



# 电力跨区传输视角下电动汽车规模化应用的碳排放转移

李文博 龙如银 张琳玲

**Carbon Emission Transfer by Large-scale Application of Electric Vehicles from the Perspective of Inter-regional Electricity Transmission**

LI Wenbo LONG Ruyin ZHANG Linling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2022.5512>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [投入产出视角下工业技术创新的环境规制协同效应](#)

Study on the Synergetic Effect of Environmental Regulation for Industrial Technology Innovation in the Industrial Sectors from Innovation Input-output Perspective

北京理工大学学报(社会科学版). 2019(4): 1 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.2596>

#### [中国电力消费周期的路径演化识别——基于Markov区制转移模型](#)

Path Evolution Identification of China's Electricity Consumption Cycle based on Markov-switching Model

北京理工大学学报(社会科学版). 2018(5): 17 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2018.3030>

#### [中国区域碳排放驱动因素、减排贡献及潜力探究](#)

Study on China's Regional Driving Factors of Carbon Emission, Emission Reduction Contribution and Potential

北京理工大学学报(社会科学版). 2019(4): 13 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.2529>

#### [碳中和目标下中国碳排放路径研究](#)

Research on China's CO<sub>2</sub> Emission Pathway under Carbon Neutral Target

北京理工大学学报(社会科学版). 2021, 23(2): 17 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.7380>

#### [区域旅游业碳排放的时空差异——以山东省为例](#)

The Spatial and Temporal Differences of Carbon Emissions in Regional Tourism—A Case Study of Shandong Province

北京理工大学学报(社会科学版). 2018(6): 45 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2018.2396>

#### [北京市居民消费间接碳排放测算及影响因素](#)

Calculation and Driving Forces of Indirect Carbon Emissions from Household Consumption in Beijing

北京理工大学学报(社会科学版). 2018(3): 33 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2018.3265>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2022.5512

# 电力跨区传输视角下电动汽车规模化应用的碳排放转移

李文博<sup>1</sup>, 龙如银<sup>2</sup>, 张琳玲<sup>3</sup>

(1. 江苏师范大学 商学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江南大学 商学院, 江苏 无锡 214122;  
3. 南京财经大学 财政与税务学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 电动汽车的推广应用可以有效减少尾气排放甚至达到零排放, 但其实质是将污染排放转移至发电侧。近年来中国电动汽车市场由于政策驱动呈“井喷”式发展, 因而电动汽车大规模用电需求背后隐含的碳排放转移问题日益引发关注。为此, 基于电力跨区传输视角, 构建电动汽车碳排放转移定量测算模型; 在此基础上设立多种规模化应用情景, 测算不同情景下各省电动汽车碳排放转移量, 总结其空间分布规律; 进而分析各省电动汽车规模化应用的环境收益/成本。研究表明: 电动汽车的发展会加剧碳排在区域之间的流动, 全国电动汽车在发展受阻情景、基准情景和快速发展情景下的碳排放转移量分别达到  $5.85 \times 10^6$  吨  $\text{CO}_2$  当量、 $9.37 \times 10^6$  吨  $\text{CO}_2$  当量和  $23.43 \times 10^6$  吨  $\text{CO}_2$  当量; 碳排放转移的主要路径为经济发达的沿海地区向欠发达的中西部地区输出碳排放, 且华北和华东电网内部各省间也存在大量的碳排放转移; 碳排放除了由电力流入地向电力流出地直接转移, 还会通过电力枢纽地区间接流向其他地区, 产生间接碳排放转移, 北京和上海的间接碳排放转移量甚至超过总排放转移量的 15%; 电力跨区传输对电动汽车规模化应用的环境价值有正向影响, 有利于提升全国总体环境效益。因此, 在合理布局各省电动汽车发展规模和优先次序过程中, 除了要关注电动汽车的总体环境效益, 还应从电力跨区传输视角尽可能缓解碳排放转移对电力输出地区的环境压力。

**关键词:** 电力跨区传输; 电动汽车; 碳排放转移; 准投入产出模型

中图分类号: X24

文献标志码: A

文章编号: 1009-3370(2022)01-0012-12

交通运输是节能减排的重点领域。在发达国家, 交通运输部门碳排放约占国家总量的三分之一, 中国目前约占百分之十左右<sup>[1]</sup>。随着城镇化加速和人民生活水平提高, 对汽车的需求显著增加, 根据公安部发布的统计数据, 截至 2020 年 9 月中国机动车保有量已达 3.65 亿辆<sup>[2]</sup>。交通运输部门能源消耗和碳排放增速均高于全社会平均水平, 正处在高速增长期, 机动车尾气已成为城市生态环境问题的重要致因<sup>[3]</sup>, 因而交通运输部门节能减排形势十分严峻。在此背景下, 电动汽车越来越受到社会各界关注。相比于传统燃油车, 电动汽车有着替代化石能源消耗、减少常规污染物和碳排放的显著优势<sup>[4]</sup>。目前中国政府明确将发展电动汽车作为国家战略, 在综合宏观、行业管理、推广应用、税收优惠、科技创新和基础设施等方面制定出台了一系列政策措施, 营造了良好的政策环境。可见, 发展电动汽车已成为交通领域实现节能减排目标的战略共识。

在政府各类利好政策推动下, 电动汽车产销量不断攀升, 目前中国电动汽车市场规模更是达到世界领先水平, 全国保有量已经接近 200 万辆, 市场占有率已超过 2%<sup>[5]</sup>。根据相关研究预测, 2030 年中国电动汽车保有量有望达到 8 000 万辆, 市场占有率将达到 40%<sup>[6]</sup>, 每年充电需求将达到 4 100 亿千瓦时<sup>[7]</sup>。尽管电动汽车在行驶阶段可以实现“零污染”, 但受制于中国“一煤独大”的能源结构, 电动汽车的环保能力备受质疑, 公众甚至称其为“煤车”。考虑到电力生产过程中会产生大量碳排放<sup>①</sup>, 电动汽车保有量增加

收稿日期: 2020-11-28

基金项目: 国家自然科学基金青年项目“电力跨区传输视角下电动汽车规模化应用的隐含污染转移研究”(71904067); 国家社会科学基金重大项目“推进居民绿色消费升级的监管体系研究”(19ZDA107); 国家社会科学基金重点项目“推进绿色消费 3.0 的嵌入式监管体系研究”(18AZD014)

作者简介: 李文博(1991—), 男, 博士, 副教授, E-mail: liwenbo5498@126.com; 龙如银(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: longruiyin@cumt.edu.cn; 张琳玲(1988—), 女, 博士, 讲师, E-mail: zll3474@nufe.edu.cn

① 无特别说明, 本文中碳排放均指从碳足迹角度出发, 包括各种温室气体排放在内的碳排放。

带来的环境效益实质上以发电侧排放量增加为代价。随着电动汽车推广规模的逐渐扩大,其产生的发电侧排放量将越来越大,甚至可能加剧发电地区的环境问题。因而,电动汽车电力需求的发电侧排放问题值得高度重视。

