



世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

城市的交通“净零”排放： 路径分析方法、关键举措和对策建议

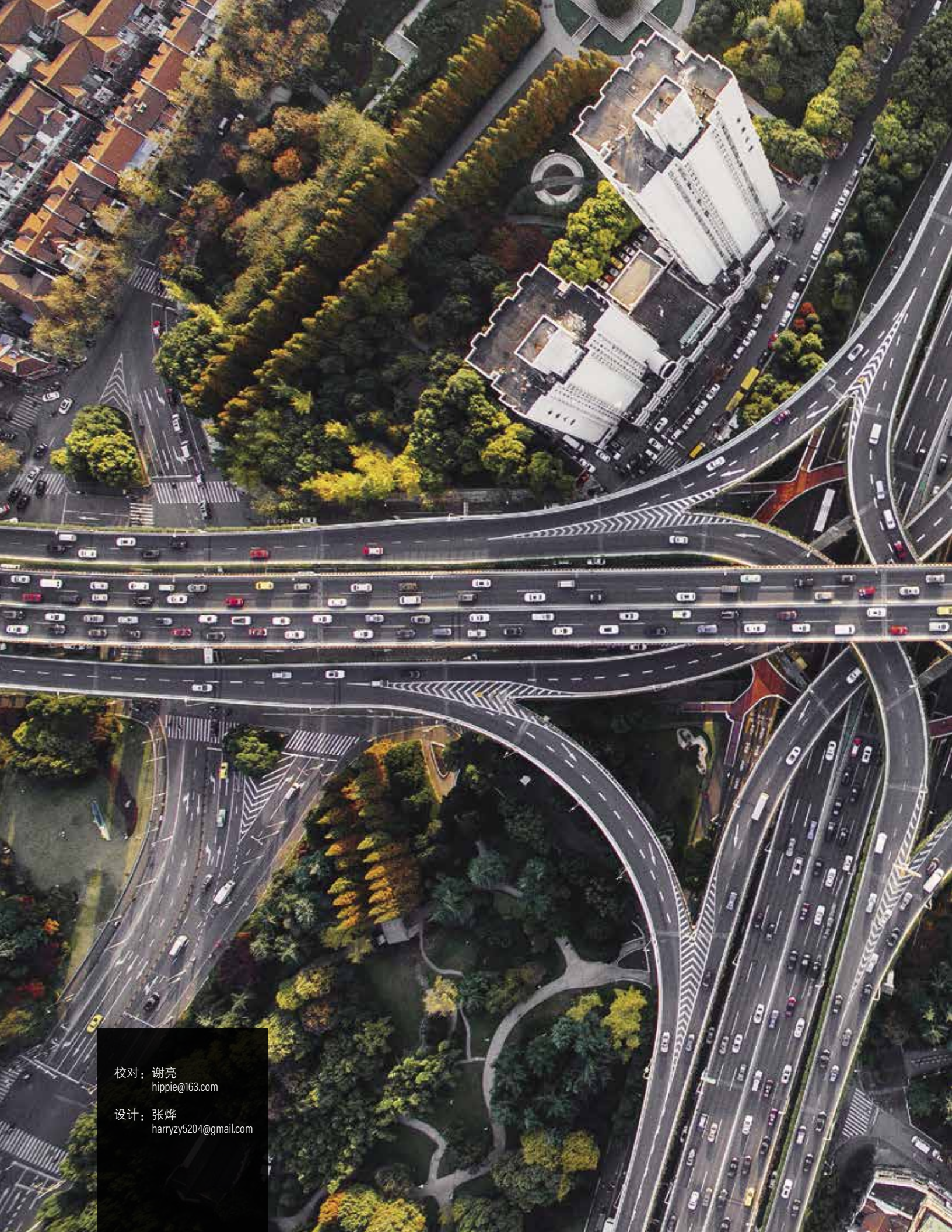
ACHIEVING NET ZERO CARBON EMISSIONS OF TRANSPORTATION SECTOR:
ANALYTICAL FRAMEWORK, KEY ACTIONS AND POLICY SUGGESTIONS
FOR CHINESE CITIES

奚文怡 蒋慧 鹿璐 蒋小谦



SUPPORTER FOR
ACHIEVING NET
ZERO EMISSION OF
TRANSPORTATION

WRI.ORG.CN



校对：谢亮
hippie@163.com

设计：张烨
harryzy5204@gmail.com



目录

V 执行摘要

XI Executive Summary

1 第1章 交通净零排放

- 1 净零排放的意义
- 2 城市交通领域的重要性
- 7 交通净零排放的含义

9 第2章 交通净零排放路径分析方法

- 9 总体技术路线
- 11 未来排放路径分析
 - 12 情景设置
 - 13 宏观参数
 - 15 交通需求
 - 21 运输结构
 - 23 能源效率
 - 26 能源结构

35 第3章 实现交通净零排放的关键举措

- 35 传统交通政策措施
- 36 补充手段：碳吸收与市场机制

41 第4章 未来交通净零排放的对策建议

- 42 近期（至2025年）
- 42 中远期（至2050年）

44 参考文献

45 注释

图目录

图 1	交通排放信息比较	3
图 2	城市交通排放占比情况	3
图 3	北京市六环内全天各方式出行时耗以及出行平均距离	4
图 4	机动车道路基础设施及私人小汽车增长速度	6
图 5	路径分析总体技术路线	10
图 6	情景设置示例	12
图 7	30 个发达国家 2017 年人口和人均 GDP 水平	14
图 8	武汉市 2008—2018 年货物运输平均运距变化趋势	16
图 9	武汉市汽车保有量预测	18
图 10	武汉汽车保有量 Gompertz 模型预测与实际对比图	19
图 11	1983-2017 年美国家庭出行调查	20
图 12	2004-2018 年北京市居民平均百户摩托车保有量	21
图 13	乘用车燃油经济性（百公里油耗）的年度变化	24
图 14	中国交通运输业能源结构历年变化	26
图 15	2005 年和 2012 年交通能源消费结构对比	27
图 16	对策建议示意图	41

表目录

表 1	国家基本信息比较	2
表 2	我国城市道路面积与私人小汽车保有量的对比	5
表 3	主要宏观参数	13
表 4	Gompertz模型线性拟合结果	18
表 5	不同保有量数值下的未来汽车保有量预测	19
表 6	道路机动车年均行驶里程	19
表 7	北京市摩托车管理规定演变	20
表 8	武汉市货运结构示例	22
表 9	传统燃油车的节能潜力（至2030年）	23
表 10	主要国家和地区汽车燃料消耗量标准目标对比（L/100km）	25
表 11	航空运输五年平均单位周转量油耗下降率	26
表 12	天然气消费占比发展趋势	28
表 13	电力排放因子参数参考值	29
表 14	生物航油占比参考值	30
表 15	氢能创新路线图	31
表 16	广州市氢能源占交通行业能源消费量比重参考值	32
表 17	英国交通部道路交通零排放战略	36
表 18	交通净零排放措施潜力评估	37



执行摘要

主要结论

- 随着城市化进程的加快及经济结构的转型升级，交通行业会成为城市中温室气体排放增长最快的行业。在气候变化、空气污染、城市拥堵等多重压力下，城市的交通行业也应尽早实现温室气体净零排放，助力《巴黎协定》目标的达成。
- 城市应首先建立精细化的碳排放核算体系，开展科学的路径分析研究。本文基于在多个城市开展交通行业排放路径分析的经验，总结整理了研究方法学，并对情景及参数设置提供了具体的建议，以供城市管理部门参考。
- 为了更好地帮助城市开展交通净零排放分析，本文还识别了交通行业主要的节能减排政策措施对实现净零排放的贡献程度。减排潜力较高的政策措施为采用新能源、发展多式联运、推广节能技术、提升燃料品质。
- 采用新能源、提升燃料品质等措施均需要行业整体的技术突破和政策支持，因此通过对比可以发现，行业主导的政策措施的减排潜力普遍高于城市政府主导的本地化措施的减排潜力。
- 虽然交通行业实现净零排放存在着极大的挑战，但城市应在近期从各类交通方式的能效提升、城市内以及城市间的运输结构调整入手，并在中远期大力推广电动化交通工具、发展远距离运输可应用的零排放燃料，同时辅以碳吸收手段，最终实现交通领域净零排放这一中长期愿景。

背景

《巴黎协定》于2016年11月正式生效，其中提出全球各国应共同努力确保将本世纪全球平均温升控制在工业化水平之上2°C以内并争取控制在1.5°C以内。根据IPCC 2018年10月最新发布的1.5°C特别报告¹，如果温升控制在2°C左右，2075年前要实现全球二氧化碳净零排放；如果要将温升控制在1.5°C，则需要在2050年实现全球二氧化碳净零排放。然而，基于对现有国家减排目标的评估，按照现有政策发展将无法实现将温升控制在1.5°C以内的目标。因此，各国需要不断强化其气候变化行动。

城市作为人类的居住地，贡献了全球70%的温室气体排放，是控制人为温室气体排放的关键主体。随着城市经济结构不断调整与优化、第三产业的大力发展、城市化进程不断加快，以及跨区域合作交流需求的日益增长，交通行业会成为城市中温室气体排放增长最快的行业，同时也将带来交通拥堵、空气污染等其他愈发严重及紧迫的问题。为了保持高效的运输水平、营造清洁的城市环境，城市不应仅局限于排放达峰这一目标，还应该关注交通发展的可持续性，力争在中长期内早日实现交通领域的净零排放，全面支持全球应对气候变化。

关于报告

近来关注交通领域低碳发展的研究越来越多，世界资源研究所（WRI）也开展了多项研究，撰写了《城市交通大气污染物与温室气体协同控制技术指南》和《中国道路交通2050年“净零”排放路径》等研究报告，并帮助多个城市开展了交通行业排放路径的分析。本研究在既往研究的基础上，主要针对城市交通²未来排放路径的分析方法提炼出共同的经验与思路，从而为中国城市进行交通低碳发展管理提供研究方法学及政策制定的参考信息。特别地，本研究不仅关注达峰，更关注达峰以后的中长期目标，以城市实现整体交通净零排放为出发点，结合路径分析的研究思路，探讨与识别实现交通深度减排、净零排放的契机，并提出实现城市交通净零排放的关键举措，从而也更有效地为城市设置相关情景与参数提供指导，探索出净零排放的路径。

