



中国道路交通2050年“净零”排放路径研究

TOWARD “NET ZERO” EMISSIONS IN THE ROAD TRANSPORT SECTOR IN CHINA

薛露露 靳雅娜 禹如杰 刘勇 任焕焕 著

执行摘要

交通运输行业二氧化碳排放占中国全国总排放量的近9%。在工业、建筑和交通运输三大重点行业中，交通运输行业的近期节能减排潜力相对较低，对中国是否实现2030年左右达峰以及达峰后走势有重要影响。展望2050年，中国道路交通领域减排面临新机遇，特别是近期新能源车辆的技术突破。本文旨在定量匡算车辆电动化技术对未来中国道路交通的减排潜力（含尾气排放和发电排放），并在此基础上，探讨协助道路交通实现“净零”排放的措施组合。

本研究从路径导向和目标导向二者入手，将未来中国道路交通领域排放划分成三种政策情景（基准情景、现有政策情景和1.5℃温控情景），利用自下而上的全国交通模型与电力模型，分析2050年在不同汽车增长策略、运输结构转移、车辆电动化与技术提升、电力清洁化等措施下，中国道路交通领域的减排潜力。

本研究认为，在现有政策情景下，得益于乘用车保有量增长放缓和轻型车领域电动化市场普及率显著提升，中国道路交通排放达峰时间有望提前到2035年，并尽早实现自主减排目标，而本研究结论也早于其他道路交通领域相关预测。尽管如此，实现道路交通领域“净零”排放，特别是“达峰”后进入1.5℃温控情景的排放快速下降通道，依然困难重重。届时，道路交通领域也将进入减排“深水区”，不仅需要乘用车领域实现“禁燃”，还要在“难减排（hard-to-decarbonized）”的重型货车领域发力——不仅达到货运结构深度转移、电动或氢燃料电池货车高比例推广，更需要在电源侧实现高比例可再生能源渗透。

在减排措施上，单纯依赖电动化无法帮助道路交通领域实现“净零”排放。运输结构转移的减排潜力（“转移”）与车辆电动化的减排潜力（“优化”）相当，是实现中国道路交通行业深度减排的必然选择。此外，在近期，对年行驶里程的有效控制可

目录

| | |
|-------------------------|----|
| 背景 | 2 |
| 中国道路交通排放主要构成与历史变化 | 4 |
| 分析方法 | 7 |
| 影响道路交通排放的措施及未来趋势 | 8 |
| 乘用车保有量和年行驶里程 | 8 |
| 商用车保有量、周转量和年行驶里程 | 14 |
| 车辆技术 | 16 |
| 车辆燃油经济性 | 22 |
| 电力清洁化 | 23 |
| 情景设置 | 26 |
| 情景分析结果 | 29 |
| 三个情景道路交通行业排放路径 | 29 |
| 道路交通行业未来终端能源需求 | 30 |
| 二氧化碳排放驱动因素分析 | 32 |
| 政策建议与讨论 | 44 |
| 注释 | 49 |
| 引用 | 50 |

“工作论文”包括初步的研究、分析、结果和意见。“工作论文”用于促进讨论，征求反馈，对新事物的争论施加影响。工作论文最终可能以其他形式进行发表，内容可能会修改。

引用建议：薛露露（世界资源研究所）、靳雅娜（威廉玛丽学院）、禹如杰（中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心）、刘勇（中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心）、任焕焕（中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心）著。中国道路交通2050年“净零”排放路径研究. 2019. 工作论文, 北京: 世界资源研究所. <http://www.wri.org.cn/publications>.

降低道路交通排放的峰值。在中长期即2030—2050年，随着车辆电动化规模扩大，电力清洁化势必将成为减排的重要发力点。尽管如此，多措并举才是实现1.5℃温控目标的必然选择。

最后，实现中国道路交通深度减排需要尽早采取措施，以应对交通和电力基础设施的“锁定效应”，以及漫长的体制机制改革过程。

背景

2015年12月，近200个缔约方在巴黎气候变化大会上表决通过《巴黎协定》。该协定旨在将全球平均温升控制在2℃之内（与工业化前的全球平均气温相比），并且朝着不超过1.5℃的目标努

力（联合国气候变化框架公约，2015a）。要做到这一点，各缔约方应尽快实现温室气体排放达峰，并在本世纪下半叶实现温室气体“净零”排放。

作为世界上最大的温室气体排放国，2015年6月，中国提交了《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》，细化了2020年后的国家气候行动计划：二氧化碳排在2030年左右达到峰值，并争取尽早达峰；单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%~65%。

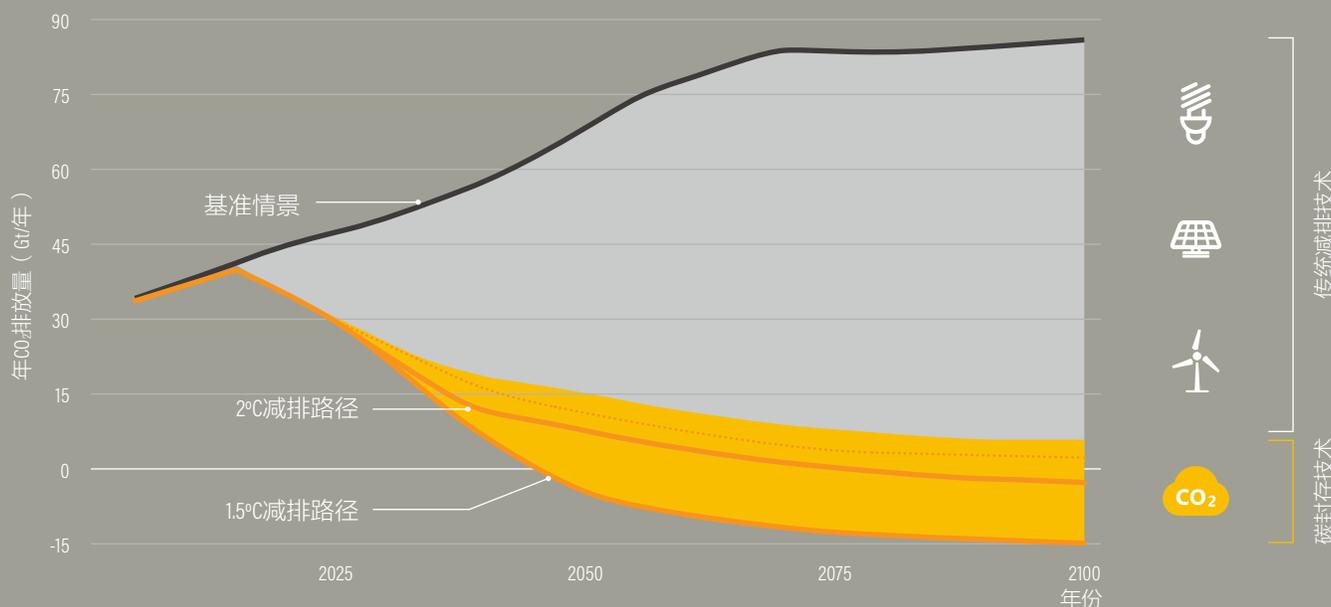
根据世界资源研究所测算，交通运输与工业、建筑三个领域作为排放最大的三个部门，贡献了中国2014年二氧化碳总排放（一次能源直接消费的范围—总排放）的99%。根据《中国气候

专栏 1 | 1.5℃与2℃升温控制减排形势比较

《巴黎协定》要求将全球平均温升幅度控制在工业化前水平以上2℃之内，这意味着全球二氧化碳需要在2060—2075年左右实现“净零”排放。

然而，2018年政府间气候变化专门委员会（IPCC）发表的《全球升温1.5℃ 特别报告》表明，2℃温控目标下，地球环境仍然会面临破化性气候风险，威胁人类生存和发展。目前全球气温较工业化前水平已经增加了1℃，为有效控制气候变化，有必要将温度升幅限定在1.5℃以内。为达到这一目标，2030年全球二氧化碳排放需要比2010年减少40%~60%，并于2045—2050年实现“净零”排放，比2℃升温时全球二氧化碳在2060—2075年实现“净零”排放提前15~25年（见专栏图1）。要实现全球温升控制在1.5℃以内的目标，所需的变革规模和程度是史无前例的。

专栏图 1 | 1.5℃和2℃温控目标下全球排放减排路径比较



图片来源：柏林全球公共与气候变化研究所

变化第二次两年更新报告》，交通运输行业二氧化碳排放占总排放量的9%，位列第二大排放源。根据国家发展和改革委员会能源研究所的测算（2017），在充分发掘各行业减排潜力的前提下，较之参考情景，2050年交通运输部门的节能潜力可达8.6亿吨标准煤，高于工业部门（7.63亿吨标准煤），低于建筑部门（11.6亿吨标准煤）。但即便如此，交通运输部门终端能源需求直到2035—2040年才能实现达峰，晚于建筑部门（2030年）和工业部门（2020年）。因此，交通运输部门的节能减排对中国的二氧化碳排放能否实现2030年左右达峰，以及达峰后的走势有重要影响。

交通运输部门的排放中，道路交通排放占绝大多数，2015年道路交通排放为整个交通运输部门排放的82.7%（Zhang等，2019）。相对于航空和水运而言，道路交通减排潜力较大。此外，随着私人汽车的普及，以及城市货运和公路货运的需求日益上升，道路交通行业的减排压力不容小觑。交通运输部门排放未来是否会实现减排或达峰，与道路交通领域减排措施息息相关。

近年来，中国已制定和实施了一系列针对道路交通领域应对气候变化、减少温室气体排放的政策，涉及结构调整、运输效率提升、燃油经济性改善、车辆技术升级，以及新兴共享出行等方面。例如，国务院印发的《“十三五”节能减排综合工作方案》提出了一揽子综合措施，包括：

- 发挥不同运输方式的比较优势和组合效率，推广甩挂运输等先进组织模式，提高多式联运比重。大力发展公共交通，推进“公交都市”创建活动，到2020年大城市公共交通分担率达到30%。
- 促进交通用能清洁化，大力推广节能环保汽车、新能源

汽车、天然气清洁能源汽车、液化天然气动力船舶等，并支持相关配套设施建设。

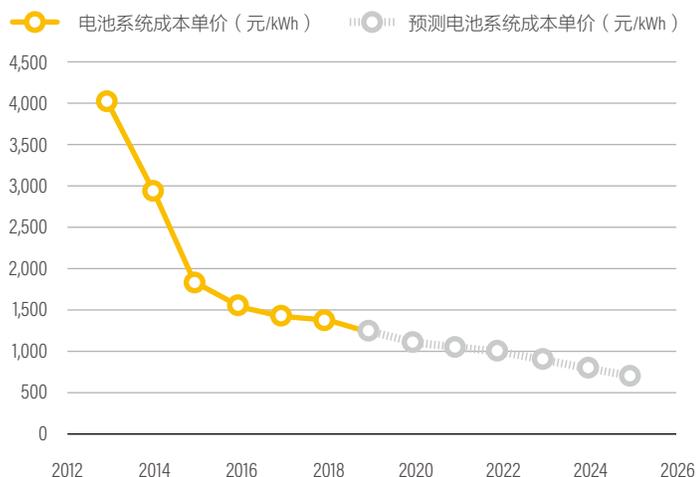
- 提高交通运输工具能效水平，到2020年新增乘用车平均燃料消耗量降至5.0升/百公里。
- 建立公众出行和物流平台信息服务系统，引导培育“共享型”交通运输模式。

展望2050年，中国道路交通领域减排面临新机遇，特别是近期新能源汽车的技术突破。自2010年起，全球动力锂电池技术实现快速发展；截至2018年，动力电池系统价格降至176美元每千瓦时，2010—2018年间降幅高达85%。据彭博新能源财经预测，未来5~7年动力电池系统价格将进一步降至100美元每千瓦时以下，这意味着2020—2025年，全球电动汽车价格将与燃油汽车价格达到“平价点（price parity）”，电动汽车将成为传统燃油车的强有力替代，实现高速增长（见图1）。除了技术的助推力外，近年来多国也出台了较为激进的电动汽车推广政策。例如，截至2019年初，全球19个国家或地区已经提出燃油车禁售时间表。当前，中国电动汽车销量增长一直引领全球电动汽车销量增长；2018年，中国新能源汽车年销量达到125.6万辆，其保有量占全球新能源汽车总量的半壁江山（见图1）。

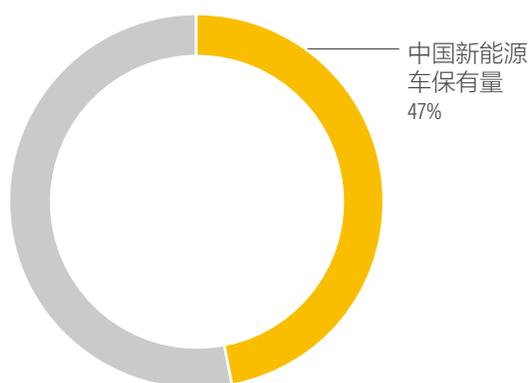
这场车辆技术的变革为中国提供了一个重新审视未来减排目标与路径的机遇。据测算，中国纯电动汽车车队的单车油井到车轮（含能源开采、运输、发电和电力传输）二氧化碳排放平均比燃油汽车低35%（中国汽车工程学会，2018）。如果电池技术进一步提升且能源生产更加清洁，纯电动汽车的全生命周期排放将逐步降低，中国的道路交通排放将有望大幅减少。

图 1 | 中国电池系统价格变化趋势和2018年中国新能源汽车保有量全球占比

(a) 中国电池系统成本价格变化趋势（2013—2025年）



(b) 2018年中国新能源汽车保有量全球占比



来源：中国汽车技术研究中心有限公司（2018）、国际能源署（2019）

但是，车辆电动化本身（或乘用车“禁燃”）未必足以实现中国道路交通领域中长期的深度减排目标：

- 首先，电力生产环节与能耗强度是纯电动汽车减排的关键。据测算，中国纯电动乘用车在全生命周期中，车辆生产排放和运行排放分别占28%和72%（沈万霞等，2017）。其中，72%的运行排放主要源于火力发电产生的排放。因此，未来能源结构的清洁程度与道路交通行业的排放紧密相关。
- 其次，根据交通运输部科学研究院交通发展研究中心测算，重型货车二氧化碳排放目前占中国道路交通二氧化碳排放的40%~55%，且目前仍缺乏针对重型货车可商业化量产的电动化技术。根据国际能源署预测，未来全球交通运输行业石油需求和碳排放增长主要来源于货运，其中，中国货运排放增长将占全球货运排放增长的90%（国际能源署，2017）。
- 此外，降低活动水平、优化调整结构、改善车辆燃油经济性等传统减排措施所扮演的角色和重要程度是否也发

生变化，还是仍保留其相应的作用，都是在这场技术变革下需要重新审视的。

因此，本文旨在定量匡算车辆电动化技术未来对中国道路交通的减排潜力，并在此基础上探讨协助道路交通实现深度减排的措施组合。自动化、共享化不在本文讨论范围内。

中国道路交通排放主要构成与历史变化

2.1 中国道路交通车型分类

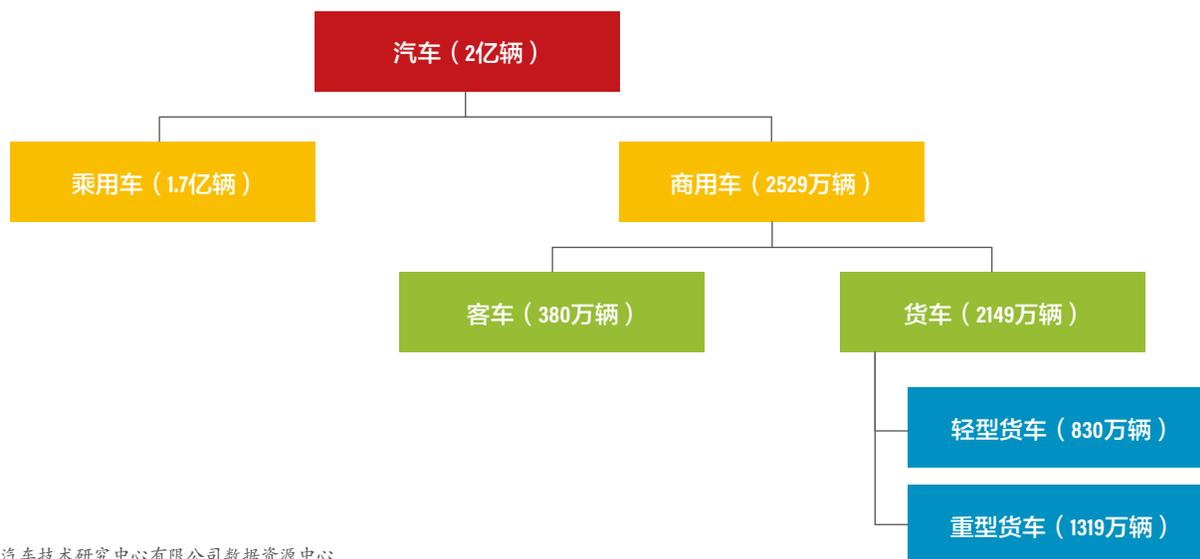
基于国家标准《机动车辆及挂车分类》（GB/T 15089—2001）和《城市温室气体核算工具指南》的分类，道路交通涉及的车型主要是指移动的两轮、三轮和四轮机动车。由于两轮、三轮机动车数量不易统计、二氧化碳排放基本可忽略不计，本研究将集中于四轮机动车，即汽车，但不含四轮低速电动车（见表1）。

根据国家标准《轻型商用车燃料消耗量限值》（GB 20997—2015），道路交通的汽车部分可分为乘用车和商用车两类。其

表 1 | 本研究中的“道路交通”范围界定

| | | | |
|-------|-----------|---------|-------|
| 道路交通 | 乘用车 | 私家车 | 本研究范围 |
| | | 出租车 | |
| | | 网约车 | |
| | | 其他乘用车 | |
| | 商用车 | 公共汽（电）车 | |
| | | 城际客运汽车 | |
| | | 城市货运汽车 | |
| | | 城际货运汽车 | |
| | 其他机动车 | 低速电动车 | |
| | | 摩托车 | |
| 电动自行车 | | | |
| 非道路交通 | 铁路运输 | 铁路客车 | |
| | | 铁路货车 | |
| | | 地铁列车 | |
| | 航空运输 | 民航客机 | |
| | | 民航货机 | |
| | 水路运输 | 城际客运船舶 | |
| | | 城际货运船舶 | |
| | | 城市内水运船舶 | |
| | 非道路（机械）交通 | | |

图 2 | 2017年中国汽车不同车型组成情况



来源：中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心

表 2 | 2017年中国汽车各车型燃料类型组成

| | 汽油 | 柴油 | 天然气 | 新能源 (含氢燃料) | 其他 |
|------|-------|-------|------|------------|------|
| 乘用车 | 98.6% | 0.4% | 0.4% | 0.5% | 0.1% |
| 商用车 | 24.3% | 70.4% | 2.0% | 1.9% | 1.5% |
| 客车 | 28.8% | 52.3% | 6.6% | 9.9% | 2.3% |
| 轻型货车 | 58.5% | 39.6% | 0.7% | 0.2% | 1.0% |
| 重型货车 | 0.3% | 96.2% | 1.4% | 0.6% | 1.6% |

来源：中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心

中，根据设计总质量不同，商用车可以分为轻型商用车（最大设计总质量小于3.5吨）和重型商用车（最大设计总质量大于3.5吨）；根据用途不同，商用车可以分为商用客车和商用货车。本研究中采用如下车型分类方法以及其与国家标准分类的对应关系：

- 9座及以下乘用车（以下简称“乘用车”）：对应国家标准中的M1类，包括轿车、交叉型乘用车等。
- 9座以上客车（以下简称“客车”）：含最大设计总质量小于5吨的M2类载客车，以及最大设计总质量大于5吨的M3类载客车。
- 最大设计总质量为3.5吨以下的轻型货车（以下简称“轻型货车”）：对应国家标准中的N1类载货车。

- 最大设计总质量为3.5吨以上的重型货车（以下简称“重型货车”）：对应国家标准中的N2类和N3类载货车，以及O类挂车。

截至2017年底，中国机动车保有量为3.1亿辆，其中汽车保有量超过2.0亿辆，占比65%。2.0亿辆汽车中，具体包括1.7亿辆乘用车（占比85%）和2529万辆商用车。其中，2529万辆商用车包括1319万辆重型货车、830万辆轻型货车和380万辆客车（中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心，见图2和表2）。

2.2 中国道路交通排放组成

根据本研究测算，2017年中国道路交通二氧化碳排放达到近10.9亿吨（不含摩托车、两轮和三轮车），比2010年的2.2亿吨（国家发展和改革委员会能源研究所，2017）增长了近5倍。

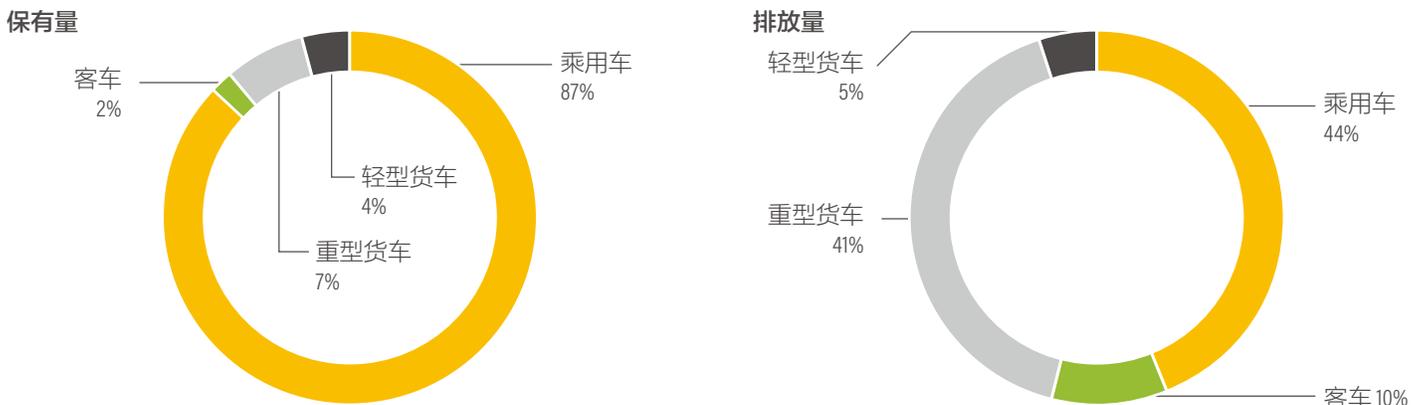
根据上述车型分类，乘用车与重型货车是中国道路交通二氧化碳排放两大来源（见图3和图4）：

- 乘用车是近年道路交通排放的最主要贡献源，且增速最快：2017年，乘用车二氧化碳排放占道路交通总排放的44%，是最大排放源。在乘用车保有量增长的推动下，乘用车二氧化碳排放增速迅猛，2017年排放水平为2010年排放水平的6倍。

- 货车（特别是重型货车）是仅次于乘用车的道路交通排放第二大贡献源：虽然全国重型货车保有量不高——2017年重型货车保有量仅占全国汽车总量的6.6%，但其2017年二氧化碳排放已经达到道路交通行业排放的约40%。然而在增速上，受货车保有量增速放缓等因素影响，其二氧化碳排放量增长相对乘用车较为缓和，2017年货车排放水平为2010年排放水平的3.1倍。

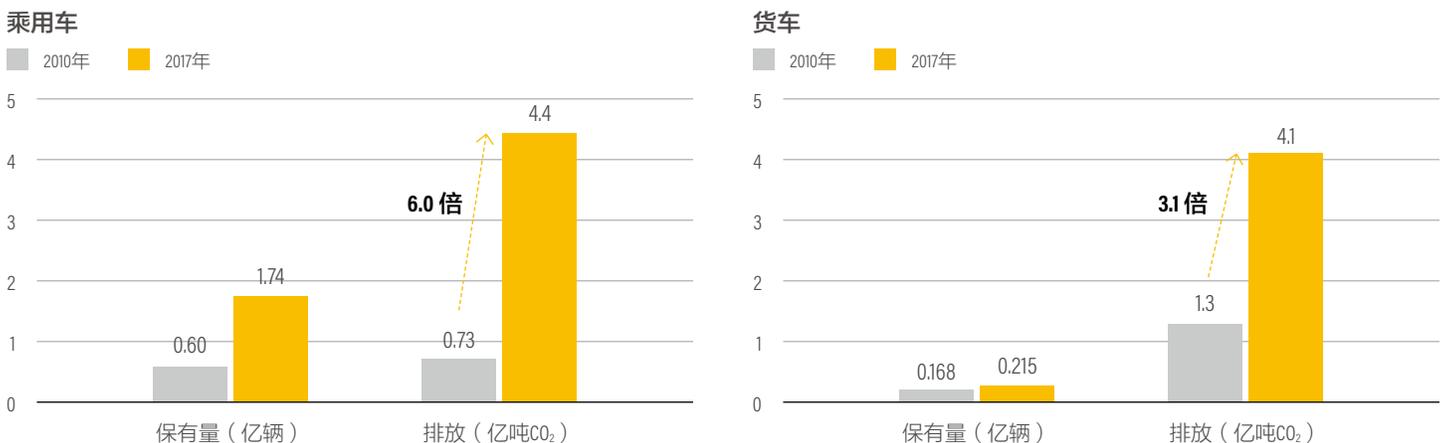
鉴于乘用车和重型货车对中国道路交通减排的重要作用，本研究将主要对这两类车型未来的发展前景与减排潜力进行探讨。

图 3 | 2017年中国道路交通不同车型保有量和排放的关系



说明：本研究中，轻型货车的最大设计总质量小于3.5吨、重型货车的最大设计总质量大于3.5吨。
来源：中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心

图 4 | 2010年和2017年乘用车、货车保有量和二氧化碳排放增长情况



说明：2010年数据来源于国家发展和改革委员会能源研究所测算；2017年数据来源于本研究模型计算，并通过表现车用柴油和汽油的消耗量进行验证。2010年车辆数据粒度不支持对重型货车和轻型货车的区分。

分析方法

本研究采用“交通+电力”模型和情景分析方法，测算不同政策情景下全国和31个省份（不含港澳台）的道路交通行业在中长期（2035—2050年）实现达峰与“净零”排放的潜力，并提出政策建议。

3.1 排放边界

- 时间轴：2017年、2035年和2050年。
- 空间范围：全国及31个省份（不含港澳台）。
- 排放边界：首先，本文关注二氧化碳排放，由于甲烷和氧化亚氮排放占比小，简化处理时可不作考虑。其次，在排放边界上，本文仅涉及化石燃料燃烧直接产生的和电力使用间接产生的二氧化碳排放，但不含轮胎磨损、燃料蒸发、电池与车辆生产等车辆端排放，也不含能源开采运输与冶炼、电网传输损失、电池充电效率损失带来的燃料和电网端排放。
- 车辆类别：本文仅关注道路交通机动车中较重要的车辆类别，包括乘用车、客车、轻型货车、重型货车，但不含摩托车、两轮和三轮机动车。此外，本文仅关注移动

源，交通领域中的非道路机械（如施工工地用车与农业生产用车）并不在研究范围内。

- 燃料类型和车辆技术：本文关注汽油、柴油、天然气、电力等动力源产生的排放，但不含氢燃料、生物质燃料及其在生产运输和使用中的排放（原因见后文分析）。

3.2 模型方法

未来中国道路交通排放由传统燃油车的尾气排放和新能源汽车的发电侧排放两部分组成：

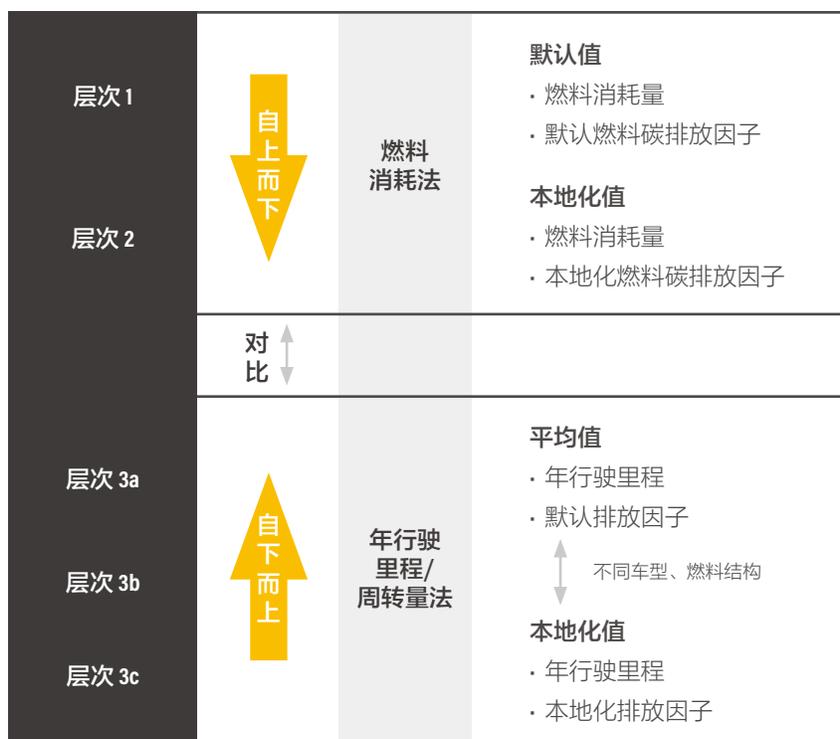
道路交通排放

=传统燃油车尾气排放 + 新能源汽车发电侧排放

传统燃油车尾气排放：本研究利用“自下而上”法（见图5的第3a层次），预测中国全国与各省份在不同情景下2035年和2050年道路交通行业传统燃油车的二氧化碳尾气排放。与基于车用燃料消耗量的“自上而下”法不同，“自下而上”法以车辆保有量、年行驶里程、周转量等交通活动为基础，测算排放。

自下而上的尾气排放计算方法进而可分为“年行驶里程法”（针对非营运交通）和“周转量法”（针对营运交通）（世界资源研究所，2015）。计算公式见下框。

图 5 | 道路交通行业碳排放测算模型分类



年行驶里程法：年行驶里程法主要适用于非营运交通的排放计算，计算公式如下：

燃油车尾气排放量
=保有量×年行驶里程×百公里能耗×单位能耗排放因子

周转量法：周转量法主要适用于营运交通的排放清单计算，计算公式如下：

燃油车尾气排放量
=客/货运周转量×单位周转量能耗×单位能耗排放因子

由于缺乏数据和模型支撑，本文针对非营运与营运车辆均采用“年行驶里程法”计算排放。

发电侧排放：随着新能源汽车的推广，道路交通排放也在从尾气排放向上游电力排放转移。计算新能源汽车发电侧排放主要采用自下而上的“年行驶里程法”。其中，电力行业排放因子应结合电力部门未来可再生能源发展、现役高碳型基础设施改造、碳捕集技术推广等措施，统筹电力部门模型，综合考量确定。