电力是目前和今后中国较长时期内的主要能源。根据中国能源统计年鉴,2019年中国全社会用电量为7.25万亿千瓦时,在终端能源消费中的比重已达到27%<sup>[8]</sup>。由于区域间经济发展不平衡,各区域电力生产和消费严重不匹配。经济发达的东部沿海地区电力需求较大,约占全国电力消费的60%以上,但多数省份存在电力生产的瓶颈和较大的电力缺口;而中西部地区能源比较丰富,电力生产成本较低,多数地区的发电产能已经过剩。在环境困境的约束下,跨区输电(如“西电东送”等)成为了优化电力配置,缓解区域电力生产和消费不匹配问题的重要举措。近年来,中国区域间电力传输已呈常态化,且电力跨区传输总量呈扩大趋势。全国跨区域电网电力交易已从2006年的816亿千瓦时增加到2019年的5404亿千瓦时;占全社会电力总用量的比例也从2006年的2.85%增长至2018年的7.46%<sup>[9]</sup>。在国家能源战略结构调整的大框架下,电力跨区传输将是中国电网发展的必然趋势。电力生产尤其是火电生产必然会产生一定数量的污染物。据统计,电力行业是中国气态污染物的主要来源,2019年全国电力行业烟尘、二氧化硫和氮氧化物排放量分别约为18万吨、89万吨和93万吨<sup>[10]</sup>。同时,区域电力系统是一个开放系统,存在区域间电力流入/流出过程。因此,电力的区域间调配过程类似于区域间产品贸易,隐含着碳排放的逆向传输。该问题的实质就是电力消费地把碳排放转移到了电力生产地,简单而言就是一种污染转移。随着电力跨区传输的常态化,与之相关的碳排放转移问题将尤为突出。

电动汽车规模化应用的电力需求将给本地电网带来巨大压力。随着电力跨区传输技术的发展,电动汽车的电力来源多样化,其在行驶过程中消耗的电力不再局限于本地电网<sup>[11]</sup>。电动汽车在消耗外地流入电力的同时,经由电力传输网络把相应的碳排放转移至发电地区。随着电动汽车的规模化应用,大规模的跨区电力传输将改变中国未来各区域能源使用和碳排放的空间格局。因此,隐藏在电动汽车规模化应用背后的碳排放转移问题有待从电力跨区传输视角进行深入探讨。为解决上述问题,本文一是对2025年中国电动汽车的发展规模进行预测,以掌握各省电动汽车规模化应用的电力需求;二是探究区域间电力流入/流出的碳排放转移规律并建立定量模型,以得出各省电动汽车规模化应用的碳排放转移量及其特征。三是从货币价值的角度分析各省电动汽车规模化应用的环境损失/收益。本文的主要贡献在于可以进一步认识各省电动汽车规模化应用的碳排放空间格局,对政府科学布局各省电动汽车的发展规模和优先次序具有重要参考价值,同时也为区域碳排放治理中的责任划分和生态补偿提供参考。

## 一、文献综述

随着区域间联系不断加强,能源消费过程背后的碳排放转移问题逐渐受到关注<sup>[12-13]</sup>。碳排放转移是在貌似合理的“比较优势”和“自由贸易”原则下进行的,具有较强的隐蔽性<sup>[14-16]</sup>。对于国家/区域间产品贸易而言,产品贸易带来了产品产地与消费地的分离,产品生产过程中的碳排放多数留在了原产地<sup>[17-18]</sup>。而由于市场和政策存在部分失灵,使得这些碳排放所带来的损失并未全部由产品的使用者承担,而是由产地通过投资建设污染治理设施或牺牲环境质量为代价予以承担,由此形成了区域间碳排放转移问题<sup>[19-20]</sup>。换言之,碳排放转移并非污染物的跨区直接转移,而是伴随着某种区域间贸易活动,由产品消费地转移至生产地的现象。

近年来,电力跨区传输对各地区资源和环境的影响受到学者的广泛关注。对于电力流入地区,流入电力所产生的碳排放留在了发电地区,意味着该地区流入的电量相当于向发电地区转移一定的碳排放;同理,对于电力流出地区,流出电力的碳排放实际上是由流入地产生<sup>[21-22]</sup>。因而,与区域间产品贸易类似,电力跨区传输过程也隐含着碳排放转移问题<sup>[23-24]</sup>。近年来,许多学者从国家尺度出发针对这一问题展开了研究,也有部分学者对不同国家电力跨区传输的碳排放转移效应进行了比较。以国内为研究对象,叶敏华等<sup>[25]</sup>根据2010年区域电网发电装机容量,研究了跨区域电力传输对环境的影响,结果表明跨区域电力传输可以减少中国东部地区和北部地区的环境损失,但将导致西北部碳排放量的增加;Su等<sup>[26]</sup>的研究发现,2012年跨省电力传输的碳排放量占全国电力行业总排放量的14%,比2007年增加94%,研究结

果还表明碳排放呈现由东向西转移的特点,政府可以考虑向污染移入省份提供经济补偿和技术支持;孙媛等<sup>[27]</sup>研究了各省域间2015年电力区域调配的污染排放转移效应,结果发现中国区域间电力调配的二氧化硫转移量呈下降趋势,但氮氧化物转移量呈现上升趋势。魏文栋等<sup>[28]</sup>建立了中国省级电力碳排放核算综合模型,结果表明2012年中国通过输电网络和贸易网络发生的省级电力碳排放流动总量分别为4.6亿吨和9.76亿吨,分别占全国生产侧电力碳排放总量的13.1%和27.7%。Li等<sup>[29]</sup>的研究结果进一步表明,除省际电力流动产生的直接碳排放转移外,电力出口省份从其他省份购买电力引起的间接碳排放转移不容忽视,在部分地区(如湖南),间接排放转移占总排放转移的50%以上。还有一些研究以局部区域为研究对象展开了分析,如宋洁尘等<sup>[30]</sup>以广东为例,对其流入电力的环境影响进行了定量测算,结果发现电力跨区传输对广东省碳减排具有重要意义;Li等<sup>[10]</sup>以长江三角洲地区为例,分析了该区域流入电力的污染排放转移效应,结果发现2015年长三角地区因电力流入而转移出2.05万吨二氧化硫、2.24万吨氮氧化物和0.43万吨粉尘,这些污染物主要转移至山西、四川和湖北。总体而言,电力跨区传输的碳排放转移主要表现为由经济发达地区流向电力富集地区,换言之,电力富集区为其他地区的电力需求承担了额外的碳排放。

上游电力构成对电动汽车的环境影响较大,使用清洁能源给电动汽车供电,可以达到真正意义上的零排放<sup>[31-32]</sup>;而使用化石能源发电供给电动汽车,会在燃料生命周期上游产生大量的能源消耗和污染排放,极大削弱了电动汽车的减排优势<sup>[33-34]</sup>。随着区域间电网连通性的大幅增强,各区域电力来源多样化,本地电源结构不能完全决定电动汽车的排放情况<sup>[35-36]</sup>。由于区域间电力调配关系较为复杂,且目前区域间电力传输规模较小,因而少有研究将电力跨区传输这一特征系统融入到电动汽车碳排放核算中。仅有的相关研究,如宋永华等<sup>[37]</sup>综合考虑了区域电源结构差异和跨区输电问题,提出了分区域、按电力消费来源评估电动汽车的能源消耗和碳排放水平的思路和方法。他们的研究表明,判断电动汽车是否高碳需要充分考虑各区域的电力供应结构而定,例如广东,虽然省内火电比例很高,但外地流入电力比例很大,且相当一部分电力来自广西和云南的水电,导致其终端电力的碳排放水平较低,所以广东电动汽车的排放水平也较低。总体而言,电力跨区传输会影响各区域的电力结构,进而会对电动汽车的碳排放产生较大影响。

