

深圳市道路交通机动车全面电动化路线图研究

曾元 唐杰 王东

摘要：交通部门能源活动产生的碳排放已成为深圳市第一大的碳排放源。本研究以深圳市为对象，借鉴国内外先进经验，梳理深圳市推广新能源汽车的前期成效，基于自下而上模型科学论证道路交通全面电动化的碳减排潜力及成本效益。研究发现，现有政策情景下由于新能源汽车的大力推广，深圳市道路交通碳排放预计在2022年达峰，随后至2050年逐年下降；而在全面电动化和能源结构大幅优化的情景下，碳排放达峰后至2050年保持快速下降。2020—2050年道路交通全面电动化的边际减排成本呈现出先逐年下降，2031年后产生边际减排收益的趋势。根据研究结果，提出未来深圳市道路交通电动化路线图及政策建议，以支撑近期碳排放达峰及远期碳中和目标的实现。

关键词：纯电动汽车；碳减排；成本效益分析；路线图

中图分类号：X73;U12 **文献标识码：**A **文章编号：**1673-5706(2021)05-0045-07

一、引言

2018年，石油燃烧产生的二氧化碳(CO₂)排放量占全球燃油燃烧产生的CO₂排放量的34.1%，而交通运输业占全球石油消耗量的65.2%，其中公路运输占49.3%。^[1]从2000年到2019年，中国的汽车保有量增长迅速，年均增长率超过15.6%。^[2]截至2020年底，中国机动车保有量为3.72亿辆，其中汽车2.81亿辆，新能源汽车保有量492万辆，占汽车总量的1.75%，纯电动汽车保有量400万辆，占新能源汽车总量的81.32%。中国70个城市汽车保有量超过百万辆，其中，北京、成都、重庆、苏州、上海、郑州、西安、

武汉、深圳等13个城市超300万辆，^[3]这必将导致城市道路交通能耗和温室气体排放（以下简称“碳排放”）的快速增长。

道路交通的碳减排需要提高燃油汽车的平均能效，同时提高新能源汽车尤其是纯电动汽车的销售份额。^[4]深圳市作为国家首批低碳试点城市、碳排放权交易试点城市、可持续发展议程创新示范区，将绿色低碳作为破解深圳发展难题的重要抓手，^[5]是中国最早推广新能源汽车的城市之一，也是中国首批13个节能与新能源汽车示范城市之一。^[6]截至2019年底，交通部门（包含道路和非道路交通能源活动产生的碳排放）已成为深

圳市第一大的碳排放源, 约占深圳市全部门(制造业、建筑、交通、其他)碳排放的40%, 因此, 交通部门尤其是道路交通的碳减排已成为深圳市实现碳达峰、碳中和的最重要抓手。

在道路交通领域的碳排放核算及未来情景分析的研究中, 一般采用自下而上模型, 通过计算并预测未来基准情景的交通碳排放, 然后根据减排政策目标和技术参数, 计算各政策情景下碳排放和减排潜力, 据此提出相应的政策建议及技术路线图, 部分研究在计算政策实施的减排潜力同时计算了政策的边际减排成本。^[7] 这类模型以能源需求和能源消费为分析对象, 对各部门由于人类活动变化所引起的能源需求和消费方面的变化, 进行详细地分析计算, 代表性的模型有法国的 MEDEE 模型和 LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System) 模型。^{[8][9][10]} 例如, 利用在美国48个城市地区的详细数据, Hartgen 等基于自下而上模型^[11]比较了提高燃油经济性、交通系统的改善和出行方式的改变引起的成本效益和CO₂的减排量。Huo 等^[12]基于自下而上模型预测了中国各类机动车温室气体排放, 并分析了提高燃油效率、机动车柴油化、发展纯电动汽车、发展替代燃料四种政策情景的温室气体减排潜力, 并对四种政策同时实施情景下的温室气体减排潜力进行了分析。高波阳和刘卫东^[13]分析了优先发展公共交通、鼓励发展小排量汽车、降低机动车单耗、控制排放物标准等四种道路交通碳减排途径, 并结合自下而上方法和情景分析方法计算了不同政策力度下的中国道路交通碳减排潜力。高怡^[14]运用 LEAP 模型的原理构建碳排放测算模型, 以西安市为例, 分析比较各情景碳排放情况, 结果表明同时发展公共交通与加大低碳技术投资与运用的减排效果最为明显。尽管自2009年起深圳市大规模的新能源汽车, 如实行了公交、出租全面电动化, 新能源私家车不限购等政策, 但由于城市的边界较小, 数据获取难度大, 现有研究多缺乏城市尺度的尤其是针对深圳市推广新能源汽车的未来减排潜力和边际减排成本的研究, 缺乏针对深圳市未来实现碳达峰、碳中和背景下的新能源汽车推广方案的探讨。

