WRI CHINA

# 迈向碳中和目标：中国道路交通领域中长期减排战略

薛露露，刘岱宗

WRI.ORG.CN



# 致谢

本项目是国家自主贡献亚洲交通倡议项目（NDC-TIA）的一部分，该项目支持中国、印度和越南乃至全球各国全面开展交通减排战略研究。国家自主贡献亚洲交通倡议项目是国际气候倡议（IKI）的一部分。德国联邦环境、自然保护和核安全部（BMU）根据德国联邦议院决议，为国际气候倡议提供支持。

作者向为本研究提供支持和意见的机构和专家表示诚挚的感谢。感谢中国环境科学研究院机动车排污监控中心（VECC）对本研究的大力支持。感谢世界资源研究所方莉博士与刘哲博士对报告提供的中肯意见和指导。

另外，作者也感谢为本报告的撰写提供了宝贵专业建议的专家和同事（排名不分先后）：

| | |
|---|---|
| **马冬** | 中国环境科学研究院机动车排污监控中心 |
| **任焕焕** | 中国汽车技术研究中心有限公司 |
| **郭杰** | 交通运输部科学研究院 |
| **伊文婧** | 国家发展和改革委员会能源研究所 |
| **吴烨** | 清华大学 |
| **刘永红** | 中山大学 |
| **Holger Dalkmann** | Sustain2030 |
| **Jen JungEun Oh** | 世界银行 |
| **Yang Chen** | 世界银行 |
| **Katharina Göckeler** | Oeko Institut |
| **Malithi FERNANDO** | 国际交通论坛 |
| **李昂** | 世界资源研究所 |
| **蒋小谦** | 世界资源研究所 |
| **Stephanie Ly** | 世界资源研究所 |
| **Erika Myers** | 世界资源研究所 |
| **Ben Welle** | 世界资源研究所 |
| **Amit Bhatt** | 世界资源研究所 |

此外，作者感谢为本研究做了大量文献搜集与数据分析工作的世界资源研究所优秀实习生Isabel Qi、鲍文玮和曾小欢，以及参与报告翻译工作的世界资源研究所同事程怡然博士、张黛阳与香雪莹。

**支持机构：**

Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety

校对
谢亮　hippie@163.com

设计与排版
张烨　harryzy5204@gmail.com

https://doi.org/10.46830/wrirpt.21.00145cn



# 目录


III **执行摘要**

XV **Executive Summary**

1 **背景**

7 **第 2 章 研究方法**

31 研究范围

31 模型方法

19 **第 3 章 情景设置**

31 影响因素

31 情景假设

37 **第 4 章 模型结果**

31 基准年结果

31 情景预测结果

31 各类措施的减排潜力与成本分析

31 温室气体排放与空气污染物协同减排潜力

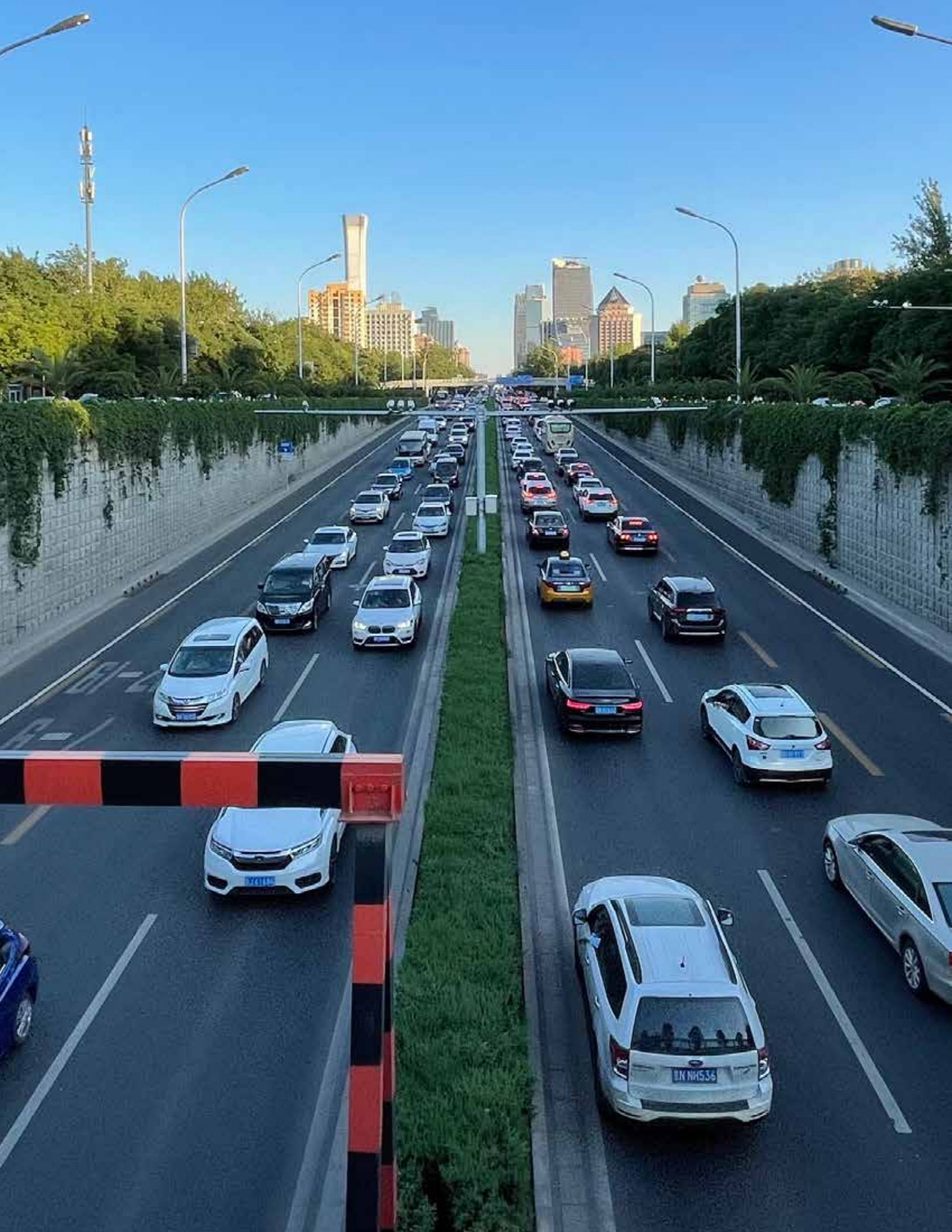
52 **第 5 章 总结与讨论**

56 **附录 1. 社会经济假设与需求预测**

56 **附录 2. 生物燃料的未来推广潜力**

56 **注释**

58 **参考文献**



# 执行摘要

## 主要结论

- 近期，随着出行需求的增加，国内道路交通温室气体排放将持续增长。然而，如果中国能如期实现现有政策目标与行业目标，道路交通领域温室气体排放有望在2030年实现达峰，石油消耗量有望在2027年实现达峰。如果采取积极的运输结构优化措施，道路交通领域的温室气体排放达峰时间可提前至2025年。

- 到2060年，如果中国能够如期实现现有政策目标与行业目标，道路交通领域的温室气体排放有望在2020年的基础上减少50%。如果同时采取更积极的新能源汽车推广和运输结构优化措施，2060年的道路交通领域的温室气体排放可在2020年基础上减少95%，基本实现道路交通领域的温室气体排放碳中和。

- 在道路交通领域的各项减排措施中，新能源汽车推广与应用的温室气体减排潜力最大，其后依次为运输结构优化、车辆能效提升，以及上游发电与制氢环节减排。短期来看，运输结构优化措施的减排潜力最大且成效显著；长期来看，新能源汽车推广与应用对道路交通领域实现碳中和将起到决定性作用。

- 为实现道路交通领域碳中和，全社会需要在2020年至2060年间累计投入21万亿~83万亿元的低碳投资（包括公共投资与私人投资），用于购置新能源汽车、建设充（换）电与加氢站等基础设施，以及运输结构优化所需的公共交通与货运铁路基础设施投资。

- 中国道路交通领域空气污染物排放将与温室气体排放脱钩，呈现稳步下降趋势。

## 研究问题

快速增长的运输与出行需求，不但增加了中国交通运输部门的温室气体排放，还加剧了能源安全与空气污染等挑战。交通运输部门的温室气体减排对于中国实现碳达峰、碳中和目标，降低能源进口依赖，实现空气污染协同减排，都至关重要。

为化解这一挑战，国务院于2021年10月24日印发《2030年前碳达峰行动方案》，提出了一系列减少道路交通领域温室气体排放的措施，涉及运输工具装备低碳转型、运输结构绿色调整、绿色交通基础设施建设等多方面。该方案指出，交通运输领域绿色低碳行动的目标为“确保交通运输领域碳排放增长保持在合理区间”。这表明，中国交通运输领域碳排放在近期仍存在上升势头。与此同时，全球温室气体排放预测模型表明，为实现《巴黎协定》中全球温升不超过2摄氏度的目标，全球交通运输业的温室气体排放有必要在2020年至2025年之间达到峰值（国际能源署，2021；Gota等，2016；Fransen等，2019）。中国的交通运输温室气体排放仅次于美国和欧盟，因此，交通运输部门的减排对实现《巴黎协定》目标与中国2060年碳中和目标至关重要。

在交通运输部门中，道路交通领域是其最大排放源（生态环境部，2020）。考虑到航空和水运尚未成熟的减排技术与高昂的减排成本，近期动力电池和氢燃料电池技术突破与成本下降为道路交通领域减排带来了新机遇（彭博新能源财经，2021）。为实现《巴黎协定》目标与中国2060年碳中和目标，促进低碳投资与技术创新，实现温室气体减排和空气污染治理的协同效益，中国道路交通领域不仅需要建立明确的中长期减排目标，制定与中长期减排目标相符的减排战略，同时也需要出台具成本经济效益与公共财政可持续性的政策。

为此，本研究基于LEAP模型建立了中国道路交通温室气体排放、污染物排放与减排成本的分析与预测模型，构建了五个情景，分别基于不同减排政策差异化的影响，对中国道路交通的中长期减排趋势进行预测，并识别了具备成本效益的重点减排措施（见执行摘要表1）：

- 基准情景：作为反事实情景，该情景假设新能源汽车推广数量有限，车辆能效无任何提升，以评估基于现状政策延续的减排潜力。
- 现有政策情景：该情景将预测中国在如期完成现有政策目标与相关行业协会目标的前提下所产生的减排潜力。
- 结构优化情景（即更积极的运输结构调整与运营效率提升情景）：在现有政策情景基础上，该情景假设未来客运与货运的运输结构将大幅优化调整，且车辆运营效率（满载率/负载率）将得到显著提升。得益于这些结构优化措施，该情景的未来汽车保有量将是所有情景中最低的。
- 深度电动化情景（即更积极的新能源汽车推广情景）：在现有政策情景基础上，该情景假设新能源汽车[1]渗透率将进一步提高。具体而言，新能源汽车在乘用车新车销量中的占比到2035年达到100%，新能源汽车在货车（包括用于长距离运输与冷链运输的中重型货车）新车销量中的占比到2050年达到100%。
- 深度减排情景：该情景综合结构优化和深度电动化两个情景的假设，确保在不借助碳汇的条件下，实现2060年道路交通领域温室气体排放的碳中和。



执行摘要表 1 | **五个情景的参数假设**

| | 2020年 | 基准情景 | 现有政策情景 | 结构优化情景 | 深度电动化情景 | 深度减排情景 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 运输需求增长与结构优化 | | | | | | |
| 2020年和2060年乘用车保有量（百万辆） | 239（千人170辆） | 506（千人425辆）（112%） | 506（千人425辆）（112%） | 381（千人300辆）（59%） | 506（千人425辆）（112%） | 381（千人300辆）（59%） |
| 2020年和2060年总货运周转量（万亿吨公里） | 11.2 | | | 25.9（131%） | | |
| 货运运输结构（公路货运周转量占比） | 54% | 50%（-4%） | 50%（-4%） | 40%（-14%） | 50%（-4%） | 40%（-14%） |
| 中重型货车单车平均负载重量（吨） | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 11.5（21%） | 9.5 | 11.5（21%） |
| 2020年和2060年中重型货车保有量（百万辆） | 9.5 | 20（111%） | 20（111%） | 12（26%） | 20（111%） | 12（26%） |
| 推广新能源汽车 | | | | | | |
| 2020年和2035年乘用车电动化率（新能源乘用车在乘用车新车销量中的占比） | 16% | 30%（14%） | 50%（34%） | 50%（34%） | 100%（84%） | 100%（84%） |
| 2020年和2050年中重型货车电动化率（新能源中重型货车在中重型货车新车销量中的占比） | 0.6% | 12%（11%） | 50%（即用于城市配送、短倒与区域运输场景的货车和自卸货车）（49%） | 50%（即用于城市配送、短倒与区域运输场景的货车和自卸货车）（49%） | 100%（所有中重型货车，包括用于长距离运输与冷链运输的货车与牵引车）（99%） | 100%（所有中重型货车，包括用于长距离运输与冷链运输的货车与牵引车）（99%） |
| 车辆能效提升 | | | | | | |
| 传统能源乘用车能效 | 新车平均燃料消耗量为5.6升/百公里<br>混合动力乘用车销量占比为3% | 无改善 | 乘用车新车平均燃料消耗量2025年达4升/百公里；<br>混合动力乘用车销量占比2025年达60%，2035年达100% | | | |
| 传统能源中重型货车能效 | 取决于车辆最大总质量 | 无改善 | 中重型货车平均燃料消耗量：2035年比2020年水平降低20% | | | |
| 新能源汽车能效 | 取决于车辆最大总质量 | 无改善 | 基于车辆最大总质量，有不同程度的改进 | | | |
| 上游发电和制氢环节减排 | | | | | | |
| 2020年和2050年发电结构（非化石能源发电占比） | 32% | 75%（43%） | 92%（60%） | | | |
| 2020年和2050年氢气供给结构（灰氢供给占比） | 99% | 35%（-64%） | 15%（-84%） | | | |

说明：对于数字，括号内的百分比为相较于 2020 年基准年的变化比例；对于百分比，括号内的百分比为该年比例与基准年比例之差。

来源：2020 年数据来自统计年鉴，其他数据为作者的情景假设。

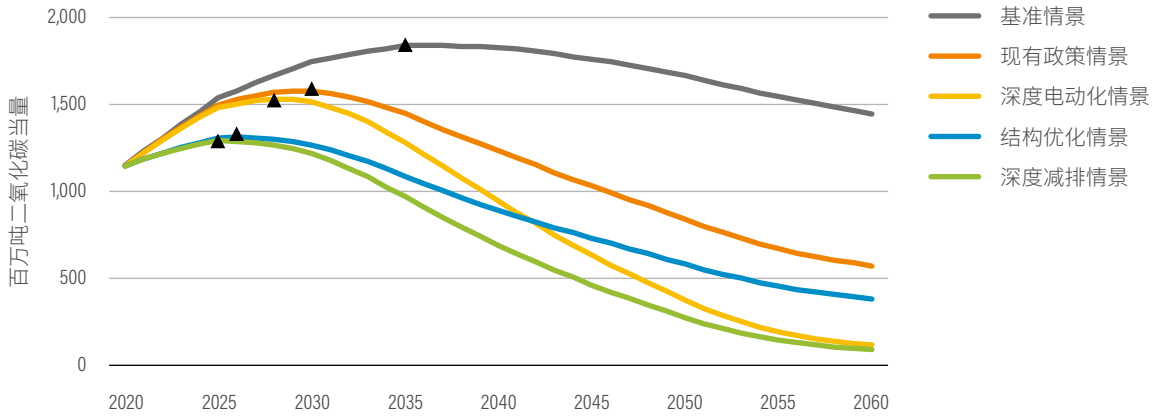
# 研究结果与建议

## 本研究主要结论包括：

首先，**中国道路交通领域温室气体排放量将在2025—2035年达到峰值，道路交通领域石油需求将在2024—2030年达到峰值**（见执行摘要图 1、执行摘要图 2）。受快速增长的运输与出行需求的推动，中国道路交通领域温室气体排放在未来一段时期内都将保持增长的势头。但是，如果现有政策目标与相关行业目标能够如期达成，中国有可能在2030年前实现道路交通温室气体排放达峰，并于2027年前实现道路交通石油消耗量达峰（见现有政策情景）。在此基础上，如果施以更为积极的运输结构优化措施（包括运输结构调整及车辆客运满载率/货运负载率提升措施）与新能源汽车推广措施，中国有望将道路交通温室气体排放与石油消耗量的达峰时间分别提前至2025年与2024年（见深度减排情景）。值得注意的是，与更激进的新能源汽车推广措施相比，更激进的运输结构优化措施有助于温室气体排放更早达峰，且峰值也会更低（见结构优化情景与深度电动化情景）。

其次，**到2060年，道路交通领域温室气体排放量有望比2020年降低50%～95%**（见执行摘要图 1）。其中，如果现有政策目标与相关行业目标能如期达成，2060年道路交通温室气体排放可能在2020年的水平上降低50%（见现有政策情景）。如果采取更为激进的新能源汽车推广措施，2060年道路交通温室气体排放有望在2020年的水平上降低95%，几乎在不借助大量碳汇的前提下，实现碳中和（见深度电动化情景与深度减排情景）。

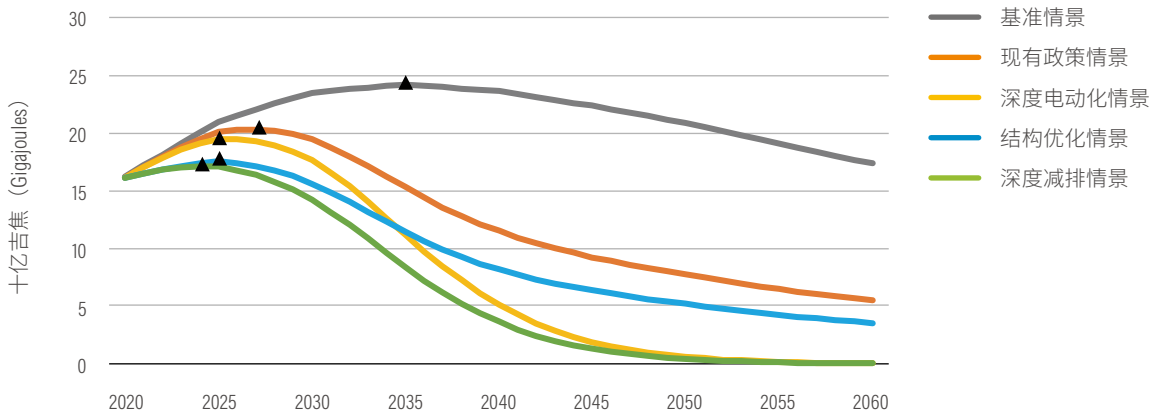
执行摘要图 1 | **不同情景下温室气体排放预测**




说明：本研究所指的温室气体包括二氧化碳、氧化亚氮和甲烷。氧化亚氮和甲烷的全球增温潜势值（global warming potential，简称 GWP）采用政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告中的全球增温潜势值。▲三角形为温室气体排放达峰时间。

来源：作者根据模型测算。

执行摘要图 2 | **道路交通石油消耗量预测**



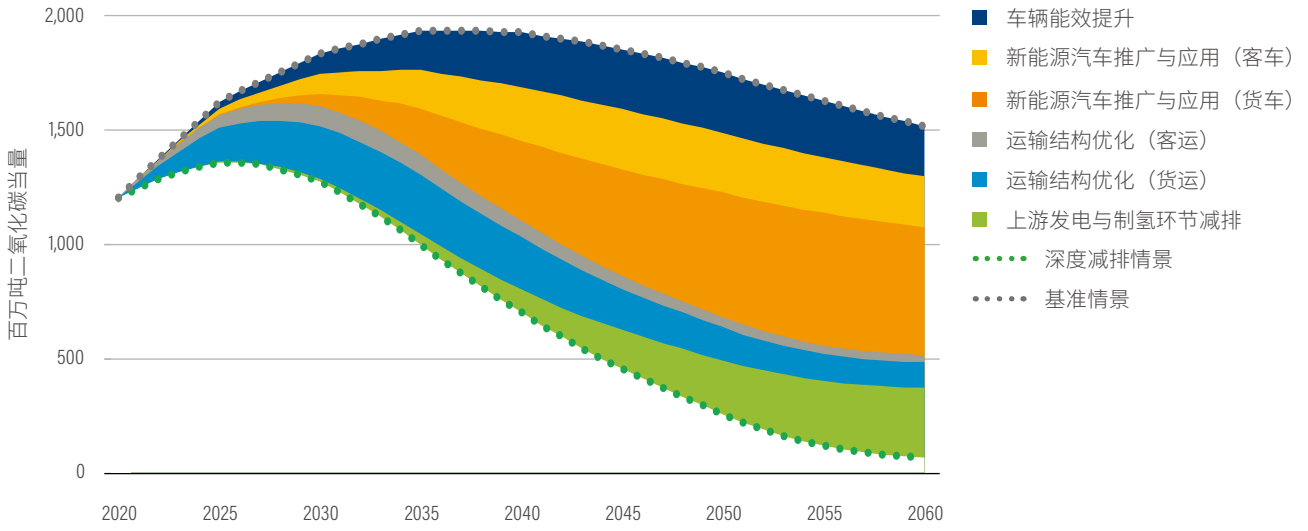

说明：▲三角形为道路交通石油消耗量达峰时间。

来源：作者根据模型测算。

**为实现本研究深度减排情景中95%的累计减排量与道路交通碳中和的目标，新能源汽车推广与应用、运输结构优化及车辆能效提升是三大关键措施（见执行摘要图 3和执行摘要表2）：**

- 众多措施中，新能源汽车推广与应用的减排潜力最大。与基准情景中2020年至2060年的累计排放量相比，深度减排情景中的新能源汽车推广措施有望实现48%的温室气体减排。如果上游电力和制氢部门能够遵循有关政府部门与行业协会制定的减排路线图并在中长期实现行业深度脱碳，则新能源汽车推广措施可较基准情景减排60%。
- 运输结构优化（含客货运运输结构调整及车辆满载率/负载率提升）的减排潜力仅次于新能源汽车推广与应用，有望帮助道路交通实现23%的温室气体减排。值得注意的是，在近期（2020—2035年），运输结构优化的减排潜力最大，甚至高于新能源汽车推广与应用，这主要由于新能源汽车（特别是温室气体排放占比较大的中重型货车）的市场渗透率难以在2030年前实现爆发式增长。
- 车辆能效提升可在2020年至2060年间累计减排17%。另外，从严规定企业平均车辆燃料消耗标准有利于激励新能源汽车的生产；建立新能源商用车能效标准也有利于提升续航里程与降低新成本，加速其推广。

执行摘要图 3 | **各项措施的温室气体减排潜力：从基准情景到深度减排情景**




来源：作者根据模型测算。

执行摘要表 2 | **各项措施的温室气体减排潜力：从基准情景到深度减排情景**

| | 2020—2035年 | | 2035—2060年 | |
|---|---|---|---|---|
| | 年均减排量（百万吨二氧化碳当量/年） | 累计减排量（百万吨二氧化碳当量） | 年均减排量（百万吨二氧化碳当量/年） | 累计减排量（百万吨二氧化碳当量） |
| 车辆能效提升 | 65 | 1,036 | 240 | 6,003 |
| 新能源汽车推广与应用（客车） | 61 | 982 | 239 | 5,970 |
| 新能源汽车推广与应用（货车） | 51 | 821 | 468 | 11,703 |
| 运输结构优化（客运） | 62 | 996 | 52 | 1,302 |
| 运输结构优化（货运） | 167 | 2,679 | 167 | 4,165 |
| 上游发电与制氢环节减排 | 12 | 187 | 196 | 4,899 |

来源：作者根据模型测算。

**天然气汽车技术是否应视为道路交通领域减排技术，并在中重型货车中得到大规模推广，仍有待进一步分析。**从“油箱到车轮”的二氧化碳排放看，天然气货车单车比柴油货车低20%，但由于存在一定甲烷逃逸排放，其温室气体减排效果并不明显：国家第五阶段机动车污染物排放标准（以下简称“国五”标准）中天然气货车的温室气体排放（利用IPCC第五次评估报告20年全球升温潜能值）甚至比柴油货车排放还高，只有替换为国家第六阶段机动车污染物排放标准（以下简称“国六”标准）的天然气货车，且其甲烷排放得到有效控制时，天然气货车的单车温室气体排放才有可能比柴油货车排放低12%。从情景分析看，在深度推广天然气汽车情景下（天然气货车2060年市场渗透率达50%），累计温室气体排放仅比现有政策情景低约3%。

本研究还表明，现有政策在提高车辆能效及（上游）发电与制氢环节减排方面已有雄心勃勃的目标，但在新能源汽车推和运输结构优化方面缺乏明确的中长期发展目标及与之相匹配的措施（见执行摘要表3）。例如，要实现深度减排情景中的减排量，中国道路交通领域需要在以下方面强化现有政策的目标（见执行摘要表 4）：

- 新能源汽车深度推广目标：到2035年，新能源汽车在乘用车销量中占比达100%；到2050年，新能源中重型货车在中重型货车销量占比达100%。
- 运输结构优化目标：到2060年，千人乘用车保有量达300辆，绿色出行量在总出行量占比75%～85%；公路货运周转量在货运运输结构占比40%；中重型货车运输效率改善，单车平均负载重量不低于11.5吨。

此外，为使**道路交通领域最终能够实现碳中和目标，要求货运行业的减排量比客运行业的减排量更大。**通过货车电动化和货运结构优化，公路货运需要在2020年至2060年之间累计减少193.7亿吨二氧化碳当量排放。与之相比，客运所需的累计减排量为92.5亿吨二氧化碳当量，仅为货运减排量的一半左右。为最大程度挖掘公路货运的减排潜力，中国不仅需要在长途运输和冷链运输应用场景内的新能源中重型货车车辆装备方面做出的技术突破，还需要完善货运相关统计体系以支撑更加精细化的决策，以便强化在新能源货车推广与货运结构优化方面的政策扶持力度。

不同政策情景下，2020—2060年道路交通减排需要的低碳投资额累计高达39万亿～83万亿元，其低碳投资需

执行摘要表 3 | **现有政策情景的目标**

| | 运输结构优化 | 新能源汽车推广与应用 | 车辆能效提升 | 上游发电与制氢环节减排 |
|---|---|---|---|---|
| 客运运输 | 到2060年，千人乘用车保有量为425辆，绿色出行量在总出行量中占比70%<br>（《绿色出行行动计划（2019—2022年）》，清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020） | 到2035年，新能源乘用车销量在乘用车销量中占比达50%<br>（《节能与新能源汽车技术路线图2.0》）；<br>到2060年，新能源乘用车销量在乘用车销量中占比100%<br>（本研究假设） | 到2025年，乘用车平均燃料消耗量为4升/百公里，混合动力汽车销量在乘用车销量中占比60%；到2035年，混合动力汽车销量在乘用车销量中占比达100%<br>（第五阶段乘用车燃料消耗量标准、《节能与新能源汽车技术路线图2.0》） | 到2050年，非化石能源在全国发电结构中占比达92%<br>（清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020） |
| 货运运输 | 公路周转量在运输结构中占比50%；中重型货车单车平均负载为9.5吨<br>（本研究基于《2030年前碳达峰方案》、《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》、《推进多式联运发展优化调整运输结构工作方案（2021—2025年）》等文件假设） | 到2030年，新能源中重型货车销量在货车销量中占比达12%；到2050年，新能源中重型货车销量在货车销量中占比达50%<br>（本研究假设） | 到2035年，中重型货车燃料消耗量将比2020年水平低20%<br>（《节能与新能源汽车技术路线图2.0》） | 到2050年，灰氢在氢气供给结构中占比不高于15%<br>（中国氢能联盟，2019） |

来源：作者根据有关政策与文献假设。

执行摘要表 4 | **实现深度减排的关键目标与加强措施**

| | 运输结构优化 | 新能源汽车推广与应用 | 车辆能效提升 | 上游发电与制氢环节减排 |
|---|---|---|---|---|
| 客运运输 | | | | |
| 关键目标 | 到2060年，千人乘用车保有量达300辆，绿色出行量在总出行量中占比75%～85% | 到2035年，新能源汽车销量在乘用车销量中占比达100% | 与现有政策情景一致 | 与现有政策情景一致 |
| 加强措施 | • 转变公共交通服务方式，提升公共交通服务质量<br>• 新增高铁、公共交通、步行、自行车等绿色出行基础设施投资<br>• 采取交通需求管理政策<br>• 通过出行即服务（Mobility as a Service，简称MaaS），促进共享出行与绿色出行一体化整合 | • 提高乘用车燃料消耗标准<br>• 为新能源乘用车提供优先路权（如推行零排放区政策）<br>• 提高充（换）电网络覆盖度和便利性<br>• 引入碳定价机制 | 无 | 无 |
| 货运运输 | | | | |
| 关键目标 | 公路货运周转量在货运运输结构中占比40%；中重型货车平均负载重量为11.5吨 | 到2050年，新能源中重型货车在中重型货车销量中占比达100% | 与现有政策情景一致 | 与现有政策情景一致 |
| 加强措施 | • 提高大宗商品长距离铁路和水路运输比例，促进高附加值货品的集装箱多式联运<br>• 开展铁路、水路基础设施投资与设备升级，提升各铁路段衔接能力和换装分拨效率，合理调整运价与运输时间，完善最后一公里接驳<br>• 鼓励网络货运平台、无车承运人和甩挂运输，提升公路运输效率<br>• 借助燃油税和道路收费等经济激励手段，引导货运运输结构调整 | • 提高新能源中重型货车购置补贴，引入运营补贴<br>• 建立轻型货车和重型货车燃料消耗标准与“积分”制度<br>• 建立基于二氧化碳排放的道路收费体系<br>• 为新能源货车提供优路权（如推行零排放区政策）<br>• 提高充（换）电和加氢基础设施网络覆盖度和便利性 | 无 | 无 |

来源：作者假设。

求主要集中于近期，到2035年左右达到“拐点”，并逐步下降（见执行摘要图 4和执行摘要表 5）。此外，结构优化情景的单位减排成本最低，为675元/吨二氧化碳当量；深度电动化情景的单位减排成本最高，为2,510元/吨二氧化碳当量。虽然深度电动化情景与深度减排情景均能实现碳中和的目标，但得益于结构优化带来的更低的机动车保有量，深度减排情景的低碳投资额会比深度电动化情景低一半。

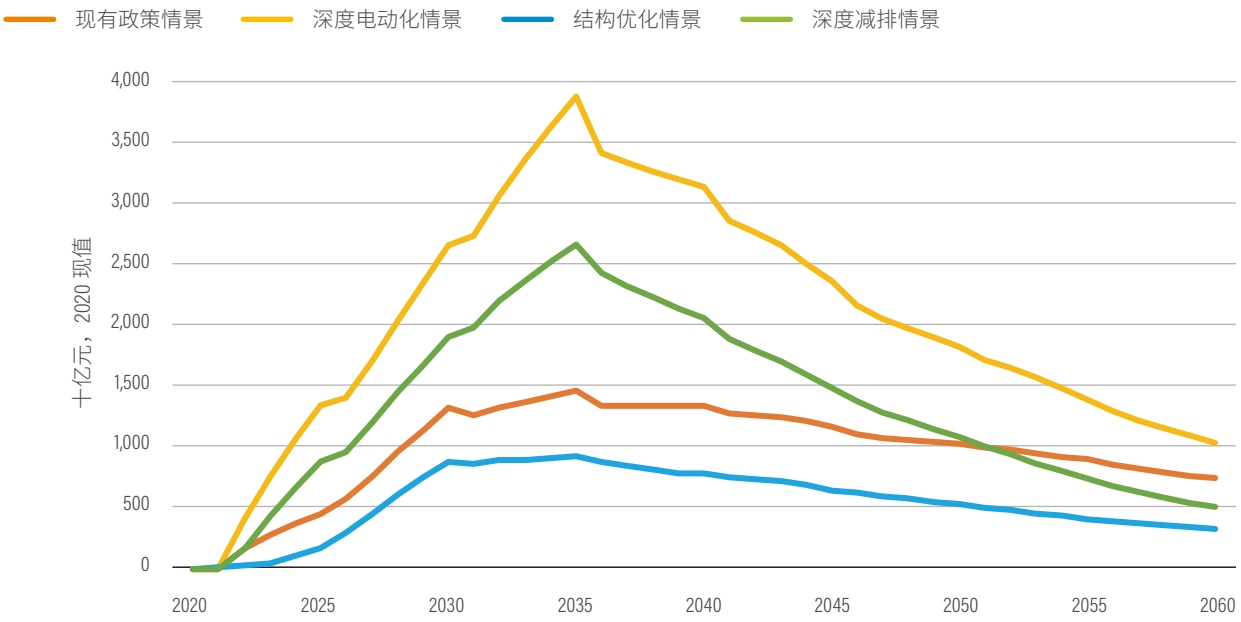
在所有减排措施中：

- 运输结构优化的减排成本是最低的：这意味着更低的全社会汽车保有量能够有效地节约全社会在以下领域的投资，包括新增发电与制氢装机投资、输配电电网扩容投资、停车场投资，以及车辆购置与充（换）电站、加氢基础设施投资等。

- 新能源汽车推广与应用的单位减排成本在近期是最高的。但是，随时间推移，特别是当新能源中重型货车的总拥有成本在2030—2035年间与柴油货车总拥有成本达到平价点后，其减排成本会逐渐下降，并开始较基准情景呈现成本节约的优势。

**“国六”标准[2]出台后，道路交通空气污染物排放将稳步下降，与其温室气体的近期持续增长趋势相脱钩**（见执行摘要图5）。然而，“国六”标准的道路交通减污潜力主要集中于2030年前，2030年后，所有车辆更新替换为“国六”标准车辆，其减污潜力将进入“平台期”。届时，温室气体减排措施（如新能源汽车推广与应用和运输结构优化）的污染物协同减排效应将逐渐显现，成为进一步降低道路交通污染排放的重要举措。同时，为确保这些温室气体减排措施能产生减少空气污染的协同效益，需采取一揽子保障措施，包括推动上游发电与制氢环节的减排、加速铁路运输电气化、提升铁路（水路）运输效率、加强（“国六”标准）在用车辆尾气排放监管等（见执行摘要表6）。

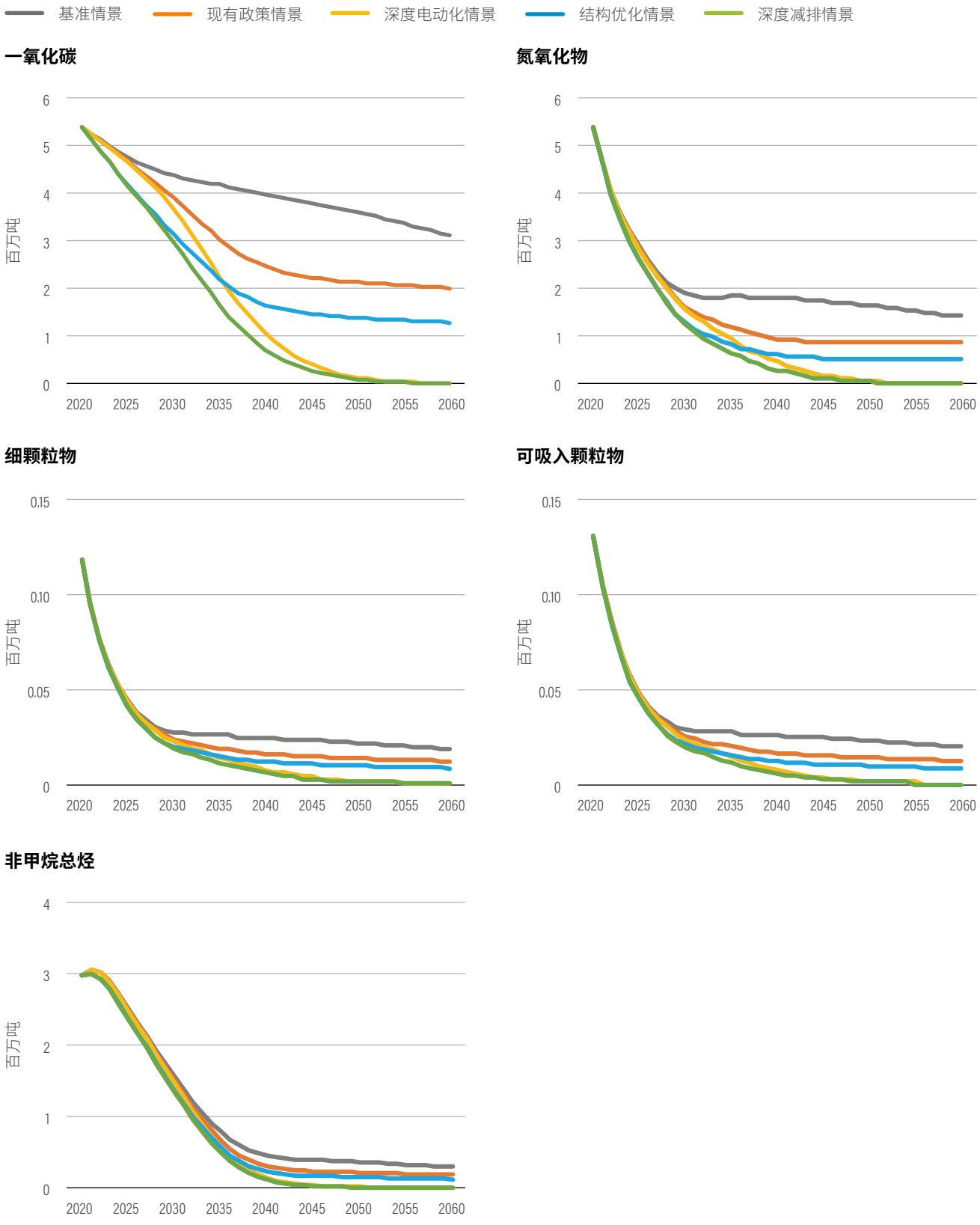
执行摘要图 4 | **不同情景下低碳投资需求量**




执行摘要表 5 | **不同情景下的低碳投资需求量**

| | 现有政策情景 | 深度电动化情景 | 结构优化情景 | 深度减排情景 |
|---|---|---|---|---|
| 2020—2060年累计低碳投资额（十亿元，2020年现值） | 39,503 | 83,896 | 22,070 | 54,226 |
| 单位减排成本（元/吨二氧化碳当量） | 1,852 | 2,510 | 675 | 1,331 |

来源：作者根据模型计算。


基准情景
现有政策情景
深度电动化情景
结构优化情景
深度减排情景
一氧化碳
氮氧化物
细颗粒物
可吸入颗粒物
非甲烷总烃
百万吨
0
1
2
3
4
5
6
0.05
0.10
0.15
2020
2025
2030
2035
2040
2045
2050
2055
2060

来源：作者根据模型测算。

执行摘要表 6 | **不同减排措施的协同减排效应**

| | 文献 | 协同减排效应 | 政策建议 |
|---|---|---|---|
| 提高车辆能效 | 本研究 | 🟡 车辆能效提升措施：减少温室气体排放，对空气污染物排放影响为中性 | -- |
| | O'Driscoll等，2018 | 🟢 混合动力技术（汽油）：减少温室气体和空气污染物排放 | 推广混合动力汽车（汽油车） |
| | Liang等，2012；Saliba等，2017；O'Driscoll等，2018 | 🟡 发动机缸内直喷（GDI）技术：减少温室气体排放，增加空气污染物排放 | 实施“国六”标准，加强在用汽车尾气排放检验 |
| 推广天然气汽车 | 本研究；Mottschall等，2020；Transport & Environment，2020 | 🟡 推广天然气汽车：“国五”天然气货车增加温室气体排放，减少空气污染物排放 | 对天然气货车甲烷（逃逸）排放进行严格监管，加强在用车辆检验 |
| 推广新能源汽车 | 本研究 | 🟢 推广新能源汽车：减少温室气体排放和空气污染物排放 | -- |
| | Peng等，2021 | 🟡 推广新能源汽车：减少温室气体排放，增加（上游）空气污染物排放 | 与可再生发电相匹配的新能源汽车推广 |
| 调整客运运输结构 | 本研究 | 🟢 客运运输结构调整：减少温室气体和空气污染物排放 | -- |
| 调整货运运输结构 | 本研究 | 🟢 货运运输结构调整：减少温室气体和空气污染物排放 | -- |
| | Shao，2020 | 🟡 公转铁：减少温室气体排放，增加（上游）空气污染物排放 | 加速推进铁路电气化，推动上游发电环节减排，降低铁路货运的回程空驶率 |

说明：绿色🟢表示该措施既可以减少温室气体排放，也可以减少空气污染物排放，黄色🟡表示改措施不协同，只能减少温室气体排放或污染物排放。

来源：作者根据文献总结。




天坛
天坛东路

# EXECUTIVE SUMMARY

## HIGHLIGHTS

- China's road transport greenhouse gas (GHG) emissions will continue growing. However, if China implements its stated policies, road transport emissions could peak before 2030 and petroleum consumption before 2027. The peaking timeline for GHG emissions could be further advanced to 2025 and that for petroleum consumption to 2024 if China takes more proactive structural change measures (including mode shift and vehicle occupancy improvements).
- If China implements all its stated policies, road transport's GHG emissions in 2060 would decline by 50 percent from the 2020 level. Further, if radical structural changes and vehicle electrification occur, road transport's GHG emissions in 2060 would reduce by 95 percent from 2020's level, fulfilling China's 2060 carbon neutrality commitment.
- Over the long term, vehicle electrification offers the largest decarbonization potential, followed by structural changes, fuel efficiency improvements, and the decarbonization of power and hydrogen generation sectors. However, structural changes have the largest decarbonization potential in the near term (from now until 2035).
- Public and private investments of 39–83 trillion Chinese yuan (CNY) cumulatively are needed from 2020 to 2060 to decarbonize China's road transport sector.
- Air pollutant emissions from China's road transport sector will decouple from GHG emission trajectories, demonstrating a steady declining trend.

## Research Problem

Decarbonizing the transport sector globally is necessary to meet the Paris Climate Agreement goal of limiting warming to below 2 degrees Celsius (°C) or the more ambitious 1.5°C target. For China, doing so is also critical for meeting the country's goals of peaking carbon dioxide emissions before 2030 and being carbon neutral by 2060. Further, historical and projected trends for growth in China's road transport sector demand have raised concerns over national energy security and local air pollution.

At present, transport sectoral emission reduction targets and mitigation actions compatible with the carbon neutrality target have not yet been established. As indicated by the *Action Plan for Carbon Dioxide Peaking before 2030*, released by China's State Council on October 26, 2021, petroleum consumption from the road transport sector should peak before 2030, with a goal to "keep the growth of carbon emissions in the transportation domain within an appropriate range" (NDRC 2021). This indicates that China's transport emissions probably will not peak before 2030. However, existing modelling studies suggest that to meet the 2-degree (or 1.5-degree) goal, global transport emissions need to peak around 2020–25 (IEA 2021a; Gota et al. 2018; Fransen et al. 2019).

Within the transport sector, road transport represented the largest share—84.1 percent—of transport-related GHG emissions in China in 2014 (MEE 2020a). To meet its carbon neutrality goal, China's road transport sector needs explicit sectoral emission reduction targets, actionable strategies, and cost-effective policy instruments. This study examines how the sector might be decarbonized to inform the following:

- The road transport sector's target setting to help achieve China's carbon peaking and neutrality goals
- Identification of cost-effective measures that deliver on the sectoral emission reduction targets, facilitate low-carbon investments, and drive technological innovation
- Identification of decarbonization measures with air pollution reduction co-benefits

Using the Low Emissions Analysis Platform (LEAP) model, we constructed and analyzed the results of the following five forecasting scenarios (Table ES-1):

- The Business as Usual (BAU) scenario is a counterfactual scenario, representing no improvement in energy efficiency and limited degrees of vehicle electrification to help evaluate the emissions reduction potential of China's stated policies and the consequences of not meeting these targets.
- The Stated Policy scenario ("Stated_policy") is based on the stated policies announced by the national government and intended actions from industrial associations.
- The Structural Change scenario ("Low_stock") assumes greater degrees of transport structural changes (through two measures—mode shift and vehicle occupancy improvements), thereby featured by smaller vehicle stocks.
- The Deep Electrification scenario ("DeepELE") assumes more rapid diffusion of new energy vehicles[i] (NEVs), with NEV passenger cars representing 100 percent of passenger car sales by 2035 and NEV medium- and heavy-duty trucks (HDTs) representing 100 percent of HDT sales by 2050.
- The Deep Decarbonization scenario ("DeepDecarb") integrates the Low_stock and DeepELE scenarios. Therefore, the scenario represents the most ambitious case that is compatible with China's 2060 carbon neutrality target.



Table ES-1 | **Key Parameters in the Five Forecasting Scenarios**

| | 2020 | BUSINESS AS USUAL (BAU) | STATED POLICY (Stated_policy) | STRUCTURAL CHANGE (Low_stock) | DEEP ELECTRIFICATION (DeepELE) | DEEP DECARBONIZATION (DeepDecarb) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Demand and Structural Change** | | | | | | |
| **Passenger car stock in 2020 and 2060** (million vehicles) | 239 (170 cars per 1,000 persons) | 506 (425 cars per 1,000 persons) | 506 | 381 (300 cars per 1,000 persons) | 506 | 381 |
| **Freight tkm in 2020 and 2060** (trillion tkm) | 11.2 | | | 25.9 | | |
| **Freight mode share in 2020 and 2060** (% of road freight in domestic tkm) | 54% | 50% | 50% | 40% | 50% | 40% |
| **Freight average load in 2020 and 2060** (tonnes per vehicle kilometer) | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 11.5 | 9.5 | 11.5 |
| **HDT stock in 2020 and 2060** (million vehicles) | 9.5 | 20 | 20 | 12 | 20 | 12 |
| **Vehicle electrification** | | | | | | |
| **Passenger car electrification in 2020 and 2035** (% of NEVs in passenger car sales) | 15.7% | 30% | 50% | 50% | 100% | 100% |
| **HDT electrification in 2020 and 2050** (% of NEVs in HDT sales) | 0.6% | 12% | 50% (only HDTs operating in urban deliveries, drayage, and regional delivery duty cycles) | 50% (only HDTs operating in urban deliveries, drayage, and regional delivery duty cycles) | 100% (all HDTs, including long-haul and refrigerated HDTs) | 100% (all HDTs, including long-haul and refrigerated HDTs) |
| **Fuel efficiency** | | | | | | |
| **ICE passenger cars** | Fleet average: 5.6 L/100 km Hybrid: 2.6% of car sales | No improvement | Fleet average: 4 L/100 km Hybrid: 60% of car sales in 2025, 100% in 2035 | | | |
| **ICE HDTs** | *(Depends on gross vehicle weight)* | No improvement | HDTs: 20% improvement in 2035 | | | |
| **NEVs** | *(Depends on gross vehicle weight)* | No improvement | (*Various degrees of improvement based on gross vehicle weight*) | | | |
| **Grid and hydrogen decarbonization** | | | | | | |
| **Power mix in 2020 and 2050** (% of non-fossil fuels in power mix) | 32% | 75% | 92% | | | |
| **Hydrogen mix in 2020 and 2050** (% of gray hydrogen in production mix) | 99% | 35% | 15% | | | |

*Abbreviations:* tkm = tonne-kilometer; HDT = heavy-duty truck; NEV = new energy vehicle; ICE = internal combustion engine; L = liter; km = kilometer.
*Source:* WRI authors' assumptions.