新能源汽车发电侧排放量
=新能源汽车保有量×单车年行驶里程×百公里电耗
×电力行业排放因子

本研究采用由国际应用系统分析研究所（IIASA）开发的温室气体与大气污染互动和协同效应模型（Greenhouse Gas - Air Pollution Interactions and Synergies, GAINS）。选择GAINS宏观模型的原因有二：一是该模型具有详细的中国分省电力系统模块，对电力行业排放因子有较系统的分析，相对科学地预测了电动汽车大规模普及与电力清洁化等措施叠加带来的电力排放；二是该模型内置有国际能源署发布的不同情景下的中国全行业排放数据，可在既有交通和电力预测研究基础上进行更新与补充。

然而，本研究模型中的传统燃油车尾气排放模块也存在一定局限性：与同样用于国家层面交通尾气排放计算的传统模型（如HBEFA和COPERT）相比，本研究的传统燃油车尾气排放模块精度低，无法精细测算道路拥堵、车辆（特别是货车）负载因子等对车辆尾气排放的影响。然而，在全国层面宏观研究中，这些因素的影响可忽略，且随着车辆电动化比例的增加，其对二氧化碳排放的影响可能会有所减弱。

3.3 情景分析方法

为了分析不同政策、减排措施对道路交通二氧化碳排放的影响，本文将采取情景分析的方法，并进行量化测算。

其中，在参数设置中，本文的参数将分为两个参数情景，即基准参数情景和激进（低碳）参数情景。而在最终的政策情景分析中，文章将侧重3个政策情景，即基准政策情景、现有政策情景和1.5℃温控情景。

影响道路交通排放的措施及未来趋势

减少中国道路交通二氧化碳排放，需要减少不合理的出行需求（含出行量和出行距离）、优化交通运输结构、提升车辆技术和效率水平，并提高电力清洁化水平（见图6）。随着经济发展、人口增加，出行需求增长、清洁技术突飞猛进，以及政策路径变化，这些影响因素在2050年将产生巨大分化，从而影响未来中国道路交通排放的走势。

然而，基于车辆保有量和年行驶里程的“自下而上”测算方法无法定量匡算减排措施、出行行为变化与特定模型输入之间的一一对应关系。例如，乘用车保有量受交通需求管理政策、城市规划、公交优先措施等多种措施共同影响，重型货车保有量则受“公转铁”等运输结构转移和运输效率提升措施影响。因此，本研究先映射出可能影响模型输入的多重政策组合（见图7）。

4.1 乘用车保有量和年行驶里程

■ 现状情况

截至2017年底，中国汽车保有量超过2亿辆，其中乘用车占87%，有1.7亿辆。乘用车（即《机动车类型术语和定义（GA802-2008）》中的小型载客车）一直是中国汽车保有量增长最主要的驱动力。2002—2017年中国乘用车保有量（即销量减去报废量）复合增长率达到23%，远超过其他车型的年增长率（见图9）。但值得注意的是，中国乘用车新车销量在2018年首次呈现下降趋势，较2017年下降4.1%，随着销量的下降，乘用车保有量增长率可能将逐渐下降。

虽然乘用车保有量一直保持较高速增长，但是中国千人乘用车保有量仍处于中等偏低水平。千人乘用车保有量能在一定程度上反映车辆渗透的饱和度：2017年，中国的乘用车千人保有量为132辆，低于欧美发达国家水平，超过新加坡的109辆（见图10）。千人乘用车保有量与国内生产总值（GDP）和人均收入紧密相关，随着经济增长，未来中国乘用车千人保有量仍存在一定增长空间。

与乘用车保有量的持续增长相比，单车使用强度（即年均行驶里程）呈现逐年下降的趋势。综合一系列研究（中国汽车技术

图 6 | 本研究中考考虑的道路交通二氧化碳减排措施

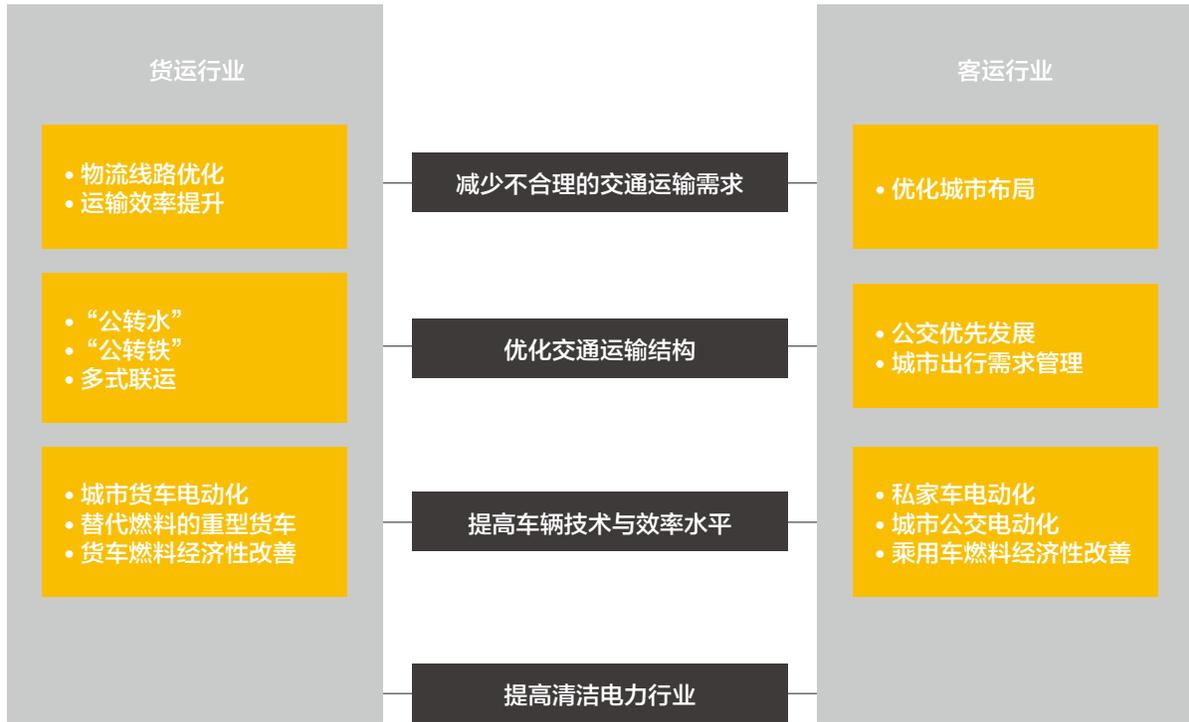
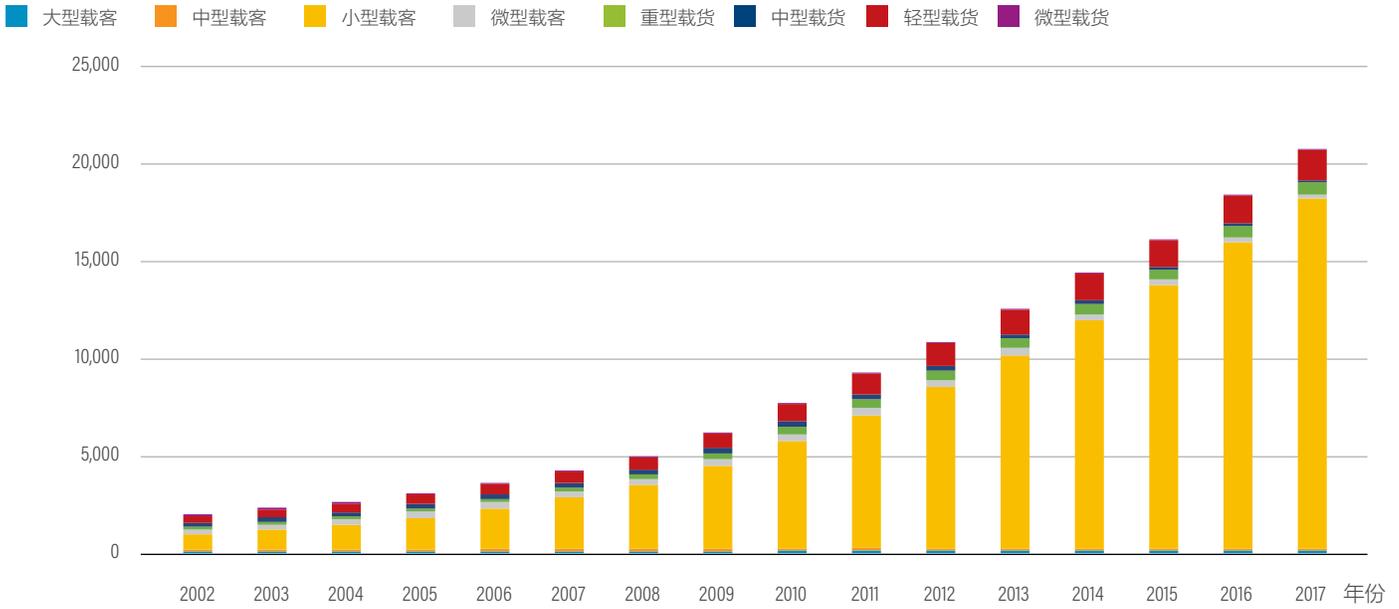


图 7 | 减排措施、出行行为变化与特定模型输入间对应关系

| 模型输入 | 各车型保有量 | 各车型年行驶里程 | 单位公里能耗 (燃料消耗或电耗) | 燃料碳排放系数/电网碳排放系数 |
|---------------------------|--------|----------|---------------------|-----------------|
| 减少不合理的出行需求 (含出行量和出行距离) | ✓ | ✓ | | |
| 优化交通运输结构 | ✓ | ✓ | | |
| 提升车辆技术和效率水平 | | | ✓ | |
| 提高电力清洁化水平 | | | | ✓ |

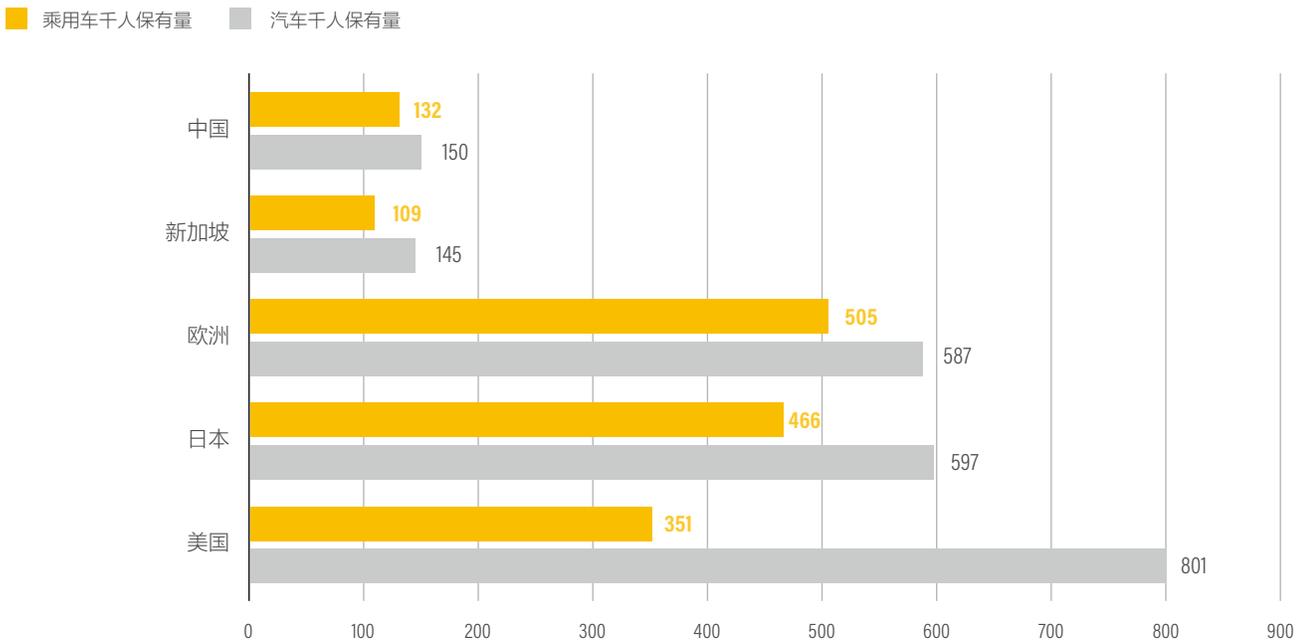
说明：对油品质量改善（即“燃料碳排放系数”）的影响不在本文讨论范围。

图 9 | 2002—2017年（民用）客车和货车保有量增长情况（单位：万辆）



来源：国家统计局（2019）

图 10 | 国内外乘用车、汽车千人保有量比较（单位：辆每千人）



来源：新加坡陆路管理局（2018），联合国欧洲经济委员会，欧洲汽车制造商协会（2016），中国产业信息（2017）

说明：中国、欧洲、新加坡等国家和地区的私家车多为乘用车，但美国的私家车既包括小型载客车，也包含轻型卡车，因此美国的千人乘用车保有量并不能很好反映其私家车渗透率情况。

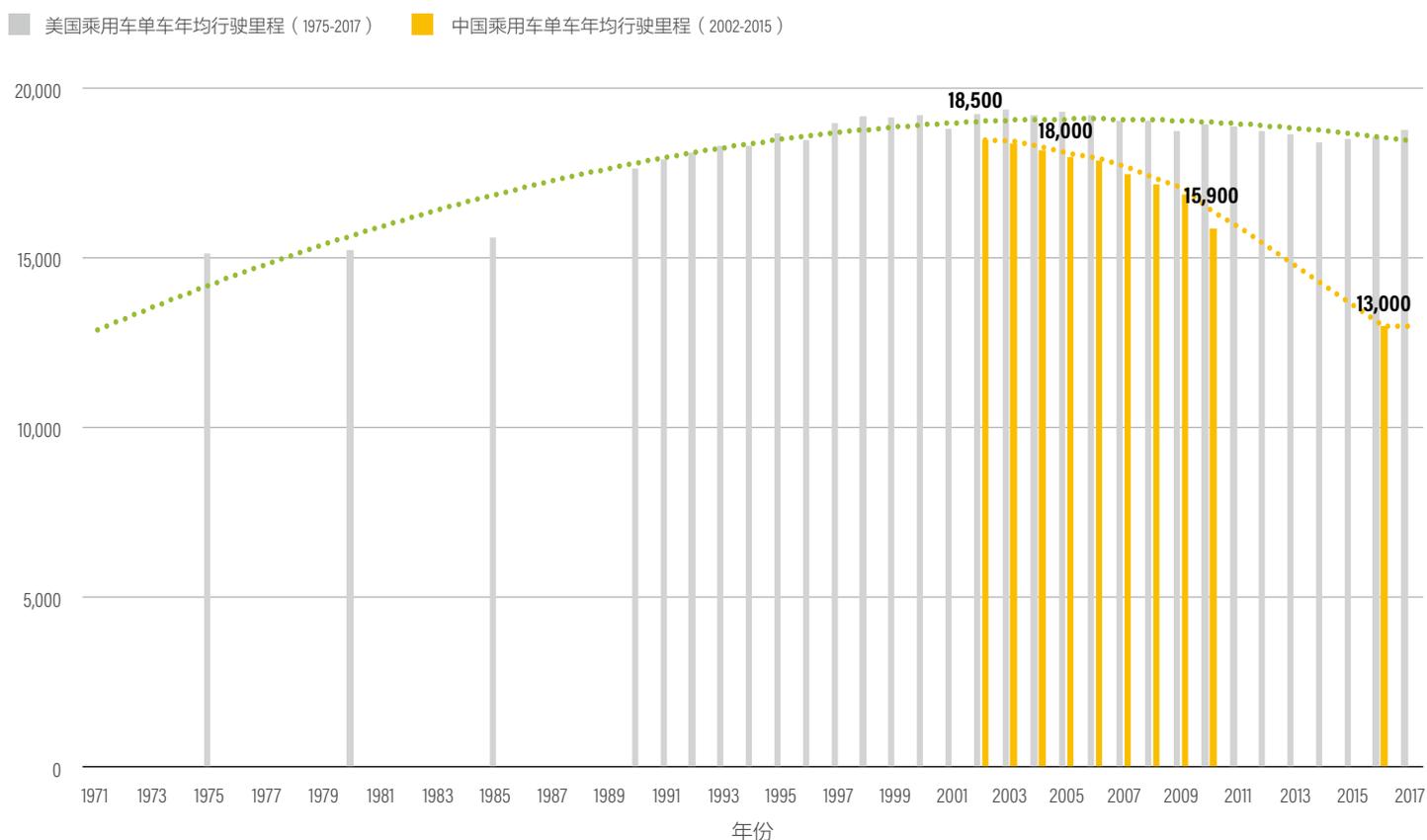
研究中心, 2013; Liu等, 2009) (见图11), 中国乘用车年行驶里程在2002年左右“达峰”, 峰值为18000~19500千米, 与出行强度最高的美国相当。但与美国不同的是, 受城市规划、交通需求、管理政策影响, 中国乘用车年行驶里程在“达峰”后呈迅速下降趋势, 2007—2013年下降了26%, 2013到2015年下降了4% (Argonne, 2018)。根据中国汽车技术研究中心有限公司最新研究 (Qu等, 2019), 2016年中国乘用车单车平均年行驶里程已降至13000~13500公里。受城市大小、公共交通便利度影响, 不同城市的单车年均行驶里程差异较大。例如, 北京的乘用车单车平均年行驶里程约为13000公里, 深圳与广州分别约为11400公里和10900公里, 苏州低于10000公里 (能源与交通创新中心, 2019)。

■ 未来趋势分析

诚然, 居民收入提高、城市扩张会推动中国乘用车保有量进一步地增长, 但越来越多城市出台的限行、限购等交通需求管理政策, 结合“公交优先”的措施, 会引导更多城市出行需求发生模式转移——即从小汽车出行转向公共交通出行, 从而对乘用车保有量的增长产生抑制作用。例如, 采取限行限购措施的北京, 近年的千人乘用车保有量已一直维持在239辆的水平, 上海千人乘用车保有量则一直维持在135辆的全国平均水平上下 (2018年国民经济和社会发展统计公报, 2018) (见图12)。

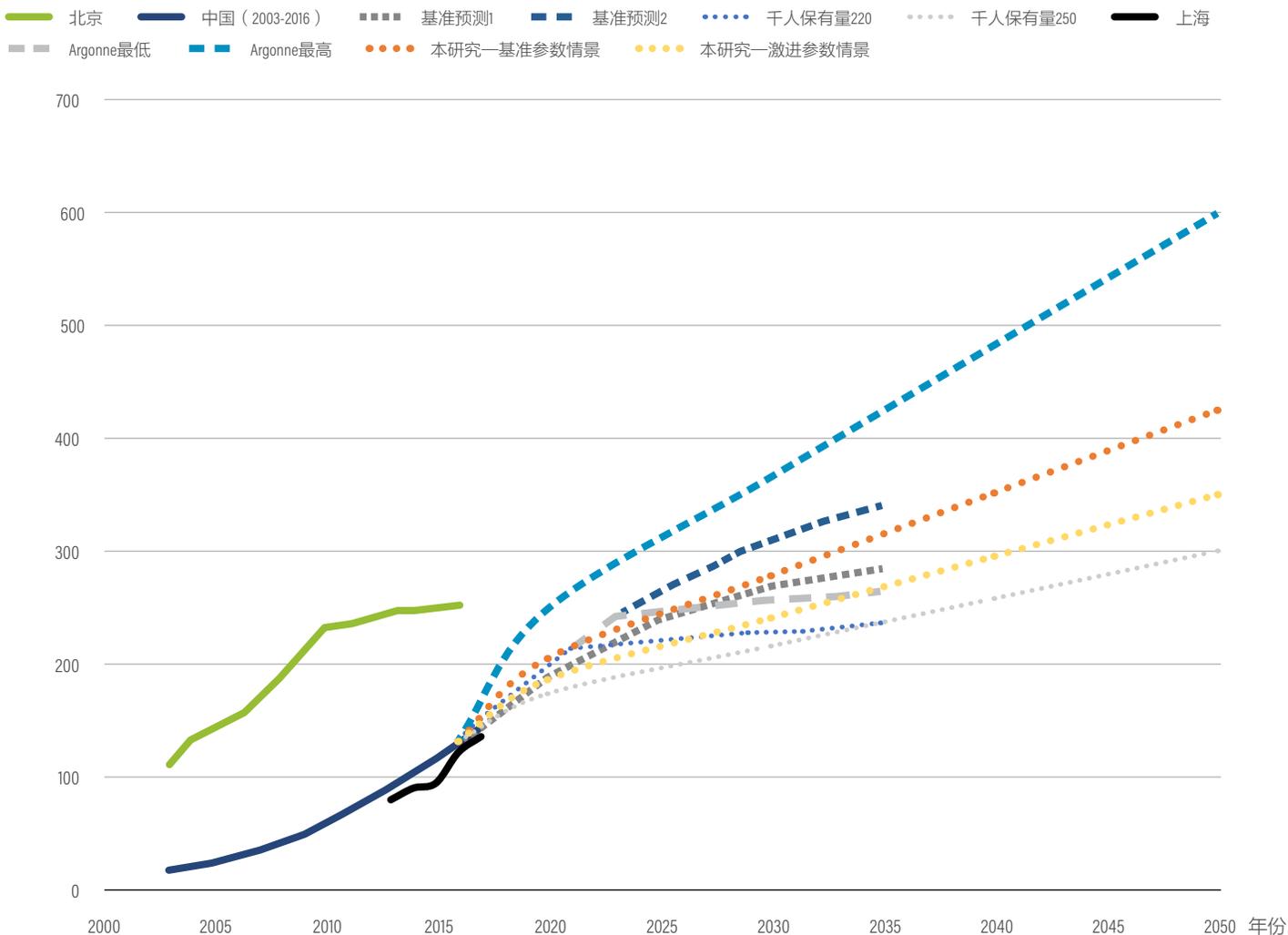
在收入增长、城市形态和交通需求管理政策多重作用下, 中国乘用车未来保有量增长具有不确定性, 通过参考各类关于保有

图 11 | 中国、美国乘用车单车年均行驶里程对比 (单位: 千米)



来源: 美国交通统计局, 中国汽车技术研究中心有限公司 (2018), Argonne (2018)

图 12 | 中国千人乘用车保有量预测（单位：辆每千人）



来源：Gilbert, C. (2017), Argonne (2018)
说明：实线为实际值，虚线与预测值。

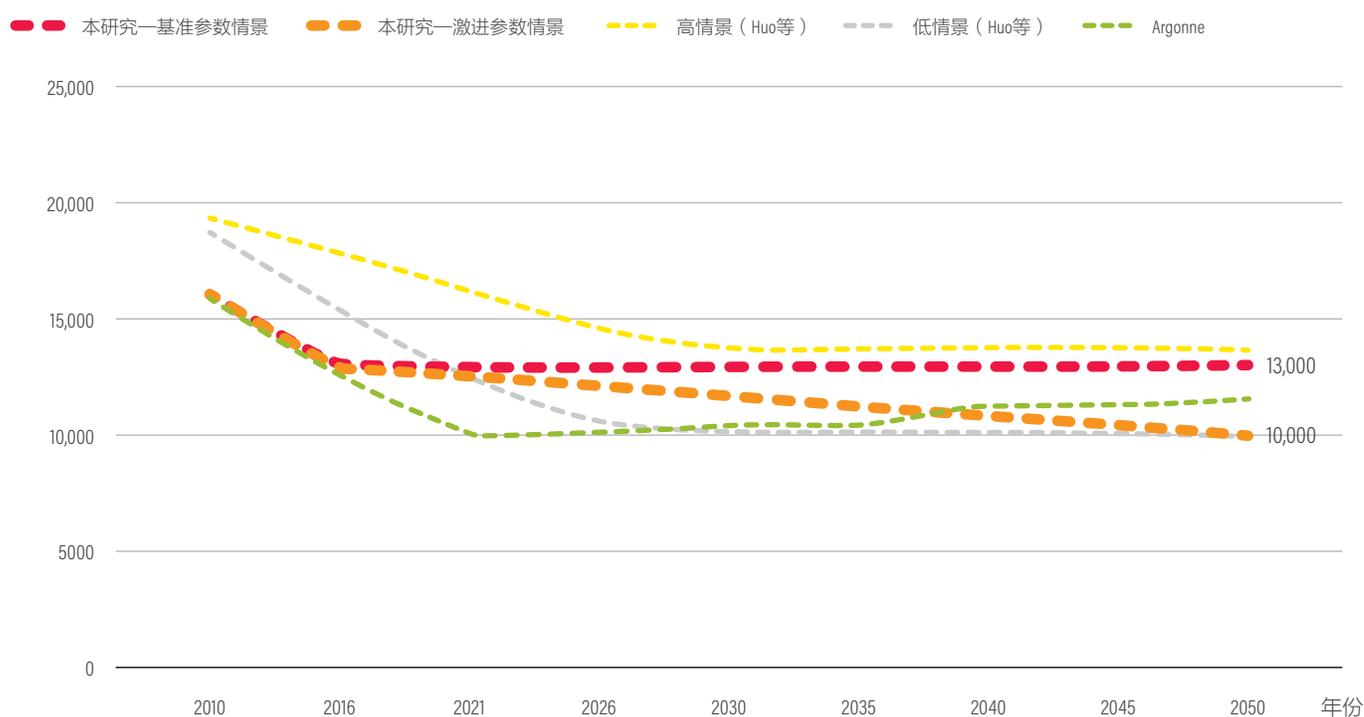
量预测的文献，本文预测中国未来乘用车千人保有量为350~425辆，将低于欧美发达国家水平：

- 基准参数情景：采用国际能源署的预测，该预测以中国未来人均GDP年增长4.5%为计算依据，得出中国2050年千人乘用车保有量高达425辆，总保有量为5.5亿辆。
- 激进（低碳）参数情景：鉴于中国部分城市出台的限行、限购等交通需求管理政策与“公交优先”等措施，加之2018年乘用车销量下滑，激进（低碳）参数情景对保有量的预测相对保守，乘用车千人保有量设置为350辆，总保有量为4.6亿辆。

虽然在未来，共享出行商业平台和自动驾驶技术日益成熟与普及后，中国乘用车保有量将可能比激进（低碳）参数情景的千人350辆更低，但由于不确定因素多，本研究不考虑共享出行和自动驾驶情景下的减排前景。中国千人乘用车保有量预测见图12。

在年行驶里程方面，中国乘用车单车年行驶里程虽然在过去的几年中呈现快速下降趋势，但13000千米的单车年行驶是否达到“平台期”仍是未知数，其未来下降趋势将取决于城市规划、交通需求管理等政策的引导。本文预测2050年中国乘用车年行驶里程为10000（激进）~13000公里（基准），这一预测值与已知研究（Huo等，2012，Argonne，2018）基本一致（见图13）。

图 13 | 乘用车年均行驶里程预测（单位：千米）



来源：Huo 等（2012），Argonne（2018）

表 3 | 乘用车：未来不同参数情景下的主要假设

| | 2017 年 | 2050 年 基准参数情景 | 2050 年 激进（低碳）参数情景 | |
|------------------|--------|------------------|----------------------|--------------|
| 汽车保有量 (亿辆) | 2.0 | 6.5 | 4.6 | 出行需求 出行结构 |
| 汽车 千人保有量 (辆) | 230 | 494 | 350 | |
| 乘用车保有量 (亿辆) | 1.74 | 5.58 | 4.59 | |
| 乘用车 千人保有量 (辆) | 230 | 425 | 350 | 出行需求 城市规划 |
| 单车年行驶里程 (千米) | 13000 | 13000 | 10000 | |

4.2 商用车保有量、周转量和年行驶里程

从商用客车看，2002—2017年其保有量复合增速较低：大型客车增速仅为5%，中型客车甚至呈现负增长趋势（国家统计局，2019）（见图14）。在城际客运方面，随着中国高铁网络的完善，预计未来城际客运车辆保有量与年行驶里程增量空间有限。在城市客运方面，中国城市在过去几年里快速扩张，公交行业自身也经历了快速发展阶段，较之2014年，运营车辆数量和运营线路数量在2017年分别增长了23.7%和26.1%（交通运输部，2017）。近几年的增长已将城市客运车辆未来增长空间及早变现，加之地铁等轨道交通网络的完善，预计城市公交车数量增长对客流增加的边际效益已减弱，需要从服务质量、网络衔接等方面改进。城际、城市客运车辆载客效率高，排放较低，占中国道路交通总排放比例仅为8%左右，因此，本研究假设未来商用客车总量、年行驶里程与目前持平。

从商用货车看，轻型货车和重型货车保有量在所有汽车类型中增长较快，2002—2017年的年复合增长率仅次于乘用车，均为10%。其中，轻型货车整体排放较低，约占中国道路交通总排放的5%，加之很多中国城市都针对轻型货车实行限行政策，本研究假设未来轻型货车保有量量成倍增长、年行驶里程则维持现状。

本节将集中对占中国道路交通排放近40%的重型货车的未来发展趋势进行探讨。

■ 现状情况

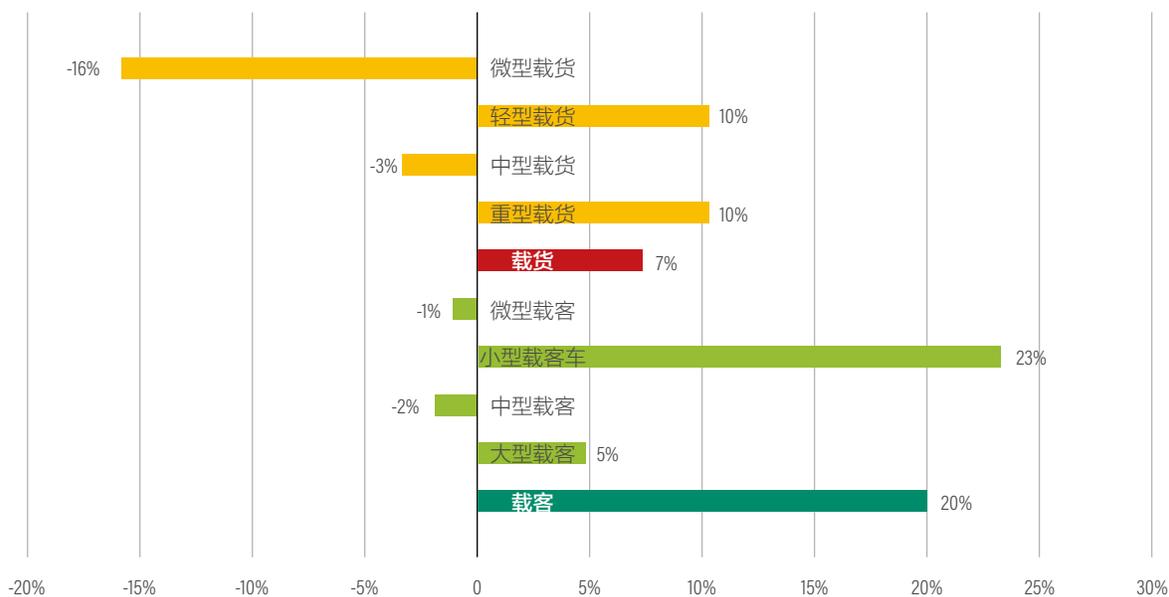
“十二五”以来，中国公路货运行业运输量持续增长，2017年中国全社会货运周转量（含公路货运、铁路货运、内河货运、沿海货运、航空货运，不含远洋货运）为142288亿吨公里，公路货运周转量达66771亿吨公里，较2009年分别增长7.0%和7.6%，与GDP增幅近似（国家统计局，2019）。