随着新能源汽车(包括纯电动汽车、插电式混合动力汽车、氢燃料电池汽车)技术的更新迭代, 未来深圳市的传统内燃机车的市场份额将不断缩小, 车辆技术与燃料结构将更加多元化。尽管如此, 不同的新能源汽车所适用的车辆类型及用途有着较大差异。因此, 本研究聚焦深圳市道路交通全面电动化, 通过梳理前期推广新能源汽车的政策成效, 搜集未来人口、机动车等道路交通发展数据, 基于自下而上模型对各类机动车电动化的碳减排潜力、成本效益进行技术经济分析, 并借鉴国内外先进政策设计经验, 提出未来深圳道路交通全面电动化路线图及政策建议。

二、国内外新能源汽车推广经验

国际能源署的《2021年全球电动汽车展望》^[15]报告表示, 经过十年的快速增长, 到2020年底, 全球道路上有1000万辆电动汽车。2020年, 尽管因新冠肺炎疫情全球汽车销量下降了16%, 但电动汽车的注册量增加了41%。纯电动汽车在全球的销量约为300万辆, 欧洲首次超过中国成为全球最大的电动汽车市场。从保有量来看, 2020年中国新能源汽车保有量全球第一, 占全球一半, 约有350万辆纯电动汽车(BEV)和100万辆插电式混合动力汽车(PHEV), 应用场景涵盖私家车、公务车、商用客货车和共享汽车等等。

在国家层面, 以美、日、欧为代表的汽车发达国家和地区均发布了各自新能源汽车发展规划和技术路线图。例如, 为实现2050年碳中和的目标, 2020年底日本政府发布的《伴随2050年碳中和的绿色成长战略》设定了到2030年代中期在日本国内停销纯燃油乘用车的目标, 2021年1月日本政府明确“到2035年, 新销售的汽车100%将为电动化车辆”。2017年, 美国发布《新能源汽车机电控2025技术发展路线图》,^[16]2021年3月拜登政府发布《基础设施计划》, 提议投资1740亿美元支持美国电动汽车完善国内产业链、销售折扣与税收优惠、到2030年建50万个充电桩、校车公交及联邦车队电动化。欧盟发布了史上最严苛的汽车排放标准——《欧洲绿色新政》, 提出欧盟将在2050年成为首个“碳中和”区域, 为此引入的严苛排放标准和惩罚措施将会倒逼新能源汽车产业的

发展。德国政府早在 2009 年和 2011 年就分别发布了《国家电动汽车发展规划》和《电动汽车政府方案》^[17]提出了德国电动汽车未来 50 年的发展目标。2017 年以来,英国先后发布《英国道路近旁氮氧化物减排计划》和《零排放之路》,提出 2040 年禁售传统燃油车的规划愿景。^[18]这些规划和路线图为各国给出了新能源汽车技术和产业的发展方向。