综上所述,可以看到多数学者关注电力来源对电动汽车碳排放水平的影响,而电力跨区传输的影响仅有少部分学者关注。电动汽车规模化应用的电力需求在一定程度上依赖于电力跨区传输,因而电力跨区域传输的排放转移效应决定了电动汽车规模化应用存在类似的环境问题。考虑到电力是电动汽车隐含排放在各区域间流动的主要载体,有必要以电力跨区域传输网络为基础,结合电动汽车的碳排放形成过程,深入探讨电动汽车碳排放转移的路径、方向和特征。此外,目前研究多考虑电力传输所带来的直接转移量,并没有考虑到包括电力流出地本身又从其他地区购入电力时所产生的间接碳排放转移,本文将弥补这方面的缺陷。

## 二、研究方法和数据来源

本文的研究过程如图1所示。首先,基于拓展的logistic模型和情景分析预测各省电动汽车保有量,进而估计不同情景下电动汽车规模化应用的电力需求;其次,利用准投入产出模型估计各省电动汽车规模化应用的碳排放转移;最后,利用成本收益分析对各省电动汽车规模化应用的环境损失/收益进行分析。

### (一)电动汽车规模化应用的电力需求预测

目前,对汽车保有量的预测方法较多,常用的方法包括时间序列模型、因果关系模型、回归分析模型、Bass模型、Lotka-Voterra模型及人工神经网络等<sup>[38]</sup>。因为目前电动汽车市场还不是一个完全成熟的市场,其在未来发展过程中的潜在影响因素较多(如扶持政策的变化),因而很难对长期电动汽车保有量进行准确预测。在短期预测方面,汽车保有量的变化常被认为符合logistic收入曲线的变化,Du等<sup>[4]</sup>为了精准地预测汽车保有量,提出了一个拓展的logistic模型。该模型综合考虑了经济发展水平、交通运输能力、人口数量和石油价格等因素,且短期预测精度较好,模型的具体形式如下

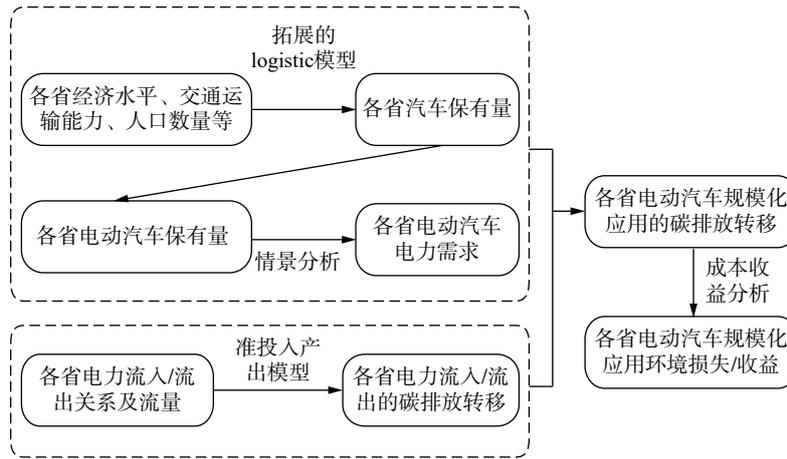


图1 本文研究框架

$$y = \frac{m}{1 + e^{a-t(\beta_0 + \beta_1 \text{gdp} + \beta_2 \text{vol} + \beta_3 \text{op})}} \tag{1}$$

其中,  $m$  表示饱和点;  $a$  表示曲线的初始状态;  $\beta$  表示增长率;  $t$  表示时间;  $\text{gdp}$  表示人均收入;  $\text{vol}$  表示公路客货周转量;  $\text{op}$  表示原油价格。

本文借鉴该模型及相关系数的设定,对中国各省2025年民用汽车保有量进行了短期预测。考虑到电动汽车在电池技术、充电技术及配套设施建设方面还不成熟,且未来发展过程中受各种因素影响的不确定性较大,在咨询电动汽车领域专家和参考相关内部研究报告的结果后,对2025年电动汽车的发展设置了三种情景,分别为发展受阻情景、基准情景和快速发展情景。第一种情景下,电动汽车技术发展较缓,没有实质性突破,政府对其支持力度减弱,公众热情和期望不高,甚至存在抵制情绪;第二种情景下,电动汽车技术稳步发展,政府支持力度保持稳定,电动汽车渗透率逐渐提高。第三种情景下,电动汽车的关键技术有了实质性突破,与燃油车的差距快速减小,公众接受度提高,电动汽车市场快速发展,并逐渐成为购车首选。这三种情景的设置并不是对电动汽车市场的准确预测,其主要目的在于观察不同电动汽车保有量所引发的碳排放转移情况。电动汽车主要考虑纯电动汽车和插电式混合动力电动汽车,三种情景下电动汽车占比情况设置如表1所示。本文与已有相关研究对未来电动汽车发展情景的设置基本一致,如冯超<sup>[39]</sup>将2030年纯电动汽车和插电式混合动力汽车占比分别设置为10%和5%;Du等<sup>[4]</sup>的预测结果表明在正常发展情景下2025年电动汽车占汽车保有量的比例为7.7%。

表1 电动汽车保有量情景设置 单位: %

占比	发展受阻情景	发展基准情景	快速发展情景
纯电动汽车占汽车保有量比例	5	8	20
插电式混合动力汽车占汽车保有量比例	2.5	4	10

各情景下电动汽车的电力需求如下

$$ED_i = \frac{\sum_{k=1}^n Q_{ik} \times EEV_{ik} \times R_{ik}}{C} \tag{2}$$

其中,  $ED_i$  表示  $i$  省电动汽车运行的电力需求;  $Q_{ik}$  为  $i$  省  $k$  类型电动汽车的保有量;  $EEV_{ik}$  为  $i$  省  $k$  类型电动汽车的单位耗电量;  $R_{ik}$  为  $i$  省  $k$  类型电动汽车的行驶里程;  $C$  为电动汽车充电损耗率。

### (二) 基于准投入产出模型的电动汽车碳排放转移测算

准投入产出模型 (Quasi-Input-Output, QIO) 是 Qu 等<sup>[40]</sup>提出的一种量化商品贸易中隐含碳排放量的方法。与传统的投入产出模型相比, QIO 模型可以在整个电力网络中跟踪电力从生产到消费的所有传输路径,从而掌握不同电网之间的直接和间接排放流。直接排放流与区域间的流入/流出电力有关;而如果一个电网的流入电力中含有来自其他电网的电力,则存在间接排放流。对于某一个区域而言,其传输给其

