

# 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究

李晓易<sup>1,2</sup>, 谭晓雨<sup>1,2</sup>, 吴睿<sup>1,2</sup>, 徐洪磊<sup>1,2</sup>, 钟志华<sup>3</sup>, 李悦<sup>1,2</sup>,  
郑超蕙<sup>1,2</sup>, 王人洁<sup>1,2</sup>, 乔英俊<sup>4</sup>

(1. 交通运输部规划研究院环境资源所, 北京 100028; 2. 交通运输部规划研究院交通排放控制监测技术实验室, 北京 100028; 3. 中国工程院, 北京 100088; 4. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088)

**摘要:** 碳达峰目标、碳中和愿景是国家重大战略, 相应目标的提出对仍在快速发展的交通运输领域带来了严峻压力与挑战, 推动交通运输尽快实现碳达峰是交通运输高质量发展与绿色转型的重要方向。本文系统分析了交通运输领域绿色发展和碳排放现状, 识别出为进一步实现碳达峰目标、碳中和愿景而面临的重大挑战; 论证提出了“分类施策、远近结合、先易后难、控增量调存量、积极稳妥推进、梯次有序达峰”的总体思路, 针对 2060 年前的主要阶段提出了交通运输领域低碳发展的总体路径。结合交通运输的发展趋势, 进一步从优化运输结构、提升运输装备能效、推广应用低碳运输装备、提高运输组织效率、鼓励绿色出行等方面着手, 详细分析并总结了推动交通碳达峰、碳中和的举措建议, 以期为行业高质量发展提供基础参考。

**关键词:** 交通运输; 碳排放预测; 碳达峰; 碳中和; 发展路径

中图分类号: F512.3 文献标识码: A

## Paths for Carbon Peak and Carbon Neutrality in Transport Sector in China

Li Xiaoyi<sup>1,2</sup>, Tan Xiaoyu<sup>1,2</sup>, Wu Rui<sup>1,2</sup>, Xu Honglei<sup>1,2</sup>, Zhong Zhihua<sup>3</sup>, Li Yue<sup>1,2</sup>,  
Zheng Chaohui<sup>1,2</sup>, Wang Renjie<sup>1,2</sup>, Qiao Yingjun<sup>4</sup>

(1. Institute of Environment Resources, Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China;  
2. Laboratory of Transport Pollution Control and Monitoring Technology, Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China; 3. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China;  
4. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Peaking carbon dioxide emissions and achieving carbon neutrality is a major strategic decision taken by China and it brings significant pressure and challenges to the transport sector. Peaking carbon emissions is an important direction for the high-quality development and green transformation of the transport sector. This study analyzes the status quo of green development and carbon emission in China's transport sector and identifies the challenges for achieving the carbon peak and carbon neutrality goals in the transport sector. The overall idea is to peak carbon emissions actively and steadily by implementing categorized policies, combining short- and long-term goals, controlling carbon emission increment, and adjusting the current emission structure. An overall path for carbon reduction in the transport sector at different stages is proposed. Furthermore, we summarize several key measures

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-11-16

通讯作者: 徐洪磊, 交通运输部规划研究院高级工程师, 研究方向为交通运输绿色低碳发展与应对气候变化的技术与政策;  
E-mail: xuhl@tpri.org.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国碳达峰、碳中和战略及路径研究”(2021-HYZD-16)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

to achieve carbon peak and carbon neutrality in the transport sector: (1) optimizing the transport structure, (2) promoting the energy efficiency of transport equipment, (3) popularizing low-carbon transport equipment, (4) improving the traffic organizing efficiency, and (5) encouraging low-carbon travel modes.