公路货运是中国货运结构的主力，占全社会货运周转量（不含远洋货运）的47%，铁路货运周转量和水路货运周转量仅占全社会货运周转量（不含远洋货运）的19%和30%（国家统计局，2019）。传统上适于铁路运输的大宗煤炭、钢铁、矿石、粮食运输，其运量呈下降趋势且向公路运输转移。

■ 未来趋势分析

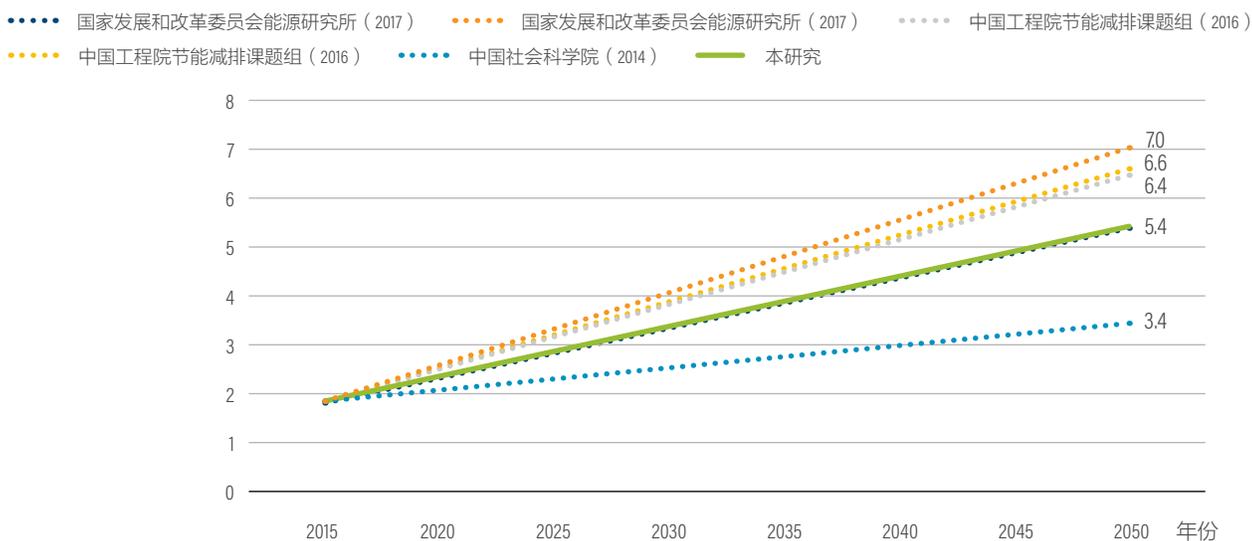
经济发展与对外贸易投资将是提升中国未来全社会货运需求的重要动力，未来中国货运需求势必将呈现高速增长，但具体增速仍是未知数。国家发展和改革委员会能源研究所（2017）根据弹性系数法预测2050年全社会货运周转量为540000~700874亿吨公里，中国社会科学院预测2050年全社会货运周转量为638868~655625亿吨公里（刘建翠，2011），中国工程院节能减排课题组（2016）预测2050年全社会货运周转量为344024亿吨公里。本文取目前各类预测的中值（540000亿吨公里）作为全社会货运周转量（不含远洋运输）（见图15）。

图 14 | 2002—2017年（民用）客车和货车保有量年复合增长率（%）



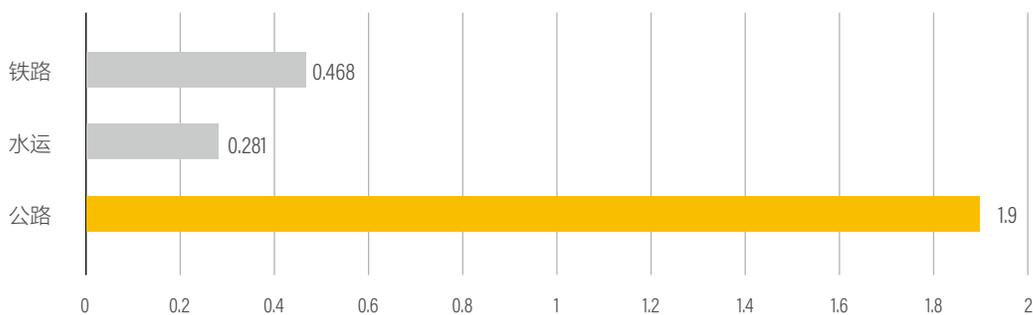
说明：“货车”是所有类型货车增长率的加总，而“客车”是所有类型客车增长率的加总。
来源：国家统计局（2019）

图 15 | 全社会货运周转量预测（2050年）（单位：十亿吨公里）



说明：国家发展和改革委员会能源研究所（2017）的预测含远洋运输，中国社会科学院（2014）的预测不含远洋运输，中国工程院节能减排课题组（2016）的预测含远洋运输。由于远洋运输增幅有限，本文假设未来预计远洋运输在全社会货运周转量占比不高，该统计口径差异所导致的影响可忽略不计。

图 16 | 2015年中国铁路货运、水路货运和公路货运单位周转量能耗对比（单位：千克标准煤每百吨公里）



来源：交通运输部（2015）

在货运结构方面，根据周转量计算，美国、日本等国家公路运输也同样占较大的市场份额，但这些国家一直着力发展与公路货运并驾齐驱且更为低碳的货运模式。例如，得益于铁路可以长距离运输大宗货物的优势，2014年美国铁路货运周转量占全部货运周转量的35.4%，接近于公路货运（38.1%）；为缓解公路货运形成的城际高速公路拥堵及对运输效率的影响，美国也在大力发展多式联运。日本为了抑制公路运输的负外部性，加大了对港口的建设并提高了对公路运输的要求，其2016年水路货运周转量占比为43.7%，与公路货运（43.8%）几乎相当（姜旭，2010）。

中国未来货运结构会受到货源结构和货运行业整体转型升级两个方面的影响。一方面，随着第三产业比重上升，中国对重量轻、附加值高的产品的运输需求不断增加，从而增加对“即时

配送”方式的需求，但同时大宗货物（煤炭、钢铁、矿石、粮食）的需求也会维持在高位。另一方面，在中国大力发展“公转铁”和“公转水”政策的激励下，大宗货物的运输将从公路转移到更具优势的铁路，而铁路可能在未来也会拓展冷链运输和快递运输等专业化运输方式。因此，在货源机构升级与货运行业转型两股力量作用下，本文预计在激进（低碳）情景中，2050年公路货运占全社会货运周转量的比例有望从2015的47%降至35%，而铁路货运和水路或运占全社会货运周转量的比例将达到60%左右，大幅提升货运节能效果（见图16）。该结构水平比国家发展和改革委员会能源研究所预测的2050年公路货运周转量占全社会货运中转量的比例（45%）要低十个百分点。该运输结构预测的前提是未来铁路货运、水路货运会提供更大的运力与更好的服务水平，从而能承载相应的货运量转移。

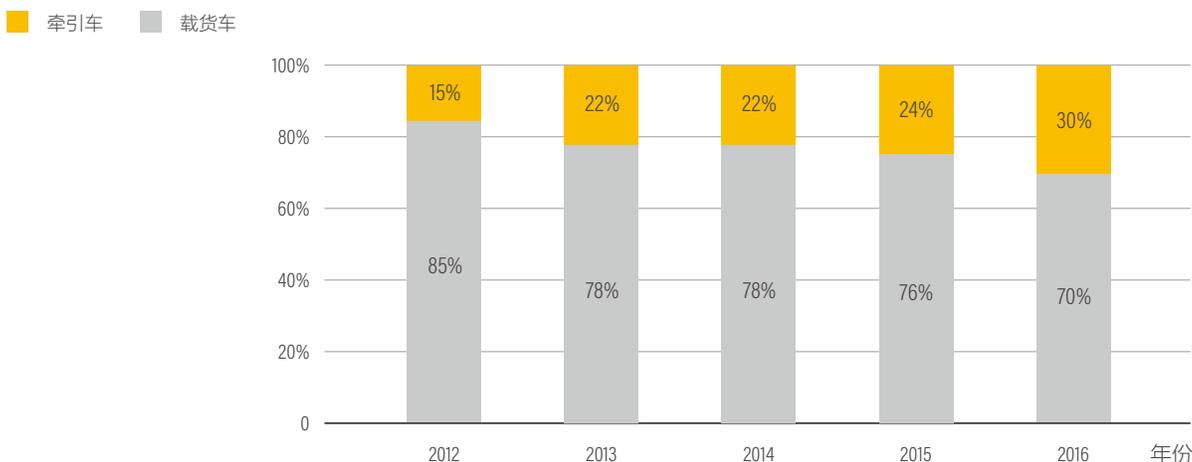
此外，公路货运运输效率提升也能在很大程度上实现减排。对长途公路货运而言，半挂牵引车是最高效的车型。在美国，半挂牵引车占公路货运市场的大多数，通常总设计质量15吨及以上的甩挂卡车（Class 8）中，以牵引车拖带挂车完成的运输量占总运输量的近80%（国家信息中心，2014）。但是在中国，2012年甩挂运输量占道路运输总量的比例还不到3%。目前，国内重型货车中最常见的车型是载货车，占市场份额的70%（见图17），并以设计总质量在3.4~4.5吨和12.5~16吨两类载货车居多（Delgado等，2016）。所以，中国完全有条件通过组织管理、发展甩挂运输、提高公路货运载货率等方式，降低其运输成本（运

输能力可提高40%，成本最多降低40%），更好地实现公路货运行业的低碳、绿色发展。

4.3 车辆技术

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）技术更新迭代，及可替代燃料（包括天然气、乙醇）汽车的推广，未来中国传统内燃机车规模将不断缩小。未来的车辆技术与燃料结构将更加多元化。尽管如此，不同的新能源与可替代燃料所适用的车辆类型及用途有着较大差异。因此，

图 17 | 2012—2016年中国重型货车车型占比



来源：中国汽车技术研究中心有限公司，2017

表 4 | 重型货车：未来不同参数情景下的主要假设

| | 2017年 | 2050年 基准参数情景 | 2050年 激进（低碳）参数情景 | |
|---------------------|--------|-----------------|---------------------|----------|
| 全社会货运周转量（亿吨公里） | 142288 | 540000 | 540000 | ← 货运结构转移 |
| 公路货运周转量占全社会货运周转量的比例 | 47% | 50% | 35% | |
| 公路货运周转量（亿吨公里） | 66771 | 270000 | 189000 | |
| 货车平均载货量（吨） | 10 | 16 | 23 | ← 运输效率提升 |
| 单车年行驶里程（千米） | 50000 | 50000 | 50000 | |
| 重型货车保有量（亿辆） | 0.13 | 0.33 | 0.16 | |

说明：1. 基准参数情景中的公路货运周转量占全社会货运周转量采用与现状水平（47%）相当的值，即50%。

2. 单车年行驶里程来源于中国汽车技术研究中心有限公司2018年针对商用车的调研。调研平均值为52000千米，本研究取整，并假设未来货车单车年行驶里程与2018年的水平相当。

3. 假设随着厢式货车减少、甩挂货车增加与运输效率提高，车均载货量将不断增加，假设未来将增加到目前的近2倍，接近甩挂货车单车载货量。

本文对乘用车、公交客车、轻型货车、重型货车等车型中长期技术路线进行了研判（见表5）。

1. 乘用车、城市公交和轻型货车

■ 现状情况

中国目前是全球最大的新能源汽车市场。2018年中国新能源汽车年销量为125.6万辆，比2017年增长115%，是排名第二的美国年销量的近3.5倍。中国市场的新能源汽车总保有量约为261万辆，占全球新能源汽车总保有量的47%（国际能源署，2019）。

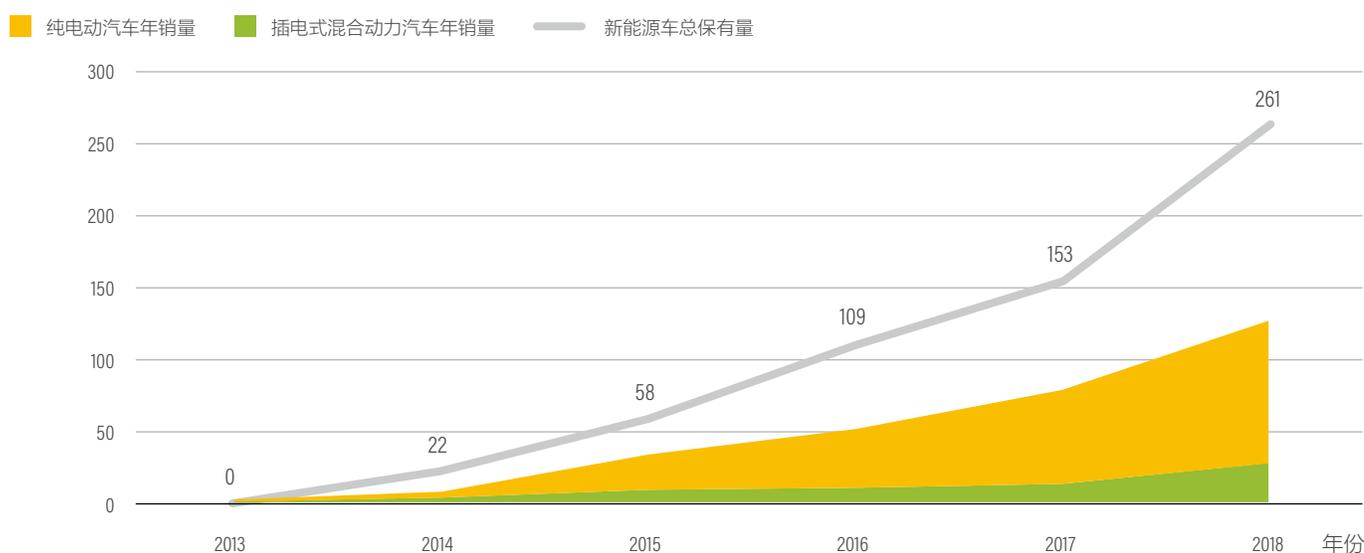
虽然中国新能源汽车销量大，但市场整体渗透率还落后于欧洲国家。2018年中国新能源汽车市场占有率上升至4.21%，全球排名第四，仅次于挪威（38.6%）、瑞典（7.06%）和荷兰（6.26%）。

与其他国家不同，无论在私人乘用车领域还是公共领域，中国的新能源汽车推广均以纯电动为主（见图18）。2018年，中国纯电动汽车保有量占新能源汽车保有量的81%，高于全球71%的平均水平（国际能源署，2019）。这主要得益于在新能源汽车产业发展初期，中国就制定了“纯电驱动”的技术路线和战略目标，在倾向于纯电动汽车的国家地方补贴优惠与地方限行限购政策的驱动

表 5 | 各类车型的中长期（2050年）技术路线研判

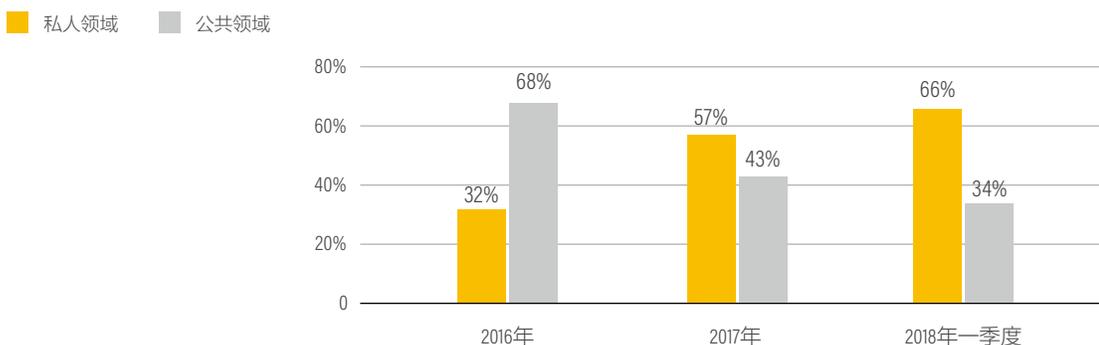
| 车辆类型 | 传统燃油车 | 替代燃料车 | | 新能源汽车 | | |
|-----------|-------|--------|----------|-------------|-------------|-------------|
| | 汽（柴）油 | 天然气 | 生物燃料（乙醇） | 纯电动 | 增程式或插电式混合动力 | 氢燃料 |
| 乘用车 | 不推荐 | 不推荐 | 不推荐 | 主要推广车型 | 过渡推广车型 | 不推荐 |
| 公交客车、轻型货车 | 不推荐 | 不推荐 | 不推荐 | 主要推广车型 | 过渡推广车型 | （中长期）主要推广车型 |
| 长途客车、重型货车 | 不推荐 | 过渡推广车型 | 过渡推广车型 | （中长期）主要推广车型 | （中长期）主要推广车型 | （中长期）主要推广车型 |

图 18 | 中国新能源汽车年销量和保有量（单位：万辆）



来源：中国汽车工业协会历年统计数据

图 19 | 近年新能源汽车在公共领域和私人领域分布占比



来源：中国汽车技术研究中心有限公司（2018）

表 6 | 不同国家或地区纯电动汽车推广政策清单

| 国家或地区 | 起效时间 | 政策及内容 |
|---------------------------|--------|--|
| 生产侧：碳交易政策 | | |
| 美国加利福尼亚州 | 1990 年 | · 零排放车辆积分政策：乘用车及轻型、中型货车 |
| 中国 | 2018 年 | · 乘用车“双积分”政策：仅针对乘用车，2020 年后可能会纳入商用车 |
| 需求侧：新车“禁燃”政策 | | |
| 挪威 | 2025 年 | · 新售汽车必须为纯电动汽车或氢燃料电池汽车 · 插电混合动力汽车属于“禁燃”范畴 |
| 荷兰 | 2030 年 | · 新售乘用车必须为新能源汽车 |
| | 2045 年 | · 全部车队替换为新能源汽车 |
| 瑞典 | 2030 年 | · 新售乘用车必须为新能源汽车 |
| 爱尔兰 | 2030 年 | · 新售乘用车和小型厢式货车必须为纯电动汽车或插电式混合动力汽车 · 新售重型货车必须为以生物质燃料、天然气、电力和氢燃料电池等为动力源 |
| 中国海南省 | 2030 年 | · 2020 年公共领域（公务用车、公交车、出租车等）全面替换为新能源汽车或天然气车 · 2025 年社会运营领域（轻型物流配送车、网约车等）全面替换为新能源汽车或天然气车 · 2030 年新售私家车、公共和社会领域用车必须为新能源汽车 · 不含对重型货车的要求 |
| 需求侧：路权政策 | | |
| 英国牛津：零排放区 (暂定，目前在公示阶段) | 2020 年 | · 2020 年在小范围城市中心仅允许新能源私家车、出租车进出 · 2025 年在扩大范围的城市中心仅允许新能源私家车、出租车、轻型货车进出 · 2035 年在全市仅允许新能源汽车进出 |
| 厄瓜多尔基多：零排放区（官员口头承诺） | 2020 年 | · 仅允许纯电动汽车和公交车进入城市中心历史保护区 |

来源：Hitchcock 等（2017），爱尔兰交通旅游部（2017），海南省政府（2019）

下，纯电动汽车年销量的市场占比从2014年的60%上升到2017年的84%。

虽然中国新能源汽车发展起初以公共领域（如公交客车和轻型货车）为主导，但自2017年始，中国私人领域新能源汽车年增长数量首次超过公共领域，其占比已从2016年的32%快速上升到2018年的66%（见图19），正成为纯电动汽车未来主要的增长点（中国汽车技术研究中心有限公司，2018）。

■ 未来趋势

当前中国私人领域和公共领域纯电动汽车的高速增长，既有赖于电池能量密度提升、整车价格下降，也与政策导向密不可分。

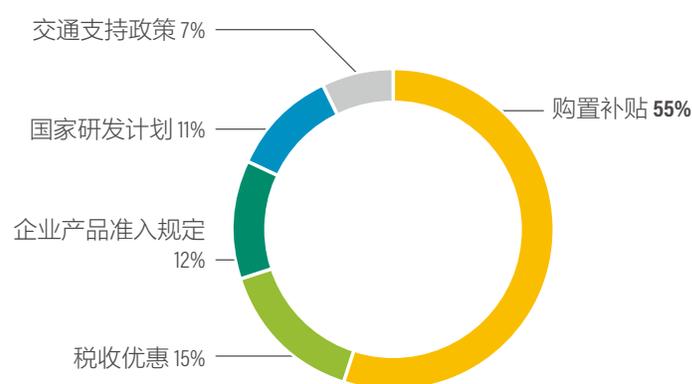
根据国际能源署（2019）对全球现行新能源汽车推广政策类型的统计，中国的推广政策基本覆盖研发、生产、购买、电池回收利用等所有政策类型。据中国汽车技术研究中心有限公司统计，2009—2017年中国出台的各类针对新能源汽车推广的政策中，财税政策（特别是购置补贴）发挥的作用最大（见图20）。

展望未来，随着2021年新能源汽车补贴政策的退坡、免购置税的取消，“后补贴时代”下中国新能源汽车推广政策将会更加趋向多元化。未来新能源汽车推广政策手段将既包括生产侧的“双积分”政策，也涉及需求侧的低排放区或零排放区，以及新能源汽车路权优惠政策。同时，这些未来的政策不仅会涉及对新能源汽车的优惠政策（如完善充电桩基础设施），也必然涉及对传统燃油车的限制政策（如限购、限行、与能耗挂钩的税费政策

等）。虽然中国的新能源汽车政策在过去的推广中发挥了巨大作用，但与欧洲新能源汽车渗透率高且均提出“禁燃”的国家（如挪威、瑞典）相比，中国在需求侧政策和对传统燃油车的限行、限购政策方面仍存在发力空间（见表6）。

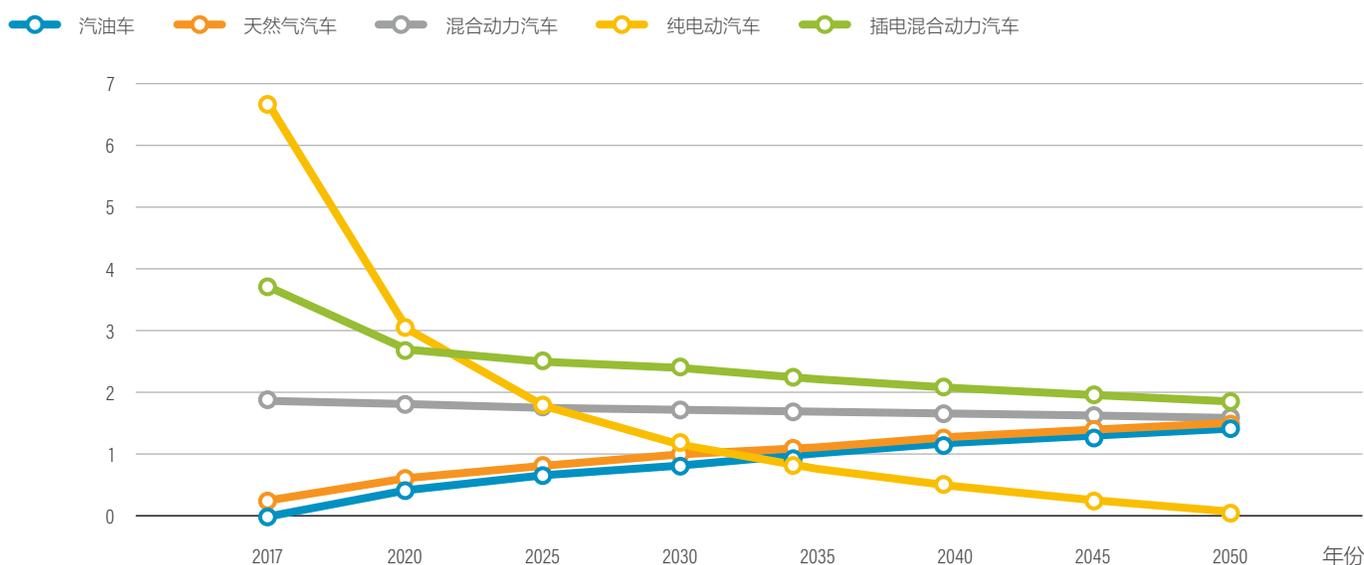
本研究采用中国汽车技术研究中心有限公司的最新研究成果（2019），基于消费者选择模型，结合中国未来不同政策路径，

图 20 | 2009—2017年中国各类推广政策对新能源汽车增长贡献程度分析



来源：中国汽车技术研究中心有限公司（2019）

图 21 | 不同乘用车车型相对成本未来变化趋势（单位：万元）



说明：纵轴为各车型相对于2017年基准汽油车的差价，其中2017年基准汽油车价格计为0。
来源：中国汽车技术研究中心有限公司（2019）

按照车辆自然淘汰规律（即不考虑燃油车队的加速淘汰），对采用不同燃料和技术的新能源汽车的购置使用综合成本、充电便利性等进行预测，得到未来乘用车市场结构：

- 鉴于纯电动汽车价格可能在2022年左右将低于插电式混合动力汽车的价格，插电式混合动力汽车未来市场占有率有限。因此，本研究假设在政策、市场双重作用下，插电式混合动力汽车仅在短期内有上升趋势，但未来乘用车市场的新能源汽车将以纯电动汽车为主。
- 基准参数情景：考虑购买成本（财税优惠）、使用成本与充电便利性等因素后，纯电动汽车综合成本有可能在2025—2030年前后降低到传统燃油车的水平（见图21），可以通过市场力量与传统燃油车进行商业竞争。在这一基准情景下，2035年和2050年中国新能源汽车乘用车市场渗透率将分别达到22.5%和50.1%，并以纯电动汽车为主（见图22）。
- 激进参数情景（乘用车“禁燃”）：在基准情景下，如果考虑未来可能的政策加码——假设分区域、分车型的

“禁燃”政策自2035年实施，乘用车市场的纯电动汽车渗透率在2050年上升到75.8%（见图22）。

2. 重型货车

与乘用车和城市公交车不同，长途运输的重型货车（及公路客车）由于车辆总设计质量大、运输距离长，近期内电动化面临的技术与成本阻碍较大，未来车辆技术路径呈现多元化趋势。

■ 现状情况

目前中国重型货车市场中，柴油动力货车仍为主流，占90%左右（见图23）。然而，替代燃料——天然气（LNG）货车技术相对成熟，LNG货车规模呈稳步增长态势（广东省交通运输规划研究中心，2014）。从2007年到2014年LNG货车数量增长了10倍。截至2017年底，中国LNG重型货车保有量为25.5万辆，其天然气消耗占中国车用天然气总消耗量的一半。

■ 未来趋势

在货车技术发展上，目前仅有LNG货车技术较为成熟，基本

图 22 | 本研究不同情景下纯电动乘用车保有量增长预测（单位：百万辆）

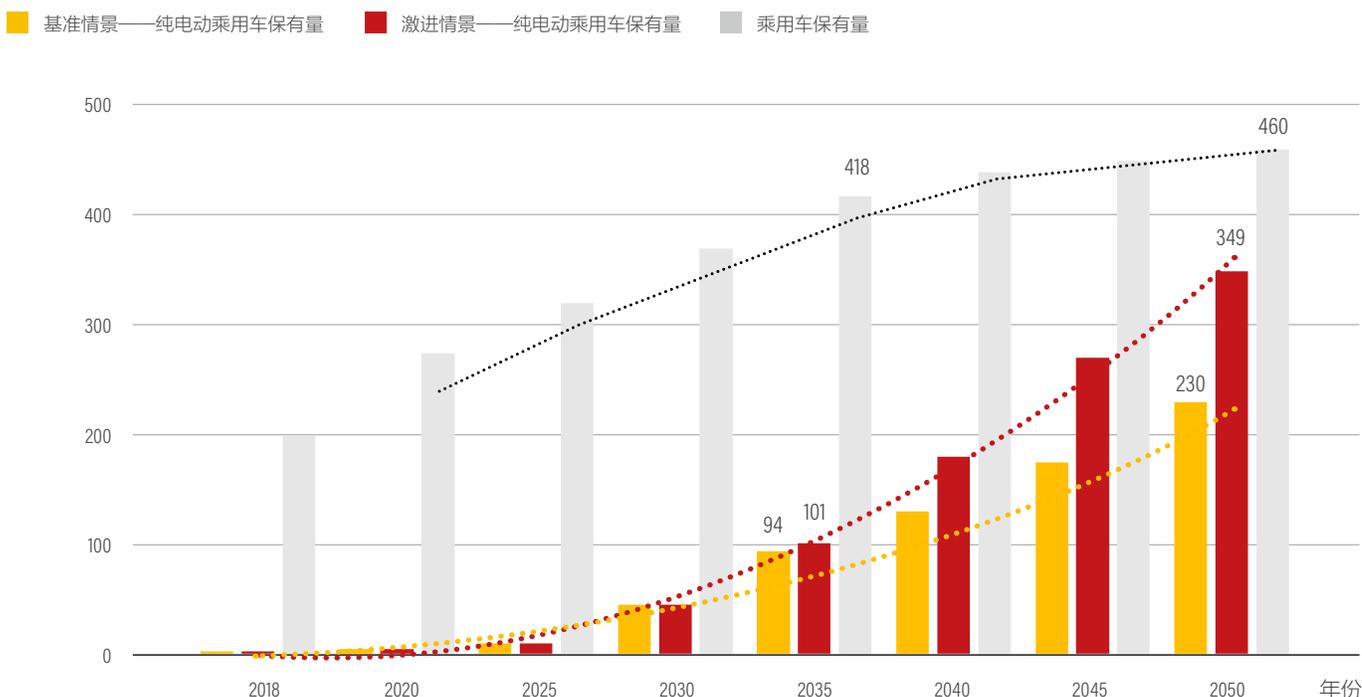
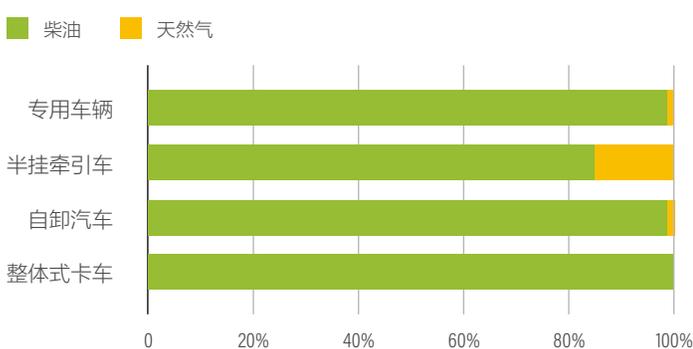