## Research Findings

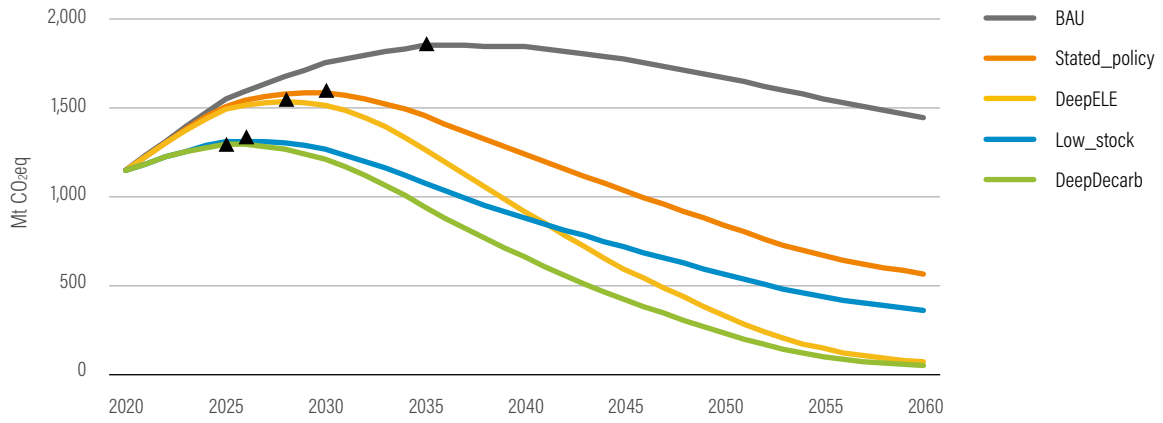
Our models indicate the following: First, road transport GHG emissions in China would peak during 2025–35, and petroleum demand would peak during 2024–30 under all scenarios except for Business as Usual. Driven by increasing travel demand, China's road transport GHG emissions would continue growing. Nonetheless, **if China implements its stated policies (the Stated_policy scenario), road transport emissions could peak before 2030 and petroleum consumption before 2027** (Figure ES-1). **The peaking timeline for GHG emissions would be advanced to 2025 and that for petroleum consumption to 2024 at the earliest if China takes more proactive structural change measures that include mode shifting to low-emitting modes as well as increasing vehicle occupancy** (DeepELE, Low_stock, and DeepDecarb scenarios). In the near term, structural changes are more effective at peaking emissions earlier and reducing emissions to a greater extent than vehicle electrification.

Second, over the long term, under different policy scenarios, the country can reduce road transport GHG emissions in 2060 by about 50–95 percent from the base year (2020). Specifically, **if China implements its stated policies, its road transport GHG emissions in 2060 would decline by 50 percent from 2020's level (the Stated_policy scenario). Further, if a radical shift in vehicle technologies and structural changes is made, road transport GHG emissions in 2060 would be reduced by 95 percent from the 2020 level, realizing China's 2060 carbon neutrality commitment** (the DeepDecarb scenario) (Figure ES-1).

**To achieve the largest emission reduction potential of 95 percent by 2060 in the DeepDecarb scenario, four measures—namely, vehicle electrification, structural changes, fuel efficiency improvements, and power and hydrogen decarbonization—are critical** (Figure ES-2 and Table ES-2):

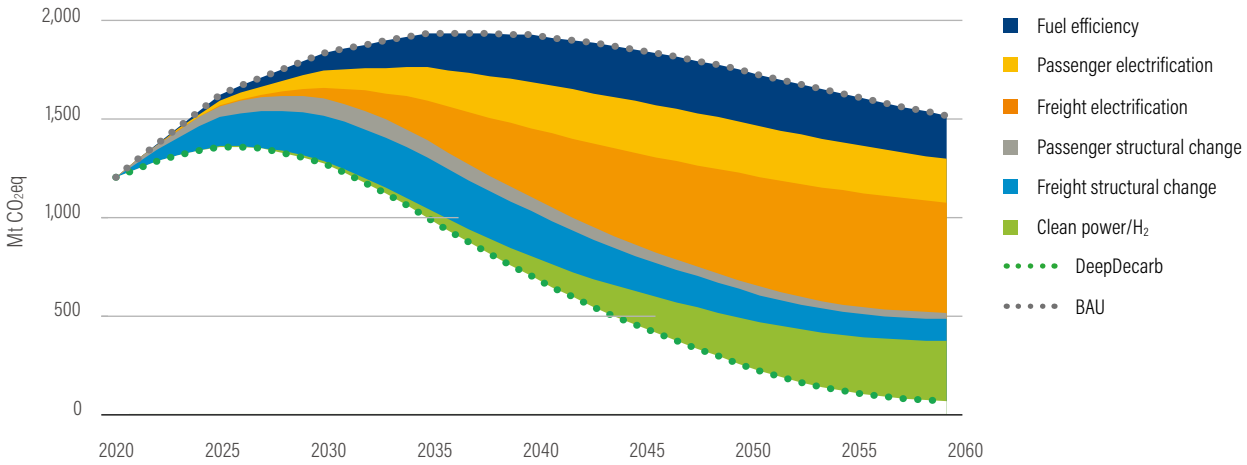
- **Vehicle electrification has the largest decarbonization potential, contributing 48 percent of the cumulative GHG emission reduction** from the BAU scenario to the DeepDecarb scenario during 2020–60. If the decarbonization of the power and hydrogen-related sectors follows the roadmaps outlined by the national government and industrial associations, vehicle electrification could yield a cumulative 60 percent emission reduction.
- **Structural changes have the second-largest mitigation potential and can cut cumulative GHG emissions from 2020 to 2060 by 23 percent. Of note, in the near term (2020–35), structural changes have the largest mitigation potential** because vehicle electrification is not likely to reach the tipping point during this time frame.

Figure ES-1 | **GHG Emission Projections under Different Scenarios**




*Note:* Greenhouse gases include carbon dioxide, nitrous oxide ($N_2O$), and methane ($CH_4$). $N_2O$ and $CH_4$ use 20-year global warming potential (GWP) values from IPCC (2014).
*Abbreviation:* Mt $CO_2$eq = million tonnes of carbon dioxide equivalent.

Figure ES-2 | **GHG Reduction Potentials of Key Decarbonization Interventions**




*Abbreviations:* Mt $CO_2$eq = million tonnes of carbon dioxide equivalent; DeepDecarb = Deep Decarbonization scenario; $H_2$ = hydrogen; BAU = Business as Usual scenario.
*Source:* WRI authors' calculations using the Low Emissions Analysis Platform model.

- **Fuel efficiency improvements can generate 17 percent of the cumulative emission reduction during 2020–60.** Further, tightening the fleet-wide fuel efficiency standard is instrumental to stimulating NEV production, while NEV energy efficiency improvements help improve NEVs' driving ranges as well as reduce vehicle weights and costs.

**Whether natural gas (NG) vehicles should be treated as a viable decarbonization solution is worth further scrutiny.** Although the carbon dioxide ($CO_2$) emissions from NG vehicles are around 20 percent lower than those of diesel- and gasoline-powered vehicles, they have limited GHG emissions savings due to methane escape from NG vehicles (such as crankcase emissions or dynamic venting of the fuel system). This study shows that because of large methane leakage, an NG heavy-duty truck meeting the China 5 emission standard would tend to have higher tank-to-wheel GHG emissions than its diesel counterpart. Only when the China 6 emission standard is stringently enforced would a China 6 NG heavy-duty truck reduce tank-to-wheel GHG emissions by up to 12 percent. In the scenario analysis, when the market share of China 6 NG heavy-duty trucks rises to 50 percent in 2050 in the Stated_policy scenario (compared with the original 15 percent), the wider adoption of NG trucks would lead to an additional 7 percent GHG emission reduction in 2060 and less than a 3 percent cumulative GHG emission reduction from 2020 to 2060, compared with the Stated_policy scenario.

This study further reveals that for China to achieve its carbon neutrality goal, **its stated policies need to include increased ambition on structural changes and vehicle electrification** (Table ES-2):

- For structural changes, a 75–85 percent green transport mode share for passenger transport, 40 percent road freight in the mode split for domestic tonne-kilometers (tkm), and an average 11.5 tonne load per truck-kilometer

- For vehicle electrification, NEVs would represent 100 percent of passenger car sales by 2035 and 100 percent of HDT sales by 2050

**Reaching China's carbon neutrality target has more pronounced implications for freight transport than it does for passenger transport.** The DeepDecarb scenario shows that road freight transport could reduce GHG emissions by a cumulative 19,367 million tonnes of carbon dioxide equivalent (Mt $CO_2$eq) from 2020 to 2060 compared with the BAU scenario, over two times the cumulative emission reduction associated with road passenger transport (9,250 Mt $CO_2$eq). To unlock road freight's decarbonization potential, China needs to make technology advances in long-haul HDTs and refrigerated HDTs, promote freight mode shifts to railways and waterways, and improve freight logistic efficiency. China also needs to significantly improve its freight statistical data

Table ES-2 | **Key Targets and Policy Interventions to Realize the Carbon Neutrality Commitment**

| | STRUCTURAL CHANGES | VEHICLE ELECTRIFICATION | FUEL EFFICIENCY IMPROVEMENTS | POWER AND HYDROGEN DECARBONIZATION |
|---|---|---|---|---|
| **Targets in the Stated_policy scenario** | | | | |
| **Passenger transport** | ***Targets:***<br>425 cars per 1,000 persons, 70% green transport mode share in 2060[a] | ***Targets:***<br>By 2035: NEVs represent 50% of passenger car sales[b]<br>By 2060: NEVs represent 100% of car sales[c] | ***Targets:***<br>By 2025: Fleet-average fuel consumption for passenger cars of 4 L/100 km; hybrid vehicles represent 60% of passenger car sales (100% in 2035)[d]<br>By 2025: NEVs' energy efficiency of 12 kWh/100 km[e] | ***Targets:***<br>By 2050: 92% of non-fossil fuel in power mix[f] |
| **Freight transport** | ***Targets:***<br>50% of road freight in domestic tkm; average load: 9.5 tonnes per vehicle-kilometer[g] | ***Targets:***<br>By 2050: NEVs represent 50% of HDT sales (that is, the HDTs operating in urban deliveries, drayage, and regional delivery duty cycles)[h] | ***Targets:***<br>By 2035: 20% improvement in HDTs' fuel consumption[i]<br>Continuous improvement in NEVs' energy efficiency | ***Targets:***<br>By 2050: 15% of gray hydrogen in production mix[j] |
| **Targets and policies in the DeepDecarb scenario** | | | | |
| **Passenger transport** | ***Targets:***<br>300 cars per 1,000 persons, 75–85% green transport mode share in 2060 | ***Targets:***<br>NEVs represent 100% of passenger car sales in 2035 | Same targets as the Stated_policy scenario | Same targets as the Stated_policy scenario |
| | ***Tactics:***<br>▪ Shift transit service paradigm with intelligent demand responsive services<br>▪ Increase the share of infrastructure investments in transit, active mobility, and railway<br>▪ Pursue travel demand management and carbon pricing<br>▪ Promote Mobility-as-a-Service and ride sharing | ***Tactics:***<br>▪ Enhance fleet-wide fuel consumption standard<br>▪ Provide road access privileges to NEVs<br>▪ Increase infrastructure accessibility<br>▪ Introduce carbon taxes | | |
| **Freight transport** | ***Targets:***<br>40% of road freight in domestic tkm; average load = 11.5 tonnes per HDT vehicle-kilometer | ***Targets:***<br>NEVs represent 100% of HDT sales in 2050 (HDTs for short-range and long-range duty cycles) | Same targets as the Stated_policy scenario | Same targets as the Stated_policy scenario |
| | ***Tactics:***<br>▪ Shift bulk commodities to railways and waterways and promote intermodal freight for high-value freight<br>▪ Invest in intermodal infrastructure and equipment, improve service connectivity, rationalize pricing and scheduling, and enhance first-/last-mile truck delivery<br>▪ Encourage the use of non-truck operating carriers and facilitate drop-and-hook operations<br>▪ Employ fuel taxes and road charges | ***Tactics:***<br>▪ Increase vehicle acquisition and introduce operation subsidies<br>▪ Introduce fleet-wide fuel consumption standard for HDTs<br>▪ Introduce $CO_2$-emission indexed road pricing<br>▪ Provide road access privileges<br>▪ Increase infrastructure accessibility | | |

*Note:* [a.] Extrapolated by the authors based on NDRC (2021). [b.] China SAE 2020. [c.] Extrapolated by the authors. [d.] MIIT 2019, 2021; China SAE 2020. [e.] State Council 2020. [f.] ICCSD 2020. [g.] Extrapolated by the authors based on NDRC (2021). [h.] Extrapolated by the authors. [i.] China SAE 2020. [j.] CHA 2019.

collection system to support evidence-based policymaking in the above areas.

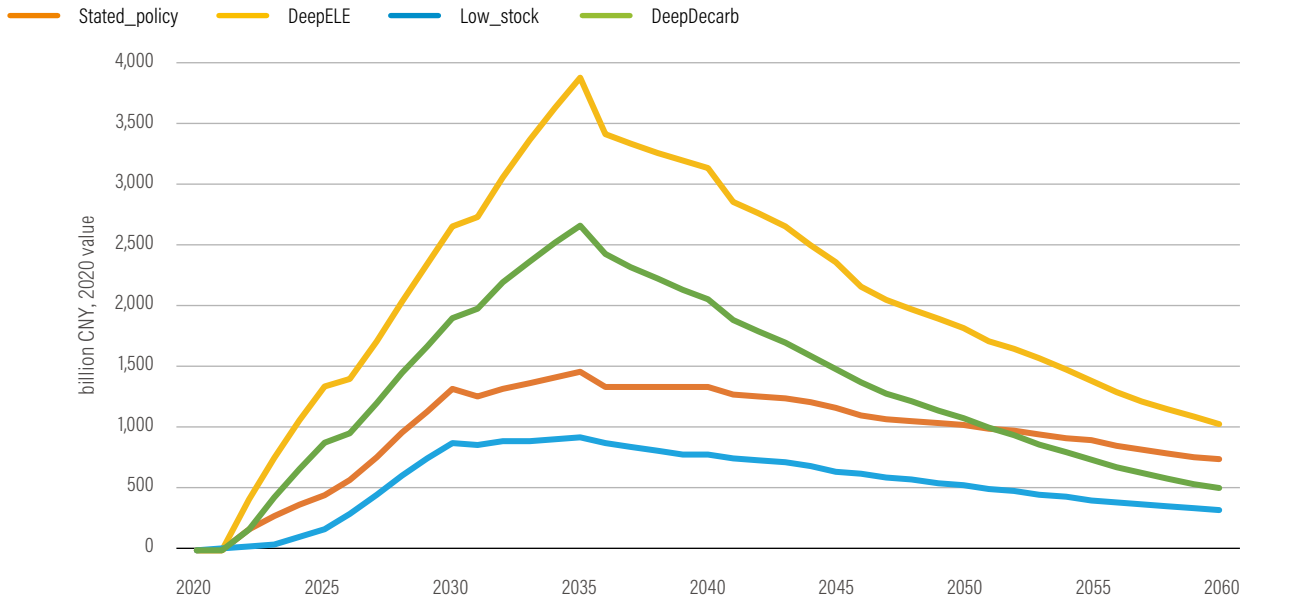
The results show that **low-carbon investments amounting to 39–83 trillion CNY cumulatively are needed from 2020 to 2060 to decarbonize China's road transport sector.** The investment demand is the largest from now till 2035 and will steadily decline over time. Among all the scenarios, **the Low_stock scenario is the lowest-cost pathway**, with an average abatement cost of 675 CNY per tonne of $CO_2$eq reduced thanks to an associated smaller vehicle fleet (Figure ES-3).

Structural changes are the least-expensive measure among all the decarbonization measures because a smaller vehicle fleet size reduces needed investments in installed capacities for power and hydrogen generation and transmission as well as investments in vehicle acquisition and charging (and refueling) infrastructure expansion.

Vehicle electrification's abatement costs vary significantly over time. Only after the total cost of ownership parity for NEV heavy-duty trucks is reached (around 2030–35) will NEVs exhibit net cost savings compared with internal combustion engine (ICE) vehicles. However, the high abatement costs of vehicle electrification should not deter relevant investments.

After the introduction of the China 6 emission standard[ii] (hereafter referred as the China 6 standard), **road transport's air pollutant emissions would decouple from GHG emissions trajectories,** showing a steady

Figure ES-3 | **Low-Carbon Investments (2020–60) under Different Scenarios**

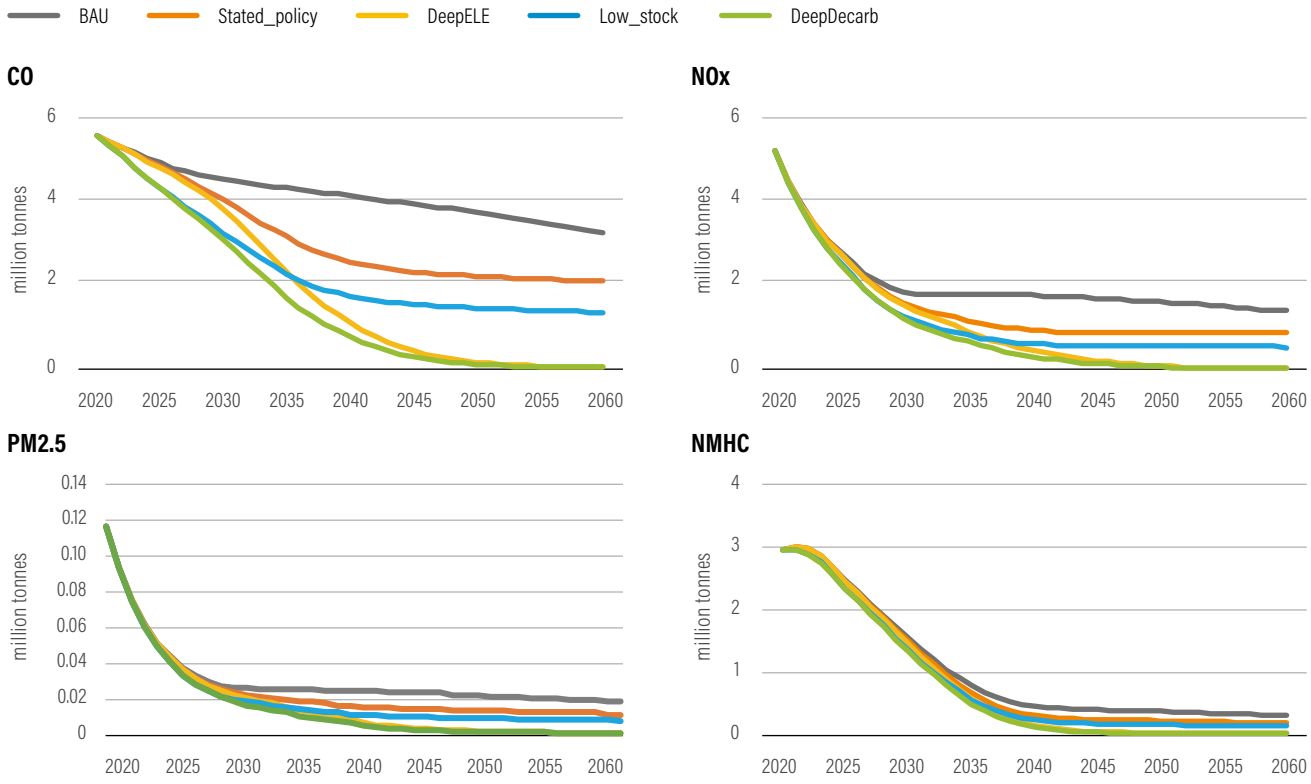



| | Stated_policy | DeepELE | Low_stock | DeepDecarb |
|---|---|---|---|---|
| **Cumulative low-carbon investments** (billion CNY, 2020 value) | 39,503 | 83,896 | 22,070 | 54,226 |
| **Average abatement cost** (CNY per tonne of $CO_2$eq reduced) | 1,852 | 2,510 | 675 | 1,331 |

*Abbreviations:* CNY = Chinese yuan; $CO_2$eq = carbon dioxide equivalent; Stated_policy = Stated Policy scenario; DeepELE = Deep Electrification scenario; Low_stock = Structural Change scenario; DeepDecarb = Deep Decarbonization scenario.
*Source:* WRI authors' calculations using the Low Emissions Analysis Platform model.

declining trend (Figure ES-4). **Despite this achievement, air pollution abatement efforts should be sustained** because non-road transport sectors such as inland waterways and non-road machinery also contribute significant amounts of air pollutants, and the next-generation China exhaust emission standard (such as a Euro 7 equivalent standard) would be conducive to accelerating NEV adoption. This study further shows that for the aforementioned decarbonization measures to produce air pollution reduction co-benefits, additional measures are necessary, including improving railways and waterways' freight operational efficiency, promoting railway electrification, tightening the China 6 standard, and improving in-use vehicles' inspection/maintenance programs (Table ES-3).

Figure ES-4 | **Air Pollutant Emissions from the Road Transport Sector**




*Abbreviations:* CO = carbon monoxide; NOx = nitrogen oxides; PM2.5 = particulate matter 2.5 micrometers or less in diameter; NMHC = non-methane hydrocarbons.
*Source:* WRI authors' calculations using the Low Emissions Analysis Platform model.





Table ES-3 | **The Co-control Effects of Different Decarbonization Measures**

| | RESEARCH | CO-CONTROL EFFECTS | POLICY IMPLICATIONS |
|---|---|---|---|
| **Fuel efficiency standards** | This study | 🟡 **General fuel efficiency measures:** Reduce GHG emissions, neutral to air pollutants | -- |
| | O'Driscoll et al. 2018 | 🟢 **Hybrid (gasoline) vehicles:** Reduce GHG emissions and air pollutants | Promote hybrid (gasoline) vehicles |
| | Liang et al. 2012<br>Saliba et al. 2017<br>O'Driscoll et al. 2018 | 🟡 **Gasoline direct injection:** Reduce GHG emissions but increase air pollutants | Enforce China 6 standard and enhance inspection/ maintenance programs for in-use vehicles |
| **NG vehicle promotion** | This study<br>Mottschall et al. 2020<br>T&E 2020a | 🟡 **NG vehicles:** Possibly increase GHG emissions, reduce/ neutral to air pollutants | Tighten China 6 standard on non-tailpipe $CH_4$ emissions from NG vehicles, enhance inspection/ maintenance programs |
| **NEV promotion** | This study | 🟢 **NEV promotion:** Reduce GHG emissions and air pollutants | -- |
| | Peng et al. 2021 | 🟡 **NEVs and upstream emissions:** Reduce GHG emissions, increase upstream air pollutants | Couple NEV promotion with the decarbonization of the upstream power and industrial sector |
| **Passenger structural changes** | This study | 🟢 **Passenger structural changes:** Reduce GHG emissions and air pollutants | -- |
| **Freight structural changes** | This study | 🟢 **Freight structural changes:** Reduce GHG emissions and air pollutants | -- |
| | Shao 2020 | 🟡 **Freight structural changes (mode shift to railways):** Reduce GHG emissions, increase upstream air pollutants | Decarbonize the upstream power sector, promote railway electrification, and reduce railway backhauls |

*Note:* Green cells 🟢 indicate that the measure can reduce both GHG emissions and air pollutants, and yellow cells 🟡 mean that the measure can reduce only GHG/ air pollutant emissions.
*Abbreviations:* GHG = greenhouse gas; $CH_4$ = methane; NG = natural gas; NEV = new energy vehicle.
*Source:* WRI authors, based on this study and existing literature.






充电车位

第一章

# 背景

交通运输部门减排对于中国实现碳达峰碳中和目标，以及将全球温升控制在2摄氏度（甚至1.5摄氏度）以内都至关重要。

2014年，中国交通运输部门温室气体排放量为8.28亿吨二氧化碳当量，占全国温室气体排放总量（不含土地利用、土地利用变化和林业排放）的6.7%（生态环境部，2018）。发达国家经验表明，随着交通运输部门排放不断增加，其在全行业所占的比重将持续扩大。例如，与电力部门与工业部门不断下降的排放趋势相反，欧盟（包括英国）和美国的交通运输部门温室气体排放量自1990年以来一直保持上升态势（见图1）。至2019年，美国和欧盟（包括英国）交通运输的温室气体排放在全行业排放（不含土地利用变化和林业排放）中的占比已分别上升到28.6%和23.6%，分别成为美国的第一大排放源（美国环保署，2020）和欧盟（包括英国）的第二大排放源（欧洲环境署，2020）。

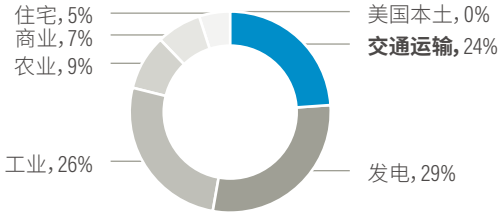
中国交通运输部门温室气体排放量在全球交通运输部门排放中的占比也十分可观。世界资源研究所CAIT数据库2018年数据显示，中国交通运输部门排放在全球交通运输部门占比达11.1%，仅次于美国的21.3%和欧盟（包括英国）的11.2%。未来，这一份额有可能会更高：到2050年，中国道路货运需求量将可能跃居世界第一（Mulholland等，2018）；中国与印度还将引领全球汽车保有量增长——若不加以控制，两国2050年汽车保有量将可能是2015年的六倍，与经合组织（OECD）国家16%的保有量增长幅度形成鲜明对比（国际交通论坛，2019）。快速增长的交通出行需求不仅会加速温室气体排放，也会加剧能源安全、空气污染等挑战（Yin等，2015；Hao等，2015）。

在交通运输部门排放中，道路交通领域的温室气体排放量占比最大。2014年，中国道路交通领域排放在交通运输部门排放中占比达84.1%（生态环境部，2020）。然而，考虑到航空和水运不成熟的减排技术与高昂的减排成本，近期动力电池和氢燃料电池技术的不断突破与成本的持续下降，为道路交通领域减排带来了新机遇（彭博新能源财经，2021）。

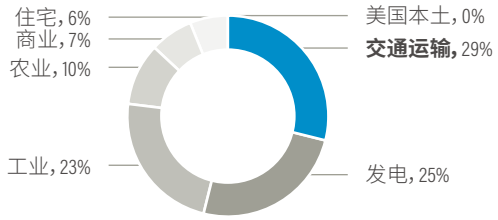
为化解这一挑战，国务院于2021年10月24日印发《2030年前碳达峰行动方案》，出台了一系列针对道路交通领域应对气候变化、减少温室气体排放的措施，涉及运输工具装备低碳转型、运输结构绿色调整、绿色交通基础设施建设等方面。该方案指出，交通运输部门绿色低碳行动的目标为“确保交通运输领域碳排放增长保持在合理区间”。这表明，中国交通运输部门碳排放在近期仍存在上升势头。然而，全球排放模型的预测表明，为实现全球温升不超过2摄氏度的目标，全球交通运输部门的温室气体排放有必要在2020年至2025年之间达到峰值（国际能源署，2021；Gota等，2016；Fransen等，2019）。为实现《巴黎协定》目标与中国2060年碳中和目标，促进低碳投资与技术创新，实现空气污染协同效益，中国道路交通领域需要建立明确的中长期减排目标，制定与中长期目标相符的深度减排战略，并出台具有成本经济效益与公共财政可持续性的政策（见专栏1）。

图 1 | **不美国、欧盟（包括英国）和中国的交通运输部门排放变化趋势（1990—2019年）及交通运输部门温室气体排放在全行业排放（不包括土地利用变化和林业排放）中的占比**

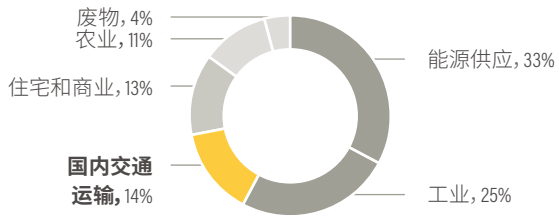
**1990年美国温室气体排放量各行业占比**



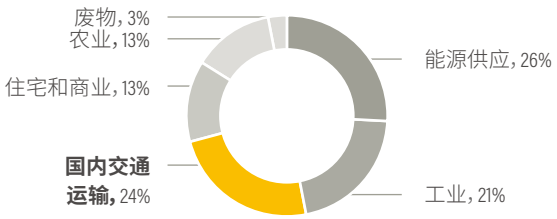

**2019年美国温室气体排放量各行业占比**



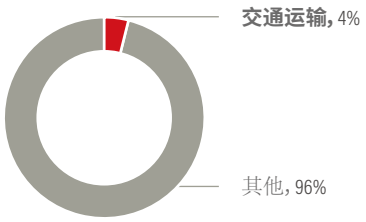

**1990年欧盟（包括英国）温室气体排放量各行业占比**



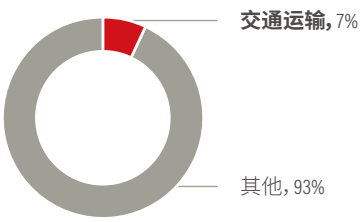

**2019年欧盟（包括英国）温室气体排放量各行业占比**

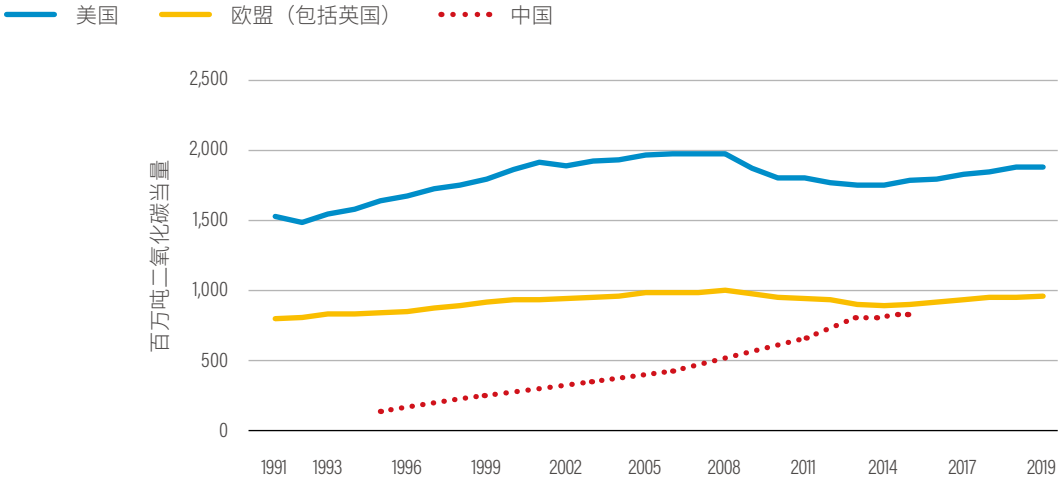



**1994年中国温室气体排放量各行业占比**




**2014年中国温室气体排放量各行业占比**




说明：中国交通部门温室气体排放为官方统计数据，最新年份为 2014 年，因而有必要加大温室气体核算频次以更好追踪排放趋势。此外，中国的排放趋势是利用 1994 年、2005 年、2010 年、2012 年和 2014 年的交通运输部门温室气体排放官方数据进行线性插值得出。

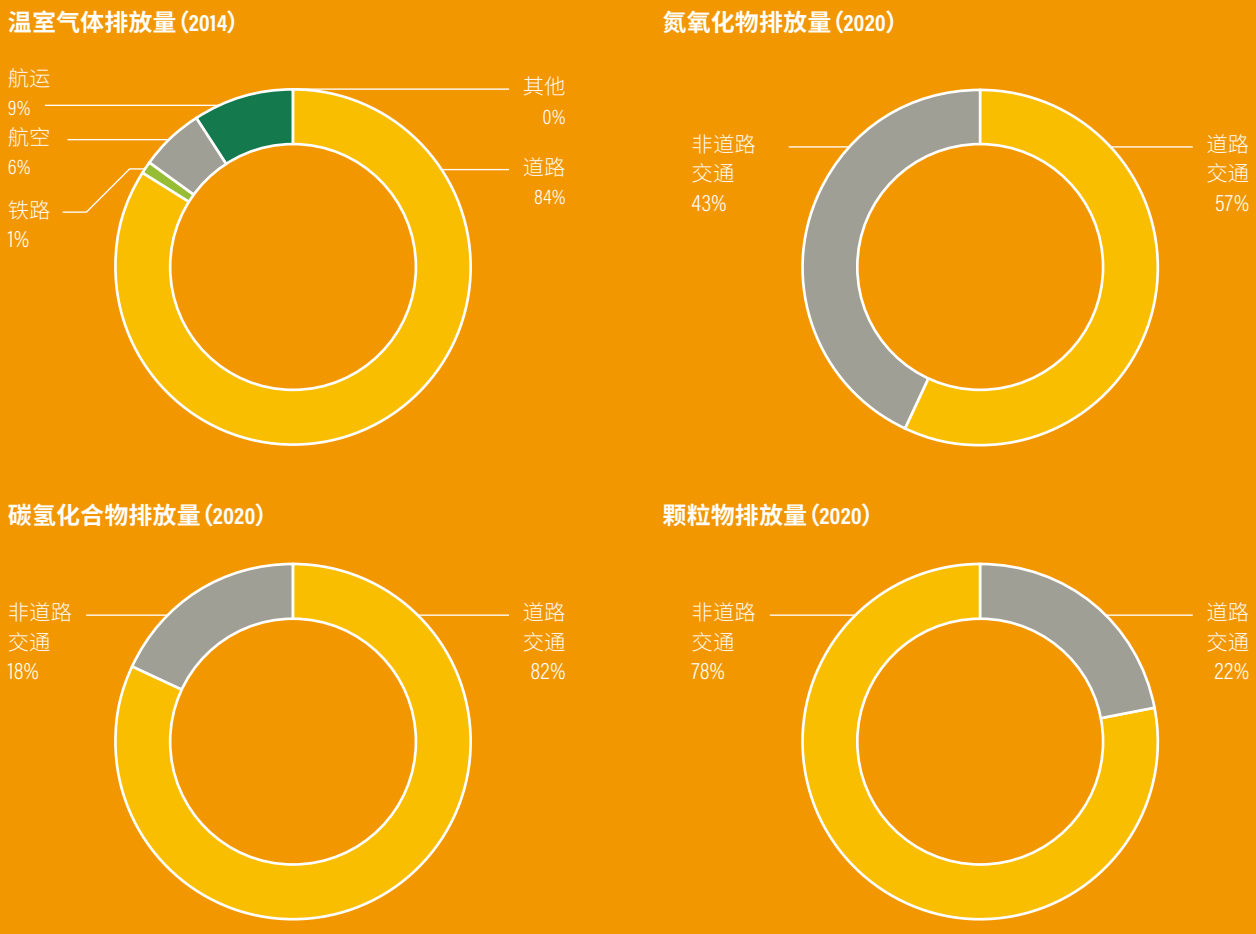
来源：美国环保署（2020），Greenhouse Gas Inventory Data Explorer；欧洲环境署（2020-），EEA Greenhouse Gases Data Viewer；国家发展改革委（1994、2005、2010 和 2012）；生态环境部（2014）。

## 专栏 1 | 交通运输部门空气污染物排放现状

交通运输部门也是空气污染物的主要排放源。据估算，中国的城市机动车等移动源排放已经成为本地细颗粒物（也称PM2.5，是指粒径小于等于2.5微米的颗粒物）的首要来源，贡献了占本地细颗粒物排放的20%～50%。其中，深圳占比高达52%、北京为45%、广州为22%（生态环境部，2018）。

道路交通和非道路交通均贡献了可观的空气污染物排放。例如，道路交通的碳氢化合物（HC）和氮氧化物（NOx）排放高于非道路交通排放，非道路交通（如水运、非道路机械）则产生了更多颗粒物（PM）排放（78%）与相当比例的氮氧化物排放（43%），如专栏图1所示。

## 专栏图 1 | 道路交通领域温室气体与空气污染物排放占比



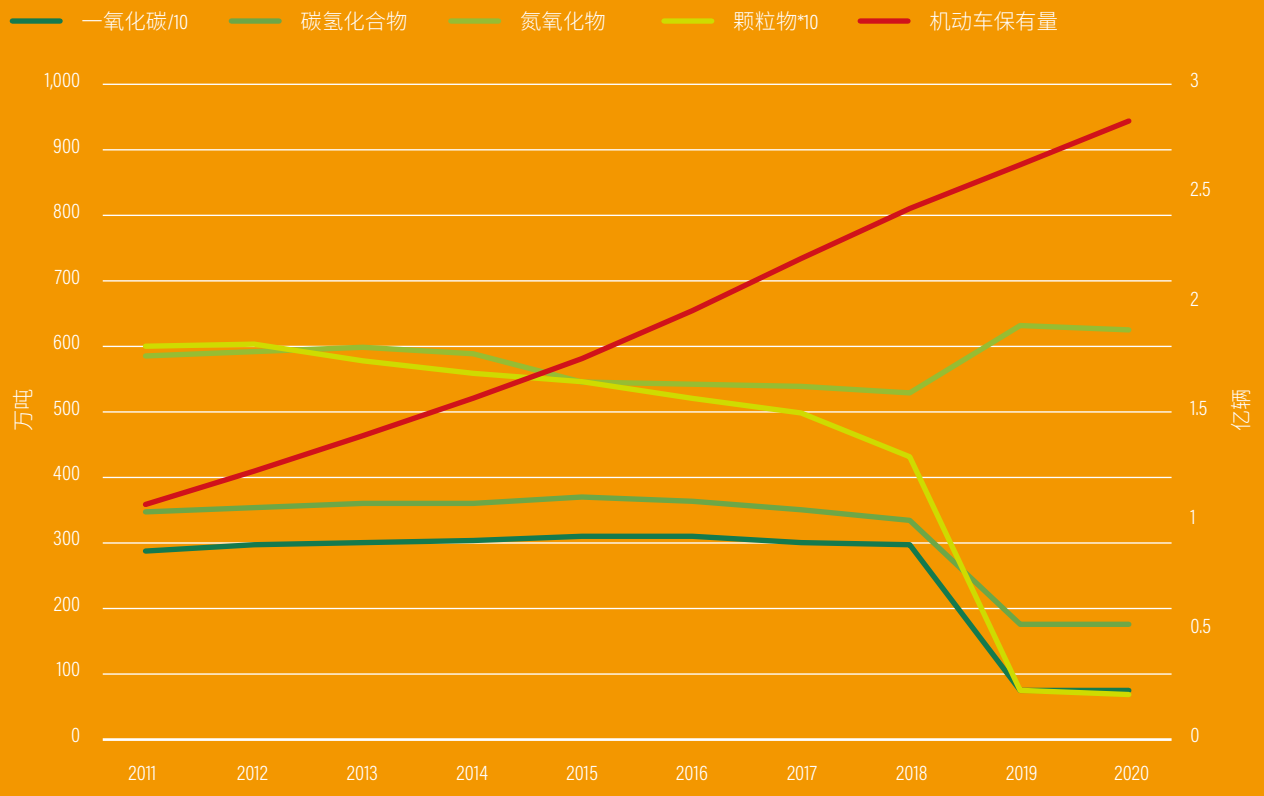

说明：“非道路交通”包括国内航空、内河与沿海水运、非道路机械。

来源：生态环境部，2021。

## 专栏 1 | 交通运输部门空气污染物排放现状

中国自2018年出台《打赢蓝天保卫战三年行动计划》以来，道路交通领域污染防治取得明显成效，空气污染物排放持续下降（见专栏图 2）。为到2035年基本实现“美丽中国”目标，中国近年来在机动车污染防治领域开展了大量工作，包括实施“国六”标准、推广使用新能源汽车、加快油品质量升级、促进“公转铁”和“公转水”等运输结构调整。在这些措施的影响下，道路交通的空气污染物排放虽已呈下降趋势，但温室气体排放仍保持增长势头。为加强措施之间协同、节约公共投入，有必要探索道路交通温室气体与空气污染物协同治理的路径。

## 专栏图 2 | 中国道路交通领域空气污染物年排放量（2011—2020年）




来源：生态环境部，2011—2020；国家统计局，2011—2020。

说明：机动车各项空气污染物排放在 2019 年发生的变化主要是由于第二次全国污染源普查统计数据的更新与污染物核算方法的调整。





第二章

# 研究方法

## 2.1 研究范围

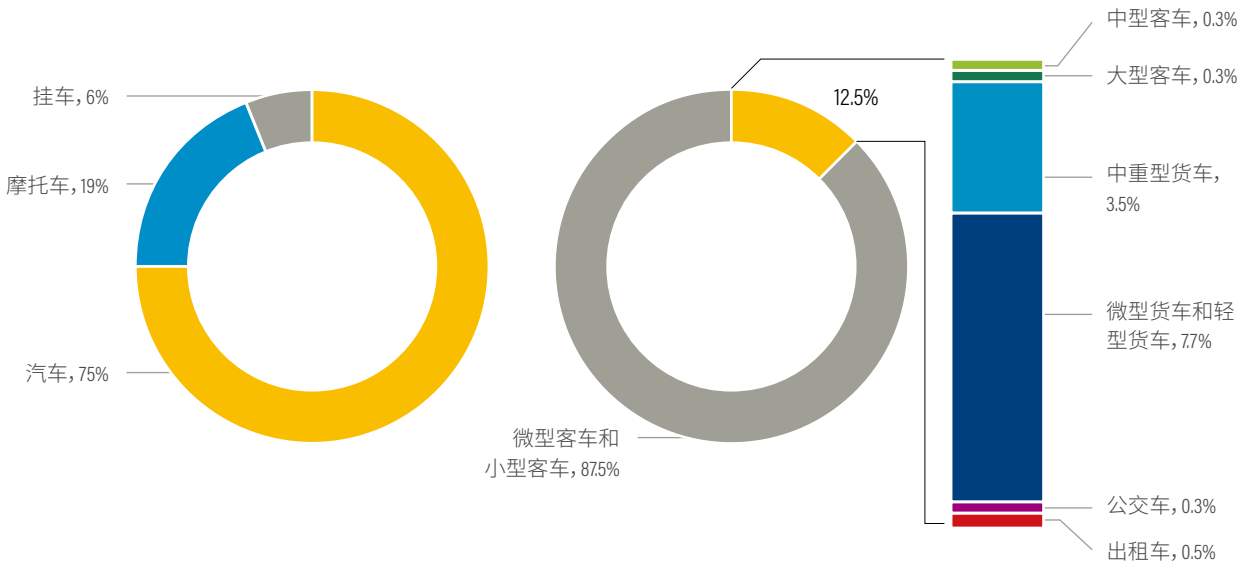
本研究仅涉及道路交通，航空、水运、管道与非道路移动机械等非道路交通不在本研究范围之内。此外，在本研究中，道路交通的机动车涵盖客车、商用车与摩托车，具体车型分类见表1。由于活动水平差异，公交车与出租车分别从“大型载客汽车”与“小型载客汽车”中分离出来，并单作为一类。2020年中国各类机动车保有量百分比如图2所示。

表 1 | 基于《道路交通管理机动车类型》(GA 802—2019) 标准的机动车分类

| 分类 | | 说明 | 本研究是否涵盖 |
|---|---|---|---|
| 载客汽车 | 大型 | 车长大于或等于6000毫米或者乘坐人数大于或等于20人的载客汽车 | ✓ |
| | 中型 | 车长小于6000毫米且乘坐人数为10～19人的载客汽车 | ✓ |
| | 小型 | 车长小于6000毫米且乘坐人数小于或等于9人的载客汽车，但不包括微型载客汽车 | ✓ |
| | 微型 | 车长小于或等于3500毫米且内燃机气缸总排量小于或等于1000毫升（对纯电动汽车为驱动电机总峰值功率小于或等于15千瓦）的载客汽车 | ✓ |
| 载货汽车 | 重型 | 总质量大于或等于12000千克的载货汽车 | ✓ |
| | 中型 | 车长大于或等于6000毫米的载货汽车，或者总质量大于或等于4500千克且小于12000千克的载货汽车；但不包括重型载货汽车和低速货车 | ✓ |
| | 轻型 | 车长小于6000毫米且总质量小于4500千克的载货汽车，但不包括微型载货汽车和低速汽车（三轮汽车和低速货车的总称） | ✓ |
| | 微型 | 车长小于或等于3500毫米且总质量小于或等于1800千克的载货汽车，但不包括低速汽车 | ✓ |
| 其他汽车 | 专项作业车 | 专项作业车是指装置有专用设备或器具，在设计和制造上用于工程专项（包括卫生医疗）作业的汽车，如汽车起重机、消防车、混凝土泵车、清障车、高空作业车、扫路车、吸污车、钻机车、仪器车、检测车、监测车、电源车、通信车、电视车、采血车、医疗车、体检医疗车等，但不包括装置有专用设备或器具而座位数（包括驾驶人座位）超过9个的汽车（消防车除外）。专项作业车的规格分为重型、中型、轻型、微型，具体按照载货汽车的相关规定确定 | |
| | 低速（低速货车） | 以柴油机为动力，最大设计车速小于70公里/小时，总质量小于或等于4500千克，长小于或等于6000毫米，宽小于或等于2000毫米，高小于或等于2500毫米，具有四个车轮的货车。低速货车不应具有专项作业的功能 | |
| 摩托车 | 摩托车 | 使用内燃机驱动或电驱动，最大设计车速大于25公里/小时的摩托车 | ✓ |
| 挂车 | 挂车 | 挂车是指无动力驱动车辆，专为公路运输而设计 | |

来源：《道路交通管理机动车类型》（GA 802—2019）标准。

图 2 | 2020年中国各类机动车保有量百分比




来源：国家统计局，2021；公安部。

说明：据称，中国有3亿辆摩托车，包括电动踏板车、电动摩托车和汽油摩托车（政府新闻，2020[3]），其规模大于私家车。由于本研究依赖官方统计数据，而未注册的摩托车没有体现在官方统计数据中，因此摩托车在本研究中的代表性欠佳，只有6800万辆。

本研究中，温室气体排放的核算范围是“油井到车轮”（well-to-wheel，WTW）排放，其包括“油箱到车轮”（tank-to-wheel，TTW）排放——即车辆运行中的排放，以及部分“油井到油箱”（well-to-tank，WTT）排放——即发电与制氢产生的排放。该核算范围与政府间气候变化专门委员会（IPCC）出台的《2006年IPCC国家温室气体清单指南》的核算范围有所差异：在《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中，交通运输部门“油井到油箱”排放（包括上游发电及制氢环节产生的排放）计入电力和工业部门；换言之，新能源汽车在交通运输部门为零排放[4]。在本研究中，交通运输部门的“油井到油箱”排放计入交通运输部门排放，因而，可评估新能源汽车推广与电力（制氢）行业脱碳进程的匹配程度。此外，本研究不含车辆生产与道路交通基础设施建设和运营过程中产生的排放。

道路交通温室气体排放主要包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮排放，其中：

- 二氧化碳排放通常包括机动车化石燃料燃烧产生的排放、上游发电与制氢环节产生的排放、润滑油燃烧产生的排放，以及采用尿素的催化转化器（SCR）产生的排放。由于前两者为二氧化碳主要排放源，本研究只考虑前两种排放，润滑油燃烧产生的排放与采用尿素的催化转化器产生的排放不在本研究核算范围内。
- 甲烷排放通常包括机动车化石燃料燃烧排放与天然气汽车的甲烷逃逸排放（Mottschall等，2020）。其中，天然气汽车自身的甲烷逃逸排放量更大。研究表明，由于“国五”标准天然气汽车主要采用稀薄燃烧技术，存在较突出的甲烷逃逸问题（如车辆曲轴箱逃逸排放等），因此，“国五”标准天然气汽车的甲烷排放因子比IPCC的甲烷排放因子默认值高8倍（Pan等，2020）。鉴于天然气汽车在中国的广泛应用，本研究将两种源头的甲烷排放纳入核算范畴。
- 氧化亚氮排放主要包括机动车化石燃料排放与尾气后处理净化排放。用于减少柴油车氮氧化物排放的尾气后处理系统在降低氮氧化物排放的同时，会产生更多的副产品——氧化亚氮排放。因此，随着柴油车排放标准不断从严，氧化亚氮排放因子也不断增加（Clairotte等，2020）。本研究将两种源头的氧化亚氮排放纳入核算范畴。
- 氢氟碳化物排放包括汽车空调制冷剂HFC-134a（1，1，1，2-四氟乙烷）在空调运行中的排放与空调报废时的泄露排放（美国环境署，2015）。由于HFC-134a的消耗臭氧潜能值（ozone depletion potential，简称ODP）为零，其已经成为消耗臭氧物质的主要替代物与常见的空调制冷剂。虽然HFC-134a的全球变暖潜能值（global warming potential，简称GWP）也很高，并且在交通排放中占一定比例，但由于数据限制，本研究未将氢氟碳化物排放纳入核算范畴。