**Keywords:** transport sector; carbon emission projection; carbon peak; carbon neutrality; development path

### 一、前言

交通运输是化石能源消耗及温室气体排放的重点领域，近年来已成为我国温室气体排放增长最快的领域之一 [1]。目前，我国交通运输行业仍以化石燃料消耗为主，清洁能源使用比例依然较低；结合当前形势和长远发展来看，交通运输行业碳排放达峰存在较大困难。一方面，运输需求总量不断增长，居民对于出行时间、舒适度等出行服务品质提升的需求越来越高，碳排放总量控制难度很大，碳排放强度下降遭遇瓶颈；另一方面，新能源和清洁能源在交通运输行业尚未形成规模化应用，在一定程度上依赖新能源装备技术的突破性进展。若不实行积极、持续的减缓政策，交通运输领域的排放增速可能会高于其他终端用能行业，可能成为 CO<sub>2</sub> 排放最大的贡献者 [2]。

交通运输工具在使用化石燃料的过程中排放出大量温室气体及污染物，加剧雾霾、酸雨及温室效应，引发了各方对交通绿色转型与发展路径的高度关注。在梳理发达国家推动交通低碳发展经济的基础上发现 [3]，交通运输可采取提高燃油效率、推广清洁能源等措施来加快碳减排进程，转向低碳燃料将在缓解交通领域的气候变化方面发挥重要作用。有研究 [4] 提出了分阶段的交通低碳发展路径，即近期聚焦交通装备技术的节能减排，中期大力推广非化石能源在交通领域的使用，远期推动氢燃料在交通领域的商业化应用；认为私人机动车的节能减排应是我国低碳交通研究的重点。还有研究 [5] 针对我国交通低碳转型提出了中长期的发展路径，建议充分发挥城市公共出行的减排潜力，注重车辆燃油经济性的提升以及新能源汽车的应用推广，支撑交通部门以技术可行的方式实现低碳转型。此外，为推动交通部门实现碳排放达峰，需要制定更为严格的燃料经济性标准，大力推广替代燃料，积极引导低碳运输方式的使用 [6]。

在“双碳”目标背景下，交通运输领域面临更

加严峻的减排压力，推动交通领域碳排放达峰和深度减排对全社会实现碳达峰、碳中和意义重大 [7]。无论是应对气候变化的国际国内要求，还是行业自身高质量发展的需要，都亟待加速行业节能降碳进程，研究提出面向碳达峰、碳中和的交通运输领域发展路径。针对于此，本文梳理交通运输领域的碳排放现状，识别交通运输领域碳减排面临的问题与挑战，结合国情实际和“双碳”目标明确交通运输领域分阶段的发展路径并提出重点任务建议。

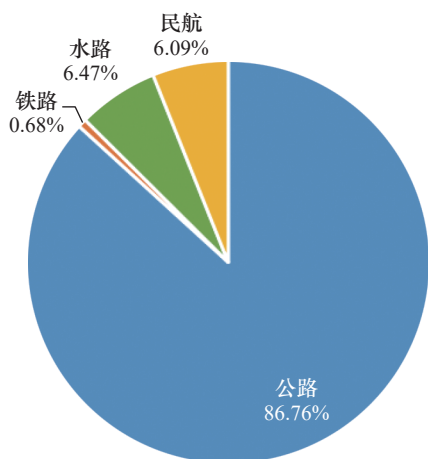
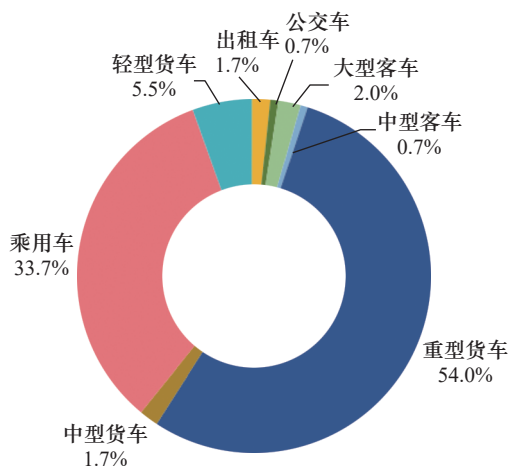
### 二、交通运输绿色发展及碳排放现状

交通运输中的碳排放主要来源于运输过程中交通运输工具燃料燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 排放。基于交通运输领域能源消费情况 [8]，本文测算了 2019 年我国交通运输领域产生的直接 CO<sub>2</sub> 排放量，其中不包括国际海运、国际航空部分的直接排放以及使用电力产生的间接排放。2019 年，交通运输领域 CO<sub>2</sub> 排放约占我国全社会 CO<sub>2</sub> 总排放的 11%，各个子领域排放占比如图 1 所示。