图 23 | 2014年中国重型货车市场份额
(按车辆类别和燃料类别分类)



来源: Delgado 等 (2016)

覆盖了货车的主要车型 (广东省交通运输规划研究中心, 2014)。但中国天然气对外依存度高, 天然气供应紧张会导致价格水平高。而天然气发动机能效比柴油发动机低, 在供应链环节天然气容易发生逃逸; 在空气污染物 (特别是氮氧化物) 和全生命周期排放上, 受制于中国天然气发动机技术路线选择, 天然气车排放比柴油车明显高出很多。此外, 天然气储罐也会占据货车货物空间, 从而压缩天然气货车的经济效益。而电动化、氢燃料电池等, 在车辆技术、基础设施配套建设上较落后, 预计到2030年之后才可能发力, 实现商业化并占据一定市场份额。因此, 中、重型货车的未来车辆技术将呈现多元化趋势。

(1) 纯电动技术: 在技术上, 由于电池能量密度不够高, 货车需要更大重量的电池, 才能维持其所需的续航里程, 但这会对车辆经济性产生较大影响; 此外, 常规动力电池通常无法提供货车所需要的强大动力。因此, 目前中国电动货车市场以城市物流的轻型货车为主。尽管如此, 重型货车电动化已经成为全球主要车企的攻坚方向, 如特斯拉、比亚迪、曼恩 (MAN) 都相继推出电动重型货车初代车型 (Eurelectric, 2017)。在充电技术方面, 这些电动货车分化成动力电池驱动货车和有轨货车¹两种类型; 在设计质量方面, 这些示范车型也较为多元, 覆盖了从负载16吨的中型货车到负载37吨的牵引车等多种车型 (国际能源署, 2019)。

(2) 氢燃料电池技术: 对比纯电动汽车, 氢燃料电池汽车具有续航里程长、加氢时间短、气候适应性更接近传统燃油车等优势。由于氢燃料电池增加能量密度对车身重量影响较小, 氢燃料电池车辆在大型客车和重型货车领域有更强的技术适应性。目前, 全球氢燃料电池汽车仍处于应用示范阶段, 虽然部分国内车企已经开始量产, 但市场规模很小且仅处于示范阶段, 例如佛山市的氢燃料电池公交车和上海市氢燃料电池物流车。

较之纯电动汽车, 氢燃料电池汽车仍需要突破技术、成本和基础设施掣肘, 才能实现规模化发展。举例来说, 当前中国氢燃

料储运成本较高 (20元每吨公里)、氢燃料电池成本高, 产业整体滞后, 预计在2025—2030年实现市场普及 (中国汽车技术研究中心有限公司 2018)。此外, 氢燃料电池车辆的全生命周期排放仍存在变数: 若采用目前中国火电水平 (2017年为70.9%) 进行电解水制氢, 氢燃料电池的全生命周期排放接近传统燃油车的2倍; 未来制氢过程与电力结构将影响氢燃料电池车辆全生命周期排放 (刘坚、钟财富, 2019)。

在重型货车技术发展和政策保障均不成熟、未来高度不确定的前提下, 本研究假设:

- 由于氢燃料电池未来数量规模与二氧化碳排放的不确定性需另作研究, 本研究将不考虑其未来在货车 (和乘用车) 市场的占有情况, 着重考虑天然气替代燃料和纯电动两种未来货车技术。
- 除天然气外的替代燃料 (如生物燃料乙醇) 虽然排放低, 且中国计划2020年在全国范围基本实现车用乙醇燃料全覆盖 (国家能源局, 2017), 但市场需求猛增导致的粮食安全问题, 以及间接造成土地使用情况改变等问题, 也需要另作探讨, 本研究将不考虑其未来在货车 (和乘用车) 市场的占有情况。
- 对于纯电动货车和天然气货车未来市场占有率, 本研究假设LNG重型货车可能作为过渡车型在2050年占据15%~28%的市场份额。随着纯电动技术在货车上的突破, 其可能在2050年占15%~50%不等的市场份额。其中, 基准参数情景下15.7%的重型货车电动化渗透率与彭博新能源财经 (2019) 预测的2040年全球重型货车电动化渗透率 (10%) 相近。而激进参数情景下59.5%的重型货车电动化渗透率更乐观, 但可实现性待考证。本研究中未来重型货车在不同参数情景下的假设见表7。

表 7 | 本研究中未来重型货车在不同参数情景下的假设

| | 基准参数情景 | 激进参数情景 | 彭博新能源财经 (2019) |
|---------------|--------|--------|----------------|
| 预测年份 | 2050年 | | 2040年 |
| 纯电动重型货车保有量占比 | 15.7% | 59.8% | 10% |
| LNG 重型货车保有量占比 | 15.0% | 28.2% | -- |

4.4 车辆燃料经济性

提高传统燃油车燃料经济性，不仅有助于传统燃油车减排，也能够帮助纯电动汽车提升相对成本优势。

■ 现状情况

目前，中国无论在货车还是乘用车领域，传统燃油车的燃料经济性距国际水平仍有一定差距。

(1) 乘用车燃料经济性：国家标准《乘用车燃料消耗量限值》(GB 19578—2014)和《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》(GB 27999—2014)是中国管理乘用车燃料经济性重要标准。该标准体系对不同等级整车整备质量，分别设定车辆燃料消耗限值及目标值。从2005年中国开始实施第一阶段的燃料消耗量限值及目标值标准以来，该标准体系已经发布到第四阶段(2015—2020年)。

在这一油耗标准体系的管理下，中国乘用车²在NEDC工况下平均燃料消耗(不计入新能源汽车核算值)也已从每百公里8.05升下降到2017年的6.77升，总降幅为16%。尽管如此，该平均油耗水平仍高于美国、欧洲与日本。

(2) 货车燃油经济性：与乘用车类似，中国也对重型商用车分类型、分质量提出燃料消耗量限值标准(涉及货车、客车、半挂牵引车、自卸汽车)，2018年已发布第三阶段重型商用车标准，提出“2020年在2015年基础上燃料消耗量限值加严约15%”。根据2017年商用车的平均油耗统计，现有车型中平均油耗高于第三阶段限值(见图24)，有80%以上油耗不达标，需要退出市场(中国汽车技术研究中心有限公司，2018)。

对比美国、欧洲，中国在货车燃油经济性上也存在一定差距。以半挂牵引车(总设计质量大于18吨)为例，在负载接近20吨的情况下，中国平均燃料消耗为百公里36.4~38.6升，欧洲平均则为32.6升，其最佳车型可以实现29.9 L的百公里燃油消耗。

■ 未来趋势

目前，国内传统燃油车的燃料经济性仍有较大改善空间。根据中国汽车工程学会编写的《节能与新能源汽车技术路线图》(2016年)，中国汽车技术最大可将车辆燃料经济性提高40%。

在乘用车方面，根据第四阶段油耗标准，2020年中国平均油耗目标为百公里5.0升，2025年国家平均油耗目标为百公里4.0升。这些目标正在缩小与欧洲的差距，并将赶超美国(百公里5.4升)，但美国乘用车车型较大，与中国不具可比性(见表8)。

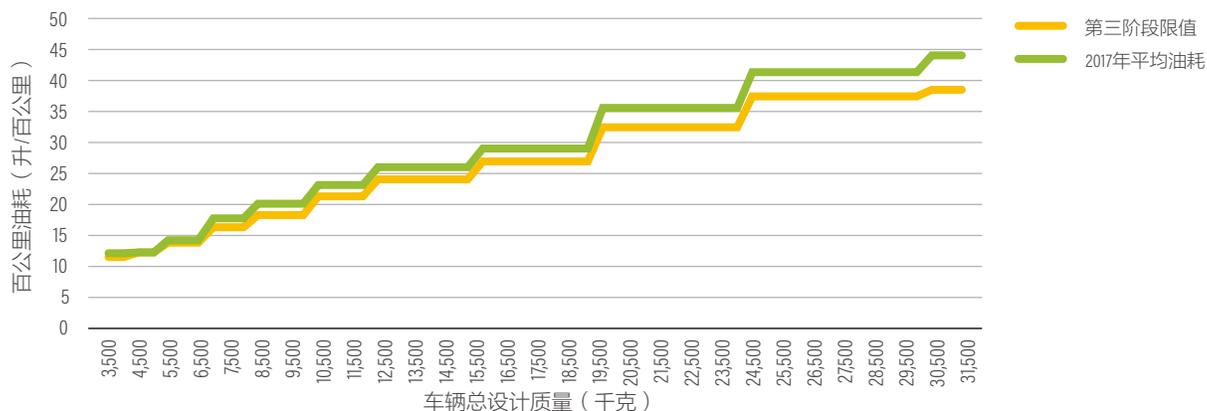
以上中国国家平均油耗目标计入了新能源汽车的油耗(其中纯电动汽车油耗计为零)，这意味着目前的目标需要配合纯电动汽车技术才能达标。尽管如此，中国传统燃油车自身也存在较大节能空间，包括发展制动能量回收技术、普及车辆混合动力技术等。特别是随着混合动力汽车在市場中的份额逐渐扩大，未来中国传统燃油车节能水平将会大幅改善。

在货车方面，对标欧盟与美国，车辆燃料经济性在中国仍存在较大改善空间：

□ 根据2018年欧盟最新要求，在“欧六”污染物排放基础上，首次增加针对货车生产企业的单车平均二氧化碳排放标准(可姑且视为与车辆燃料经济性呈线性关系)。该标准要求，截至2025年，欧盟新生产的货车单车平均二氧化碳排放必须比现状减排15%，在2030年实现减排30%的强制性目标(该标准不是仅针对传统燃油车，也包括天然气车、纯电动汽车、氢燃料电池汽车等车型)。

□ 2016年，美国发布最新的阶段二(2018—2027年)中重型车及发动机燃料经济性及温室气体排放法规。阶段二标准要求，截至2027年，中重型半挂牵引车的二氧化碳排放和燃料经济性要比阶段一改善25%，专用车要改善24%，货车要改善16%。根据国际清洁交通委员会

图 24 | 中国重型商用车燃料消耗第三阶段限值与2017年油耗平均值比较 (C-WTCV循环工况)



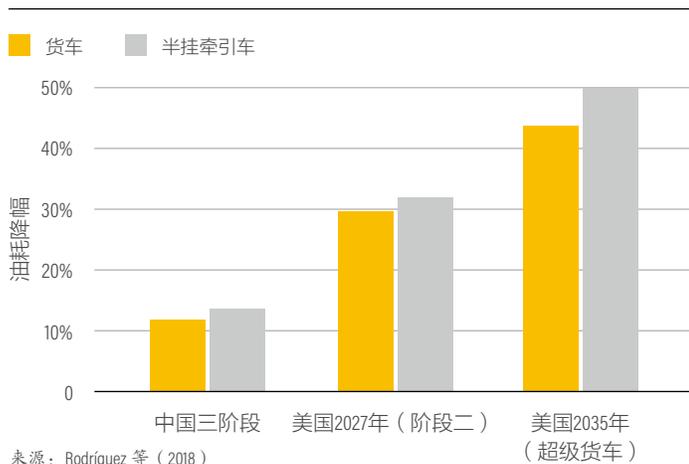
来源：中国汽车技术研究中心有限公司(2018)

表 8 | 第四阶段和第五阶段标准目标导入计划：
不同国家和地区平均油耗目标（单位：升/百公里）

| | 第三阶段平均 油耗值 (2012—2015年) | 第四阶段平均 油耗目标 (2015—2020年) | 第五阶段平均 油耗目标 (2020—2025年) |
|----|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 中国 | 6.9 | 5.0 | 4.0 |
| 美国 | 6.8 | 5.4 | 4.8 |
| 日本 | 6.1 | 5.2 | -- |
| 欧洲 | 5.2 | 3.8 | 3 |

说明：中国第三、第四、第五阶段油耗目标均为 NEDC 工况，并计入新能源车核算值。
来源：工业和信息化部（2015）

图 25 | 中美货车、半挂牵引车燃料消耗降低幅度比较



(ICCT) 测算（见图25），如果中国的半挂牵引车采用了与美国阶段二标准等效的技术方案，在中国C-WTCV循环工况下，可实现超过中国现行重型货车三阶段燃料消耗量限值15%以上的节油效果。如果采用了美国超级货车技术，到2030年可实现超过中国现行重型货车第三阶段燃料消耗量限值35%的节油效果。

在中国，一方面，随着货车总体向大型化的甩挂车方向转型，加之货运空驶率将不断降低，可能带来货车平均百公里油耗的上升；但另一方面，随着货车节能技术（如减少车身重量和轮胎摩擦、提高发动机热效率、增加空气动力结构）的普及，以及运输效率的改善，货车油耗可在现状基础上实现一定比例的下降（国家发展和改革委员会能源研究所，2017）。二者相互叠加，本文假设未来货车油耗呈小幅下降趋势。

值得注意的是，上述限值与目标值分别为NEDC、WLTP和C-WTCV工况下的油耗，与车辆实际燃油消耗仍存在一定差异。

例如，乘用车在NEDC工况下的油耗与实际油耗差异可达20%，本文预测以实际油耗为基础，因此对油耗限值做了20%的线性扩大。综合以上分析，本文对乘用车和重型货车油耗预测如下（轻型货车和客车将沿用国际能源署情景的预测值）：

□ 乘用车油耗：呈线性下降趋势，到2050年乘用车实际平均百公里燃料消耗将降至4.6升。

□ 重型货车油耗：呈下降趋势，到2050年重型货车平均百公里燃料消耗将下降10%左右，至24.2升。

4.5 电力清洁化

随着电动车规模的扩大，电力的清洁化水平（指非化石能源发电比例）将直接关系到交通运输行业的减排效果。在极端100%清洁的电力下，纯电动汽车才可以称为“零排放³”车辆。

■ 现状情况

在全国层面，根据中国电力企业联合会数据：火电（包括煤、天然气和燃油）发电量比重从2011年的82.5%下降到2017年底的71%；非化石能源发电中（含可再生能源发电与核电），可再生能源发电量（包括水电、风电、光伏发电、生物质发电，不含核电）占比上升至25.1%，并以水电为主，风电和光伏发电占6.5%。与欧洲、美国和巴西相比，中国的火电发电量占比仍在较高水平（见表9）。

在国内层面，根据国家能源局《2016年度全国可再生能源电力发展监测评价报告》，2016年各地区可再生能源电力消纳量比重呈现较明显的区域差异。其中，蓝天保卫战重点地区（如华北地区、长三角地区、汾渭平原），可再生能源占比明显偏低。特别是未来纯电动汽车渗透率可能较高的区域（如山东、北京，甚至海南），目前仍有较高的火力发电水平（见图26）。可见，中国各地区新能

表 9 | 国内外电力清洁度比较

| | 中国 | | 德国 | 美国 | 巴西 | 印度 |
|--------------------------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 2016年 | 2017年 | 2017年 | 2017年 | 2017年 | 2017年 |
| 电力行业 碳排放强度 (g/kWh) | 694 | 666 | 461 ² | 570 ¹ | 158 ⁴ | 820 ³ |
| 火电发电量 占比 (%) | 71.8% | 70.9% | 51.0% | 63.2% | 18.2% | 81.9% |

来源：1. 美国电力行业碳排放因子数据来源于：eGRID.

2. https://www.eumayors.eu/IMG/pdf/technical_annex_en.pdf

3. <http://ercp.gov.in/wp-content/uploads/2018/06/carbon-emissions-from-power-sector-7062018.pdf>

4. <http://mitsidi.com/co2-emissions-from-electricity-generation-in-brazil-exceeded-in-august-2014-the-official-forecast-for-the-year-2030/>

源汽车的推广力度与电力部门的清洁化进程还处于脱节状态。

■ 未来趋势

未来实现电力行业清洁化，依据传统产业的转型升级难度、存量电厂淘汰成本等不同的策略，可分化为两种情景（国际能源署，2019）（见图28）：

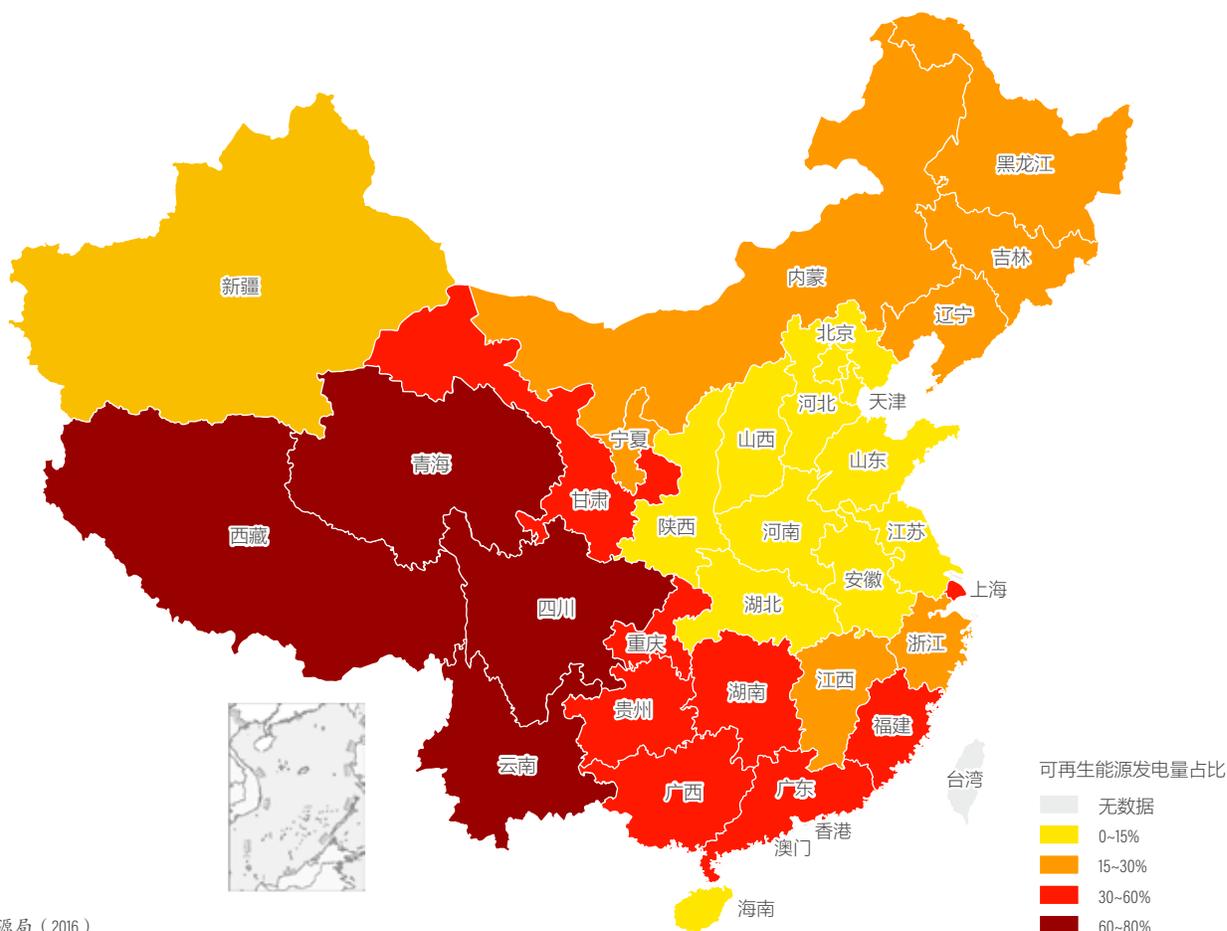
- 电力基准情景（一定比例火力发电）：考虑能源基础投资后的“锁定效应”，因而预测未来电力部门里仍有部分存量火电厂，虽然可降低社会基础设施投资成本，提高存量燃煤燃气电厂资产的使用率，但减排潜力有限。针对这一情景，本研究采用国际能源署的“新政策情景（New Policy Scenario）”，该情景预计截至2040年，中国火力发电比例将从71%下降到47%（其中，煤炭发电比例从64.7%下降到39%，天然气发电比例从3.2%上升到8%）；而非化石能源发电量占比为53%（与国家发展和改革委员会能源研究所预测的基准情景51.4%相当），其中风力发电量和太阳能发电量占比为23%。在这一情景中，电力部门的减排来

自可再生能源比例增加，以及对火电厂进行能效与灵活性改造，增加碳捕集、利用和封存（CCUS）功能。

- 电力激进情景（高比例可再生能源）：未来电力部门从发电侧、电网侧和用户侧多重发力，提升水力、风力和太阳能的发电比例，可能及早淘汰部分燃煤燃气电厂。例如，美国加利福尼亚州出台《清洁能源法案》，甚至计划于2045年实现100%可再生能源发电。本模型采用国际能源署的可持续发展情景（Sustainable Development Scenario），该情景预测截至2040年，中国火力发电量占比为23%，非化石能源发电量占比为77%，与国家发展和改革委员会能源研究所重塑情景预测值（2050年占比为82.7%）基本相当（国家发展和改革委员会能源研究所，2016）。

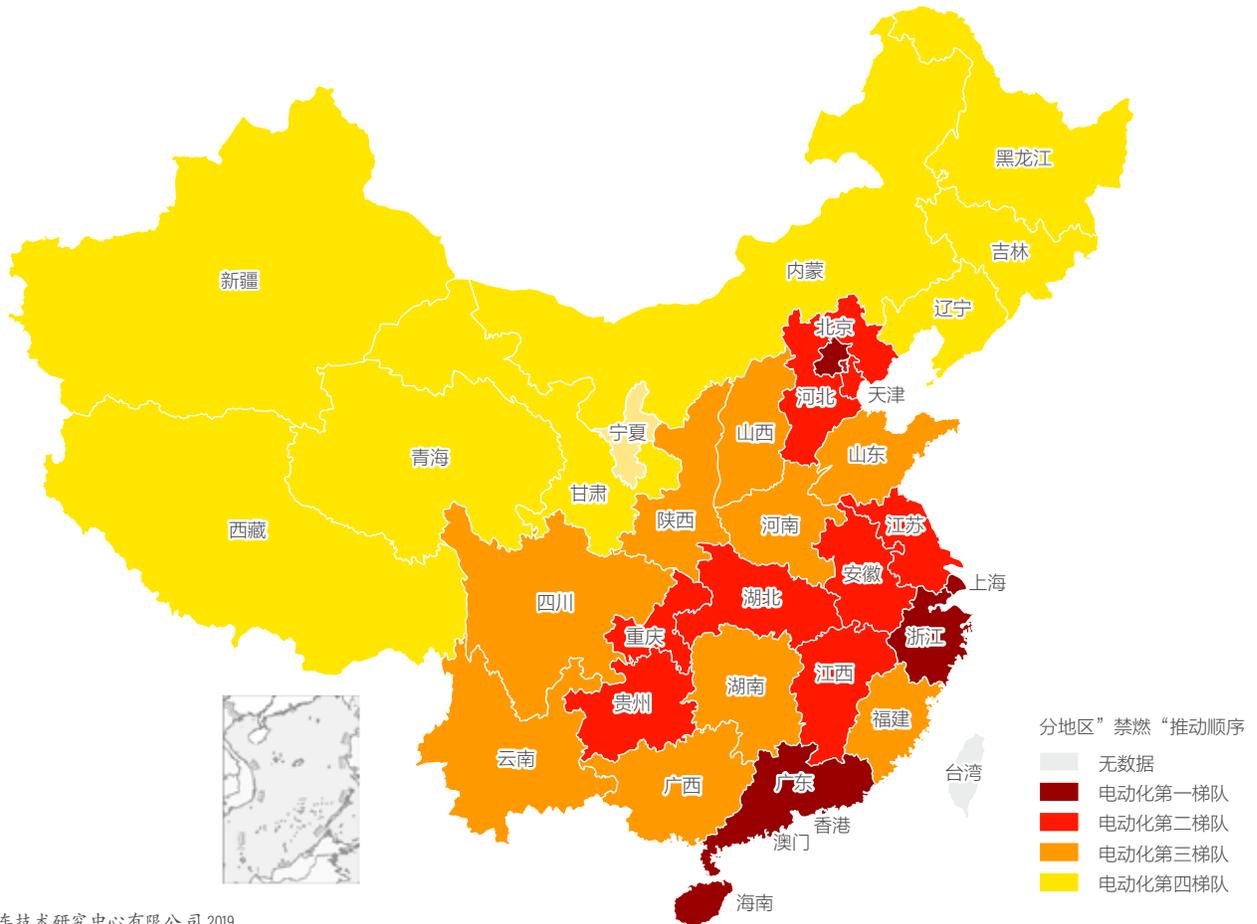
此外，随着电力跨省传输与交易壁垒（本地经济增长需求、成本分摊、监管机构间协调）的消失，可再生能源在地域禀赋与分布上的差异与不平衡也将得到缓解，风能和太阳能也可以被输送到其他高负荷地区（国家发展和改革委员会能源研究所，2018）。

图 26 | 2016年中国各地区可再生能源发电量占比（单位：%）



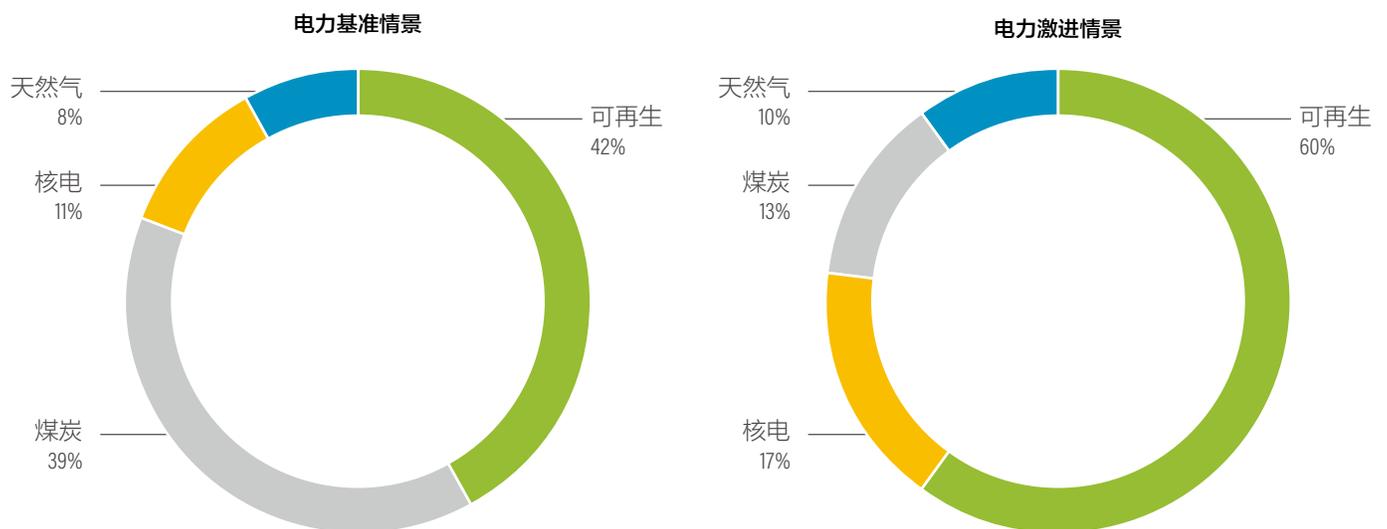
来源：国家能源局（2016）

图 27 | 中国纯电动汽车未来分地区新车“禁燃”推动顺序



来源：中国汽车技术研究中心有限公司 2019

图 28 | 不同情景下2050年电力部门发电结构



说明：这里假设国际能源署预测的 2040 年和 2050 年电力部门发电结构差异不大。此外，国家发展和改革委员会能源研究所和国际能源署计算采用的能耗值也不同。

情景设置

本研究从路径导向和目标导向二者入手，将未来中国道路交通行业排放划分成三种政策情景：基准情景、现有政策情景和1.5°C温控情景（见表10）。

■ 基准情景

基准情景的多数参数将延续历史发展趋势，在中长期不设定多减排措施进行干预，因此在模型参数方面，基准情景大多沿用国际能源署的新政策情景（NPS）。NPS情景基于中国2015年前的汽车保有量、车辆年行驶里程、车辆电动化、燃料经济性发展历史趋势对未来进行预测。虽然新政策情景有考虑“十三五”规划中新能源汽车目标、油耗目标和货运结构变化，但缺乏对政策及技术更进一步的判断和预测，导致预测结果较为保守，无法真正体现未来中国道路交通发展趋势，特别是汽车总保有量、电动化水平。本研究基准情景中，2050年中国汽车规模将达到6.5亿辆，

其中乘用车规模为5.5亿辆，千人汽车保有量为494辆。车队结构方面，纯电动汽车比例较低，乘用车中纯电动汽车保有量比例为19%左右，重型货车没有电动化；

在货运结构和电力清洁程度方面，基准情景将与现有政策情景一致，考虑已出台的“公转铁”、“公转水”政策和可再生能源推广政策可能产生的减排效果。

■ 现有政策情景

与基准情景的“无为”不同，现有政策情景则是结合目前已制定政策、未来最可行的政策，以及预判未来最可行的车辆技术路径，三者结合分析减排潜力。

在保有量和车辆结构上，现有政策情景考虑交通需求管理政策、公交优先政策对保有量的影响，因此2050年乘用车车队规模将控制在4.6亿辆左右。在“双积分”政策与电池技术升级双重助推下⁴，纯电动汽车数量将呈现爆发式快速增长，截至2050年，纯

表 10 | 本研究三种情景政策技术路径描述以及与国际能源署情景比较

| 政策情景 | 政策和技术路径 | 与国际能源署情景对比 | | 与上述参数情景的对应关系 |
|-----------|--|---------------------------------|------------------|-----------------------------|
| | | 交通运输行业 | 电力行业 | |
| 基准情景 | <ul style="list-style-type: none"> “十三五”规划 “公转铁”、“公转水”政策及推广甩挂运输 可再生能源推广 | 国际能源署新政策情景（NPS） 但燃料经济性和年里程自设 | 国际能源署新政策情景（NPS） | 基准参数情景、电力基准情景 |
| 现有政策情景 | 在基准情景的基础上，增加： <ul style="list-style-type: none"> 严格的私家车交通需求管理政策（限行限购）、大力发展公共交通等 乘用车、商用车“双积分”政策 电动汽车电池技术将演进到固态电池、锂硫电池时代，电动乘用车综合成本将于2025—2030年赶超传统燃油车 | 参考各类研究，定制参数 | 国际能源署新政策情景（NPS） | 基准参数情景与激进（低碳）参数情景的组合、电力基准情景 |
| 1.5°C温控情景 | 在现有政策情景的基础上，增加： <ul style="list-style-type: none"> 激进的“公转铁”、“公转水”政策、推广甩挂运输 乘用车新车分地区、分阶段“禁燃” 纯电动货车技术实现飞跃性突破 更大力度地推广可再生能源使用与消纳 | 参考各类研究，定制参数 | 国际能源署可持续发展情景（SD） | 激进参数情景、电力激进情景 |