与温室气体排放的核算范围不同，由于交通相关的空气污染物产生的健康影响主要集中在车辆尾气排放环节，因此本研究范围仅涉及“油箱到车轮”的污染物排

放。该范围的空气污染物排放可进一步分为机动车尾气排放、蒸发排放及轮胎和刹车磨损排放。由于缺乏本地化的轮胎和刹车磨损污染物排放因子，本研究涉及的空气污染物排放仅包括机动车尾气排放与蒸发排放。

另外，本研究的空气污染物包括一氧化碳(carbon monoxide，CO)、氮氧化物、非甲烷总烃(non-methane hydrocarbons，NMHC)、细颗粒物和可吸入颗粒物。值得注意的是，交通运输部门的空气污染物排放与温室气体排放存在重叠：在机动车污染物排放标准中，甲烷和氧化亚氮也属于空气污染物；而部分空气污染物，如PM10中的黑碳(black carbon)，也是具有高全球变暖潜能值的“短寿命气候污染物”。为简化分析，对温室气体，本研究只考虑二氧化碳、甲烷和氧化亚氮，不考虑黑碳等短寿命空气污染物；对空气污染物，本研究只考虑以上五种污染物，不将甲烷和氧化亚氮作为空气污染物处理。本研究涵盖的温室气体排放和空气污染物排放范围见表2。

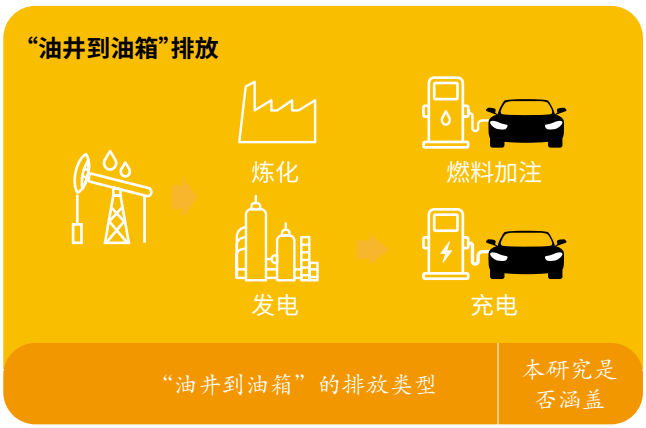
## 2.2 模型方法

### 2.2.1 排放模型

本研究针对道路交通温室气体排放与空气污染物排放的预测，主要基于LEAP(Low Emissions Analysis Platform)模型实现。作为典型的综合评估模型，虽然LEAP模型能够基于部门之间、能源供给与能源消费之间的相互作用，统筹模拟各部门的减排潜力(Yeh等，2017)，但是为简化模型的复杂程度，本研究仅关注道路交通领域，电力与制氢部门减排为模型外生值。

对于温室气体排放，本研究主要基于“自下而上”的方法测算基准年排放(公式 1)。对于空气污染物排放，本研究主要依据《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》中的方法，测算基准年的机动车尾气排放(公式 2)与蒸发排放(公式 3)。

表 2 | **本研究涵盖的温室气体排放和空气污染物排放范围**




| | “油井到油箱”的排放类型 | 本研究是否涵盖 |
|---|---|---|
| 温室气体 | · 化石燃料原材料开采（和/或土地利用变化）的排放 | |
| | · 燃料炼化排放 | ✓* |
| | · 发电与制氢产生的排放 | ✓ |
| 空气污染物 | · 化石燃料原材料开采（和/或土地利用变化）的排放 | |
| | · 炼化、发电与制氢的排放 | |




| | “油箱到车轮”的排放类型 | 本研究是否涵盖 |
|---|---|---|
| 温室气体 | · 化石燃料燃烧排放 | ✓ |
| | · 甲烷逃逸排放 | ✓ |
| | · 用尿素的催化转化器（SCR）排放 | |
| 空气污染物 | · 化石燃料燃烧排放 | ✓ |
| | · 蒸发排放 | ✓ |
| | · 轮胎和刹车磨损排放 | |

说明：· 由于采用尿素的催化转化器在尿素消耗中产生的二氧化碳排放量有限，本研究没有将其纳入核算范围。
· 蒸发排放包括驻车过程中的热浸与昼间蒸发排放，以及行驶过程中的蒸发排放。车辆在加油过程中的蒸发排放不计算在内。
· *代表本研究仅测算基准年的排放量，但未对未来排放做深入分析。

来源：作者总结，“油井到油箱”排放和“油箱到车轮”排放示意图来自 https://kleebinder.net/en/tag/lifecycle-assessment/。

■ 二氧化碳排放测算：

$$E=\sum_i^N P_i \times FE_i \times VKT_i \times EF_i \quad \text{（公式1）}$$

其中：

$E$是二氧化碳排放量，单位为千克；

$P_i$是车辆类型$_i$的保有量，单位为辆；

$FE_i$是车辆类型$i$的能效，单位为升/百公里（柴油、汽油）、千瓦时/百公里（电能）、千克/百公里或兆焦耳/百公里（天然气、氢气）；

$VKT_i$是车辆类型$_i$的年平均行驶里程，单位为公里；

$EF_i$是不同燃料的二氧化碳排放因子，单位为千克/升、千克/千瓦时或千克/兆焦耳。对于电能与氢燃料，$EF_i$指发电与制氢的排放因子。此外，本研究假设输电电损为8%，新能源汽车充电电损为8%。

■ 污染物的尾气排放、甲烷和氧化亚氮排放测算：

$$E=\sum_i^N P_i \times EF_i \times VKT_i \quad \text{（公式2）}$$

其中：

$E$是空气污染物尾气排放量，或甲烷、氧化亚氮排放量，单位为千克；

$EF_i$是车辆类型i的污染物尾气排放因子、甲烷和氧化亚氮的排放因子，单位千克/公里。

■ 污染物的蒸发排放估算：

$$E=(EF_{running} \times \frac{VKT}{V} + EF_{soak+diurnal} \times 365) \times P_i \quad \text{（公式3）}$$

其中：

$E$是空气污染物蒸发排放量，单位为千克；

$EF_{running}$是机动车行驶过程中的蒸发排放因子，单位为千克/小时；

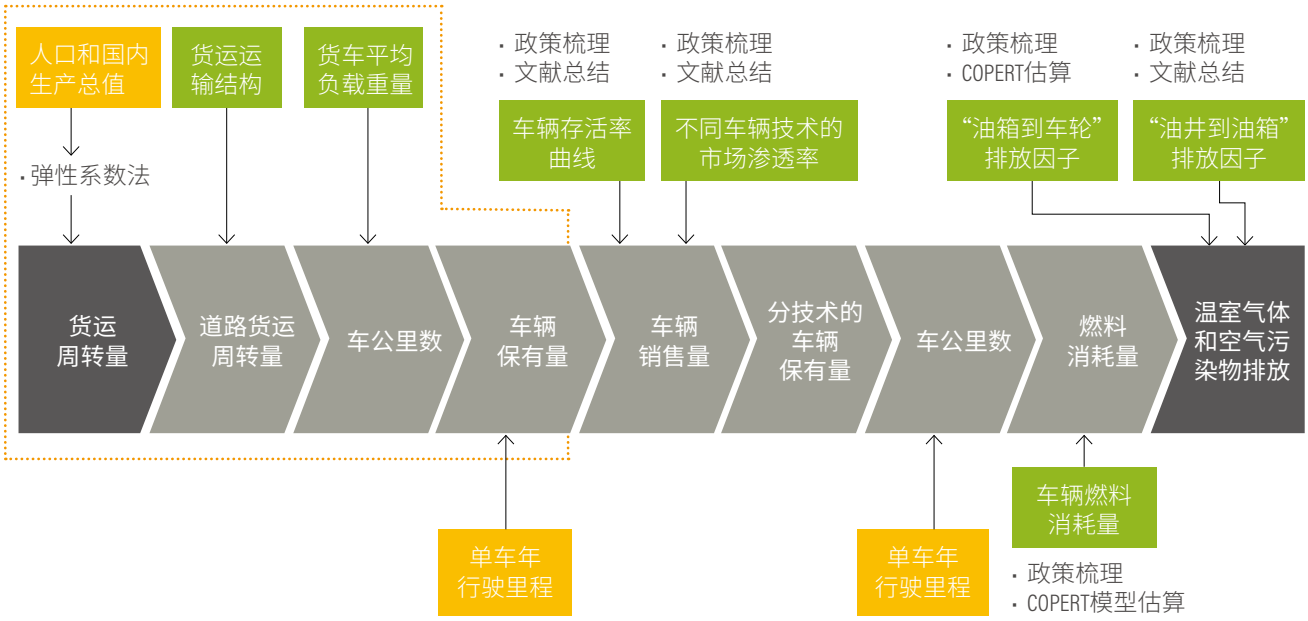
$EF_{soak+diurnal}$是机动车驻车期间热浸和昼间排放的排放因子，单位为千克/天；

$V$是平均车速，单位为公里/小时。

**对未来温室气体与污染物排放预测**，本研究采用了LEAP模型中的“车队周转模块”（fleet turn-over model）预测未来道路交通车辆保有量的技术结构。该模块基于事先预测的各类型车辆保有量、车辆存活率曲线与（不同情景下）低碳技术的未来市场占有率，估算各车型的年销量以及分技术的车辆保有量，在此基础上，根据公式1、公式2和公式3估算未来温室气体和污染物排放量（见图 3和图 4）。

LEAP模型的优势在于能较好地针对各类低碳技术的减排潜力进行建模，但其缺点在于难以评估交通运输结构优化措施的减排潜力。为弥补LEAP模型的不足，本研究进而开发了一个基于Excel的模型，用于预测运输结构优化措施影响下的未来机动车保有量。

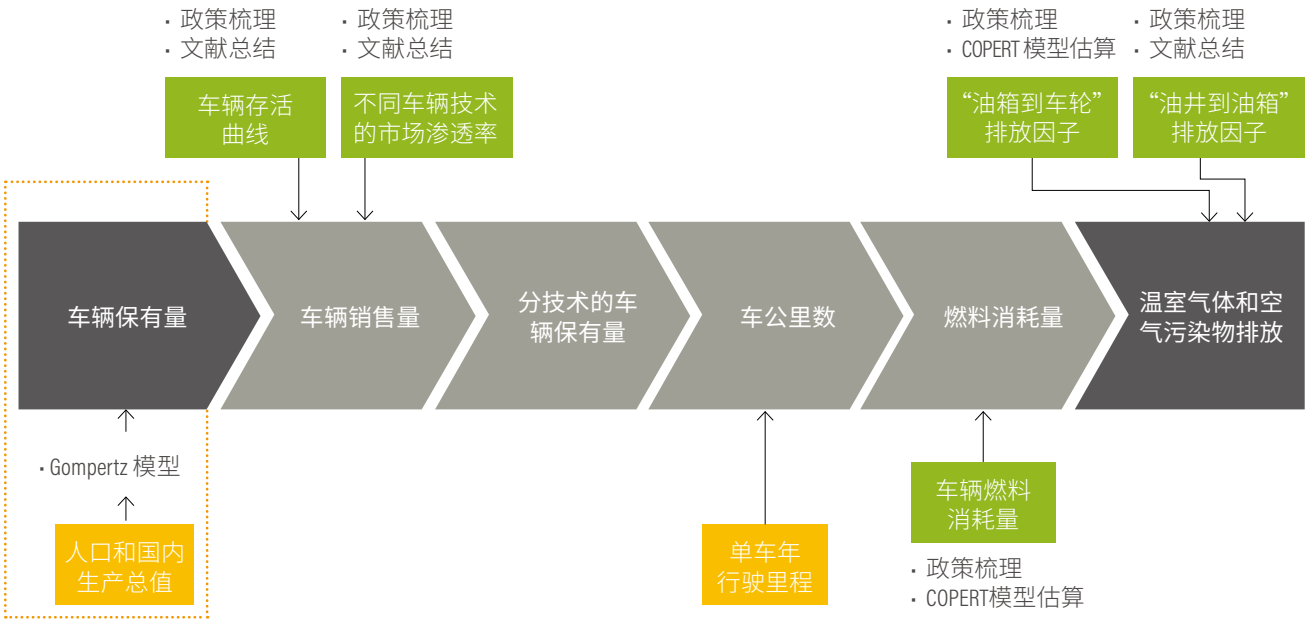
图 3 | **货运排放预测方法**




说明：框中区域是指在 Excel 模型里执行的模型计算，其他区域是在 LEAP 模型里执行的模型计算。

来源：作者开发。

图 4 | **客运排放预测方法**




说明：框中区域是指在 Excel 模型里执行的模型计算，其他区域是在 LEAP 模型里执行的模型计算。
来源：作者开发。

在该Excel模型中，货车保有量预测主要采用周转量法，而乘用车保有量预测主要采用车辆法（见图3、图4和附录1）。其中，货车保有量主要基于未来货运周转量预测值、公路运输占比、单车平均负载量计算得出，因而能对运输结构优化（如结构调整或运输效率提升）对货车保有量产生的影响进行直接评估。但该方法不适用于乘用车保有量预测，由于缺乏客运周转量（含私家车）以及乘用车平均载客数等完整统计体系，乘用车保有量只能采用传统的Gompertz方法进行预测，即根据保有量历史增长趋势以及出行结构优化对千人保有量影响的定性假设进行预测。因此，出行结构变化对乘用车保有量的影响属于间接分析。

模型相关的本地化输入参数主要取自官方统计数据、COPERT与GREET 2.0的模型测算、文献总结与专家咨询。表3详细描述了数据来源，并对其数据质量做定性评价。



表 3 | **温室气体与污染物排放计算相关的数据来源**

| | 数据来源 | 数据质量 |
|---|---|---|
| 基准年车辆保有量 | 国家统计年鉴（2020） | ● 高 |
| 基准年各车型的车队车龄结构 | 各车型年度销售量（2005—2020年）（国家统计年鉴，中国汽车工业协会） | ● 高 |
| 各车型的车辆存活率曲线 | 阿贡国家实验室（Argonne National Laboratory, ANL）（2018） | ◕ 一般<br>假设新能源汽车的存活率曲线与传统汽车的存活率曲线一致 |
| 基准年货运周转量 | 国家统计年鉴（2020） | ● 高 |
| 分技术的车辆保有量 | 国家统计年鉴（2020）与 中国汽车技术研究中心有限公司 | ● 高 |
| 车辆年行驶里程（Vehicle kilometer travelled，简称VKT） | 交通运输部公路科学研究院和北京中交兴路信息科技有限公司（2021）<br>本研究不考虑车辆年行驶里程随车辆老化而下降的情况，因此假设年行驶里程在车辆的生命周期内为固定值 | ◔ 低<br>车辆年行驶里程取决于调查样本量。车辆行驶里程统计数据之间的差异往往很大（Song 2017） |
| 新车平均燃料消耗量 | 基于中国工况在COPERT模型中进行估算，乘用车采用“中国汽车行驶工况 第1部分 轻型汽车”（CLTC），中重型货车采用“中国汽车行驶工况 第2部分 重型商用车辆”（CHTC）。同时，假设空调开启时长为 4 个月，车辆负载率为 50% | ◕ 一般<br>单车实际油耗受各种复杂因素的影响，如行驶工况、坡度、空调使用情况、车辆负载等，单一平均值难以准确反应实际情况。此外，即便单车油耗固定，车队的平均燃料消耗量也会受车型结构“大型化”的影响而发生变化 |
| 基准年货车平均单车负载重量 | 基于货车周转量、保有量与车辆年行驶里程估算 | ◔ 低<br>受行驶里程数据质量的影响，平均单车负载量数据的质量不高 |
| 基准年新能源汽车在各车型新车销量中占比 | 基准年新能源汽车在各车型新车销量中占比数据来自中国汽车工业协会和中国汽车技术研究中心有限公司 | ● 高 |
| 污染物（及甲烷和氧化亚氮）排放因子 | 污染物排放因子的数据来源为：<br>· 《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南（试行）》<br>· 针对混合动力汽车与“国六”标准汽车，采用COPERT模型测算污染物排放因子<br>· 针对天然气汽车，TTW甲烷排放因子基于文献获得（Pan等，2020）<br>假设不考虑后处理控制装置的劣化对污染物排放因子的影响 | ◕ 一般<br>与油耗类似，污染物排放因子受到行驶工况、天气、油品质量、车辆负载与后处理系统劣化等因素影响，单一平均值难以准确反应实际情况 |
| 基准年发电排放因子 | 中国电力企业联合会，2020 | ● 高 |
| 基准年制氢排放因子 | 基于文献中对中国氢气生产结构的现状判断（中国标准化研究院，2018），通过GREET 2.0模型测算制氢的排放因子 | ● 高 |

说明：● 表示数据质量较高，◔ 表示数据质量较低。
来源：作者总结。

### 2.2.2 减排成本模型

本研究针对不同的减排政策和技术，分别计算边际减排成本。边际减排成本是指在特定年份，每减少一单位排放量所对应的减排成本（公式 4）。

$$边际减排成本 = \frac{减排成本}{减排量} \quad （公式4）$$

如公式5所示，减排成本是减排政策（或技术）所需的成本投入与未来费用节约之差，以净现值表示。这些成本投入或费用节约存在两种计算方法，即终端用户法和全社会法。从终端用户视角计算时，由于税收和补贴影响到终端用户的成本，因而这两项需被计入成本。从全社会视角计算时，由于税收和补贴属于社会内部实体之间的转移，因而不能计入成本（Schroten等，2012）。本研究选择全社会法，以规避对补贴、税收政策动态调整的讨论，及其对成本计算的挑战。

$$减排成本 = \frac{总成本\text{-}总节省费用}{(1+贴现率)^{年\ t}} \quad （公式5）$$

由于不同减排措施对应的减排成本计算方法存在差异，此处以两种措施为例，对计算方法进行解释：

- 推广替代能源车辆技术的减排成本：以新能源汽车为例，其减排成本等于推广一定数量新能源汽车的成本与推广同样数量传统燃油汽车的成本之差（公式6）。某年新能源汽车推广的总成本等于单车总体拥有成本[5]乘以新能源汽车年销量。新能源汽车总体拥有成本包括购车成本、能源成本和车辆使用寿命期间的平准化充电/加氢成本（即充电或加氢基础设施建设与运维总投资[6]摊销到新能源汽车生命周期总能源消耗中，单位为元/千瓦时或元/千克）。如前所述，所有与新能源汽车推广相关的税收优惠与补贴不含在内。

$$减排成本 = \frac{(Cost_{capital,t}+Cost_{operation,t})\times Sales_t - ICE_{cost_t}\times Sales_t}{(1+r)^{year\ t}} \quad （公式6）$$

其中：

$Cost_{capital,t}$是指在$t$年的新能源汽车购车成本，不含税收优惠与政府补贴；

$Cost_{operation_t}$包括在$t$年购买的新能源汽车生命周期用电成本或加氢成本；

$ICE_{cost_t}$是指在$t$年购买的传统燃油汽车总拥有成本；

$Sales_t$是指在$t$年某车型技术的车辆年销量；

$r$是指社会贴现率（本研究假设为 3%）。



- 运输结构优化的减排成本：与完整街道改造、公共交通和货运铁路基础设施投资相关的建设与运维投入费用与因运输结构优化所致的车辆保有量减少所节省的费用（如充电基础设施投入节约）之差。针对客运结构调整与货运结构调整，本研究分别进行计算（公式7-1和公式7-2）。

*客运结构转移减排成本*

$$= \frac{Cost_{transit_infrastructure,t}+(Cost_{capital,t}+Cost_{operation,t})\times Sales_t-(Cost_{capital,t}+Cost_{operation,t})\times Sales_{t,no_shift)}}{(1+r)^{year\ t}} \quad \text{（公式7-1）}$$

其中：

$Cost_{transit_infrastructure,t}$是指在$t$年对绿色出行基础设施的投资额，以实现客运出行调整；

$Sales_t$是指在$t$年客运出行结构调整后，各车型的年销量；

$Sales_{t,no_shift}$是指在$t$年若未采取客运出行结构调整（即未对绿色出行基础设施进行投资），各车型的年销量；

$r$是指社会贴现率（本研究假设为 3%）。

*货运结构转移减排成本*

$$= \frac{Cost_{railway_infrastructure,t}+(Cost_{capital,t}+Cost_{operation,t})\times Sales_t-(Cost_{capital,t}+Cost_{operation,t})\times Sales_{t,no_shift}}{(1+r)^{year\ t}} \quad \text{（公式7-2）}$$

其中：

$Cost_{railway_infrastructure,t}$是指在$t$年针对铁路货运基础设施的投资，以实现货运运输结构调整；

$Sales_t$是指在$t$年货运结构调整影响下（即铁路货运铁路基础投资后），各车型的年销量；

$Sales_{t,no_shift}$是指在$t$年若未采取货运结构调整（即未对铁路货运基础设施进行投资），各车型的年销量，

$r$是指社会贴现率（本研究假设为 3%）。

与各种减排成本相关的数据来源见表4。

**表 4 | 减排成本相关的数据来源**

| 减排成本 | 数据来源 | 数据质量 |
|---|---|---|
| 购车成本 | 基准年各车型的购车成本来自易车网、货车之家等网站。未来各车型购置成本的预测基于文献整理。 | ● 高 |
| 能源价格 | 柴油价格为6.5元/升，汽油价格为7.1元/升，天然气价格2020年为4.5 元/立方米，2060 年为6 元/立方米，电价为0.6 元/千瓦时。<br>虽然存在市场波动与地区间差异，但本研究假设能源价格为固定值。 | ◕ 一般 |
| 充电基础设施建设和运维的平准化成本 | 0.5 元/千瓦时（中国电动汽车百人会和自然资源保护协会，2019）<br>尽管快充、慢充充电基础设施建设运维成本差异较大，但为简化，本研究假设充电基础设施平准化成本为固定值。 | ◕ 一般 |
| 平准化加氢成本[7] | 2025年为40元/千克[8]，2035年为30元/千克，2050年为20元/千克（中国氢能联盟，2019）。 | ◕ 一般 |
| 货运铁路基础设施建设与运维成本 | 假设未来货运相关基础设施投资额与未来货运周转量线性相关，且假设四分之一的货运基础设施投资用于货运铁路基础设施（经合组织，2018）。 | ◔ 低<br>货运铁路基础设施投资因实际需求而异 |
| 绿色出行基础设施的建设与运维成本 | 根据中国城市轨道交通行业的发展趋势（中国城市轨道交通协会，2017—2020），假设到 2035 年中国仍会每年新增 700 公里地铁里程，而地铁建设成本为每公里 7 亿元。与地铁投资相比，完整街道改造投资体量较小，因而忽略不计。 | ◔ 低<br>绿色出行基础设施投资因实际需求与设施类型而异 |

说明：● 表示数据质量较高，◔ 表示数据质量较低。

来源：作者总结。


38 出口
雍和宫桥
YONGHEGONG Bridge
1.6km
1 出口
小 街 桥
XIAOJIE Bridge
800m
2 出口
机场高速
三环路(三元桥)
200m



第三章

# 情景设置

## 3.1 影响因素

通常，道路交通温室气体排放受运输需求增长、运输结构优化、替代车辆技术推广，以及上游发电与制氢环节减排等多种因素的影响（见表 5）。

尽管如此，本研究并非考虑所有影响因素。例如，个别减排措施（如低碳燃料的推广）在国内推广的可行性仍在探讨中。此外，本研究建立的模型也无法对所有影响因素的减排潜力做出定量评估，如紧凑城市规划、碳定价机制与自动驾驶技术的推广。

因而，本节主要介绍情景设置中所涉及的减排措施及主要参数假设。

表 5 | **道路交通温室气体排放的主要影响因素**

| | 运输需求增长 | 运输结构优化 | 替代车辆技术推广 | 上游发电与制氢环节减排 |
|---|---|---|---|---|
| 减排措施 | · 紧凑的城市规划<br>· 提升燃油税或引入碳定价机制 | · 运输结构调整<br>· 提升车辆满载率或负载率 | · 推广新能源汽车<br>· 提升车辆能效<br>· 推广低碳燃料 | · 上游发电减排<br>· 上游制氢环节减排 |
| 影响的模型参数 | · 各车型保有量<br>· 客运周转量或货运周转量 | · 客运出行分担率或货运运输结构<br>· 满载率或单车负载 | · 新能源汽车的市场渗透率<br>· 燃料中低碳燃料占比或燃料碳排放强度<br>· 车辆能效提升 | · 发电结构<br>· 氢气供给结构 |

来源：作者整理。

## 3.2 情景假设

由于各研究中对未来需求增长、新能源汽车未来市场渗透率和交通运输结构调整的预期有较大差异，未来中国道路交通领域温室气体排放存在多种可能的发展路径。本研究设置的情景是基于政府已出台的减排行动方案、行业协会编制的规划与技术路线图，以及相关文献综述设定的。

### 3.2.1 运输需求增长

与发达国家交通运输需求的缓慢增长不同（TUMI，2021），过去几十年，中国道路交通的运输需求经历了快速增长（见图5）：

- 乘用车保有量从2005年的1,900万辆增长到2020年的2.39亿辆，增长了12倍，年复合增长率高达18%（国家统计局，2005—2020）。
- 国内货运需求的增长势头也很强劲。2018年国内货运周转量（包括公路、铁路和水路、航空和管道，但不含远洋运输）达15.2万亿吨公里，是2005年货运周转量的3倍，年复合增长率达10.5%（国家统计局，2005—2020）。

***乘用车保有量增长预测***

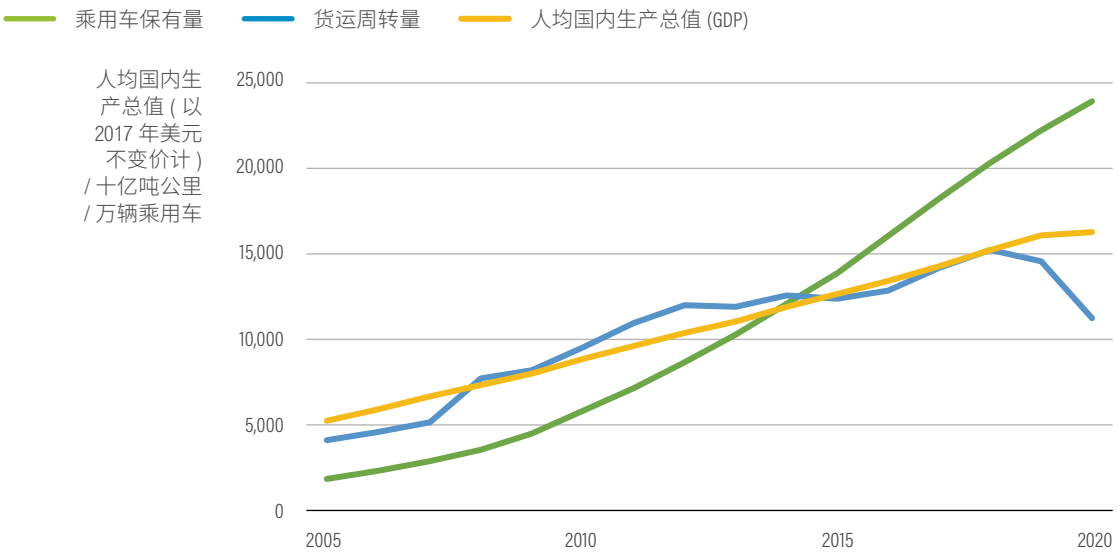
尽管国内乘用车保有量增速迅猛，但千人乘用车保有量仍处于较低水平：2020年中国千人乘用车保有量为170辆，低于日本的493辆，欧盟的540辆与美国的592辆（国家统计局，2020；日本国土交通省，2021；欧盟统计局，2020；美国运输统计局，2021）（见图6）。

未来，中国的机动化进程仍随人均GDP增长而快速增长，直至千人乘用车保有量接近最大饱和值时，增速放缓。为预测中国乘用车保有量，本研究采用Gompertz模型，其中，输入变量的人均GDP采用的是“共享社会经济路径”（Shared Socioeconomic Pathways，简称SSPs）的预测值（Riahi等，2012）（见附录1）。

本研究采用的Gompertz模型的预测结果与现有文献研究的预测结果均表明：中国乘用车保有量在未来一段时期内仍将持续增长，直至在2040—2050年间达峰，达峰时的千人乘用车保有量将低于发达国家水平（见图7）：

- 若不在现有政策基础上采取更激进的措施，中国千人乘用车保有量可能在2050年增长到350～425辆的水平（Gilbert，2017；ANL，2018；Huo等，2012），届时乘用车保有量将达到4.5亿～6.0亿辆。本研究现有政策情景的千人乘用车保有量预测值位于该区间：即千人乘用车保有量在425辆时达到最大饱和值，届时国内乘用车保有量将于2045年达到5.1亿辆的峰值。
- 若采取调整城市规划、鼓励绿色出行等出行结构优化措施，国内千人乘用车保有量有可能降至260～350

图 5 | 2005年至2020年乘用车保有量、货运周转量和人均国内生产总值的增长情况



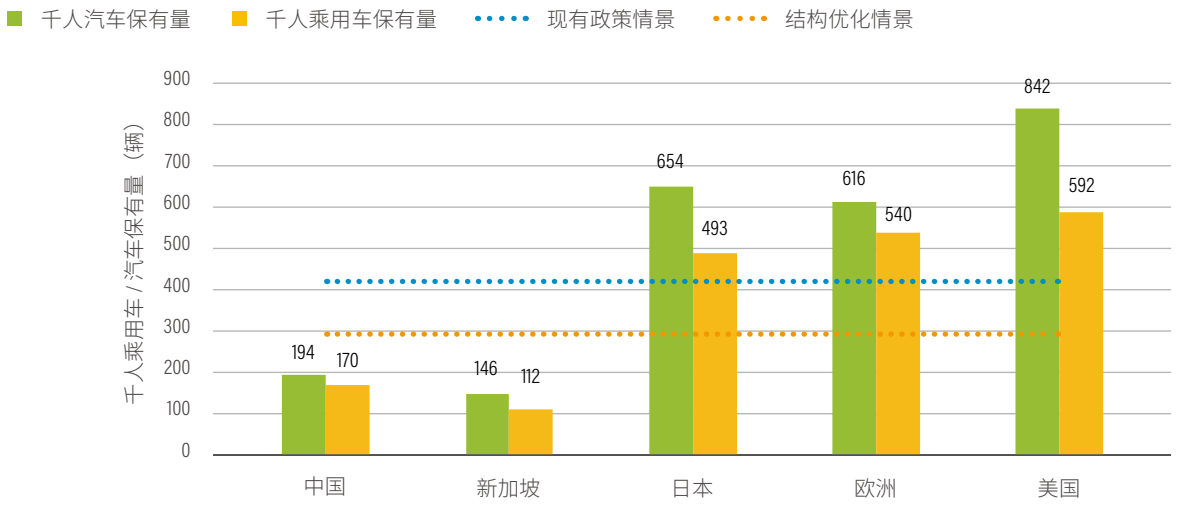

说明：2018 年起国内货运周转量下降的主要原因有二：一是统计口径的调整（4.5 吨以下轻型货车不纳入公路周转量统计范畴），二是新冠肺炎疫情管制对水运周转量的影响。
来源：国家统计局，2002—2020。

辆的水平，届时乘用车保有量将达到3.5亿~4亿辆（Gilbert, 2017; ANL, 2018; Huo等, 2012）。本研究结构优化情景的预测值就位于该区间：即千人乘用车保有量在300辆时达到饱和，届时国内乘用车保有量将于2040年达到3.8亿辆的峰值。

### *货运周转量的增长预测*

随着经济发展，中国的货运需求（以货运周转量计）将在近期保持增长。但未来货运周转量能否持续增长，受诸多因素的影响，包括供应链迁移、经济结构向运输强度较低的服务部门转变[9]（Wang等，2021），以及油价波

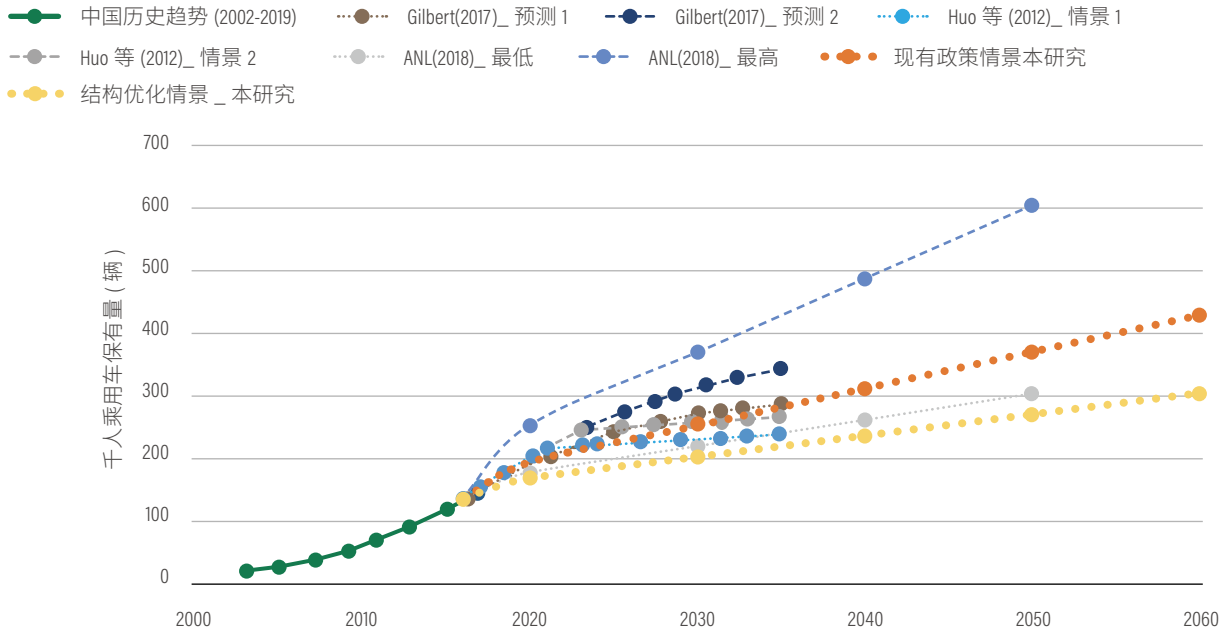
图 6 | **中国和其他国家千人汽车保有量和千人乘用车保有量**




说明：欧盟和美国的数据为 2019 年值，其他国家的数据为 2020 年值。

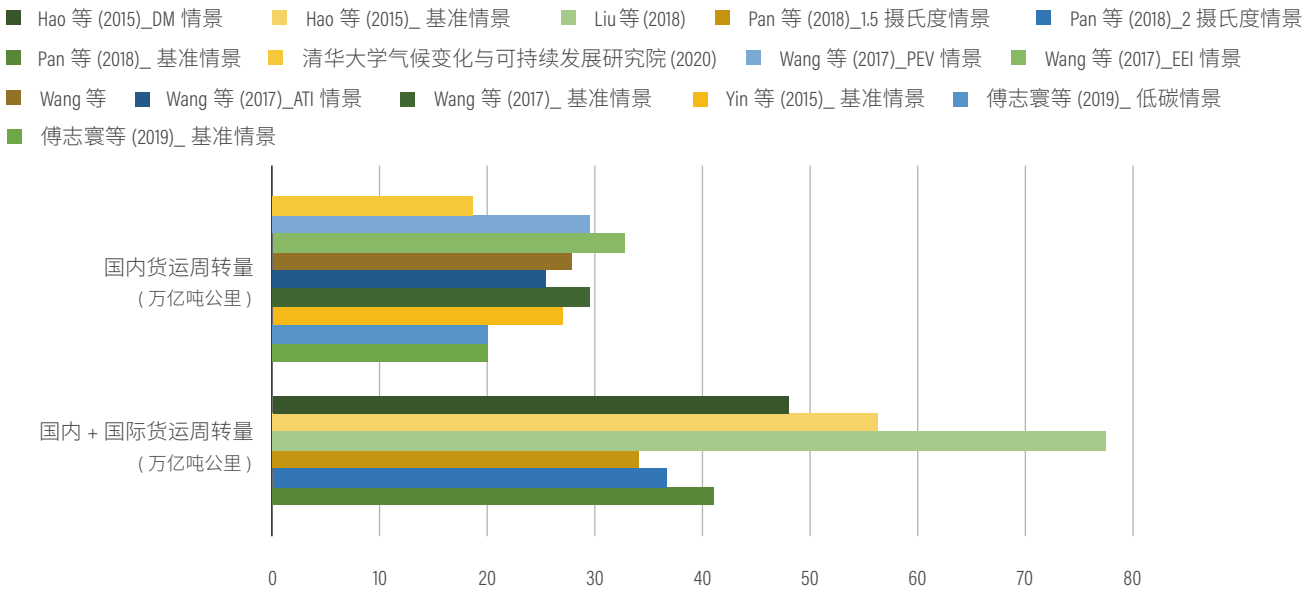
来源：国家统计局，2002—2020；新加坡陆路交通管理局，2020；新加坡统计局，2020；美国运输统计局，2021；《国家交通统计 2021》；欧盟统计局，2020（各类汽车保有量）；日本国土交通省，2021（https://www.mlit.go.jp/statistics/details/jidosha_list.html）。人口数据来自世界银行数据库（https://data.worldbank.org）。

图 7 | **本研究与各文献对国内未来千人乘用车保有量的预测**




来源：国家统计局，2002—2019；Gilbert，2017；ANL，2018；Huo 等，2012；本研究假设。

图 8 | **现有文献对国内货运周转量的预测**




说明：国内货运周转量包含国内公路、铁路和水路、航空和管道的周转量，但不包含国际航运（远洋运输）与国际航空的周转量。

来源：Liu 等，2021；清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020；Pan 等，2018；Wang 等，2017；Zhang 等，2016；Yin 等，2015；Hao 等，2015；Huo 等，2012；作者整理。

动等，具有较高不确定性。因此，根据现有文献无法对中国货运需求进行预测：

- 部分文献如《交通强国战略研究》（傅志寰等，2019）和《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》（清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020）预计，随着经济结构的升级以及大宗商品（如煤炭和矿石）运输量的减少，国内货运周转量将于2030年起放缓增速（年复合增长率将降至0.6%），并在2040—2045年之间达到平台期，届时峰值的货运周转量在18.6万亿~19.8万亿吨公里左右，将是2020年周转量的1.7~1.8倍。
- 其他研究指出，货运周转量受运输量与运输距离两个因素影响。尽管运输量的增速会随产业结构升级与大宗商品运输量减少而放缓，但总的货物运输距离会随着运输次数增加与运距增加而增长。二者相互作用下，中国货运周转量仍有望保持上升势头。因此，这些研究认为，中国的货运需求水平与发达国家一致[10]，到2050年国内货运周转量将达到25.2万亿~32.5万亿吨公里，将是2020年的2~3倍（Yin等，2015；Wang等，2017）。

现有文献对国内货运周转量的预测如图8所示。

鉴于欧美等国家对货运周转量的预测前景趋好，本研究也对中国未来货运需求的增长持乐观态度。例如，根据美国货运分析框架（Freight Analysis Framework），美国国内货运周转量将在2045年上升至7.6万亿英吨英里，为2015年的1.5倍（美国运输统计局和美国联邦公路局，2016）。德国国内货运周转量也呈增长态势，预计到2050年将达到8,960亿吨公里，为2016年的1.4倍（Agora energiewende，2020）。基于欧美国家的乐观预测，本研究也在弹性系数预测中将国内货运周转量的2060年预测值（见附录1对人均收入弹性的解释）调高至25.9万亿吨公里，为2020年的2.5倍。

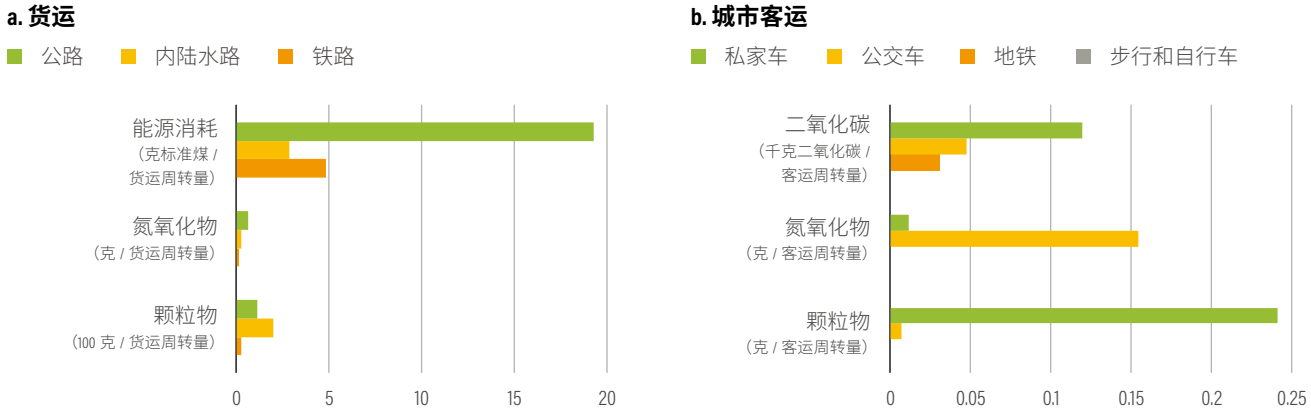
### 3.2.2 运输结构优化

由于低碳运输模式（如公共交通、铁路运输等）的满载率或负载率更大，单位客运或货运周转量的能耗强度更低，客运与货运的运输结构调整对于缓解交通拥堵、减少碳排放都至关重要（见图 9）。

尽管低碳运输方式具有显著的环境效益，但是随着居民收入水平增长及对出行时效的更高要求，国内的运输结构正从低排放的出行模式（如绿色出行、铁路运输）向高排放的出行模式（如私家车出行、公路运输及航空运输）转移（见图10）：

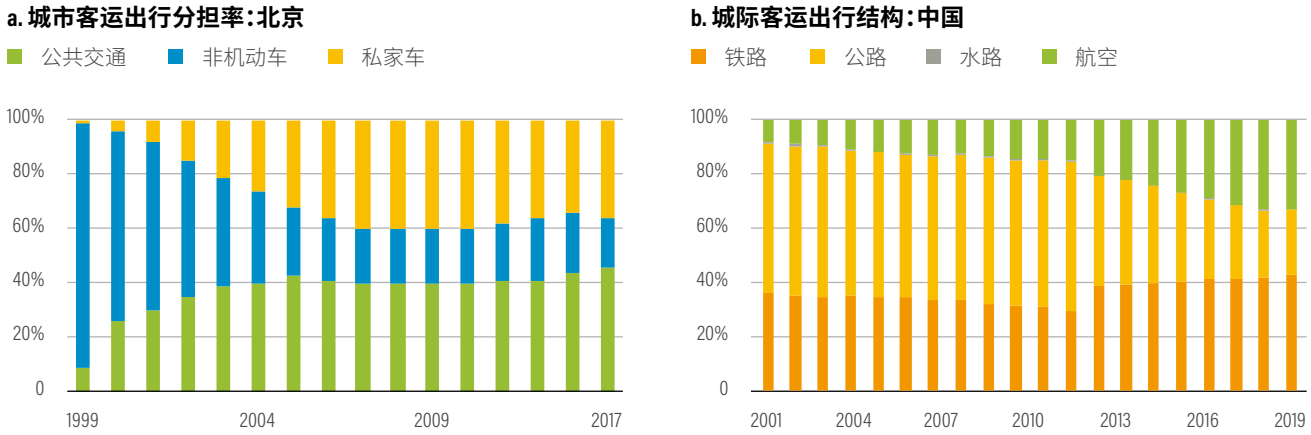
- 客运运输：对于城市内出行，由于城市快速扩张与出行距离增加，大城市机动出行（私家车出行和公共交通出行）的出行量与分担率占比持续增加，非机动出行（如步行、自行车出行和电动自行车出行）的分担率不断下降。例如，北京市自行车、电动自行车和摩托车的出行分担率从1999年的90%下降到2017年的

图 9 | **不同交通运输模式的能源消耗强度或碳排放强度**




来源：交通运输部，2015；生态环境部，2020；地铁的二氧化碳排放强度基于世界资源研究所 2019 年的相关研究；其他客运模式的二氧化碳排放强度由作者基于深圳各出行模式的单车载客量计算（深圳市城市规划研究院）。

图 10 | **中国客运出行结构历年变化**




说明：北京出行分担率不含步行。

来源：北京交通发展研究院、傅志寰等，2019；国家统计局，2021。

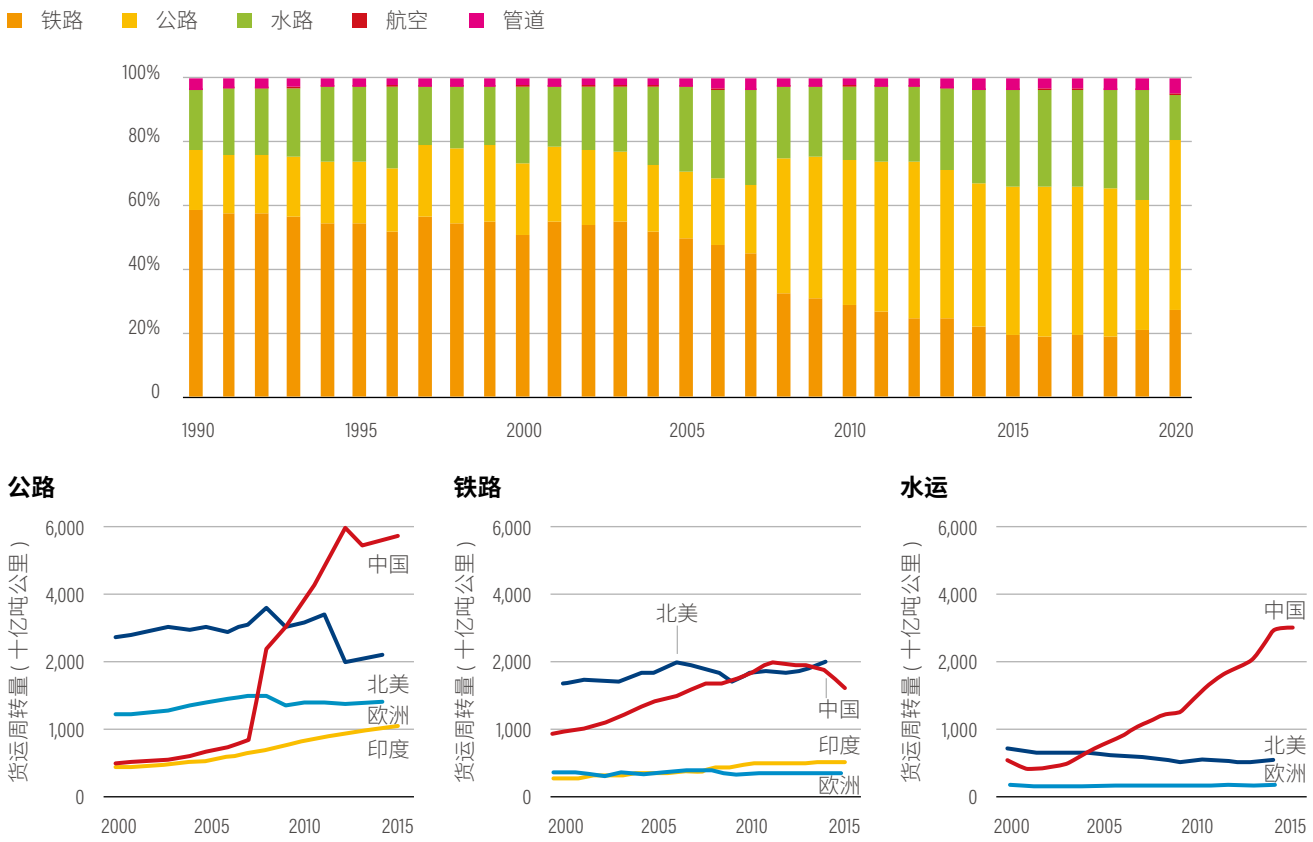
18%（傅志寰等，2019），私家车的出行分担率从1999年的1%上升到2017年的36%。