交通运输领域不同运输方式的碳排放总量差异明显。公路运输（含社会车辆、营运车辆）是交通领域碳排放的重点方面，排放量占交通领域碳排放总量的 86.76%。水路运输排放占比为 6.47%，民航运输排放占比为 6.09%，铁路运输碳排放占比为 0.68%。

公路运输中重型货车的排放量最大，占公路运输碳排放总量的 54%（见图 2）。近年来我国乘用车市场规模持续扩张，2019 年保有量超过  $2.2 \times 10^8$  辆，随之产生的碳排放占公路运输碳排放总量的 33.7%。其他类型车辆碳排放占比均不超过 6%。由此可见，重型货车和乘用车是未来我国公路运输，也是整个交通运输行业的节能减排关键方面。

近年来，交通运输能耗及排放问题得到全社会的高度重视，管理部门采取了多项措施推动交通运输的低碳转型。2020 年，我国新能源城市公交车达

图1 我国交通运输领域 CO<sub>2</sub> 排放量占比 (2019 年)图2 公路运输各类车型 CO<sub>2</sub> 排放情况 (2019 年)

到  $4.66 \times 10^5$  辆, 新能源巡游出租车、新能源城市物流配送车分别达到  $1.32 \times 10^5$  辆、 $4.3 \times 10^5$  辆 [9]。水路运输船型标准化工作不断推进, 清洁能源利用水平逐步提高, 2020 年内河建成船舶液化天然气 (LNG) 加注站 20 个、LNG 动力船舶 290 余艘。

管理部门制定了系列目标以支持和推动交通运输节能减排目标的实现。①在车辆燃料消耗量限值标准方面,《乘用车燃料消耗量限值》(2021 年) 强制性国家标准规定了乘用车新车平均燃料消耗量水平到 2025 年下降至 4 L/100 km (CO<sub>2</sub> 排放约为 95 g/km) 的国家总体节能目标。②在运输结构调整方面, 绿色交通“十四五”发展规划明确了进一步推进大宗货物及中长距离货物运输向铁路、水运有序转移的目标。③在引导绿色出行方面,《绿色出行创建行动方案》、绿色交通“十四五”发展规划都要求改善绿色出行环境, 提高城市绿色出行比例; 到 2025 年, 力争 60% 以上的参与绿色出行创建行动的城市, 绿色出行比例达到 70%。④在推广新能源汽车车辆装备方面,《新能源产业发展规划(2021—2035 年)》《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》提出, 新能源汽车新车销售量将达到汽车新车销售总量的 20%, 纯电动乘用车新车平均百千米电耗将下降至 12 kW·h; 到 2035 年, 纯电动汽车将成为新销售车辆的主流, 公共领域用车将全面电动化。

### 三、交通运输碳减排面临的重大问题

#### (一) 交通运输需求仍将保持增长

交通运输是居民出行、物流服务的基础支撑

和保障。随着经济社会的快速发展和居民生活水平的不断提高, 运输需求不断增加, 碳排放总量控制难度很大。《国家综合立体交通网规划纲要》指出, 未来旅客出行需求将稳步增长, 高品质、多样化、个性化的需求不断增强, 预计 2021—2035 年旅客出行量 (含小汽车出行量) 年均增速约为 3.2% [10]。高铁、民航、小汽车出行占比不断提升, 城市群旅客出行需求更加旺盛; 东部地区仍将是我国出行需求最为集中的区域, 中西部地区出行需求增速加快; 货物运输需求稳中有升, 高价值、小批量、时效强的需求快速攀升。预计 2021—2035 年, 全社会货运量年均增速约为 2%, 邮政快递业务量年均增速约为 6.3%。外贸货物运输保持长期增长态势, 大宗散货运量未来一段时期内保持高位运行状态; 东部地区货运需求仍保持较大规模, 中西部地区增速将快于东部地区。运输需求总量增长将导致交通运输碳排放量持续增加。