中国政府高度重视新能源汽车技术和产业的发展。2009 年财政部、科技部联合发布了《关于开展节能与新能源汽车示范推广试点工作的通知》,正式启动“十城千辆节能与新能源汽车示范推广应用工程”,明确指出要在北京、上海、重庆等 13 个城市开展节能与新能源汽车示范推广试点工作,并不断增加试点城市。国务院和交通运输部先后分别印发《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020 年)》(2012)和《关于加快新能源汽车在交通运输行业推广应用的实施意见》(2015),对新能源汽车未来发展方向进行了部署,同时完善配套服务设施建设,以提升新能源汽车的运营效率和安全水平。2016 年因新能源汽车产量的大幅增加,大规模财税补贴难以为继,为继续推进新能源汽车的发展,国家发展改革委发布《新能源汽车碳配额管理办法》征求意见稿,以配额形式代替补贴来刺激新能源汽车的发展。2017 年工业和信息化部、财政部、商务部、海关总署、质检总局联合公布了《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》,正式发布双积分政策,通过建立积分交易机制,替代财政补贴,以同时提高汽车能效、促进新能源汽车的快速发展。2020 年国务院印发《新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)》,以推动新能源汽车产业高质量发展,加快建设汽车强国。2017 年中国汽车工程学会出版的《节能与新能源汽车技术路线图》,提出了到 2030 年我国纯电动汽车和混合动力汽车以及充电基础设施的发展目标,并于 2021 年出版了《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》,根据实际发展情况修订完善了新能源汽车发展技术路线图,提出到 2030 年全国新能源汽车保有量超过 8000 万辆、2035 年超过 1.6 亿辆的目标。

三、深圳市新能源汽车推广的前期政策成效

政策推进电动化发展。深圳市从 2009 年开始大力推广新能源汽车,为全面贯彻中央、省和市有关决策部署,持续提升大气质量,保持“深圳蓝”的亮丽城市名片,深圳以公共服务领域为突破口,在公共交通、公务车、私人轿车、轻型货车(包含物流车、环卫车等)领域逐步开展新能源汽车推广应用。深圳市与新能源车辆推广应用相关的现行政策有 10 余项,如《深圳市新能源汽车发展工作方案》《深圳市 2016—2020 年新能源汽车推广应用工作方案》《深圳市开展国家新能源汽车动力电池监管回收利用体系建设试点工作方案(2018—2020 年)》《深圳市人民政府办公厅关于印发 2018 年“深圳蓝”可持续行动计划的通知》《关于对新能源纯电动物流车继续实施通行优惠政策的通告》《关于进一步加快纯电动出租车充电设施建设的通知》《深圳市新能源汽车推广应用工作方案(2021—2025 年)》等,从多角度全方位助力新能源汽车的推广。

各类电动汽车推广应用初显成效。早在 2014 年,深圳市因拥有当时全球最大规模的纯电动公交车车队,而获“C40& 西门子城市气候领袖奖”。截止到 2020 年 9 月,深圳新能源汽车保有量约为 44.3 万辆,占全市机动车总保有量的 12.6%,规模超过上海和北京,位居全国第一。其中,2017 年深圳实现全市专营公交车 100% 纯电动化,成为全球纯电动公交车规模最大、应用最广的城市。2019 年出租车实现全部纯电动化,深圳市成为国内一线城市中唯一实现巡游出租车纯电动化的城市,也成为全球运营纯电动巡游出租车规模最大的城市。私人轿车领域,深圳市插电式混合动力小汽车和纯电动小汽车的增量指标总量没有额度限制,通过个人申请及资格审核后即可直接发放。深圳已连续四年成为全球新能源电动物流车保有量最大的城市,截至 2020 年 9 月,深圳市纯电动物流车保有量 8.6 万辆,注册登记量位列全国第一。长途运输的重型货车由于车辆总设计质量大、运输距离长,短期内电动化面临的技术与成本阻碍较大,但作为示范,深圳市已推广 4306 新能源泥头车。

氢燃料电池汽车成本过高,仅处于小规模示范

阶段。2019年,深圳市推广了657辆氢燃料电池物流车。2021年1月4日,由深圳氢时代新能源科技有限公司配套的氢燃料电池半挂牵引车首次在深圳盐田港正式进行港口运营测试,这也是继青岛港和上海港之后,国内第三个港口引进氢能重卡进行专项测试。预计到2030年之后,氢燃料电池车才可能加速发展,实现商业化并占据一定市场份额。

从存在的问题和挑战来看,现阶段深圳市公共领域新能源汽车的推广受到充电设施不足、产品竞争力低、电池更换费用高、货车电动化购置成本较高、资金压力大等问题影响较大。而私人领域新能源汽车推广也受到诸多问题的限制:一是新能源汽车成本偏高,较同级燃油车贵80%以上;二是使用便利性不够,充电基础设施数量不足,私人建充电桩难,停车资源紧张;三是动力电池回收网络不完善,尚无动力蓄电池梯次利用管理平台。