本套分析思路是世界资源研究所在多个城市实践经验的基础上总结而来，主要参考了《武汉市交通碳排放达峰路径研究》³、《成都市交通低碳发展路径研究》、《广州市交通运输领域低碳发展路径研究》⁴等，具体介绍了如何从城市层面分析交通领域碳排放路径以及减排措施。整套方法包括边界设定、历史排放计算（即清单编制，本文未详细介绍，具体参考《城市交通大气污染物与温室气体协同控制技术

指南》、《武汉市交通碳排放达峰路径研究》等）、情景设置、参数设置、未来变化预测等，并在研究方法的步骤、参数的参考值方面提供了具体的建议。

关键分析

■ 总结路径分析方法

城市交通碳排放路径分析的总体技术路线如图I所示。为了更加系统地全面地分析交通领域，本套方法结合了常用的计算交通排放的ASIF分析框架，围绕交通需求（Activity）、出行结构（Structure）、出行方式的能源强度（Intensity）和燃料的碳排放强度（Fuel）四个部分，分析各部分中不同交通管理政策及措施对交通排放的影响。对于未来排放的预测方法，从与城市的合作经验来看，城市最常用的是采用LEAP模型（Long-range Energy Alternatives Planning System）以自下而上的方法进行能源消耗和排放的测算。因此，本研究也主要基于LEAP模型的思路总结未来排放的测算方法，提供情景搭建和关键参数设置的思路与经验，方便城市管理部门直接借鉴利用。LEAP模型的情景设置中主要应用了探索性预测方法，即基于不同的政策、技术发展情况得到不同的排放路径，但在个别情景中如果已有清晰、明确的目标，则可结合规范性预测方法共同使用。

本路径分析方法主要针对排放产生阶段的测算（包括尾气直接排放及电力消耗的间接排放）。虽然如果不考虑碳吸收技术，交通排放产生阶段较难实现零排放，但鼓励城市在交通行业的前端排放阶段实现深度脱碳、尽可能接近零排放，为净零排放愿景作出贡献。

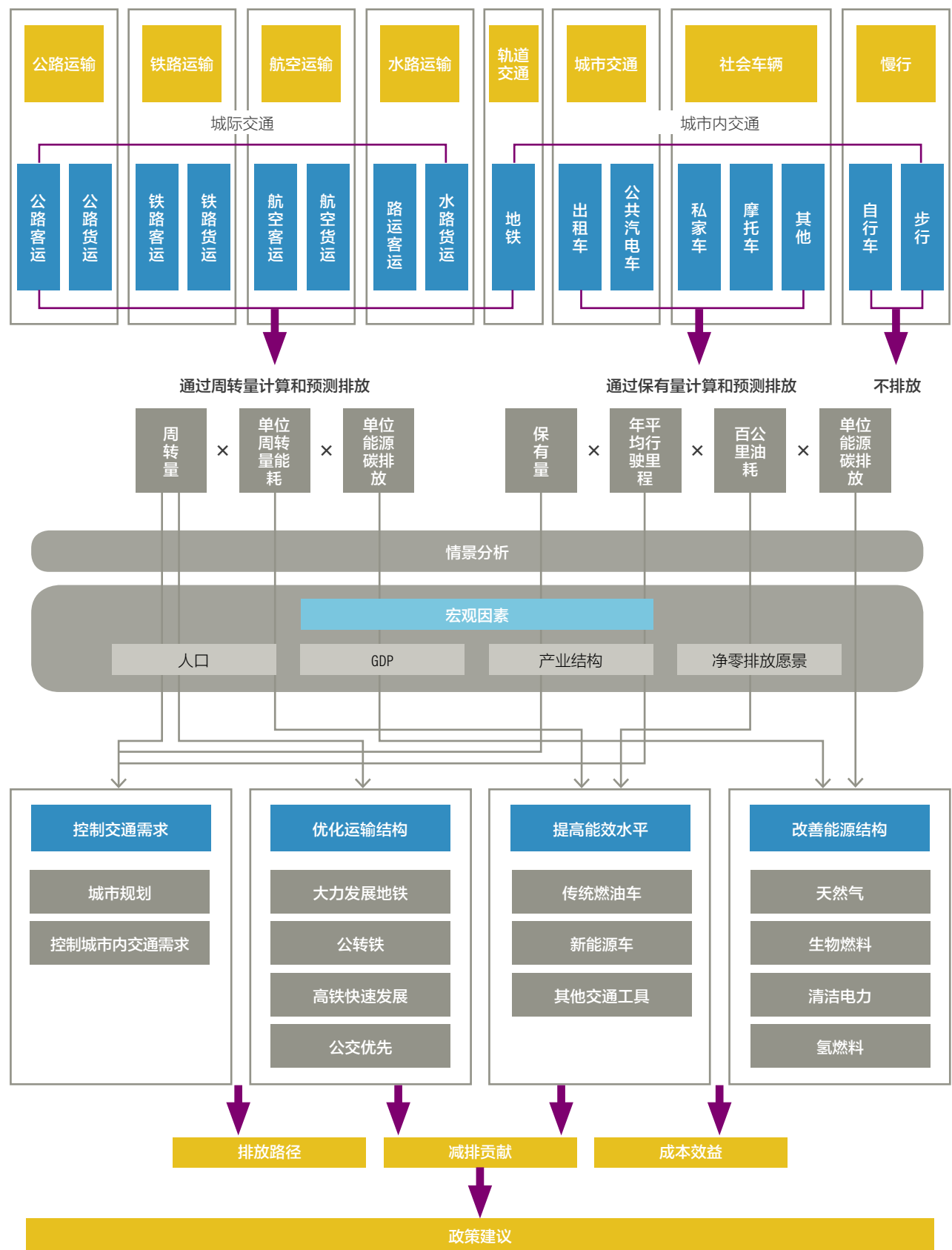
■ 提出关键举措

为了更好地帮助城市开展交通净零排放分析，本文还基于国内外交通行业的主流研究及作者前期相关研究的经验，汇总整理了交通行业主要的节能减排政策措施，识别其对实现净零排放的贡献程度，并提供了各项措施的减排效果、时间周期、管辖权等信息。城市管理部门在基于ASIF分析框架探索净零排放路线图时可加强或减弱有关措施的实施强度，并相应调整关键参数的设置。

根据研究，减排潜力较高的政策措施为采用新能源、发展多式联运、推广节能技术、提升燃料品质。其次，合理开展城市规划、优化货运运输（如货运甩挂技术等）、公交优先措施、设置低碳标准等都将起到一定的作用。

同时可以发现，行业主导的政策措施的减排潜力普遍高于城市政府主导的本地化措施的减排潜力。例如，节能技

图 I | 路径分析总体技术路线



术、新能源、燃料品质均有赖于交通行业的整体技术性突破，由行业协会、行业研究院所主导，不受地域限制；而城市政府主导的政策措施则主要面向城市自身发展方向的转变，如城市规划、交通需求管理政策。因此，城市在开展路径分析时，应在力争实现净零排放的情景中积极推进减排潜力大的措施，并参考行业发展的最先进水平设置相关参数。

另外，城市在实现交通净零排放的道路上，除了要依赖以上交通行业的传统减排措施，也需要与其他创新手段（包括碳吸收技术与市场机制）相结合，以保证消除余量排放。

建议

本研究提出了城市实现交通领域净零排放的政策建议，如图II所示：

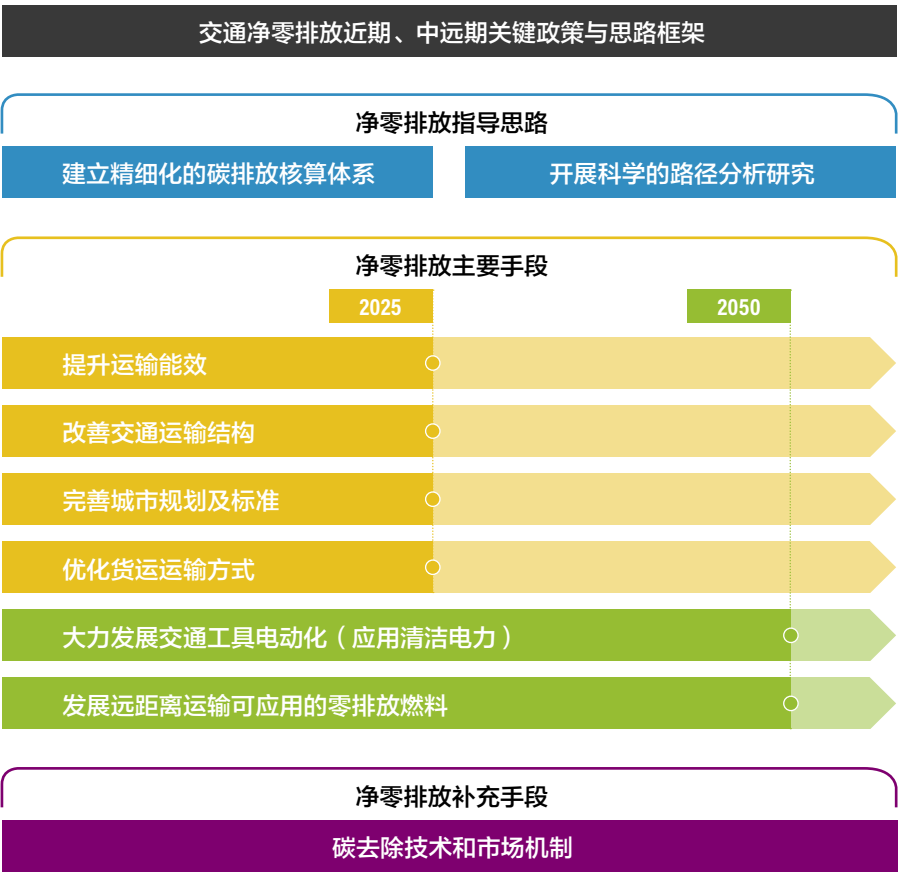
近期内，城市应首先加强基础能力建设，建立精细化的

碳排放核算体系，开展科学的路径分析研究，为实现交通领域净零排放目标奠定重要的理论基础。

在此基础上，城市应以政策类措施为导向，结合相关行业技术的研发，**从提升各类交通方式的能效、调整城市内以及城市间的运输结构入手**，尤以发展新能源交通工具、推广货运多式联运、倡导市内公交优先、制定合理的城市规划和低碳交通标准为主攻方向。同时，城市应当提出调整能源结构的设想，制定初步方案和目标，为后续的结构优化工作提供政策导向。