他区域的电力便是该区域的流入电力,反之亦然。因而可以用 $n \times m$ 矩阵  $T$  来表示各区域间的电力传输关系,其中,  $T_{nm}$  表示  $n$  区域传输至  $m$  区域的电量,该矩阵将根据所梳理的各区域间电力流向关系来进行确定。从电力生产角度来看,各省消耗的本地电力等于各省生产电力与调往外省电力之差;从电力消耗角度来看,各省消耗的本地电力等于各省消耗电力与外省流入电力之差。因而,利用各省消耗的本地电力作为平衡点,搭建各省间电力流向平衡关系。以三个省级电网之间的电力流入/流出关系为例,A省流入电力包括本省上网电力  $p_1$ 、B省流入电力  $T_{21}$  和C省流入电力  $T_{31}$ ,A省流出电力包括本省消耗电力  $c_1$ 、流出B省电力  $T_{12}$  和流出C省电力  $T_{13}$ 。基于此,以各省消耗的本地上网电力作为平衡点,省际间电力流向平衡关系可以确定为“本省上网电力+流入电力=本省消耗电力+流出电力”<sup>[40]</sup>。具体可用式(3)表示

$$x_n = p_i + \sum_{j=1}^n T_{ji} = c_i + \sum_{j=1}^n T_{ij} \quad (3)$$

其中,  $x_i$  表示  $i$  省消耗的本省上网电力;  $p_i$  和  $c_i$  分别表示  $i$  省生产和消耗的电力。

电动汽车消耗的电力包括本省生产电力和外省流入电力。在电力跨区传输过程中,从其他地区流入电力将排放留在了发电地区,可以视为碳排放移出;而向其他地区流出电力则情况相反,为碳排放移入。因而,某地区电动汽车消耗的电力总量中外地流入电力产生的碳排放应为该地区电动汽车的碳排放转移量。此外,考虑到跨区传输过程中的电力损耗,初步将某省电动汽车的碳排放转移量界定为电动汽车电力消耗总量中外省流入以及电力传输损耗部分产生的碳排放。

基于所构建的省际间电力传输网络,各省电动汽车总体电力需求中外省流入以及传输损耗部分产生的碳排放转移量初步如下

$$pt_{jm} = \sum_{n=1, n \neq m}^q b_{nm} \times ef_j^n \quad (4)$$

其中,  $pt_{jm}$  为各省流入  $m$  省电力产生的  $j$  气体量;  $b_{nm}$  为  $n$  省流入  $m$  省的电量;  $ef_j^n$  为  $n$  省排放物  $j$  的排放系数;  $q$  为省级电网数量。

通过上述模型得到的碳排放转移量包括直接转移和间接转移两部分。直接转移是指区域间电力直接交易所产生的排放流动;间接排放转移是指电力流出地本身从外部引入电力,进而间接导致电力流入地的碳排放转移到流出地以外的现象。通过判断各地区之间是否存在电力传输关系可以区分直接和间接碳排放转移。

### (三) 成本收益分析

本文将通过成本收益分析框架,对各省电动汽车电力需求的碳排放转移以货币价值形式进行衡量,从而为政策制定者评估和选择区域大气污染协同治理方案提供决策信息。下面将从电力流出地和流入地两个视角介绍成本收益分析的框架。电力流出地的收益主要指流出电力的电价收入,而成本主要是流出电力生产过程中所造成的环境和经济损失。相反,电力流入地的收益是指碳排放减少带来环境质量变高和人体健康改善等多层面的社会收益,成本是指为了获得外部电力需要支付的费用。对于大多数省份来说,它们既是电力生产者,也是电力消费者。由于目前的电价不能反映电力消费的环境成本,此部分中的成本和效益主要是指跨省电交易造成的经济损失和效益。电力交易给各省带来的环境收益、环境损失和净收益可以分别可以用式(5)~式(7)表示

$$\text{Benefit}_i = Q_i \times \sum_{m=1}^q E_{im}^i \quad (5)$$

$$\text{Cost}_i = Q_i \times \sum_{m=1}^q E_{im}^i \quad (6)$$

$$\text{Netbenefit} = \sum_{i=1}^I \text{Benefit}_i - \text{Cost}_i \quad (7)$$

其中,  $\text{Benefit}_i$  和  $\text{Cost}_i$  分别表示某省碳排放转移而产生的环境收益和损失;  $Q_i$  是指单位碳排放量的环境价值;  $E_{im}^i$  和  $E_{mi}^i$  分别指  $n$  到  $m$  省和  $m$  到  $n$  省的碳排放转移量;  $\text{Netbenefit}$  为各省碳排放转移的净收益。

碳排放的单位环境价值依据生态环境部提出的《主要污染物减排总量核算办法》和《排污费征收管理办法》的相关数据进行计算,本文碳排放的环境价值设定为0.195元/千克。不同的经济发展水平和人口密集程度决定了同样的排放在各地环境成本也有较大差异。东部地区因为人口集中、经济发展水平较高、能源资源相对匮乏,因而发电的环境成本较高;相反,中西部地区能源资源丰富、人口稀少、经济发展水平较低,因而发电的环境成本也比较低。本文选取单位面积的碳排放水平、单位面积GDP和人均GDP对各省单位碳排放的环境收益和损失进行调整。通过去量纲处理,以处在均值水平的省份环境损失水平为基准,可以得到各省单位环境损失系数。

#### (四)数据来源

考虑到中国电源结构以煤电为主,发电过程中产生的气态排放物种类较多,参考世界气象组织最新发布的全球气候报告,本文选择二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)作为代表。三种气体将使用全球增温潜势(GWP)统一折算为CO<sub>2</sub>当量,目前CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的GWP值分别为1、25和298。各省电网排放量等同于各种发电能源(主要包括原煤等)的排放量之和。本文按照省级行政区域边界将中国划分为30个省级电网。由于缺少相关数据,暂不考虑西藏、台湾、香港和澳门四个地区的省级电网,各省发电结构如表2所示。各省发电量、厂用电率和用电量来源于《中国电力年鉴》。各省流出电量情况和省际间电力流向关系来源于《电力工业统计资料汇编》和《中国电力行业年度发展报告》。发电燃料消费量和平均低位发热值来源于《中国能源统计年鉴》。分燃料品种的含碳量主要来源于《省级温室气体清单编制指南(试行)》。各省火电机组的装机容量和发电时间来源于《中国电力年鉴》。行驶里程主要参考Ou等<sup>[4]</sup>的研究,不同区域私家车的行驶里程具体如表3所示。

表2 2017年中国各省电力结构 单位:亿千瓦时

发电量	火力	水力	核能	风力	太阳能
北京	379.70	11.25	—	3.47	2.25
天津	626.81	0.07	—	5.87	4.94
河北	2645.30	15.56	—	249.59	73.01
山西	2607.22	42.46	—	164.32	47.25
内蒙	3741.98	20.11	—	544.97	106.22
辽宁	1415.04	30.31	235.98	151.65	11.02
吉林	620.75	63.47	—	65.92	9.64
黑龙江	821.13	21.02	—	108.49	3.80
上海	836.13	—	—	14.99	0.56
江苏	4536.90	28.93	172.80	120.36	64.55
浙江	2560.25	204.06	510.56	26.15	35.34
安徽	2319.56	57.13	—	39.58	61.26
福建	1132.44	463.66	560.08	65.93	3.91
江西	949.00	153.21	—	31.41	26.72
山东	5546.69	6.46	—	164.24	56.54
河南	2581.06	101.23	—	26.21	38.02
湖北	1047.14	1504.24	—	54.79	24.34
湖南	787.67	594.92	—	49.00	6.03
广东	3327.59	319.21	799.87	57.34	13.41
广西	626.83	686.72	126.81	24.25	3.29
海南	195.34	26.37	74.59	5.36	2.87
重庆	467.58	261.71	—	7.67	0.61
四川	374.28	3023.56	—	38.46	16.11
贵州	1136.51	723.72	—	64.51	7.47
云南	240.34	2489.67	—	191.70	27.76
陕西	1613.54	140.15	—	51.92	40.63
甘肃	694.45	350.58	—	185.42	72.15
青海	161.24	328.14	—	17.42	108.42
宁夏	1167.14	15.45	—	149.78	73.67
新疆	2384.74	244.12	—	291.53	116.85