四、深圳道路交通全面电动化的碳减排及成本效益分析

(一) 碳排放核算及成本效益分析方法

本研究采用基于交通工具的碳排放核算模型进行城市道路交通的碳排放的核算,其计算原理是指利用车辆保有量、车辆行驶里程、机动车燃油经济性、单位燃料消耗的排放因子等关键因素,建立温室气体排放清单,是一种“自下而上”的方法。对于一定区域,某年(t)的能源消耗和温室气体排放量的核算公式如下:

$$E_t = \sum_j E_{jt} = \sum_j \sum_i (VP_{ijt} \times VKT_{ijt} \times FE_{ijt} \times Density_j) \quad (1)$$

$$GHG_t = \sum_j \sum_k (E_{jt} \times EF_{jk} \times GWP_k) \quad (2)$$

式中 i, j, t, k 分别代表机动车类型,燃料类型,模拟的年份,温室气体类型,本研究中温室气体类型包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 。 E_t 和 GHG_t 分别代表在 t 年道路交通能源消耗量(kg)和温室气体排放量(gCO_2e), VP_{ijt} , VKT_{ijt} 和 FE_{ijt} 分别代表 t 年使用燃料 j 的机动车 i 的保有量、年均行驶里程(km)和燃油经济性(L/km); $Density_j$ 代表燃料 j 的密度(kg/L),本研究中汽油取0.732,柴油取0.875; E_{jt} 代表 t 年的燃料 j 的消耗量(kg); EF_{jk} 代表燃料 j 的温室气

体 k 的排放因子($g\ kg^{-1}$); GWP_k 代表温室气体 k 的100年全球变暖潜能值 $GWP100$ 的值。 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 三类温室气体的 $GWP100$ 的值按《2006年IPCC国家温室气体清单指南》规定取值,分别为1、21、310。

本研究中计算的推广新能源汽车政策的碳减排成本,是指当推广新能源汽车政策的实施对城市道路交通产生影响后,相应的机动车和基础设施的增量投资成本、增量运营和维护成本以及相应的燃料成本的变化之和。推广新能源汽车政策的边际减排成本,是指在同一段时期内温室气体减排潜力的总和除以政策的成本净现值成本,其计算方法如下:

$$I = \frac{\sum_{t=t_0}^T (C_t / (1+r)^{t-t_0})}{\sum_{t=t_0}^T (GHG_t - GHG'_{t1})} \quad (3)$$

其中, r 是贴现率, C_t 是政策在 t 年的总减排成本, GHG_t 是政策实施前在 t 年的温室气体排放量; GHG'_{t1} 是政策实施后在 t 年的温室气体排放量; t_0 是研究的基准年; T 是研究期的最后一年。

(二) 情景设定

通过搜集未来深圳市人口、机动车等规划发展数据,基于自下而上的碳排放核算模型,以2019年为基准年,结合历史发展趋势,按照车辆自然淘汰规律(即不考虑燃油汽车的加速淘汰),设定在2020—2050年的现有政策情景、全面电动化情景两种未来深圳市汽车发展的政策路径,对不同情景的能源消耗、碳排放和机动车的投资及运营维护成本进行分析,比较得出深圳市道路交通全面电动化的减排潜力和成本效益。此外,由于氢燃料电池汽车成本过高,还不具备规模化商业推广条件,在此的展望研究暂不考虑其未来推广情况。

现有政策情景反映了按国家、广东省及深圳市政府宣布的所有已制定的政策和目标。其中,乘用车、商用车的新能源汽车推广份额,2025年的前来自《深圳市新能源汽车推广应用工作方案(2021—2025年)》的规划,2025—2035年参考《节能与新能源汽车技术路线图2.0》的推广率,2036—2050年的按照更新及新增重型货车中纯电动车型在2060年达到20%,其他车型达到100%