中远期来看，城市应通过进一步制定并落实切实可行的具体措施，实现能源结构的优化、不同清洁能源的搭配使用，即主要为**大力推广电动化交通工具、发展远距离运输可应用的零排放燃料**，以及结合利用碳吸收手段，从而使得交通领域的各类运输方式真正达到净零排放。

图 II | 政策建议







EXECUTIVE SUMMARY

Highlights

- In the process of urbanization and economic structures upgrading, the transportation sector will show the fastest growth in greenhouse gas emissions. The pressure of climate change, air pollution and urban congestion should be sufficient reason to push cities to achieve net-zero emissions of greenhouse gases in the transportation sector as outlined in the Paris Agreement.
- Cities should begin by setting up refined systems to calculate carbon emissions and researching pathway analysis options. Referencing the experiences of several cities in developing emission pathways, this paper outlines research methodology and provides specific suggestions for scenario and parameter settings for other cities to reference.
- To better assist cities to analyze net-zero emissions in the transportation sector, this paper identifies the contribution of major energy saving and emissions reduction policies and measures in the transportation sector working toward the goal of net-zero emissions. Policies and measures with the highest potential for reducing emissions include the adoption of new energy sources, multimodal freight transport, energy-saving technologies and improved fuel quality.
- Measures such as applying new energy sources and improved fuel quality require industry-wide technological breakthroughs and policy supports. This study finds that industry-led policies have greater potential in reducing emissions than local government-led policies.
- Despite the challenges faced by the transportation sector in achieving net-zero emissions, in the short-term cities can start by improving energy efficiency in all modes of transport and upgrading urban and intercity transportation structure. In the mid- and long-term, cities should vigorously promote the electrification of vehicles and work on developing zero-emission fuel for long-distance transportation. At the same time, cities should implement carbon removal measures to achieve net-zero emissions in transportation sector.

Background

The Paris Agreement came into force in November 2016 and proposed the countries of the world work together to ensure that temperature increases are kept below 2°C and ideally below 1.5°C. According to the latest Special Report on Global Warming of 1.5°C issued by the IPCC in October 2018¹, if temperature increases are kept within 2°C, net-zero global carbon dioxide emissions need to be achieved before 2075; if temperature increases are kept within 1.5°C degrees, net-zero emissions have to be reached by 2050. However, current national emission reduction goals and existing policies make it impossible to keep temperature increases below 1.5°C. Therefore, the current climate measures need to be strengthened drastically.

As major population centers, cities contribute to 70% of global greenhouse gas emissions and are the main focus in controlling man-made greenhouse gas emissions. With the continued adjustment and improvement of urban economic structure, strong growth in tertiary industries and rapid urbanization as well as expanded inter-regional cooperation and exchange, the transportation sector will become the fastest growing contributor to greenhouse gases in cities and bring with it additional problems including urban traffic congestion, air pollution and other pressing issues. To streamline transportation systems and clean up urban environments, cities should not only focus on peak emission levels, but also pay attention to sustainability of transportation development, to achieve net-zero emissions in the mid- and long-term, while fully supporting global efforts to combat climate change.

About this report

An increasing amount of research focuses on low-carbon development in transportation. The World Resources Institute (WRI) has produced a number of research reports, including Technical Guidance for Coordinated Control of Urban Traffic Air Pollutants and Greenhouse Gases, Toward Net Zero Emissions in the Road Transport Sector in China and assisted several cities to develop transportation emissions pathways. Building on previous studies, this paper extracts common methodology in the analysis of urban transportation² emission pathways to provide reference information for Chinese cities to conduct

similar research and formulate policies on low-carbon transportation. In particular, this paper identifies ways to ensure transportation emissions peaks in the short-term as well as deep decarbonization and net-zero emissions in transportation in the mid- and long-term. The paper also proposes key measures to achieve the net-zero emissions in the transportation sector and provides guidance on setting up scenarios and parameters for emissions pathway analysis.

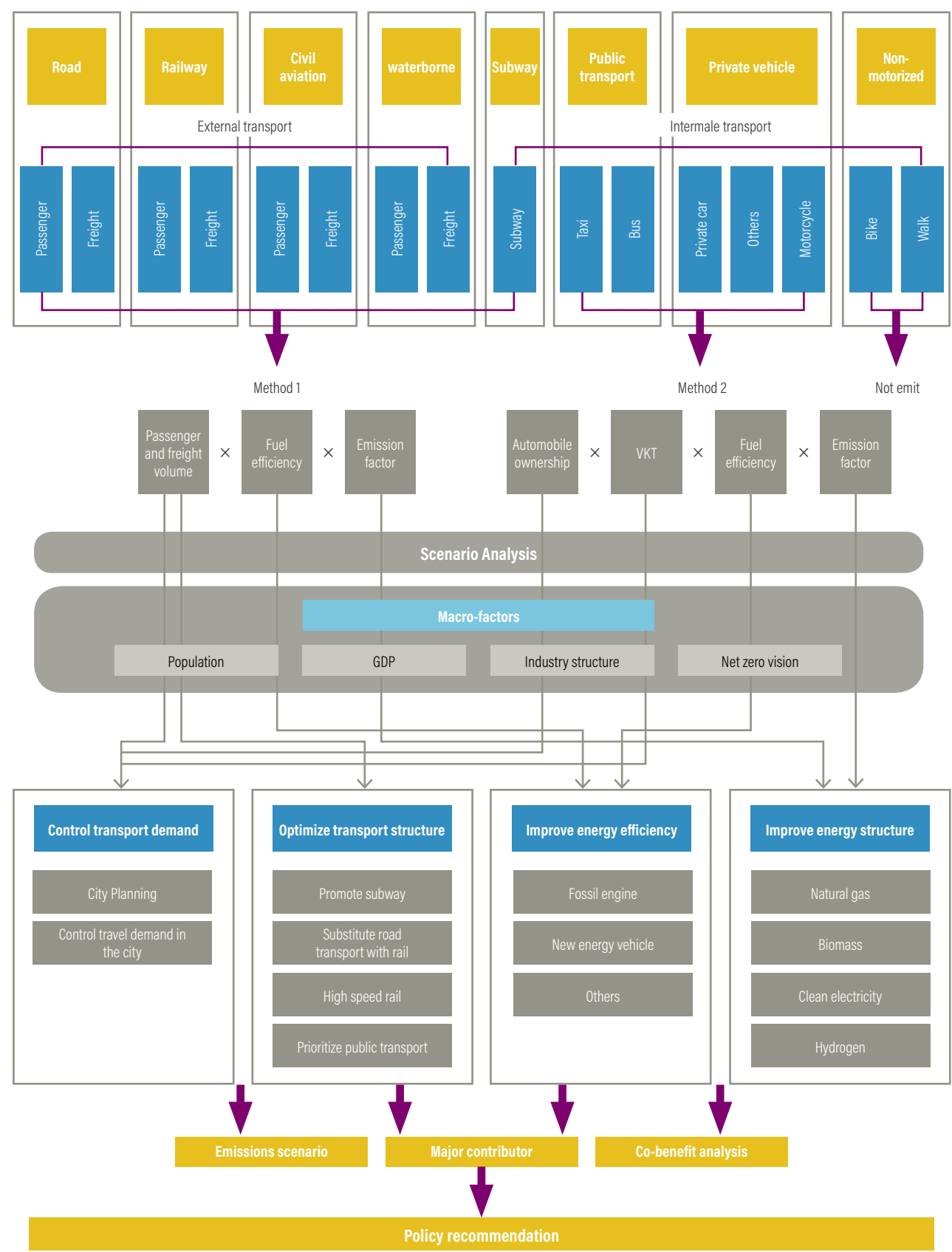
The analytical framework proposed in this paper outlines how to develop city-level carbon emission pathways and emissions reduction measures for the transportation sector based on previous WRI city-based research projects, including the Wuhan Transport Sector Carbon Emissions Roadmap Study³, the Study on the Low Carbon Development Pathway of Chengdu's Transportation Sector, the Study on the Low Carbon Development Pathway of Guangzhou's Transportation⁴, etc. Methodology includes boundary setting, historical emission accounting (i.e. inventory preparation⁵), scenario setting, parameter setting and future projections. Suggestions for research steps and reference values of parameters are also provided

Key findings

Summary of pathway analysis methodology

The overall methodology framework for analyzing carbon emissions pathways for transportation sector in cities is shown in Figure I, which combines the commonly used ASIF analysis framework to estimate the impact of reductions in transportation emissions in four major areas: transportation demand (Activity), travel structure (Structure), energy intensity of different modes of transport (Intensity) and the carbon emission intensity of fuels (Fuel). In projecting future emissions, the most commonly used method, based on experience in city-based projects, is the LEAP model (Long-Range Energy Alternatives Planning System), which adopts a bottom-up approach to help measure energy consumption and emissions. Therefore, this paper also provides reference for scenario building and key parameter settings in accordance with the methodology of the LEAP model. Scenario settings in the LEAP model mainly utilize the Exploratory Forecasting method, i.e., projecting emission pathways based on different policies and technology applications. The Normative Forecasting method may also be applied for specific objectives in certain scenario analyses.