注：三个情景在经济、人口、客运和货运出行量方面的假设均一致，区别在于表中列出的关于政策与技术趋势的预测。

如第4章开篇所述，由于模型参数（如保有量、年行驶里程）对应的多是组合政策措施，而非单一措施，因而，本研究无法定量说明单一措施（如“更严格的交通需求管理措施”）的严格程度，也无法定量衡量单一政策带来的减排潜力。

电动乘用车保有量将占乘用车总保有量的50%。

在货运结构上，随着现行“公转铁”、“公转水”政策范围和效果的扩大，截至2050年，公路货运周转量在全社会货运周转量中占比将基本维持现状（47%~50%）。在货车车辆结构与车辆节能方面，公路货车的车辆更新将提上议程：一方面，现有传统燃油车的节能效果将进一步提升；另一方面，创新货车技术将更加成熟，纯电动货车将占重型货车总量的16%，天然气货车则占15%。

■ 1.5℃温控情景

1.5℃温控情景部分以现有政策情景“最可行”的路径为基础，以1.5℃温控目标为导向，反推能够协助中国道路交通行业实现2050年“净零”排放的政策，包括目前看似较激进的乘用车“禁燃”政策。

具体而言，1.5℃温控情景假设2035年开始，根据不同地区的政策导向、产业基础、气候适应性与市场接受度，将在中国分步骤、分区域地推行乘用车“新车燃油禁售”政策（见图29）。其中，除了率先提出禁止销售燃油车的海南外，上海、广东、浙江、北京等限行限购或者政策较为超前的地区也将加入“一类地

区”，可能率先提出新车“禁燃”。财政实力有限的西部地区和极寒的东北地区可能会较晚实现电动化的大规模普及。受此影响，2050年，4.6亿乘用车中有75.8%为纯电动汽车，高于现有政策情景53%的比例。

在运输结构上，1.5℃温控情景假设现行“公转铁”、“公转水”政策将不断加码，同时公路货运甩挂业务与运输效率将大幅提升，逐步在2050年实现货运结构“深度优化”，届时，公路货运承担的周转量将从2017年的47%降低至35%。该周转量水平下，重型货车保有量将从目前的约1300万辆小幅增长至2050年的1600万辆。

同时，该情景假设货车电动化技术将实现重大突破，电动货车将成为货车车队中的主流车型：其中，电动货车占重型货车的比例将达60%，远高于现有政策情景16%的比例和其他研究对全球重型货车电动化水平的预测。

在发电侧，随着灵活性发电资源（如电化学储能、抽水蓄能等）的普及，以及电力调度更加智能和高精度，电力行业将可以实现更高比例的风能、太阳能渗透，届时非化石能源发电占比将高达77%，比现有政策情景高出24%。

表 11 | 三种政策情景的具体参数设置

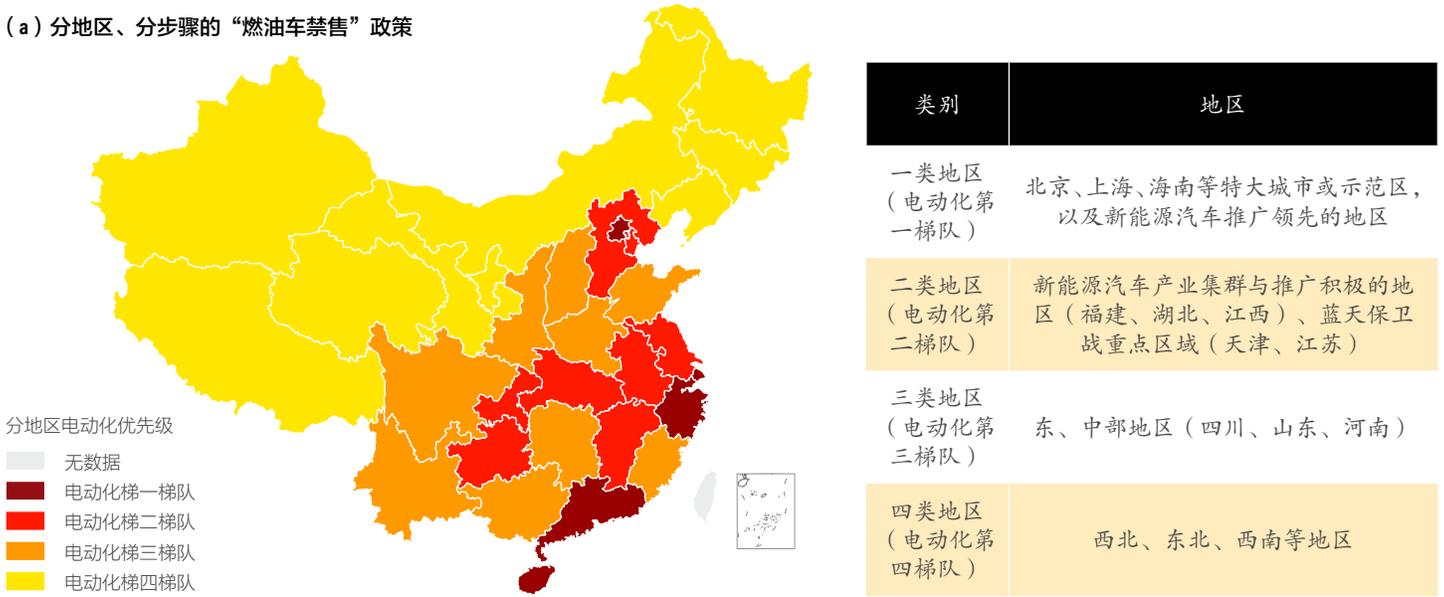
| | | 2017年 | 2035年 | | | 2050年 | | |
|----------|-----------------|-------|-------|--------|----------|-------|--------|----------|
| | | | 基准情景 | 现有政策情景 | 1.5℃温控情景 | 基准情景 | 现有政策情景 | 1.5℃温控情景 |
| 保有量和车队结构 | 乘用车保有量（亿辆） | 1.74 | 5.19 | 4.18 | 4.18 | 5.58 | 4.59 | 4.59 |
| | 纯电动乘用车保有量占比 | 1.8% | 12.3% | 22.5% | 24.3% | 17.4% | 50.1% | 75.8% |
| | 重型货车保有量（亿辆） | 0.13 | 0.23 | 0.23 | 0.17 | 0.33 | 0.33 | 0.16 |
| | 货运结构（公路货运周转量占比） | 48% | 50% | 50% | 43% | 50% | 50% | 35% |
| | 纯电动重型货车保有量占比 | 0 | 0 | 13.3% | 36.0% | 0 | 15.7% | 59.8% |
| | 天然气重型货车保有量占比 | 1.4% | 6.8% | 11.9% | 16.0% | 9.2% | 15.0% | 28.2% |
| 年行驶里程 | 乘用车单车年行驶里程（公里） | 13000 | 13000 | 11500 | 11500 | 13000 | 10000 | 10000 |
| | 重型货车单车年行驶里程（公里） | 50000 | 50000 | 50000 | 50000 | 50000 | 50000 | 50000 |
| 车辆燃料经济性 | 乘用车百公里能耗（升） | 8.27 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 4.6 | 4.6 | 4.6 |
| | 货车百公里能耗（升） | 272 | 25.7 | 25.7 | 25.7 | 24.2 | 24.2 | 24.2 |
| 电力清洁化 | 非化石能源发电比例（%） | 29% | 38% | 38% | 55% | 53% | 53% | 77% |

说明：1.车辆能效采用实际工况下的能效，而非NEDC或WLTP工况的目标值。

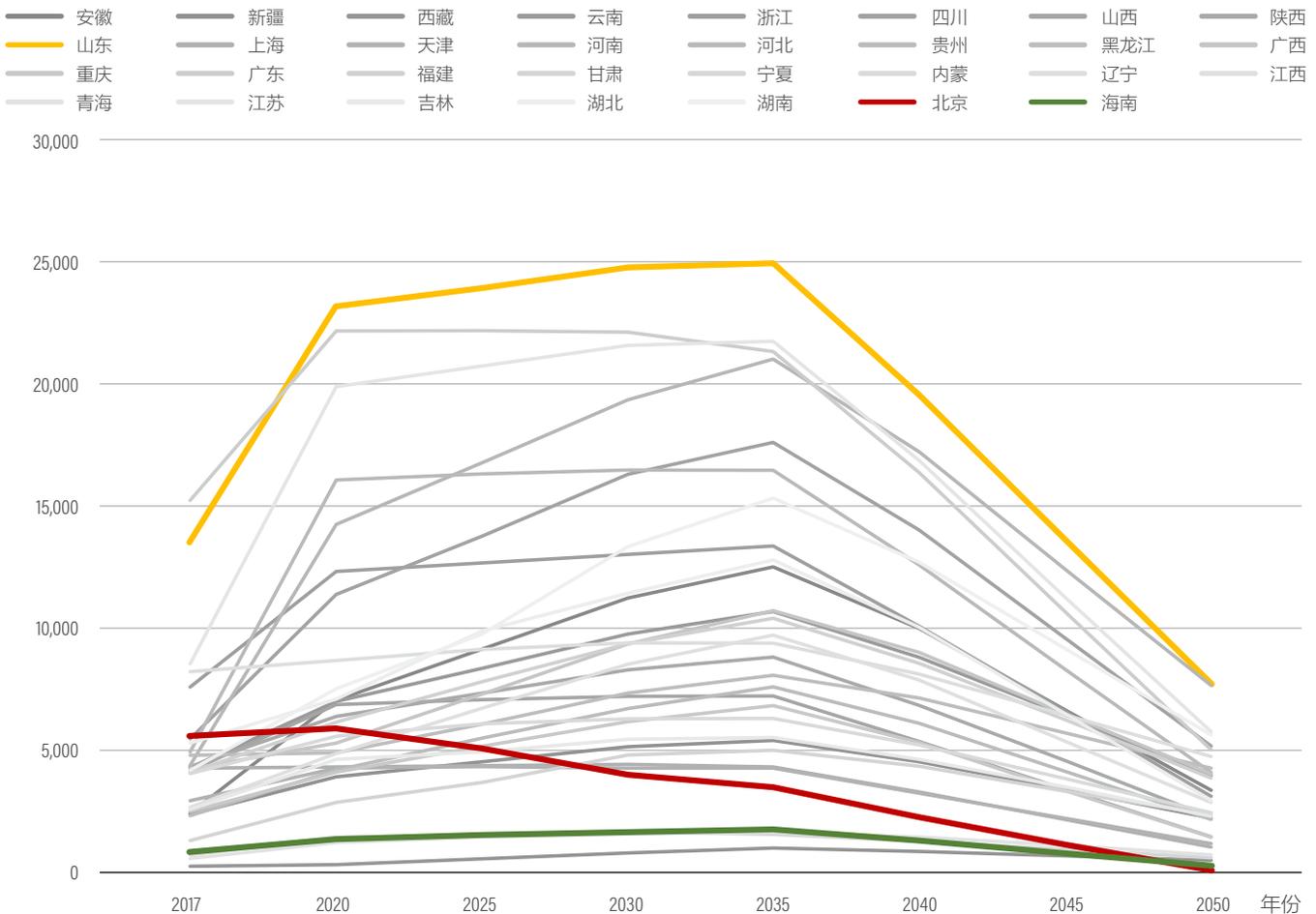
2.除车辆保有量、车辆燃料结构（纯电动、天然气）外，其他参数的中间年份数据以线性外推方式确定。

图 29 | 1.5°C温控情景：分地区、分步骤的“燃油车禁售”政策及潜在效果

(a) 分地区、分步骤的“燃油车禁售”政策



(b) 分地区、分步骤的“燃油车禁售”政策对乘用车保有量的影响（2015—2050年）（单位：千辆）



注：不含港澳台数据

情景分析结果

6.1 三种政策情景下道路交通行业排放路径

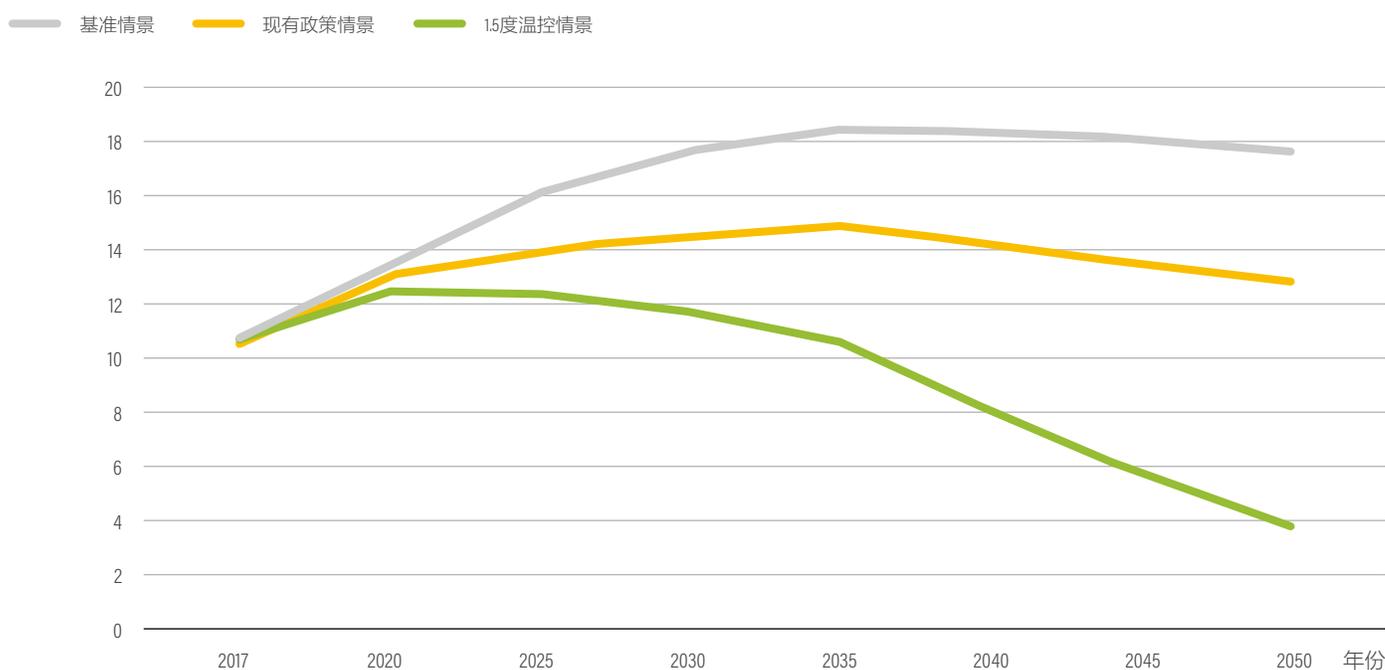
情景分析的结果表明，中国道路交通行业未来排放（如不做特殊说明，以下内容均含电力消耗排放）增速将放缓，在不同年份将达到峰值，并呈现差异化的下降幅度（见图30）。其中：

- 基准情景下，中国道路交通行业排放要到2040年左右才达峰，且达峰后一直维持在高位，峰值时二氧化碳排放

超过18亿吨，较2017年增长了近65%。

- 现有政策情景下，中国道路交通行业排放将在2035年左右达峰，达峰时最高排放约为15亿吨，较2017年水平增长了36%。达峰后下降趋势较缓和，到2050年排放下降至13亿吨，仍比2017年排放水平高。
- 1.5°C温控情景下，道路交通行业排放达峰时间提前至2020年左右，且峰值时二氧化碳排放约为12亿吨，比2017年水平略高。此外，达峰后二氧化碳排放迅速下降，到2050年将降至4亿吨左右，约为2017年的1/3。

图 30 | 三种政策情景下中国道路交通行业排放路径（单位：亿吨）



| 情景 | 达峰时间 | 峰值排放 (亿吨) | 峰值较2017年排放增长值 (亿吨) | 2050年排放 (亿吨) | 2050年道路交通排放占全国总排放的比例* |
|-----------|-------|-----------|--------------------|--------------|-----------------------|
| 基准情景 | 2040年 | 18 | 7 | 17 | -- |
| 现有政策情景 | 2035年 | 15 | 4 | 13 | 15% |
| 1.5°C温控情景 | 2020年 | 12 | 1 | 4 | 5% |

说明：*全国总排放为GAINS模型中内置值（道路交通排放由本研究参数替代）。

6.2 道路交通领域未来终端能源需求

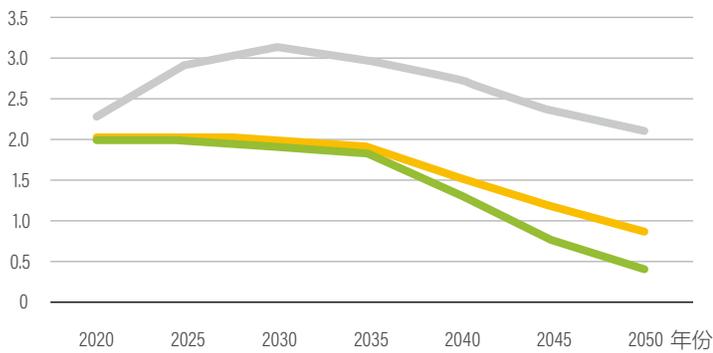
从宏观看，2050年中国道路交通行业使用的能源将更加多元化，汽油、柴油用量会呈现不同幅度的减少或持平态势，而天然气与电力需求将迅速上升（见图31）。

■ 汽、柴油消耗量：汽油方面，基准情景下，中国道路交通行业的汽油消耗量在2030年左右达峰，但在现有情景和1.5℃温控情景下，道路交通行业汽油消耗量的达峰时间则大幅提前至2020—2025年，并随着乘用车电动化普

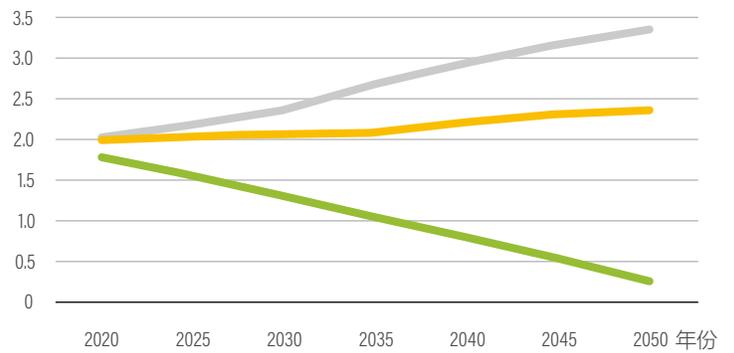
图 31 | 三个情景下中国道路交通未来终端能源需求

— 基准情景 — 现有政策情景 — 1.5度温控情景

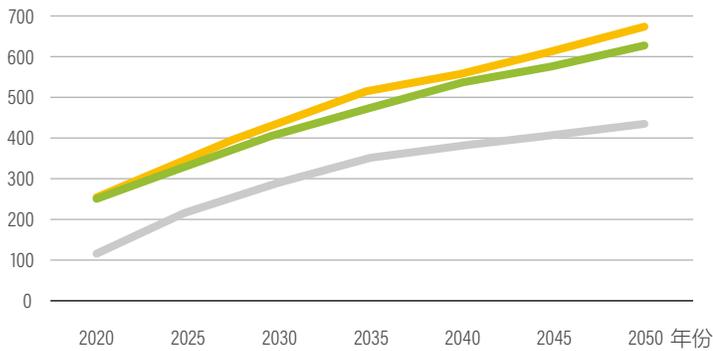
道路交通用油：汽油（单位：亿吨）



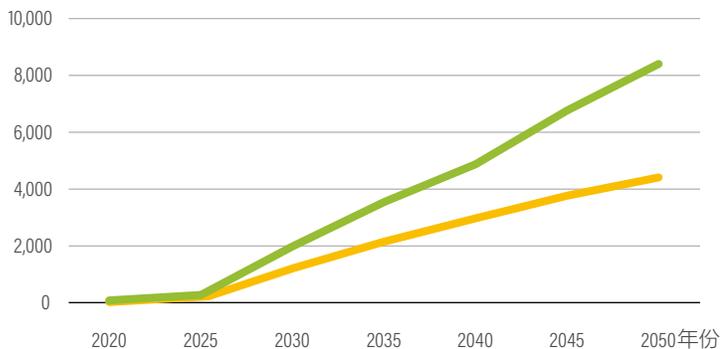
道路交通用油：柴油（单位：亿吨）



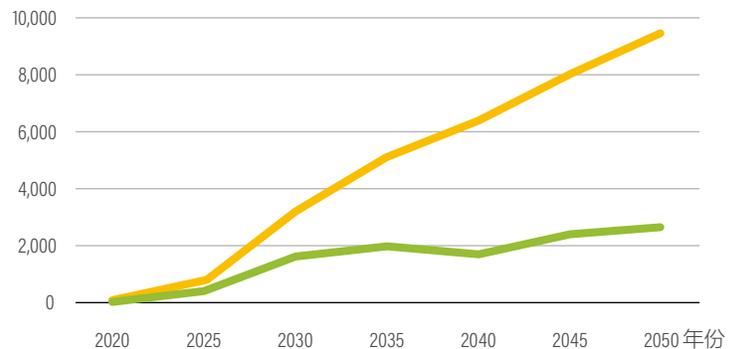
道路交通天然气消耗（单位：亿立方米）



道路交通用电量（单位：亿千瓦时）



道路交通发电煤耗（单位：万吨）



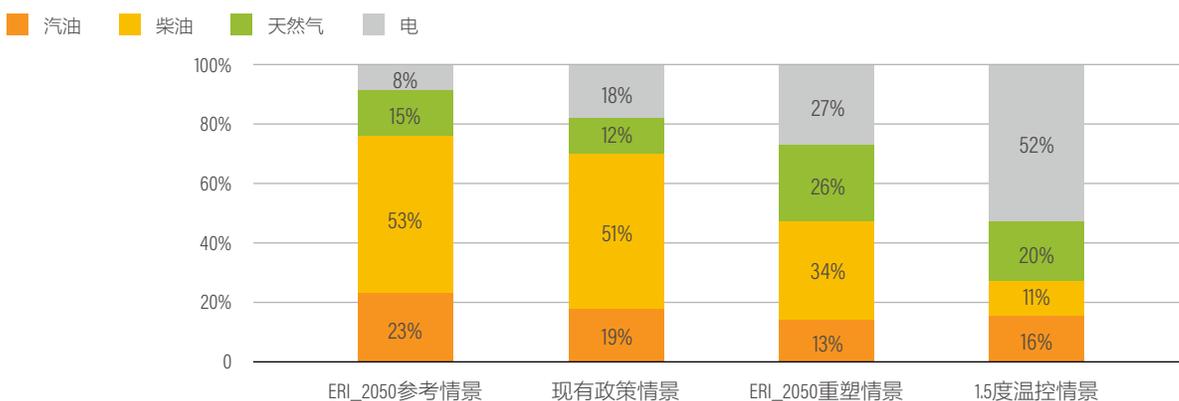
及而快速下降，2050年道路交通行业的汽油消耗量仅为2017年的20%~45%。柴油方面，在现有政策情景下，2050年道路交通行业柴油消耗将比现状有18%的小幅上升，低于基准情景下65%的升幅。然而，在1.5°C温控情景下，受货运结构转移和车辆清洁化的影响，柴油消耗量将快速下降，2050年较2020年的降幅为84%。

- 用电量：道路交通行业用电量会从如今的微乎其微，迅速增长至2050年的4,391亿千瓦时（现有政策情景）和8,282亿千瓦时（1.5°C温控情景，即乘用车“禁燃”和货车高度电动化）。现有政策情景下2050年电动汽车的用电量相当于2016年法国全国一年的用电量。1.5°C温控情景下的用电量更高，接近2016年俄罗斯全国用电量，且与2017年一整年中国城乡居民用电量（8695亿千瓦时）相当（中电传媒电力数据研发中心，2018）。在两种情景下，道路交通行业用电量分别占中国2050年全社会用电量（国际能源署预测值）的4.3%和9.2%。

- 煤炭消耗量：道路交通行业的煤炭消耗主要源自新能源汽车的电力需求。虽然道路交通行业未来用电量将持续增长，但其煤炭消耗在不同情景间将大幅分化。以2017年度电煤耗水平进行预测（即火电机组保持现状能效水平），本研究得出，未来用于道路交通行业的煤炭消耗量将总体呈增长态势，而增长速度的差异将主要缘于发电结构的不同：截至2050年，用于驱动电动汽车日常行驶的发电煤耗将增长1.2亿吨（现有政策情景）至2.2亿吨（1.5°C温控情景），可能会影响中国整体煤炭消耗量。

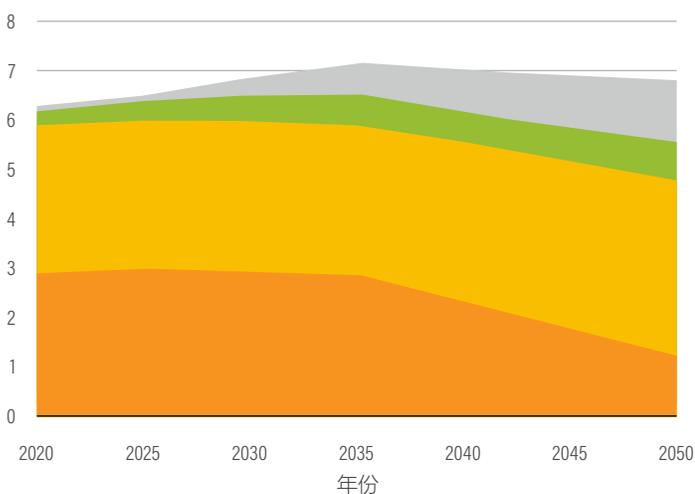
从道路交通行业终端用能结构上看（即将各类用能转化为标准煤）（见图32），在现有政策情景下，2050年道路交通行业主要用能的70%仍为柴油和汽油，天然气和电力仅占30%左右的比例。然而，在1.5°C温控情景下，电力将成为道路交通行业主要用能来源，占比超过50%。此外，基准情景和现有政策情景下，道路交通行业终端用能在2035年左右达峰，而在1.5°C温控情景下，道路交通行业终端用能在2020年左右就可达峰（见图32）。

图 32 | 中国道路交通行业终端用能结构

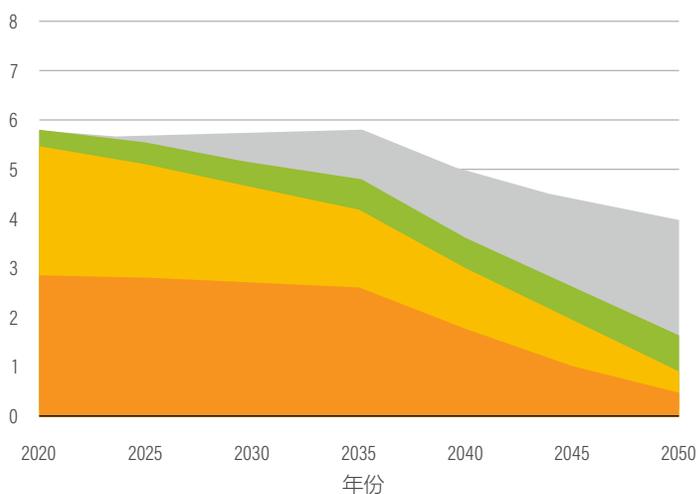


说明：ERI_2050 重塑情景含非道路交通通用油部分（如航空用油），本研究已将可识别为非道路交通通用油的情况剔除，但可能仍有部分水运用油混入柴油和汽油占比。

现有政策情景终端用能（单位：亿吨标准煤）



1.5°C温控情景终端用能（单位：亿吨标准煤）



不过，与国家发展和改革委员会能源研究所（ERI，2016）研究的比较可见，不同研究对2050年深度减碳情景所采取的技术路径的差异，导致不同研究对中国道路交通行业的终端用能预测呈现较大分化（见图32）。例如，本研究中，由于1.5℃温控情景假设乘用车与重型货车均实现高比例的电动化，因此2050年道路交通行业一半以上的终端用能来自电力。此外，如果考虑未来氢能、乙醇（或其他生物质燃料）的商业化普及，道路交通行业2050年的终端用能结构将更加多元化，对石油和煤炭的依赖度会显著降低，同时各类能源的市场竞争也会更加激烈，道路交通行业未来的用能结构更具有不确定性。