城际客运出行则喜忧参半。2001年至2020年，公路客运在客运周转量中的占比从55%下降到24%，铁路客运占比从36%小幅增至43%。然而，航空客运占比从8%跃升到33%，增长了四倍。

- 货运运输：过去几十年中，受运输成本缺乏竞争力[11]、专用线接驳不足与服务质量不高等问题（Agenbroad等，2016）困扰，铁路货运周转量在运输结构中占比持续降低，从1990年的59%锐减至2020年的27%。同期，国内内河与沿海水路货运在运输结构中的占比也在小幅下降，从1990年的19%下降至2020年的14%。较之铁路货运和水路货运的下降趋势，公路货运在运输结构中的占比则从1990年的19%大幅攀升至2020年的54%（见图11）。

横向对比北美、欧洲及印度可以发现，中国货运更依赖公路运输与水路运输：从1990年到2019年，国内公路货运周转量与水路货运周转量分别增长了17倍与13倍。然而，同一时期，中国铁路货运周转量仅增长3倍。特别是自2010年起，国内铁路货运周转量始终未突破2010年的水平。相较之下，得益于从传统煤炭大宗商品运输转向更多元化的商品集装箱多式联运，美国的铁路货运周转量在近几年成功反弹，铁路在运输结构中的占比也呈上升趋势（KaaK等，2018）。

图 11 | 中国货运运输结构（周转量占比）及与北美、欧洲和印度货运周转量发展趋势对比




说明：国内货运周转量包含国内公路、铁路和水路、航空和管道的周转量，但不包含国际航运（远洋运输）与国际航空的周转量。

来源：国家统计局，2021；Kaak 等，2018。

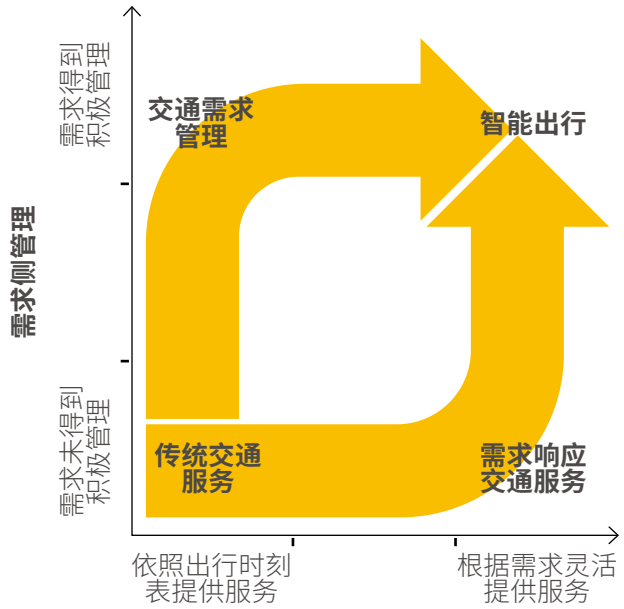
***未来客运出行结构调整***

对于高度依赖私家车出行的发达国家，如美国，因其出行结构已基本锁定，所以绿色出行措施的作用将较为有限（TUMI，2021）。但中国的情况有所不同，由于城市人口密度高、对私家车尚未形成依赖，国内城市的出行结构更容易避免私家车主导的局面。特别是很多中小型城市（如株洲）的小汽车出行分担率仍处在低位，只有10%～15%（株洲市交通运输局，2016），有望在未来将其小汽车出行分担率维持在这一较低的水平上。

综合现有文献（清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020），本研究假设在现有政策情景下，大部分城市能够实现并维持《绿色出行创建行动方案》提出的70%以上的绿色出行占比的目标——假设在目标中公共交通占比为45%。在结构优化情景下，为将乘用车保有量与使用强度保持在合理水平，绿色出行比例应提高至75%～85%，其中公共交通占比至少在50%以上（清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020）。结构优化情景的绿色出行分担率目标完全可实现。例如，通过完整街道改造，鼓励自行车和步行出行，完善公共交通网络与服务质量，促进多模式一体化整合，国内大城市（如深圳和北京）的绿色出行比例不断上升，已经接近或达到75%～85%的目标分担率（2020年深圳绿色出行比例为78%，北京为73%）（深圳市城市交通规划设计研究中心股份有限公司，2021；北京市交通委员会，2021[12]）。

另外，为实现结构优化情景中的出行分担率，中国城市（或城市群）还需要从以供给为主的管理模式向以需求为导向、以人为本的管理模式转变（见图 12）（Enoch，2018）。尽管近年来共享出行（如网约车服务、汽车分时租赁等）在服务模式上更加强调需求为导向，也更灵、更智能，但面临与传统公共交通竞争的问题，且机动化的共享出行也具有较高的空驶里程，这些问题均可能导致交通排放的增加（Kong等，2020；Schaller，2021；Zheng等，2020）。因此，为有效地推动城市（或城市群）公共交通服务模式的转变，需要在保证传统公共交通地位的基础上，通过出行即服务等措施，

图 12 | **公共交通服务的模式转变**




来源：Enoch，2018。

将供应侧多种出行方式整合到统一平台上，基于对公众出行需求的深刻理解，最终形成一体化出行规划、预定、支付的出行服务。其益处在于，让共享出行成为公共交通出行的有益补充（特别是公共交通服务匮乏的地区），提升共享出行的车客匹配程度，减少共享出行车辆的空驶里程（ERTICO，2019），降低其负面环境效益。

***未来货运运输结构调整***

尽管产业结构升级、快递运输和即时配送需求的上升不利于货运运输结构从公路转移到铁路或水路，但中国具备“公转铁、公转水”的先天条件：研究表明，地理跨度大、幅员辽阔、铁路网络完善的国家（如俄罗斯、澳大利亚和加拿大等），铁路在货运运输结构中的占比通常较高，其公路周转量与铁路周转量的比例均高于61∶39的全球平均水平（Kaak等，2018）。目前，由于各种制度与基础设施限制，中国的先天优势并未释放。虽然国内公路货运周转量与铁路货运周转量的比例自2016年（71∶28）到2020年（66∶34）有所改善，但仍低于全球平均水平（国家统计局，2017和2021）。其主要的原因包括但不限于：一是缺乏铁路多式联运，2016年中国铁路货运量只有5.4%是由铁路集装箱多式联运完成（傅志寰等，2019），低于欧洲的19%（欧盟统计局，2021）；二是铁路运价与公路运价倒挂[13]，即便运距超过400公里，部分铁路（集装箱）运输运价仍比公路运输运价高出2~20元（Liu，2021）。

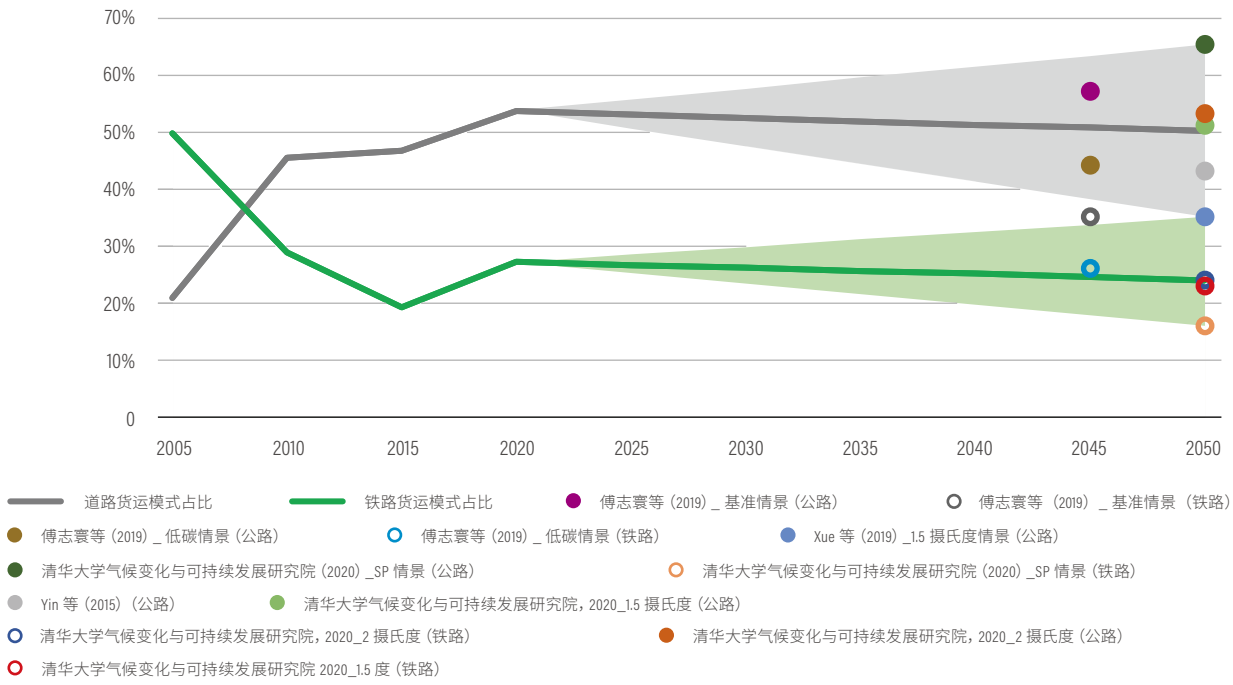
由于国内尚未建立明确的货运运输结构转移目标，本研究主要基于现有研究的预测值，对各情景中未来货运结构进行假设，但同时建议国家率先完善货运统计体系，建立不同货物种类的货物流量、流向调研（包括货运量、起运地、目的地等），为货运结构转移目标制定与支撑政策出台提供更扎实的统计基础。

在现有政策情景下，本研究假设当下货运运输结构向公路运输转移的趋势会得到遏制，公路运输在货运运输结构中的占比将从2020年的54%降至2060年的50%，即当前各预测结果的中位数（Liu等，2021；清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020；Pan等，2018；Wang等，2017；Zhang等，2016；Yin等，2015；Hao等，2015；Huo等，2012）。现有文献对货运运输结构（周转量占比）的预测如图13所示，现有政策情景中的货运运输结构调整相关政策措施见表6。

而在结构优化情景下，本研究假设公路运输在货运运输结构中的占比在2060年能够降至40%。为了实现这一目标：

- 在铁路货运方面，短期内，可加速推动大宗商品的“公转铁”和“公转水”，特别是钢铁、水泥和非金属矿石目前仍主要依靠公路运输（傅志寰等，2019），存在较大的结构转移潜力。长期来看，随着中国产业结构升级，大宗商品运输量下降，可通过加大高附加值产品结构转移力度，优化货运运输结构。为此，需要根据货源的变化与地理分布特征，组织新的铁路基础设施投资以及提升铁路运输服务质量（智慧货主联盟，未注日期；Kaak等，2018），包括提升各铁路段衔接能力和换装效率、合理确定铁路

图 13 | **现有文献对货运运输结构（周转量占比）的预测**




说明：国内货运周转量包含国内公路、铁路和水路、航空和管道的周转量，但不包含国际航运（远洋运输）与国际航空的周转量。

来源：傅志寰等，2019；清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020；Xue 等，2019；Yin 等，2015。

表 6 | **现有政策情景中的货运运输结构调整相关政策措施**

### 铁路及水运运输

**大力发展铁路与水运，鼓励多式联运**（《关于加快推进铁路专用线建设的指导意见》（2019）、《2030年前碳达峰行动方案》、《推进多式联运发展优化调整运输结构工作方案（2021—2025年）》）

- 到2025年，全国铁路和水路货运量比2020年分别增长10%和12%左右，集装箱铁水联运量年均增长15%以上。沿海主要港口利用疏港铁路、水路、封闭式皮带廊道、新能源汽车运输大宗货物的比例力争达到80%。晋陕蒙煤炭主产区大型工矿企业中长距离运输（运距500公里以上）的煤炭和焦炭中，铁路运输比例力争达到90%
- 沿海主要港口、大宗货物年运量150万吨以上的大型工矿企业、新建物流园区铁路专用线力争接入比例均达到85%
- 加快内河高等级航道网建设

提高铁路和水运运输效率，降低运输与换装时间（《国家综合立体交通网规划纲要》（2021—2035年））

- 到2035年，国家综合立体交通网设施利用更加高效，多式联运换装效率显著提高
- 推动不同运输方式之间装卸标准、跟踪数据等有效衔接，实现信息共享

### 公路运输

**缓解公路货运行业运力过剩、过度低价竞争与利润微薄的现象**（《网络平台道路货物运输经营管理暂行办法》、约谈货运平台企业[14]

- 通过互联网货运平台，提升车货匹配程度，提高公路运输的行业集中度，并促进运输企业向价值链上游转移，承担更多高附加服务（如供应链管理或库存管理）
- 要求互联网货运平台不得诱导货主压低运输价格，不得诱导驾驶员压价竞争

**治理货车超载问题**（《关于治理车辆超限超载联合执法常态化制度化工作的实施意见（试行）》（2017年）、《关于进一步做好货车非法改装和超限超载治理工作的指导意见》（2017年）、《关于开展货车非法改装专项整治工作的通知》（2020年））

- 加强货物装载源头和路面执法监督，缓解货车超载问题
- 强化对货车生产和改装的监管，避免非法改装、“大吨小标”及倒卖合格证等问题

来源：作者基于政策文件总结归纳。

运输定价机制、提高铁路运输准点率、引入自动化装卸系统与高附加值服务（如冷链运输等）、完善最后一公里配送等。

- 在公路运输方面，对于公路运输运力过剩、无序竞争导致公路运价与铁路运价倒挂的问题，交通主管部门也应及时采取措施，提升公路运输效率、合理确定道路收费机制等，提升铁路运输与公路运输在长距离运输领域的竞争力（详见“提升车辆负载率”部分）。

***提升车辆负载率***

改善车辆运行效率，提升车辆满载率/负载率，有助于在同等周转量水平下，减少（营运）车辆的保有量，降低车队的运营成本和排放水平。

目前，国内公路客运与公路货运均缺乏车辆满载率/负载率的官方统计，难以评估当前国内客运与货运行业的运输效率。但对于公路货运行业，可通过统计数据估算出货车的负载率。此外，与客运行业有所不同，公路货运效率提升与私营运输企业降本增效的初衷相符，能够较好激励企业。本部分主要侧重公路运输效率提升，但也建议国家有关部门进一步完善客车满载率与货车负载率相关的统计制度。

目前，国内公路货运运输效率较低，特别是随着对货车超载超限治理的常态化后[15]（交通运输部，2017），公路运输效率呈下降趋势：首先，根据本研究测算，2020年国内公路货运单车平均负载重量（即公路运输周转量除以货车总车公里数）为9.8吨，低于欧盟（11.5吨）；其次，国内公路运输40%的平均空驶率也高于欧盟与美国20%的水平（Yang等，2019；美国运输研究所，2020）。公路货运的运输效率低和运力过剩会导致：一是国内重型货车整体规模数量较大，尽管中国公路周转量是欧盟和美国的2～3倍，但重型货车（其定义见表7的说明）数量却是欧盟和美国的3～5倍；二是加剧公路货运行业内不良竞争，包括过度压低公路运输运价，进而造成公路运输与铁路运输的运价倒挂，不利于货运运输结构的调整。

在未来，如果货运运输结构持续依赖公路运输，且公路运输效率仍处于较低水平，将可能导致中重型货车保有量的低效“膨胀式”增长。根据本研究的测算，在现有政策情景下，若公路货运在运输结构中占比达50%，公路货运维持在当前水平（单车平均负载重量为9.5吨），2060年国内中重型货车的保有量将可能在2020年950万辆的基础上翻一番，达到2,000万辆。然而，在结构优化情景下，通过促进运输结构转移，实现公路货运在运输结构中占比40%的目标，且公路运输效率得到有效提升（单车平均负载重量为11.5吨），2060年国内中重型货车的保有量将达到1200万辆的水平，仅比2020年增加26%，为现有政策情景下2060年中重型货车保有量预测结果的一半。不同情景下中重型货车的保有量预测如图14所示。

表 7 | **中国、欧盟和美国公路运输行业的运输效率对比**

| 参数 | 中国（2020年） | 欧盟（2020年） | 美国（2018年） |
|---|---|---|---|
| 公路货运周转量（万亿吨公里） | 6.017 | 1.803 | 2.969 |
| 重型货车年行驶里程（公里） | 46,808或65,171 | 74,000～114,000 | 96,446（牵引车） |
| 中重型货车单车平均负载重量（吨） | 9.8 | 11.5 | -- |
| 空驶率 | 40% | 20% | 20%（第三方物流） |
| 货车保有量（万辆） | 3040 | 3150 | 1310 |
| 重型货车保有量（万辆） | 840 | 170 | 290（牵引车） |

说明：中国的公路货运周转量统计未计入轻型货车周转量。货车数量包括轻型货车、中型货车与重型货车。中国的轻型货车是指车辆总设计质量低于 4.5 吨的货车，欧盟是指车辆总设计质量低于 3.5 吨的货车。中国和欧盟的重型货车是指车辆总设计质量超过 12 吨的货车，美国的重型货车仅包括牵引车（Class 8）。

来源：· 各国公路周转量数据分别来自国家统计局（2021）、欧盟统计局（2021）、美国运输统计局（2021）。

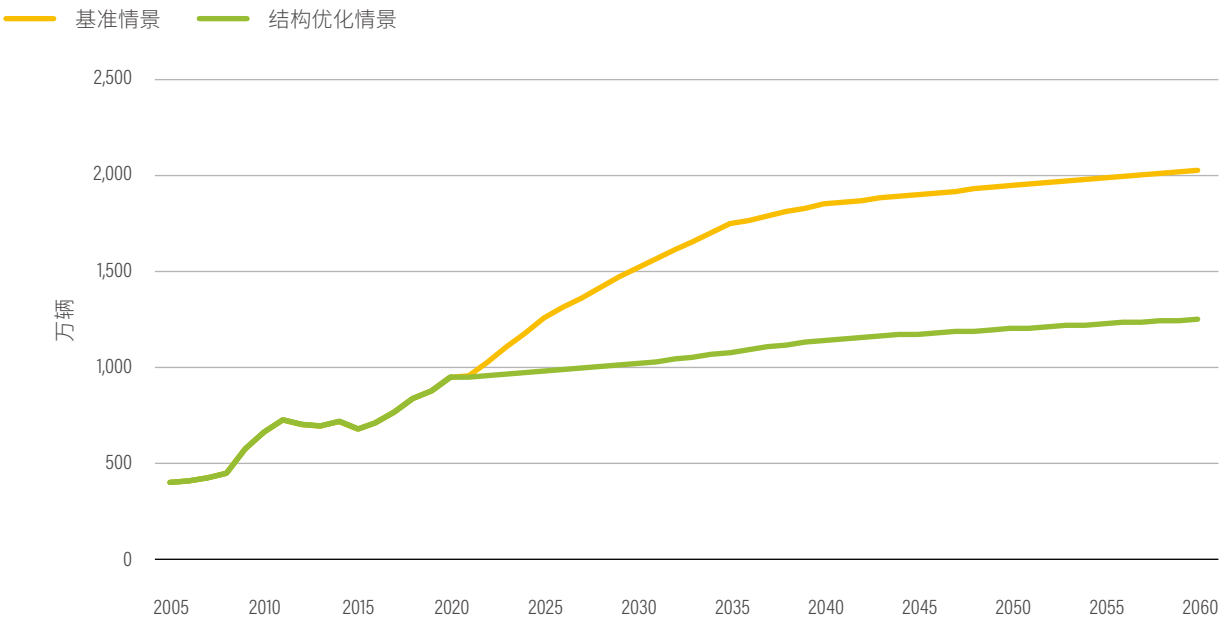
· 货车年行驶里程数据分别来自交通运输部公路科学研究院和北京中交兴路信息科技有限公司，（2021）、中国汽车技术研究中心有限公司（2018）、Gnann 等（未注明日期）、美国联邦公路局（2019）。

· 欧盟单车平均负载重量数据来自欧盟统计局。

· 空驶里程比例来自 Yang 等（2019）、美国交通运输研究所（2020）。

· 货车与重型货车保有量数据分别来自国家统计局（2021）、欧盟统计局（2021）-、美国运输统计局（2021）。

图 14 | 不同情景下中重型货车的保有量预测（2020—2060年）




来源：历史数据源于国家统计局（2005—2020），预测数据为作者基于模型测算。

货物分布的不均衡性、未来轻抛货货运量的增加（McKinnon，2010），以及新能源货车推广初期存在的运输效率折损问题（Qiu等，2020）都会影响公路运输效率提升，换言之，货车单车平均负载重量的提升空间存在上限。尽管如此，国内公路货运的运输效率提升至本研究在结构优化情景中假设的水平（货车单车平均负载重量达11.5吨）并非不可能。国际研究（Mulholland等，2018）表明，随着经济增长与收入水平提高，重型货车会呈现“大型化”趋势（货车升级替换为牵引车），公路运输组织效率也会随路网改善与管理水平提升而提升，重型货车的单车平均负载重量有望提升至11～16吨。此外，除了外部因素，提升公路运输效率的措施也必不可缺，包括但不限于：鼓励“无车承运人”以及互联网货运平台，加强车货匹配，促进运输组织的集约化；推广甩挂运输、车辆及托盘的标准化；促进公路运输企业向价值链上游转移，承担高附加服务（如供应链管理、库存等）（Agenbroad等，2016）。

### 3.2.3 替代车辆技术推广

***低碳车辆技术（或低碳燃料）推广***

中国汽车的车队技术构成正加速低碳转型的步伐：

首先，国内新能源汽车的推广正在提速中（见图15）。其中：

- 在公交车保有量中，新能源公交车占比从2012年的3%迅速攀升至2020年的56%，新能源公交车销量在公交车2020年销量中的占比也已超过90%，成为公交车的主流车型。在出租车保有量中，2020年新能源出租车的保有量占比也已达到9%。
- 尽管新能源乘用车在乘用车保有量中的占比仅为1%，但新能源汽车在乘用车市场的销量份额在飙升。2021年，新能源汽车在乘用车新车销量中的占比已从2020年的6%增加至2021年的15.7%（中国汽车工业协会，2022）。
- 新能源货车在货车保有量与市场销量中的占比仍偏低：2021年底，新能源轻型货车与中重型货车在轻型货车和中重型货车保有量中的占比仍低于1%，而市场渗透率也在1%左右。

其次，天然气汽车在营运车辆中普及率较高。其中：

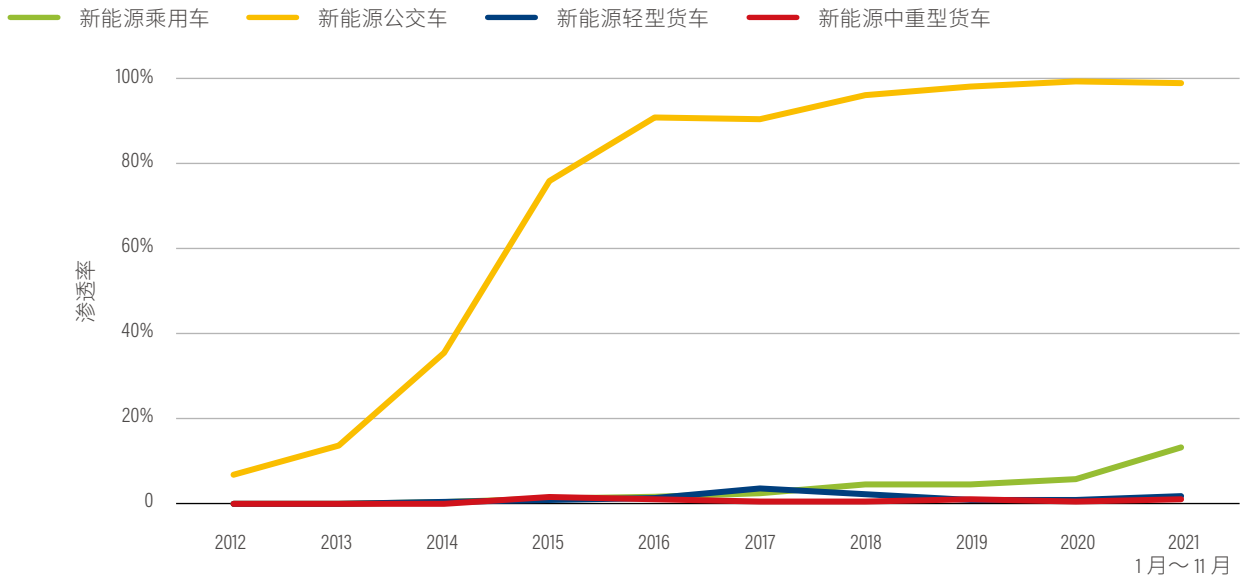
- 天然气出租车（含天然气和汽油双燃料汽车）在出租车总保有量中的占比已高达55%，天然气公交车在公交车总保有量中的占比达18%。
- 值得注意的是，天然气汽车在公路货运中也得到越来越多的应用——2020年，中重型货车保有量的5%左右为液化天然气（LNG）货车。LNG货车在中重型货车市场的渗透率也从2015年的2.4%增长到2020年的8.5%（中国汽车工业信息网，2021[16]）。

表 8 | 2020年不同车型的保有量中各类车辆技术与燃料占比

| 车型 | 保有量占比 | 汽油 | 柴油 | 混合动力 | 天然气 | 新能源 | 乙醇、液化石油气等 | 小计 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 私家车 | 70% | 98% | 0% | 1% | 0% | 1% | 0% | 100% |
| 出租车 | 0% | 22% | 0% | 1% | 55% | 9% | 13% | 100% |
| 公交车 | 0% | 0% | 14% | 12% | 18% | 55% | 1% | 100% |
| 客车 | 1% | 3% | 87% | 0% | 6% | 4% | 0% | 100% |
| 轻型货车 | 6% | 42% | 56% | 0% | 1% | 1% | 0% | 100% |
| 中重型货车 | 3% | 0% | 95% | 0% | 5% | 0% | 0% | 100% |
| 摩托车 | 20% | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% |

说明：由于当前摩托车保有量统计数据中各车辆技术的占比难以辨别，本研究假设所有摩托车均为汽油驱动。
来源：中国汽车技术研究中心有限公司、交通运输部，2021。

图 15 | 各类车型的新能源汽车市场渗透率（2012年—2021年11月）




来源：中国汽车技术研究中心有限公司。

相比之下，低碳燃料如生物燃料在中国的推广程度较为有限。在美国，所有销售的汽油中均掺有10%～15%不等的乙醇（按体积计）；而在中国，生物燃料推广程度较低，主要应用于出租车——2020年国内约有11%的出租车使用乙醇燃料（交通运输部，2021）。2020年不同车型的保有量中各类车辆技术与燃料占比见表8。

未来，车队的车辆技术构成因国家与车型而异。虽然新能源汽车将无可厚非地成为未来主流技术，但目前争议主要集中在近期推广“过渡技术”的必要性。一些研究认为，虽然“过渡技术”的温室气体减排潜力有限，但是近期实现道路交通的低碳转型仍有赖于“过渡技术”。这些“过渡技术”包括但不限于：

- 液化天然气（LNG）中重型货车：根据劳伦斯伯克利国家实验室（2021）的“短期策略情景”（short-term strategies scenario）预测，2050年，LNG货车在中重型货车保有量中的占比将达50%。
- 生物燃料：有研究预测（Pan等，2018），到2050年，生物燃料将有望在交通运输部门得到广泛应用，其在交通运输领域总能耗的占比可上升至32%。
- 混合动力货车：根据能源与交通创新中心（2021）的“中国政策延续情景”预测，到2035年，混合动力技术在货车和牵引车新车中的应用比例将达到40%。

未来，车辆技术预判将会很大程度上影响车辆技术研发推广、燃料加注与充（换）电站等基础设施建设，以及政府与企业在（生物燃料）原料获取与炼化等方面的投资。特别地，考虑到“过渡技术”最终会被减排潜力更大的新能源汽车所替代，因而在近期投入的基础设施与设备可能会在未来变为“搁置资产”。本研究对“过渡技术”推广潜力的假设为：

- 乘用车和轻型货车：本报告讨论的新能源乘用车与轻型货车技术主要集中在市场渗透率最高的纯电动汽车。这是由于：首先，纯电动技术已经占据新能源汽车市场的主导地位。自2016年起，国内纯电动乘用车在新能源乘用车中的销量占比一直维持在80%左右，高于欧盟的45%～51%（欧洲汽车制造商协会，2021）与美国的54%～78%（美国运输统计局，2021）。纯电动货车更是在新能源货车市场中占据绝对主导地位：2020年国内新能源货车销量的99.1%为纯电动货车。其次，由于用户缺乏充电意识，插电混合动力汽车的减排潜力较小。为此，英国、美国加利福尼亚州和中国香港等国家和地区已将插电式混合动力汽车与传统能源汽车一并纳入“禁燃”的行列（Wappelhorst，2021）。
- 中重型货车：本报告集中讨论新能源汽车与LNG天然气技术，但不涉及混合动力技术。这主要是由于：一是混合动力技术的燃油经济性优势对中重型货车可能并不明显。研究显示，中重型货车节油效果在城市工况最显著，可节约30%的油耗；在高速工况下节油潜力约为3%～6%（Gao等，2015）。用于长距离运输的中重型货车中，47%的日行驶里程为高速工况（交通运输部公路科学研究院和北京中交兴路信息科技有限公司，2021），其综合燃油经济性优势是否突出仍有待研究。二是目前国内混合动力货车的车型较少。2020年，仅有少量混合动力中重货车车型在售，其销量也仅有十多辆（能源与交通创新中心，2020），车型仍有待丰富。
- 本研究的情景设计中不涉及未来低碳燃料（如生物燃料）在道路交通中的推广。详细原因见附录2。

未来，国内新能源汽车的新车销量增长将符合S形增长曲线（Abramczyk等，2017）的特征：即在早期推广时，新能源汽车的销量增长缓慢，而随着成本的下降与充电（加氢）基础设施网络的完善，新能源汽车的销量将达到推广的“临界点”，并开始呈指数级增长的趋势。目前，除公交车、出租车与乘用车外，其他车型的新能源汽车的新车销量增长仍处于S形曲线的早期阶段（见表9）。

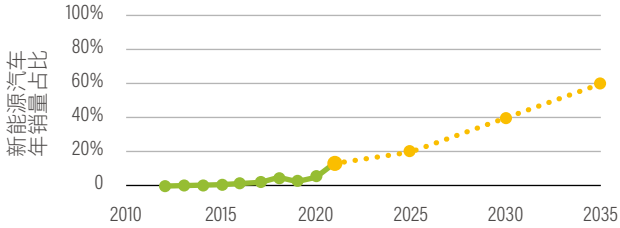
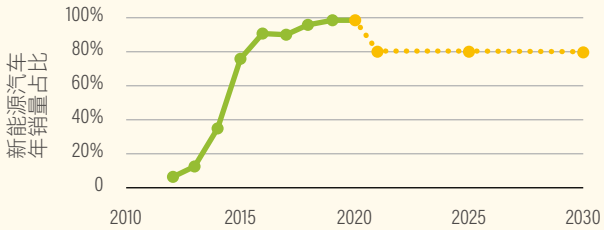
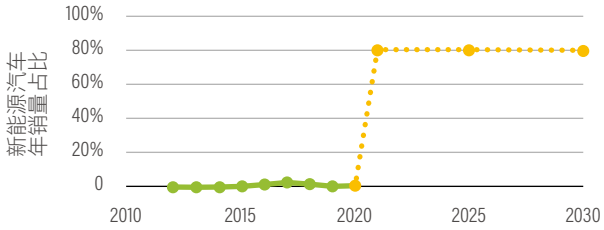
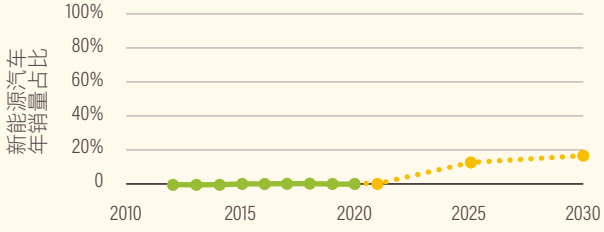
本研究通过预测新能源汽车与传统能源汽车在拥有总成本上达到“平价”的时间点，结合未来潜在可行的政策激励，推测各车型新能源汽车销量的S形增长曲线。

**乘用车：**国内新能源乘用车销量增长正在逼近临界点。2021年11月，新能源汽车销量占乘用车销量的21%（中国汽车工业协会，2021），提前5年达到《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》中提出的2025年新能源汽车年销量占比达20%的目标。此外，即便在没有政策激励的情况下，纯电动私家车拥有总成本有望在2024—2030年间[17]与传统能源汽车的实现平价：紧凑车型在2024—2025年之间较早实现平价，而SUV车型可能在2025—2030年稍晚实现平价（Lutsey等，2021）。

本研究假设：现有政策情景中，新能源乘用车的市场渗透率S形增长曲线将遵循《节能与新能源汽车技术路线图2.0》中设定的（非约束性）目标，即2030年新能源乘用车在乘用车销量中占比达40%，2035年达50%，直至2060年实现100%的占比。深度电动化情景中，未来新能源乘用车的市场渗透率增长，将依据“与《巴黎协定》兼容的行业排放水平”研究中提出的全球交通部门新能源汽车推广目标而设定，即2035年实现纯电动汽车在乘用车销量中占比100%（新气候研究所和气候分析，2020）。现有新能源乘用车推广措施未必能支撑深度电动化情景目标的实现，有必要采取更多措施，如提升乘用车燃料消耗量标准、给予新能源乘用车优先通行权、促进充电基础设施建设等。

表 9 | **现有政策情景下各种新能源汽车渗透率预测**

历史市场占比　目标市场占比

| 新能源汽车类型 | 现有政策下新能源汽车渗透率 | 目前新能源汽车推广的措施 | 目前充（换）电、加氢基础设施配套措施 |
|---|---|---|---|
| 乘用车 | 到2025年：新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的20%左右（《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》）<br>到2030年：当年新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到40%左右（《2030年前碳达峰行动方案》）<br>到2035年：新能源汽车占2035年汽车年销量的50%～60%（《节能与新能源汽车技术路线图2.0》）<br> | · 新能源汽车国家购置补贴<br>· 免征新能源汽车购置税<br>· 乘用车平均燃料消耗量标准与“双积分”政策 | · 免收新能源汽车充电的容量电费<br>· 地方充（换）电基础设施补贴 |
| 公交车 | 2021年起：国家生态文明试验区、大气污染防治重点区域每年新增或更新的公交车中，新能源汽车比例不低于80%（《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》）<br> | · 新能源汽车国家购置补贴<br>· 免征新能源汽车购置税<br>· 新能源公交车国家运营补贴 | · 免收新能源汽车充电的容量电费<br>· 地方充（换）电基础设施补贴 |
| 城市物流车 | 2021年起：国家生态文明试验区、大气污染防治重点区域每年新增或更新的物流配送车中，新能源汽车比例不低于80%（《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》）<br> | · 新能源汽车国家购置补贴<br>· 免征新能源汽车购置税<br>· 深圳、北京等城市提供新能源物流车运营补贴<br>· 部分城市为新能源物流车提供优先通行权 | · 免收新能源汽车充电的容量电费<br>· 地方充（换）电基础设施补贴 |
| 中重型货车 | 到2030年：当年新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到40%左右（《2030年前碳达峰行动方案》）<br>到2030年：新能源中重型货车年销量占比在12%以上（《节能与新能源汽车技术路线图2.0》）<br> | · 新能源汽车国家购置补贴<br>· 免征新能源汽车购置税<br>· 部分港口和工业园区为新能源货车提供优先路权（即近零排放区） | · 免收新能源汽车充电的容量电费<br>· 地方充（换）电与加氢基础设施补贴 |

来源：作者根据现有政策文件总结。

**公交车：**虽然在没有任何政策支撑的条件下，纯电动公交车拥有总成本尚未与传统能源汽车总成本实现平价（世界银行，2021），但得益于大幅政府补贴，国内新能源公交车的市场渗透率从2016年起已经超过90%，达到并越过新能源公交车推广的“临界点”。所以，本研究假设未来所有情景中新能源公交车的市场渗透率均为100%。

**城市物流车：**虽然目前新能源城市物流车（以轻型货车为主）的市场渗透率仅为1%，与《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》设定的目标（80%）相差甚远，但新能源城市物流车的市场渗透率正接近临界点。城市物流车具备日行驶里程短、固定往返的特征，是继公交车后新能源汽车推广的重要方向。在没有政策支撑的条件下，纯电动城市物流车有望在2024年至2025年之间与传统燃油汽车实现拥有总成本的平价点。因此，本研究假设，自2035年起，所有情景中新能源物流车的市场渗透率将达到100%。

**中重型货车：**由于纯电动与氢燃料技术尚不成熟[18]，公路运输行业从业者多为“小、散、乱”的企业与个体户（Qiu等，2020）、新能源汽车的总拥有成本远未达到“平价点”（Mao等，2021）且缺乏政策激励，新能源中重型货车将比其他车型更晚达到市场渗透率的“临界点”。

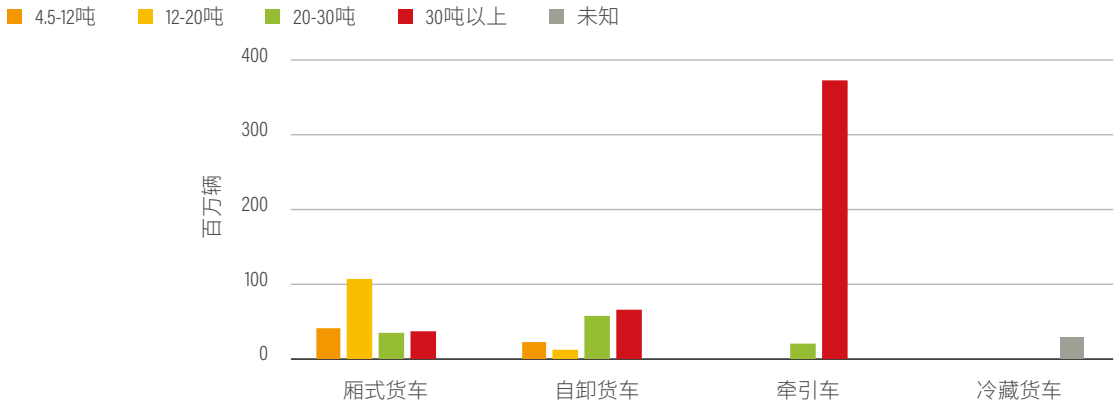
不同应用场景下，中重型货车零排放转型的步伐并不一致：首先，用于城市配送、短倒与区域运输场景的货车和自卸货车（日行驶里程不超过200公里）将在2023—2025年达到平价点（无政策激励），且有望较早实现新能源汽车的规模化推广。其次，用于长距离运输的中重型货车（日行驶里程为200~1,000公里）或用于冷链运输的货车将在2030—2035年才能达到平价点（无政策激励）（Mao等，2021；英国交通部，2021；Agora energiewende，2020），而其向零排放过渡的时间会比较晚，并且速度也会较慢。

目前，国内现有的载货车统计体系无法识别以上两种应用场景下中重型货车的数量。为简化，本研究假设总设计质量在30吨以上的半挂牵引车是长途运输的主力车型（虽然货车在国内也常用于长途运输）。基于此，长距离运输的中重型货车和冷藏货车在目前中重型货车总保有量中的占比约为50%，剩余50%主要是用于城市配送、短倒与区域运输场景的货车和自卸货车。本研究进一步假设这一车队结构在未来很长时间内会保持稳定。根据车辆总设计质量与车型划分的中重型货保有量如图16所示。

在现有政策情景中，虽然《2030年前碳达峰行动方案》要求2030年“新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到40%左右”，但是该目标并没有明确新能源中重型货车的销量占比，不足以支撑情景假设。因此，本研究采用《节能与新能源汽车技术路线图2.0》中的最高目标，即新能源中重型货车在2030年的市场渗透率为17%。本研究进一步假设，到2050年，100%新增与更新的用于城市配送、短倒与区域运输场景的货车和自卸货车将是零排放货车，即2050年新能源中重型货车在中重型货车保有量中占比达50%（其当年市场渗透率占比也约为50%）。

在深度电动化情景中，考虑到国内中重型货车的使用年限一般为4年到10年（Mao等，2021），所以，若要在2060年实现道路交通领域的碳中和，应该在2050年前停止销售传统能源中重型货车（含柴油货车与天然气货车）。这意味着，不仅要在城市配送、短倒与区域运输场景实现新增货车的零排放，更要在长途运输和冷链运输场景实现新增货车的零排放。此外，纯电动技术足以支持城市配送、短倒与区域运输场景的中重型货车，而长距离重型货车和冷藏货车则需要燃料电池汽车技术提供支撑。目前国内的新能源货车推广政策不足以支撑该目标的实现，因此有必要施以更多激励措施，如提高新能源货车的购置

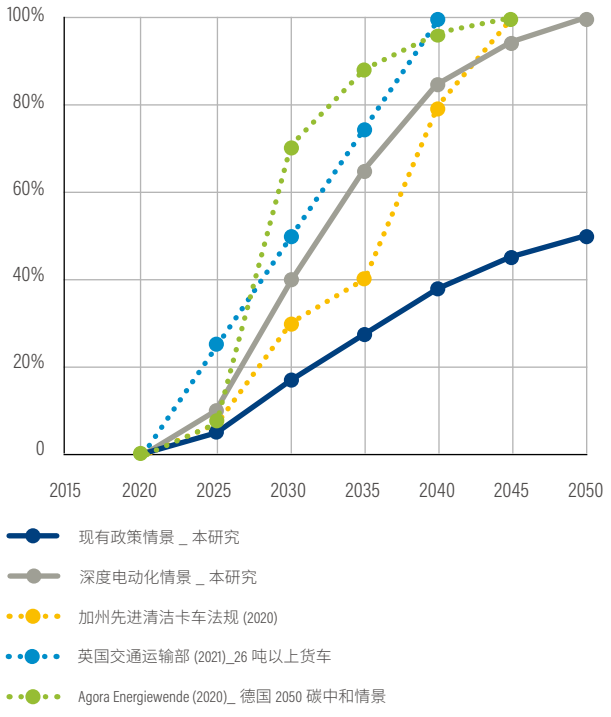
图 16 | **根据车辆总设计质量与车型划分的中重型货保有量**



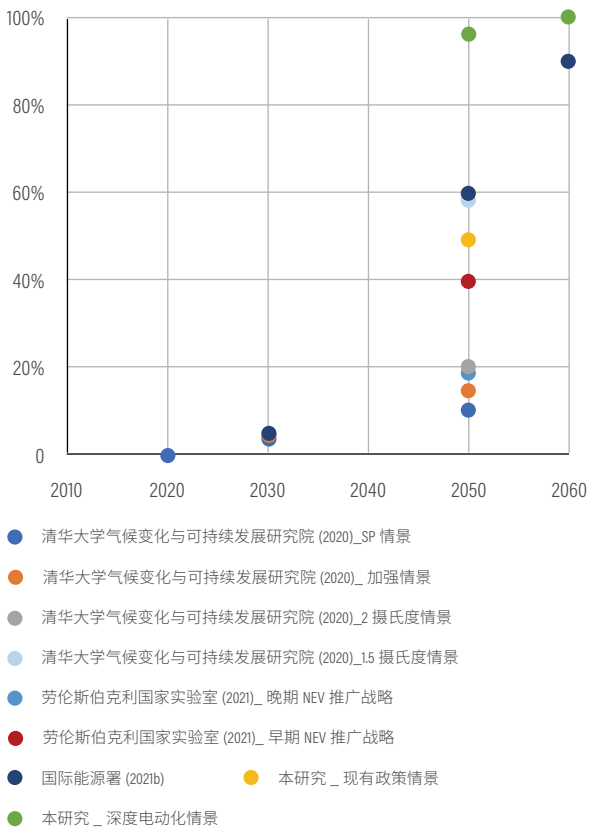

来源：中国汽车技术研究中心有限公司。

图 17 | 现有研究对国内外新能源中重型货车推广趋势预测

**a. 新能源中重型货车的市场渗透率**




**b. 新能源中重型货车保有量占比**




来源：作者根据以上文献总结与本研究假设。

补贴（尽管新能源汽车国家购置补贴将于2023年彻底退出，但新能源重型货车的补贴仍有必要维系甚至提高）、引入新能源货车运营补贴、建立重型商用车燃料消耗量标准与碳排放道路收费体系、为新能源货车提供优先通行权、提高充（换）电和加氢基础设施网络覆盖度和便利性（包括大功率快充网络的建设）。

现有研究对国内外新能源中重型货车推广趋势预测如图 17 所示。

***车辆能效提升***

与众多发展中国家不同，中国自2004年就逐渐开始实行全面且严格的车辆燃料消耗量标准。这些标准要求，在中国生产或进口的汽车必须符合单车燃料消耗量限值要求；此外，整车生产企业必须满足企业平均燃料消耗量目标，企业平均燃料消耗量（和新能源汽车）积分可以根据《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》在企业之间进行交易。

随着车辆燃料消耗量限值要求越来越严格，包括传统能源汽车和新能源汽车在内的车队平均燃料消耗量持续下降。以乘用车为例，目前国内乘用车平均燃料消耗量已经从2016年的6.5升/百公里（NEDC工况）下降到2020年的5.61升/百公里，接近2020年5升/百公里的目标（中国汽车技术研究中心有限公司，2021）。根据最新的乘用车第五阶段燃料消耗量标准，乘用车新车平均燃料消耗量目标是2025年的4升/百公里（95克二氧化碳/公里，WLTP工况），即将达到欧盟2024年95克二氧化碳/公里的目标水平（WLTP工况）（欧盟议会和理事会，2019），与美国2017—2025年（第二阶段）轻型汽车燃油经济性及温室气体排放标准规定的4.3升/百公里接近（美国环保署和美国国家公路交通安全管理局，2012）。

尽管车队平均燃料消耗量有显著下降，但传统能源汽车的平均燃料消耗量并未得到改善。这主要是由于新能源汽车燃料消耗低，有助于大幅降低车队的平均燃料消耗量——即整车生产企业可以通过增加新能源汽车产量来满足企业平均燃料消耗量目标（国际清洁交通委员会，2019）。所以，尽

管在2016年和至2020年间国内乘用车（包括新能源汽车）的平均燃料消耗量下降了13%，但传统能源汽车的平均燃料消耗量仅下降了7%（中国汽车技术研究中心有限公司，2016和2021）。

