industrial and academic fields, highlight international research focuses, and promote academic exchange in urban transportation. This review involves three papers, including a comparative analysis of comprehensive benefits of taxi electrification in Beijing, research on inter-provincial transfer of carbon emissions from electric vehicles in China, and a study of the impact of demand-side policies on the electrification and decarbonization of private transportation in China based on CGE analysis.

**Keywords:** taxi; electrification; battery charging station; battery swapping station; emissions transfer; electric vehicles

收稿日期: 2023-06-15

作者简介: 陆圣澜(1995—), 女, 浙江湖州人, 在读博士研究生, 主要研究方向: 绿色交通。

E-mail: 2210717@tongji.edu.cn

## 北京市出租汽车电气化综合效益比较分析

### 研究背景

交通运输是CO<sub>2</sub>排放的主要来源之一, 发展和推广新能源汽车是交通部门解决碳排放和环境污染问题的有效途径之一。2020年, 中国出租汽车虽然只占私人汽车总数不到1%, 但其行驶距离却是私人汽车的15~25倍, 导致大量能源消耗和污染物排放。因此, 出租汽车电气化是降低碳排放的关键手段之一。

大部分出租汽车电气化研究主要以充电

出租汽车(Charging Taxi, CT)为研究对象, 且未考虑技术进步带来的经济和环境效益。该论文旨在回答现阶段出租汽车电气化的社会效益, 探讨充电出租汽车和换电出租汽车(Swapping Taxis, ST)综合效益的差异、充电站(Battery Charging Station, BCS)和换电站(Battery Swapping Station, BSS)服务综合效益的区别、影响出租汽车及其充(换)电站经济效益的关键因素。该论文以电气化前沿城市北京为例, 从充(换)电站角度比较分析出租汽车电气化的经济效益、环境效益和社会效益, 并对影响充电和换电两种电气化路径经济效益的关键因素进行敏感性分析。

## 研究思路

### 1) 效益计量及对比分析。

该论文对出租汽车电气化的经济效益、环境效益、社会效益和充(换)电站综合效益进行计量。经济效益计量包括出租汽车成本和收入,从全生命周期角度出发,成本包含车辆购买成本、购置税、注册费、车船税、保险费用、维修保养费、能源使用成本、停车费,收入包括购车补贴、营业收入以及车辆转卖或剩余价值。环境效益计量中涉及的大气污染物以 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 为主,计算燃料生命周期(The Life Cycle of Fuel, LCF)和车辆生命周期(The Life Cycle of Vehicle, LCV)所排放的空气污染物成本分别采用美国能源部开发的WTW评估系统和交通运输能耗GREET模型。社会效益计量以相同作业时间下满足相同服务里程的平均日作业里程和出租汽车数量作为评价指标。充(换)电站综合效益计量以满足1 000辆充电出租汽车和1 000辆换电出租汽车服务需求的充(换)电站进行分析,其经济效益包括对这两类充电站投资成本、运营和维护成本等支出,电力销售、充(换)电服务费、停车费以及设备设施剩余价值等收入,社会效益选取占地面积和提供的就业机会两个指标进行衡量。

### 2) 敏感性分析。

为探究两种电气化路径经济效益的影响因素,该论文使用单因素分析法,选取能源补贴价格、营运里程、出租汽车收费标准和购车补贴4个影响因素进行经济效益敏感性分析。同时,选取设备价格、土地租赁价格、电力价差和站点服务范围4个主要影响因素,对供电站经济效益的敏感性进行分析。

## 研究结论

1) 燃油出租汽车(Fuel Taxis, FT)电气化的综合效益较大,其中换电出租汽车的效益大于充电出租汽车。

经济效益方面,8年经营期内,燃油出租汽车、充电出租汽车和换电出租汽车净现值分别为987.0万元、1 003.1万元和1 021.9万元;环境效益方面,充电出租汽车和换电出租汽车在整个生命周期中比燃油出租汽车 $\text{CO}_2$ 排放量分别减少34.65 t和36.85 t、 $\text{NO}_x$ 排放量分别减少17.23 kg和19.45 kg,排放总成本分别减少1 033.34元和1 613.07元;社会效益方面,换电出租汽车比充电出租汽车平均每天节省1.25 h的能源补充时间,相