Figure I | Overall Analytical Framework



This method focuses specifically on CO₂ emissions, including direct exhaust emissions and indirect emissions from electricity consumption. While it is difficult to achieve complete net-zero emissions in the carbon generation stage of transportation (if not considering carbon removal), cities still need to take concerted action to achieve deep decarbonization of direct and indirect transportation emissions and approach net-zero emissions.

Proposed key actions

In analyzing net-zero emissions pathways at the city level, this paper summarizes major energy-saving and emission reduction policies and measures from mainstream studies and previous research experience focusing on the transportation sector to identify the contributions of different measures to net-zero emissions efforts and provide information on the effectiveness, time span and administrative structure of each measure. In exploring net-zero emissions roadmaps using the ASIF analysis framework, cities can increase or decrease implementation intensity of relevant measures and adjust key parameters accordingly.

This study shows that adopting new energy sources, utilizing multimodal freight transport, promoting energy-saving technology and improving fuel quality have the highest potential to reduce emissions. It is also found that reasonable urban planning strategies, improvements to freight transport (drop and pull transport, etc.), prioritizing

public transport and setting low-carbon fuel standards also play an important role.

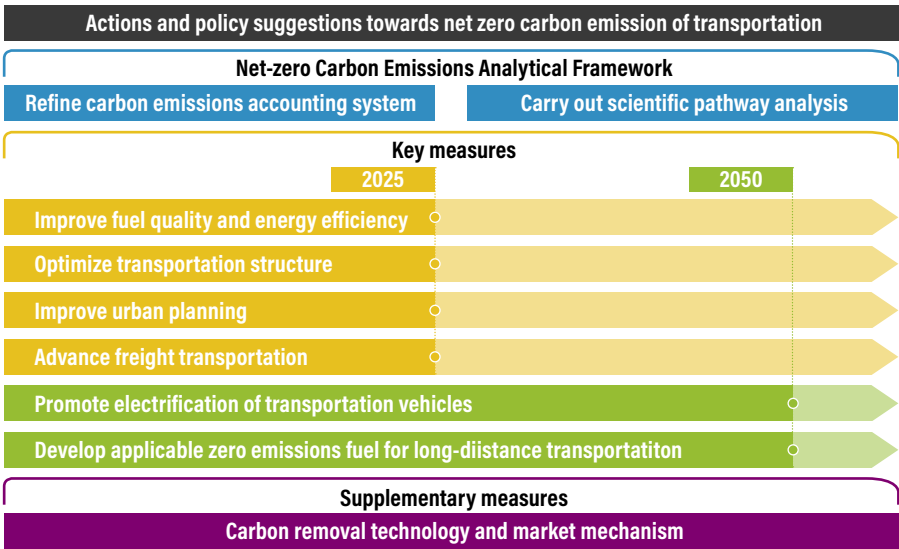
Meanwhile, it is also found that industry-led policies generally have a greater potential to reduce emissions than local government-led policies. Policies, such as energy-saving technology, developing new energy sources and improving fuel quality largely rely on technological breakthroughs, which are usually led by industry associations, industry research institutes and enterprises, regardless of region. Policies and measures led by local governments usually focus on urban planning and traffic demand management of a particular city. Therefore, when conducting pathway analysis, cities should prioritize measures with greater potential for emissions reduction and set parameters that meet the highest standards for net-zero emissions in the transportation sector.

To achieve net-zero emissions in the transportation sector, cities should not rely solely on traditional emission reduction measures. They should also consider other innovative means such as carbon removal technology and market-based mechanisms to ensure the elimination of residual emissions.

Recommendations

This paper puts forward the following policy recommendations to achieve net-zero emissions in urban transportation:

Figure II | Policy Recommendation Framework



In the near term, cities should begin by improving basic capabilities, creating a refined system for calculating carbon emissions, and carrying out scientific pathway analysis and related research so as to lay an important theoretical foundation for achieving net-zero emissions in the field of transportation.

On this basis, cities should next enforce relevant policies and industry R&D in related technologies to **increase the energy efficiency of all modes of transportation and upgrade both urban and intercity transport structures.** Specifically, cities should focus on developing new-energy vehicles, promoting multimodal freight transport, prioritizing urban public transportation and formulating reasonable standards for

urban planning and low-carbon transportation. Meanwhile, adjustments should be made in energy structures, setting initial plans and objectives to provide policy guidance for future optimization of transportation structures.

In the mid- and long-term, cities should focus mainly on optimizing energy structures and matching different clean energy options with future transportation options, i.e., **vigorously promoting the electrification of transportation vehicles, developing applicable zero-emission fuels for long-distance transportation** and integrating carbon removal measures to work toward complete net-zero emissions for all modes of transportation.





第一章

交通净零排放

1.1 净零排放的意义

《巴黎协定》于2016年11月正式生效，其中第二条提出全球各国应共同努力确保将本世纪全球平均温升控制在工业化水平之上2°C以内的目标，并争取控制在1.5°C以内。然而，根据气候行动追踪组织（Climate Action Tracker）测算，各国所提出的气候变化行动并无法保证目标的实现，仅能将升温控制在3.4°C左右（Climate Action Tracker, 2017）。因此，各国需要不断强化其气候变化行动，在交通、建筑、工业等领域形成快速和大规模的转型，采取更加有力的行动方案，同时需要各个国家、地区、企业/行业的共同努力。根据《巴黎协定》第四条，为了实现升温目标，各缔约方需在“本世纪下半叶实现温室气体的人为排放源与碳吸收汇之间的平衡”（UNFCCC, 2015）。国际能源署（以下简称“IEA”）研究表明，为了确保升温2°C以内目标的实现，各国通过更加强化的行动，可以在2060年以前实现二氧化碳（CO₂）的“净零排放”（IEA, 2017）。

净零排放意味着温室气体的产生被生态系统自然吸收消化，并辅以碳捕获与封存技术的应用，从而实现大气中温室气体的净存量维持在“零排放”这一稳定的水平。另外，国际上也存在一种碳补偿的方式，即通过资金帮助其他国家进行减排，实现本国排放的替代，从而保证本国名义上的净零排放，实现碳中和。由于此项方式在国际上引起了较大争议，因此不纳入本文研究考虑范围。同时，与净零排放相近的概念还有“近零排放”和“零排放”，近零排放指最

终温室气体净存量大幅减少并接近于零，而零排放则指在不考虑气体吸收的前提下，各排放源直接排放减少为零。可以看到，零排放的要求最高，其次为净零排放，近零排放要求最低，在实现净零排放的过程中即可实现。

根据《美国2050年减碳战略》，实现温室气体的有效减排，主要依靠三方面的措施：一是减少能源（尤其是化石能源）的使用量，提升能源使用效率，加大利用非化石能源及清洁能源的比例；二是提升森林、土地和除碳技术的碳捕获能力；三是减少非二氧化碳温室气体的排放（美国国务院，2016）。IEA展望了2060年全球二氧化碳净零排放的途径，其中能源使用效率提升和可再生能源贡献75%的减排潜力，碳捕获与封存技术贡献14%，核能贡献6%，燃料转换贡献5%（IEA, 2017）。综上，减少能源使用量、提高可再生能源的使用率、碳捕获与封存是实现净零排放的主要驱动力。

目前，一些国家、地区或城市已经采取了行动。欧洲一直以来是气候变化行动的积极推动者，欧盟于2019年12月发布“欧洲绿色新政”并提出到2050年成为全球首个碳中和的大洲；瑞典于2017年提出到2045年实现净零排放的目标，并形成《气候法案》，于2018年正式生效，从而以法律的形式保障目标的实现；挪威于2016年提出到2030年实现碳中和的目标，提前20年完成原先设定的2050年目标；哥本哈根、雷克雅未克等城市也出台了净零排放目标和实施方案；美国作为全球第二大温室气体排放国，虽然未提出净零排放目标，但也曾于奥巴马时期向《联合国

表 1 | 国家基本信息比较

国家	GDP ⁶ (十亿美元) 2018年	人口 ⁷ (百万) 2018年	能源消耗 二氧化碳排放 (百万吨) 2018年	人均二氧化碳 排放 (吨/人) 2018年	碳排放目标
中国	13,407.40	1,395.4	9,048.4 ⁸ (2017年)	6.48	NDC ⁹ 提出相较于2005年，单位GDP二氧化碳排放到2020年下降40%~45%，到2030年下降60%~65%
美国	20,494.05	327.4	5,269 ¹⁰	16.09	奥巴马政府时期：相较于2005年，温室气体排放到2020年下降17%，到2025年下降26%~28%，到2050年下降80% ¹¹
瑞典	551.14	10.2	44.8 ¹²	4.39	2045年实现净零排放；相较于1990年，温室气体排放到2030年下降63%，到2040年下降75%，到2045年下降85%
挪威	434.94	5.3	35.5 ¹³	6.70	2030年实现碳中和；相较于1990年，温室气体排放到2030年下降40% ¹⁴

数据来源：世界银行、国际能源署、Statista、世界资源研究所等



气候变化框架公约（UNFCCC）秘书处提交了到2050年相较于2005年温室气体排放下降80%的目标，力争最大程度上减少温室气体排放。表1列示了中国与全球第二大温室气体排放国美国，以及已提出净零排放目标的瑞典、挪威有关温室气体排放信息的比较。可以看到，中国能源活动所导致的人均碳排放远低于美国，而高于瑞典，与挪威接近，而美国、瑞典、挪威均已提出较激进的控温目标。因此，中国需进一步提升其控温目标。虽然在目前的国情下短期甚至中期内难以实现净零排放，但仍应向实现净零排放这一远期目标努力迈进。