中国车辆燃料消耗相关标准与法规见表 10。

实际上，传统能源汽车的油耗仍然存在较大改善空间：

- 对乘用车而言，通过改善传统能源乘用车的油耗——特别是通过加速混合动力汽车的推广，就可基本实现第五阶段乘用车燃料消耗量标准提出的4升/百公里的目标。目前，2020年国内混合动力乘用车在乘用车新车销量中占比仅为2.6%，低于欧盟的11.9%（欧洲汽车制造商协会，2021）。根据《节能与新能源汽车技术路线图2.0》中设定的目标，混合动力汽车2025年在传统能源汽车销量中占比为50%～60%，2035年为100%。本研究现有政策情景也采用该目标值。
- 对于中重型货车而言，基于《节能与新能源汽车技术路线图2.0》的目标，本研究假设，在现有政策情景中，通过提高发动机热效率、减轻车重、减少货车的空气阻力、采用低摩擦轮胎等措施，2030年中重型货车的油耗有望比现状油耗低20%。

《节能与新能源汽车技术路线图2.0》中各车型新车平均燃料消耗目标如图18所示。

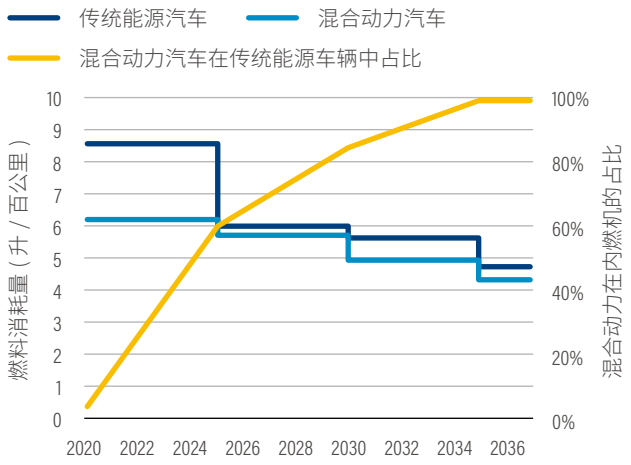
**表 10 | 中国车辆燃料消耗相关标准与法规**

| 车辆类型 | 单车燃料消耗量限值 | 企业平均燃料消耗量目标值 | 企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分管理办法 |
|---|---|---|---|
| **乘用车** | | | |
| 传统能源汽车 | 到2025年，乘用车新车平均燃料消耗量降至4升/百公里（WLTP）<br>作为乘用车第五阶段燃料消耗量标准组成之一，2021年起执行《乘用车燃料消耗量限值》（GB 19578—2021） | 到2025年，乘用车新车平均燃料消耗量降至4升/百公里（WLTP）<br>作为乘用车第五阶段燃料消耗量标准组成之一，2021年起执行《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》（GB 27999—2019） | 到2023年，新能源汽车积分比例为18%<br>2018年起执行《乘用车企业平均燃料消耗量和新能源汽车积分并行管理办法》 |
| 新能源汽车 | 纯电动汽车2025年电耗为12千瓦时/百公里（NEDC）<br>2019年起执行《电动汽车能量消耗率限值》（GB/T 36980—2018） | | |
| 天然气汽车 | 无 | 无 | 无 |
| **轻型商用车** | | | |
| 传统能源汽车 | 在第二阶段的水平上降低20%<br>2018年起执行第三阶段《轻型商用车辆燃料消耗量限值》（GB 20997—2015） | 无 | 无 |
| 天然气汽车 | 无 | 无 | 无 |
| 新能源汽车 | 无 | 无 | 无 |
| **重型商用车** | | | |
| 传统能源汽车 | 在第二阶段的水平上降低15%<br>2019年起执行第三阶段《重型商用车辆燃料消耗量限值》（GB 30510—2018） | 无 | 无 |
| 天然气汽车 | 无 | 无 | 无 |
| 新能源汽车 | 无 | 无 | 无 |

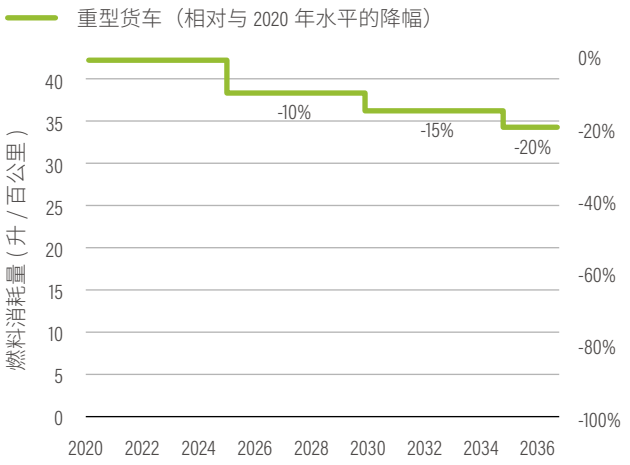
来源：作者根据现有标准和法规总结。

图 18 | 《节能与新能源汽车技术路线图2.0》中各车型新车平均燃料消耗目标(2020—2035年)

**a. 乘用车**




**b. 中重型货车(以牵引车为例)**




来源：作者根据《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》绘制。

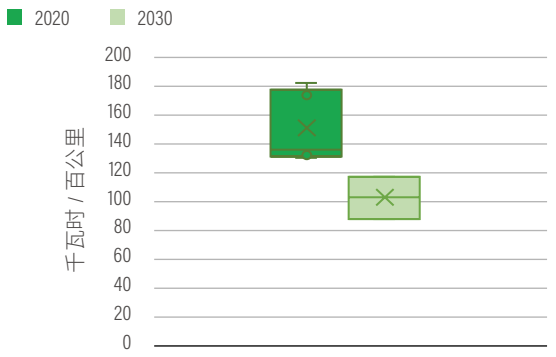
与此同时，降低新能源汽车的能量消耗也同等重要（Gao 等，2019）。尽管中国率先出台了全球首个纯电动乘用车能量消耗标准《电动汽车能量消耗率限值》（GB/T 36980—2018），但仍缺乏新能源商用车相关的能量消耗标准。从提升新能源商用车续航里程、降低车辆成本的角度看，有必要改善新能源商用车能耗。本研究假设，通过采用高性能动力电池、提高电机效率、减轻车重与车辆空气阻力、优化电池热管理系统等手段，可在未来降低新能源商用车的能耗。由于目前新能源商用车（特别是货车）推广数量有限且缺乏实证数据与未来模型测算，本研究通过文献总结假设新能源商用车未来潜在的能耗降幅——即所有相关文献预测值的中位数（见图 19）。

以上假设主要应用在现有政策情景。考虑到现有政策情景的燃料消耗目标具有国际先进性，本研究不再设立更激进的情景，而是在基准情景中假设传统能源汽车和新能源汽车燃料消耗量相对现状将无任何改善，以评估当现有政策情景中的目标未达成时，可能对排放产生的影响。

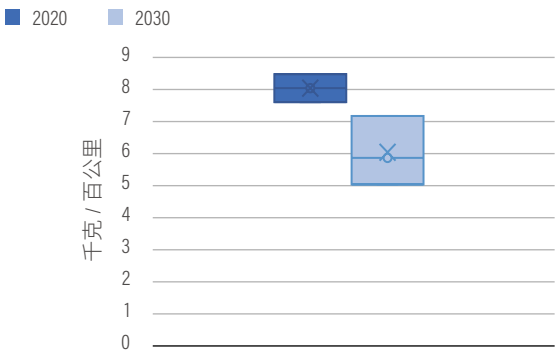
值得注意的是，本研究在碳排放计算中采用实际油耗，而非认证油耗。特别是对乘用车而言，由于测试工况[19]与实际工况存在差异以及乘用车的“大型化”趋势[20]，传统乘用车的实际油耗比认证油耗高：2017年传统乘用车实际平均油耗为8.6升/百公里，比认证消耗量高30%（能源与交通创新中心，2018）。因此，本研究使用COPERT模型估算的实际油耗作为基准年数据（参见“排放模型”部分），并假设未来乘用车实际油耗与认证油耗的差异将不断缩小。

图 19 | 2020年和2030年总质量超过30吨的新能源牵引车的能耗

**a. 纯电动牵引车**




**b. 燃料电池牵引车**




来源：作者根据现有文献（Mareev，2018；劳伦斯伯克利国家实验室，2021；Liimatainen 等，2019；T&E，2020；Liu 等，未注明日期；国际清洁交通委员会，2021）的不完全统计。

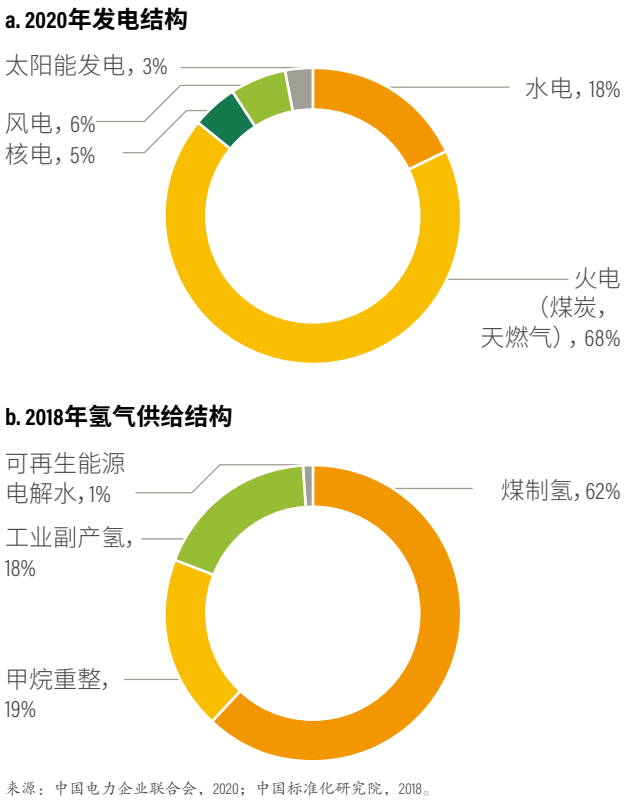
### 3.2.4 上游发电与制氢环节减排

由于国内目前发电与制氢均较依赖煤炭（见图20），因此新能源汽车的上游发电与制氢排放不可小觑：

- 发电结构：据统计，2020年，中国近61%的发电量来自煤电（中国电力企业联合会，2020），而欧盟2020年只有37%的发电量来自化石燃料发电[21]（Agora Energiewende，2020）。
- 氢气供给结构：2018年，国内62%的氢气供给量来自高排放的煤制氢（coal gasification）（中国标准化研究院，2018），而美国2020年95%的氢气供给量来自排放水平相对低一些的蒸汽甲烷重整（steam methane reforming，简称SMR）（美国能源部，2020）。

由于依赖煤电与煤制氢，相对于传统能源汽车，目前国内新能源汽车的“油井到车轮”（WTW）排放减排潜力有限，特别是能耗高的中重型车。以总设计质量为40吨的牵引车为例，纯电动牵引车每百公里的“油井到车轮”（WTW）二氧化碳排放比柴油车低25%；而燃料电池牵引车的减排潜力更加有限，其“油井到车轮”二氧化碳排放与柴油车的排放基本相当。相较之下，纯电动乘用车“油井到车轮”的二氧化碳排放比传统燃油乘用车低59%。因此，推广新能源乘用车“油井到车轮”的减排潜力比新能源牵引车更大，甚至相对于柴油牵引车，燃料电池牵引车在目前煤制氢为主的氢气供给结构下几乎无减排潜力。当前发电结构和氢气供给结构下各车型“油井到车轮”二氧化碳排放量如图21所示。

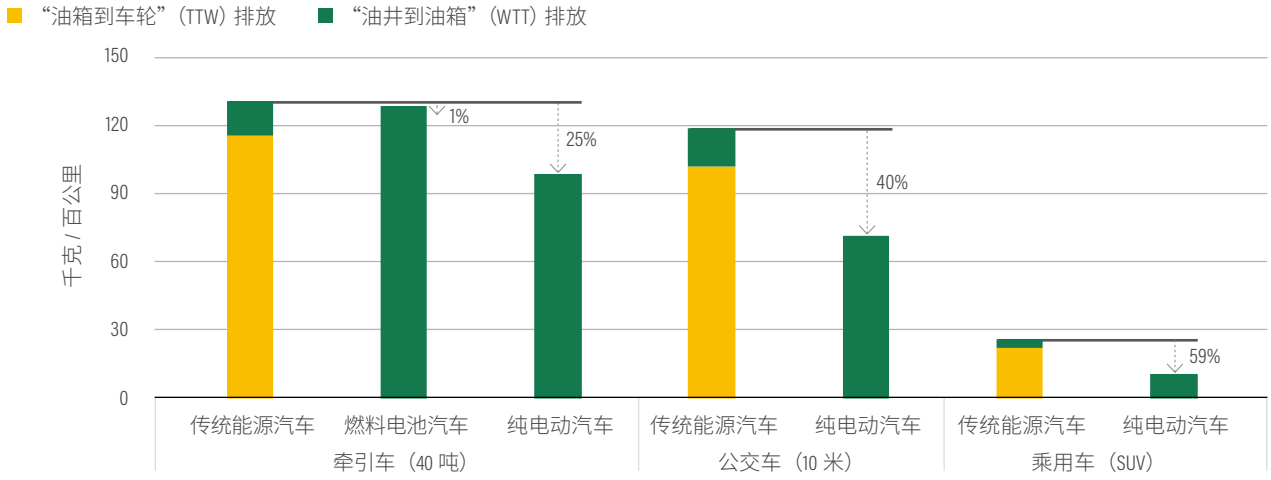
图 20 | 中国当前发电结构和氢气供给结构




来源：中国电力企业联合会，2020；中国标准化研究院，2018。

实现道路交通运输部门减排，也需针对上游发电和制氢行业采取相关措施。目前国家已经对电力行业减排提出碳达峰目标，有关行业协会也已对制氢技术路线提出未来

图 21 | 当前发电结构（2020年）和氢气供给结构（2018年）下各车型“油井到车轮”二氧化碳排放量




说明：· 图中百分比代表相对于同类型传统能源汽车，新能源汽车二氧化碳排放降幅。

· 各种类型车辆的百公里能耗如下：柴油牵引车为 34 升，纯电动牵引车为 150 千瓦时，燃料电池牵引车为 8.5 千克氢气；传统乘用车（SUV 车型）为为 8.6 升，纯电动乘用车为 16.5 千瓦时；传统公交车为 38 升，纯电动公交车为 109 千瓦时。

· 作者基于 GREET 2.0 模型测算炼化与不同制氢方式的“油井到油箱”（WTT）排放因子，不含氢气运输与加注过程中产生的二氧化碳排放。假设电网输配电损为 8%，新能源汽车充电电耗为 8%。

来源：作者测算。

规划。这些目标与规划为本研究的现有政策情景设计提供了重要参考：

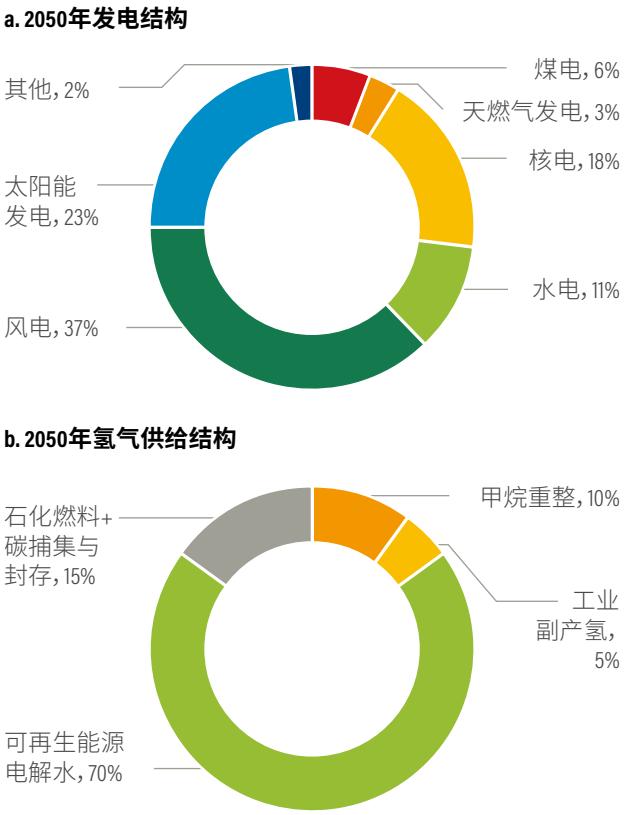
- 发电环节的现有政策减排目标：在近期，根据《2030年前碳达峰行动方案》要求，国内煤炭消耗量将在“十四五”期间（2021—2025年）达峰；到2030年风电和太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上。在中长期，根据《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》报告“2摄氏度情景”中的假设（清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020），到2050年，国内煤电发电量在总发电量中占比为6.5%。

- 制氢环节的现有政策减排目标：根据《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》（中国氢能联盟，2019），未来氢气供给结构中，绿氢（即利用可再生能源电解水制氢）将成为氢气主要来源，其产量占比将从2020年的1%扩大到2050年的70%。在此基础上，本报告假设2050年蓝氢和少量灰氢将为绿氢提供补充：国内灰氢产量占比将降至15%，其中蒸汽甲烷重整和工业副产氢占比分别为10%和5%；而蓝氢（煤制氢+碳捕集与封存）产量占比将在2050年增长至15%。

现有政策情景中发电结构和氢气供给结构的假设如图22所示。

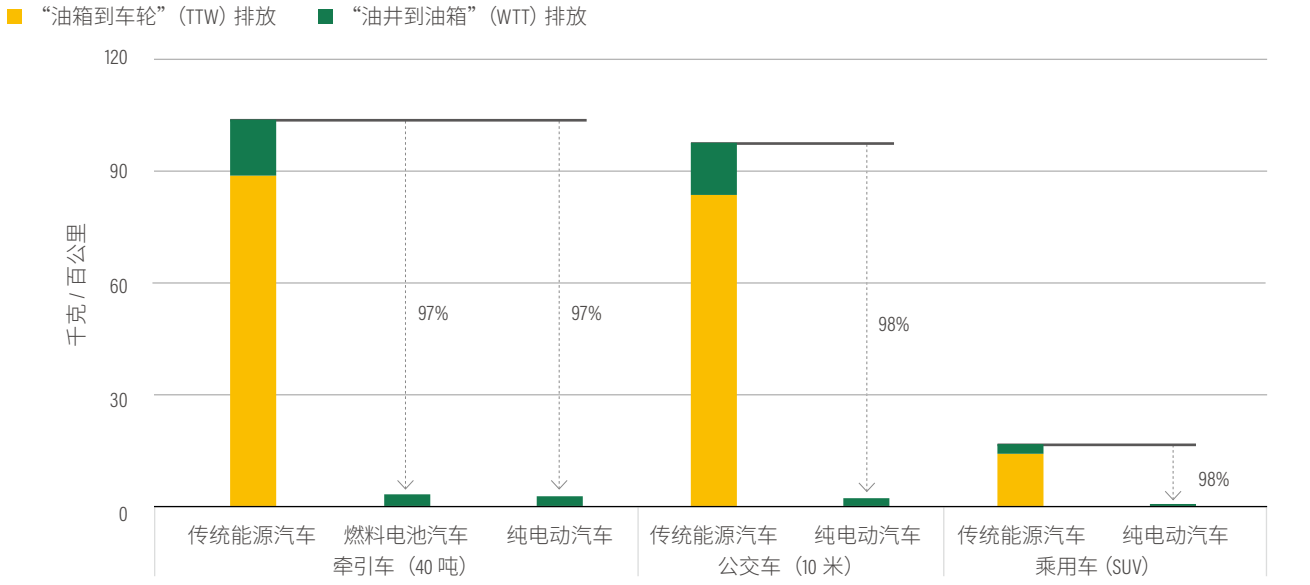
现有政策情景中的行业减排目标已相当积极：根据本研究测算，若实现上述发电结构与氢气供给结构的目标，到2050年，新能源汽车“油井到车轮”的二氧化碳排放将有望降至接近于零（见图 23）。因此，本研究不再针对

图 22 | **现有政策情景中发电结构和氢气供给结构的假设**




来源：清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020；中国氢能联盟，2019。

图 23 | **现有政策情景2050年的发电结构和氢气供给结构下各车型“油井到车轮”二氧化碳排放量**




说明：图中百分比代表相对于同类型传统能源汽车，新能源汽车二氧化碳排放降幅。作者利用 GREET 2.0 模型计算不同制氢方式“油井到油箱”（WTT）排放因子。
来源：作者测算。

表 11 | **不同情景下的发电结构和氢气供给结构**

| | 2050年 | |
|---|---|---|
| | 基准情景 | 现有政策情景 |
| 发电结构 | · 煤炭+天然气（25%）<br>· 非化石燃料（75%） | · 煤炭+天然气（9%）<br>· 非化石燃料（92%） |
| 氢气供给结构 | · 灰氢（35%）：煤制氢（15%）、蒸汽甲烷重整（15%）、工业副产氢（5%）<br>· 蓝氢（15%）：化石燃料制氢+碳捕集与封存（15%）<br>· 绿氢（50%）：可再生能源电解水制氢（50%） | · 灰氢（15%）：蒸汽甲烷重整（10%）+工业副产氢（5%）<br>· 蓝氢（15%）：化石燃料制氢+碳捕集与封存（15%）<br>· 绿氢（70%）：可再生能源电解水制氢（70%） |

来源：基准情景中的氢气供给结构为本研究假设。其余数据分别来自清华大学气候变化与可持续发展研究院（2020）以及中国氢能联盟（2019）。

发电结构与氢气供给结构设立更激进的情景，而是考虑在基准情景中增加相对保守的假设——即2050年仍有25%的化石燃料用于发电，50%的化石燃料用于制氢（Liu等，2021）（见表 11），以评估未达成现有政策情景目标的潜在影响。

### 3.2.5小结

综上所述，基于不同的减排政策目标假设，本研究共建立五个情景，分别是基准情景、现有政策情景、结构优化情景、深度电动化情景和深度减排情景，五个情景的参数假设见表12。

作为“反事实”（counterfactual）的参照情景，基准情景假设未来新能源汽车没有规模推广，车辆能效没有任何改善，有助于评估现有政策情景的减排潜力。

现有政策情景用以预测中国如期履行现有政策的目标（包括《2030年前碳达峰行动方案》等政策文件中提出的约束性目标，以及《节能与新能源汽车技术路线图2.0》等行业协会减排路线图中提出的非约束性目标）产生的减排潜力。如“替代车辆技术推广”和“上游发电与制氢环节减排”部分所述，现有政策情景在提高车辆能效及上游部门减排方面已设立较先进的目标，但在新能源汽车推广与应用和运输结构优化方面缺乏明确的中长期目标及与目标相匹配的政策措施。因此，除现有政策情景外，本研究还构建了三个强化情景。

- 结构优化情景：在现有政策情景基础上假设未来（客运与货运）运输结构将大幅优化且车辆运营效率（满载率、负载率）得到显著提升。而得益于这些结构优化措施，结构优化情景未来的机动车保有量将是所有情景中最低的。
- 深度电动化情景：在现有政策情景基础上假设新能源汽车渗透率将进一步提速。其中，新能源汽车在乘用车新车销量中的占比将在2035年达到100%；新能源汽车在货车新车销量中的占比将在2050年达到100%，届时新增的用于长距离运输与冷链运输中的中重型货车均为新能源汽车。
- 深度减排情景：综合结构优化与深度电动化两个情景的假设，在确保不使用碳汇的条件下，基本实现道路交通温室气体排放在2060年实现碳中和。

表 12 | **五个情景的参数假设**

| | 2020年 | 基准情景 | 现有政策情景 | 结构优化情景 | 深度电动化情景 | 深度减排情景 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **运输需求增长与结构优化** | | | | | | |
| 2020年和2060年乘用车保有量（百万辆） | 239（千人170辆） | 506（千人425辆）（112%） | 506（千人425辆）（112%） | 381（千人300辆）（59%） | 506（千人425辆）（112%） | 381（千人300辆）（59%） |
| 2020年和2060年总货运周转量（万亿吨公里） | 11.2 | | | 25.9（131%） | | |
| 货运运输结构（公路货运周转量占比） | 54% | 50%（-4%） | 50%（-4%） | 40%（-14%） | 50%（-4%） | 40%（-14%） |
| 中重型货车单车平均负载重量（吨） | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 11.5（21%） | 9.5 | 11.5（21%） |
| 2020年和2060年中重型货车保有量（百万辆） | 9.5 | 20（111%） | 20（111%） | 12（26%） | 20（111%） | 12（26%） |
| **推广新能源汽车** | | | | | | |
| 2020年和2035年乘用车电动化率（新能源乘用车在乘用车新车销量中的占比） | 16% | 30%（14%） | 50%（34%） | 50%（34%） | 100%（84%） | 100%（84%） |
| 2020年和2050年中重型货车电动化率（新能源中重型货车在中重型货车新车销量中的占比） | 0.6% | 12%（11%） | 50%（即用于城市配送、短倒与区域运输场景的货车和自卸货车）（49%） | 50%（即用于城市配送、短倒与区域运输场景的货车和自卸货车）（49%） | 100%（所有中重型货车，包括用于长距离运输与冷链运输的货车与牵引车）（99%） | 100%（所有中重型货车，包括用于长距离运输与冷链运输的货车与牵引车）（99%） |
| **车辆能效提升** | | | | | | |
| 传统能源乘用车能效 | 新车平均燃料消耗量为5.6升/百公里<br>混合动力乘用车销量占比为3% | 无改善 | 乘用车新车平均燃料消耗量2025年达4升/百公里；<br>混合动力乘用车销量占比2025年达60%，2035年达100% | | | |
| 传统能源中重型货车能效 | 取决于车辆最大总质量 | 无改善 | 中重型货车平均燃料消耗量：2035年比2020年水平降低20% | | | |
| 新能源汽车能效 | 取决于车辆最大总质量 | 无改善 | 基于车辆最大总质量，有不同程度的改进 | | | |
| **上游发电和制氢环节减排** | | | | | | |
| 2020年和2050年发电结构（非化石能源发电占比） | 32% | 75%（43%） | 92%（60%） | | | |
| 2020年和2050年氢气供给结构（灰氢供给占比） | 99% | 35%（-64%） | 15%（-84%） | | | |

说明：对于数字，括号内百分比为相较于 2020 年基准年的变化比例；对于百分比，括号内百分比为该年比例与基准年比例之差。

来源：2020 年数据来自统计年鉴。其他数据为作者的情景假设。



第四章

# 模型结果

## 4.1 基准年结果

本研究基准年为2020年，即统计数据能支持的最新年份。虽然受新冠肺炎疫情期影响，2020年全球的交通活动量与排放量有所减少（Le Quéré，2020），但中国较早结束了封锁，因此道路交通受疫情影响较为有限（Zhou等，2020）。

为估算道路交通的温室气体排放，本研究采用“自下而上法”（见“模型方法”部分），并将基准年“自下而上法”的测算结果与“自上而下法”的结果（Su，2017）进行交叉验证。为两种结果间的差异，本研究对“自下而上法”中的车辆年行驶里程进行了调整。

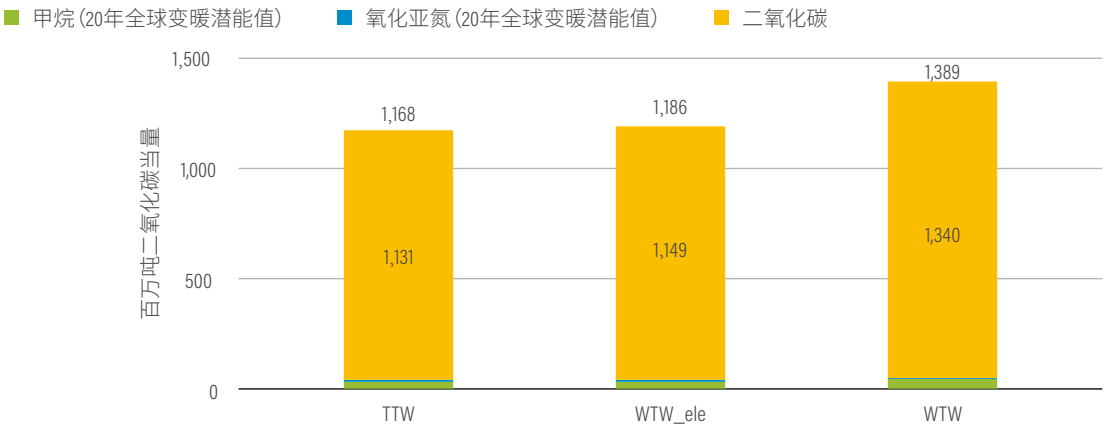
不同排放核算范围下，中国道路交通基准年温室气体排放量（见图24）分别为：

- “油箱到车轮”排放为11.68亿吨二氧化碳当量。
- “油箱到车轮”排放加上游发电与制氢排放（以下简称“WTW_ele排放”）为11.86亿吨二氧化碳当量，与“油箱到车轮”排放相当，原因是当前新能源汽车的市场渗透率较低。
- “油井到车轮”排放为13.89亿吨二氧化碳当量，比“油箱到车轮”排放高19%。

无论是何种排放核算范围，二氧化碳在道路交通温室气体排放中的占比均为96%～97%之间，是最主要的排放物。

其次，在目前道路交通温室气体排放（WTW_ele）与空气污染物排放中，各种车辆类型的排放贡献有差异（见图25）：

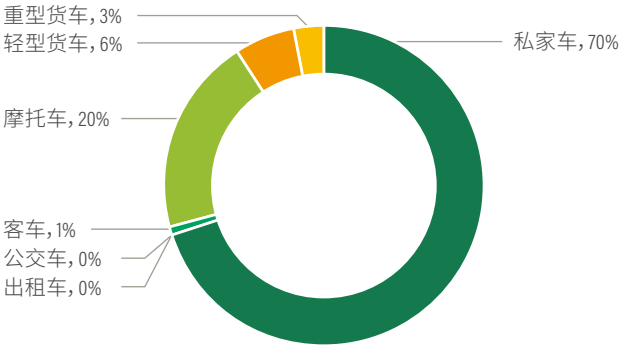
图 24 | 2020年不同核算范围下的道路交通温室气体排放量



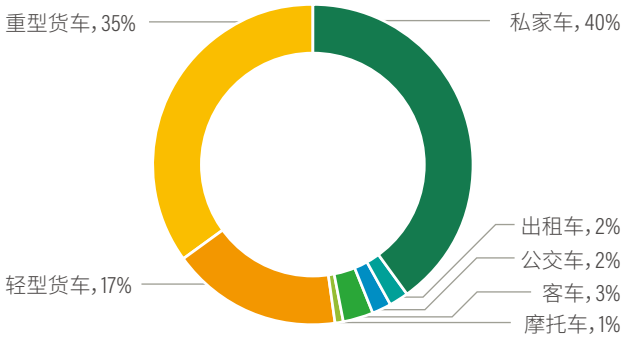

说明：温室气体主要包括二氧化碳、氧化亚氮和甲烷。氧化亚氮和甲烷的全球升温潜能值采用 IPCC 第五次评估报告 20 年全球升温潜能值（GWP）。
来源：作者根据模型测算。

图 25 | 不同车型车辆保有量、温室气体排放以及空气污染物排放占比

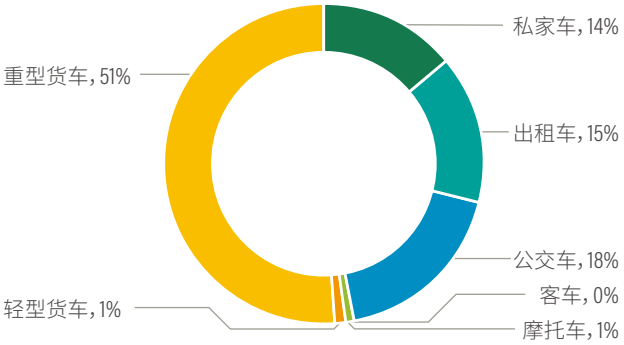
**车辆保有量**



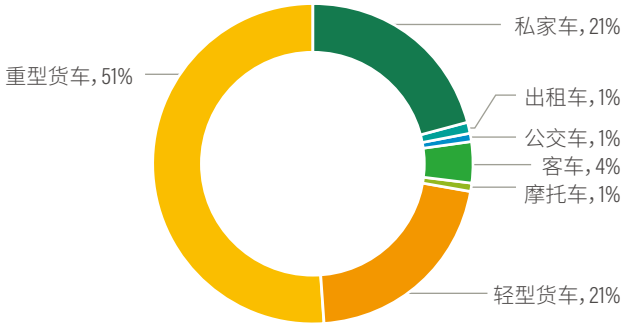

**二氧化碳(WTW_ele)**



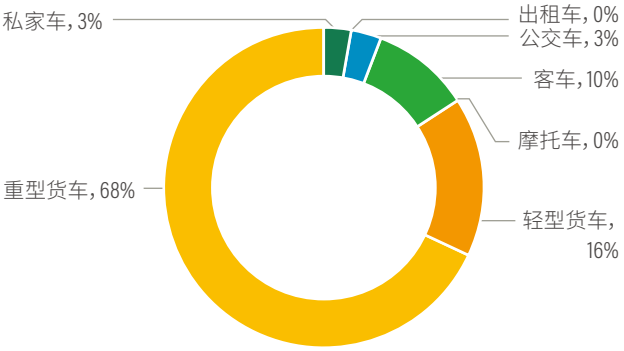

**甲烷(WTW_ele)**



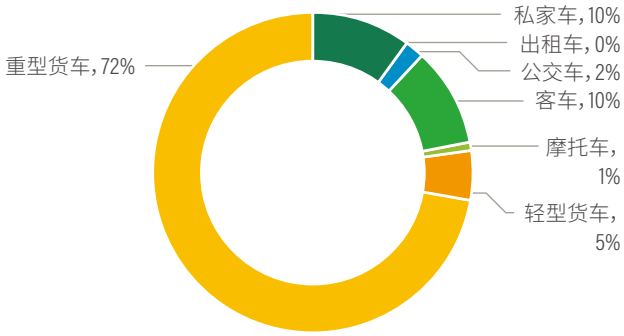

**氧化亚氮(WTW_ele)**



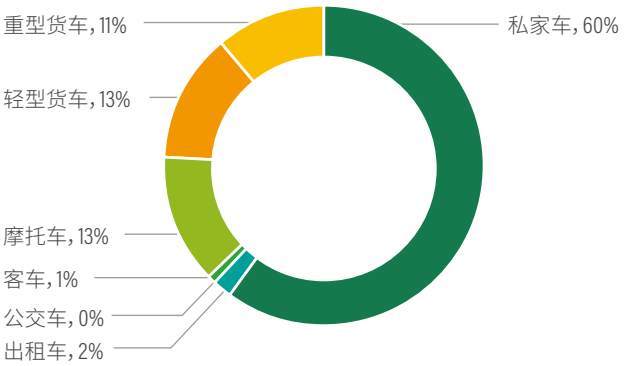

**氮氧化物**



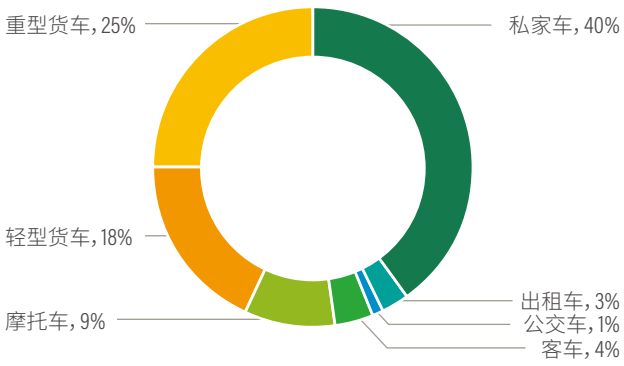

**颗粒物**




**非甲烷总烃**




**一氧化碳**




来源：作者根据模型测算。

- 二氧化碳排放（WTW_ele）：私家车为机动车二氧化碳排放的主要排放源，在机动车二氧化碳排放中占比达40%。其他主要二氧化碳排放源依次为中重型货车（占比为35%）与轻型货车（占比为17%）。尽管摩托车在机动车保有量中占比达20%，但其二氧化碳排放占比却微乎其微。
- 甲烷排放（WTW_ele）：道路交通的甲烷排放量主要源于各类车辆燃料燃烧后的尾气排放与天然气汽车自身的甲烷逃逸排放（Pan等，2020）。其中，天然气汽车自身的甲烷排放占比较大，因此天然气汽车占比较大的车型——包括中重型货车、公交车和出租车，是道路交通甲烷排放的主要排放源，其排放占比分别达51%、18%与15%。
- 氧化亚氮排放：柴油车是氧化亚氮的主要排放源。其中，中重型货车的氧化亚氮排放在机动车氧化亚氮排放中的占比最高，达51%；轻型货车次之，占比达21%。
- 空气污染物：私家车为一氧化碳与非甲烷总烃的主要排放源，其排放占一氧化碳排放的40%与非甲烷总烃排放的60%。重型货车和轻型货车则是道路交通氮氧化物与颗粒物的主要排放源之一。

## 4.2 情景预测结果

本节预测不同情景下道路交通的温室气体排放、能源消费与消费结构，及空气污染物排放。以下将主要采用WTW_ele排放核算范围，其主要原因有二：一是上游石油炼化与天然气加工行业为难减排行业，其能否深度减排已超越本研究讨论范畴。二是上游发电与制氢环节的减排对新能源汽车全生命周期减排至关重要。若上游发电与制氢环节无法有效深度减排，新能源汽车是否为“零排放”将存疑（Gustafsson等，2021）。

### 4.2.1 温室气体排放

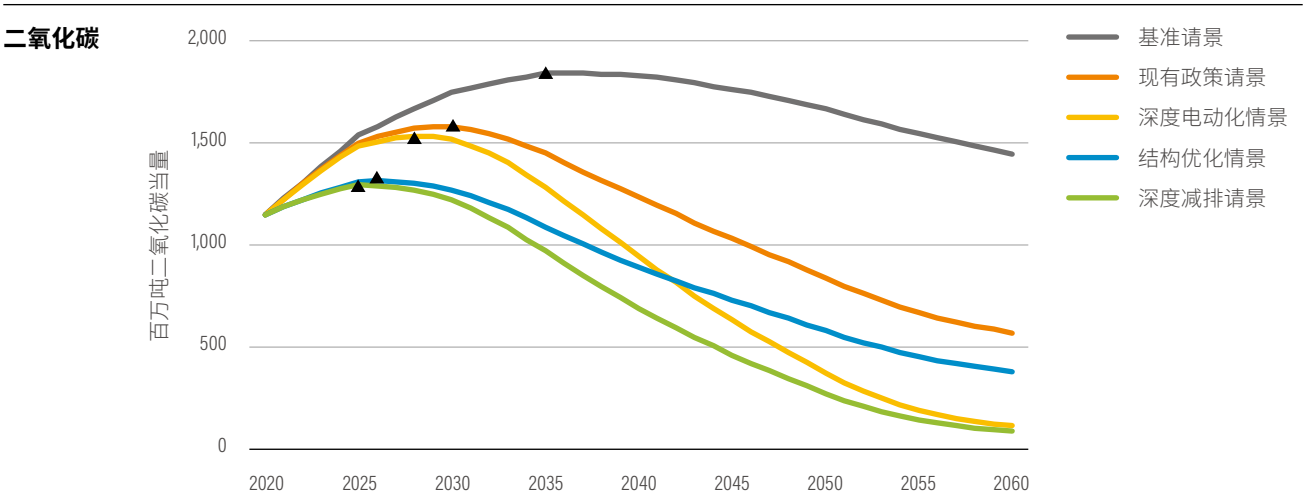
情景预测的结果表明：

**在近期，**道路交通领域的温室气体排放量将持续增长，并于2025—2035年达到峰值，峰值为13.4亿～19.1亿吨二氧化碳当量（比2020年排放水平高13%～61%）。其中，在现有政策情景下，如果中国能够如期达成现有政策目标，道路交通温室气体排放将在2030年达峰，峰值为16.38亿吨二氧化碳当量。在结构优化情景与深度电动化情景下，通过更激进的运输结构优化和新能源汽车推广与应用措施，达峰年份将分别提前至2026年与2028年，达峰时排放将分别为13.6亿吨与15.9亿吨二氧化碳当量。值得注意的是，与更激进的新能源汽车推广措施相比，激进的运输结构优化措施有助于温室气体排放更早达峰，且峰值也会更低。

在**中长期，**2060年道路交通领域的温室气体排放存在较大变数，在6,300万吨二氧化碳当量（比2020年排放水平低95%）与14.95亿吨二氧化碳当量（比2020年排放水平高26%）之间。其中，在现有政策情景下，如果现有政策能够延续当前的发展趋势，道路交通2060年的温室气体排放将比2020年低50%。在深度电动化情景与深度减排情景中，受更激进的新能源汽车推广措施的影响，道路交通2060年温室气体排放将比2020年低93%～95%，在不借助大量碳汇的基础上，能够实现道路交通排放的碳中和。值得注意的是，在中长期，新能源汽车推广与应用将超越运输结构优化，成为最具减排潜力的措施。

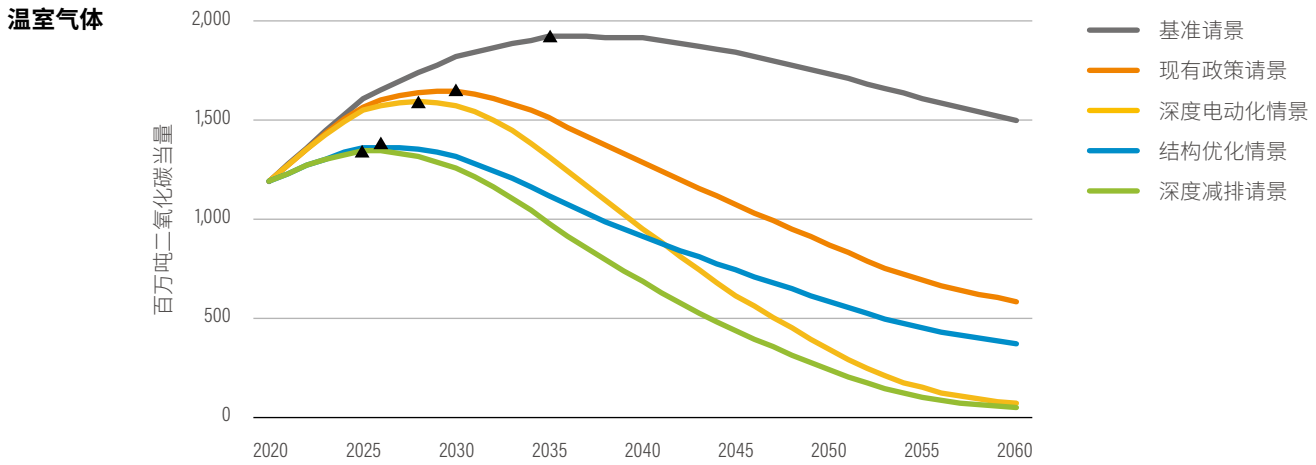
不同情景下的二氧化碳与温室气体排放如图26所示。

图 26 | **不同情景下的二氧化碳与温室气体排放**




说明：温室气体包括二氧化碳、氧化亚氮和甲烷等。氧化亚氮和甲烷的全球升温潜能值使用 IPCC 第五次评估报告 20 年全球升温潜能值。▲三角形为二氧化碳排放达峰时间。
来源：作者根据模型测算。

图 26 | **不同情景下的二氧化碳与温室气体排放**




说明：温室气体包括二氧化碳、氧化亚氮和甲烷等。氧化亚氮和甲烷的全球升温潜能值使用 IPCC 第五次评估报告 20 年全球升温潜能值。▲三角形为温室气体排放达峰时间。
来源：作者根据模型测算。

表 13 | **不同情景达峰时间、峰值排放量、2060年排放量与2020—2060年累计排放量**

| | 达峰时间 | | 峰值排放量（百万吨二氧化碳当量） | | 2060年排放量（百万吨二氧化碳当量） | | 2020—2060年累计排放量（百万吨二氧化碳当量） | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 二氧化碳 | 温室气体 | 二氧化碳 | 温室气体 | 二氧化碳 | 温室气体 | 二氧化碳 | 温室气体 |
| 基准情景 | 2035 | 2035 | 1,867 (63%)[a] | 1,909 (61%) | 1,455 (27%) | 1,495 (26%) | 68,228 | 69,947 |
| 现有政策情景 | 2030 | 2030 | 1,598 (39%) | 1,638 (38%) | 556 (-52%) | 595 (-50%) | 46,910 | 48,615 |
| 深度电动化情景 | 2028 | 2028 | 1,546 (35%) | 1,585 (34%) | 88 (-92%) | 88 (-93%) | 35,818 | 36,518 |
| 结构优化情景 | 2026 | 2026 | 1,322 (15%) | 1,358 (15%) | 360 (-69%) | 384 (-68%) | 36,080 | 37,268 |
| 深度减排情景 | 2025 | 2025 | 1,301 (13%) | 1,340 (13%) | 63 (-95%) | 63 (-95%) | 28,643 | 29,205 |

说明：括号内百分比为该数据相对 2020 年排放水平的变化率。
来源：作者根据模型测算。

不同情景达峰时间、峰值排放量、2060年排放量与2020—2060年累计积排放量见表13。

由于甲烷与氧化亚氮不仅是温室气体，也是空气污染物，需遵循“国六”标准，所以，甲烷与氧化亚氮的排放趋势与温室气体有所不同。

在现有政策情景与基准情景下，随着“国六”标准自2021年起全面实施，道路交通甲烷排放在2020—2030年会持续下降，但在2030年后将出现反弹。这一“先降后升”的趋势主要是由于天然气汽车推广数量的增长速度高于单车甲烷排放水平的下降速度导致的。同样，在现有政策情景与基准情景下，氧化亚氮排放量则呈现出“先升后降”的趋势。这是因

为，为了满足“国六”标准氮氧化物排放限值而对柴油货车安装的尾气后处理系统会增加氮氧化物的排放（Clairotte等，2020），因此单车氧化亚氮的排放会上升。

在深度电动化情景与深度减排情景中，甲烷和氧化亚氮排放呈快速下降的趋势（虽然氧化亚氮仍有“先升后降”的趋势）。这说明，相对于通过提升机动车排放标准（即现有政策情景）来限制甲烷与氧化亚氮排放，大规模推广新能源汽车是未来减少甲烷与氧化亚氮排放最为有效的措施。