当于增加33.79 km运行里程。如果北京市所有燃油出租汽车都被电动出租汽车取代,那么都换成换电出租汽车比都换成充电出租汽车将少配备7 311辆车,因此选择前者更有利于出租汽车企业减少投资,避免增加城市交通压力;从充(换)电站角度来看,10年运营期内充电站和换电站净现值分别为2 157万元和2 591万元、占用土地面积分别为2 500  $\text{m}^2$ 和1 000  $\text{m}^2$ 、提供的就业机会分别为4个和40个,因此换电站能够带来更大的经济效益和社会效益。

2) 不同影响因素的敏感性不同,随着影响因素的变化,换电出租汽车路径的经济性优于充电出租汽车路径。

出租汽车电气化的经济效益与营运里程、收费标准、购车补贴呈正相关关系,与能源补贴价格呈负相关关系。其中,出租汽车收费标准和营运里程的敏感性较强,能源补贴价格和购车补贴的敏感性较弱。充(换)电站方面,经济效益与电价差和站点服务范围呈正相关关系,与设备和土地租赁价格呈负相关关系。其中,站点服务范围和电价差的敏感性较强,设备和土地租赁价格的敏感性较弱。

## 研究总结

出租汽车电气化在中国一些城市得到推广,但针对不同电气化路径综合效益的对比研究较少。该论文以北京市为例,分别从出租汽车和充(换)电站角度对充电出租汽车和换电出租汽车两种电气化路径在整个生命周期中的经济效益、环境效益和社会效益进行计量和比较分析。在此基础上对经济效益的影响因素进行敏感性分析,从而确定提高经济效益的重点。

资料来源:ZHANG L H, LENG K Q, LI S R, et al. Comparative analysis of comprehensive benefits of Beijing's taxi electrification paths [J]. Transportation research part D: transport and environment, 2023, 115: 103612.

## 中国电动汽车碳排放省际转移研究

### 研究背景

交通领域电气化是缓解气候变化和改善空气质量必要且可行的方案。为推进交通领域电气化进程,中国政府制定了一系列政策

并取得一定成效，在一定程度上减少了温室气体和污染物排放。然而，电动汽车在降低碳排放方面的作用尚不明确，推广电动汽车虽然减少了道路上的碳排放，但是增加了发电(尤其目前中国以燃煤发电为主)过程中的碳排放。

交通领域电气化对电力的需求会导致发电压力提高。在中国，电力生产与消费之间存在区域性严重不匹配问题，电力传输是解决方案之一。由于电力生产和消费地点分离，碳排放也会通过地区电力流发生转移，且随着时间推移而变化，因此估算电动汽车生命周期内产生的碳排放将是一项挑战。该论文旨在评估中国推广电动汽车所发生的省际碳排放转移，进而探究推广电动汽车的区域碳排放效益。

### 研究思路

该论文采用政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的清单方法计算各省发电产生的温室气体排放量。各省电网的温室气体排放量等于各发电源(煤炭、石油、天然气等)排放量的总和，其中温室气体包括 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ ，空气污染物包括 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ ，计算时统一转换成二氧化碳当量。利用拟投入产出(Quasi-Input-Output, QIO)模型即网络模型，量化区域间电力交易(主要是行政决策)包含的碳排放。在该模型中将省份视作节点，将省际电力流动看作是模型中的联系，根据每个省份的电力供需平衡点可计算具体碳排放量。与传统的投入产出模型相比，QIO模型可以跟踪整个电网从生产到消费的所有电力传输路径，从而捕获子电网之间的直接和间接碳排放流。