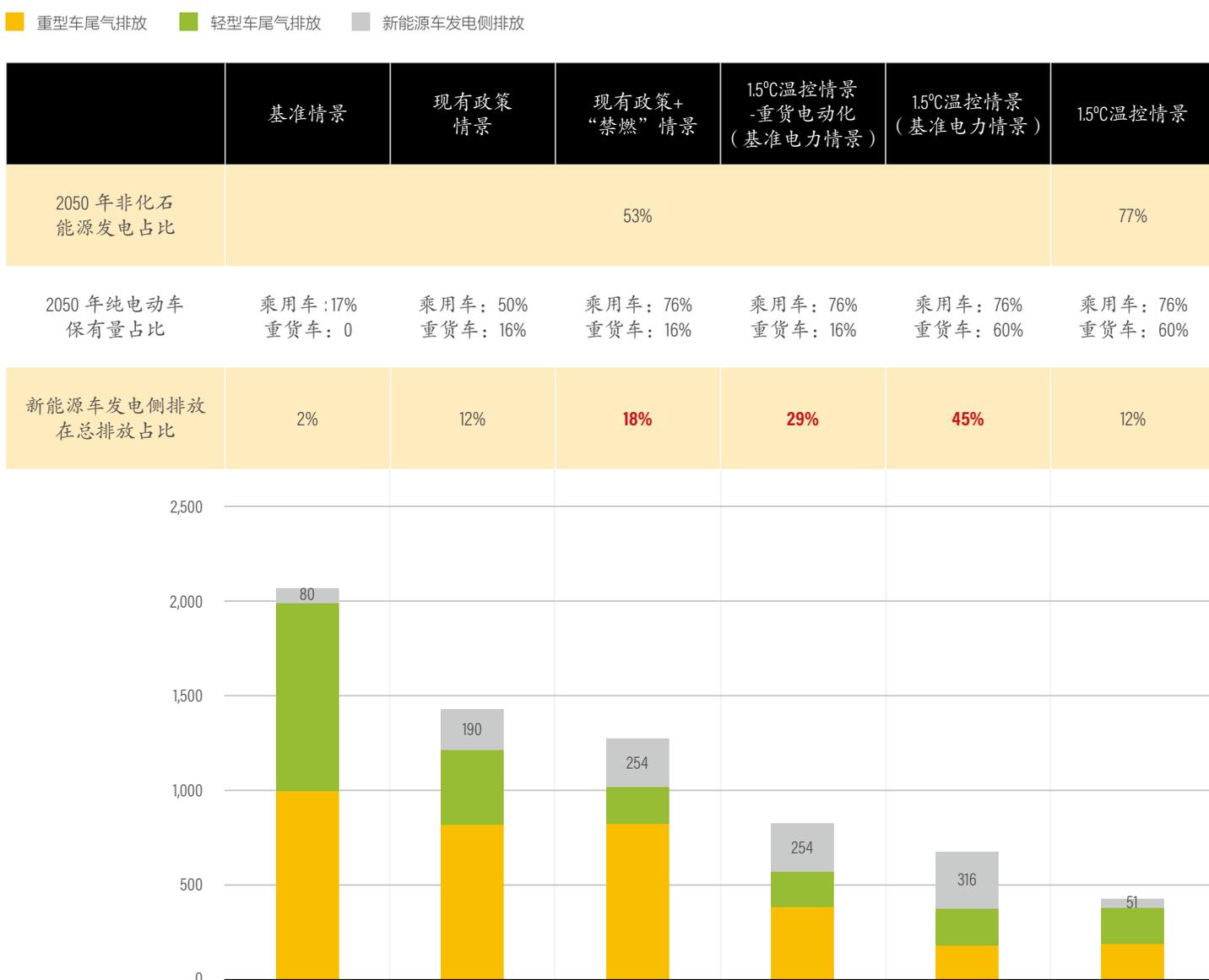
6.3 二氧化碳排放驱动因素分析

为分析影响中国未来道路交通二氧化碳排放变化的主要驱动因素，本文首先分解不同排放类型——各类车型的尾气排放、发电侧排放对道路交通总排放的贡献。

为此，本文增加了3个中间情景（见图33）：

- 现有政策+乘用车新车“禁燃”的情景，缩写为现有政策+‘禁燃’情景：即其他条件与现有政策保持一致，加入乘用车新车“禁燃”政策，重型货车等均沿用现有政策情景的结果。

图 33 | 2050年不同情景下道路交通排放组成（单位：百万吨）



说明：“重型车排放”包含重型货车和客车排放之和，而“轻型车排放”包含乘用车和轻型货车排放之和。

■ 不含重型货车深度电动化的1.5℃温控情景，缩写为1.5℃温控-重货电动情景：在现有政策情景基础上，针对乘用车推出“燃油车禁售”和货运结构深度优化。较之1.5℃温控情景，区别在于：一是该情景中重型货车不会实现60%的高水平电动化，相反，其电动化水平保持在现有政策情景水平——15.7%；二是发电侧排放的计算采用基准电力情景。

■ 1.5℃温控情景+基准电力情景，缩写为1.5℃温控情景（基准电力）：即其他条件与1.5℃温控情景保持一致，但发电侧排放的计算采用电力基准情景，即非化石能源占比仅为53%，而非电力激进情景的77%。

随着各种政策组合的实施，2050年不同情景下，道路交通尾气排放呈下降趋势，而发电侧排放则在上升（见图33）。

对发电侧排放，在基准情景和现有政策情景下，车辆尾气排放将占绝对多数，而车辆电动化带来的发电侧排放仅占全部排放量的2%~12%。然而，从“现有政策+‘禁燃’”情景开始，随着乘用车“禁燃”政策的实施，电动车规模显著扩大，若发电侧没能及时实现高比例可再生能源渗透，则发电侧排放占比逐步上升至18%~45%，甚至超过轻型乘用车排放，成为未来道路交通主要排放源（见图33）。这说明，“禁燃”政策必须要电力行业清洁化作为配套条件，才可达理想的减排效果；否则将存在排放转移（leakage）风险。

在尾气排放中，轻型车排放降速最快，未来重型货车减排较为困难，或将成为主要排放源（见图34）：

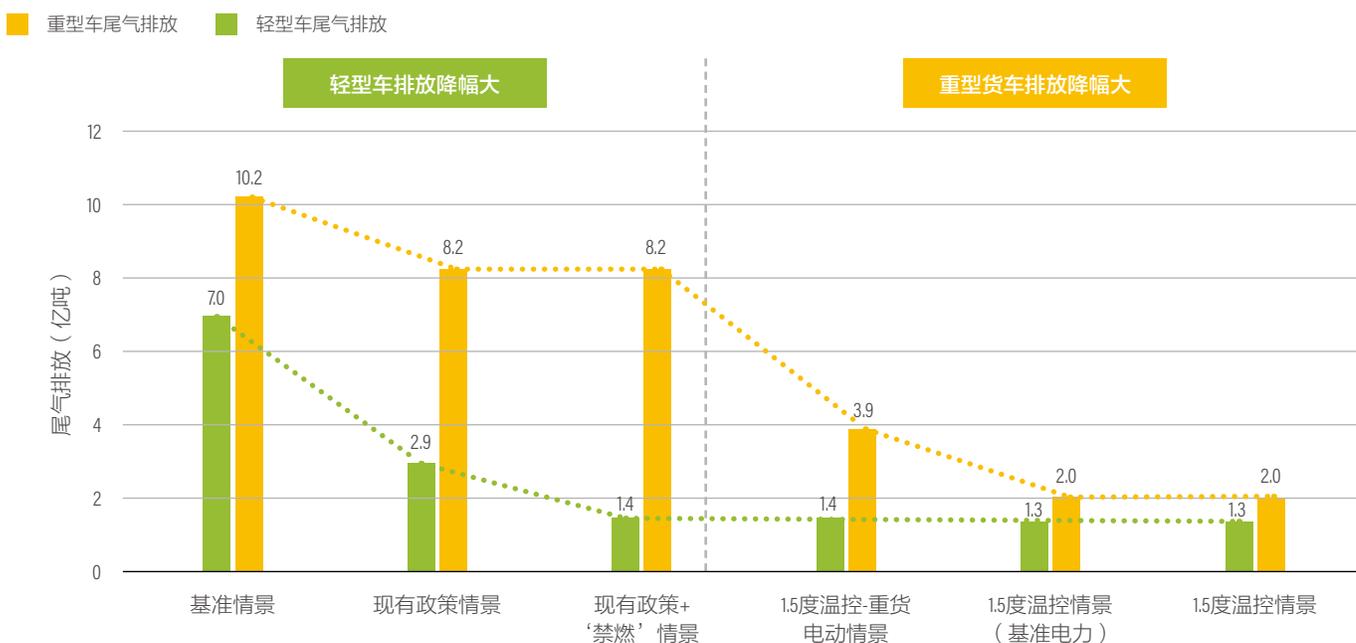
■ 从基准情景演进到现有政策情景、现有政策+‘禁燃’情景，得益于乘用车保有量增长放缓和电动汽车市场渗透率显著提升，轻型车排放降幅最大。在2050年，轻型车排放从基准情景的近7亿吨，下降到现有政策情景的2.9亿吨或现有政策+‘禁燃’情景的1.4亿吨，缩减近80%。重型货车排放维持在较高水平，仅从基准情景的10亿吨降至现有政策+‘禁燃’情景的8.2亿吨。如果不对重型货车采取措施，其将成为道路交通主要排放源，排放占比将从2017年的38%上升到2050年的70%左右（现有政策+‘禁燃’情景）。

■ 从现有政策+‘禁燃’情景到1.5℃温控情景，货运行业减排将成为重要动力：借助于货运结构转移和货车深度电动化等措施，2050年重型货车排放将从现有政策情景的8.2亿吨，降至1.5℃温控情景的近2亿吨，而其在道路交通排放中占比也将将从60%下降到接近2017年34%的水平，助力道路交通实现“净零”排放。

其次，本文进而将道路交通二氧化碳总排放分解到不同影响因素（如不同车型保有量、年行驶里程），分析不同措施在不同时间对道路交通减排的贡献程度：

（1）针对每个情景2017年到2050年的道路交通排放，本文首先采用“对数平均迪氏指数法（LMDI）”，对各情景的贡献因素分别进行分解，其结果可见图35。各情景中，从2017年到2050年，随着乘用车与货车燃油经济性改善，以及私家车年行驶里程不断下降，传统燃油车保有量的变化将是未来道路交通行业

图 34 | 2050年不同情景下道路交通尾气排放组成（单位：亿吨）



排放逐年下降的主要原因。而传统燃油车保有量变化受以下措施综合影响：

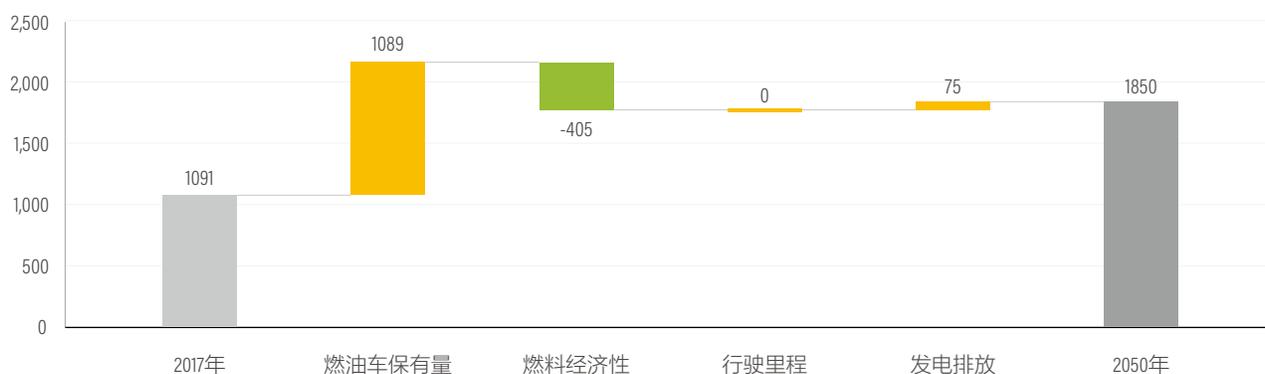
- 一是车辆电动化或低碳替代燃料的普及。
- 二是客运、货运出行结构的转移，例如从私家车转移到公共交通、从公路货运转移到水路货运或铁路货运，以及控制机动车购买和使用的需求管理政策。

(2) 对2050年各情景之间的排放差异，本文进而进行跨情景的贡献因素分解（见图36）。结果表明，在2050年，从基准情景跨越到1.5℃温控情景，运输结构转移与车辆电动化对道路交通减排贡献最大，分别达到5亿吨和4亿吨左右（见图37）：

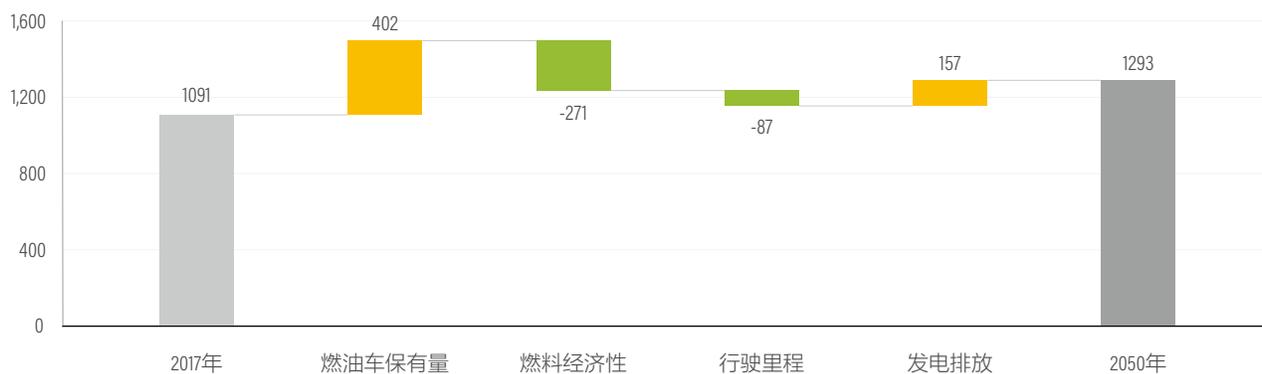
- 在运输结构转移方面，货运结构转移减排效果最大、占运输结构转移带来的减排量的80%。值得注意的是，该减排量对应的是2050年重型货车保有量从现有政策情景

图 35 | 三种情景下2017—2050年各因素对道路交通减排的贡献程度

(a) 基准情景下2017—2050年各因素对排放的贡献程度（单位：百万吨）



(b) 现有政策情景下2017—2050年各因素对排放的贡献程度（单位：百万吨）



(c) 1.5℃温控情景下2017—2050年各因素对排放的贡献程度（单位：百万吨）

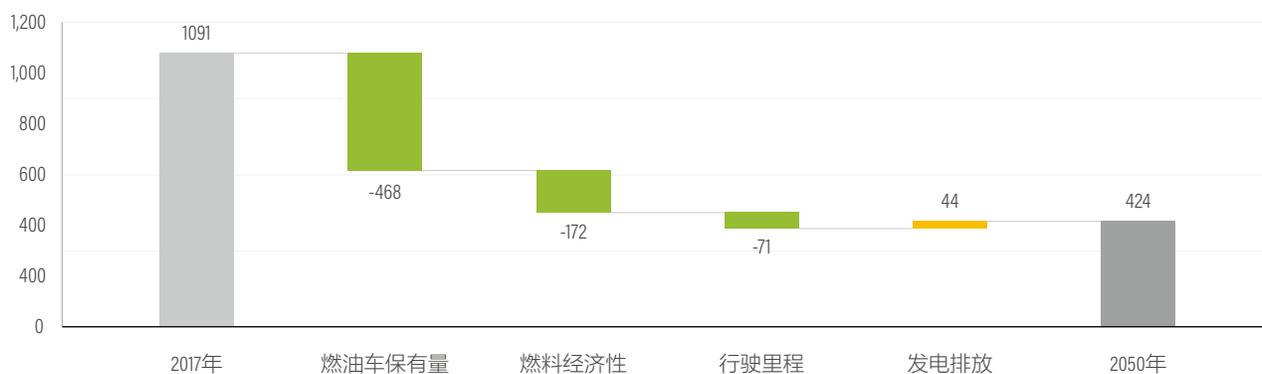
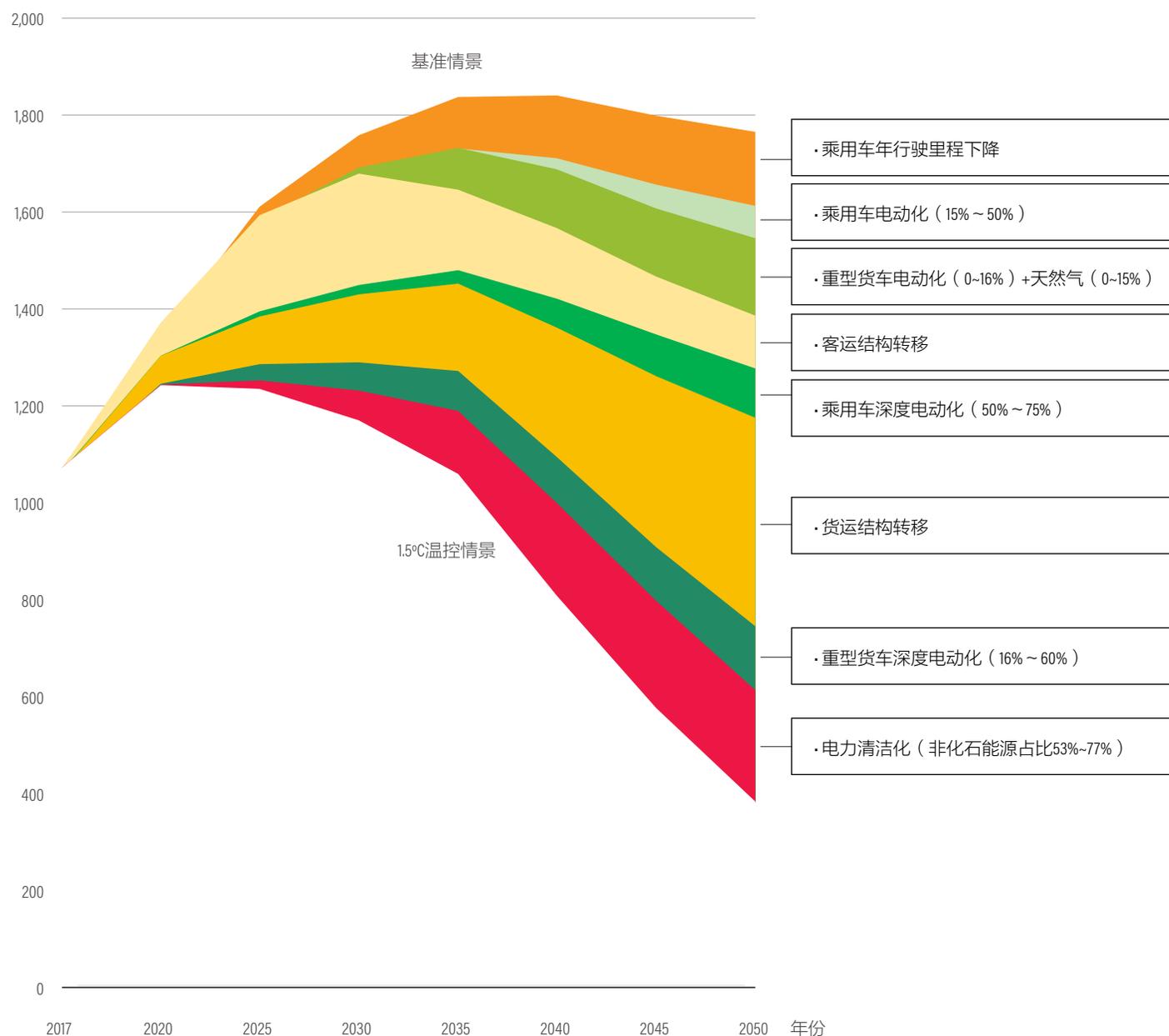


图 36 | 从基准情景到1.5°C温控情景：2017—2050年道路交通减排（单位：百万吨）



的3000万辆减至1.5°C温控情景的1600万辆，实现该目标难度较大，可操作性有待商榷。客运结构转移的绝对减排量（1.0亿吨）虽然不及货运结构转移（4.3亿吨），但在可操作性方面，保持2050年千人乘用车保有量为350辆相对容易。

■ 从车辆电动化方面，乘用车和货车电动化的减排效果较大。虽然车辆电动化对尾气侧减排效果明显，但计入发电侧排放后，减排潜力明显下降（见图36）。相对而言，

由于重型货车百公里电耗大、使用强度（年行驶里程）高，货车单车电动化的减排潜力大于乘用车，但重型货车实现高比例电动化所面临技术和成本挑战也不可小觑。乘用车方面，纯电动乘用车保有量从17%市场占比增至50%，减排潜力（含发电侧排放）仅为0.8亿吨，而在此基础上实施分地区、分阶段新车“禁燃”，整体乘用车电动化的减排潜力可达1.8亿吨，与电动重型货车市场占比从0升至60%所产生的减排量相当（见表12）。

图 37 | 从基准情景到1.5°C温控情景：2050年不同措施减排量贡献度分析

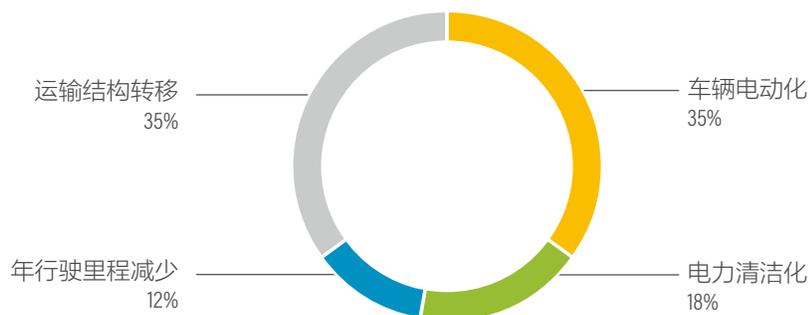


表 12 | 从基准情景到1.5°C温控情景：2050年减排贡献度分析（单位：百万吨）

| 措施 | 措施类型 | 2050年 减排量差异 | 措施难度 |
|--|-------|----------------|------|
| 运输结构转移 | | | |
| 货车结构转移（保有量从 3000 万辆减至 1600 万辆） | 结构转移 | 432 | 高 |
| 乘用车结构转移（保有量从 5.6 亿辆减至 4.6 亿辆） | 结构转移 | 105 | 低 |
| 运输结构转移总减排 | | 537 | |
| 电力清洁化 | | | |
| 电力清洁化（非化石能源占比从 53% 提高到 77%） | 电力清洁化 | 231 | 高 |
| 电力清洁化总减排 | | 231 | |
| 车辆电动化 | | | |
| <i>乘用车电动化</i> | | | |
| 乘用车电动化（从 17% 提高到 50%）（含发电侧排放） | 电动化 | 81 | 中等 |
| 乘用车电动化（从 50% 提高到 75%）（含发电侧排放） | 电动化 | 105 | 高 |
| <i>货车电动化</i> | | | |
| 重型货车电动化（从 0 提高到 16%）+ 天然气（从 0 提高到 15%）（含发电侧排放） | 电动化 | 105 | 中等 |
| 重型货车深度电动化（从 16% 提高到 60%）（含发电侧排放） | 电动化 | 92 | 高 |
| <i>其他车型电动化</i> | | | |
| 轻型货车电动化（从 0 提高到 83%）（含发电侧排放） | 电动化 | 35 | 低 |
| 客车电动化（从 50% 提高到 100%）（含发电侧排放） | 电动化 | 30 | 低 |
| 车辆电动化总减排 | | 448 | |
| 年行驶里程减少 | | | |
| 乘用车年行驶里程减少（13000 公里降至 10000 公里） | 年行驶里程 | 152 | 中等 |
| 年行驶里程总减排 | | 152 | |

说明：由于不同情景下车辆燃油经济性取值一致，因此以上分析无法拆解出燃油经济性的减排贡献。措施难度为作者主观判断。

在2050年，从基准情景跨越到较易实现的现有政策情景，再到1.5°C温控情景，不同措施扮演的角色也有所不同（见表13和图38）：

- 从基准情景到现有政策情景所对应的减排措施实施难度不大，但减排量有限，总减排量仅有约5亿吨。该阶段中，车辆电动化的减排贡献度最高，占50%。

- 从现有政策情景到1.5°C温控情景，虽然减排措施的实施难度较高，但其对应约8.5亿吨的减排潜力更大，也是实现道路交通深度减排的关键。该阶段中，单纯的车辆电动化措施如“燃油车禁售”已不再是主要贡献因素，需要从货运结构转移、电力清洁化等方面发力才可能实现深度减排。

表 13 | 从基准情景到1.5°C温控情景：分步骤的减排贡献度分析（单位：百万吨）

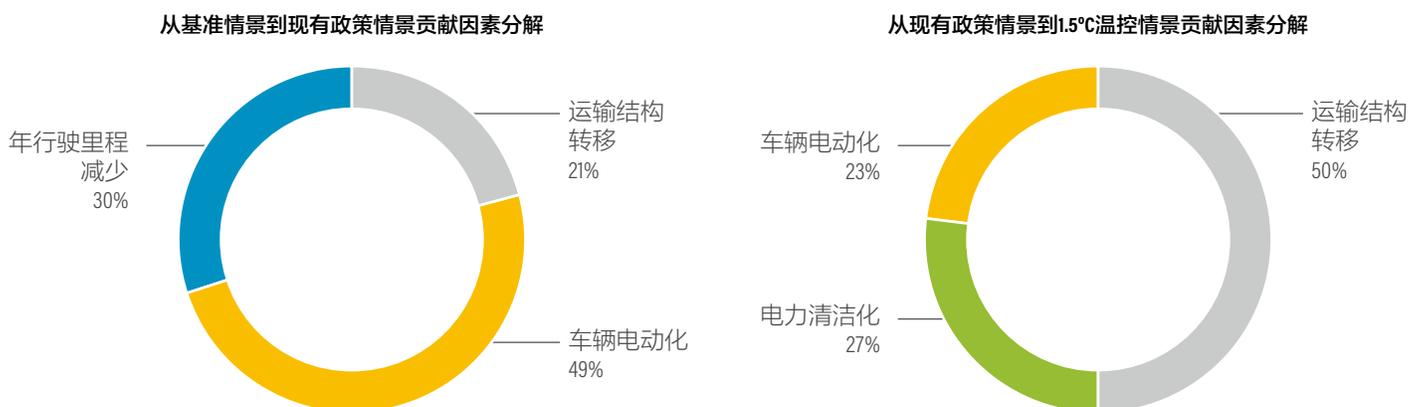
(a) 从基准情景到现有政策情景：减排贡献因素分解（单位：百万吨）

| 措施 | 措施类型 | 减排潜力 |
|--|-------|------------|
| 乘用车结构转移（保有量从5.6亿辆减至4.6亿辆） | 结构转移 | 105 |
| 乘用车电动化（从17%提高到50%）（含发电侧排放） | 电动化 | 81 |
| 重型货车电动化（从0提高到16%）+ 天然气（从0提高到15%）（含发电侧排放） | 电动化 | 105 |
| 轻型货车电动化（83%电动化）（含发电侧排放） | 电动化 | 35 |
| 客车电动化（100%电动化）（含发电侧排放） | 电动化 | 30 |
| 乘用车年行驶里程减少（13000公里降至10000公里） | 年行驶里程 | 152 |
| 从基准情景到现有政策情景总减排潜力 | | 508 |

(b) 从现有政策情景到1.5°C温控情景：减排贡献因素分解（单位：百万吨）

| 措施 | 措施类型 | 减排潜力 |
|-------------------------------|-------|------------|
| 货车结构转移（保有量从3000万辆减至1600万辆） | 结构转移 | 432 |
| 电力清洁化（非化石能源占比从53%提高到77%） | 电力清洁化 | 231 |
| 乘用车电动化（从50%提高到75%）（含发电侧排放） | 电动化 | 105 |
| 重型货车深度电动化（从16%提高到60%）（含发电侧排放） | 电动化 | 92 |
| 从现有政策情景到1.5°C温控情景总减排潜力 | | 860 |

图 38 | 从基准情景到1.5°C温控情景：分步骤的减排贡献度分析（百万吨，%）



专栏 2 | 未来传统燃油车、纯电动乘用车单车排放对比

车辆电动化后，其尾气侧排放可忽略不计，发电侧排放则取决于电力清洁程度。在目前全国平均火力发电水平（71%）下，纯电动乘用车车队的单车（含能源开采、运输、发电和电力传输）二氧化碳排放平均比传统燃油车低35%（中国汽车工程学会，2018）。

在未来，随着纯电动乘用车百公里电耗的降低与电力发电结构的优化，纯电动乘用车的单车年均排放逐步降低。在基准电力情景下，2035年纯电动乘用车发电侧排放约比当年传统燃油车单车年均排放低54%，到2050年则低59%。在激进电力情景下，纯电动乘用车单车年均发电侧排放下降迅速，2035年纯电动乘用车发电侧排放约比当年传统燃油车单车年均排放低84%，到2050年则更低至可忽略不计。

专栏图 2 | 传统燃油车、纯电动乘用车单车年均排放和发电侧排放对比（单位：千克每车每年）



| 纯电动车相对当年燃油车排放降幅 | 2020年 | 2025年 | 2030年 | 2035年 | 2040年 | 2045年 | 2050年 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 电力基准情景 | 36% | 43% | 49% | 54% | 55% | 57% | 59% |
| 电力激进情景 | 38% | 53% | 69% | 84% | 90% | 92% | 93% |

(3) 本文最后对乘用车能耗、货车能耗、乘用车年行驶里程分别进行敏感度分析，以说明各情景减排潜力的变化浮动区间（见图39和图40）：

- 在车辆燃料能耗方面：各情景均上下浮动20%，即将2050年乘用车百公里能耗从4.6升上升至5.2升或下降至3.7升，重型货车百公里能耗从24.2升上升至29升或下降至19.5升。
- 在年行驶里程方面：各情景均上下浮动20%，即基准情景下，2050年乘用车年行驶里程从13000千米上升至15600千米或下降至10400千米；现有政策和1.5℃温控情景下，2050年乘用车年行驶里程从10000千米上升至12000千米或下降至8000千米。对重型货车也做类似处理。

在此基础上，对各情景调整前后的碳排放进行比较（见图39）可见，传统燃油车能耗改善与年行驶里程下降带来的减排效果将随着电动化水平的提高而降低：其在基准情景下减排潜力最大，在2050年分别可实现1.2吨（乘用车）至1.5吨（重型货车）排放降幅，但在1.5℃温控情景下减排潜力最低，几乎可以忽略不计。从车型看，重型货车能耗与年行驶里程的变化带来的减排效果均比乘用车高，这主要是由于重型货车出行强度高。

以上分析说明，车辆年行驶里程与车辆百公里能耗的改善是近期——即电动化尚未形成规模之前，道路交通实现快速减排的有效措施。其中，针对重型货车能耗与年行驶里程的控制措施可贡献更多的减排量；目前针对重型货车的运输管理和百公里燃料消耗量的控制亟需加强。