表3 按区域划分的私人乘用车年均行驶距离

区域	涵盖省份	年均行驶距离/千米
东北	辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古	12 404.47
华北	北京、天津、河北、山西	12 090.07
华东	上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东	12 222.88
华南	广东、广西、海南	13 568.76
华中	河南、湖北、湖南	12 681.05
西北	陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆	13 058.17
西南	重庆、四川、贵州、云南	12 261.78

### 三、电动汽车规模化应用的电力需求及碳排放转移

#### (一) 电动汽车规模化应用的电力需求预测

基于民用汽车保有量预测结果,结合所设置的相关情景,得出了各省电动汽车保有量。总体上来看,各情景下电动汽车保有量的地区差异较大。其中,河北、江苏、浙江、山东和广东的保有量较高。在快速发展情景下,这些省份的纯电动汽车和插电式混合动力汽车保有量分别超过500万辆和200万辆。而对于青海、宁夏、海南等省份,由于其人口较少,经济发展水平相对较低,电动汽车的推广数量仍然较少。在对各情景下电动汽车保有量进行预测的基础上,进一步估算各省电动汽车的电力需求,具体结果如图2所示。可以看到,各省电力需求的总体趋势与保有量基本一致,这主要是因为本文主要聚焦私家车,各地区私家车日常行驶里程差异不大。电力需求最大的为广东、山东和江苏,这些省份电动汽车年电力需求均超过了150亿千瓦时。而青海、宁夏、海南等省份在快速发展情景下的年电力需求均不超过50亿千瓦时。

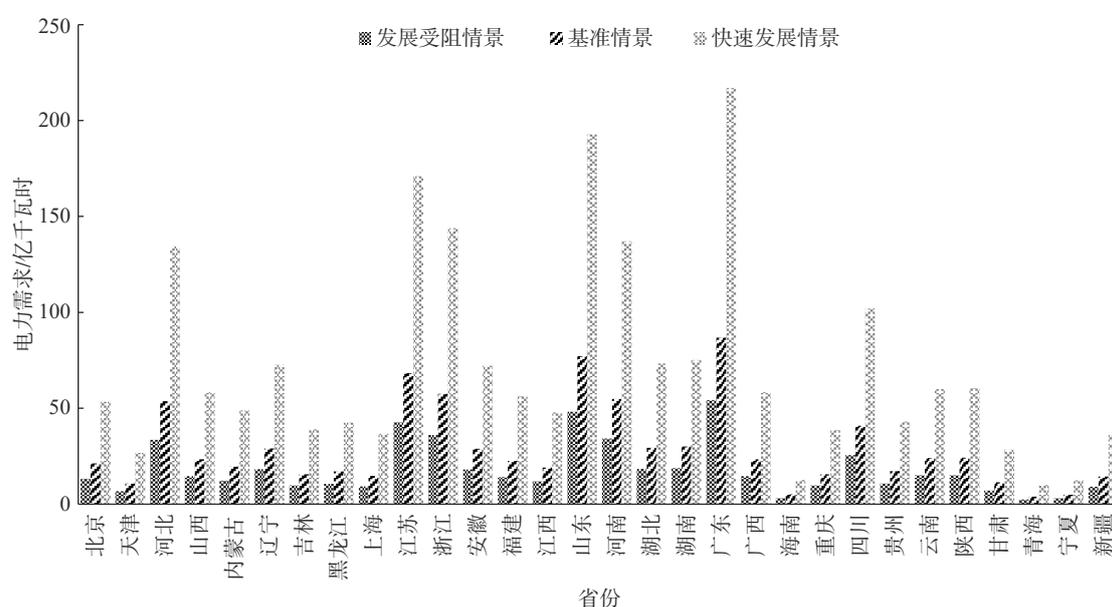


图2 三种发展情景下电动汽车的电力需求

#### (二) 电动汽车规模化应用的碳排放转移量

根据所构建的全国电力传输网络,对各省电动汽车规模化应用的碳排放转移进行了核算。全国电动汽车在发展受阻情景、基准情景和快速发展情景下的碳排放转移量分别达到585.82万吨CO<sub>2</sub>当量、937.31万吨CO<sub>2</sub>当量和2343.28万吨CO<sub>2</sub>当量。表4和表5分别展示了在不同情景下主要省份电动汽车规模化应用的碳排放移出量和移入量。北京、天津、河北、辽宁、江苏、浙江、山东和广东的碳排放移出量较大,均超过10万吨CO<sub>2</sub>当量。这些省份经济发达,电动汽车保有量相对较高,电力需求较大,外省流入电力中煤电占据较大比例,导致这些省份碳排放移出量较大。大部分地区的间接排放转移量较低,低于碳排放移出总量的5%;但北京和上海的间接排放转移量较高,分别占碳排放转移总量的20.38%和15.96%,这主要是因为它们电力来源地(如山西、江苏、浙江)同样有较多的外部流入电力,由此将碳排放经由全国电力传输网络逆向转移到了其他地区。

碳排放移入量较大的省份为山西、内蒙古、安徽、宁夏和新疆,这些省份电动汽车保有量相对较低,本地电力可以很好地满足电动汽车充电需求,同时由于电能丰富,在流出电力满足其他省份电力需求的过程中,使得碳排放回流至本省。在碳排放主要移入省份中,内蒙古的碳排放移入量远超其他省份,其排放量在电动汽车发展受阻情景下也依然超过150万吨CO<sub>2</sub>当量。除了该省电力资源丰富,更主要的原因在于其电源结构以火电为绝对主导,占总发电量80%以上。大部分地区间接排放转移量占总转移量的比例均低于10%;而新疆、贵州和吉林的这一比例分别为10.13%、16.44%和23.05%,原因在于这些地区的电力流出地多为电力枢纽,其又将大量电力传输给周边地区,如“新疆→浙江→上海”。

表4 主要省份电动汽车规模化应用的碳排放移出量

单位:万吨CO<sub>2</sub>当量

省份	发展受阻情景		基准情景		快速发展情景	
	直接移出	间接移出	直接移出	间接移出	直接移出	间接移出
河北	108.91	2.86	174.25	4.57	435.63	11.43
北京	68.17	17.45	109.07	27.91	272.68	69.78
浙江	51.81	2.71	82.89	4.34	207.23	10.84
江苏	45.32	1.08	72.52	1.73	181.29	4.34
辽宁	45.39	1.81	72.63	2.89	181.57	7.23
山东	41.27	1.66	66.03	2.66	165.07	6.64
广东	43.20	0.84	69.12	1.34	172.81	3.35
天津	23.52	0.92	37.63	1.47	94.09	3.67
河南	26.19	0.15	41.91	0.24	104.78	0.61
上海	13.46	2.56	21.53	4.09	53.83	10.22