不同情景下甲烷和氧化亚氮排放量如图27所示。

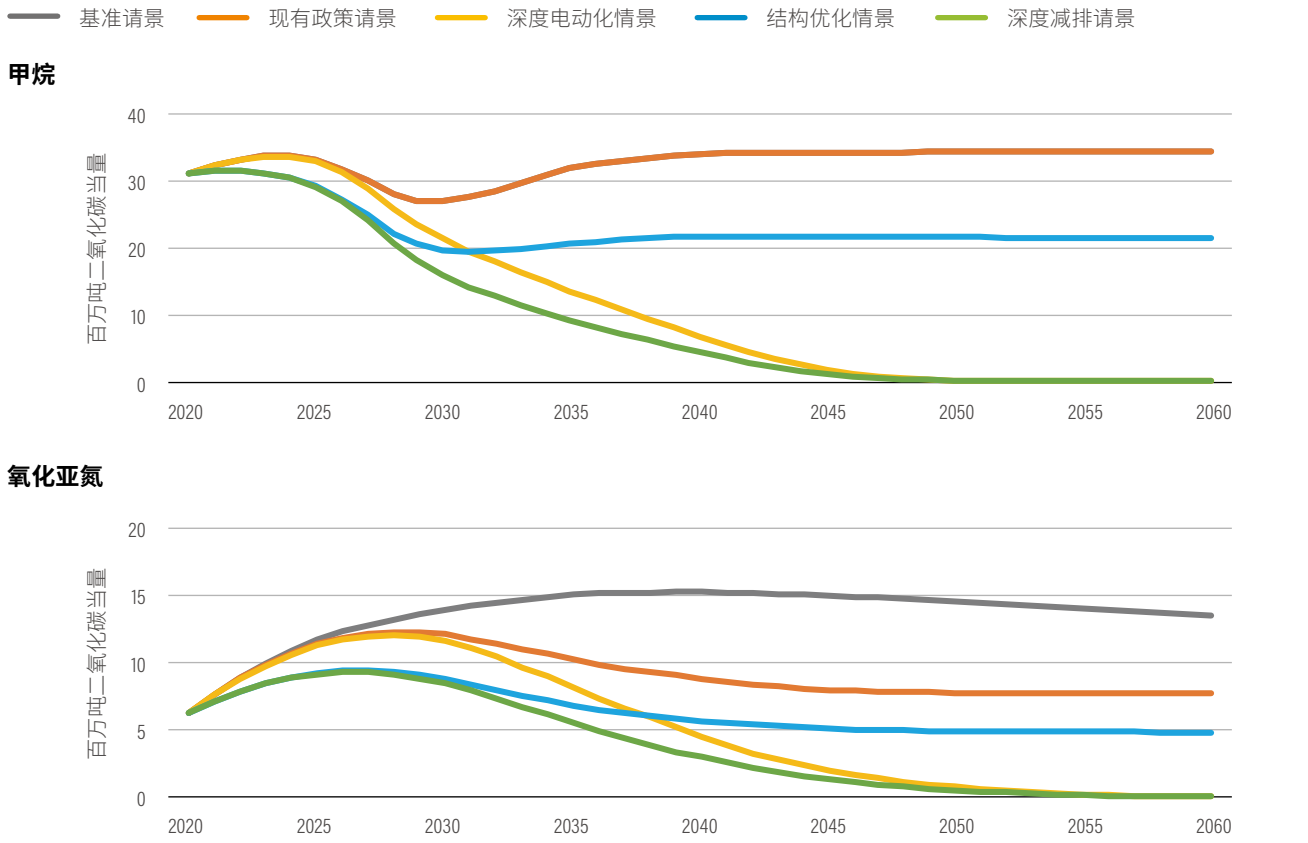
### 4.2.2 能源消耗量

未来道路交通能源消耗量与消费结构将面临巨大变化。

首先，新能源汽车的推广与应用将大幅减少道路交通对化石燃料（包括汽油、柴油和天然气）的依赖：

- 道路交通的石油消耗量（包括汽油与柴油）将早于2030年（即《2030年前碳达峰行动方案》设定的陆路交通石油消耗量达峰年）达峰。在现有政策情景下，国内道路交通石油消耗量将于2027年达峰，与彭博新能源财经（2021年）预测的全球道路交通石油消耗量达峰时间一致。在结构优化情景、深度电动化情景与深度减排情景中，受更激进的运输结构优化和新能源汽车推广与应用措施影响，道路交通石油消耗量的达峰时间可分别提前至2024年和2025年。在所有政策情景中，2060年道路交通石油消耗量将比2020年下降66%~100%，说明道路交通对石油的依赖程度将不断降低，特别是在深度电动化情景与深度减排情景中，道路交通领域将在2060年前彻底摆脱对石油的依赖。
- 道路交通的天然气消耗量存在较大变数：如果天然气汽车作为中重型货车低碳转型的过渡车型，将会在实现“2030年新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到40%左右”的目标中发挥重要作用，道路交通的天然气消耗量将在2060年才能达峰，且峰值消耗量将比

图 27 | **不同情景下甲烷和氧化亚氮排放量**




说明：氧化亚氮和甲烷的全球升温潜能值采用 IPCC 第五次评估报告 20 年全球升温潜能值。
来源：作者根据模型测算。

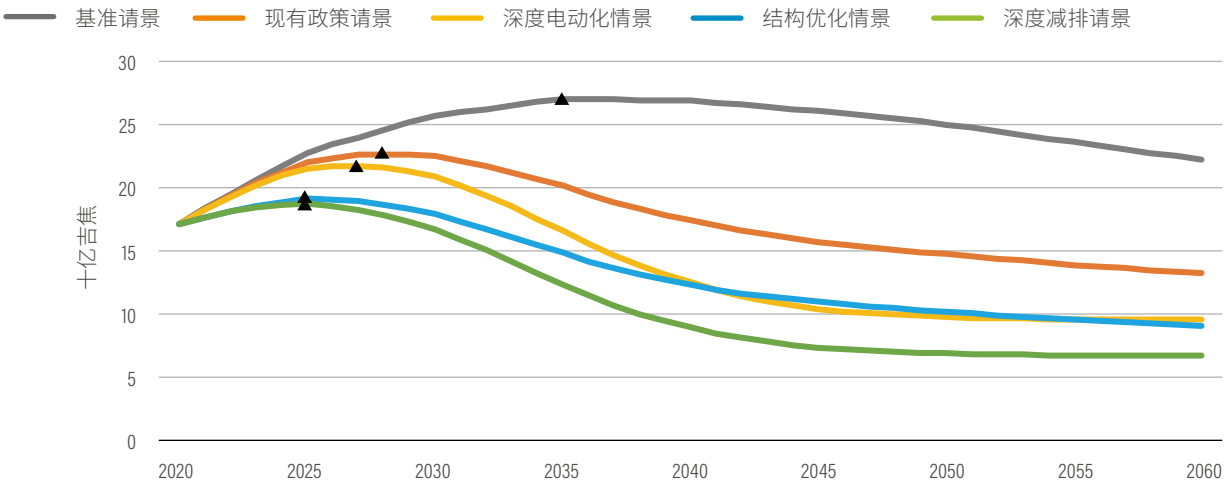
2020年高179%（见现有政策情景与结构优化情景）。如果天然气汽车不作为中重型货车低碳转型的过渡车型，即传统能源中重型货车将直接更新替换为新能源货车，则未来道路交通天然气消耗量将于2024—2026年达峰，并在2060年彻底退出使用（见深度电动化情景与深度减排情景）。

相较之下，未来道路交通领域的电量需求与氢燃料需求将呈强劲增长的态势：到2060年，道路交通的用电量将从目前的微乎其微，增长至28亿~62亿吉焦之间；氢燃料需求量也从目前的几近于零，增长至4亿~33亿吉焦之间。

值得注意的是，2060年的汽车保有量越低，对电能和氢燃料的需求量也就越少。例如，受运输结构优化的影响，深度减排情景的汽车保有量比深度电动化情景更低——乘用车低25%，中重型货车低40%，因此，2060年，深度减排情景的用电量比深度电动化情景低24%，氢燃料需求量也比深度电动化情景低39%。未来，适当控制汽车保有量（与车辆使用强度）有助于降低新增发电装机容量、制氢装机容量及输配电网的容量，可以在一定程度上节省社会投资。

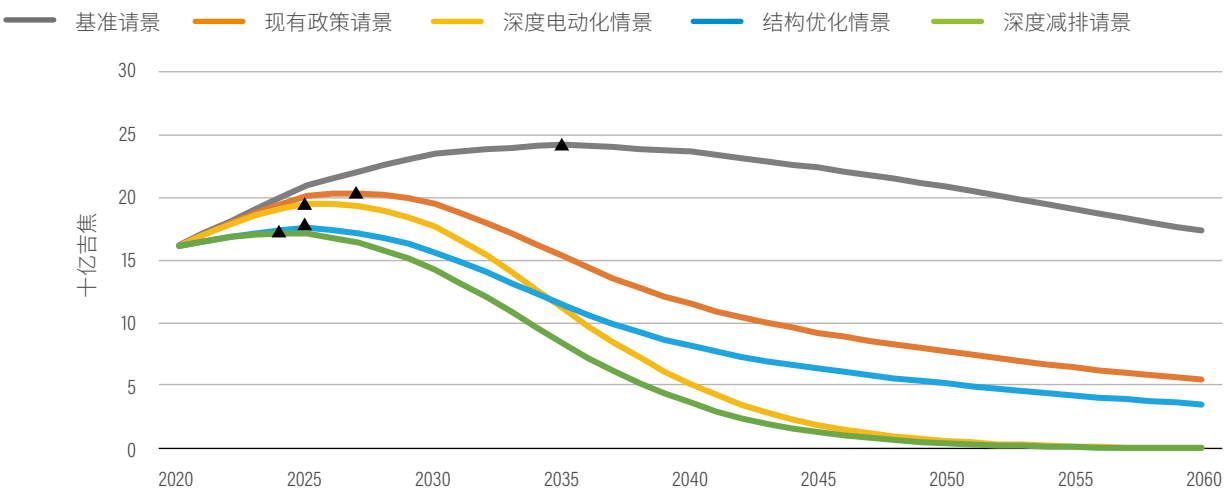
不同情景下道路交通领域能源消耗量和石油消耗量如图28和图29所示，不同情景下能源消费结构如图30所示。不同情景各燃料类型的达峰时间、峰值能源消耗量与2060年能源消耗量见表14。

图 28 | **不同情景下道路交通领域能源消耗量**



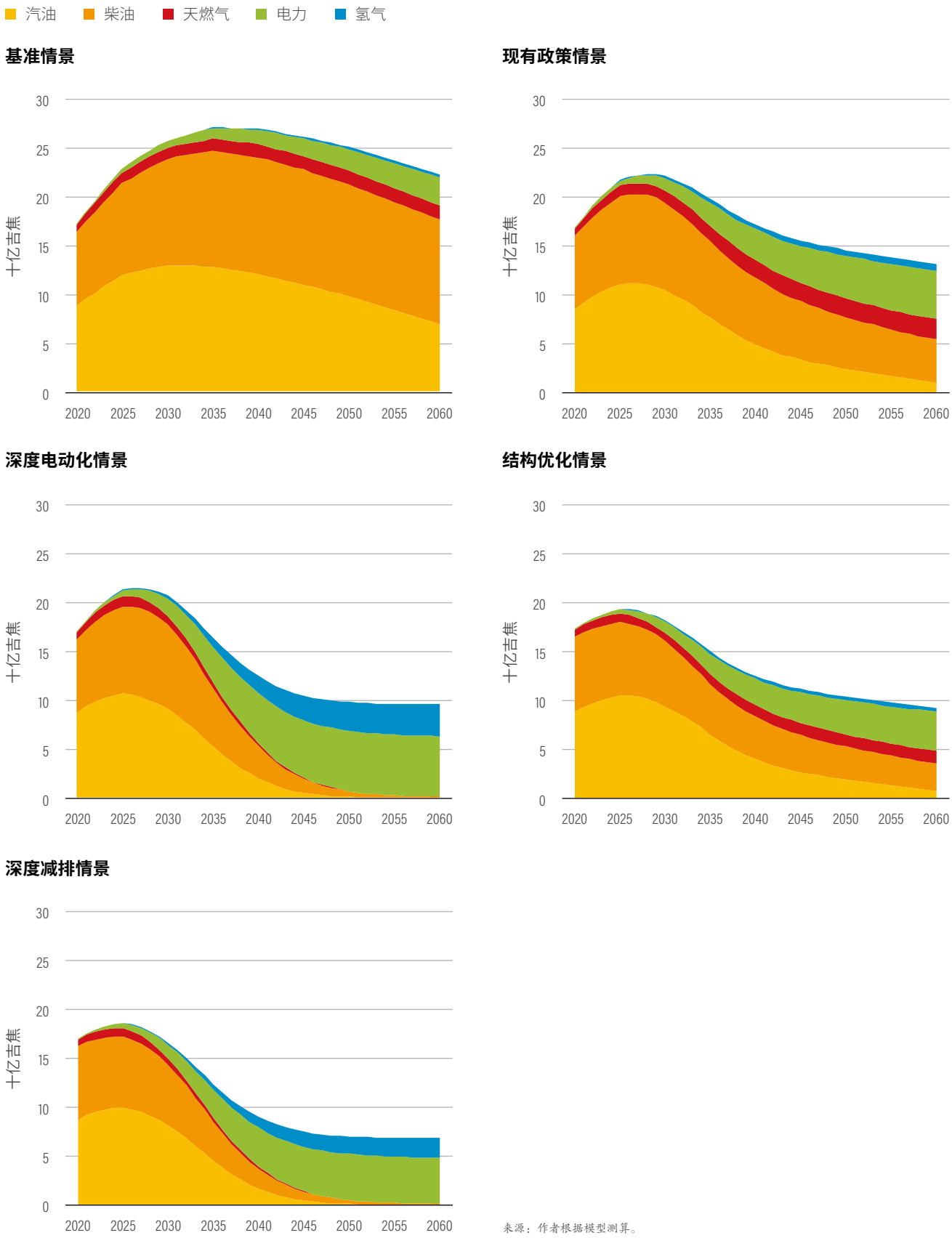

说明：▲三角形为不同情景下道路交通领域能源消耗量达峰时间。
来源：作者根据模型测算。

图 29 | **不同情景下道路交通领域石油消耗量**




说明：▲三角形为不同情景下道路交通领域石油消耗量达峰时间。
来源：作者根据模型测算。

图 30 | **不同情景下能源消费结构**




来源：作者根据模型测算。

表 14 | **不同情景各燃料类型的达峰时间、峰值能源消耗量与2060年能源消耗量**

| 情景类型 | 石油消耗量达峰时间（年） | 天然气消耗量达峰时间（年） | 石油消耗量（十亿吉焦） | | 天然气消耗量（十亿吉焦） | | 电能消耗量（十亿吉焦） | 氢气消耗量（十亿吉焦） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 峰值年 | 2060年 | 峰值年 | 2060年 | 2060年 | 2060年 |
| 基准情景 | 2035 | 2060 | 24.7 | 17.4 | 1.4 | 1.4 | 2.8 | 0.4 |
| | | | +52% | +7% | +97% | +97% | +2,500% | +401,400% |
| 现有政策情景 | 2027 | 2060 | 20.4 | 5.49 | 2.0 | 2.0 | 5.0 | 0.7 |
| | | | +26% | -66% | +179% | +179% | +4,500% | +659,900% |
| 深度电动化情景 | 2025 | 2026 | 19.7 | 0.0 | 1.1 | 0.0 | 6.2 | 3.3 |
| | | | +22% | -100% | +52% | -100% | +5,600% | +3,299,900% |
| 结构优化情景 | 2025 | 2060 | 17.7 | 3.5 | 1.3 | 1.3 | 3.9 | 0.4 |
| | | | +9% | -78% | +71% | +71% | +3,500% | +399,900% |
| 深度减排情景 | 2024 | 2024 | 17.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4.7 | 2.0 |
| | | | 8% | -100% | -100% | -100% | +4,200% | +2,019,900% |

说明：由于化石燃料达峰时间与石油（汽油和柴油）达峰时间一致，表中未列出化石燃料达峰时间。表中百分比表示相对于2020年消耗量的变化率。
来源：作者根据模型测算。

### 4.2.3 空气污染物排放

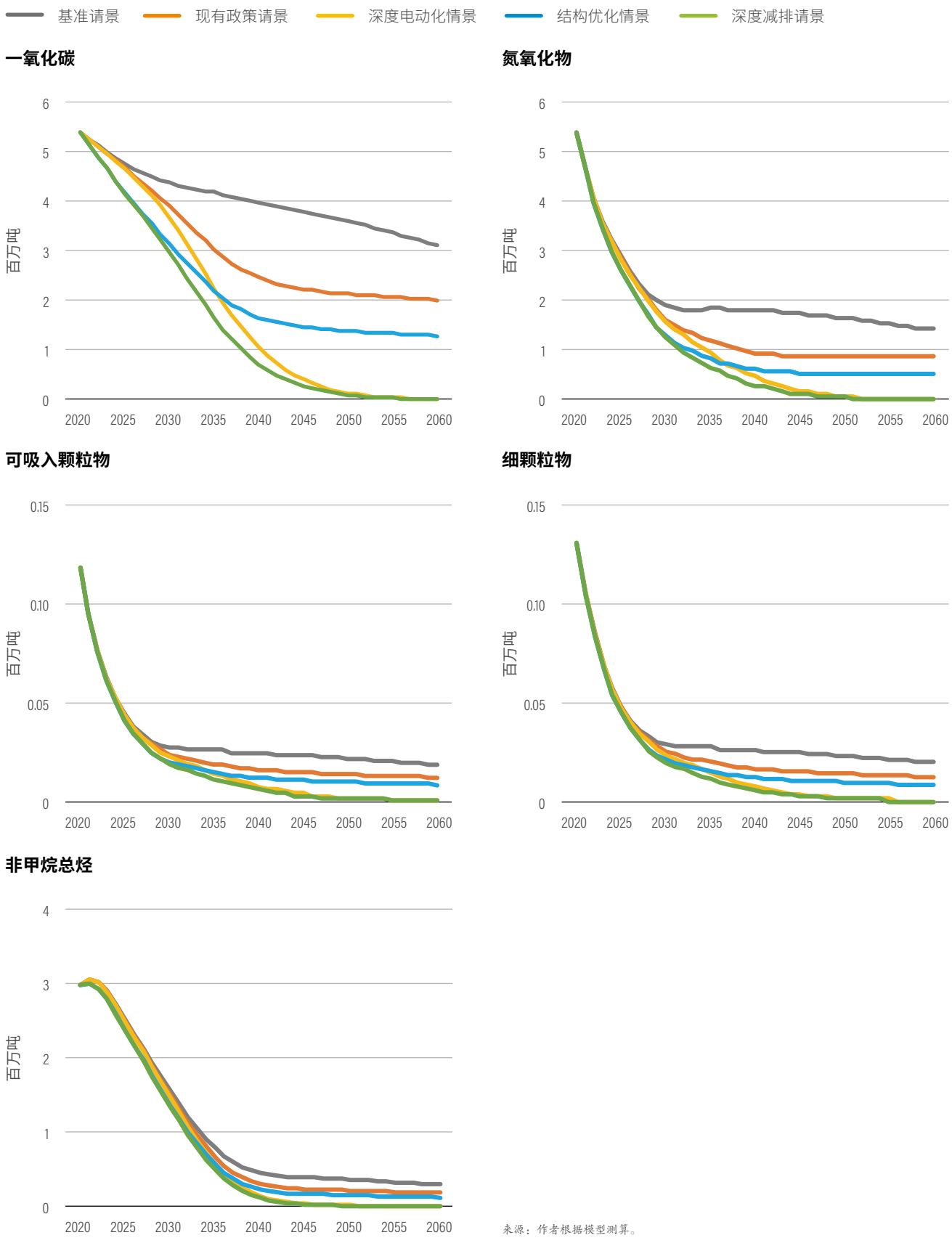
与持续增长的温室气体排放不同，未来道路交通领域空气污染物排放将与温室气体的排放脱钩，呈稳步下降的趋势。

得益于2021年起全面执行的“国六”标准（专栏2），即便在基准情景下，道路交通领域的各类空气污染物排放也呈现出不同程度的下降。例如，2060年氮氧化物排放将比2020年的水平低73%，颗粒物低84%，非甲烷总烃低90%，一氧化碳低41%。然而，假如“国六”标准未得到执行，近期内基准情景的道路交通氮氧化物、非甲烷总烃与一氧化碳排放仍将呈增长趋势。

然而，如基准情景所示，全面执行“国六”标准带来的空气污染物减排潜力也存在瓶颈。全面执行“国六”标准的减排潜力主要集中于2030年前；而在2030年以后，当所有汽车更新替换为符合“国六”标准的车辆后，全面执行“国六”标准带来的空气污染物减排潜力将进入“平台期”。届时，如现有政策情景、深度电动化情景与结构优化情景所示，温室气体减排措施（如新能源汽车推广与应用和运输结构优化）的污染物协同减排效应将逐渐显现，成为进一步减少道路交通污染排放的重要举措。不同情景下道路交通污染物排放如图31所示。“国六”标准全面实施情景（基准情景）与未实施情景下空气污染物排放对比如图32所示。

虽然道路交通污染排放有望在未来得到控制，但仍有必要持续推进针对移动源的污染物治理行动。这是由于：一是未来局部地区（如人口与车辆稠密的地区）仍可能面临较为严重的机动车污染问题与居民健康暴露风险。随着世界卫生组织《全球空气质量指导值（2021）》于2021年提高了细颗粒物与可吸入颗粒物的长期暴露指标（世界卫生组织，2021），中国也应相应加强移动源污染物治理力度，以达到这一新的目标要求。二是除道路交通外，内河沿海船舶、非道路移动机械等也是移动源污染物的主要排放源，减少这些非道路交通的污染物排放也至关重要（Feng等，2019；Shao，2021）。三是下一阶段轻型车、重型车排放标准（如等同于“欧七”的国内排放标准）（见专栏2），不仅有助于改善空气质量，也有益于促进整车生产企业转向新能源汽车的生产（欧洲汽车制造商协会，2022）。

图 31 | **不同情景下道路交通空气污染物排放**

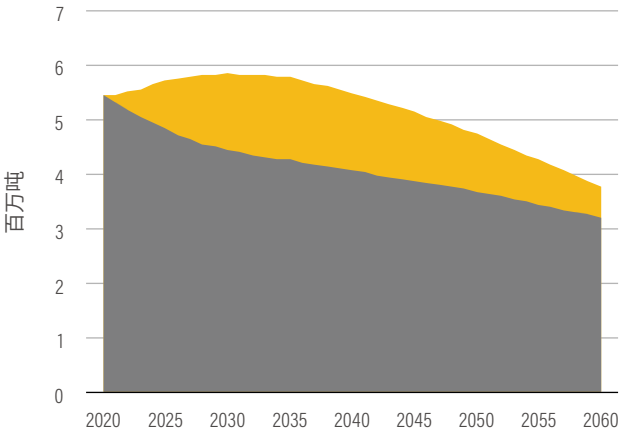



来源：作者根据模型测算。

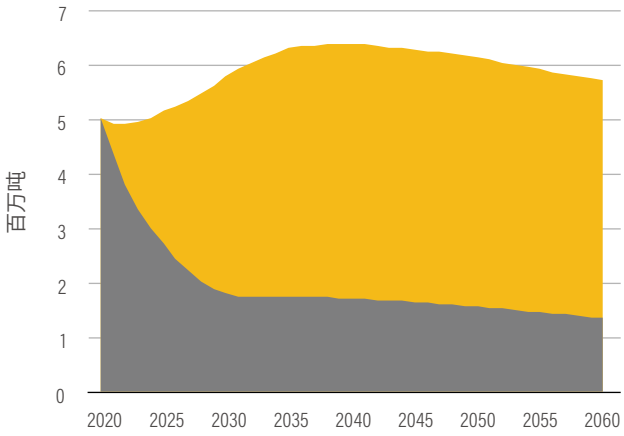
图 32 | “国六”标准全面实施情景（基准情景）与未实施情景下空气污染物排放对比

基准请景　“国六”标准未实施情景

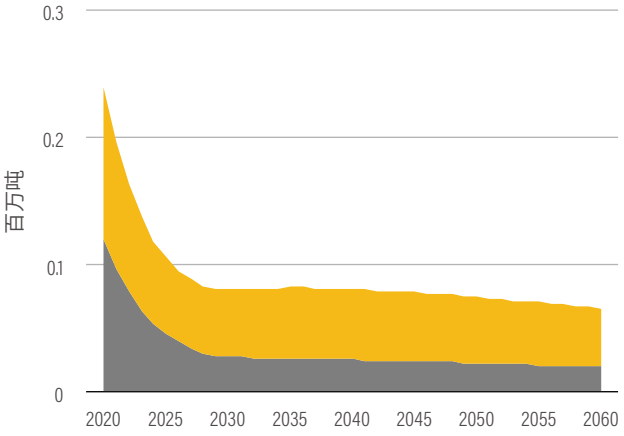
**一氧化碳**



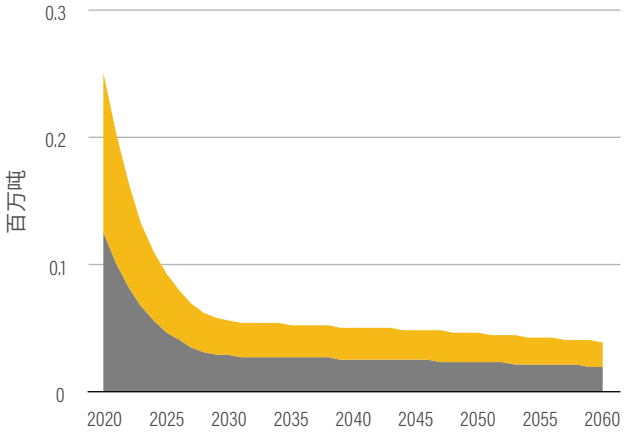

**氮氧化物**



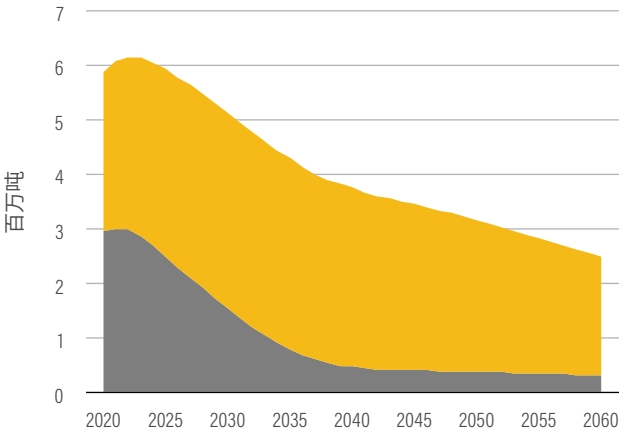

**可吸入颗粒物**




**细颗粒物**




**非甲烷总烃**




来源：作者根据模型测算。

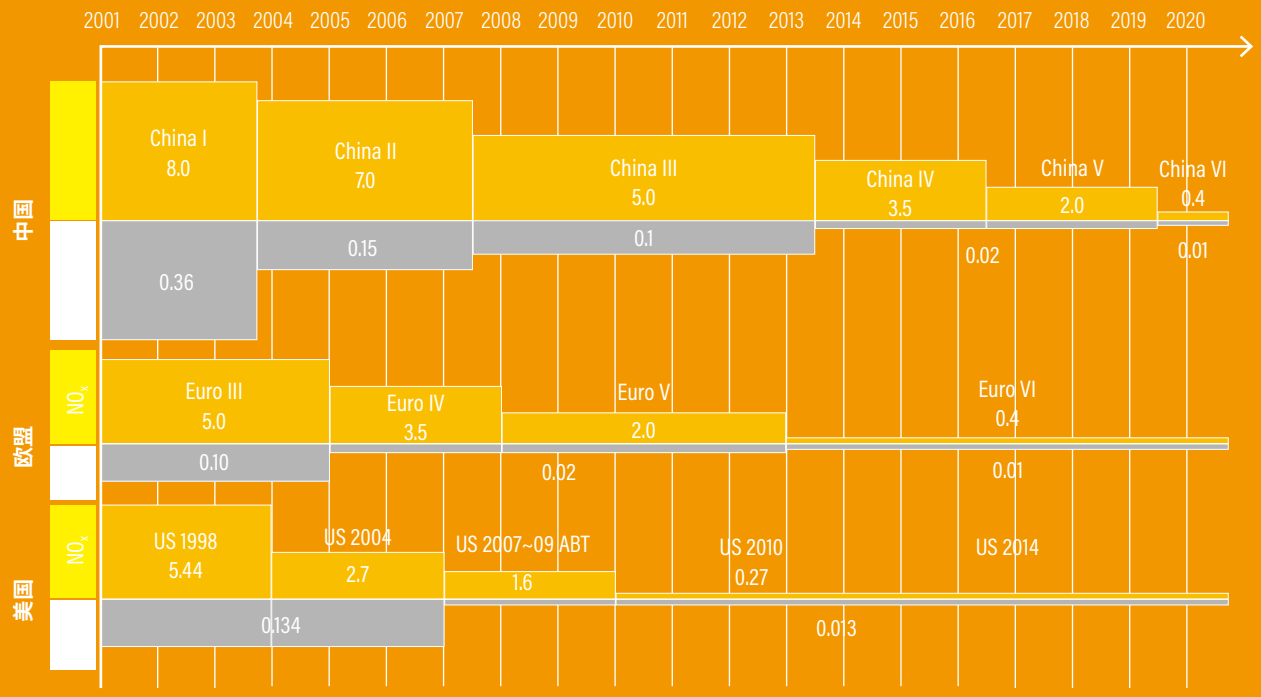
## 专栏 2 | 中国机动车污染物排放标准

过去二十年中，中国机动车污染物排放标准已经从第一阶段排放标准（即“国一”标准）迅速升级到第六阶段排放标准（即“国六”标准）。“国六”标准（包括轻型车排放标准与重型柴油车排放标准）是世界上最严格的机动车排放标准之一：自2020年7月起生效的轻型汽车“国六”a排放标准与2021年7月起生效的重型柴油车“国六”a排放标准，其污染物排放限值已经等同于“欧六”标准（见专栏图3）；而即将在2023年生效的“国六”b标准，其污染物排放限值甚至比“欧六”标准还低（国际清洁交通委员会，2017）。

尽管如此，中国仍存在提升机动车排放标准的空间。与美国2010年中重型发动机和车辆温室气体排放标准规定的氮氧化物排放限值（0.27克/千瓦时）相比（美国EPA和NHTSA，*2010*），“国六”标准氮氧化物排放限值（0.4克/千瓦时）仍处于较高水平。此外，美国加利福尼亚州在2020年正式通过了《重型车用发动机和车辆综合法规》（*Heavy-Duty Engine and Vehicle Omnibus Regulation*），规定在2024年到2027年期间使中重型货车氮氧化物排放量进一步减少90%。如此一来，中美重型车氮氧化物排放限值的差距将进一步扩大。

## 专栏图 3 | 中国、欧盟和美国重型柴油车氮氧化物和颗粒物排放限值

单位：克/千瓦时




来源：Wei等，2020。

## 4.3 各类措施的减排潜力与成本分析

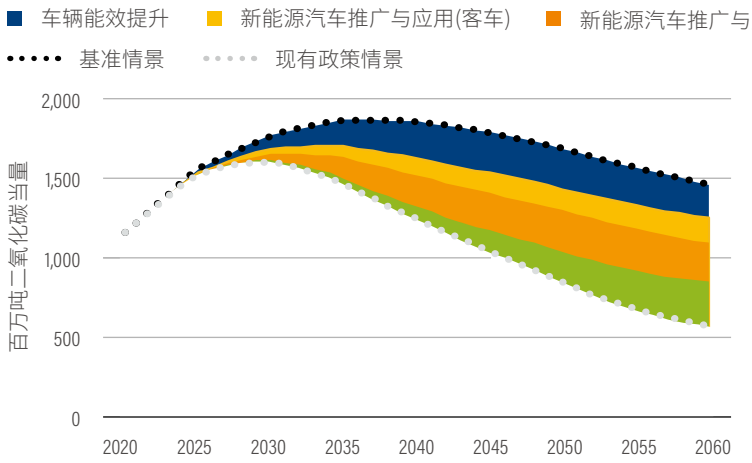
### 4.3.1各类措施的减排潜力分析

本节分析不同情景下各类型措施的温室气体减排潜力。

***驱动因素分析1：***
***从基准情景到现有政策情景的各措施减排潜力***

情景预测结果显示，与基准情景相比，现有政策情景能够实现2020—2060年间214.0亿吨二氧化碳当量的累计减排（见图33）。其中，新能源汽车推广与应用贡献了最大的温室气体减排量（累计减排100.92亿吨二氧化碳当量），其次为车辆能效提升（累计减排70.03亿吨二氧化碳当量），最后为上游发电与制氢环节减排（累计减排43.09亿吨二氧化碳当量）。上述减排潜力的实现有赖于现有政策目标的成功达成。现有政策情景的政策目标见表15。

图 33 | **不同措施的温室气体减排潜力：从基准情景到现有政策情景**




| 措施类型 | 2020—2060年累计减排量（百万吨二氧化碳当量） |
|---|---|
| 车辆能效提升 | 7,003 |
| 新能源汽车推广与应用（客车） | 3,601 |
| 新能源汽车推广与应用（货车） | 6,491 |
| 上游发电与制氢环节减排 | 4,309 |

来源：作者根据模型测算。

表 15 | **现有政策情景的政策目标**

| | 运输结构优化 | 新能源汽车推广与应用 | 车辆能效提升 | 上游发电与制氢环节减排 |
|---|---|---|---|---|
| 公路客运 | 到2060年，千人乘用车保有量为425辆，绿色出行量在总出行量中占比70%<br>（《绿色出行行动计划（2019—2022年）》，清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020） | 到2035年，新能源乘用车在乘用车销量中占比达50%<br>（《节能与新能源汽车技术路线图2.0》）；<br>到2060年，新能源乘用车在乘用车销量中占比达100%<br>（本研究假设） | 到2025年，乘用车平均燃料消耗量为4升/百公里，混合动力汽车在乘用车销量中占比60%；到2035年，混合动力汽车在乘用车销量中占比达100%<br>（第五阶段乘用车燃料消耗量标准、《节能与新能源汽车技术路线图2.0》） | 到2050年，非化石能源在全国发电结构中占比达92%<br>（清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020） |
| 公路货运 | 公路周转量在运输结构占比50%；中重型货车单车平均负载为9.5吨<br>（本研究基于《2030年前碳达峰方案》、《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》、《推进多式联运发展优化调整运输结构工作方案（2021—2025）》等文件假设） | 到2030年，新能源中重型货车销量在货车销量中占比达12%；到2050年，新能源中重型货车销量在货车销量中占比达50%<br>（本研究假设） | 到2035年，中重型货车燃料消耗量将比2020年水平低20%<br>（《节能与新能源汽车技术路线图2.0》） | 到2050年，灰氢在氢气供给结构中占比不高于15%<br>（中国氢能联盟，2019） |

来源：作者基于现有政策文件及相关文献总结。

***驱动因素分析2：***
***从现有政策情景到深度减排情景的各措施减排潜力***

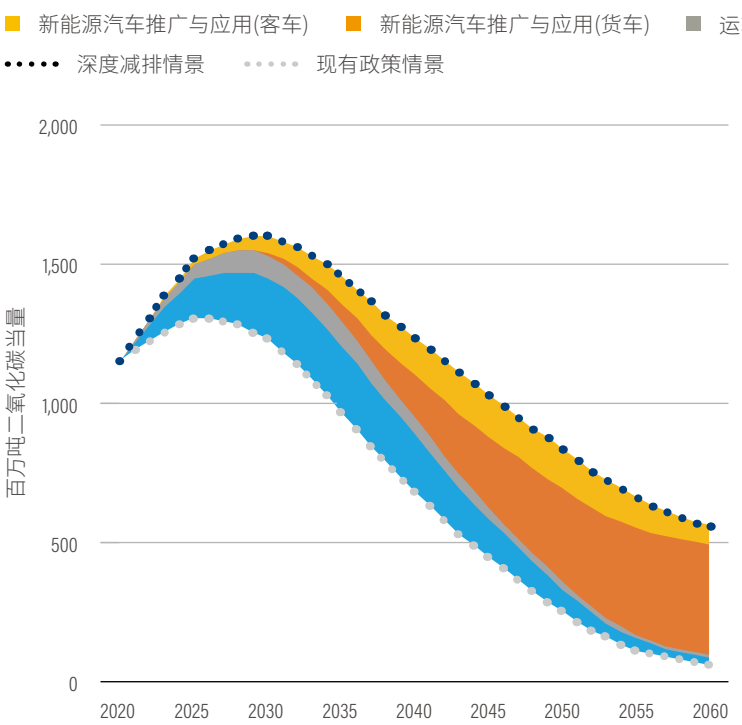
情景预测结果显示，与现有政策情景相比，深度减排情景能够实现2020—2060年间181.8亿吨二氧化碳当量的累计温室气体减排。其中，新能源汽车推广与应用贡献了最大的累计减排量（110.1亿吨二氧化碳当量），其次为运输结构优化，贡献了71.8亿吨二氧化碳当量的累计减排量（见图34）。深度减排情景下的政策目标与具体措施见表16。

这意味着，为实现2060年碳中和目标，中国的道路交通领域需要在与现有政策基础上制定更为激进的目标，包括但不限于：

- 到2035年，新能源汽车在乘用车销量中占比达100%。
- 到2050年，新能源中重型货车在中重型货车销量中占比达100%，包括长途运输与冷链运输的货车均能实现零排放。
- 公路货运周转量在货运运输结构中占比40%。
- 中重型货车单车平均负载量11.5吨。

上述累计减排量中，公路货运行业需提供的累计减排量最大，达125.7亿吨二氧化碳当量，高于客运行业需提供的56.1亿吨二氧化碳当量累计减排量。

图 34 | **各措施温室气体减排潜力：从现有政策情景到深度减排情景**




| 措施类型 | 2020—2060年累计减排量（百万吨二氧化碳当量） |
|---|---|
| 新能源汽车推广与应用（客车） | 3,768 |
| 新能源汽车推广（货车） | 7,239 |
| 运输结构优化（客运） | 1,846 |
| 运输结构优化（货运） | 5,329 |

来源：作者根据模型测算。

表 16 | **深度减排情景下的政策目标与具体措施**

| | 运输结构优化 | 新能源汽车推广与应用 | 车辆能效提升 | 上游发电与制氢环节减排 |
|---|---|---|---|---|
| 客运运输 | | | | |
| *关键目标* | 到2060年，千人乘用车保有量达300辆，绿色出行量在总出行量中占比75%～85% | 到2035年，新能源汽车销量在乘用车销量中占比达100% | 与现有政策情景一致 | 与现有政策情景一致 |
| *加强措施* | · 转变公共交通服务方式，提升公共交通服务质量<br>· 新增高铁、公共交通、步行、自行车等绿色出行基础设施投资<br>· 采取交通需求管理政策<br>· 通过出行即服务（Mobility as a Service，简称MaaS），促进共享出行与绿色出行一体化整合 | · 提高乘用车燃料消耗标准<br>· 为新能源乘用车提供优先路权（如推行零排放区政策）<br>· 提高充（换）电网络覆盖度和便利性<br>· 引入碳定价机制 | 无 | 无 |
| 货运运输 | | | | |
| *关键目标* | 公路货运周转量在货运运输结构中占比40%；中重型货车平均负载重量为11.5吨 | 到2050年，新能源中重型货车在中重型货车销量中占比达100% | 与现有政策情景一致 | 与现有政策情景一致 |
| *加强措施* | · 提高大宗商品长距离铁路和水路运输比例，促进高附加值货品的集装箱多式联运<br>· 开展铁路、水路基础设施投资与设备升级，提升各铁路段衔接能力和换装分拨效率，合理调整运价与运输时间，完善最后一公里接驳<br>· 鼓励网络货运平台、无车承运人和甩挂运输，提升公路运输效率<br>· 借助燃油税和道路收费等经济激励手段，引导货运运输结构调整 | · 提高新能源中重型货车购置补贴，引入运营补贴<br>· 建立轻型货车和重型货车燃料消耗标准与“积分”制度<br>· 建立基于二氧化碳排放的道路收费体系<br>· 为新能源货车提供优路权（如推行零排放区政策）<br>· 提高充（换）电和加氢基础设施网络覆盖度和便利性 | 无 | 无 |

来源：作者假设。

***驱动因素分析3：***
***从基准情景到深度减排情景的各措施减排潜力***

综合以上分析，将道路交通温室气体排放量从基准情景的排放水平降至深度减排情景的排放水平（即实现2060年道路交通碳中和），以下三项措施将至关重要：

- 新能源汽车推广与应用提供最大的减排潜力。与基准情景相比，深度减排情景中更激进的新能源汽车推广与应用措施有望实现48%的温室气体累计减排量。如果上游发电和制氢部门能够遵循政府与相关行业协会制定的减排路线图，在中长期实现深度脱碳，则新能源汽车推广与应用措施的累计减排潜力有望提升至60%。
- 运输结构优化与车辆能效提高的减排潜力仅次于新能源汽车推广与应用。与基准情景相比，深度减排情景中的激进运输结构优化措施有望实现23%的温室气体累计减排量。同时，车辆能效提升有望实现17%的累计减排量，且提升车辆燃料消耗标准也利于刺激新能源汽车的产量（Wappelhorst，2021）。

值得注意的是，以上措施在不同时期具有不同的减排潜力：

- 在近期（2020—2035年），运输结构优化的减排潜力最大。这是因为，在近期，新能源汽车的总拥有成本仍比传统燃料汽车高，市场渗透率尚未达到规模化推广的“临界

点”。相对而言，运输结构优化的减排成本低（见“边际减排成本分析”部分），且不存在技术门槛。因此，在近期，运输结构优化比新能源汽车推广与应用减排潜力更大。

- 在中长期（2035—2060年），新能源汽车推广与应用将超越运输结构优化，成为减排潜力最大的措施。尽管如此，现有新能源汽车的技术水平难以支撑深度减排情景中更激进的新能源汽车推广与应用目标的实现。因此，仍亟须采取政策措施，推动以下关键技术的突破（与成本的下降），包括但不限于：一是推动用于长途运输或冷链运输的新能源重型货车技术的研发。当前新能源货车不仅行驶里程与充电时间难以满足长途运输与冷链运输的要求，且车辆成本也是传统能源货车的2~5倍。二是如果采用氢燃料电池技术，也需要在低成本的绿氢生产与运输技术上实现“质”的突破。目前绿氢成本仍是灰氢的3~4倍，且绿氢技术未规模化推广，不足以满足燃料电池货车商业化推广的条件（国际可再生能源机构IRENA，2020）。

将基准情景的排放水平降低到深度减排情景的排放水平，货运行业的减排需求较客运行业的减排需求更大。通过新能源货车推广与应用和货运运输结构优化，公路货运需要在2020年至2060年之间累计减少193.7亿吨二氧化碳当量排放，为客运累计减排量（92.5亿吨二氧化碳当量）的一倍。为达到这一减排潜力，货运行业需采取更多的积极措施：

- 更激进的新能源货车推广与应用措施（累计减排125.24亿吨二氧化碳当量，约为新能源乘用车推广与应用累计减排量的2倍）：如前所述，通过技术突破与政策激励推动新能源货车在长途运输与冷链运输领域的推广与应用，是实现这一减排潜力的重要条件。在技术突破基础上，也需采取更多政策措施加速新能源货车推广，如提高新能源货车的购置补贴、引入新能源货车运营补贴、建立重型商用车燃料消耗量标准与碳排放道路收费体系、为新能源货车提供优先通行权、提高充（换）电和加氢基础设施网络覆盖度和便利性（包括大功率快充网络的建设）等。
- 更激进的货运运输结构优化措施（累计减排68.44亿吨二氧化碳当量，约为客运运输结构优化减排量的3倍）：实现这一减排潜力，需要在现有运输结构优化政策基础上加码，多措并举，包括提高大宗商品长距离铁路和水路运输比例、促进高附加值货物的集装箱多式联运、开展铁路和水路基础设施投资建设与设备升级、提升各铁路段衔接能力和换装效率、合理调整运价与运输时间、完善最后一公里接驳、提升公路货运运输效率等。

此外，为更好地支持货运减排政策制定，应率先完善货运统计体系，建立不同货物种类的货物流量、流向调研（包括货运量、起运地、目的地等），统计不同应用场景下货车的使用数量与运行特征（包括城配场景、短倒场景、区域支线运输与长途运输场景等），监测各类货车的负载率，为出台精细化的新能源货车推广与应用政策和运输结构优化政策提供扎实的统计基础。

从基准情景到深度减排情景，各措施温室气体减排潜力见图35和表17。

图 35 | 各措施温室气体减排潜力：从基准情景到深度减排情景

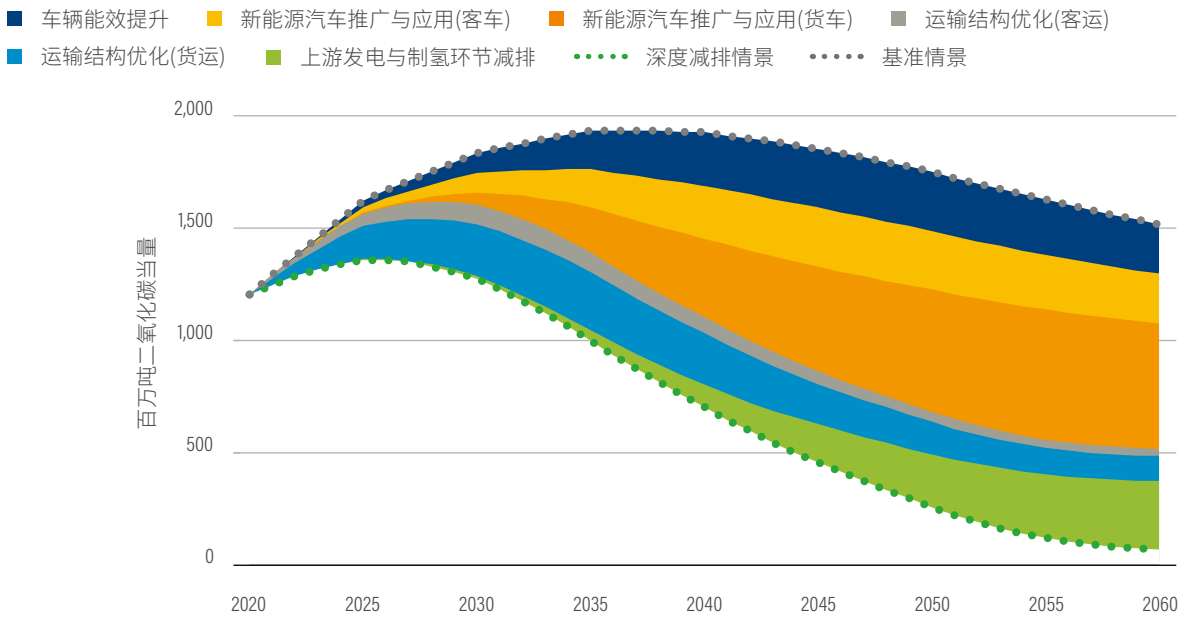


表 17 | **各种措施的温室气体减排潜力**

| | 2020—2035年 | | 2035—2060年 | |
|---|---|---|---|---|
| | 年均减排量（百万吨二氧化碳当量/年） | 累计减排量（百万吨二氧化碳当量） | 年均减排量（百万吨二氧化碳当量/年） | 累计减排量（百万吨二氧化碳当量） |
| 车辆能效提升 | 65 | 1,036 | 240 | 6,003 |
| 新能源汽车推广与应用（客车） | 61 | 982 | 239 | 5,970 |
| 新能源汽车推广与应用（货车） | 51 | 821 | 468 | 11,703 |
| 运输结构优化（客运） | 62 | 996 | 52 | 1,302 |
| 运输结构优化（货运） | 167 | 2,679 | 167 | 4,165 |
| 上游发电与制氢环节减排 | 12 | 187 | 196 | 4,899 |

来源：作者根据模型测算。

***驱动因素分析4：天然气汽车推广措施的减排潜力***

由于当前天然气汽车在中重型货车中的保有量占比在快速增长，本节分析如果天然气汽车作为传统能源中重型货车向新能源货车转型期的过渡技术，在未来获得大力推广的情况下，其温室气体减排的潜力。

根据现有研究对国内天然气汽车的实际道路测试（Pan等2020），本报告对天然气汽车“油箱到车轮”（包含尾气排放与车辆逃逸排放）的甲烷排放因子做如下假设：“国五”标准天然气重型货车的排放因子为3%（天然气消耗量）；“国六”标准天然气重型货车的排放因子为0.4%~1%（天然气消耗量）。基于以上假设，分别计算天然气汽车的单车温室气体排放与车队的温室气体排放。