图 39 | 不同情景下，乘用车、重型货车百公里能耗变化对道路交通排放的影响（单位：百万吨）

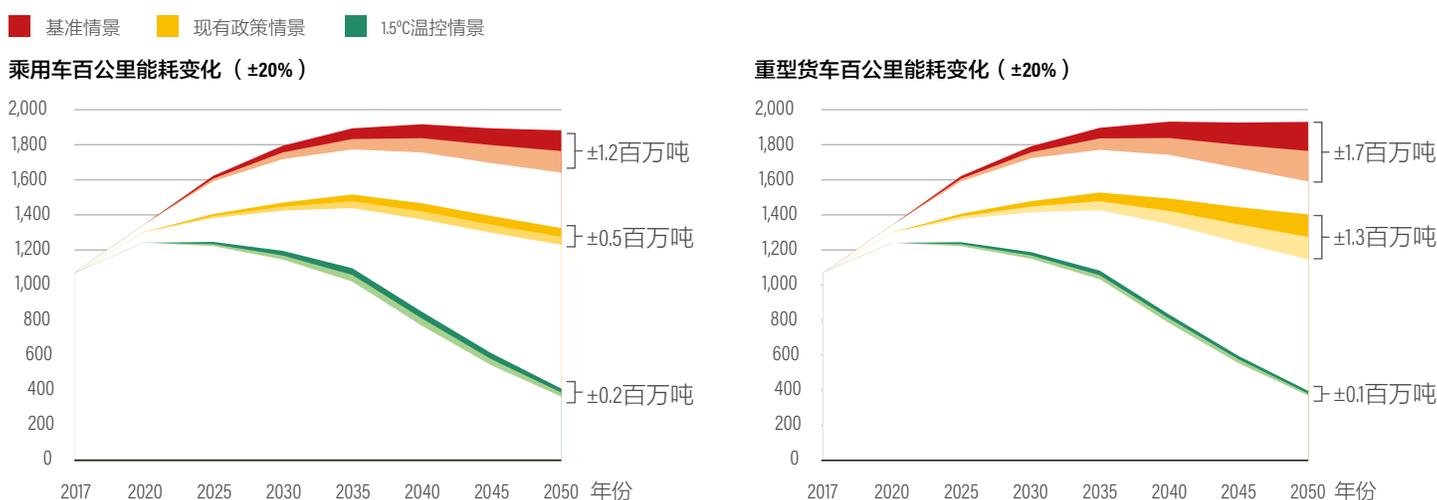
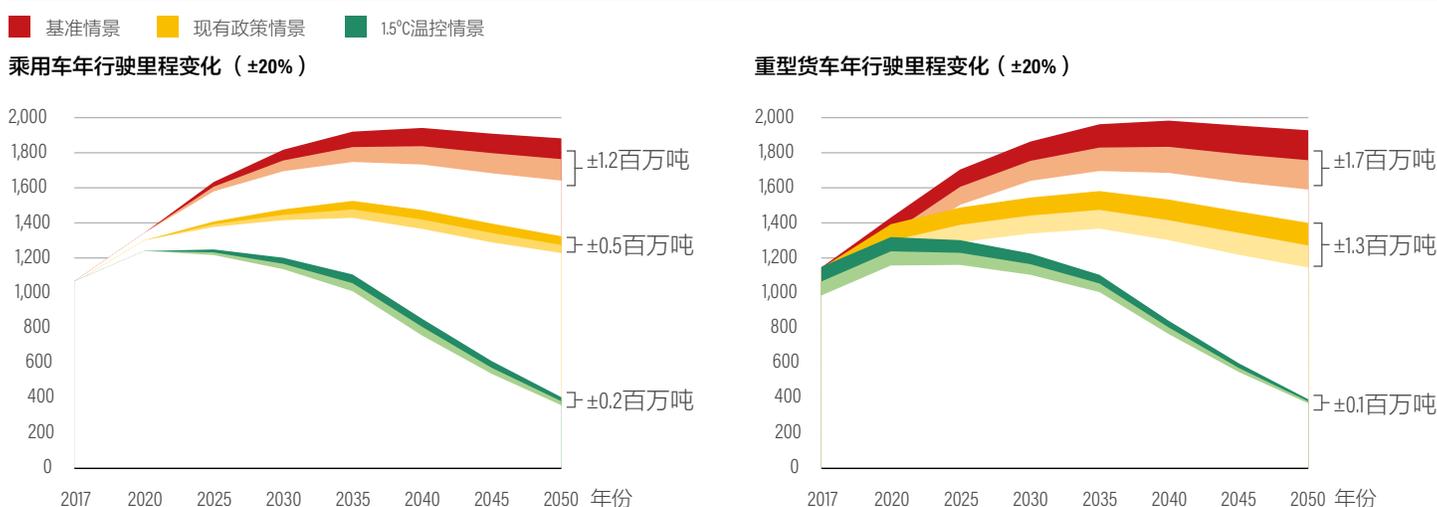


图 40 | 不同情景下，乘用车、重型货车年行驶里程变化对道路交通排放的影响（单位：百万吨）

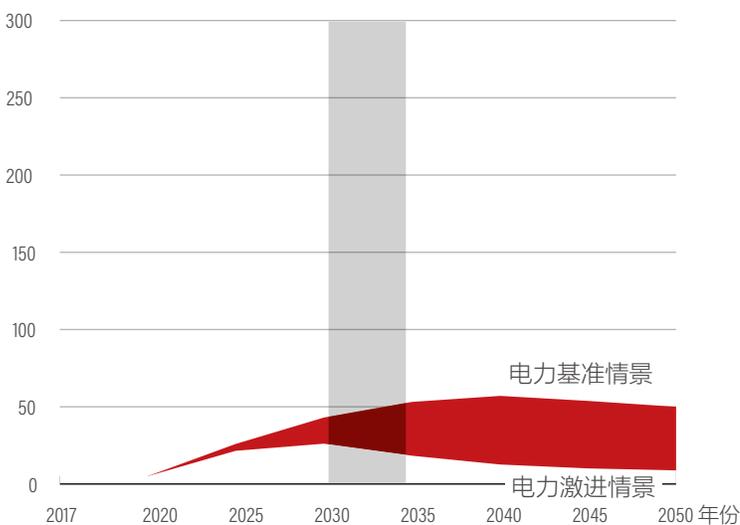


虽然电力清洁化措施的减排潜力不是最高的，但其重要程度因阶段而异。例如，在中长期，特别是2030—2035年之后，随着车辆电动化规模扩大，发电侧排放将呈图41所示的几何级数增长，其占道路交通排放的比例也将明显提高，成为未来主要排放源之一。届时——即2030—2035年左右，电力清洁化势必将成为道路交通减排的重要发力点（见图41）。

图 41 | 不同情景下电力清洁化措施对减排的贡献分析（单位：百万吨）

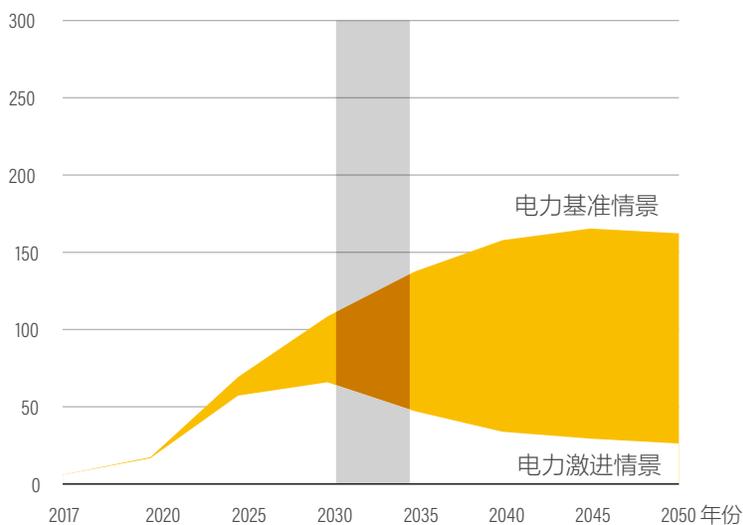
基准情景

■ 发电侧排放：从电力激进情景到电力基准情景



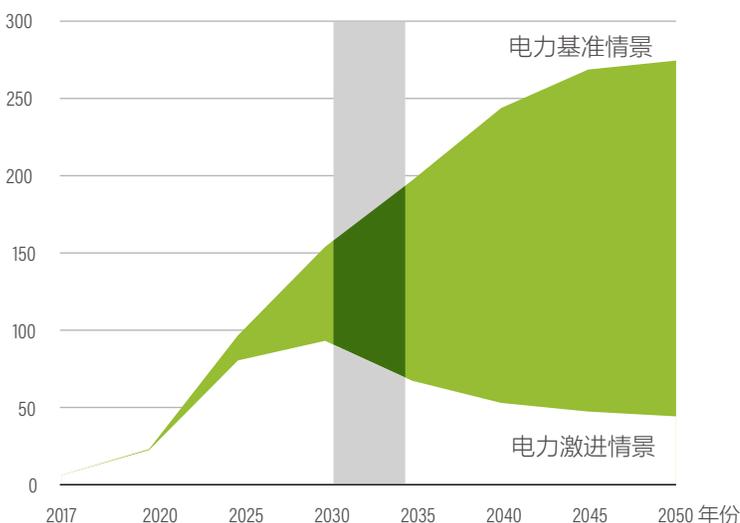
现有政策情景

■ 发电侧排放：从电力激进情景到电力基准情景



1.5°C温控情景

■ 发电侧排放：从电力激进情景到电力基准情景

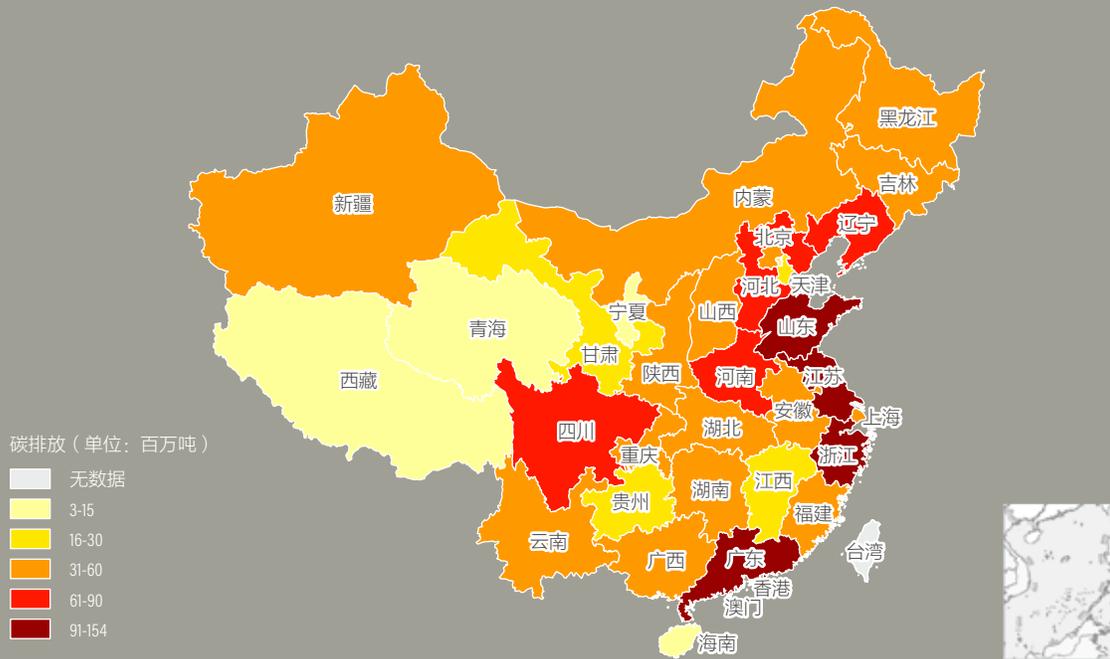


说明：图中灰色柱状表示2030—2035年时间段。

专栏 3 | 省级层面道路交通排放预测

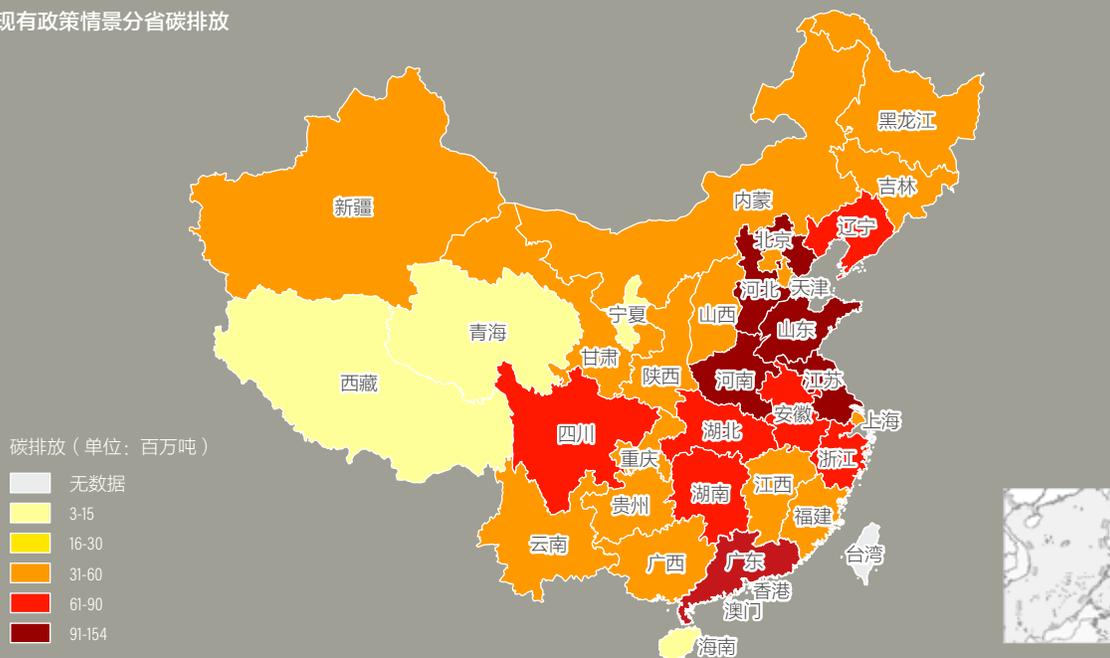
在省级层面，经济发达、人口多的沿海省份是道路交通排放的重点贡献区域。视情景的不同，到2050年，7个汽车保有量多、可再生能源在发电量中占比低的省份，包括山东省、广东省、江苏省、河北省、河南省、浙江省和四川省，其道路交通二氧化碳排放预计将占全国道路交通排放的41%~45%。

专栏图 3 | 2017年全国分省道路交通二氧化碳排放

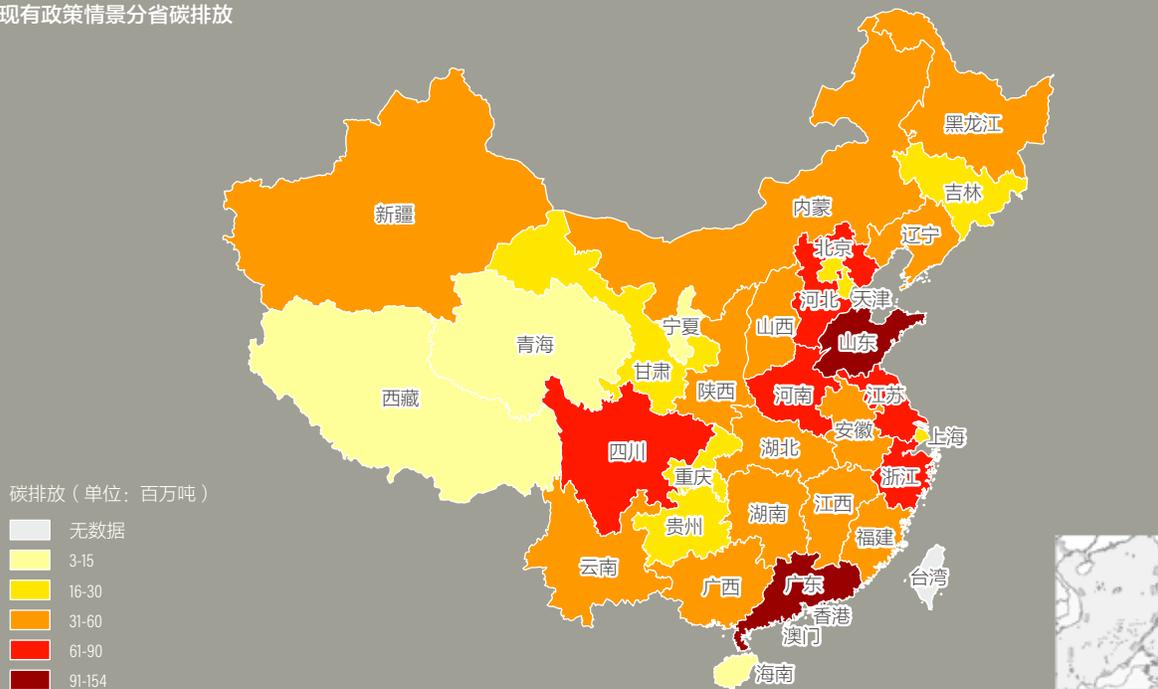


专栏图 4 | 现有政策情景下2035年和2050年全国分省道路交通二氧化碳排放

(a) 2035年现有政策情景分省碳排放

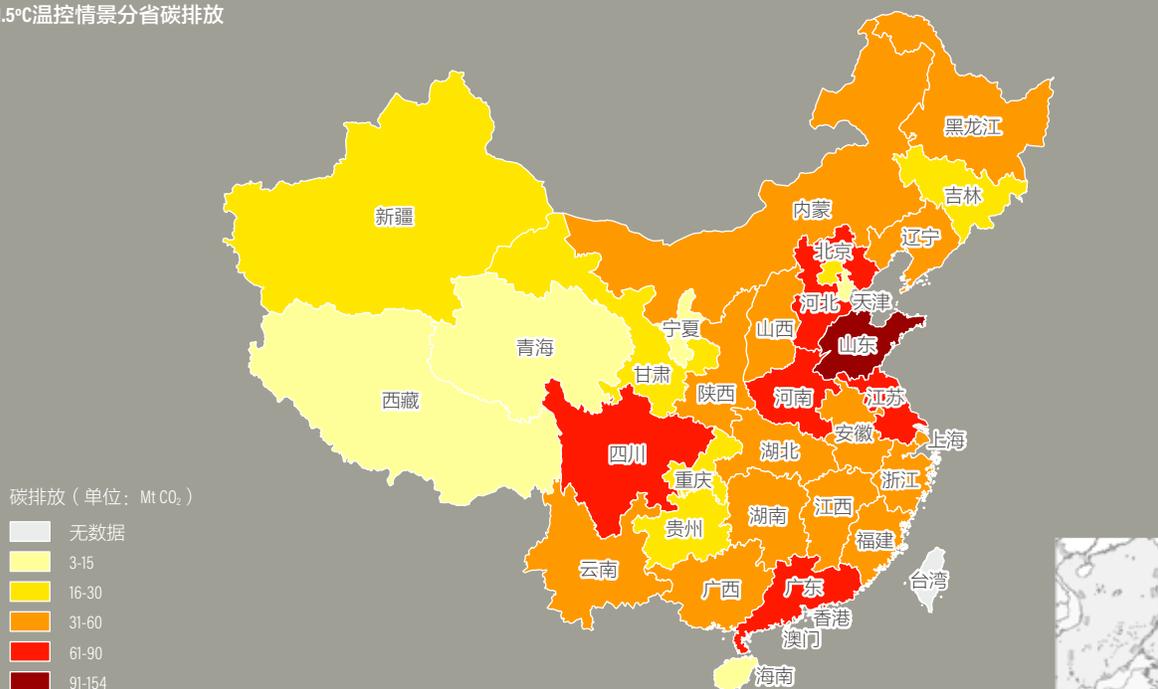


(b) 2050年现有政策情景分省碳排放

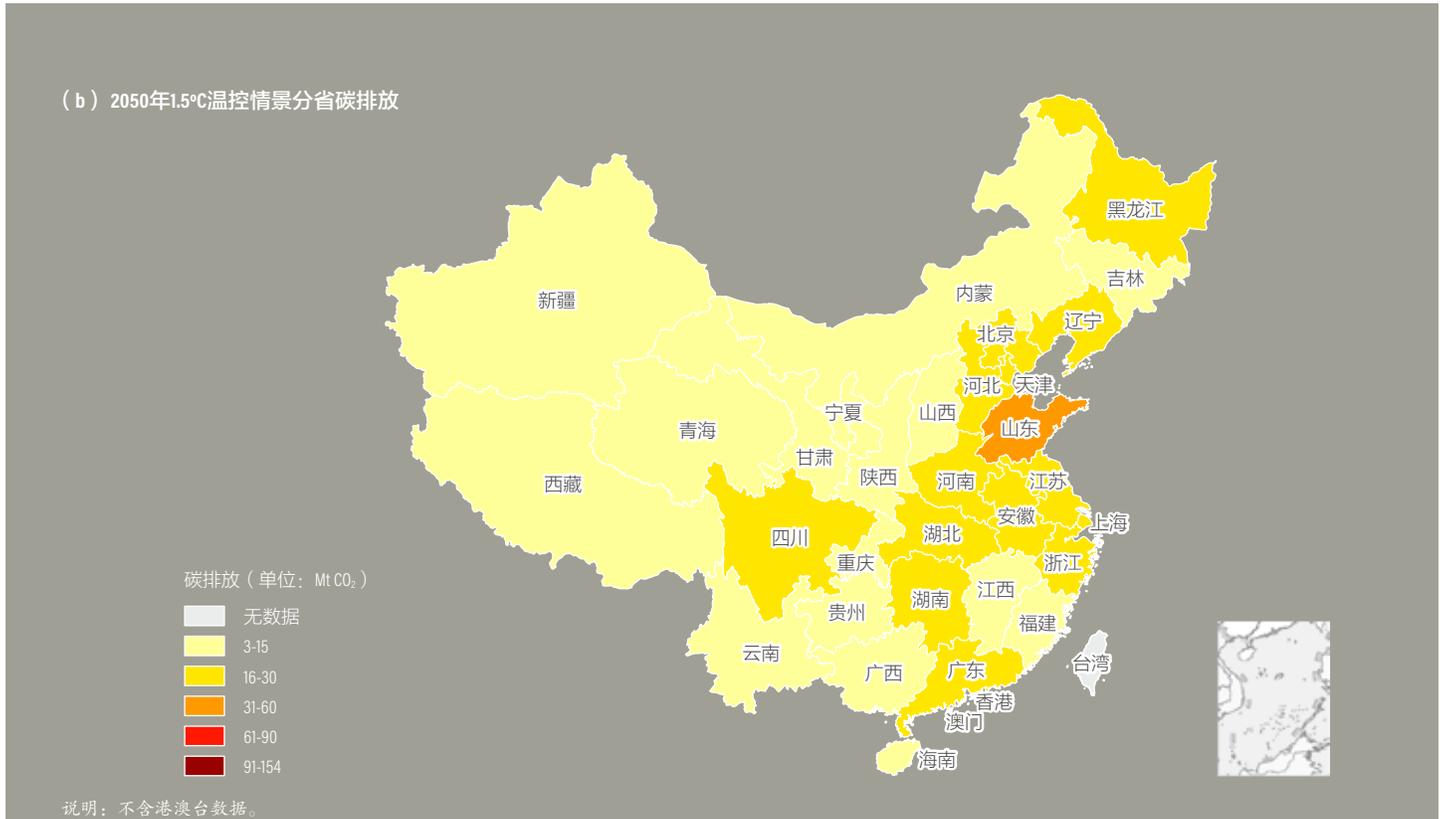


专栏图 5 | 1.5°C温控情景下2035年和2050年全国分省道路交通二氧化碳排放

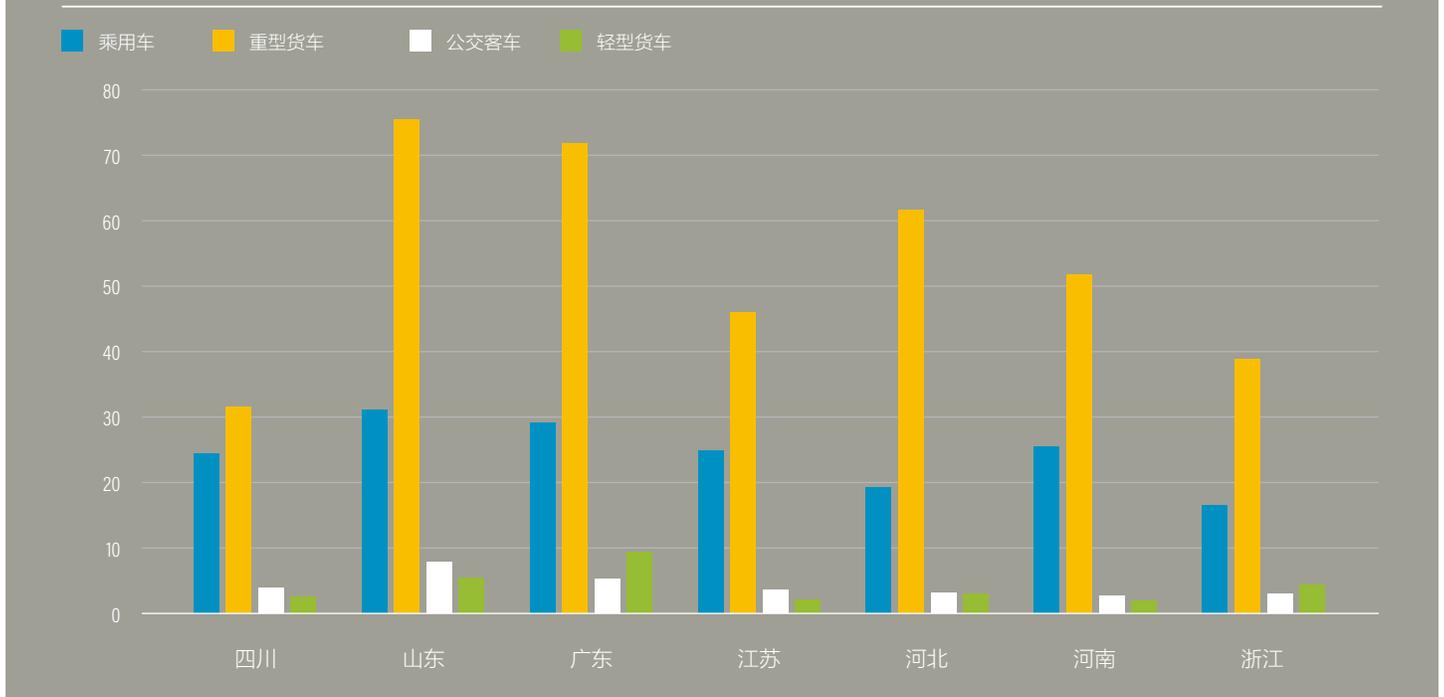
(a) 2035年1.5°C温控情景分省碳排放



专栏 3 | 省级层面道路交通排放预测 (续)



专栏图 6 | 2050年七个重点省份分车型尾气排放 (单位: 百万吨)



政策建议与讨论

7.1 政策建议

1. 减排目标设置

目前道路交通行业减排相关的预测研究多与本文中的基准情景一致，没能考虑近中期车辆电动化和货运结构转移的减排潜力，因此，通常低估道路交通排放达峰时间，使得政策目标设置相对保守。未来，中国道路交通排放可能与现有政策情景更为相符，达峰时间有望提前到2035年，有助于中国及早实现自主减排目标。

尽管如此，值得指出的是，“达峰”后，道路交通行业减排将进入“深水区”，深度减排困难重重，不仅需要在乘用车领域实现“禁燃”，也需要在“难减排”的重型货车领域发力，达到深度货运结构转移、高比例电动化或氢燃料电池车的渗透，更需要电力侧实现高比例可再生能源渗透。这些“激进”政策在制定与实施过程中，必将遭遇各种阻力，但是道路交通行业对中国实现二氧化碳“净零”排放的意义不可小觑。

最后，即便在最理想的1.5°C温控情景下，中国道路交通仍存在近4亿吨排放，主要源于重型货车的尾气排放（占比54%）。为

实现真正意义上的“净零”排放目标，需要对这些“难以减少的排放”采取森林固碳等“碳汇”措施进行抵消。

2. 减排路径和政策组合

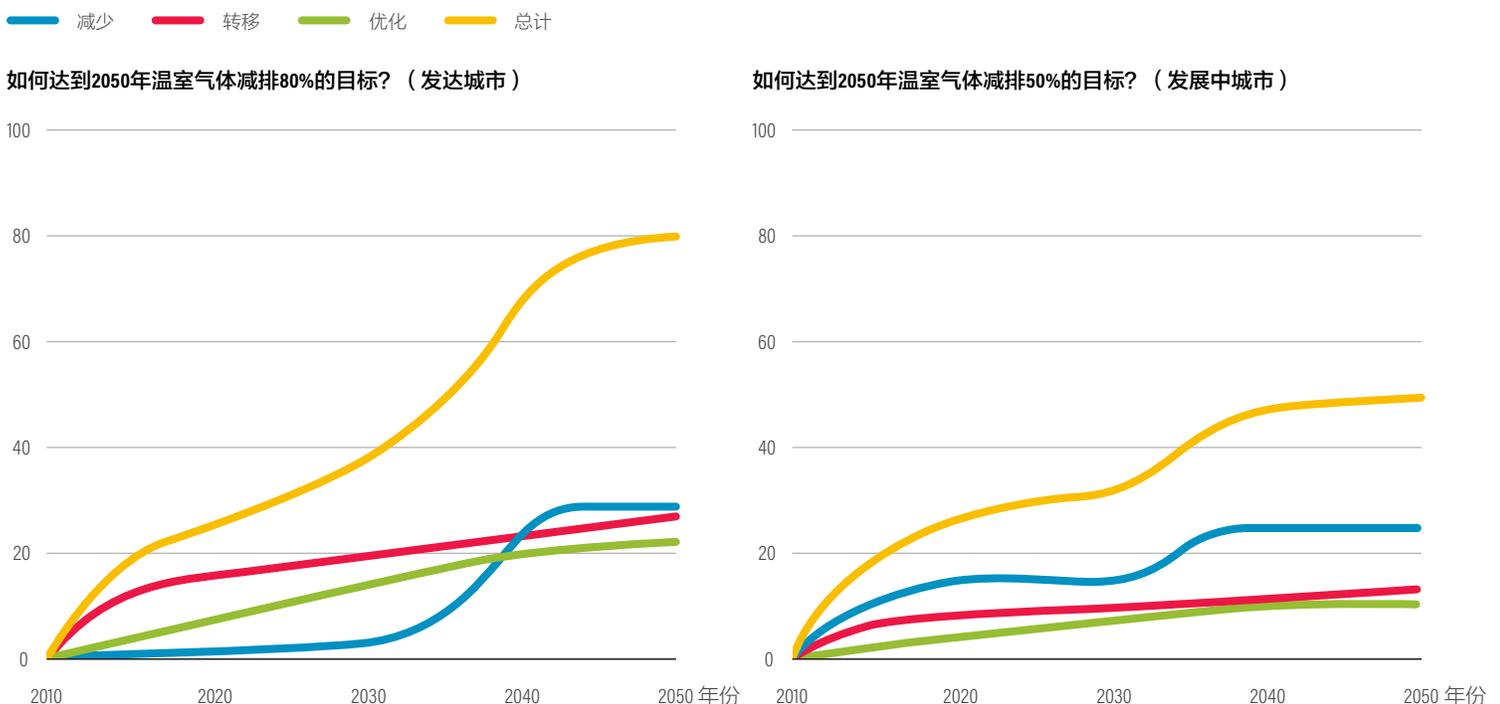
以往，道路交通减排采取的是“减少—转移—优化”措施，即从减少不必要的出行活动水平、调整优化交通运输结构、使用清洁高效燃料等方面发力：

- 减少：整合土地利用和交通规划，提升交通系统效率，减少出行总量和出行距离。
- 转移：提升出行效率，从能源消耗型城市交通模式转向环境友好型城市交通模式。
- 优化：改善车辆技术和燃料性能，减少机动车温室气体排放。

如图42所示，传统的道路交通减排研究认为：对发达国家来说，由于城市土地开发已大致完成，因而“转移”策略减排效果较好；对发展中国家来说，城市仍然处于发展变化时期，因此“减少”策略是最具潜力的政策工具。

然而，随着车辆电动化技术超预期地迈入快速发展时代，传统道路交通减排措施也将面临优先级的重新调整：首先，“优

图 42 | “减少—转移—优化”策略的减排效果



来源：Bongardt, D., Breithaupt, M., Creutzig, F. 2010. Beyond the Fossil City: Towards low Carbon Transportation and Green Growth.