表5 主要省份电动汽车规模化应用的碳排放移入量

单位:万吨CO<sub>2</sub>当量

省份	发展受阻情景		基准情景		快速发展情景	
	直接移入	间接移入	直接移入	间接移入	直接移入	间接移入
内蒙古	137.99	13.98	220.78	22.36	551.96	55.91
山西	88.54	1.11	141.66	1.77	354.14	4.44
宁夏	40.72	1.46	65.15	2.33	162.87	5.82
安徽	35.20	0.78	56.32	1.24	140.80	3.11
新疆	29.63	3.34	47.41	5.35	118.54	13.37
贵州	22.92	4.51	36.67	7.21	91.67	18.03
陕西	22.87	3.36	36.59	5.38	91.48	13.44
辽宁	22.09	0.10	35.35	0.16	88.37	0.40
湖北	19.34	0.15	30.95	0.23	77.37	0.58
吉林	13.14	3.94	21.03	6.30	52.57	15.75

### (三)电动汽车规模化应用的碳排放转移路径

为了更好地展示区域间碳排放转移关系,表6绘制出碳排放转移的主要路径。从地理区位上来看,碳排放移出量较多的省份基本分布在东部沿海,而碳排放移入量较多的省份主要分布在中、西部地区。也就是说,随着电动汽车保有量的增多,大规模电力需求所带来的排放转移呈现从东向西的趋势,这与电力传输的方向正好相反。但是,电力外输大省未必是碳排放移入的主要省份。如广东省电动汽车在发展受阻情景、基准情景和快速发展情景下的电力需求均为所有省份中最高,但是其碳排放转移量却低于河北、北京、浙江、江苏、辽宁和山东。主要原因在于广东外部流入电力的一半以上来自云南,而云南非化石能源发电(包括水电、风电和太阳能发电)占总发电量的比例超过90%,这大幅降低了流入电力的碳排放转移量。广东省电动汽车规模化应用的碳排放转移地主要为贵州,但是贵州并不是广东最大电力流入的省份。因而电动汽

表6 电动汽车规模化应用的主要碳排放转移路径

单位:万吨CO<sub>2</sub>当量

转移路径	发展受阻情景	基准情景	快速发展情景
河北→内蒙古	66.57	106.52	266.30
辽宁→内蒙古	34.06	54.50	136.25
河北→山西	29.65	47.45	118.62
河南→新疆	24.12	38.59	96.48
北京→辽宁	22.07	35.31	88.27
北京→山西	21.97	35.16	87.89
浙江→安徽	21.35	34.16	85.41
浙江→宁夏	20.91	33.45	83.63
广东→贵州	20.53	32.85	82.12
江苏→山西	20.02	32.03	80.07
山东→宁夏	18.36	29.38	73.44
北京→河北	14.66	23.46	58.64
江苏→安徽	13.85	22.15	55.39
北京→内蒙古	13.64	21.82	54.55
山东→内蒙古	12.26	19.61	49.03

车推广规模的逐渐扩大未必会导致区间碳排放转移量的增加。除了从东部向西部的总体转移趋势外，各区域电网内部的碳排放流动不容忽视，可以看到同属于华东电网的浙江和江苏向安徽转移了的大量碳排放，类似情况同样存在于华北电网。

为说明电力跨区传输在电动汽车碳排放核算中的重要作用，绘制了主要省份电动汽车规模化应用的排放转移在总排放量中的结构，如图3所示。图3所展示的省份中，随着电动汽车保有量的增加，碳排放转移量在总排放中所占比例持续增高。对于部分地区来说，如北京市，其电动汽车电力需求所产生的碳排放转移已经占总排放量的90%以上。也就是说，忽视电力传输所带来的排放转移会导致电动汽车碳排放核算的较大偏差。在以往研究中，当核算电动汽车在行驶阶段的碳排放时，大部分研究忽略了电力跨区传输的影响，当然这与过去各区域间电力传输量较小有关。近期部分研究开始关注这一问题，如Shen等<sup>[42]</sup>在核算电动汽车2030年的排放量时，虽然也考虑了电力跨区传输的影响效应，但主要是各大区域电网之间的电力流通，未能将尺度进一步拓展到省级层面。也有少量研究考虑省域间电力传输，但只考虑了各省电力净流入或流出量的排放转移，未能将各省电力流入和流出量分开核算，本文的研究弥补了上述缺陷。

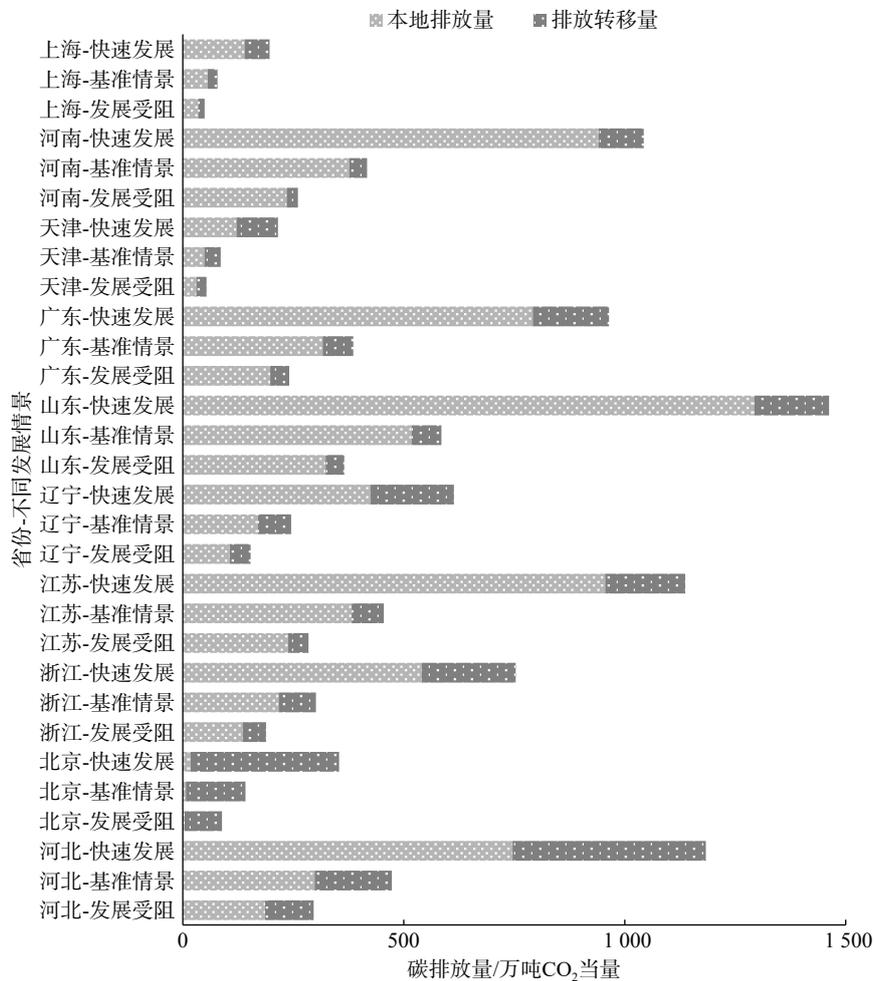


图3 主要省份电动汽车规模化应用的碳排放量

#### (四) 电动汽车规模化应用碳排放转移的环境效益

由于各省份在不同情景下的排放转移量仅在绝对量上存在差异，占总排放量的比例一致。因此，以各省份在电动汽车快速发展情景下的环境收益和损失计算结果为例进行分析，具体如表7所示。由表7可以看到，东部地区的环境净收益基本为正，其中上海的环境净收益最高为21.19亿元；而中、西部地区的环境净收益大多为负，净损失最大的山西为-2.91亿元；全国的环境净收益为76.88亿元。这表明东部地区所取得的环境收益远超过西部地区的环境损失。对于东部地区来说，通过中西部地区的电力流入