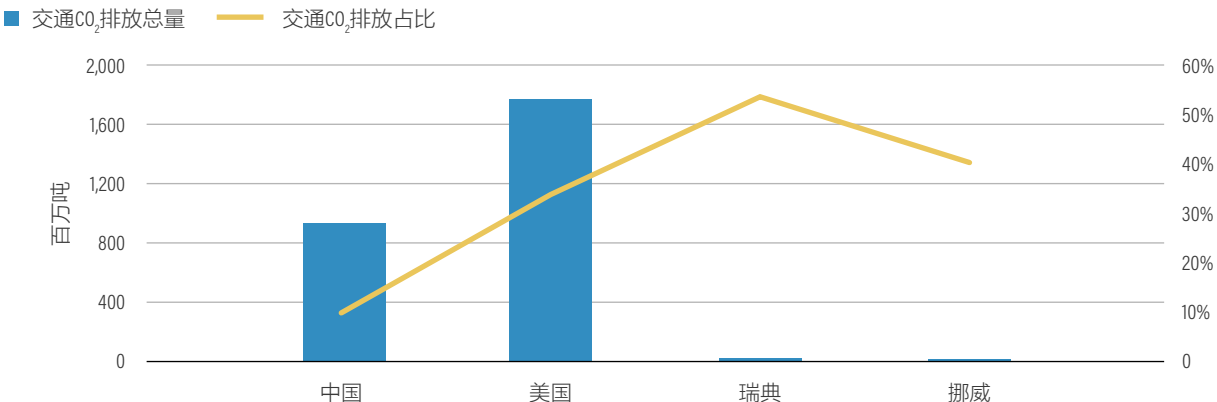
1.2 城市交通领域的重要性

实现净零排放需要各行各业的配合。温室气体排放清单的构成中，固定能源活动的排放往往是主要贡献者，交通排放排第二。根据世界银行2014年的数据（见图1），多数国

家交通所产生的碳排放占能源活动总排放的20%以上，如瑞典高达50%以上。中国交通排放占比远低于此水平，除统计口径差异的原因外，主要是因为中国仍处于高速发展阶段，形成了以固定能源排放为主的排放结构。虽然中国的交通排放占比仅为10%左右，但近年来随着产业结构的转型升级，第三产业占比逐步增加，交通排放占比也随之上升。而且由于中国排放总量居全球之首，其交通排放甚至高于很多国家的总排放，因此中国交通行业对温室气体减排的影响重大。

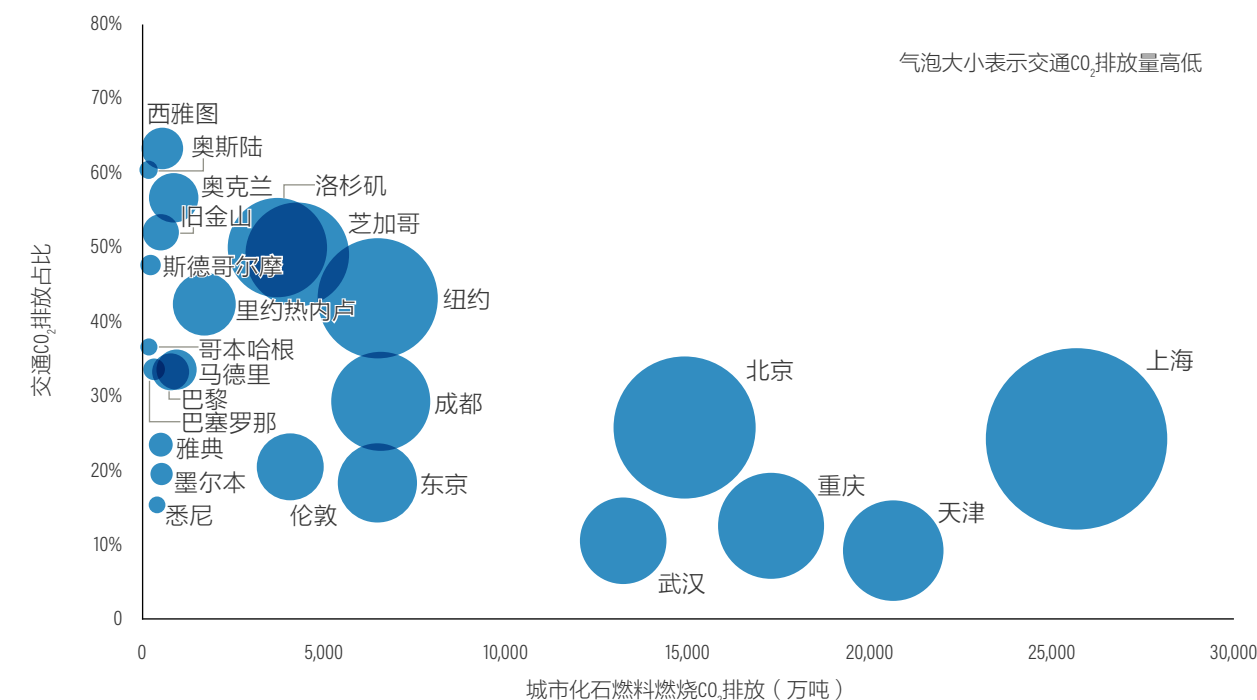
从城市开展的层面来看，交通领域排放的影响则更加显著，占据了较高的比例。根据世界资源研究所整理的国内外主要城市交通排放占比情况（见图2），大部分城市在20%至60%之间不等，一些发达城市交通排放占比高达60%多，例如奥斯陆、西雅图。中国城市中，北京、上海交通排放占比为25%左右，而成都作为准一线城市，其交通排放达到了城市总排放的30%左右，这与其私家车保有量近几年迅速增长密不可分。

图 1 | 交通排放信息比较



数据来源：交通排放数据均为2014年数据，且仅为交通燃料消耗的直接排放。中国数据根据世界资源研究所测算，其余国家交通二氧化碳排放占比来源于世界银行^⑤并基于此测算交通二氧化碳排放总量数据。

图 2 | 城市交通排放占比情况



图片来源：世界资源研究所，《武汉市交通碳排放达峰路径研究》

随着城市经济结构调整与优化、第三产业大力发展、城市化进程不断加快，以及跨区域合作交流需求日益增长，交通行业会成为城市温室气体排放中增长最快的行业（Lefevre, B., 2014）。具体表现在：

- 经济及人口增长导致机动车数量增长，城市交通消费支出比例逐年上升，城市出行总量增加

近年来，我国的城镇化水平迅速发展，国家统计局最新发布的数据显示，2018年末，我国城镇常住人口83137万人，比上年末增加1790万人；城镇人口占总人口比重（城镇化率）为59.58%，比上年末提高1.06%¹⁶。

“十三五”规划提出，到2020年，中国常住人口城镇化率要达到60%左右。随着经济的发展和城市化水平的提高，城市的总出行量及机动车需求量也会随之增高。截至2018年年底，全国汽车保有量达2.4亿辆，比2017年增加2285万辆，增长10.51%。私家车持续快速增长，2018年保有量达1.89亿辆，近五年年均增长1952万辆。全国有61个城市的汽车保有量超过100万辆¹⁷。

- 城市无序蔓延，小汽车出行成本较低，导致人们出行距离变长

利用滴滴出行的数据¹⁸对中国一百多个人口量及出行数量较多的城市进行分析，测算城市的出行半径（城市

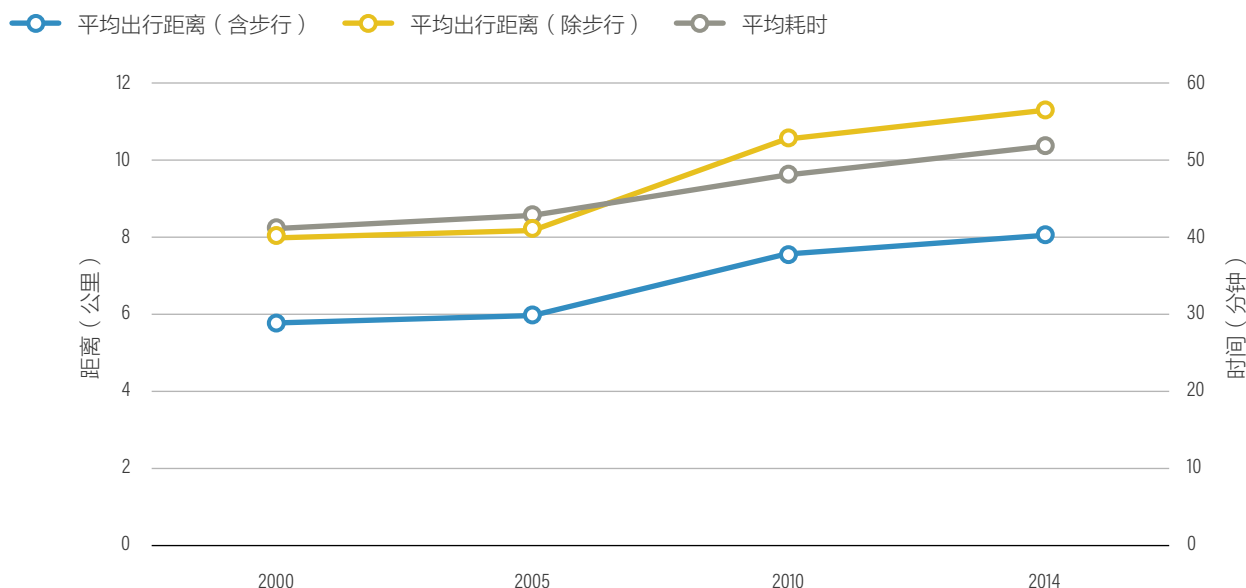
出行半径即以市中心为原点，超过90%的出行起点或终点都分布在以此为半径的圆圈之内）。数据显示，主要大城市如北京、上海、深圳的城市出行半径已超20公里。以北京为例，城市出行半径已经增长至31.7公里，几乎覆盖整个六环城区。北京市民的平均出行距离也日益增加，据第五次北京市交通综合调查总报告，北京市民平均出行耗时52分钟，平均出行距离增至11.3公里，如图3所示。