#### (二) 运输结构调整实现的减排效益需要周期且效益递减

目前干线铁路和铁路专用线均存在能力制约, 铁路基础设施的建设以及铁路货运市场规模的形成均需要时间, 铁路货运无法在短时间内迎来爆发性增长; 需要在网络建设、配套设施、服务水平、市场开发、生产效率等方面综合发力, 才能逐步缓解铁路货运能力紧张的状况。受铁路、水路货运能力和适运货种的限制, 长期来看运输结构调整的边际效益递减, 对碳减排的贡献率近中期大于远期。

### （三）交通用能结构调整进程存在技术不确定性

运输装备的新能源和清洁能源替代是交通领域碳减排的重要手段。尽管近年来新能源小型乘用车、轻型物流车的技术逐步成熟，但重型货车、船舶在短期内还缺乏成熟的能源替代方案。例如，新能源重型货车在续驶里程、有效载重方面仍存在技术瓶颈，氢燃料和氨燃料船舶在技术装备研发、配套能源基础设施建设、安全风险防控、标准规范研究等方面尚处于起步阶段。基于我国新能源汽车发展现状 [11]，若要实现交通领域碳排放 2030 年前达峰，重型货车新能源替代量接近  $1 \times 10^6$  辆，以现有技术发展趋势来看，这一规模应用存在较大不确定性；需要在乘用车领域加大新能源车辆的推广力度，利用 10 年时间多推广近  $3 \times 10^7$  辆新能源乘用车才能达到同样的减排效果。因此，交通领域用能结构的深度调整，离不开全社会、各行业、各部门的共同努力，需要加快实现装备技术成熟、产能初具规模、能源供给稳定、消费意愿强烈、基础设施配套完善的新能源车船产业生态。

### （四）交通领域碳减排资金需求量大

政府间气候变化专门委员会第六次评估报告认为 [12]，交通运输行业碳减排成本显著高于工业、建筑等行业。目前采取的“公转铁”“公转水”、老旧柴油货车淘汰等减排措施以及配套能源供应体系等，资金投入大、经济收益小，地方政府、运输企业、个体运输户缺乏内生动力。

### （五）交通领域碳减排涉及利益方众多

交通运输的碳达峰工作涉及领域广，涵盖营业性车辆、船舶、铁路、民航以及非营业性车辆、私家车等，加之协调部门多（如铁路、民航、生态环境、工信、公安等部门），需要进一步完善工作机制，强化统筹和协调。社会车辆的碳排放占交通领域碳排放的比例超过 1/3，碳排放量占比高且保有量的增长空间大，在新能源重型货车规模化推广应用存在不确定性的情况下，社会车辆的碳减排工作尤为重要 [13]。社会车辆的碳排放取决于保有量、车辆能效、新能源替代等因素，政府主管部门针对这些因素可采取的运输管理手段十分有限 [14]，需要生态环境、工信、公安、交通运输等多个部门协同发力，在数据共享、装备研发、标准规范制定等方面

加强对接，共同推进社会车辆的碳减排工作。

## 四、交通运输领域碳达峰、碳中和实施路径

碳达峰、碳中和目标对交通运输领域而言，既是发展的重要挑战，也是行业绿色转型的重要机遇，极大增强了行业推进碳减排工作的紧迫感和积极性。交通领域碳达峰与交通运输发展规模、碳减排措施力度紧密相关。近中期，交通运输规模呈现中高速增长，技术尚需发展和推广应用，规模增速是碳排放的主因；中远期，交通运输规模增速放缓，技术渗透和应用全面提升，技术和政策减排措施将发挥主要作用。

本研究按照“分类施策、远近结合、先易后难、控增量调存量、积极稳妥推进、梯次有序达峰”的总体思路，基于“尊重客观规律、坚持实事求是、追求经济高效、把握科学节奏，既满足国家总体战略安排，又满足人民群众多样化出行需求和经济高质量发展的运输需求”的总体原则，提出“交通用能深度电气化、客货运输绿色高效化”作为核心路径，据此推进交通运输领域实现碳达峰、迈向碳中和。

2021—2030 年，交通运输需求持续增长、碳排放量持续增加，交通运输减碳排放应着重加强顶层设计，出台各项行动方案和指导意见，完善统计能力建设，全面推进运输结构优化、能效提升、新能源与清洁能源替代、引导绿色出行等工作；部署开展低碳、零碳运输装备的储备技术研发和准备工作。