### 研究结论

1) 在评价电动汽车整个生命周期内的碳排放时，转移排放不容忽视。

国家和地区的环境政策并没有关注大规模推广电动汽车所引起的碳排放转移。全国碳排放权交易计划将是解决这一问题的可行方法，同时需要关注公平问题。

2) 政策制定者需要关注推广电动汽车所引发的碳排放转移问题。

电动汽车带来的碳排放放在区域间流动以及由此造成的环境损害责任应该在区域气候政策制定和推广电动汽车过程中加以考虑。

另外，有必要在大量电力出口的省份加强碳排放控制，并完善区域碳减排责任的划分，同时还应探索各省因电力生产和消费导致碳排放的补偿机制。

3) 推广电动汽车有助于在全国范围内减少碳排放，因此有必要促进各地交通领域电气化。

随着电力脱碳化技术逐步成熟，通过电动汽车减少碳排放的益处将更加凸显。虽然各省之间的碳排放转移程度不同，但考虑到温室气体的存在期限及其混合存在的形式，碳排放转移对某一特定区域不会产生重大影响。推广使用电动汽车还有助于减少全国范围内的 $\text{NO}_x$ 和大部分省份的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量，但增加了所有省份的 $\text{SO}_2$ 排放量。如果电动汽车普及率迅速提高，并且仍然以燃煤为主的方式发电， $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{SO}_2$ 排放量将继续增加。空气质量与人类健康高度相关，尤其是在人口密集的省份，因此有必要关注电动汽车的健康效益。

4) 在制定各区域未来电动汽车发展优先事项和支持政策时，应考虑推广电动汽车产生的碳排放转移的影响。

随着电动汽车保有量的不断增加，电动汽车的碳排放转移将对中西部地区产生负面影响。电动汽车普及率高的地区大多经济发达且电力需求依赖于外部电力供应，这些地区应该通过生态补偿措施来规范当地电动汽车发展给其他地区造成的环境损失。

5) 最后，国家或地区碳排放总量不能反映省际电动汽车碳排放的异质性，缺乏对区域间电力转移的考虑可能会错误放大电动汽车的碳减排效果。

政策制定者应区分不同区域差异从而更好地估算推广使用电动汽车带来的碳减排效益，例如北京和广东等大量进口电力的城市和省份，估计电力转移的影响主要取决于电力碳排放强度；而云南、海南等进口电力不多的省份可以相对准确地估算当地电动汽车的碳排放量。

### 研究总结

交通领域电气化对减少碳排放是必要的。然而，目前尚未明确推广使用电动汽车是否能减少碳排放以及在何处减少碳排放。该论文采用QIO模型估算中国各省电动汽车产生的温室气体及空气污染物排放量，研究表明大量出口电力且电力碳排放强度高的省



份承担了其他省份电动汽车用电造成的碳排放负担。推广使用电动汽车有助于在全国范围内减少NO<sub>x</sub>排放以及大部分省份的PM2.5排放量。电动汽车碳排放转移表明大量出口电力的省份碳减排处于弱势地位。因此，在制定相关政策时应考虑电动汽车碳排放转移对电力出口地区造成的环境压力。

资料来源：LI W B, Long R Y, Chen H, et al. Inter- provincial emissions transfer embodied in electric vehicles in China[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2023, 119: 103756.

基于CGE分析需求侧政策对中国私人交通电气化和低碳化的影响

研究背景

电动汽车在解决石油安全、减少空气污染治理和缓解气候变化方面具有巨大潜力，因此电动汽车被视作解决空气污染和温室气体排放问题的有效途径。中国政府提出的到2060年实现碳中和目标使得低碳社会建设和私人交通电气化尤为迫切。中国是世界上最大的电动汽车市场，购车优惠政策发挥了至关重要的作用，然而随着国家和地方补贴逐步减少，电动汽车销量开始下降；此外工信部鼓励企业生产和进口电动汽车的相关政策规定使得电动汽车生产出现过剩，供大于求的现象日渐凸显。因此，为保证电动汽车的持续