- 城市内物流配送、城市间货物运输需求日益增长，货运排放占比显著加大

城市的生存和发展、人们的正常生活离不开货物运输，尤其是随着互联网经济的蓬勃发展，城市内物流配送越发重要。相应地，城市货物运输排放也显著增长，很多城市的货运排放已成为其主要的排放源。例如，广州市交通领域二氧化碳排放最大的贡献者就是货运交通¹⁹，且排放占比逐年增长。根据《广州市交通运输领域低碳发展路径研究》²⁰，货运交通排放占全市交通排放的比例已由2005年的48%增长至2016年的60%，占据绝对大头。

因此，随着经济、人口的增长和城市的扩张，城市交通需求量及活动水平还将不断增长。与此同时，城市交通还面临着其他愈发严重及紧迫的问题。

图3 | 北京市六环内全天各方式出行时耗以及出行平均距离





■ 城市出行结构与基础设施建设不匹配

城市化及城市交通的机动化一方面成为经济增长的象征，另一方面也给城市基础设施建设带来了巨大的压力。在过去很长一段时间，保证机动车的路权是中国城市发展的主导策略，各城市均努力增加道路面积，以满足机动车需求。然而城市道路的供给与发展受多方面的制约，譬如土地资源和财政等因素，其增速远低于目前中国城市的机动车增长率及需求。2007~2017年，全国城市道路面积年均复合增速约为7%，但机动车保有量的增速为其3倍左右。目前城市道路设施建设也已进入相对饱和阶段（增速自2010年起逐年递减），照此基础发展，城市道路的供给将

无法满足小汽车及日渐兴起的慢行交通需求，不合理的出行结构会加剧城市排放、拥堵等问题。我国城市道路面积与私人小汽车保有量的对比见表2，机动车道路基础设施及私人小汽车增长速度如图4所示。

■ 城市交通拥堵问题严峻，小汽车使用外部成本过高

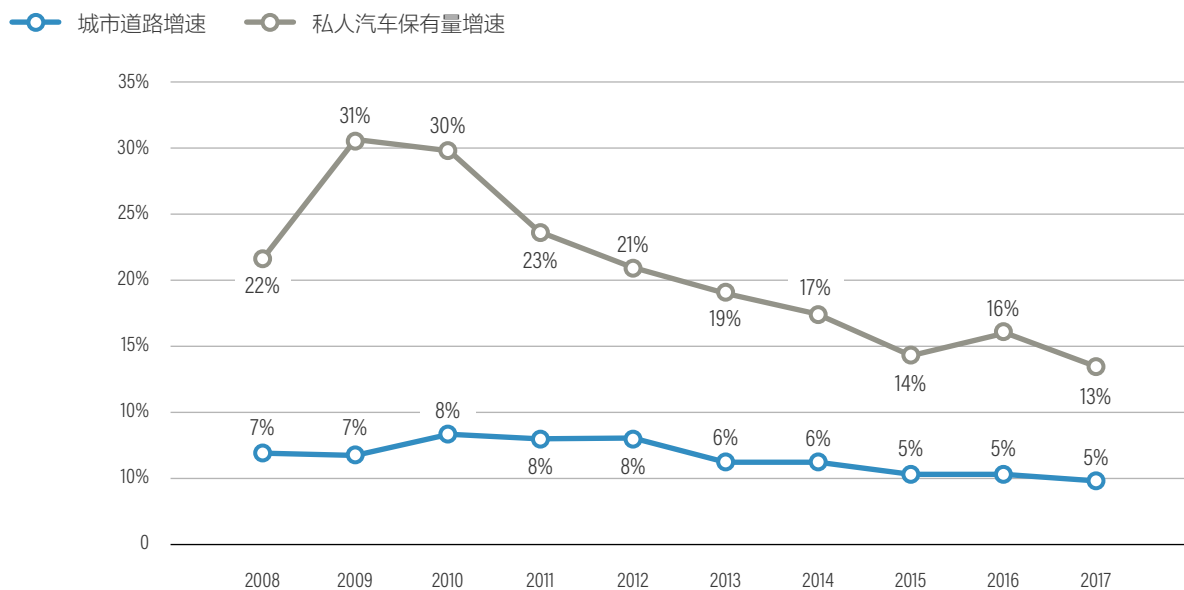
小汽车出行产生的外部成本过高，城市交通的拥堵水平增加以及出行效率的低下导致不断上涨的社会成本。高德地图发布的《2018年中国主要城市交通分析报告》中总结，全国只有约四分之一（26%）的城市不受通勤拥堵的困扰。高德地图根据拥堵延时指数对其监测的50个城市开展排序分析，第一名为北京，第八名为上海，但是即使是

表 2 | 我国城市道路面积与私人小汽车保有量的对比

年份（年）	城市道路面积（亿平方米）	私人小汽车保有量（万辆）
2007	42.37	2876.22
2008	45.24	3501.39
2009	48.19	4574.91
2010	52.13	5938.71
2011	56.25	7326.79
2012	60.74	8838.60
2013	64.42	10501.68
2014	68.30	12339.37
2015	71.77	14099.10
2016	75.38	16330.22
2017	78.89	18515.11

数据来源：世界银行、国际能源署、Statista、世界资源研究所等

图 4 | 机动车道路基础设施及私人小汽车增长速度



数据来源：国家统计局

排名第八的上海，其近乎一半（45.8%）的通勤时长也是拥堵导致的。

加拿大Moving Forward的研究显示²¹，小汽车用户支付的道路使用费用远低于其成本。小汽车用户每行驶5公里，将支付6.47美元的直接成本，而其引发的外部成本为2.78美元，然而公交车用户每行驶5公里的成本为8美元，引发的外部成本仅为0.38美元。过低的小汽车收费会变相鼓励小汽车出行，使其他出行群体分担其产生的负外部性成本。

■ 交通行业导致空气污染，燃油标准亟待提升

近年来，城市空气污染受到了越来越多的关注，与民众生活息息相关。越来越多的研究发现城市的空气质量离不开路面交通的影响，例如，原北京市环境保护局2018年对城市细颗粒物来源组分的解析研究中发现，本地排放源占三分之二，且其中移动源占比最高，达45%²²。根据研究，污染主要来自于移动源中的柴油车和汽油车，事实上，汽柴油车排放的黑炭等污染物所产生的温室效应也是非常显著的。因此，提升燃油标准、控制燃油车的污染物排放也是城市交通急需解决的问题。

综上，交通领域是城市温室气体排放中非常重要的领域，控制其温室气体排放，不仅是实现净零排放这一任重

道远的目标必不可少的手段，也能够协同解决诸多“城市病”，如基础设施落后、交通拥堵、空气污染等问题。另一方面，城市也拥有更多的减排潜力和机遇。例如，四川水力资源丰富、电网清洁，同时成都是轨道交通的研发基地，汽车制造业也是其支柱产业之一，随着轨道电气化的发展以及电动汽车的推广，成都是最有可能率先实现净零排放的地区之一。因此，中国城市如果可以因势利导，在发展地方经济的同时进一步管理其交通排放，将会在全球的交通减排行动中起到领军的作用。本文后续研究也将以城市为有力的抓手，梳理交通净零排放路线图。

特别说明的是，本文后续所指的城市交通，除了包括传统意义上的城市市内交通，也包括与城市活动相关的城际交通，即公路运输、铁路运输、航空运输和水路运输。因此，实现交通领域的净零排放离不开各类交通方式的共同努力。虽然铁路运输、航空运输和水路运输可能不在部分城市的管辖范围内，但城市均应该了解和掌握各类交通方式的发展路径，在有必要时积极配合拥有管辖权的城市或部门开展相关工作，尽可能推动不同交通方式之间的协调发展。

1.3 交通净零排放的含义

理解交通领域净零排放，首先应明确交通行业涵盖的范围。交通行业可以从全生命周期的角度理解，即包括交通工具的设计制造、运输服务、后续回收处理等主要阶段，也可以按照温室气体排放清单的编制原则理解，即仅指交通运输服务阶段。由于本文以核算温室气体排放为出发点，因此在后续的研究中，本文所指的交通行业均主要指交通工具的运行使用阶段（具体测算范围详见第二章）。

另一方面，交通行业在能源燃烧阶段主要产生二氧化碳、甲烷、一氧化二氮这三类温室气体，而甲烷和一氧化二氮排放占比非常小。例如，中国2012年温室气体清单中，交通领域甲烷和一氧化二氮排放占比不足1%²³（中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告，2016）。因此，由于交通行业温室气体排放以二氧化碳为主，本研究所涉及的净零排放也主要关注二氧化碳这一气体。

交通净零排放即意味着交通运输使用能源所产生的排放能够实现零排放，或者其产生的排放能够被其他途径所吸收中和。常见的交通减排方式包括改变出行方式以使用零排放的交通工具（如步行、自行车）、选择使用更加清洁能源（如氢燃料电池、可再生能源生产的电力、生物质能源）、

提升能源使用效率（如技术变革提升内燃机效率）等。同时，越来越多服务于交通领域的企业也关注到碳汇层面，如摩拜单车与中国绿化基金会合作，在沙漠化严重的地区植树造林²⁴，进一步增强了该地区的固碳能力；携程网曾在客户在线预订机票时提供积分兑换树苗的机会，以补偿客户在飞行过程中产生的二氧化碳排放²⁵。然而，根据对意大利博尔扎诺市的研究，城市公共绿植每年仅可抵消交通领域所产生二氧化碳排放的0.08%（Russo等，2015）。因此，交通行业的碳吸收领域如果要发挥较大作用，则需要植树造林以外的更多的固碳增汇行动。

为了洞悉交通净零排放的关键驱动力，本文的研究将主要侧重交通排放产生阶段的去碳行为，并简要论述碳吸收层面的减缓措施。事实上，交通行业做到净零排放存在着极大的挑战，尤其是交通运行产生排放的阶段更难以实现零排放。例如，在美国的净零排放研究（Energy Innovation，2019）²⁶中，到2050年交通行业还将产生2.9亿吨的二氧化碳排放，主要集中在远距离的公路货物运输、航空运输和水路运输，而美国最终实现净零排放还需要依靠碳吸收进行中和。因此，城市应力争在交通运行阶段解决远距离运输的排放问题，不断突破技术壁垒，实现深度减排，尽可能接近零排放，同时还需要辅以碳吸收技术，最终实现交通领域净零排放这一中长期愿景。