减少本地电力生产来满足电动汽车规模化发展,这有利于全国总体环境效益提升。

表7 主要省份环境成本和收益

进出口地	省份	单位环境损失/ (元/千瓦时)	环境收益/ 亿元	环境成本/ 亿元	净收益/ 亿元
主要电力 出口地	内蒙古	0.07	0.16	2.60	-2.45
	山西	0.12	0.24	3.15	-2.91
	宁夏	0.14	0.38	2.00	-1.62
	安徽	0.12	0.30	1.46	-1.16
	新疆	0.04	0.00	0.43	-0.43
主要电力 进口地	上海	1.12	24.00	2.81	21.19
	广东	0.2	15.82	0.00	15.81
	江苏	0.34	12.73	0.75	11.98
	北京	0.27	11.22	0.04	11.18
	浙江	0.21	9.24	0.61	8.63
全国		0.15	101.31	24.43	76.88

#### 四、结论

发展电动汽车是国家推进生态文明建设和打赢蓝天保卫战的重要举措。随着电动汽车保有量的提高,大规模充电需求要以区域间电力传输为保障,由此产生碳排放在区域之间的转移。本文利用准投入产出分析方法,测算了多种情景下电动汽车规模化应用的碳排放转移情况,主要结论如下:(1)电动汽车规模化应用会加剧碳排放在区域之间的流动,主要路径为经济发达的沿海地区向欠发达的中、西部地区输出碳排放,以及各区域电网内部的碳排放转移,最大的电力流出省份内蒙古在电动汽车快速发展情景下流入的碳排放超过600亿吨。(2)碳排放转移除了由电力流入地向电力流出地直接转移,还会通过电力枢纽地区间接流向其他地区,产生间接碳排放转移,大部分地区间接转移占总排放转移的比例不足10%,而北京和上海的间接碳排放转移量均超过总排放转移量的15%。(3)电动汽车电力需求所产生的碳排放转移量在总排放量中的比例不容忽视,如北京市电动汽车的碳排放转移量甚至超过总排放量的90%。(4)电力跨区传输对电动汽车规模化应用的环境价值具有正向影响,有利于提升全国总体环境效益。

随着全国电动汽车保有量的持续增多,大规模充电需求所带来的碳排放转移将不断加剧,这无疑会给电力流出量较大的中、西部地区造成较大负面影响。电力生产过程中将产生大量气态排放物进入环境,危害生态系统和人体健康,阻碍当地经济社会的可持续发展。如果不采取措施缓解和治理碳排放转移问题,中、西部地区实际上承担了其他区域电动汽车电力消费的外部性。此外,中、西部地区的生态环境比东部沿海地区更加脆弱、难以恢复,过度的能源资源开发将产生永久性的环境问题,不利于区域协调发展目标的实现。随着电力跨区传输体量不断增大,这种环境压力将愈发明显。为了平衡地区之间的环境利益,实现资源的有效配置,从碳排放转移的角度来看,本文可为电动汽车推广工作提供如下启示:(1)碳排放移出量较大的地区大多经济发达,基础设施建设完善,公众对电动汽车认知程度高,具备较好的电动汽车推广条件;但这些地区电力需求较为依赖于外部电力供应,导致大量碳排放转移至其他地区。因此,此类地区在推广电动汽车的过程中,应该通过生态补偿措施调控本地电动汽车发展给其他地区造成的环境损失。(2)碳排放移出量较少地区的电力供应大多可以满足自身需求,因而这些地区应逐步提升清洁能源在发电结构中的比重。(3)碳排放移入量较大地区的电源结构以化石能源为主,为了降低外输电力给自身所带来的环境影响,除了提升清洁能源发电能力,更需要提升清洁能源发电在外输电力中的比例,例如内蒙古和新疆都有较为丰富的风力资源。(4)部分对外流出电量很大的地区排放移入量较小(如云南和四川),即便对外大规模流出电力,对本地碳排放的影响也不明显,这些地区的电源结构可以很好地发挥电动汽车节能环保的优势。

## 参考文献:

- [1] YIN X, CHEN W, EOM J, et al. China's transportation energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions from a global perspective[J]. *Energy Policy*, 2015, 82: 233–248.
- [2] 公安部交管局. 全国机动车保有量达 3.65 亿辆 [EB/OL]. ( 2020-10-20 ). [http://www.gov.cn/xinwen/2020-10/20/content\\_5552831.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-10/20/content_5552831.htm).
- [3] ZHANG Y, LIU Z, QIN C, et al. The direct and indirect CO<sub>2</sub> rebound effect for private cars in China[J]. *Energy Policy*, 2017, 100: 149–161.
- [4] DU Z L, LIN B Q, GUAN C X. Development path of electric vehicles in China under environmental and energy security constraints[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 143: 17–26.
- [5] 智研咨询集团. 2017—2023 年中国新能源汽车产业竞争现状及未来发展趋势报告 [R/OL]. ( 2017-04 ). <https://www.chyxx.com/research/201704/515256.html>.
- [6] 节能与新能源汽车技术路线图战略咨询委员会, 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [7] 国家发展和改革委员会能源研究所, 国家可再生能源中心, 清华大学, 等. 新能源发电与电动汽车协同发展战略研究 [R/OL]. ( 2019-11-08 ). <https://max.book118.com/html/2019/1108/5143213144002200.shtm>.
- [8] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [9] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020.
- [10] LI F, XIAO X, XIE W, et al. Estimating air pollution transfer by interprovincial electricity transmissions: the case study of the Yangtze river delta region of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 56–66.
- [11] AHN S, KIM L, KWON O. Korea's social dynamics towards power supply and air pollution caused by electric vehicle diffusion[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 205: 1042–1068.
- [12] LI N, CHEN W. Modeling China's interprovincial coal transportation under low carbon transition[J]. *Applied Energy*, 2018, 222: 267–279.
- [13] TANG J P. Pollution havens and the trade in toxic chemicals: evidence from U. S. trade flows[J]. *Ecological Economics*, 2015, 112: 150–160.
- [14] 李方一, 刘卫东, 唐志鹏. 中国区域间隐含污染转移研究 [J]. *地理学报*, 2013, 68 ( 6 ): 791–801.
- [15] 庞军, 石媛昌, 李梓瑄, 等. 基于 MRIO 模型的京津冀地区贸易隐含污染转移 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37 ( 8 ): 3190–3200.
- [16] 刘巧玲, 王奇. 我国省际贸易隐含污染核算方法的比较研究 [J]. *统计研究*, 2016, 33 ( 10 ): 12–20.
- [17] ZHANG Y, LI Y, HUBACEK K, et al. Analysis of CO<sub>2</sub> transfer processes involved in global trade based on ecological network analysis[J]. *Applied Energy*, 2019, 233–234: 576–583.
- [18] LI Y L, LI Z, CHEN B, et al. Tracking carbon transfers embodied in Chinese municipalities' domestic and foreign trade[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 192: 950–960.
- [19] 黄永明, 陈小飞. 中国贸易隐含污染转移研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2018 ( 10 ): 112–120.
- [20] DONG D, AN H, HUANG S. The transfer of embodied carbon in copper international trade: an industry chain perspective[J]. *Resources Policy*, 2017, 52: 173–180.
- [21] QU S, LIANG S, XU M. CO<sub>2</sub> emissions embodied in interprovincial electricity transmissions in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 18 ( 51 ): 10893–10902.
- [22] YUAN R, RODRIGUES J F D, BEHRENS P. Impact of non-fossil electricity on the carbon emissions embodied in China's exports[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 192: 582–596.
- [23] LI J, LIN B. Environmental impact of electricity relocation: a quasi-natural experiment from interregional electricity transmission[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2017, 66: 151–161.
- [24] JI L, LIANG S, QU S, et al. Greenhouse gas emission factors of purchased electricity from interconnected grids[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 751–758.
- [25] 叶敏华, 蔡闻佳, 王灿. 跨区电力传输对大气污染物和 CO<sub>2</sub> 的区域排放影响研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33 ( 10 ): 1869–1875.
- [26] SU S, FANG X, ZHAO J, et al. Spatiotemporal characteristics of consumption based CO<sub>2</sub> emissions from China's power sector[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2017, 121: 156–163.
- [27] 孙媛, 张鸣之, 于洋, 等. 电力跨区域调配隐含的污染转移效应 [J]. *中国环境监测*, 2018 ( 3 ): 68–74.
- [28] 魏文栋, 张鹏飞, 李佳硕. 区域电力相关碳排放核算框架的构建和应用 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30 ( 7 ): 38–46.
- [29] LI W, YANG M, LONG R, et al. Assessment of greenhouse gasses and air pollutant emissions embodied in cross-province electricity