2030—2035 年，伴随交通运输规模增速不断放缓以及减碳手段的持续推进，碳排放将进入平台期，交通运输减碳主要依靠大规模的新能源替代和能效提升手段，重点深化公路领域的碳减排工作。

2035—2050 年，随着新能源替代效益的发挥，交通运输领域的碳排放将实现稳步下降；燃料替代开始发挥关键作用，私家车、公交车、出租车、铁路机车逐步实现电动化，车辆能效水平持续提升，自动驾驶技术逐渐成熟应用。

2050—2060 年，交通运输领域进入深度降碳阶段，主要依靠新能源装备的大规模稳定使用以及交通与能源融合模式的全面应用。重点强化航空、水运领域的碳减排工作，最大程度推进交通领域实现近零排放。

## 五、推动交通运输领域碳达峰、碳中和的举措与建议

### (一) 优化运输结构

优化运输结构是碳达峰阶段的主要举措之一，需加快大宗货物和中长距离货物运输的“公转铁”“公转水”。

提高铁路、水路基础设施的通达性、便利性，全面加快集疏港铁路项目建设进度，完善港区集疏港铁路与干线铁路及码头堆场的衔接，加快港区铁路装卸场站及配套设施建设。到 2030 年，全国沿海及内河主要港口的大宗散货港区、主要集装箱港区基本接入集疏港铁路。

深入推进多式联运发展，建立高效的陆-港-水综合调度体系。加快铁路物流基地、铁路集装箱办理站、港口物流枢纽、航空转运中心、快递物流园区等的规划和升级改造，开展多式联运枢纽建设。实行多式联运“一单制”，推进标准规则衔接，加快应用集装箱多式联运电子化统一单证。推动“铁-水”“公-铁”“公-水”“空-陆”等联运发展，加快培育一批具有全球影响力的多式联运龙头企业。

全面提高工矿企业的绿色运输比例。加快煤炭、钢铁、电解铝、电力、焦化、汽车制造、水泥、建材等大型工矿企业的铁路专用线建设；新建及迁建大型工矿企业，原则上应同步规划建设铁路专用线、专用码头、封闭式皮带廊道等基础设施。鼓励和限制等多种手段并举，全面提高大宗货物铁路、水路、封闭式皮带廊道、新能源与清洁能源汽车的绿色运输比例。

建议研究出台“公转铁”财政补贴和铁路运价优惠政策，铁路专用线建设资金补贴及贷款优惠政策，铁路和水路货运规范收费政策，制定绿色运输能力保障制度。

### (二) 提升运输装备能效

提升运输装备能效是推动交通碳达峰、碳中和的重要举措，需聚焦完善能效标准、抓好准入制度、加快淘汰老旧车船等工作。

完善运输车辆能耗限值标准，协助建立车辆碳排放标准体系。建立营运装备燃料消耗检测体系并加强对检测的监督管理，采取经济补偿、严格超标

排放监管、强化汽车检测与维护制度等方式，加速淘汰落后技术和高耗低效车辆。

推进实施船舶能效准入制度，建立新造船舶设计能效指标以及分阶段实施要求与验证机制；根据高效技术和替代燃料应用情况，定期评估并调整新造船舶设计能效要求。建立船舶能耗监测体系、营运船舶能效核查机制与营运能效评价指标，推动高能耗老旧营运船舶限制使用政策制定，鼓励高能耗船舶技术改造升级或提前退出。推广应用节能附体、减阻涂层、废热回收、船舶航速优化、纵倾优化等能效提升技术，加大轻型材料、风力助航、光伏发电等技术在船舶领域的应用研究和示范。

推广车辆节能驾驶技术和船舶最佳操作实践，将节能驾驶、节能航行作为独立模块纳入驾驶员（船员）培训和考试内容。加大交通枢纽场内作业装备的节能操作技术应用。

加强节能技术研发和应用，积极推广智能化、轻量化、高效、低排放的营运车辆，推动车辆燃料消耗量限值和车辆碳排放标准提升。充分发挥营运装备燃料消耗检测体系作用，做好在用装备燃料消耗限值管理工作。逐步普及车辆自动驾驶技术，试点并推广智能船舶驾驶技术，在沿海试点船舶无人驾驶技术。