第二章

交通净零排放 路径分析方法

为了帮助城市系统全面地梳理交通领域的排放路径，本研究将结合路径分析的研究方法，探讨与识别实现交通深度减排、净零排放的契机，以期在城市开展相关研究时提供一定的经验指导。该研究方法主要基于世界资源研究所前期在不同城市开展的路径分析的研究经验，从而总结了适用于各个城市的通用信息。

如前文所述，交通排放产生阶段较难实现净零排放，而本章提供的路径分析方法主要针对排放产生阶段的测算。因此，本章主要侧重于鼓励城市的交通行业在前端排放产生阶段实现深度脱碳，尽可能接近净零排放，为净零排放愿景作出贡献。

2.1 总体技术路线

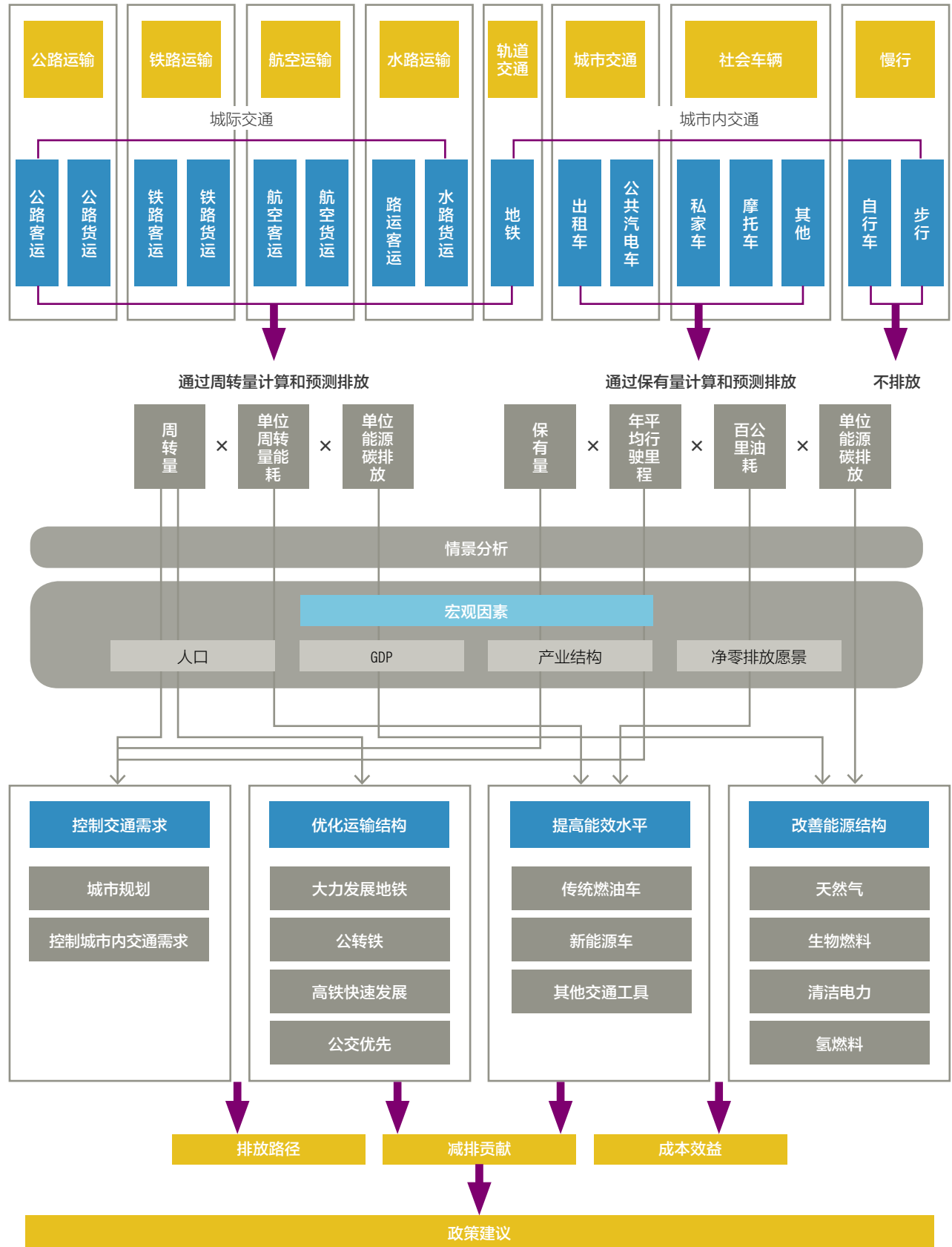
本套方法将介绍如何从城市层面分析交通领域碳排放路径以及减排措施，包括设定边界、计算历史排放、预测未来排放、分析结果和提供政策建议等。这套方法学涵盖了所有交通类型，既包括营运交通，也包括非营运交通，既包括城市内交通，也包括城际交通。根据数据可获得性不同，分别通过周转量和保有量这两类方法计算历史排放²⁷，然后通过设置关键参数预测未来排放。这些关键参数包括人口、GDP、产业结构等宏观因素，以及交通需求、运输结构、能效水平和能源结构等微观指标，主要根据城市总体的减排目标以及为实现全球温升不超过2°C而设置的长期净零排放目标等要求进行设置。综合上述这些数据，可以得到城市交通总体排放路径和分交通类型的排放

路径，并分析得出不同贡献因素的减排贡献，再结成本效益分析等，最终可以为城市提供相应的政策建议。图5展示了总体技术路线。

碳排放测算的基础性内容（如计算方法）已在多份研究报告中涉及，本文将不再赘述，可参考《城市温室气体清单编制与应用的国内外经验》、《武汉市交通碳排放达峰路径研究》、《城市交通大气污染物与温室气体协同控制技术指南》等。然而，针对交通碳排放边界设定的关注与争议往往较多，主要体现在以下几个方面：首先，交通排放源最大的特征是移动性，如何处理跨边界交通排放问题是难点。第二，在城市层面探讨交通减排涉及城市管辖权的问题，城市通常对铁路运输、对外水路运输和空运运输不具有管辖权。第三，低碳和应对气候变化领域的从业人员通常从城市温室气体清单和能源消费的角度，倾向于将所有交通类型涵盖在内；而传统交通领域的从业人员对“城市交通”有非常明确的定义，不建议将铁路运输、水路运输、航空运输包含进来。针对上述问题，往往建议城市从两个尺度来考虑交通碳排放路径：

- 全口径：全口径交通的边界与城市温室气体清单中的交通边界一致，包括公路运输、铁路运输、航空运输、水路运输、非道路（机械）运输。
- 不包含铁路运输、水路运输和航空运输：从城市管辖的角度，不考虑铁路运输、水路运输和航空运输。

图 5 | 路径分析总体技术路线



专栏 1 | 城市交通领域碳排放核算边界

- 城际公路运输、航空运输、水路运输主要通过周转量计算排放，因此数据边界与周转量的统计口径一致。以航空运输为例，周转量统计口径为在本地注册的航空公司相关活动。
- 铁路运输和公路运输的数据边界与周转量统计口径一致。需要特别说明的是，由于铁路运输统计是以线路而非行政区划为单位，计算排放时无法区分城市边界，因此铁路运输相关分析以铁路部门管辖范围为边界。
- 城市内道路交通主要通过保有量计算排放，因此采用属地原则，即在城市内注册的机动车。城市轨道交通的研究边界为城市地铁牵引能耗相关²⁸的排放。
- 对于电动交通工具，虽然本文仅考虑交通工具运行使用阶段的排放，但从全面实现净零排放的角度，应考虑电力消费所产生的间接排放。

专栏 2 | 运输量、吞吐量、周转量的区别

吞吐量是指出发和到达的旅客或货物的数量，一般单位为人次或吨。运输量只计算出发的量，单位也是人次或吨。周转量是用运输量乘以平均运输距离，单位是人公里或吨公里。

由于本文将探讨城市整体交通领域的净零排放路径，因此将以全面性为原则，考虑全口径的排放。

以上整体分析思路中也结合了计算排放的ASIF框架，以便更加系统、全面地分析交通领域的排放。ASIF分析框架最早由国际能源署提出，目前在交通低碳发展领域中广为应用。ASIF框架将交通碳排放分解成四个部分：交通需求（Activity）、出行结构（Structure）、出行方式的能源强度（Intensity）和燃料的碳排放强度（Fuel）。现有交通管理政策与措施也往往能与以上四个部分相对应。本章后续将根据ASIF的四个部分展开，分析各自部分中不同政策及措施干预的结果、对交通排放的影响，提出关键参数的设置思路，探讨未来排放预测的分析方法。

2.2 未来排放路径分析

开展未来预测有多种方法，一般会采用情景分析方法识别不同路径下事物的发展方向。情景分析方法通常有两种模式：探索性预测方法（Exploratory）和规范性预测方法（Normative）。探索性预测方法侧重于对现有政策技术及其未来发展方向进行分析，从而得到不同的路径及目标，而规范性预测方法侧重于明确未来目标、需求和任务，基于此而识别实现未来目标所需要的政策技术组合（方伟等，2017）。在研究过程中，两种模式可以结合应用，也可以单独应用。

在能源及环境领域，学者已基于以上原则开发出了多种模型。从与城市的合作经验来看，城市最常用的是采用LEAP模型（Long-range Energy Alternatives Planning System）以自下而上的方法测算能源消耗和排放。因此在

此导则中，世界资源研究所也基于LEAP模型的思路总结未来排放的测算方法、提炼关键参数的设置经验，方便城市管理部门直接借鉴利用。LEAP模型的情景设置中主要应用了探索性预测方法，即基于不同的政策、技术发展情况得到不同的排放路径，但在个别情景中如果已有清晰、明确的目标，则可结合规范性预测方法共同使用。