从单车排放看，天然气货车二氧化碳排放比柴油货车低20%，但其温室气体的减排潜力（采用IPCC第五次评估报告20年全球升温潜能值）有限：

- “国五”标准天然气重型货车：“国五”标准天然气重型货车采用的稀薄燃烧技术会产生大量甲烷逃逸排放（如曲轴箱排放等），这部分甲烷排放量会抵消二氧化碳减排量。所以，“国五”标准天然气重型货车的温室气体排放比柴油货车更高（Pan等，2020；Mottschall等，2020）。
- “国六”标准天然气重型货车：如果“国六”标准天然气重型货车的甲烷排放能够得到有效控制（即甲烷排放因子为0.4%），其温室气体排放将比柴油货车低12%；然而，如果“国六”标准天然气重型货车耐久性低，导致使用过程中甲烷排放量略高出“国六”标准排放限值（即甲烷排放因子为1%），“国六”标准天然气重型货车的温室气体排放将几乎与柴油货车相当。

从情景预测（车队排放）看，本报告采用最低的“国六”标准天然气货车甲烷排放因子（0.4%）构建并对比了两种情景——现有政策情景与深度推广天然气汽车情景（以下简称“天然气情景”）。新建的天然气情景在LNG货车未来市场渗透率上做如下假设：到2030年，LNG中重型货车销量占货车销量的20%，高于现有政策情景（15%）；到2050年，LNG中重型货车的销量占比将进一步提升到50%，而现有政策情景将维持在15%。对比两个情景的结果表明：

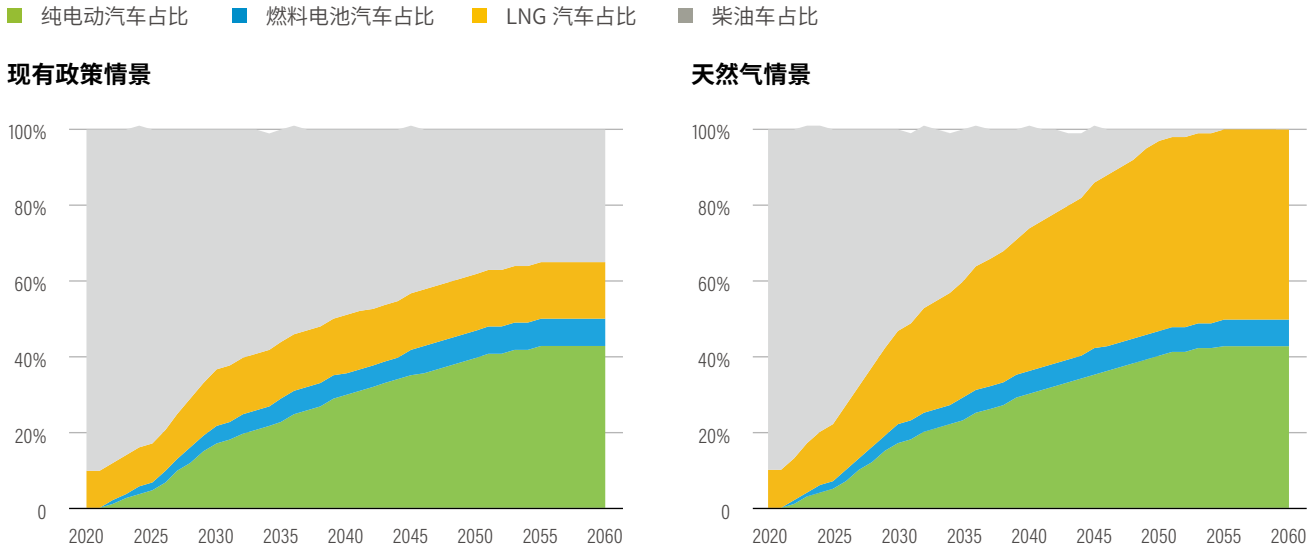
- 2060年的排放水平：天然气情景下，二氧化碳排放较现有政策情景低11%，温室气体排放较现有政策情景低7%。
- 2020—2060年累计排放量：天然气情景下，累计二氧化碳排放较现有政策情景低3%，累计温室气体排放与现有政策情景相当。

综上所述，如果通过加强“国六”标准天然气货车与在用车辆排放检验，确保“国六”标准天然气货车使用过程中的甲烷排放低于“国六”标准限值，相比柴油货车，天然气货车将更大程度地减少温室气体排放。但在情景分析中，较之其他减排措施，推广天然气货车产生的减排量并不显著。

除相对有限的减排效果外，天然气汽车的广泛应用也可能会造成对天然气的进口依赖以及天然气成本高企对社会经济的传导效应。与此同时，新建天然气基础设施（如管道和储气库）在新能源汽车大规模化推广后，可能会沦为“搁浅资产”。因此，需深入分析《2030年前碳达峰行动方案》中提出的2030年“新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到40%左右”的目标减排效果，以及其所对应的经济环境效益，以便规划将来在天然气中重型货车的推广力度。

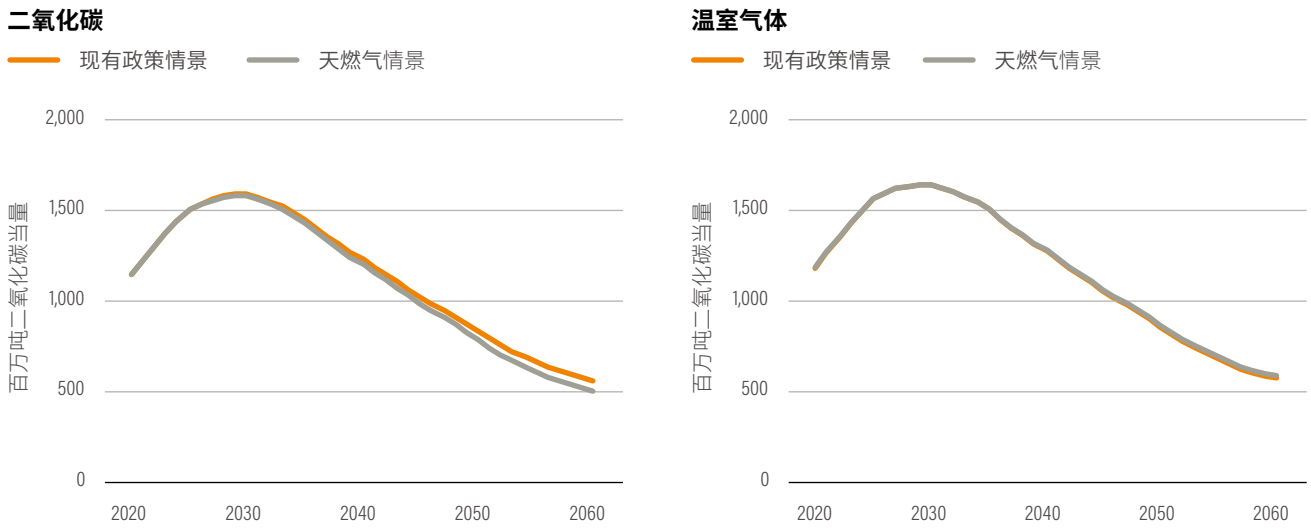
现有政策情景和天然气情景中的中重型货车销量结构如图36所示，二氧化碳和温室气体排放对比如图37所示。

图 36 | **现有政策情景和天然气情景中的中重型货车销量结构**




来源：作者根据模型测算。

图 37 | **现有政策情景和天然气情景中二氧化碳和温室气体排放对比**




说明：“国五”标准天然气重型货车的“油箱到车轮”甲烷排放因子为天然气消耗量的 3%，“国六”标准天然气重型货车甲烷排放因子为天然气消耗量的 0.4% ~ 1%（Pan 等，2020）。甲烷的全球变暖潜能值为 IPCC 第五次评估报告 20 年全球升温潜能值。

来源：作者根据模型测算。

### 4.3.2边际减排成本分析

实现道路交通深度减排需要大量的低碳投资。据估计，中国全社会的低碳转型需要90万亿~174万亿元的低碳投资（2020—2050年）（波士顿咨询公司，2020；清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020；高盛集团，2021）。在所有部门中，交通运输部门是吸引低碳投资最多的部门之一（波士顿咨询公司，2020），仅次于电力部门（清华大学气候变化与可持续发展研究院，2020）。

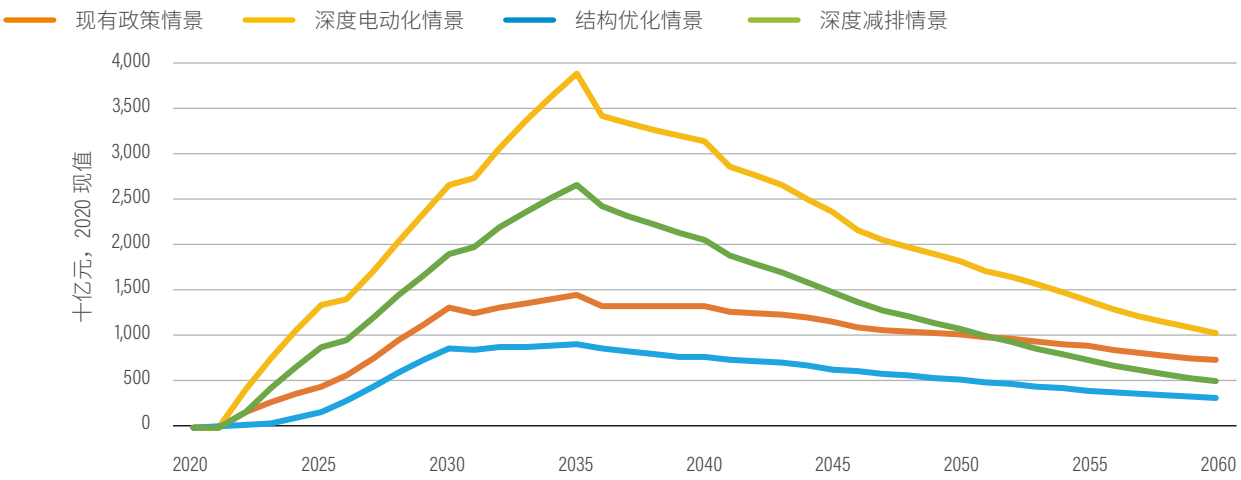
利用“模型方法”部分的减排成本模型，本节主要分析不同情景下中国道路交通深度减排所需的低碳投资额（见图38和表18），以及各类减排措施的减排成本。

首先，本节分析不同情景较之基准情景所需的低碳投资额。道路交通所需的低碳投资既涉及传统基础设施如货运铁路和公共交通系统的投资，也涉及新型基础设施如充电（或加氢）基础设施的投资。情景预测结果显示，2020—2060年道路交通减排的累计低碳投资额高达39万亿~83万亿元。该预测的投资额区间比波士顿咨询公司（2020）、清华大学气候变化与可持续发展研究院（2020）和高盛集团（2021）的预测值更高，这是由于本研究所涉及的时间跨度更长（至2060年）、投资成本项更多[22]。

从时间趋势上看，各情景均显示，道路交通的低碳投资需求在不同时间节点，存在较大差异。由于早期新能源汽车推广成本高、数量增长快，道路交通在近期（2020—2035年间）的低碳投资的需求量大且增长快，到2035年之后会达到“拐点”，并逐步下降。

从各情景的单位减排成本看，结构优化情景的单位减排成本最低，为675元/吨二氧化碳当量；深度电动化情景的单位减排成本最高，为2510元/吨二氧化碳当量，约为结构优化情景单位减排成本的4倍。值得注意的是，虽然深度电动化情景与深度减排情景均能实现2060年道路交通碳中和的目标，但两个情景的低碳投资额存在明显差异：得益于结构优化带来的更少的机动车保有量，深度减排情景的低碳投资需求比深度电动化情景低一半。

图 38 | **不同情景下低碳投资需求**




来源：作者根据模型测算。

表 18 | **不同情景下低碳投资需求**

| | 现有政策情景 | 深度电动化情景 | 结构优化情景 | 深度减排情景 |
|---|---|---|---|---|
| 2020—2060年累计低碳投资额（十亿元，2020年现值） | 39503 | 83896 | 22070 | 54226 |
| 单位减排成本（元/吨二氧化碳当量） | 1852 | 2510 | 675 | 1331 |

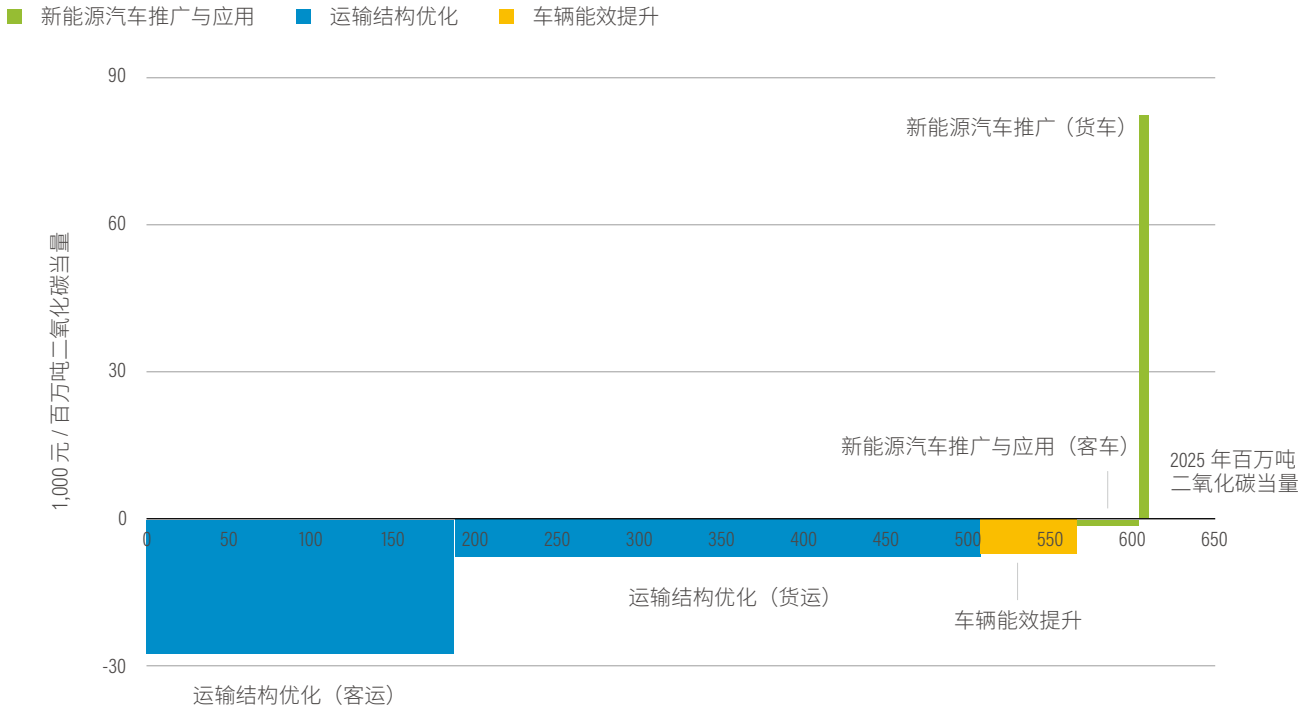
来源：作者根据模型计算。

其次，本节通过构建不同时间节点的边际减排成本曲线，计算不同减排措施的减排成本。鉴于不同措施的减排成本随着时间而变化，这里选取了三个时间点——2025年（即“十四五”末期）、2030年与2050年，分别建立边际减排成本曲线。边际减排成本分析的结果表明：

- 运输结构优化和车辆能效提升始终具有较低的减排成本，甚至比基准情景能够产生大幅的成本节约。对运输结构优化而言，虽然必然需要大量基础设施投资（如新建货运铁路、轨道交通等基础设施），但结构优化后所带来的机动车保有量下降，可以节省大量车辆购置与充电（或加氢）基础设施相关开支。节省的投资要大于结构优化所需的基础设施投资，最终运输结构优化的单位减排成本为负。例如，2030年客运运输结构优化的单位减排成本为14.7元/千克二氧化碳当量，货运运输结构优化的单位减排成本为-4.1元/千克二氧化碳当量（见图 39）。对提高车辆能效而言，虽然引入新的节能技术（如混合动力技术、车辆轻量化技术与新的发动机技术等），会导致车辆价格上升，但使用阶段燃料成本的下降足以抵消车辆价格的上升（Yang和Cui，2020），从而带来全生命周期总拥有成本的节约，因此该措施的单位减排成本为负。例如，2030年，车辆能效提升的单位减排成本为-4.0元/千克二氧化碳当量。
- 新能源汽车推广与应用措施早期的单位减排成本较高，但随时间推移将不断下降。以新能源重型货车的单位减排成本为例，2030年前，新能源中重型货车总拥有成本远高于柴油货车，其单位减排成本在2025年高达81.9元/千克二氧化碳当量。当新能源中重型货车总拥有成本在2030—2035年间达到与柴油货车总拥有成本的平价点后，其单位减排成本会在2030年降至5.8元/千克二氧化碳当量。到2050年，新能源中重型货车推广的单位减排成本可以降至-0.6元/千克二氧化碳当量——开始较基准情景呈现节约成本的优势（见图 39、图 40和图 41）。

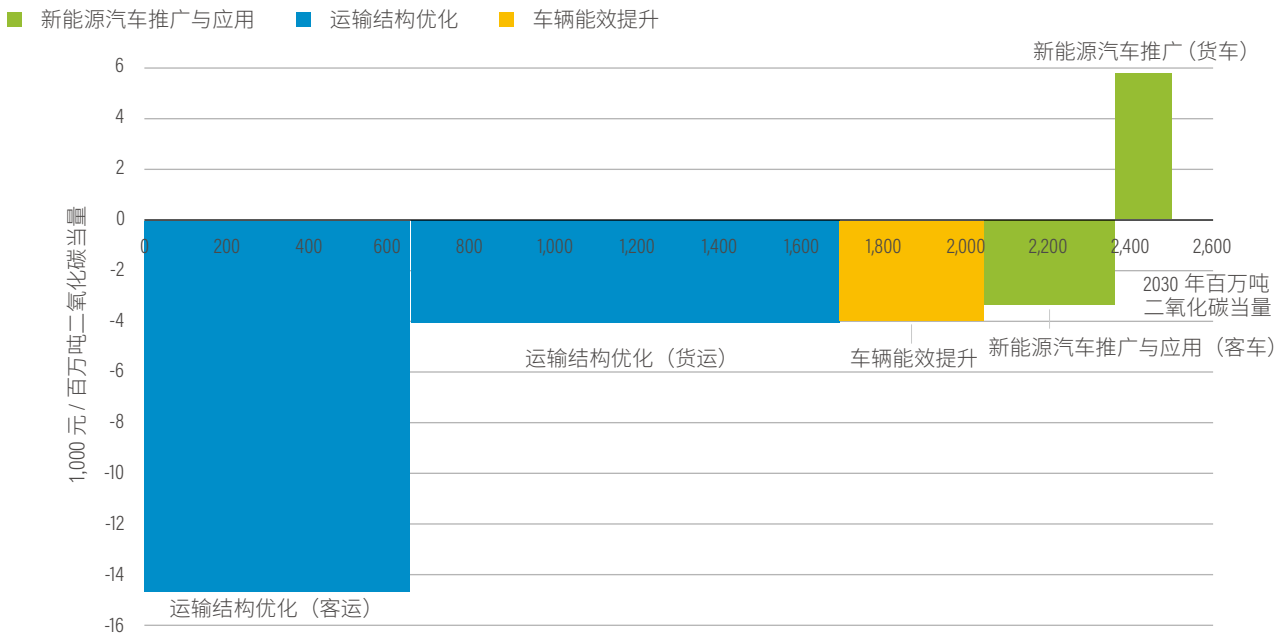
值得注意的是：一是虽然结构优化措施的单位减排成本低，但单纯地强调基础设施投资并不一定会促进运输结构调整、实现节能减排，反而过度的基础设施投资可能会导致基础设施利用率低下，增加基础设施全生命周期的碳排放（国际交通论坛，2013）。因此，需要多措并举地引导运输结构的优化调整，包括引入交通需求管理措施、合理化铁路定价、提高铁路（水运）运输服务质量等。二是虽然推广新能源汽车的单位减排成本高，但新能源汽车推广相关的投资至关重要，因为只有不断完善充电（或加氢）基础设施网络，才能形成新能源汽车推广的规模效应，进而促进新能源汽车总拥有成本的降低。

图 39 | **边际减排成本曲线：2025年**



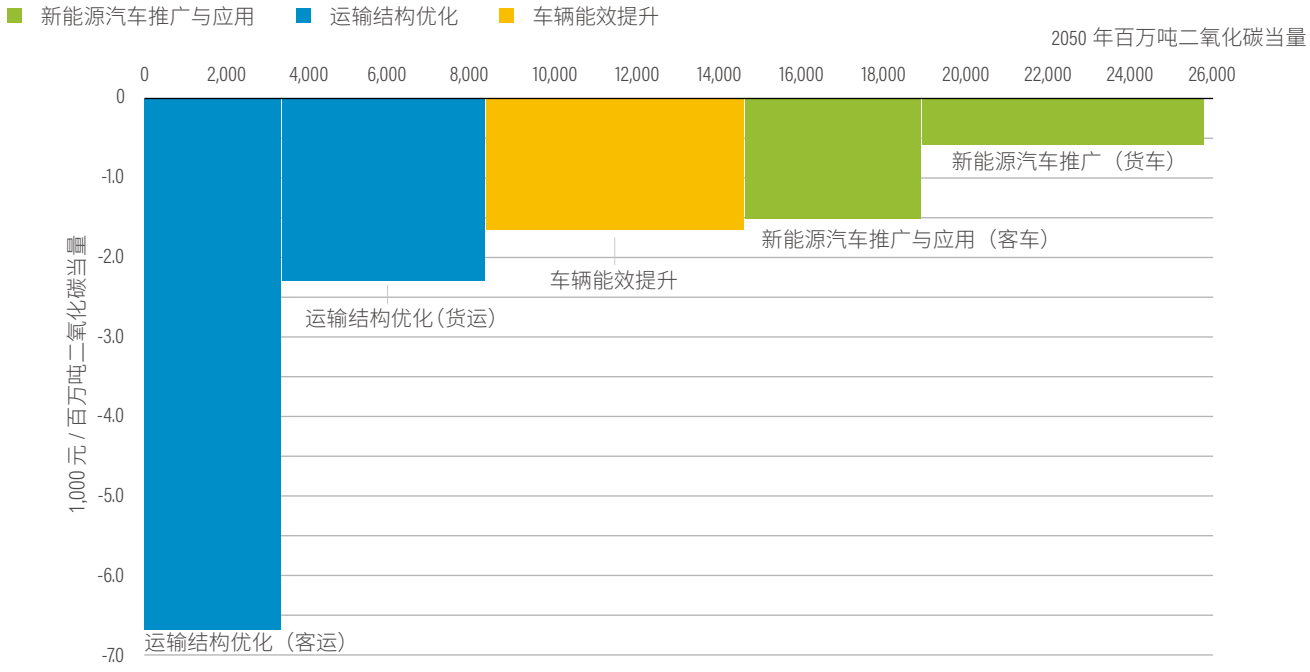

来源：作者根据模型测算。

图 40 | **边际减排成本曲线：2030年**




来源：作者根据模型测算。

图 41 | **边际减排成本曲线：2050年**




来源：作者根据模型测算。

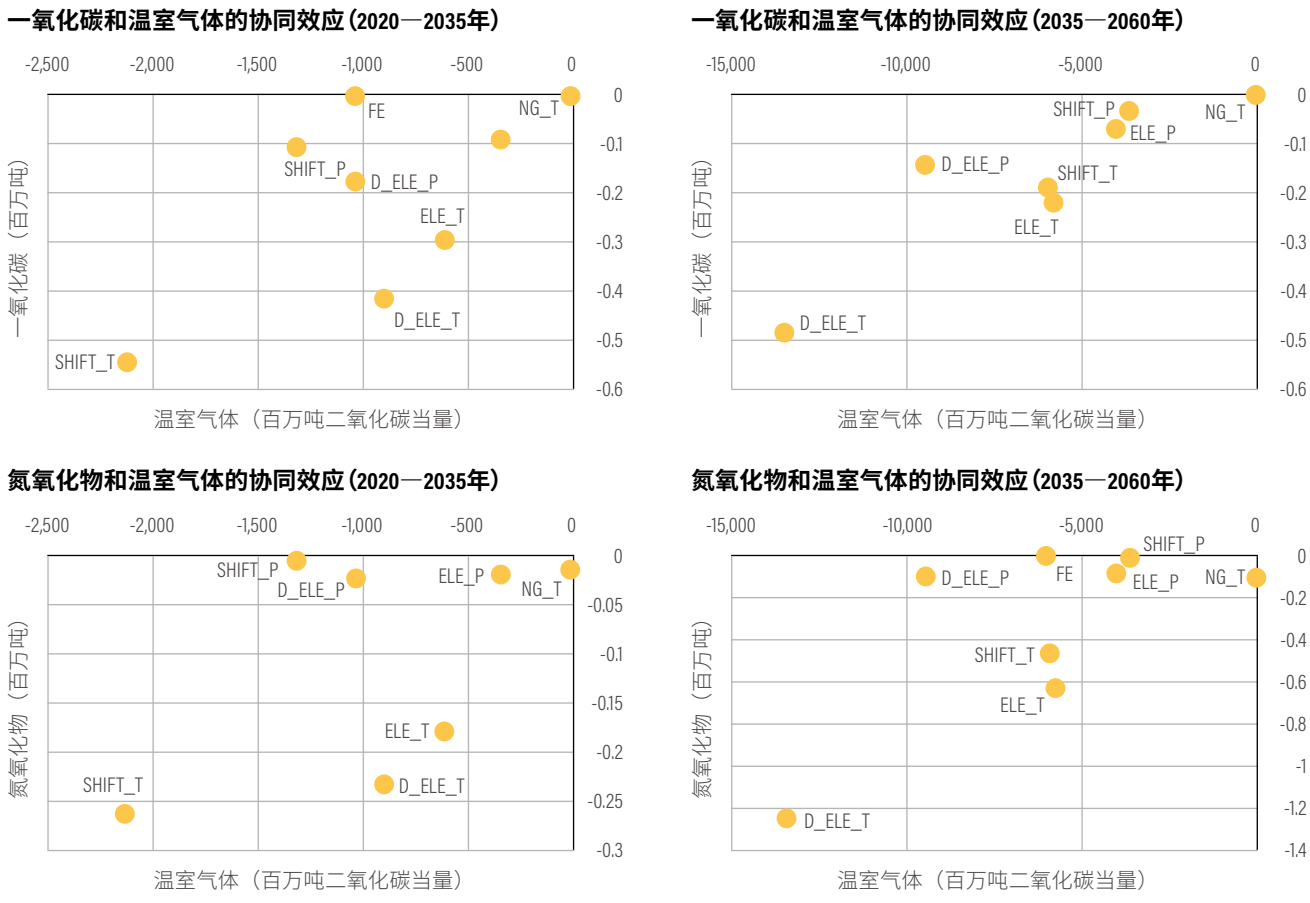
## 4.4 温室气体排放与空气污染物协同减排潜力

虽然“国六”标准的全面执行能够在近期大幅降低道路交通空气污染物排放，但“国六”标准中长期的减排潜力有限。随着“国六”标准降低污染物排放的潜力逐渐减小，届时道路交通机动车的空气污染防治也将进入减排深水区，将有必要寻求其他低成本的温室气体与空气质量协同减排措施。

本研究采用“协同控制效应坐标系”方法，定量分析不同措施在不同时间节点的温室气体和空气污染物的协同减排潜力（Hu.等，2020）。协同控制效应坐标系的纵轴代表某措施相对于基准情景的累计温室气体减排量，横轴代表同一措施相对于基准情景的累计空气污染物减排量。因此，当减排措施位于第三象限时，意味着该措施具有协同减排潜力（见图 42）。

如图41所示，新能源汽车推广与应用和运输结构优化不仅具有最大的温室气体减排潜力，也具有最大的降低道路交通污染的潜力。其中，在近期（2020—2035年），运输结构优化的协同减排潜力最大。在中长期（2035—2060年）——即“国六”标准的污染物减排达到瓶颈时，新能源汽车推广与应用“减污降碳”的协同减排潜力最大。

图 42 | 与基准情景相比不同措施的协同减排潜力

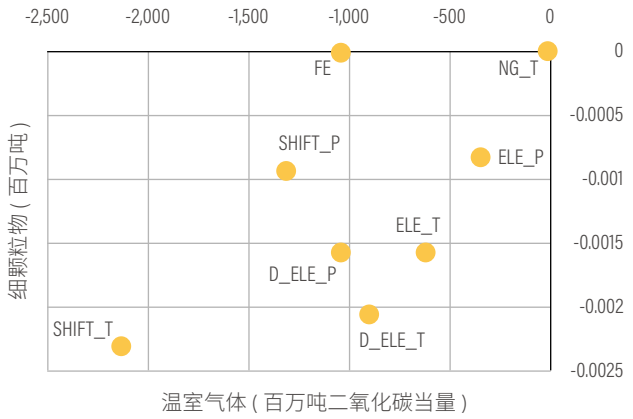



说明：
- “D_ELE_T”表示深度电动化情景中货车深度电动化程度。
- “ELE_T”表示现有政策情景中新能源货车推广程度。
- “FE”表示在现有政策情景中车辆能效提升水平。
- “SHIFT_P”表示结构优化情景中客运运输结构优化的程度。
- “D_ELE_P”表示深度电动化情景中客车深度电动化程度。
- “ELE_T”表示现有政策情景中新能源乘用车推广程度。
- “SHIFT_T”表示结构优化情景中货运运输结构优化的程度。
- “NG_T”表示现有政策情景中天然气汽车推广水平。

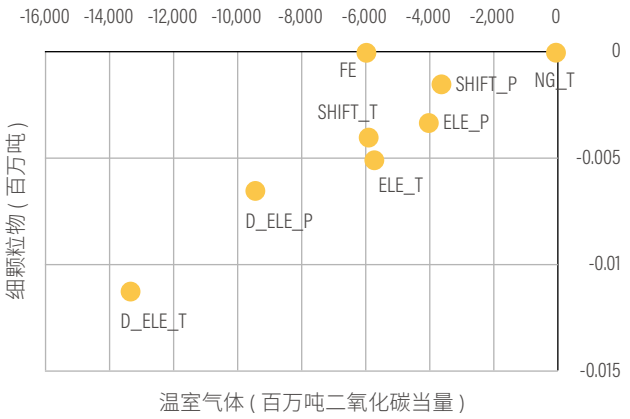
来源：作者根据模型测算。

图 42 | 与基准情景相比不同措施的协同减排潜力（接前页）

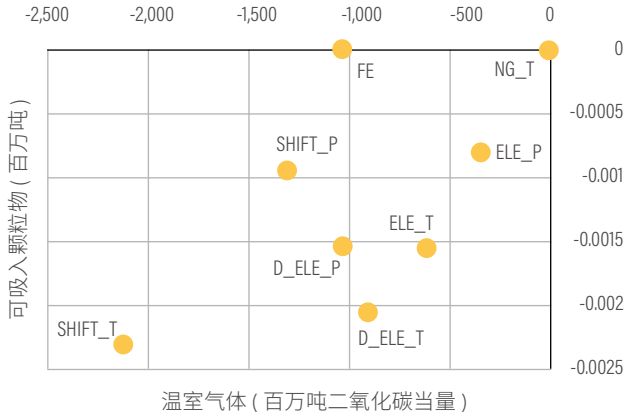
**细颗粒物和温室气体的协同效应(2020—2035年)**



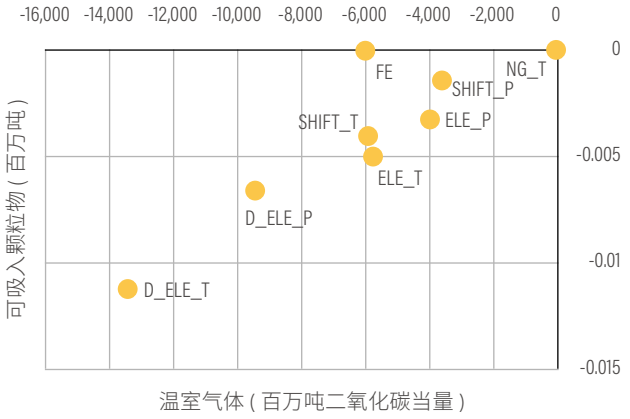

**细颗粒物和温室气体的协同效应(2035—2060年)**



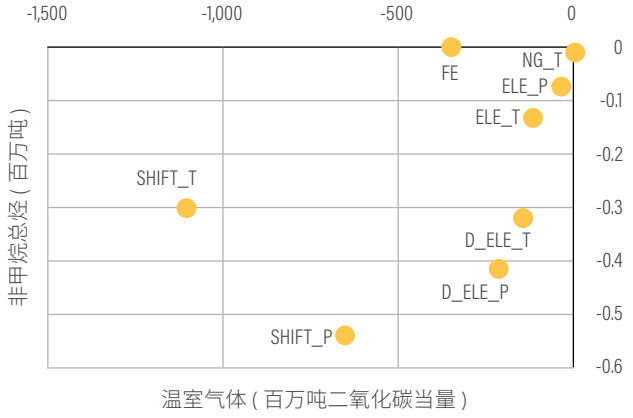

**可吸入颗粒物和温室气体的协同效应(2020—2035年)**



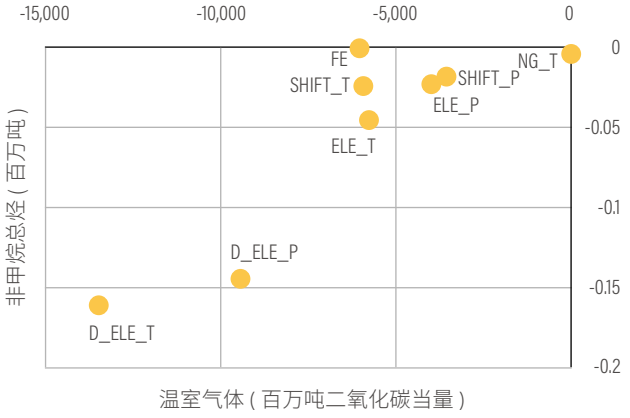

**可吸入颗粒物和温室气体的协同效应(2035—2060年)**




**非甲烷总烃和温室气体的协同效应(2020—2035年)**




**非甲烷总烃和温室气体的协同效应(2035—2060年)**




说明：·“D_ELE_T”表示深度电动化情景中货车深度电动化程度。
·“ELE_T”表示现有政策情景中新能源货车推广程度。
·“FE”表示在现有政策情景中车辆能效提升水平。
·“SHIFT_P”表示结构优化情景中客运运输结构优化的程度。
·“D_ELE_P”表示深度电动化情景中客车深度电动化程度。
·“ELE_T”表示现有政策情景中新能源乘用车推广程度。
·“SHIFT_T”表示结构优化情景中货运运输结构优化的程度。
·“NG_T”表示现有政策情景中天然气汽车推广水平。

来源：作者根据模型测算。

表 19 | **不同减排措施的协同减排效应**

| | 文献 | 协同减排效应 | 政策建议 |
|---|---|---|---|
| 车辆能效提升 | 本研究 | 车辆能效提升措施：减少温室气体排放，对空气污染物排放影响为中性 | -- |
| | O'Driscoll等，2018 | 混合动力技术（汽油）：减少温室气体排放和空气污染物排放 | 推广混合动力汽车（汽油车） |
| | Liang等，2012；Saliba等，2017；O'Driscoll等，2018 | 发动机缸内直喷（GDI）技术：减少温室气体排放，增加空气污染物排放 | 实施“国六”标准，加强在用汽车尾气排放检验 |
| 推广天然气汽车 | 本研究；Mottschall等，2020；Transport & Environment，2020 | 推广天然气汽车：“国五”天然气货车增加温室气体排放，减少空气污染物排放 | 对天然气货车甲烷（逃逸）排放进行严格监管，加强在用车辆检验 |
| 推广新能源汽车 | 本研究 | 推广新能源汽车：减少温室气体排放和空气污染物排放 | -- |
| | Peng等，2021 | 推广新能源汽车：减少温室气体排放，增加（上游）空气污染物排放 | 与可再生发电相匹配的新能源汽车推广 |
| 调整客运运输结构 | 本研究 | 客运运输结构调整：减少温室气体排放和空气污染物排放 | -- |
| 调整货运运输结构 | 本研究 | 货运运输结构调整：减少温室气体排放和空气污染物排放 | -- |
| | Shao，2020 | 公转铁：减少温室气体排放，增加（上游）空气污染物排放 | 加速实现铁路电气化，推动上游发电环节减排，降低铁路货运的回程空驶率 |

说明：绿色🟢表示该措施既可以减少温室气体排放，也可以减少空气污染物排放，黄色🟡表示改措施不协同，只能减少温室气体排放或污染物排放。
来源：作者根据文献总结。

然而，并非所有的温室气体减排措施都能带来空气质量改善的协同效应（见表19）：

- 与新能源汽车推广与应用和运输结构优化相比，车辆能效提升的协同减排效应有限。虽然车辆能效提升能减少温室气体排放，但其对空气污染排放的影响几乎为中性，特别是不同的车辆能效提升技术会产生不同的协同减排效应。例如，混合动力技术（特别是汽油车）既能减少温室气体排放，也能减少空气污染物排放，其协同减排效应在拥堵的城市工况下尤为显著（O'Driscoll等，2018年）。但是，缸内直喷技术（Saliba等，2017；O'Driscoll等，2018）会产生更多的颗粒物排放（Liang等，2012，O'Driscoll等，2018年）。尽管汽油机微粒捕集器（Gasoline Particulate Filters）等能降低颗粒物排放（Saliba等，2017），但可能会影响车辆的燃油经济性，增加二氧化碳排放[23]（Mamakos，2011）。因此，混合动力汽车是车辆能效提升技术的首选。
- 另外，虽然新能源汽车推广与应用和运输结构优化具有协同减排效应，但一些研究也表明，在特定条件下，新能源汽车推广与应用全生命周期的协同减排效应有限。例如，如果发电结构与氢气供给结构自2015年后未发生质变——即依然在较大程度上依赖煤炭，新能源汽车的“油井到车轮”温室气体排放、空气污染物（特别是颗粒物与二氧化硫）排放相较于传统能源汽车仍未减少（Peng等，2021）。同样，受铁路运输仍以内燃机车为主及铁路回程空载问题等影响，“公转铁”全生命周期的颗粒物和氮氧化物排放可能比公路货运更高（Shao，2020）。因此，提升新能源汽车推广与应用和运输结构优化的协同减排效应，需要采取一揽子措施，如推动上游发电与制氢环节减排、加速铁路电气化、提升铁路（水运）的运输效率等。


citi
人民路
Renmin Rd.
入
Entrance

第五章

# 总结与讨论

交通运输部门的温室气体减排对于中国实现碳达峰、碳中和目标，缓解能源进口依赖，实现空气污染协同减排，都至关重要。

为实现《巴黎协定》目标与2060年碳中和目标，促进低碳投资与技术创新，实现温室气体和空气污染物减排协同效益，中国道路交通领域不仅需要建立明确的中长期减排目标，制定与中长期目标相符的深度减排战略，同时也需要出台具有成本经济效益与公共财政可持续性的政策。

本研究在LEAP模型上做扩展，建立道路交通温室气体排放、污染物排放与减排成本分析的综合模型。在五种情景下，基于不同政策，本研究评估了中国道路交通中长期减排趋势，并识别了具备成本效益的重点减排措施。模型分析结果表明：

首先，中国道路交通温室气体排放量将在2025—2035年达到峰值，道路交通石油需求将在2024—2030年达到峰值。受快速增长的出行需求的推动，国内道路交通温室气体排放在未来一段时期内都将保持增长势头。但是，如果现有政策目标与一些行业目标能够如期达成，中国有可能在2030年前实现道路交通温室气体排放达峰，并于2027年前实现道路交通石油消耗量达峰（见现有政策情景）。在此基础上，如果采取更为积极的运输结构优化措施（包括运输结构调整及车辆满载率/负载率提升措施）与新能源汽车推广与应用措施，中国有望将道路交通温室气体排放与石油消耗量达峰时间分别提前至2025年与2024年（见深度减排情景）。值得注意的是，与更激进的新能源汽车推广与应用措施相比，激进的运输结构优化措施有助于温室气体排放更早达峰，且达峰的峰值也会更低（见结构优化情景与深度电动化情景）。

其次，到2060年，道路交通温室气体排放量有望比2020年降低50%～95%。其中，如果现有政策目标与一些行业目标能如期达成，2060年道路交通温室气体排放可能在2020年的水平上降低50%（见现有政策情景）。如果采取更为激进的新能源汽车推广与应用措施，2060年道路交通温室气体排放有望在2020年的水平上降低95%，几乎在不借助大量碳汇的基础上实现道路交通领域的碳中和（见深度电动化情景与深度减排情景）。值得注意的是，为实现道路交通2060年碳中和，实现2020—2060年累计减排潜力最大化，新能源汽车推广与应用、运输结构优化及车辆能效提升是减排潜力排名前三的措施。

第三，与道路交通温室气体的排放趋势相左，道路交通空气污染物排放将稳步下降。在2030年前，“国六”标准的全面执行带来的减排潜力最大，而2030年后，当所有车辆替换为“国六”标准车辆后，温室气体减排措施（如新能源汽车推广与应用和运输结构优化）的空气污染物协同减排效应将逐渐增强，成为减排潜力最大的措施。同时，为确保这些温室气体减排措施能产生减少空气污染的协同效益，需采取一揽子措施，包括推动上游发电与制氢环节减排、加速铁路运输电气化、提升铁路（水路）运输效率、加强（“国六”标准）在用车辆尾气排放监管等。

最后，本研究也存在一些不足之处，有待进一步改善：

- 第一，在本研究中，各情景在设置时旨在满足温室气体减排的单一目标，并未兼顾其他可持续发展目标（sustainable development goals，简称SDGs）。例如，为进一步缓解交通拥堵，促进公平出行，降低道路安全风险，节省社会总投资，可能需要采取更积极的客运结构调整措施。
- 第二，受模型制约，本研究无法定量匡算更为具体的政策建议（如新能源汽车购置补贴等）与研究中各类措施（2035年前新能源乘用车销量占比100%目标）之间的对应关系。因而，本研究未能对如何达成措施目标提出更为具体的建议。未来有必要采用更为详细的模型进行深入测算，增强政策建议的针对性。
- 第三，机动车空气污染物排放受诸多因素影响，这些因素包括后处理装置劣化、行驶工况变化、车辆负载变化等。出于简化分析的考虑，本研究没有纳入这些影响因素，因而可能会夸大“国六”标准的空气污染物减排效果。

到2060年，道路交通温室气体排放量有望比2020年降低50%～95%。其中，如果现有政策目标与一些行业目标能如期达成，2060年道路交通温室气体排放可能在2020年的水平上降低50%。

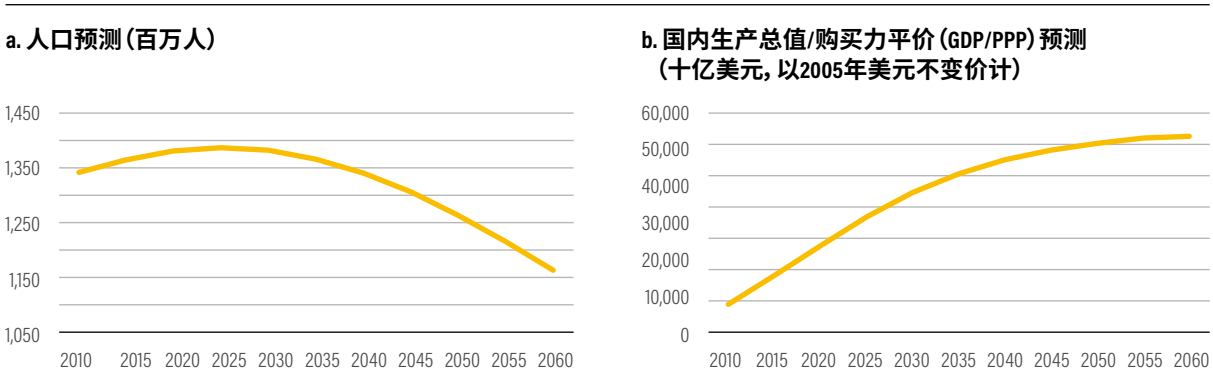



重庆长途汽车站

# 附录1.
# 社会经济假设与需求预测

本研究的人口与GDP假设以“共享社会经济路径”（SSPs）（Riahi等，2012），即综合评估模型（IAM）界广泛采用的一组社会经济预测值（包括人口和GDP预测值）为基础。本分析采用的是六个SSP路径中的SSP2路径，因为该路径是当前历史趋势的自然延续。在SSP2路径中，中国人口将在2025—2030年左右达到13.9亿人的峰值。GDP预测将延续中国经济发展的“新常态”，人均GDP将持续增长并在2060年达到44,806美元（以2005年美元不变价计）的水平，几乎是2010年水平的七倍。SSP2路径中的人口和GDP预测如附录图1和附录表1所示。

附录图 1 | SSP2路径中的人口和GDP预测




附录表 1 | SSP2路径中的人口和GDP预测

| | 人口达峰时间 | 人口峰值 | 2060年人口数量 | GDP达峰时间 | 2060年GDP |
|---|---|---|---|---|---|
| SSP2路径 | 2025—2030年 | 13.9亿人 | 11.6亿人 | 2060年尚未达峰 | 521,450亿美元（以2005年美元不变价计） |

来源：作者根据模型测算。

## 乘用车保有量预测

借助Gompertz模型（公式8），本研究对乘用车保有量与人均GDP之间的增长关系进行建模，预测中国未来乘用车保有量。

$$V(x)=\gamma e^{\alpha e^{\beta x}} \quad \text{（公式8）}$$

式中：$V(x)$是预测的千人乘用车保有量，$x$是人均GDP，$\gamma$是千人乘用车保有量的最大饱和值，$\alpha$和$\beta$是待拟合的系数。

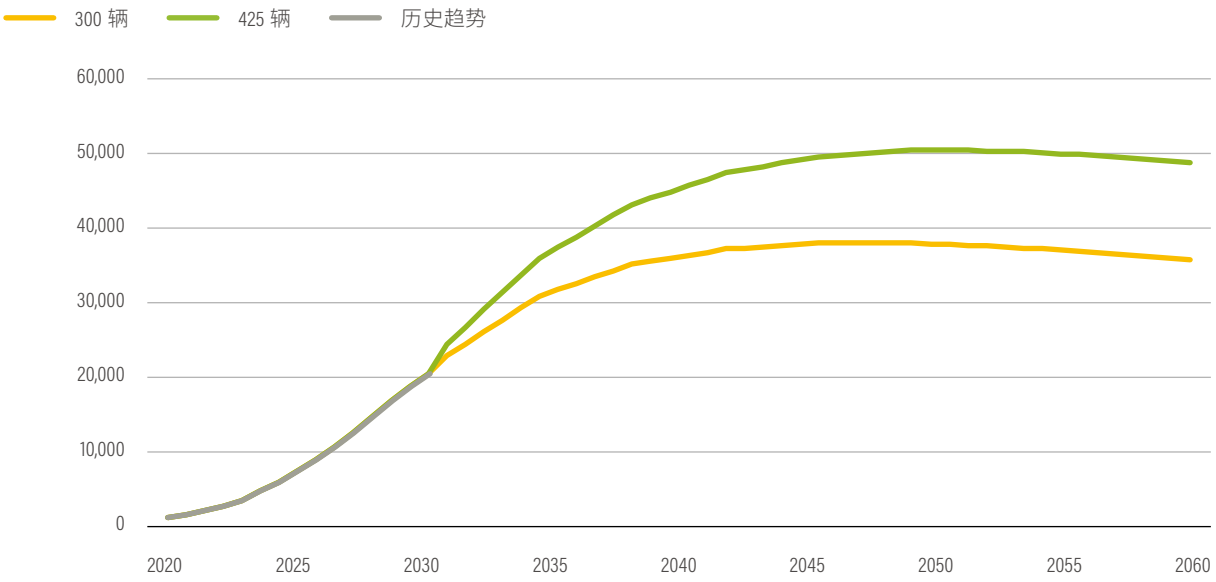
公式8能够转换为用线性回归求解的公式9：

$$ln(ln(V(x)-ln\gamma)=ln(\alpha)+\beta x \quad \text{（公式9）}$$

在公式9的基础上，本研究基于中国人均GDP和千人乘用车保有量（国家统计局，2002—2019）历史数据以及假设的2060年千人乘用车保有量最大值（基准情景为300辆，结构优化情景为425辆），通过线性回归对α和β进行拟合，并基于拟合后的Gompertz模型预测未来中国乘用车的保有量。