建议研究升级车辆燃油消耗量限值标准，制定船舶能效准入退出、在用车辆碳排放检验方法及评价、船舶能效评价与核查等制度。

### (三) 推广应用低碳运输装备

推广应用低碳运输装备是推动交通碳中和的关键举措，应加快新能源运输装备研发、分场景适配应用。

按照“先公共、后私人，先轻型、后重型，先短途、后长途，先局部，后全国”的思路，加快实施新能源全面替代。提速公务用车和城市公交车辆的电动化进程，推进货运领域示范应用纯电动、氢燃料电池车辆和电气化公路系统。

完善高速公路服务区、港区、客运枢纽、物流园区、公交场站等区域的汽车充换电站、加气站、加氢站等配套设施建设，试点示范交通自洽能源系统建设。

鼓励船舶使用岸电、混合动力等辅助能源，持

续提升电力、太阳能、风能、潮汐能、地热能在港口生产作业中的使用比例。

持续支持重型装备低碳化关键技术研发突破，通过制度、标准、规范的完善来营造清洁能源装备应用的良好市场环境。采用财政与市场相结合的方式降低应用成本，改善充（换）电、加氢和维修保养配套服务。

建议研究制定系列政策，涉及老旧车船淘汰补贴、新能源车船更新和使用激励、便利通行与差异化收费，新能源加注（更换）设施建设与运营补贴（如充换电站、加氢站、岸电），机场、港口、枢纽场站内部车辆装备和作业机械电气化改造的引导与激励，城市交通近零碳排放控制区、船舶绿色低碳航行控制区的限购限行。实施碳排放管理标准和交通运输企业碳排放“领跑者”制度。

#### （四）提高运输组织效率

提高运输组织效率也是推动交通碳达峰、碳中和的关键举措，应加快发展智慧交通，推广高效组织模式。

发展网络平台货物运输，促进物流资源整合，提升货运物流的组织化、集约化水平，有效降低空驶率。发展智慧物流，提升货运系统效率；鼓励运输企业、物流园区、港口、货运场站广泛应用物联网、大数据、自动化等技术，推广应用自动立体仓库、智能输送分拣和装卸设备。

建设“集约、高效、绿色、智能”的城市货运配送服务体系。发展城市共同配送、统一配送、集中配送、分时配送等集约化模式，与干线甩挂运输一体化运作。持续优化城市绿色货运配送相关政策，探索地下物流配送。

完善农村物流三级网络节点建设，发展低空轨道运输等新型农村物流模式。推动既有客货运输站场、邮政服务点、公路养护设施、运输管理资源、电商快递网络、农村供销系统等资源整合和综合利用，提高存量资源效率和一体化服务水平。

充分利用自动驾驶、智慧出行、共享出行技术，重构未来客运出行和货物运输场景，创造性提升客运和货运系统效率。

#### （五）鼓励绿色出行

鼓励绿色出行是推动交通碳达峰的最佳辅助措

施，应进一步营造居民出行良好环境，不断强化市场激励措施，引导居民低碳出行。

深入实施公交优先发展战略，构建以城市轨道交通为骨干、以常规公交为主体的城市公共交通系统，因地制宜构建快速公交、微循环等城市公交服务系统。加强城市步行和自行车等慢行交通系统建设，合理配置停车设施，开展人行道净化行动，因地制宜建设自行车专用道，鼓励公众绿色出行。

推动干线铁路、城际铁路、市域（郊）铁路融合建设，构建衔接中心城市、周边城市（镇）、新城新区的高效便捷城市群轨道交通网络。加强高速铁路、轨道交通与城市公交网络系统的有机整合，推动新建各种运输方式集中布局的综合客运枢纽，打造全天候、一体化的换乘环境，为公众集约化出行提供便利条件。

基于智慧交通基础设施网络和城市路网智慧管理基础，开展出行即服务（MaaS）系统设计，构建以公共交通为核心的一体化全链条便捷出行服务体系，减少对小汽车出行的依赖。开展预约出行等智慧出行系统设计。

充分发挥市场措施的激励作用，在全国实施绿色出行碳普惠激励措施，让小微企业、社区、家庭、个人实践碳普惠制绿色低碳行为，获得碳积分对应的经济效益。逐步建立以家庭为单位的出行碳账户制度，减少以家庭为单位的高碳出行。