进行推算,其他中间年份数据用线性插值计算。

全面电动化情景在现有政策情景的参数设置基础上,假设2050年左右深圳市为达到净零碳排放的目标,道路交通实现机动车全面电动化。其中,参考从2030年起,新增及更新的中型、轻型、微型货车100%为纯电动汽车,私家车至2035年新增及更新全部为新能源汽车,其中10%为PHEV,至2050年纯电动推广率达到100%。假设重型货车、大型客车的纯电动技术自2030年开始飞跃式发展,成本显著下降,到2050年新增及更新推广率分别达到70%、100%,另外新增及更新的30%的重型货车采用LNG作为燃料。

(二) 机动车燃料结构及能耗变化

在现有政策情景中,深圳市所有机动车的电动汽车保有量将从2020年的超过44万辆增长到2030年的近208万辆,占比41%,2050年增长到约476万辆,占比75%。而在全面电动化情景中,深圳市所有机动车的电动汽车保有量将增长到2030年的近349万辆,占比70%,2050年增长到约628万辆,占比99%。

相比于现有政策情景,道路交通机动车全面电动化的实施会导致深圳市电力消耗大幅增加,预计到2030年会增加84%,达到2020年机动车耗电量的3.0倍,到2050年会增加61%,达到2020年机动车耗电量的4.8倍,庞大的补能需求将给深圳市的电力供给带来前所未有的压力。但全面电动化的实施给深圳市带来了巨大的节油效果,预计到2030年,相比于现有政策情景将减少38%的燃油消耗,到2050年将减少88%。

(三) 碳减排潜力及成本效益

考虑新能源汽车通过耗电产生的间接碳排放,如图1所示,首先受新冠疫情影响深圳市2020年道路交通碳排放会有一个下降趋势,而在“十四五”时期,现有政策情景下由于新能源汽车的大力推广,预计深圳市道路交通碳排放预计在2022年达峰,随后至2050年逐年下降,相比2019年减少约35%。

而在全面电动化情景下,如果未来深圳市电力排放因子维持在现有水平,那么2022—2035年深圳市道路交通碳排放达峰后会快速下降,2035年后受电力消耗的间接排放大幅增加影响,碳排放下降

速率大幅减缓,2050年相比2019年减少约49%的碳排放;如果未来深圳市电力碳排放因子随着全国可再生能源及碳中和技术(比如碳捕获、利用与封存CCUS技术等)的大力发展而大幅度下降,假设在2060年南方电网达到零排放水平,那么按此趋势计算,深圳市道路交通碳排在2022年达峰后至2050年保持快速下降的趋势,2050年相比2019年减少约76%的碳排放,剩余的因LNG、电力消耗产生的碳排放需要靠碳汇等手段来进行中和。