预测结果表明，中国乘用车保有量正处于快速增长阶段。未来乘用车保有量会在2035—2040年左右达到峰值，而峰值乘用车保有量可能介于3.81亿辆到5.06亿辆之间，如附录图2和附录表2所示。

附录图 2 | **中国乘用车保有量预测（2020—2060年）**




来源：作者根据模型测算。

附录表 2 | **中国乘用车保有量预测**

| 千人乘用车保有量饱和值 | Ln($a$) | $\beta$ | 乘用车保有量峰值 |
|---|---|---|---|
| 300辆 | -2.03060***<br>(-147) | -0.00015***<br>(-109) | 381 million<br>(2040) |
| 425辆 | -1.98078***<br>(-195) | -0.00012***<br>(-122) | 506 million<br>(2045) |

说明：线性回归 $p$ 检验值后的“*”表示 $p < 0.05$，“**”表示 $p < 0.01$，“***”表示 $p < 0.001$；括号中数字为 $t$ 检验值。
来源：作者根据 Gompertz 模型测算。

## 国内货运周转量预测

弹性系数方法是综合评估模型（IAM）中常见的货运周转量预测方法，利用该方法可基于货运周转量、人均GDP和燃料（碳）价格之间的长期非线性关系，预测未来货运周转量（公式10）。

$$D(x)=\alpha\cdot x_{income}^{\beta}\cdot x_{price}^{\gamma} \quad \text{（公式10）}$$

式中：$D(x)$是预测的货运周转量预测值，$x_{income}^{\beta}$和$x_{price}^{\gamma}$是与起始年份（1990年）相比的人均收入和燃料（碳）价格指数，$\alpha$、$\beta$和$\gamma$分别为待拟合（或待调整）的系数，其中，$\beta$和$\gamma$分别为长期人均收入弹性系数和长期燃料（碳）价格弹性系数。

对于货运需求的长期人均收入弹性系数，本研究基于1990—2020年的国内货运周转量与人均GDP的历史统计数据（国家统计局，1990—2020），对公式10进行拟合，得到1990—2020年间中国货运需求（以周转量计）的长期人均收入弹性系数为0.99（见附录表3）。该弹性系数高于美国的0.4（美国运输统计局，2019），但低于德国的1.01（经合组织，日期不详）。这意味着，一是发达国家的货运需求增长趋势正呈现出明显分化，美国的货运需求与人均收入间的关系已不明显，但德国的货运需求与人均收入间仍具有较强的弹性关系；二是虽然中国的货运需求与人均收入具有一定弹性，但较之德国，中国的货运需求对人均收入增长的响应度仍较低。考虑到未来制造业与出口仍将可能是中国的重要经济支柱，本研究假设，中国未来货运需求的发展趋势将更趋近于德国的水平，因此中国货运需求长期的收入弹性系数将保持在高位（即0.99）。

对于燃料（碳）价格弹性系数，由于缺乏历史数据分析化石燃料价格对国内货运需求的潜在影响，本研究在历史趋势拟合中并未考虑化石燃料价格对货运需求的影响。但随着石油与天然气价格的波动与碳定价的实施，未来国内货运需求可能会越发受化石燃料价格影响。鉴于国内相关数据有限，本研究借鉴了欧洲国家（Edelenbosch等，2017）的燃料价格弹性系数，假设2020至2030年间，中国长期的燃料（碳）价格弹性系数为-0.5~-0.2，2030至2060年间为-0.7~-0.5（见附录表4）。

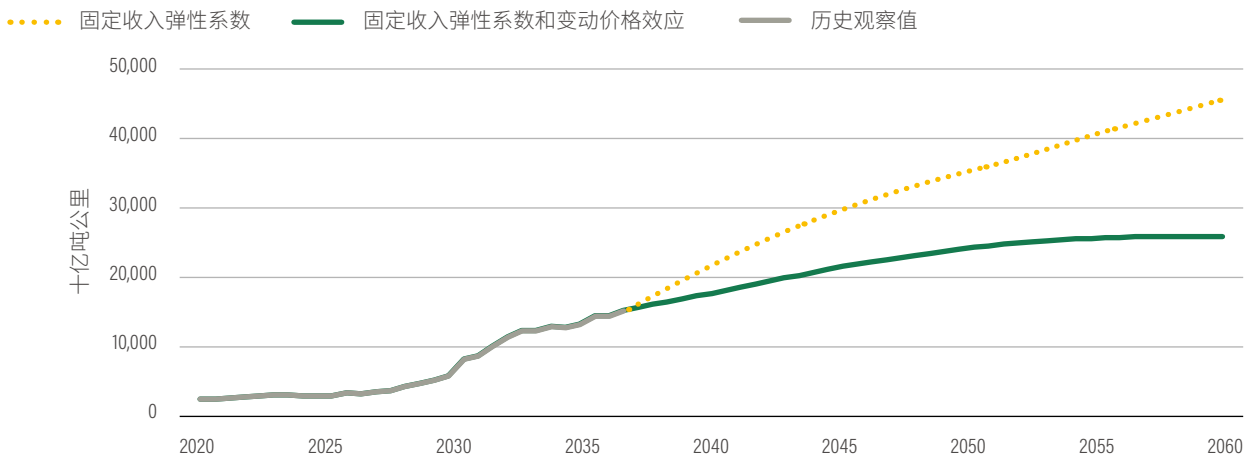
货运需求的预测结果表明，中国的货运周转量处于快速增长阶段，在2055—2060年间能够达峰，而达峰时的货运周转量为25.9万亿吨公里（见附录图3）。

附录表 3 | **中国、美国和德国货运周转量的长期人均收入弹性系数**

| 中国（1990—2020年） | 美国（1980—2018年） | 德国（1990—2020年） |
|---|---|---|
| 0.99 | 0.40 | 1.01 |

来源：中国统计年鉴、世界银行 GDP 数据、美国运输统计局、经合组织货运数据（https://data.oecd.org/transport/freight-transport.htm）。

附录图 3 | **中国国内货运周转量预测**



附录表 4 | **中国的人均收入弹性系数和燃料（碳）价格弹性系数**

| | 2020—2030年 | 2030—2060年 |
|---|---|---|
| 人均收入弹性系数 | 0.99 | 0.99 |
| 燃料（碳）价格弹性系数 | -0.5～-0.2 | -0.7～-0.5 |

来源：作者根据模型测算。

# 附录2.
# 生物燃料的未来推广潜力

本研究中，生物燃料推广并未作为国内道路交通的主要减排措施。这是因为无论是原料来源与供应，还是燃料成本与环境效益，生物燃料的规模化推广有限制：

首先，生物燃料存在原料供应上的瓶颈。对第一代生物燃料而言（主要原料是玉米、棕榈油等），可能会存在供不应求及粮食安全等挑战。2019年，国内乙醇产量为284万吨。如果要求所有国内消费的汽油都掺入10%的乙醇（E10），对乙醇的需求量将高达1,300万吨（中国石油规划总院，日期不详[24]）。如果满足1,016万吨乙醇的需求缺口，对国内农作物生产、粮食进口与粮食安全都将产生巨大的影响。对原料不同的第二代生物燃料（主要原料是废弃物和植物纤维素如秸秆）而言，虽然与第一代生物燃料相比，第二代生物燃料有诸多好处（如脱碳潜力高、粮食安全风险低等），但也面临原料供应的瓶颈。以美国为例，美国的废弃物总量（包括农业废弃物、食物废弃物、污泥和粪肥等）每年可炼成22.3千兆升（Gigaliter）的生物原油，仅能满足美国当前23.9%的航空煤油需求（Skaggs等，2018）。

第二，在缺乏政策激励的情况下，生物燃料很难获得迅猛发展。生物燃料比化石燃料更贵：国内乙醇的生产成本约为5000～6000元/吨，已达到汽油/柴油的批发价（5200～6300元/吨）[25]水平。因此，为鼓励更多企业生产生物燃料，必须出台有力的政策，推动生物燃料的应用。然而，出于粮食安全考虑，中国于2016年取消了面向炼化企业的生物燃料补贴（2005年为1883元/吨）。此外，中国也无计划出台类似欧盟《可再生能源指令》（RED）或美国《可再生燃料标准》（RFS）的低碳燃料应用强制性法规，规定终端燃料消费中掺入生物燃料（或低碳燃料）的最低比例。

最后，生物燃料的环境效益也有待改善。研究表明，与传统柴油车相比，使用生物柴油（普通柴油中掺入20%的生物柴油，DB20）的柴油车的碳氢化合物排放与一氧化碳排放分别会增加7%和10%（O'Malley和Searle，2021）。

# 注释

1. 新能源汽车包括纯电动汽车、插电式混合动力汽车、燃料电池汽车等。
2. “国六”标准指2016年发布的《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB18352.6—2016)和2018年《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB17691—2018)。“国六”标准是中国最新的汽车排放标准，其污染物排放限值接近“欧六”标准。
3. http://www.gov.cn/xinwen/2020-11/20/content_5562997.htm
4. 中国推广新能源汽车的相关优惠政策不涉及电动摩托车或电动自行车。
5. 车辆总拥有成本还包括首位拥有者的车辆总拥有成本、第二位拥有者的车辆总拥有成本，以此类推。
6. 对于充电基础设施资本支出，昂贵的电网升级投资不包括在计算中。
7. 本研究假设燃料电池汽车的加氢成本，包括氢气的生产与运输成本以及加氢站的建设运维成本(即这些投入均可从加氢成本中收回)，故称之为平准化加氢成本。
8. 2025年、2030年与2050年氢燃料成本所对应的氢燃料供给结构为中国氢能联盟(2019)预测的氢燃料供给结构。此处，假设氢燃料成本与供给结构成对应关系。
9. 对运输强度较低的服务业而言，经济增长与货运周转量的增长会逐渐脱钩。
10. 2020年中国的人均(国内)货运周转量为8,000吨公里，小于美国、澳大利亚和加拿大(约22,900吨公里)。
11. 部分是由于公路运输行业的货车超载与低价竞争。
12. http://jtw.beijing.gov.cn/xxgk/dtxx/202108/t20210825_2476639.html
13. 部分原因是公路运输行业的货车超载与低价竞争。
14. http://finance.people.com.cn/n1/2021/1103/c1004-32272730.html
15. 货车超载问题严重，其负载量甚至会达到货车最大载重量的2～3倍。
16. http://www.autoinfo.org.cn/autoinfo_cn/content/news/20210508/3033391.html
17. 达到平价点的时间跨度较大是由于不同文献对总拥有成本有不同定义，包括首次持有车的总拥有成本(乘用车的使用时长为5～6年)或生命周期总拥有成本(乘用车使用年限为10～15年)。
18. 纯电动货车在重载与长距离运输等场景存在短板，而燃料电池货车则成本较高，存在燃料电池循环寿命短、功率低等问题。
19. 乘用车第一阶段至第四阶段燃料消耗标准采用NEDC工况，第五阶段起采用WLTP工况。商用车燃料消耗标准采用C-WTVC工况。
20. 2020年，国内SUV和MPV销量占乘用车销量的52%(比2010年增加37%)，牵引车销量占中重型货车销量的45%(比2012年增加30%)。
21. 化石燃料包括煤炭、天然气和石油产品。
22. 本研究中，低碳投资包括新能源汽车购买和运营的成本，以及对货运铁路基础设施、公共交通基础设施的投资，而这些成本并未包含在波士顿咨询公司(2020)和高盛集团(2021)的相关研究中。
23. 汽油机微粒捕集器(GPF)的全球变暖效应可能为中性。这是因为GPF有助于降低黑碳的排放量(即PM 10的一种)，这部分降低的量可以抵消燃料消耗($CO_2$排放)增加的量。
24. http://www.qibebt.cas.cn/xwzx/kydt/201903/t20190316_5257518.html
25. 山东省当地炼油厂的批发价(https://www.bilibili.com/read/cv12220483)。

# 引用


Abramczyk, M., M. Campbell, A. Chitkara, M. Diawara, A. Lerch, and J. Newcomb. 2017. *Positive Disruption: Limiting Global Temperature Rise to Well below 2 Degrees*.

ACEA (European Automobile Manufacturers' Association). 2021. *Making the Transition to Zero Emission Mobility.* Progress Report. Brussels: ACEA.

ACEA. 2022. "ACEA Proposals for Euro 7 and Euro VII Emission Standards." https://www.acea.auto/publication/acea-proposals-for-euro-7-and-euro-vii-emission-standards/.

Agenbroad, J., J. Creyts, D. Mullaney, J. Song, and Z. Wang. 2016. *Improving Efficiency in Chinese Trucking and Logistics: Proceeding and Insights from the Design Charrette on Chinese Logistics and Trucking Efficiency Held April 26–27, 2016, in Shenzhen, PRC.* Rocky Mountain Institute.

Agora Energiewende. 2020a. *Towards a Climate-Neutral Germany. Three Steps for Achieving Climate Neutrality by 2050 and an Intermediate Target of -65% in 2030 as Part of the EU Green Deal.* Berlin: Agora Energiewende.

Agora Energiewende. 2020b. *The European Power Sector in 2020: Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition*. Berlin: Agora Energiewende.

ANL (Argonne National Laboratory). 2014. "Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET) Model." Lemont, IL: Argonne National Laboratory.

ANL (Argonne National Laboratory). 2018. *China Vehicle Fleet Model: Estimation of Vehicle Stocks, Usage, Emissions, and Energy Use—Model Description, Technical Documentation, and User Guide. Lemont,* IL: Argonne National Laboratory.

ATRI (American Transportation Research Institute). 2020. *An Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2020 Update.* Arlington, VA: American Transportation Research Institute.

Autoinfo. 2021. "China Natural Gas Heavy-Duty Vehicle Market Analysis." In Chinese. https://www.autoinfo.org.cn/autoinfo_cn/content/news/20210508/3033391.html.

BCG (Boston Consulting Group). 2020. *Climate Plan for China*. Boston: Boston Consulting Group.

BloombergNEF. 2021. *Electric Vehicle Outlook 2021.* New York: BloombergNEF.

BTS (Bureau of Transportation Statistics, United States). 2021a. *National Transportation Statistics 2021.* Washington, DC: Bureau of Transportation Statistics.

BTS. 2021b. *Hybrid-Electric, Plug-In Hybrid-Electric and Electric Vehicle Sales*. Washington, DC: Bureau of Transportation Statistics.

BTS and FHWA (Federal Highway Administration, United States). 2016. *The 4th Generation Freight Analysis Framework (FAF4) for Freight Volume Forecast for 2020 through 2045.* Washington, DC: Bureau of Transportation Statistics and Federal Highway Administration.

CAAM (China Association of Automobile Manufacturers). 2012. *2011 Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2013. *2012 Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2014. *2013 Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2015. *2014 Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2016. *2015 Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2017. *2016 Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2018. *2017 Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2019. *2018 Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2020. *2019 Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2021a. *2020 Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2021b. *Monthly Report on Automobile Industry Operation—November of 2021.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAAM. 2022. 2021 *Progress Report on China's Automobile Industry.* Beijing: China Association of Automobile Manufacturers.

CAM (China Association of Metros). 2017. *China Urban Rail Transit Annual Statistics and Analysis 2017.* Beijing: China Association of Metros.

CAM. 2018. *China Urban Rail Transit Annual Statistics and Analysis 2018.* Beijing: China Association of Metros.

CAM. 2019. *China Urban Rail Transit Annual Statistics and Analysis 2019.* Beijing: China Association of Metros.

CAM. 2020. *China Urban Rail Transit Annual Statistics and Analysis 2020.* Beijing: China Association of Metros.

CARB (California Air Resources Board). 2020. *Advanced Clean Trucks Regulation.* Sacramento, CA: CARB.

CATARC (China Automotive Technology and Research Center). 2016. *Annual Report on Energy-Saving and New Energy Vehicles in China 2016.* Tianjin, China: China Automotive Technology and Research Center.

CATARC. 2018. *Annual Report on Energy-Saving and New Energy Vehicles in China 2018.* Tianjin, China: China Automotive Technology and Research Center.

CATARC. 2021. *Annual Report on Energy-Saving and New Energy Vehicles in China 2021.* Tianjin, China: China Automotive Technology and Research Center.

CEC (China Electricity Council). 2020. *China 2020 Electricity and Industry Operation Bulletin.* Beijing: CEC.

CHA (China Hydrogen Alliance). 2019. *White Paper on China Hydrogen Energy Carrier and Fuel Cell Stack Industry 2019.* Beijing: China Hydrogen Alliance.

China EV 100 and NRDC (Natural Resources Defense Council). 2019. *How to Enable the Healthy Development of the Electric Vehicle Charging Market in China?*

China SAE (China Society of Automotive Engineers). 2020. *Technology Roadmap for Energy-Saving and New Energy Vehicles 2.0 (The Roadmap)*. Beijing: China Machine Press.

*China Transport News*. 2021. "Shenzhen Prioritizes Green Transport and Revitalize the City." https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202112/t20211207_3630018.html.

Clairotte, M., R. Suarez-Bertoa, A.A. Zardini, B. Giechaskiel, J. Pavlovic, V. Valverde, B. Ciuffo, et al. 2020. "Exhaust Emission Factors of Greenhouse Gases (GHGs) from European Road Vehicles." *Environ Sci Eur* 32 (125). https://doi.org/10.1186/s12302-020-00407-5.

Climate Watch. 2020. (Database.) "Global Historical GHG Emissions-CAIT." Washington, DC: World Resources Institute. https://www.climatewatchdata.org.

CSI (China Standardization Institute). 2018. *China Hydrogen Industry Infrastructure Development Bluebook (2016)*. Beijing: China Quality and Standard Publishing.

DOE (United States Department of Energy). 2020. *Hydrogen Strategy: Enabling a Low-Carbon Economy.* Washington, DC: DOE.

DOT (United Kingdom Department of Transport). 2021. *Consultation on When to Phase Out the Sale of New, Non-zero Emission Heavy Goods Vehicles.* London: United Kingdom Department of Transport.

Edelenbosch, O.Y., D.P. van Vuuren, C. Bertram, S. Carrara, J. Emmerling, H. Daly, A. Kitous, et al. 2017. "Transport Fuel Demand Responses to Fuel Price and Income Projections: Comparison of Integrated Assessment Models." *Transportation Research Part D–Transport and Environment.* 55: 310–21.

EEA (European Environment Agency). 2020. "EEA Greenhouse Gases—Data Viewer." Copenhagen: EEA.

Enoch, M. 2018. *Mobility as a Service (MaaS) in the UK: Change and Its Implications.* Loughborough, United Kingdom: School of Architecture, Building and Civil Engineering, Loughborough University.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2009. *Automobile Industry Retail Price Equivalent and Indirect Cost Multipliers.* Washington, DC: EPA.

EPA. 2015. *Transitioning to Low-GWP Alternatives in Passenger Vehicle Air Conditioners.* Washington, DC: EPA.

EPA. 2020. "Greenhouse Gas Inventory Data Explorer." Washington, DC: EPA. https://cfpub.epa.gov/ghgdata/inventoryexplorer/.

ERTICO (ERTICO – ITS Europe, Editor). 2019. *Mobility as a Service (MaaS) and Sustainable Urban Mobility Planning*.

EU P&C (European Union Parliament and Council). 2019. *Regulation (Eu) 2019/631 of the European Parliament and of the Council. Setting $CO_2$ Emission Performance Standards for New Passenger Cars and for New Light Commercial Vehicles, and Repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011.*

Eurostat. 2021a. "Stock of Vehicles by Category and NUTS 2 Regions." Luxembourg City: Eurostat.

Eurostat. 2021b. "Freight Transported in Containers — Statistics on Unitisation." Luxembourg City: Eurostat.

Eurostat. 2021c. "Annual Road Freight Transport by Load Capacity of Vehicle." Luxembourg City: Eurostat.

Eurostat. 2021d. "Road Freight Transport Statistics." Luxembourg City: Eurostat.

Eurostat. 2021e. "Lorries and Lorries (Excluding Light Goods Road Vehicles)." Luxembourg City: Eurostat.

Feng, J., Y. Zhang, S. Li, J. Mao, A.P. Patton, Y. Zhou, W. Ma, et al. 2019. "The Influence of Spatiality on Shipping Emissions, Air Quality and Potential Human Exposure in the Yangtze River Delta/Shanghai, China." *Atmos. Chem. Phys.* 19 (9): 6167–83. https://doi.org/10.5194/acp-19-6167-2019.

FHWA (Federal Highway Administration, United States). 2021. "Highway Statistics 2019—Annual Vehicle Distance Traveled in Miles and Related Data by Highway Category and Vehicle Type." Washington, DC: FHWA.

Fransen, T., B. Welle, C. Gorguinpour, M. McCall, R. Song, and A. Tankou. 2019. "Enhancing NDCs: Opportunities in Transport." Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute.

Frey, K., J. Hartwig, and C. Doll. 2014. "Accelerating a Shift from Road to Rail Freight Transport in Germany: Three Scenarios." *Transport Research Arena 2014, Paris.*

Fu, Z.H., et al. 2019. *Strategy Research on Transportation Power.* Beijing: China Communications Press. Co. Ltd.

Gao, Z.M., T.J. LaClair, D.E. Smith, and C. Stuart Daw. 2015. "Exploring Fuel-Saving Potential of Long-Haul Truck Hybridization." *Transportation Research Record* 2502 (2502): doi:10.3141/2502-12.

Gao, Z., T. Laclair, S. Ou, S. Huff, G. Wu, P. Hao, K. Boriboonsomsin, et al. 2019. "Evaluation of Electric Vehicle Component Performance over Eco-driving Cycles." *Energy* 172: 823–39. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.017.

Gilbert, C. 2017. Global Passenger Car Penetration: *Grid Lock!* Legal & General Investment Management Limited.

Gnann, T., P. Plötz, A. Kühn, and M. Wietschel. 2017. *How to Decarbonize Heavy Road Transport?* ECEEE 2017 Summer Study – Consumption, Efficiency & Limits.

Goldman Sachs. 2021. *Carbonomics—China Net Zero: The Clean Tech Revolution.* New York: Goldman Sachs.

Gota, S., C. Huizenga, K. Peet, N. Medimorec, and S. Bakker. 2018. "Decarbonising Transport to Achieve Paris Agreement Targets." *Energy Efficiency* 12: 363–86. https://doi.org/10/gfpm72.

Gustafsson, M., N. Svensson, M. Eklund, J. Dahl Öberg, and A. Vehabovic. 2021. "Well-to-Wheel Greenhouse Gas Emissions of Heavy-Duty Transports: Influence of Electricity Carbon Intensity." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 93: 102757. ISSN 1361-9209. https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102757.

Hao, H., Y. Geng, W.Q. Li, and B. Guo. 2015. "Energy Consumption and GHG Emissions from China's Freight Transport Sector: Scenarios through 2050." *Energy Policy* 85: 94–101. ISSN 0301-4215. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.05.016.

Heaps, C.G. 2022. LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. [Software version: 2020.1.56]. Somerville, MA: Stockholm Environment Institute. https://leap.sei.org.

HPK. 2019. "Efficiency and $CO_2$ Emission Analysis of Internal Combustion Engines (ICE) and Electric Vehicles (EV) on WTT and TTW Emissions." Future #SmartMobility Needs Sustainable #CleanEnergy Blog. https://kleebinder.net/en/tag/lifecycle-assessment/.

Hu, T., X.Q. Mao, X.D. Lu, and P. Gerilla-Teknomo. 2020. *Air Pollutants and Greenhouse Gas Emissions Co-control Evaluation in the People's Republic of China.* ADB East-Asia Working Paper Series. Manila: Asian Development Bank.

Huo, H., M. Wang, X.L. Zhang, K. He, H. Gong, K. Jiang, Y. Jing, et al. 2012a. "Projection of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions by Motor Vehicles in China: Policy Options and Impacts." *Energy Policy* 43 (C): 37–48.

Huo, H., Q. Zhang, K.B. He, Z.Z. Yao, and M. Wang. 2012b. "Vehicle-Use Intensity in China: Current Status and Future Trend." Energy Policy 43 (C): 6–16.

ICCSD (Institute of Climate Change and Sustainable Development of Tsinghua University). 2020. *China's Long-Term Low-Carbon Development Strategies and Pathways: Comprehensive Report.* Beijing: China Environment Press.

ICCT (International Council on Clean Transportation). 2017. *China's Stage 6 Emission Standard for New Light-Duty Vehicles (Final Rule).* ICCT 2017 Policy Update. Beijing: ICCT.

ICCT. 2019. "Comments on China's Proposed 2021–2025 Fuel Consumption Limits, Evaluation Methods, and Targets for Passenger Cars." Beijing: ICCT.

iCET (Innovation Center for Energy and Transportation). 2017. *Annual Report on the Differences between Real-World Fuel Consumption and Certified Fuel Consumption for Passenger Cars.* Beijing: iCET.

iCET. 2021. *Report on China's Commercial Vehicle Electrification Potentials.* Beijing: iCET.

IEA (International Energy Agency). 2021a. *World Energy Outlook 2021.* Paris: IEA.

IEA. 2021b. *An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China.* Paris: IEA.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.* Geneva: IPCC.

IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report.* Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team: R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. Geneva: IPCC.

IRENA (International Renewable Energy Agency). 2020. *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal.* Abu Dhabi: IRENA.

ITF (International Transport Forum). 2012. (Database.) *OECD. Stat.* Paris: ITF. http://stats.oecd.org/index.aspx.

ITF. 2013. *Railway Efficiency: An Overview and a Look at Opportunities for Improvement.* ITF Discussion Paper No. 201312. Paris: ITF. https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/dp201312.pdf.

ITF. 2019. *ITF Transport Outlook 2019.* Paris: ITF.

MLITT (Ministry of Land Infrastructure Transport and Tourism, Japan). 2021. 統計情報. https://www.mlit.go.jp/statistics/details/jidosha_list.html.

Jiang, X.Q., W.Y. Xi, W.K. Fong, J.Y. Song, and Z. Wang. 2019. *Wuhan Transport Sector Carbon Emissions Roadmap Study.* Washington, DC: World Resources Institute.

Kaak, L.H., P. Vaishanav, M.G. Morgan, I. Azevedo, and S. Rai. 2018. "Decarbonizing Intraregional Freight Systems with a Focus on Modal Shift." *Environmental Research Letters* 13 (8).

Kong, H., X.H. Zhang, and J.H. Zhao. 2020. "How Does Ridesourcing Substitute for Public Transit? A Geospatial Perspective in Chengdu, China." *Journal of Transport Geography* 86: 102769. ISSN 0966-6923. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102769.

Lai, J. n.d. "Bus Rationalization in Hong Kong." Presentation. Metropolis. https://www.metropolis.org/sites/default/files/hong-kong_bus-rationalization.pdf.

LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory). 2021. *Assessment of Energy Strategies for China's Heavy-Duty Trucks and the Potential for Electrification.* Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

Ledna, C., M. Muratori, A. Yip, P. Jadun, and C. Hoehne. 2022. "Decarbonizing Medium- and Heavy-Duty On-Road Vehicles: Zero Emission Vehicles Cost Analysis." Presentation. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

Le Quéré, C., R.B. Jackson, M.W. Jones, A.J.P. Smith, S. Abernethy, R.M. Andrew, A.J. De-Gol, et al. 2020. "Temporary Reduction in Daily Global $CO_2$ Emissions during the COVID-19 Forced Confinement." *Nat. Clim. Chang.* 10: 647–53. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x.

Liang, B., Y. Ge, J. Tan, X. Han, L. Gao, L. Hao, W. Ye, and P. Dai. 2012. "Comparison of PM Emissions from a Gasoline Direct Injected (GDI) Vehicle and a Port Fuel Injected (PFI) Vehicle Measured by Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) with Two Fuels: Gasoline and M15 Methanol Gasoline." *Journal of Aerosol Science* 57: 22–31.

Liimatainen, H., O. Vliet, and D. Aplyn. 2019. "The Potential of Electric Trucks – An International Commodity-Level Analysis." *Applied Energy* 236: 804–14.

Liu, F.Q., D.L. Mauzerall, F. Zhao, and H. Hao. 2021. "Deployment of Fuel Cell Vehicles in China: Greenhouse Gas Emission Reductions from Converting the Heavy-Duty Truck Fleet from Diesel and Natural Gas to Hydrogen." *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (34): 17982–97. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.198.

Liu, H.H. 2018. "China Railway Beijing Group's Reflections on Price Signals to Facilitate Freight Mode Shift from Roadways to Railways." *Railway Economic Research* 05: 5–10.

Liu, J.L., Y.H. Sun, K. Wang, J. Zou, and Y. Kong. 2018. "Study on Mid- and Long-Term Low Carbon Development Pathway for China's Transport Sector." *Climate Change Research* 14 (5): 513–21.

Liu, J.L., M. Yin, Q. Xia-Hou, K. Wang, and J. Zou. 2021. "Comparison of Sectoral Low-Carbon Transition Pathways in China under the Nationally Determined Contribution and 2°C Targets." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149. ISSN 1364-0321. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111336.

LTA (Singapore Land Transport Authority Singapore). 2021. "Annual Vehicle Statistics 2021 (Motor Vehicle Population by Vehicle Type)."

Lutsey, N., H.Y. Cui, and R.J. Yu. 2021. *Evaluating Electric Vehicle Costs and Benefits in China in the 2020–2035 Time Frame*. White Paper. Beijing: International Council on Clean Transportation.

Mamakos, A. 2011. *Feasibility of Introducing Particulate Filters on Gasoline Direct Injection Vehicles: A Cost Benefit Analysis.* JRC Scientific and Policy Reports. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Mao, S., H. Basma, P.–L. Ragon, Y. Zhou, and F. Rodríguez. 2021. *Total Cost of Ownership for Heavy Trucks in China: Battery Electric, Fuel Cell Electric and Diesel Trucks.* White Paper. Beijing: International Council on Clean Transportation.

Mareev, I., J. Becker, and D. Sauer. 2018. "Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation." *Energies* 11 (1): 55.

McKinnon, A. 2010. European Freight Transport Statistics: *Limitations, Misinterpretations, and Aspirations*. Report prepared for the 15th European Automobile Manufacturers' Association Scientific Advisory Group Meeting. Brussels, September 8.

MEE (Ministry of Ecology and Environment, China). 2011. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2011*. Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2012. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2012.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2013. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2013.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2014a. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2014.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2014b. *China's National Guide on Road Transport Air Pollutant Inventory Development (Test Version)*. Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2015. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2015.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2016. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2016.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2017. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2017.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2018a. *China's Second Biennial Update Report on Climate Change.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2018b. *The People's Republic of China Third National Communication on Climate Change.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2018c. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2018.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2018d. "The State Council Rolls Out a Three-Year Action Plan for Clean Air." https://english.mee.gov.cn/News_service/news_release/201807/t20180713_446624.shtml.

MEE. 2019. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2019.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2020a. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2020.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2020b. *Bulletin on the Second National Census of Pollution Source.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MEE. 2021. *China Vehicle Environmental Management Annual Report 2021.* Beijing: China Ministry of Ecology and Environment.

MIIT (Ministry of Industry and Information Technology, China). 2019. *Fuel Consumption Evaluation Methods and Targets for Passenger Cars (GB 27999-2019)*. Beijing: China Ministry of Industry and Information Technology.

MIIT. 2021. *Fuel Consumption Limits for Passenger Cars (GB19578-2021).* Beijing: China Ministry of Industry and Information Technology.

MOT (Ministry of Transport of China). 2015. *The 13th Five-Year Plan on Comprehensive Transport Development.* Beijing: Ministry of Transport of China.

MOT. 2016. *China Annual Transport Statistical Bulletin 2016.* Beijing: Ministry of Transport of China.

MOT. 2017a. *Regularity of the Enforcement on Vehicle Overloading.* Beijing: Ministry of Transport of China.

MOT. 2017b. *Guideline on Management of Illegal Adaptations to Vehicles and Vehicle Overloading.* Beijing: Ministry of Transport of China.

MOT. 2019. *Interim Measures for the Operation and Administration of Road Freight Transport Based on Internet Platforms.* Beijing: Ministry of Transport of China.

Mottschall, M., P. Kasten, and F. Rodriguez. 2020. *Decarbonization of On-Road Freight Transport and the Role of LNG from a German Perspective.* Beijing: International Council on Clean Transportation.

MPS (Ministry of Public Security, China). 2019. "Road Traffic Management—Types of Motor Vehicles (GA802–2019)." China Public Security Sectoral Standard. Beijing: Ministry of Public Security.

Mulholland, E., J. Teter, P. Cazzola, Z. McDonald, and B.P. Ó Gallachóir. 2018. "The Long Haul towards Decarbonising Road Freight – A Global Assessment to 2050." *Applied Energy 216* (C): 678–93.

NBS (National Bureau of Statistics of China). 2002. *China Statistical Yearbook 2002*. Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2003. *China Statistical Yearbook 2003*. Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2004. *China Statistical Yearbook 2004.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2005. *China Statistical Yearbook 2005*. Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2006. *China Statistical Yearbook 2006.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2007. *China Statistical Yearbook 2007.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2008. *China Statistical Yearbook 2008.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2009. *China Statistical Yearbook 2009.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2010. *China Statistical Yearbook 2010.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2011. *China Statistical Yearbook 2011.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2012. *China Statistical Yearbook 2012.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2013. *China Statistical Yearbook 2013.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2014. *China Statistical Yearbook 2014.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2015. *China Statistical Yearbook 2015.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2016. *China Statistical Yearbook 2016.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2017. *China Statistical Yearbook 2017.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2018. *China Statistical Yearbook 2018.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2019. *China Statistical Yearbook 2019.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2020. *China Statistical Yearbook 2020.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NBS. 2021. *China Statistical Yearbook 2021.* Beijing: National Bureau of Statistics of China.

NCI and CA (New Climate Institute and Climate Analytics). 2020. *Climate Action Tracker: Paris Agreement Compatible Sectoral Benchmarks. Methods Report on Elaborating the Decarbonisation Roadmap.*

NDRC (National Development and Reform Commission, China). 2004. *The People's Republic of China Initial National Communication on Climate Change.* Beijing: China National Development and Reform Commission.

NDRC. 2012. *The People's Republic of China Second National Communication on Climate Change.* Beijing: China National Development and Reform Commission.

NDRC. 2016. *China's First Biennial Update Report on Climate Change.* Beijing: China National Development and Reform Commission.

NDRC. 2021. *Action Plan for Carbon Dioxide Peaking before 2030*. Beijing: China National Development and Reform Commission. https://en.ndrc.gov.cn/policies/202110/t20211027_1301020.html.

Ntziachristos, L., D. Gkatzoflias, C. Kouridis, and Z. Samaras. 2009. "COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model." In I.N. Athanasiadis, A.E. Rizzoli, P.A. Mitkas, J.M. Gómez (Eds.). *Information Technologies in Environmental Engineering.* Environmental Science and Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer.

O'Driscoll, R., M. Stettler, N. Molden, T. Oxley, and H.M. ApSimon. 2018. "Real World $CO_2$ and NOx Emissions from 149 Euro 5 and 6 Diesel, Gasoline and Hybrid Passenger Cars." *Science of the Total Environment* 621: 282–90.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). n.d. "Freight Transport (Indicator)." Paris: OECD. doi: 10.1787/708eda32-en. Accessed April 20, 2022.

OECD. 2018. *Total Inland Transport Infrastructure Investment per GDP.* Paris: OECD.

O'Malley, J., and S. Searle. 2021. Air Quality Impacts of Biodiesel in the U.S. White Paper. Beijing: International Council on Clean Transportation.

Pan, D., L. Tao, K. Sun, L.M. Golston, D.J. Miller, T. Zhu, Y. Qin, et al. 2020. "Methane Emissions from Natural Gas Vehicles in China." *Nature Communication* 11 (4588). https://doi.org/10.1038/s41467-020-18141-0.

Pan, X., H.L. Wang, L.N. Wang, and W. Chen. 2018. "Decarbonization of China's Transportation Sector: In Light of National Mitigation toward the Paris Agreement Goals." *Energy* 155: 853–64. ISSN 0360-5442. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.144.

Peng, L.Q., F.Q. Liu, M. Zhou, M. Li, Q. Zhang, and D.L. Mauzerall. 2021. "Alternative-Energy-Vehicles Deployment Delivers Climate, Air Quality, and Health Co-benefits when Coupled with Decarbonizing Power Generation in China." *One Earth* 4: 1127–1140.

Phadke, A., A. Khandekar, N. Abhyankar, D. Wooley, and D. Rajagopal. 2021. "Why Regional and Long-Haul Trucks Are Primed for Electrification Now." Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

QDIBBT (Qindao Institute of BioEnergy and Bioprocess Technology, China Academy of Sciences). 2019. "Not Living Up to Expectations: China Has Ethanol Supply Gaps." http://www.qibebt.cas.cn/xwzx/kydt/201903/t20190316_5257518.html.

Qiu, S.Y., L.L. Xue, J. Cai, J.Q. Chen, L.Y. Song, and Z. Wu. 2020. "Zero-Emission Logistic Vehicles Promotion Challenges and Experiences: Beijing Case Study." Working Paper. Beijing: WRI China.

Riahi, K., F. Dentener, D. Gielen, A. Grubler, J. Jewell, Z. Klimont, V. Krey, et al. 2012. "Energy Pathways for Sustainable Development." In *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*, edited by T.B. Johansson, N. Nakicenovic, A. Patwardhan, and L. Gomez-Echeverri. Cambridge: Cambridge University Press.

RIOH and Sinoiov (Research Institute of Highway of China and Sinoiov). 2021. *Big Data Based China Road Freight Industry Operation Analysis Report (2020).* Beijing: Research Institute of Highway of China and Sinoiov.

Saliba, G., R. Saleh, Y. Zhao, A.A. Presto, A.T. Lambe, B. Frodin, S. Sardar, et al. 2017. "Comparison of Gasoline Direct-Injection (GDI) and Port Fuel Injection (PFI) Vehicle Emissions: Emission Certification Standards, Cold-Start, Secondary Organic Aerosol Formation Potential, and Potential Climate Impacts." *Environment Science Technology* 51 (11): 6542–52.

Schaller, B. 2021. "Can Sharing a Ride Make for Less Traffic? Evidence from Uber and Lyft and Implications for Cities." *Transport Policy* 102: 1–10. ISSN 0967-070X. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.12.015.

Schroten, A., G. Warringa, and M. Bles. 2012. *Marginal Abatement Cost Curves for Heavy Duty Vehicles.* Background Report. Delft, Netherlands: CE Delft.

SFC (Smart Freight Center). n.d. *Smart Freight Forum: China Modal Shift from Truck to Rail Summary Report.*

Shao, Y.Z. 2020. "Environmental Impacts of Modal Shift to Rail in Tangshan." Working Paper. Beijing: International Council on Clean Transportation.

Shao, Y.Z. 2021. *The Updated China IV Non-road Emission Standards. Policy Update.* Beijing: International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/publications/china-iv-non-road-emission-standards-jul2021.

Skaggs, R.L., A.M. Coleman, T.E. Seiple, and A.R. Milbrandt. 2018. "Waste-to-Energy Biofuel Production Potential for Selected Feedstocks in the Conterminous United States." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (3): 2640–51. ISSN 1364-0321. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.107.

Song, S. 2017. *The Transport Emissions & Social Cost Assessment.* Washington, DC: World Resources Institute.

Spielmann, M., M. Faltenbacher, A. Stoffregen, and D. Eichhorn. 2010. *Comparison of Energy Demand and Emissions from Road, Rail and Waterway Transport in Long-Distance Freight Transport.* Leinfelden-Echterdingen, Germany: PE International.

State Council (State Council, the People's Republic of China). 2020. *NEV Industrial Development Plan 2021–35.* Beijing: State Council.

State Council. 2021a. *Guideline on Further Prevention and Control of Pollution (2021–25)*. Beijing: State Council.

State Council. 2021b. *National Comprehensive Three-Dimensional Transportation Network (2021–35)*. Beijing: State Council.

T&E (Transport & Environment). 2020a. *Compressed Natural Gas Vehicles Are Not a Clean Solution for Transport: Review of the Latest Evidence Shows High Levels of Particle Emissions.* Brussels: Transport & Environment. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2020_06_TE_CNG_particle_report.pdf.

T&E. 2020b. *How to Decarbonize the UK's Freight Sector by 2050.* Brussels: Transport & Environment.

Teske, S., S. Niklas, and R. Langdon. 2021. *TUMI Transport Outlook 1.5°C: A Global Scenario to Decarbonize Transport*. Bonn, Germany: Transformative Urban Mobility Initiative.

UK DfT (Department for Transport, United Kingdom). 2021. *Decarbonizing Transport: A Better, Greener Britain*. London: Department for Transport.

Wang, H.L., X.M. Ou, and X.L. Zhang. 2017. "Mode, Technology, Energy Consumption, and Resulting $CO_2$ Emissions in China's Transport Sector up to 2050." *Energy Policy* 109: 719–33. ISSN 0301-4215. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.010.

Wang, H., J.Y. Han, M. Su, S.L. Wan, and Z.C. Zhang. 2021. "The Relationship between Freight Transport and Economic Development: A Case Study of China." *Research in Transportation Economics* 85: 100885. ISSN 0739-8859. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100885.

Wang, Z.P., Z.W. Yao, et al. 2021. *Annual Report on the Big Data of New Energy Vehicles in China (2021)*. Beijing: China Machine Press.

Wappelhorst, S. 2021. "Update on Government Targets for Phasing Out New Sales of Internal Combustion Engine Passenger Cars." Briefing. Beijing: International Council on Clean Transportation.

Wappelhorst, S., U. Tietge, G. Bieker, and P. Mock. 2021. "Europe's $CO_2$ Emission Performance Standards for New Passenger Cars: Lessons from 2020 and Future Prospects." Working Paper. Beijing: International Council on Clean Transportation.

Wei, H.Y., H. Zhou, Y. Yan, et al. 2020. "The Development of Diesel Fueled Heavy-Duty Vehicle Emission Standards in China." Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique 49 (06):79–87.

WHO (World Health Organization). 2021. *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide.* Geneva: WHO. https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

World Bank. 2021. *Electrification of Public Transport: A Case Study of the Shenzhen Bus Group.* Mobility and Transport Connectivity. Washington, DC: World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35935 License: CC BY 3.0 IGO.

Xinhua News. 2020. "China E-scooters' Stock Approaching 300 Million." http://www.gov.cn/xinwen/2020-11/20/content_5562997.htm.

Xinhua News. 2021. "Beijing City Center's Green Transport Mode Share over 73%." http://www.gov.cn/xinwen/2020-11/20/content_5562997.htm.

Xue, L.L., J. Liu, Y. Wang, X.S. Liu, and X. Ying. 2020. *Action Plans and Policy Recommendations on Vehicle Grid Integration in China.* Washington, DC: World Resources Institute.

Xue, L.L., Y.N. Jin, R.J. Yu, Y. Liu, and H. Ren. 2019. "Toward 'Net Zero' Emissions in the Road Transport Sector in China." Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute.

Yang, L.H., O. Delgado, and R. Muncrief. 2019. "Barriers and Opportunities for Improving Long-Haul Freight Efficiency in China." Beijing: International Council on Clean Transportation.

Yang, Z.F., and H.Y. Cui. 2020. *Technology Roadmap and Costs for Fuel Efficiency Increase and $CO_2$ Reduction from Chinese New Passenger Cars in 2030.* Beijing: International Council on Clean Transportation.

Yeh, S., G.S. Mishra, L. Fulton, P. Kyle, D. McCollum, J. Miller, P. Cazzola, et al. 2017. "Detailed Assessment of Global Transport-Energy Models' Structures and Projections." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 55: 294–309. ISSN 1361-9209. https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.001.

Yin, X., W.Y. Chen, Y.J. Eom, L.E. Clarke, S.H. Kim, P.L. Patel, S. Yu, et al. 2015. "China's Transportation Energy Consumption and $CO_2$ Emissions from a Global Perspective." *Energy Policy* 82: 233–48. ISSN 0301-4215. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.03.021.

Zhang, H.J., W.Y. Chen, and W.L. Huang. 2016. "TIMES Modelling of Transport Sector in China and USA: Comparisons from a Decarbonization Perspective." *Applied Energy* 162: 1505-1514.

Zhang, H., J. Chen, W. Li, X. Song, and R. Shibasaki. 2020. "Mobile Phone GPS Data in Urban Ride-Sharing: An Assessment Method for Emission Reduction Potential." *Applied Energy* 269: 115038. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115038.

Zhou, H.Y., Y.C. Wang, and J.R. Huscroft. 2020. "Impacts of COVID-19 on the Transportation Sector: A Report on China." SSRN. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3679662.

ZTB (Zhuzhou Transport Bureau). 2017. *Zhuzhou Annual Transport Development Report*. Zhuzhou, China: Zhuzhou Transport Bureau.

# 作者介绍

**薛露露**是中国交通项目总监，世界资源研究所（美国）北京代表处。邮箱：Lxue@wri.org

**刘岱宗**是中国可持续城市部门主任，世界资源研究所（美国）北京代表处。

# 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。我们通过与决策者交流，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。

# 图片说明

Cover 张烨; pg. i Unsplash/JJ Ying; pg. ii 张烨; pg. iv 张烨; pg. xiii 张烨; pg. xiv Unsplash/zhang kaiyv; pg. xvi 张烨; pg. xxii Unsplash/David Veksler; pg. xxii 张烨; pg. xxiii 张烨; pg. xxiii Unsplash/Decry.Yae; pg. xxiv, 张烨; pg. 5 Unsplash/Zhang gc; pg. 6 Unsplash/Kevin Grieve; pg. 11 赵艳蓉; pg. 13 张烨; pg. 15 张烨; pg. 16 Unsplash/zhang kaiyv; pg. 31 张烨; pg. 38 Unsplash/Jerry Wang; pg. 62 Unsplash/Luca Deasti; pg. 65 Unsplash/billow926; pg. 66 Unsplash/Decry.Yae.

世界资源研究所（WRI）出版物，皆为针对公众关注问题而开展的适时性学术性研究。
世界资源研究所承担筛选研究课题的责任，并负责保证作者及相关人员的研究自由，同时积极征求和回应咨询团队及评审专家的指导意见。若无特别声明，出版物中陈述观点的解释权及研究成果均由其作者专属所有。

Copyright 2022 World Resources Institute. 版权所有
本产品由创用（Creative Commons）4.0许可授权，许可副本参见http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

世界资源研究所（美国）北京代表处
北京市东城区东中街9号
东环广场写字楼A座7层K-M室
邮编：100027
电话：+86 10 6416 5697
WWW.WRI.ORG.CN