为保障交通领域稳步实施减排战略，应加快出台国家、省、市等不同层级的交通领域碳达峰行动方案，建立高效的多部门协同工作机制。制定完善的交通领域能源消费统计制度，出台交通领域温室气体排放清单编制指南，建立交通领域能耗和碳排放数据监测、报告和核实方法体系。积极探索以市场手段为核心的多元化投融资途径，通过绿色信贷、绿色债券、低碳转型基金、碳交易等多种方式，支持社会资本参与交通运输碳达峰、碳中和行动。

#### 参考文献

- [1] 油控研究项目课题组. 中国石油消费情景与峰值分析 [J]. 中国煤炭, 2019, 45(12): 20-26.  
Oil Control Research Project Group. China's oil consumption scenario and peak analysis [J]. China Coal, 2019, 45(12): 20-26.
- [2] Tang B J, Li X Y, Yu B Y, et al. Sustainable development pathway for intercity passenger transport: A case study of China [J].

- Applied Energy, 2019, 254: 113632.
- [3] 张希良, 郭庆方, 常世彦, 等. 我国发展生物液体燃料的资源与技术潜力分析 [J]. 中国能源, 2009, 31(3): 10–12.  
Zhang X L, Guo Q F, Chang S Y, et al. Resource and technical potential analysis of developing liquid biofuel in China [J]. China Energy, 2009, 31(3): 10–12.
- [4] 陆礼. 交通转型与低碳发展: 重点、路径与阶段 [C]. 贵阳: 第十五届中国科协年会, 2013.  
Lu L. Traffic transformation and low carbon development: Focus, path and phase [C]. Guiyang: The 15th Annual Meeting of China Association for Science and Technology, 2013.
- [5] 刘俊伶, 孙一赫, 王克, 等. 中国交通部门中长期低碳发展路径研究 [J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 513–521.  
Liu J L, Sun Y H, Wang K, et al. Study on mid- and long-term low carbon development pathway for China's transport sector [J]. Climate Change Research, 2018, 14(5): 513–521.
- [6] 袁志逸, 李振宇, 康利平, 等. 中国交通部门低碳排放措施和路径研究综述 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 27–35.  
Yuan Z Y, Li Z Y, Kang L P, et al. A review of low-carbon measurements and transition pathway of transport sector in China [J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 27–35.
- [7] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2): 17–24.  
Yu B J, Zhao G P, An R Y, et al. 2021. Research on China's CO<sub>2</sub> emission pathway under carbon neutral target [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 23(2): 17–24.
- [8] 国家统计局. 中国能源统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.  
National Bureau of Statistics. Chinese energy statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [9] 交通运输部科学研究院. 中国可持续交通发展报告 [R]. 北京: 联合国全球可持续交通大会, 2021.  
China Academy of Transportation Science. Sustainable development of transport in China [R]. Beijing: United Nations Global Sustainable Transport Conference, 2021.
- [10] 傅志寰, 孙永福. 交通强国战略研究 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.  
Fu Z H, Sun Y F. Strategic research on transportation power [M]. Beijing: People's Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [11] 中国汽车技术研究中心. 中国新能源汽车产业发展报告(2021) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021.  
China Automotive Technology Research Center. Annual report on new energy vehicle industry in China (2021) [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2021.
- [12] Naik V, Szopa S, Adhikary B. 2021: Short-lived climate forcers [R/OL]. (2021-08-26)[2021-10-15]. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter\\_06.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_06.pdf).
- [13] 凤振华, 王雪成, 张海颖, 等. 低碳视角下绿色交通发展路径与政策研究 [J]. 交通运输研究, 2019, 5(4): 37–45.  
Feng Z H, Wang X C, Zhang H Y, et al. Path and policy of green transportation development from low carbon perspective [J]. Transport Research, 2019, 5(4): 37–45.
- [14] Wang H, Ou X, Zhang X. Mode, technology, energy consumption, and resulting CO<sub>2</sub> emissions in China's transport sector up to 2050 [J]. Energy Policy, 2017, 109: 719–733.