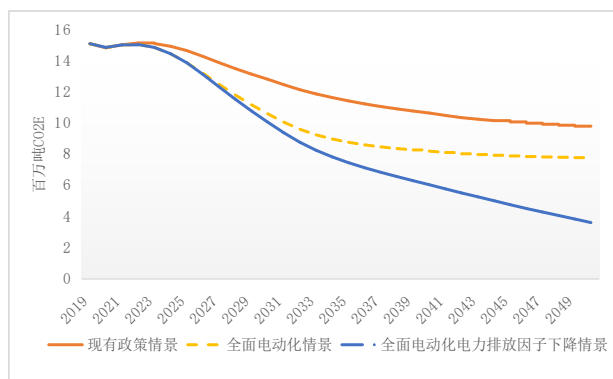


图1 深圳市2019—2050年机动车直接及电力的碳排放趋势

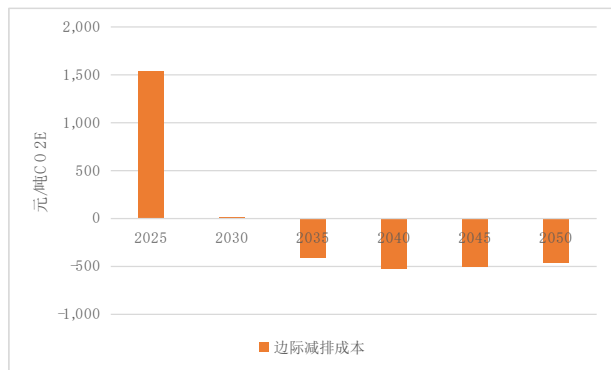


图2 深圳市机动车全面电动化的边际减排成本

考虑机动车的投资增量成本、充电设施建设和运营维护成本、机动车的运营维护成本及燃料消耗成本的变化,如图2所示,不考虑电力排放因子的变化,2020—2050年深圳市道路交通全面电动化的边际减排成本呈现出先逐年下降,2031年后产生边际减排收益的趋势,边际减排成本的下降主要原因是随着新能源汽车的大力推广产生的规模效应,单位车辆的投资成本在不断下降,产生边际减排收益的主要原因来自相比于现

有政策情景，机动车全面电动化产生的累积燃油节约收益越来越大，2031年后会燃油节约收益超过了其他成本的增量。因可再生能源、CCUS技术发展产生的电力排放因子的下降，将会产生更高的技术投资成本，需要未来综合能源、交通等多领域进行进一步的技术经济性分析。

五、深圳市道路交通全面电动化路线图及政策建议

（一）全面电动化路线图

展望未来，短期内深圳市新能源汽车的推广重点将集中在私人轿车、轻型货车领域。中长期来看，重型货车、大型客车的纯电动技术的进步及成本的下降是未来深圳市在2050年左右实现交通碳中和的关键影响因素。因此，根据前文分析，在全面电动化情景实现的可行性较高的情况下，建议2025—2050年深圳市未来各类型机动车的推广路线图如下表所示：

2025—2050年深圳市推广新能源汽车计划

机动车类型	燃料种类	2025年	2030年	2040年	2050年
公交车	纯电动	100%	100%	100%	100%
出租车	纯电动	100%	100%	100%	100%
其他大型客车	纯电动	22.5%	25%	54%	100%
乘用车	PHEV	10%	10%	6.6%	0%
	纯电动	70%	80%	93%	100%
轻型货车	纯电动	70%	100%	100%	100%
微型货车	纯电动	100%	100%	100%	100%
重型货车	LNG	2%	10%	20%	30%
	纯电动	20%	30%	50%	70%
中型货车	纯电动	75%	100%	100%	100%

注：百分数表示新增及更新的机动车的占比。

（二）政策建议

为使深圳市道路交通部门尽早达到碳排放峰值，使深圳市2050年实现提前完成碳中和的目标，建议深圳市政府及相关部门尽早提出道路交通全面电动化的计划，并建议进一步加大以下各政策措施的推广应用，具体包括：

一是继续鼓励购买使用新能源汽车。从补贴、减免税、电价、上牌、路权、停车权方面给予政策支持，加快推广私人用于城市驾驶和通勤的“普及

型”电动车。鼓励物流企业购买使用纯电动重型货车，在批发市场、快递转运中心、物流园区等加快充电桩布局建设，落实新能源货车差别化通行管理政策，提供通行便利，扩大通行范围，对纯电动轻型货车少限行甚至不限行。针对推广纯电动物流车的补贴政策，完善并加快运营里程核算和补贴发放速度，充分考虑轻型货车等车型城市周边配送的需求，设定里程核算标准；建议第二阶段运营补贴降低基准补贴金额，减少企业对于普惠性补贴的依赖性，同时设定分阶梯拔高里程门槛标准，持续鼓励优质企业增加运营并不断进行技术升级，进一步向新能源物流车的方向靠拢。

二是创新充换电模式。鼓励新能源汽车企业研发新型充电和换电技术，研究电动汽车电池等装置规范标准，加速充换电设施的建设，进行充电换电模式试点推广，推进“光伏+储能+充电桩”（PV+EV）充电设施建设及试点运营。鼓励建设多燃料产品储存、销售及综合服务的大型设施，鼓励将现有加油站、加气站或充电站改造成油气电综合能源站，为周边企业、工业园区、物流企业等提供一站式能源补给。