- trade in China[J/OL]. Resources, Conservation and Recycling, (2021-08).<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105623>.
- [30] 宋洁尘, 陈秀山, 刘玉. 西电东送输入区环境效应综合评价:以广东省为例[J]. *资源科学*, 2005 (5): 47–54.
- [31] MANJUNATH A, GROSS G. Towards a meaningful metric for the quantification of GHG emissions of electric vehicles (EVs)[J]. *Energy Policy*, 2017, 102: 423–429.
- [32] WANG Z, ZHAO C, YIN J, et al. Purchasing intentions of Chinese citizens on new energy vehicles: how should one respond to current preferential policy?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1000–1010.
- [33] 欧训民, 张希良, 覃一宁, 等. 未来煤电驱动电动汽车的全生命周期分析[J]. *煤炭学报*, 2010, 35 (1): 169–172.
- [34] ZHANG Q, OQ X, YAN X, et al. Electric vehicle market penetration and impacts on energy consumption and CO<sub>2</sub> emission in the future: Beijing case[J]. *Energies*, 2017, 10 (2): 228.
- [35] CHOI W, SONG H H. Well-to-wheel greenhouse gas emissions of battery electric vehicles in countries dependent on the import of fuels through maritime transportation: a south Korean case study[J]. *Applied Energy*, 2018, 230: 135–147.
- [36] KE W, ZHANG S, HE X, et al. Well-to-wheels energy consumption and emissions of electric vehicles: mid-term implications from real-world features and air pollution control progress[J]. *Applied Energy*, 2017, 188: 367–377.
- [37] 宋永华, 李保卫, 胡泽春. 我国电动汽车碳排放区域特征分析[J]. *中国能源*, 2013, 35 (5): 12–16.
- [38] 郭栋, 张洪浩, 郑春燕, 等. 未来中国汽车类型发展预测及节能减排效益分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36 (6): 1593–1599.
- [39] 冯超. 基于HLCA的电动汽车规模化发展对能耗及环境影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- [40] QU S, WANG H, LIANG S, et al. A quasi-input-output model to improve the estimation of emission factors for purchased electricity from interconnected grids[J]. *Applied Energy*, 2017, 200: 249–259.
- [41] OU S, YU R, LIN Z, et al. Intensity and daily pattern of passenger vehicle use by region and class in China: estimation and implications for energy use and electrification[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2020, 25 (3): 307–327.
- [42] SHEN W, HAN W, WALLINGTON T J, et al. China electricity generation greenhouse gas emission intensity in 2030: implications for electric vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53 (10): 6063–6072.

## Carbon Emission Transfer by Large-scale Application of Electric Vehicles from the Perspective of Inter-regional Electricity Transmission

LI Wenbo<sup>1</sup>, LONG Ruyin<sup>2</sup>, ZHANG Linling<sup>3</sup>

(1. Business School, Jiangsu Normal University, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 2. School of Business, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China; 3. School of Public Finance and Taxation, Nanjing University of Finance & Economics, Nanjing Jiangsu 210023, China)

**Abstract:** The promotion of electric vehicles (EVs) can effectively reduce tailpipe emissions or even achieve zero emissions, but the essence is the transfer of pollution emissions to the power generation side. In recent years, the policy-driven development of China's EV market has achieved a great success, which has drawn increasing attention to carbon emission transfer behind the large-scale electricity consumption of EVs. Based on the perspective of inter-regional electricity trade, this study builds a quantitative model to measure the carbon emission transfer of EVs under several scenarios, and summarizes the spatial distribution of carbon emission transfer. Furthermore, we analyze the environmental benefits/costs of the large-scale application of EVs. Results showed that the development of electric vehicles will intensify the flow of carbon emissions among regions, and the carbon emissions transfer of EVs under the blocked development scenario, the baseline scenario and the rapid development scenario reach  $5.85 \times 10^6$  tons,  $9.37 \times 10^6$  tons and  $23.43 \times 10^6$  tons CO<sub>2</sub> equivalent respectively. Main path of carbon emissions transfer is the export of carbon emissions from the economically developed coastal regions to the less developed central and western regions, and there is also a large amount of carbon emissions transfer between provinces within the North China and East China power grids. In addition to the direct transfer of carbon emissions from power importers to power exporters, emissions also flow to other regions through power hubs indirectly, resulting in indirect carbon emissions transfer. The amount of indirect carbon emissions transfer in Beijing and Shanghai even exceed 15% of the total carbon emissions transfer. The inter-regional electricity trade has considerable environmental value for the large-scale application of EVs, which is conducive to enhance the overall environmental benefits of the country. Therefore, in the process of rational distribution of the development scale and priorities of EVs, except for paying attention to the overall environmental benefits of EVs, the environmental pressure on the power exporting regions should also be alleviated as much as possible.

**Keywords:** inter-regional electricity trade; electric vehicles; carbon emission transmission; quasi-input-output model

[责任编辑:孟青]