普及和供需平衡，电动汽车“后补贴时代”合理的需求侧政策迫切且必要。

研究思路

1) 论文使用多模块动态递归CGE模型(Computable General Equilibrium, CGE)分析电动汽车部署的整体效果。

该模型通常用一组方程组来捕捉经济系统中不同主体之间的相互作用和效应。模型中的电力生产模块使用电力技术来探讨电动汽车推广和私人交通电气化，参照麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)的EPPA模型(Emissions Prediction and Policy Analysis, EPPA)，将中国投入产出表中的发电部门划分为10个子技术子模块，并在CGE模型中引入电力部门的不完全竞争和价格管制。此外，中国家庭的商品消费一般遵循柯布-道格拉斯函数，即遵循嵌套的替代函数的恒定弹性，因此可将非运输服务和运输服务的消费区分开来，运输服务包括私人运输和公共运输，私人运输包括燃料消耗、车辆购买和相关的服务。

2) 该研究从需求方面设计了四项政策。

需求侧政策包括：改善家庭对电动汽车的偏好(即电动汽车消费支出占私人交通总消费的比例)，保持对电动汽车的补贴，对化石燃料收取碳税和对电动汽车实行零关税政策。政策细节如表1所示。

研究结论

1) 不同需求侧政策对私人交通电气化的影响存在差异。

①碳税会增加电动汽车的生产成本，即使在高碳税下，电动汽车与燃油汽车的价格差异变化也不大，不足以构成明显的替代，因此只实施碳税不会显著增加电动汽车的需求量。②由于进口比例较低，零关税政策对电动汽车普及率的影响甚小可忽略不计。③保持补贴力度可在短期内显著提高电动汽车普及率并保持稳定增长。因此，政府应该延长补贴期限(至少到2025年或2030年)或者实施类似的激励措施(如减免高速公路费、免车船税等)。④补贴的长期刺激效应呈现逐渐减弱趋势，从长远来看，改善城市家庭对电动汽车的消费偏好是促进电动汽车普及和提高电动汽车制造企业利润的最佳途径。因此，政府应该加强环保教育并出台激励政策(如电动汽车不限行、鼓励私人充电站的

表1 需求侧政策方案设计

Tab.1 Demand-side policy design

| 政策场景                             | 详细政策 | 政策说明                                    |
|----------------------------------|------|-----------------------------------------|
| 一切照旧<br>(Business as Usual, BaU) | BaU  | 2017—2020年，电动汽车平均补贴减少了10%且没有补充政策(财政部计划) |
| 改善偏好<br>(Improve Preference, IP) | IP   | 从2020年起改善城市家庭对电动汽车的消费偏好                 |
|                                  | IP_H | 电动汽车消费偏好每年增加0.8%                        |
|                                  | IP_M | 电动汽车消费偏好每年增加0.4%                        |
| 保持津贴<br>(Keep Subsidy, KS)       | KS   | 2020年起维持电动汽车原有补贴力度                      |
| 碳税<br>(Carbon Tax, CT)           | CT   | 2020年起对化石燃料征收碳税。碳税税率每年提高5%，碳税总收入用于减少间接税 |
|                                  | CT_H | 初始碳税税率为120元·t <sup>-1</sup>             |
|                                  | CT_M | 初始碳税税率为60元·t <sup>-1</sup>              |
| 零关税<br>(Zero Tariffs, ZT)        | ZT   | 2020年4月起实施电动汽车零关税                       |

建设、在限购城市增加电动汽车配额),提高消费者对电动汽车的青睐。然而,为保证整体经济的健康发展,消费偏好的增加并不是越快越好。如果消费偏好增长过快,将对燃油汽车生产厂商以及原油上游产业链企业产生明显的负面影响,从而导致重大的社会经济损失,例如IP\_H情景下的GDP和总就业损失到2050年将达到9.8%和8.3%。所以,无论是政府还是企业的行动都不应过于激进,短期内政府应保持原有的电动汽车补贴,长期来看应逐步改善公众对电动汽车的消费偏好。