三是优先发展电池回收利用和氢燃料电池核心技术。梯次利用已经退役的动力电池，将其修复或重组为梯次产品，应用于储能、通信基站、太阳能、低速电动车等，可延长电池使用寿命，充分发挥其剩余价值，促进新能源消纳，缓解当前电池退役量大导致的回收压力，降低电动汽车产业成本，带动新能源汽车行业全面健康发展。建议全面调研深圳电池科技及回收企业、院所，评估并识别可转化率高的技术予以支持，培育相关产业发展。市属投资机构研究联合或撬动粤港澳大湾区各市氢燃料电池技术的研发和产业力量，建立体系化的区域研发支持计划，重点支持核心优势技术研发，专注于降低成本、提升关键性能，发展零碳“绿氢”生产技术。选择试点区域，在重型货车、物流车、长途客车等领域，发展氢燃料电池产业及示范推广氢燃料电池汽车的使用。

四是大力发展可再生能源。随着纯电动汽车技术的推广，将消耗大量电力。以现阶段南方电网较高的电力排放因子，未来难以实现碳中和目标。

建议在深圳全域（含深汕合作区）大力发展可再生能源发电上网，或与南方电网合作研发降低其电力碳排放因子的技术，加速降低电力碳排放因子。

参考文献：

- [1] International Energy Agency (IEA). Key World Energy Statistics 2020[R]. International Energy Agency, Paris, France, 2020.
- [2] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China (NBS). China Statistical Yearbook 2020[EB/OL]. Beijing: China Statistics Press, 2020. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>.
- [3] 公安部交通管理局. 2020年全国机动车保有量达3.72亿辆[EB/OL]. <https://finance.sina.com.cn/tech/2021-01-07/doc-iiznctkf0700301.shtml>.
- [4] 何豪, 罗比·奥维斯, 杰弗里·瑞斯曼. 气候解决方案设计方法: 低碳能源政策指南[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
- [5] 深圳市生态环境局. 深圳: 先行示范, 全力为全省实现碳达峰目标作贡献[EB/OL]. http://meeb.sz.gov.cn/xxgk/qt/hbxw/content/post_8675782.html, 2021-04-07.
- [6] 吴杰臣. 基于生命周期理论的城市公交新能源客车发展研究[D]. 北京交通大学, 2011.
- [7] 曾元. 基于案例的城市道路的低碳政策评估方法研究[D]. 中国科学院大学.
- [8] Silva-Send N, Anders S, Narwold A. Cost effectiveness comparison of certain transportation measures to mitigate greenhouse gas emissions in San Diego County, California[J]. Energy Policy, 2013, 62(5):1428-1433.
- [9] 贾彦鹏, 刘仁志. 基于LEAP模型的城市能源规划与CO₂减排研究——以景德镇为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, (s1): 75-83.
- [10] Liu L, Wang K, Wang S, et al. Assessing energy consumption, CO₂ and pollutant emissions and health benefits from China's transport sector through 2050[J]. Energy Policy, 2018, 116:382-396.
- [11] Hartgen D T, Fields M G, Scott M, San E. Impacts of Transportation Policies on Greenhouse Gas Emissions in U.S. Regions[J]. Exhaust Gases, 2011.
- [12] Huo H, He K, Wang M, Yao Z. Vehicle technologies, fuel-economy policies, and fuel-consumption rates of Chinese vehicles[J]. Energy Policy, 2012, 43(2):30-36.
- [13] 高菠阳, 刘卫东. 道路交通节能减排途径与潜力分析[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 767-775.
- [14] 高怡. 城市低碳交通的政策选择方法研究[D]. 长安大学, 2014.
- [15] IEA. Global EV Outlook 2021[EB/OL]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
- [16] 田逸帆. 新能源汽车双向全桥DC—DC变换器设计与研究[D]. 华中科技大学, 2019.
- [17] 彭逸. 纯电动车电动机——驱动桥一体化系统的优化与控制[D]. 重庆理工大学, 2017.
- [18] 祝月艳, 吴松泉, 石红. 英国推动电动汽车发展的政策措施及对我国的经验借鉴[J]. 汽车纵横, 2020, (10).

作者: 曾元, 哈尔滨工业大学(深圳)经济管理学院博士后
唐杰, 哈尔滨工业大学(深圳)经济管理学院教授、博导
王东, 哈尔滨工业大学(深圳)经济管理学院教授、博导

责任编辑: 熊哲文