表 14 | “减少—转移—优化—清洁”策略减排潜力变化

| | 政策措施 | 传统减排潜力 | 更新减排潜力 |
|-----------|---|--------|---------------|
| 减少不必要出行需求 | · 优化城市布局 · 以公共交通为导向进行城市规划 | 1 | 2 (近期潜力大) |
| 转移出行结构 | · 以公共交通为导向进行城市规划 · 优先发展公共交通 · 鼓励步行、自行车与共享出行 · 实施交通需求管理政策 · 实施公转铁、公转水政策及推广甩挂运输 | 2 | 1 |
| 优化车辆技术 | · 普及车辆电动化、发展替代能源车辆 · 提升传统燃油车的燃料经济性 | 3 | 1 |
| 清洁电力 | · 推广可再生能源的使用与消纳 | -- | 2 (中后期潜力大) |

注：1. “1”代表减排潜力最大、措施优先级最高，随数字增大，减排潜力降低。

2. 由于数据限制，本文仅作减排潜力分析，无法做减排成本分析。

3. 值得注意的是，本文中“减少”主要局限于年行驶里程的分析，没有考虑“减少”措施对车辆保有量的影响。

化”措施的减排潜力正在不断提升；其次，伴随着电动汽车规模的扩大，发电侧从以传统火电为主转移到更为清洁的能源结构也被提上议程（“清洁”）。当前的道路交通减排因此应从“减少—转移—优化—清洁”四个入手（见表14）：

首先，如第6.2节中道路交通不同因子贡献度的分析，电动化技术减排潜力（“优化”）本身有“天花板”，特别是考虑到占道路交通排放近40%的重型货车较难通过电动化技术实现减排。因此，单一依赖电动化不可能帮助道路交通领域实现深度减排。在不计成本和难度的条件下，运输结构转移（“转移”）与车辆电动化的减排潜力（“优化”）相当，能够较好实现货运行业减排，因此，“转移”和“优化”结合、多措并举才是实现1.5℃温控目标的关键。

其次，在“减少”政策方面，随着中远期车辆电动化水平的提高，年行驶里程带来的减排“红利”也逐步降低。但在近期，中国城市仍正处于扩张期，对年行驶里程的控制可以有效降低道路交通排放达峰的峰值。

最后，虽然“清洁（电力）”总减排潜力不是最高的，但与“减少”类似，其重要度因阶段而异。例如，在中长期即2030—2035年左右，特别是随着乘用车车辆电动化规模扩大，发电侧排放占道路交通排放比例将明显提高，成为未来主要排放源之一，届时电力清洁化势必将成为道路交通减排的重要发力点。

以下就减排潜力较大的“转移”和“优化”两个因素，深入讨论具体的减排措施：

■ 运输结构转移

如前文分析，客运、货运结构转移带来的减排潜力与车辆电动化减排潜力相当（客运结构转移措施见专栏四）。其中，如果货运行业能够实现深度结构转移与效率提升，即控制货车保有量从当前1300万辆小幅增至2050年的1600万辆，其减排潜力在众多措施中最高。

中国要想实现货运行业的深度结构转移，也存在很多发力点，包括增加铁路网络的覆盖度、鼓励多式联运、发展甩挂运输、规范道路运输行业等。

一是增加铁路网络的覆盖率、运力和服务质量，充分发挥铁路运输、水路运输在煤炭、矿石等大宗货物运输方面的价格和时间优势，从而能够从运力和服务质量上承接公路货运转移来的货运量：

- 增加铁路运力与覆盖率：按照《中长期铁路网规划（2016-2030）》，到2025年，铁路网规模达到17.5万公里，覆盖大城市；到2030年，基本覆盖所有县域，完成内外互联互通。投资增加机车、车辆、铁路专用线、铁路专有货场和铁路物流中心的数量，以提高铁路运能，引入信息化平台和金融创新。

表 15 | 1993年、1997、年2002年美国各种运输方式间商品运输分担情况

| 运输方式 | 运量 (百万吨) | | | 货物周转量 (10亿吨英里) | | |
|---------------|-------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-------------|
| | 1993年 | 1997年 | 2002年 | 1993年 | 1997年 | 2002年 |
| 所有运输方式总计 | 9689 | 11090 | 11573 | 2421 | 2661 | 3204 |
| 单一运输方式 | 8922 | 10436 | 10878 | 2137 | 2383 | 2913 |
| 多式联运 | 226 | 217 | 199 | 192 | 205 | 215 |
| 其他运输方式 | 540.5 | 436.5 | 496.2 | 92.6 | 73.4 | 76.6 |

来源：交通运输部科学研究院（2007）

- 挖掘现有铁路基础设施的运力与质量：实现专业化、标准化的铁路装卸、仓储和配送，提高“最后一公里”服务水平，提高铁路运输的效率，改善铁路运输的运价体系。

二是鼓励多式联运和甩挂运输，将高附加值产品（如商品车整车、冷链、电商快递和城市生产生活物资）以集装箱的模式，通过公铁联运、公水联运、铁水联运等方式运输，提高低能耗强度货运方式比重。例如，美国多式联运的快速发展出现

于1980年交通运输业放松管制后。当时为了维持铁路与其他运输方式的竞争力，铁路企业开始重新强调服务创新，以增加运输量（见表15）。

三是开展绿色货运行动和示范项目，一方面，可以通过发展甩挂运输的方式提高运输效率；另一方面，可以通过组织管理和发展互联网信息技术，推动公路物流企业“做大做强”，提高行业集中度，规范行业行为（包括超限超载和非规则纳税问题），从整体上推动物流企业降本增效，提高载货率。

专栏 3 | 客运结构转移相关政策措施

采取“一拉一推”的策略，促进城市交通模式从能源消耗和污染型转向环境友好型。所谓“拉”，是指引导公众在出行模式上向公共交通倾斜，将居民“拉”到绿色交通工具与轨道上；所谓“推”，是指引导公众减少对小汽车的依赖，将居民从小汽车出行模式上推开。具体措施包括：

- 构建完整的公交覆盖网络。在城市规划中，保障公共交通设施用地，加强和优化公共交通与周边用地的衔接，尤其是公共交通与低收入群体居住地（经济适用房等）之间的步行衔接；加大对公共交通的资金、路权投入，改进常规公交服务和管理水平；加强公交专用道建设，扩大公交专用道的规模并推进公交专用道网络化建设，同时加强对公交专用道使用过程的监管；加快公共交通智能化建设，提供实时公交信息服务，通过网络、手机等方式告知用户公交车到站时间等信息。积极发展快线公交、支线公交等不同等级的公交服务方式，提高公共交通整体服务能力和服务效率；加强不同交通模式之间的衔接。
- 实施区域化步行和自行车系统规划，提高步行和自行车出行的吸引力、效率和安全性。科学规划和完善步行、自行车网络系统。在以机动车为主的主干道和快速路上，从设施层面保障行人通行路权，过街安全、顺畅，并充分发挥步行和自行车在解决公交出行“最后一公里”问题中的作用。
- 制定交通需求管理政策，加强对小汽车的管理控制。一是制定科学的停车收费政策、设施规划和执法监督体系，实施区域差异化的停车收费制度，实现收费价格与停车需求挂钩。在停车收费合理化的基础上，建立科学的建筑停车配套标准，鼓励停车泊位公共化。二是根据道路交通实际情况，探索对不同排放量的汽车采取限行、限购管理措施，降低道路交通压力与排放。

■ 车辆技术提升

中国过去几年在新能源汽车推广中成绩斐然。中国纯电动乘用车在2025年才可能与传统燃油车实现“平价点”，但随着2021年新能源汽车补贴政策退坡、免购置税政策取消，“后补贴时代”中国的新能源汽车政策将影响新能源汽车未来增速与减排程度。

当前，一些新能源车渗透率高的欧洲国家也处在与中国类似的转型阶段，正降低新能源汽车财税政策的优惠幅度，从针对新能源汽车的税费优惠向与车辆碳排放挂钩的税费体系和限行措施转变。作为欧洲国家实现“禁燃”时间表的重要抓手，这些新型政策工具可为中国提供以下借鉴：

- 与能耗挂钩的税费政策：挪威虽然是全球各国中提出实现“禁燃”时间最早的国家——2025年，但是其明确实现“禁燃”的手段不是通过强制政令，而是借助针对传统燃油车附加高额的“污染税”或者“基于里程的收费”，让新能源汽车在全生命周期成本上比传统燃油车具有优势。目前中国车辆有关的税费（如乘用车消费税、车船税、车辆购置税）的计税依据为排量或者统一税率。未来，中国有必要逐步改革目前的车辆税制体系，从与排量挂钩转向为与二氧化碳排放量（或能效指标）挂钩，从而更有效地激励生产和消费端新能源汽车的增长。
- 更严格的车辆能效标准：欧盟于2019年推出新的2021—2030年单车平均二氧化碳排放标准。该标准要求，2025年欧盟市场销售的乘用车二氧化碳排放需较2021年下降15%，2030年乘用车二氧化碳排放需较2021年下降37.5%。欧盟目前设定的欧盟市场车辆二氧化碳排放上限为每公里130克，到2021年该上限将为每公里95克，2030年将调整为每公里69克（欧盟议会和理事会，2019）。此外，欧盟对汽车生产企业提出的新能源汽车销售目标为，2025年汽车总销量的15%必须为新能源汽车，2030年该比例将达到35%（欧盟议会和理事会，2019）。平均单车排放不符合标准的汽车生产企业将面临排量每超标准1克罚款95欧元的巨额惩罚。目前欧盟的单车平均二氧化碳排放标准非常严格，将极大刺激欧盟境内新能源汽车的生产和销售。对标欧盟的能耗标准，中国“双积分”政策的目标设定（2025年国家平均油耗目标为百公里4.0升）仍相对温和，导致目前积分价值被严重低估，市场机制尚没有发挥作用，也缺乏欧盟标准的强制性带来的高昂经济代价。随着欧盟市场对车辆能效标准的要求越来越严格，未来有必要先统一中国市场不同车型的排放计量标准，从油耗向二氧化碳排放转移，以便更好地比较传统燃油车、新能源汽车、可替代能源汽车的排放，并在此基础上提高排放要求。

除国家层面政策外，地区层面制定的新能源车推广政策也正在扮演着重要角色：

- 地区限行限购政策：中国城市对机动车实施的限行限购政策，已经证明是推广新能源汽车的有效措施。例如，2018年，6个限行限购的中国城市（北京、上海、深圳、广州、杭州和天津）的新能源汽车年销量占中国全国新能源汽车年销量的35%，占全球年销量的18%（彭博新能源财经，2019）。“禁燃”的海南省也宣布，未来将出台限行限购政策，作为助推新能源汽车在私家车领域推广的重要措施。一方面，中国不同地区采取的需求侧政策需要进一步加码，鼓励更多地区出台类似政策；另一方面，随着乘用车销量的下滑，各地需要在报废车辆换购政策中提出新能源汽车配比要求。
- 城市零排放区政策：零排放区政策起源于治理城市空气污染的低排放区政策，早期为针对“欧五”或“欧六”排放的汽车限行或收费，目前逐渐演化成为新能源汽车的优惠政策。零排放区政策在污染物排放的基础上加入了对车辆二氧化碳排放的要求，对排放较高的传统燃油车采取城市中心区限行或收费政策，将加速车辆替换。对于不会采取限购政策的欧洲城市，零排放区政策是有利的政策工具。目前，少数欧洲城市如英国牛津、法国巴黎正在考虑零排放区政策。而零排放区政策在中国城市落地的可能性仍然未知，需要在新能源汽车渗透率较高的城市、大型展会会址、工业园区等商业氛围不受影响、容易监测的地区试点并得到验证。在新能源汽车渗透率达到一定水平后，零排放区政策可作为推广新能源汽车的重要抓手。

最后，充电基础设施的完善程度是影响新能源汽车增长速度的重要因素。根据彭博新能源财经预测，未来全球新能源汽车增长将遇到“瓶颈期”，而充电基础设施的完善程度将是重要致因。目前，在部分中国城市的小区 and 公共场所，充电基础设施的负荷需求超出用地范围内配电网变压器容量的问题已经浮现。这需要城市开展充电桩专项规划，在规划中组织电力部门对既有公交场站进行变压器容量筛查，对需要扩容的场站及早提供财政支持，在一定期限内完成充电基础设施建设，简化充电桩建设审批流程。

3. 减排政策发力时间点

本研究呈现的减排潜力以及早采取措施为前提。即便在激进的1.5℃温控情景中，本研究对模型输入参数的预测仍采用对数或线性变化趋势，所有参数均从2020年开始发生改变，增长或下降势头明显缓和。

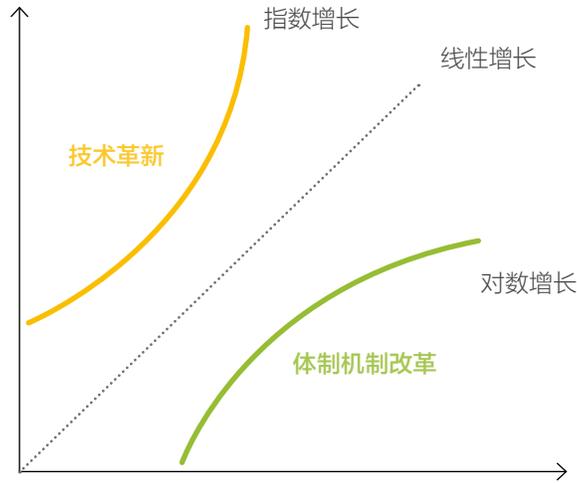
若采取后发措施，就需要采取比文中所述更为激进的措施，从文中的对数或线性变化升级为指数级变化（如传统燃油车市场

中大批车辆提前报废)，才可实现现有政策情景和1.5°C温控情景下的减排水平。然而，这种后知后觉的激进措施在实施中难免面临巨大挑战：一是交通或电力基础设施会有较长的生命周期（即“锁定效应”），在有限时间内对基础设施进行更新改造，将需要付出高昂的“转型与淘汰”成本；二是制度与体制改革阻力不可

避免，如货运结构转移中的铁路运输与多式联运均存在诸多制度阻碍，改革制度阻碍带来的往往是更为缓慢的对数级增长（见图45和图46）。

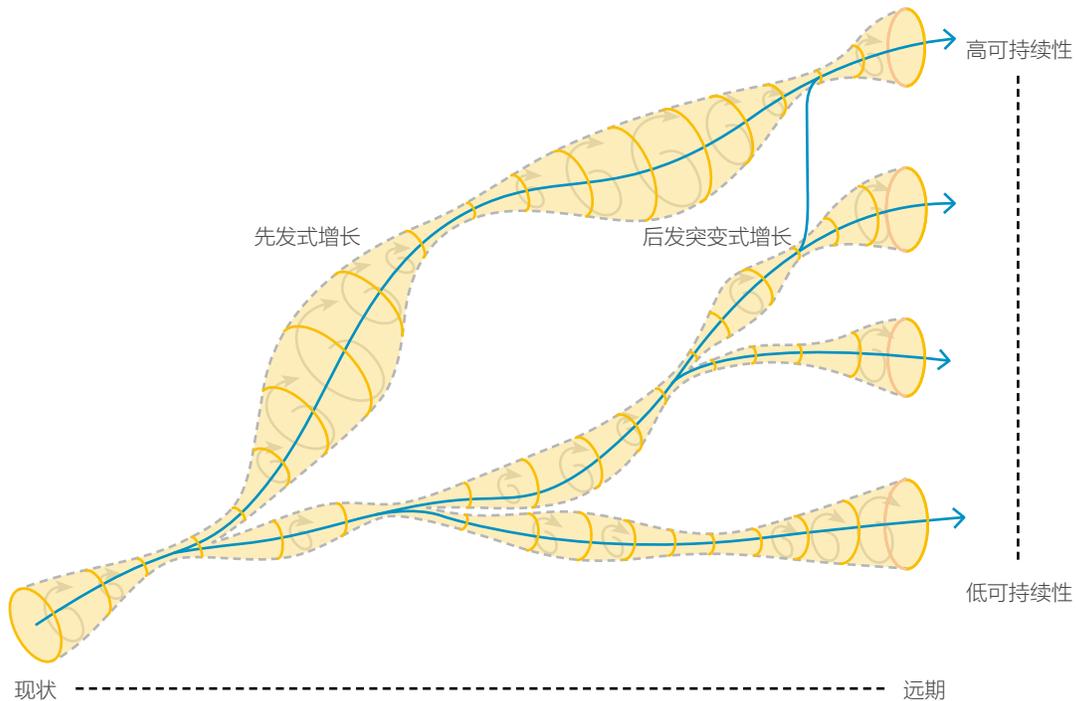
因此，为了实现中国道路交通深度减排，需要及早采取措施。

图 45 | 马泰克定律 (Martec's Law) 对数、线性、指数增长示意



说明：如图中所示，技术创新通常呈现指数增长趋势（速度快），制度变化通常呈现对数增长趋势（速度慢）

图 46 | 实现可持续发展的不同路径



说明：如图中所示，先发式增长仅需要对数增长即可，而后发突变式增长则需要指数增长才可能实现。
来源：Elmqvist 等 (2019)

7.2 讨论与未来工作

对道路交通行业的排放测算采用不同方法计算，碳排放量的结果有很大差别，准确性和适用范围也存在差异。本研究亦如此：

- 首先，本研究对未来车辆技术的选择明显倾向于电动化，特别是对商用车，没有考虑到氢燃料电池和生物燃料技术潜在的市场前景，以及与电动汽车之间的相互替代关系。其结果是1.5°C温控情景中重型货车的电动化水平过高（58%），在2050年难以实现，本研究可能高估了车辆电动化的整体减排潜力。此外，本研究对车辆技术的判断也对终端用能有较大影响，可能高估了未来中国道路交通行业的终端电力需求，低估了氢燃料、生物燃料等终端用能需求。
- 其次，基于车辆保有量和年行驶里程的“自下而上”法无法定量匡算减排措施与特定模型输入之间的一一对应关系。例如，乘用车保有量受交通需求管理政策、城市规划、公交优先等措施共同影响；重型货车保有量则受“公转铁”运输结构转移和运输效率提升等措施共同影响。未来有必要采用不同模型，从不同角度进行测算，增强单一政策建议的针对性。
- 第三，本文仅关注各措施的减排潜力，没有考虑减排成本、未来技术可行性和潜在的制度阻碍，如货运结构深度转移所带来的成本和难度、重型货车高比例电动化的可行性等。这可能导致文中对1.5°C温控情景的表述过于乐观。
- 最后，本研究的目标仅侧重于实现深度减排，空气污染、城市交通拥堵等协同效应没有纳入本文考虑范畴。如果考虑空气污染，污染水平较高的LNG重型货车未来保有量可能比文中假设更低。如果考虑城市交通拥堵，乘用车未来总保有量可能会比文中假设更低。

注释

1. 与中国的双源有轨电车概念类似，有轨货车在城际高速路上设置架高的电源线，货车可搭载较小容量的电池。
2. 2012年后含进口车。
3. 不计上游电池材料、车辆生产造成的排放。
4. 同时考虑车辆购置补贴在2021年左右完全退出、购置税减免在2026年左右取消。

引用

1. Asian Development Bank 2018. Sustainable Transport Solutions: Low-carbon Buses [1]Argonne National Laboratory. 2018. China Vehicle Fleet Model: Estimation of Vehicle Stocks, Usage, Emissions, and Energy Use—Model Description, Technical Documentation, and User Guide.
2. Bongardt, D., Breithaupt, M., Creutzig, F. 2010. Beyond the Fossil City: Towards low Carbon Transportation and Green Growth.
3. 彭博新能源财经.BloombergNEF,2019. Electric Vehicle Outlook 2019. <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/#toc-viewreport>
4. Delgado, O., Miller, J., Sharpe, B., and Muncrief, R., 2016. Estimating the fuel efficiency technology potential of heavy-duty trucks in major markets around the world. International Council on Clean Transportation. <https://www.globalfueleconomy.org/media/404893/gfei-wp14.pdf>
5. 爱尔兰交通、旅游、体育部 (Department of Transport, Tourism and Sport of Ireland(DTTAS)), 2017. Minister publishes National Policy Framework on Alternative Fuels Infrastructure for Transport in Ireland - 2017 to 2030. <http://www.dttas.ie/sites/default/files/publications/public-transport/english/alternative-fuels-framework/6186nfpalternative-fuels300517.pdf>
6. 欧洲汽车制造商协会 (European Automobile Manufacturers' Association (ACEA)), 2016. Motorisation rate in the EU in 2016. <https://www.acea.be/statistics/tag/category/vehicles-per-capita-by-country>
7. Elmqvist, T., Andersson, E., Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Olsson, P., Gaffney, O., 2019. Sustainability and Resilience for Transformation in Urban Century. Nature Sustainability.
8. Eurelectric, 2017. Electrification of Heavy Duty Vehicles: A EURELECTRIC statement. https://www.eurelectric.org/media/2161/electrification_of_heavy_duty_vehicles-2017-030-0588-01-e.pdf
9. European Commission, 2018. Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_en
10. Gilbert, C., 2017. Global passenger car penetration: Grid lock! Legal & General Investment Management Limited. https://www.lgim.com/files/_document-library/knowledge/thought-leadership-content/long-term-thinking/long-term-thinking-energy-fundamentals-gridlock-june-17.pdf
11. Huo, H., Zhang, Q., He, K.B., Yao, Z.Z., & Wang, M., 2012. Vehicle-use intensity in China: Current status and future trend. Energy Policy, 43: 6–16. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2011.09.019>
12. Hitchcock, G., Birchby, D., Bouvet, C., Clarke, D., 2017. Oxford Zero Emission Zone Feasibility and Implementation Study. Ricardo Energy & Environment. Oxford City Council. https://www.oxford.gov.uk/download/downloads/id/4019/zero_emission_zone_feasibility_study_october_2017.pdf
13. 国际能源署International Energy Agency(IEA), 2017. The Future of Trucks: Implications for Energy and the Environment. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TheFutureofTrucksImplicationsforEnergyandtheEnvironment.pdf>
14. 国际能源署International Energy Agency(IEA), 2019. Global EV Outlook 2019.
15. 国际能源署International Energy Agency(IEA), 2019. Global Energy & CO₂ Status Report 2018. <https://www.iea.org/geco>
16. 交通运输部.2017中国城市客运发展报告 (2017) .人民交通出版社.
17. 新加坡陆路交通管理局Land Transport Authority (LTA), 2018. Annual Vehicle Statistics 2018. https://www.lta.gov.sg/content/dam/ltaweb/corp/PublicationsResearch/files/FactsandFigures/MVP01-1_MVP_by_type.pdf
18. Liu, X., Tang, D., Ding, Y., Yin, H., Ji, Z. 2009. Study on the distribution of vehicle mileage traveled in China. Research of Environment Science. 22(3): 377-380.
19. 欧盟议会和理事会 The European Parliament and of the Council. 2019. Regulation (EU) 2019/631. Setting CO₂ emissions performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulation (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631&from=EN>
20. Norsk elbilforening. Norwegian EV policy. <https://elbil.no/english/norwegian-ev-policy>
21. Ou, S.Q., R.J. Yu, Z.H., Lin, H.H. Ren, X. He, S. Przesmitzki, J. Bouchard,2019. Daily distance distribution of Chinese passenger vehicles by regions and class: estimation and implications for energy use and electrification. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.
22. Rodríguez, F., Delgado, O., & Muncrief, R., 2018. Fuel consumption testing of tractor trailers in the European Union and the United States. International Council on Clean Transportation. https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU_HDV_Testing_BriefingPaper_20180515a.pdf
23. 交通运输部科学研究院 2007. 美国交通发展历程. 交通运输部科学研究院研究报告.
24. 美国交通统计局(U.S. Bureau of Transportation Statistics).<https://www.bts.gov/content/number-us-aircraft-vehicles-vessels-and-other-conveyances>
25. 联合国欧洲经济委员会United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Passenger car rate.<https://w3.unece.org/PXWeb/en/Table?IndicatorCode=44#last-period-0>
26. Zhang, L.L., Long, R.Y., Chen, H., & Geng, J.C. 2019. A review of China's road traffic carbon emissions. Journal of Cleaner Production, 207: 569–581. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.003>

27. 国家发展和改革委员会能源研究所, 2017. “十三五”及2030年交通部门节能目标研究. <http://www.efchina.org/Attachments/Report/report-20170301-1-zh/report-20170301-1-zh>
28. 国家发展和改革委员会能源研究所, 2018. 中国高比例可再生能源路线图.
29. 国家信息中心, 2014. 甩挂运输的现状与发展建议探讨分析. <http://www.sic.gov.cn/News/455/2300.htm>
30. 国家统计局, 2019. 2018年国民经济和社会发展统计公报. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201902/t20190228_1651265.html
31. 国家能源局, 2017. 关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案. http://www.nea.gov.cn/2017-09/13/c_136606035.htm
32. 广东省交通运输规划研究中心, 2014. 广东省道路货运行业推广LNG应用工作方案研究调研报告. <http://www.efchina.org/Attachments/Report/report-ctp-20140414/%E5%B9%BF%E4%B8%9C%E7%9C%81%E9%81%93%E8%B7%AF%E8%B4%A7%E8%BF%90%E8%A1%8C%E4%B8%9A%E6%8E%A8%E5%B9%BF%E5%BA%94%E7%94%A8%E5%B7%A5%E4%BD%9C%E6%96%B9%E6%A1%88%E8%B0%83%E7%A0%94%E6%8A%A5%E5%91%8A>
33. 刘建翠, 2011. 中国交通运输部节能潜力和碳排放预测. 资源科学, 33(04):640-646.
34. 刘坚、钟财富, 2019. 我国氢能发展现状与前景展望. 中国能源.
35. 姜旭, 2010. 日本货物总运输量与纯运输量的实证研究. 中国流通经济, 6:23-26.
36. 蒋小谦、房伟权、程纪华、黄炜、魏丹青, 2015. 城市温室气体清单编制与应用的国内外经验. 世界资源研究所研究报告.
37. 上海市新能源汽车公共数据网, 2018. 中国六城市新能源汽车消费者调查问卷分析——新能源汽车出行行为特征分析. <http://www.shefdc.org/laws/1855.jhtml>
38. 沈万霞、张博、丁宁、王薛超、卢强、王成, 2017. 轻型纯电动汽车生产和运行能耗及温室气体排放研究. 环境科学学报, 37(11):4409-4417.
39. 国家发展和改革委员会能源研究所, 2017. 重塑能源: 面向2050年能源消费和生产革命路线图(交通卷). 中国科学技术出版社.
40. 国家发展和改革委员会能源研究所, 2017. 重塑能源: 面向2050年能源消费和生产革命路线图(电力卷). 中国科学技术出版社.
41. 交通运输部, 2015. 2015年交通运输行业发展统计公报.
42. 中华人民共和国工业和信息化部, 2015. 乘用车燃料消耗量第四阶段标准解读. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1653018/c3780606/content.html>
43. 中国产业信息, 2017. 2017年中国乘用车行业销量有望平稳增长, 行业上市公司营收及净利润增速表现好于行业销量增速. <http://www.chyxx.com/industry/201708/549792.html>
44. 中电传媒电力数据研发中心, 2018. 数据|2018年我国各省电力消费新动向. http://www.cnenergynews.cn/dl/201803/t20180306_451578.html
45. 中国汽车技术研究中心有限公司, 2017. 中国货运体系评估——项目总体报告.
46. 中国汽车技术研究中心有限公司, 2018. 新能源汽车蓝皮书——中国新能源汽车产业发展报告(2018). 社会科学文献出版社.
47. 中国汽车技术研究中心有限公司, 2019. 中国传统汽车和新能源汽车发展趋势2050研究.
48. 能源与交通创新中心, 2018. 中国乘用车实际道路行驶与油耗分析年度报告. <http://www.icet.org.cn/admin/upload/2019012535018777.pdf>
49. 中国工程院节能减排课题组, 2016. 中国货物运输节能减排战略与政策研究. 美国能源基金会项目. <http://www.efchina.org/Attachments/Report/report-20170915-1-zh/report-20170915-1-zh>

致谢

作者感谢以下专家（排名不分先后），他们在本论文的撰写过程中提供了宝贵的专业意见：感谢交通部科学研究院发展中心凤振华博士、中国电动汽车百人会副秘书长王贺武教授、国家发展和改革委员会能源研究所伊文婧以及刘杨女士对文章提供的中肯意见。感谢世界资源研究所奚文怡、宋苏、袁敏、刘岱宗、李来来对文章写作提供的支持和建议。

关于作者

薛露露 世界资源研究所研究员。邮箱：lxue@wri.org

靳雅娜 威廉玛丽学院博士后

禹如杰 中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心高级技术经理

刘勇 中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心工程师

任焕焕 中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心总监助理

关于世界资源研究所

世界资源研究所是一家独立的研究机构，其研究工作致力于寻求保护环境、发展经济和改善民生的实际解决方案。

我们的挑战

自然资源构成了经济机遇和人类福祉的基础。但如今，人类正以不可持续的速度消耗着地球的资源，对经济和人类生活构成了威胁。人类的生存离不开清洁的水、丰饶的土地、健康的森林和安全的气候。宜居的城市和清洁的能源对于建设一个可持续的地球至关重要。我们必须在未来十年中应对这些紧迫的全球挑战。

我们的愿景

我们的愿景是通过对自然资源的良好管理以建设公平和繁荣的地球。我们希望推动政府、企业和民众联合开展行动，消除贫困并为全人类维护自然环境。

我们的工作方法

量化

我们从数据入手，进行独立研究，并利用最新技术提出新的观点和建议。我们通过严谨的分析、识别风险，发现机遇，促进明智决策。我们重点研究影响力较强的经济体和新兴经济体，因为它们对可持续发展的未来具有决定意义。

变革

我们利用研究成果影响政府决策、企业战略和民间社会行动。我们在社区、企业和政府部门进行项目测试，以建立有力的证据基础。我们与合作伙伴努力促成改变，减少贫困，加强社会建设，并尽力争取卓越而长久的成果。

推广

我们志向远大。一旦方法经过测试，我们就与合作伙伴共同采纳，并在区域或全球范围进行推广。我们通过与合作伙伴交流，实施想法并提升影响力。我们衡量成功的标准是，政府和企业的行动能否改善人们的生活，维护健康的环境。

支持机构



Copyright 2019 World Resources Institute. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.
To view a copy of the license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>