2) 电动汽车推广政策有必要与可再生能源电力补贴政策相结合,以提升对私人交通低碳化的影响。

无论是继续实施电动汽车补贴政策还是改善电动汽车的消费偏好,CO<sub>2</sub>减排效果都相对有限。这主要是由于电动汽车普及率提高使得传统燃煤发电量增加,一定程度上抵消了车辆运行过程中减少的碳排放。因此,要实现推广电动汽车的脱碳目标,还必须采取措施提高可再生电力相对传统燃煤发电的成本竞争力。在保持短期补贴和长期改善电动汽车消费偏好政策的组合下,该论文比较了两种主要方案的效果:碳税和针对可再生能源的电力补贴。结果表明,两者均具有显著的碳减排效果,但后者的社会经济负面效应更显著。此外,当电价管制和市场垄断同时发生,且所有政策方案的优先顺序保持不变,则每项政策都比改革前更有利于促进电动汽车普及和电气化。因此,在电力市场化改革进程中,为了实现电动汽车普及率的既定目标,政府可以适当弱化各种需求侧政策。然而,电动汽车普及率的提高仍不足以抵消电力市场增加的碳排放。因此,要实现既定的碳减排目标,政府应大幅提高可再生能源电力补贴率(或碳税水平),推广电动汽车应与可再生能源电力补贴政策相结合。

3) 不同需求侧政策场景下,电动汽车企业和传统燃油汽车企业应进行经营规划的相应调整。

电动汽车企业可以通过推出针对目标群体的个性化设计,及时更换故障充电桩并加强对换电模式和相应商业模式的探索,不断提高大众对电动汽车的消费偏好。随着政府对电动汽车的补贴和优惠政策的不断完善,电动汽车企业可以通过大幅度增加投资,扩

大生产和进口规模,逐步形成以龙头企业为核心、中小企业为主体的协调发展格局。随着电力市场改革的推进,电动汽车的续航里程、充电便利性等方面都得到显著改善,从而大大增强了替代燃油汽车的潜力,此外,碳税政策已成为当前中国碳减排的主流政策。研究发现,由于中国电动汽车生产的资本密集程度越来越高,加之燃煤发电在中国的长期主导地位,仅实施碳税不足以显著改善电动汽车相对于传统燃油汽车的价格劣势。因此,随着国家碳市场的发展,电动汽车企业不宜大幅度增加生产和进口。

传统燃油汽车企业应提升传统技术或转向新能源汽车,从而应对利润下滑的压力。由于燃料成本上升和消费者需求下降,传统燃油汽车企业应该降低其生产和进口。

当政府通过大幅提高碳税或可再生能源发电补贴来应对电力市场自由化带来的碳排放增加时,电动汽车企业仍然可以扩大生产和进口,而传统燃油汽车企业则需要更快地转型升级。在只实行碳定价时,电动汽车企业应该略微增加产量,而传统燃油汽车企业应该略微减少产量;而在零进口关税政策情景下,电动汽车和燃油汽车企业则不需要进行调整。

4) 不同需求侧政策场景下,电力企业和石油企业应做好相应的生产经营规划。

虽然电动汽车的发展会增加电力需求,早期阶段在一定程度上增加电力行业的利润,但长远而言,社会经济损失会抑制电力需求,导致电力行业利润下降。因此,电力企业应适当控制生产能力,而石油企业应做好应对利润下降的准备和措施。实施碳税或可再生能源电力补贴后,中国电力结构将进一步得到优化。随着电力市场改革,电力部门的利润将大幅增加,从而进一步扩大其新的生产能力。而炼油企业则应采取降低炼油产能、推广清洁石油产品、技术改造和转型升级等措施来应对利润下降的局面。综上,就企业经营规划来说,在政府维持补贴和维持电动汽车优惠的政策场景下,电力企业应适当控制新增产能,以应对利润的轻微下降,而石油企业则需要大幅度削减炼油产能或进行改造升级;实行碳税或可再生能源电力补贴后,电力企业可以继续扩大新增产能,而石油企业则应减少炼油产能,推广清洁石油产品或进行改造升级。

(下转第7页)