2.2.1 情景设置

达峰先锋城市联盟（APPC）发布的《城市达峰指导手册》中提出“排放情景构建是指，在情景设计的框架下依据排放趋势和减排潜力开展定量计算，以便对不同情景进行描绘的过程”。因此，城市交通领域也可以根据城市自身需求，设计多个情景，测算不同情景下未来的排放趋势。

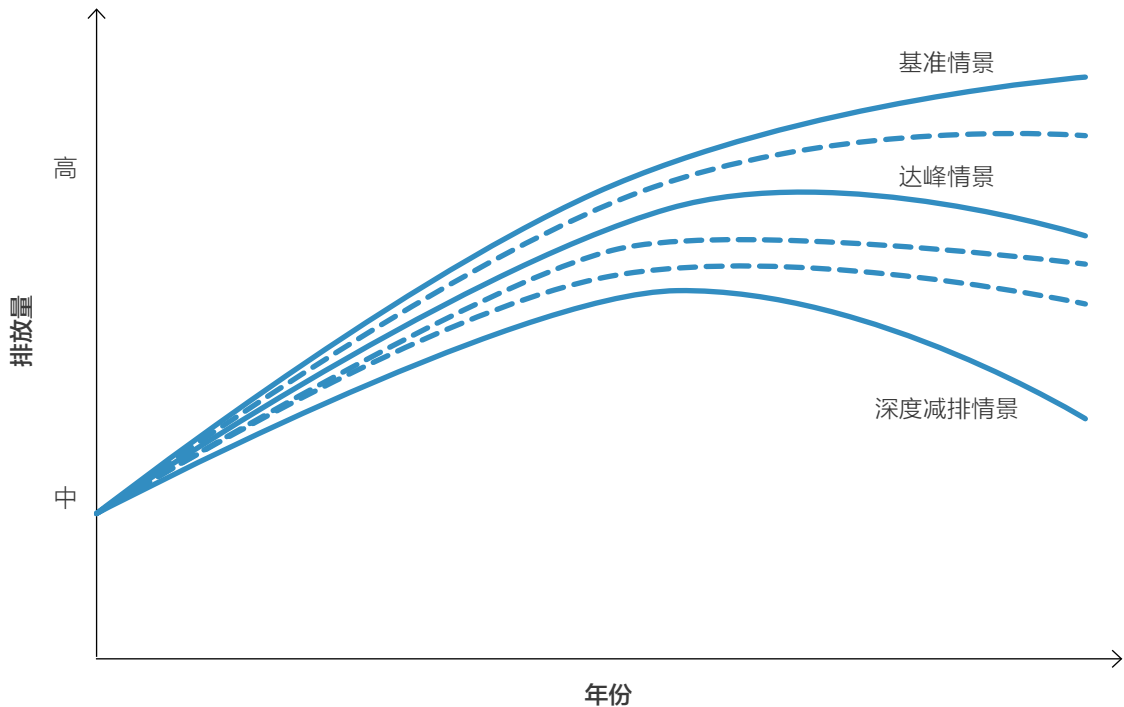
首先，城市应设定基准情景，作为后续研究的基础。**基准情景**要全面采纳城市现有的各项交通发展规划及技术发展能力，但不考虑额外的、新的交通减排措施，测算在经济、人口、产业、技术等宏观因素的影响下现有政策所导致的排放水平。值得注意的是，基准情景不是冻结情

景，而是现有政策的延续，即随着政策的实施，某些参数会随着时间的推移而得到一定的改善。

在基准情景的基础上，城市可以依次加大减排力度，通过提升政策的实施水平、大幅改善交通工具的技术发展水平、增加市场占有率、更多地考虑绿色出行方式等手段，实现不同的低碳交通目标。例如，尽早实现交通领域排放达峰即**达峰情景**，或为了实现《巴黎协定》目标而争取交通零碳排放即**深度减排情景**。城市还可以根据不同的远期目标，设立更多的情景，如强化达峰情景等。不同城市的发展状况不一，政策实施的阶段不同。例如，北京已实施了尾号限行、小汽车限购等政策，因此已经实施的政策应放入基准情景下，而很多城市还没有开展此项工作，则可考虑在达峰情景或是深度减排情景中纳入该政策的影响。大多数城市还存在着较大的政策设计和实施空间，但一般建议城市应设置至少两至三个情景（见图6），本研究从实现全球中长期净零排放目标的角度出发，建议城市应至少设置基准情景和深度减排情景。

各情景间的差异主要集中在交通活动水平、运输结构、能效水平、能源结构，以及变革性技术的推广程度等

图 6 | 情景设置示例



专栏 3 | 路径分析时间安排

建议城市纳入以下时间节点：

- 2005年：中国应对气候变化的目标之一是2020年单位GDP碳排放强度比2005年下降40%~45%，2030年比2005年下降60%~65%。2005年作为比较基准年，是一个很重要的年份。此外，收集2005年以来的历史数据并计算排放，有助于了解历史趋势，为预测未来排放趋势打下良好的数据基础。
- 2018/2019年：通常做法是将具有数据的最新年份作为现状基准，因此，城市可根据本地数据获得情况自行确定。
- 2020/2035/2050年：城市设定的达峰目标年份集中在2018—2030年，但交通领域达峰时间通常晚于城市整体达峰时间，因此需要延长时间范围。此外，城市行动的最终目标是帮助全球实现平均温升不超过2℃甚至1.5℃的目标，需要有更加长远的眼光致力于长期全球净零排放，因此建议将时间序列延长至2050年。

方面。通过对比不同的情景，可以得到不同节能减排措施对交通领域碳排放的影响。

2.2.2 宏观参数

在具体进行参数设置时，应首先了解城市的基础信息，把握城市的社会发展方向，探析整体经济、产业结构，以及人口、家庭等主要宏观参数的发展规律，从而有助于分析交通领域相关参数的变化趋势。

表 3列示了城市应收集的主要宏观参数，大体覆盖经济和人口两个方面。国民经济发展水平及产业结构可以在一定程度上影响城市交通基础设施建设、公共交通投入、旅客货物运输规模。经济发展态势良好，说明经济活动频繁，则商品流通活动即运输规模会得到一定的提升，政府或产业也会加大相关设施和技术的投入。城市的人口水平可以体现一个城市的活力，也会影响城市交通的发展规模，尤其是交通工具的保有量水平。交通规划中往往都会提到千人交通工具保有量千人的指标，因此摸清城市人口数据是核算相关交通数据的基础。

表 3 | 主要宏观参数

	主要参数	其他参数（加工处理）
经济及产业结构	地区生产总值	年均增长率 占比 人均情况
	第一产业	
	第二产业	
	第三产业	
人口及家庭	常住人口	
	城镇人口	
	农村人口	
	城镇化率	
	户数	
	城市居民月均可支配收入	

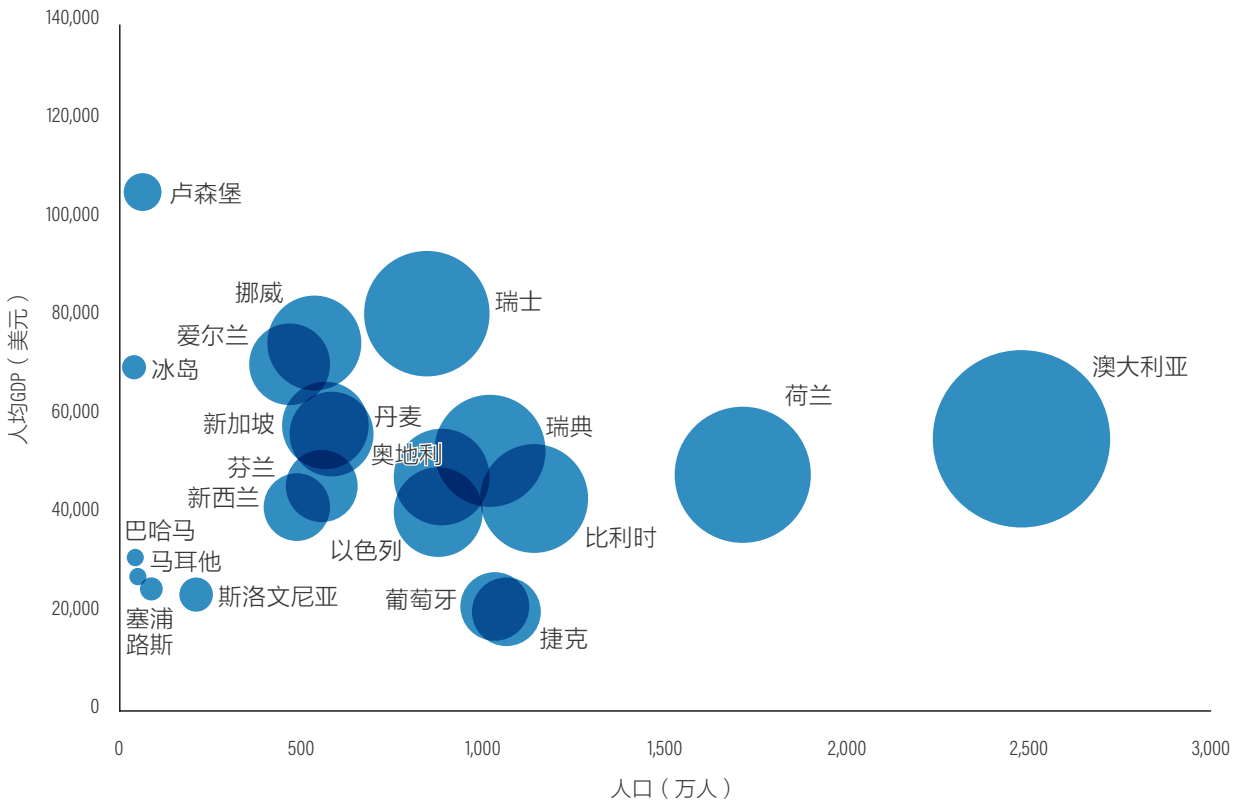
城市根据需要可以选择上表中的具体参数，不一定需要收集齐全，但应确保至少有地区生产总值、常住人口及城镇化率作为参考。城市也可以对参数进行一定的加工，如获得不同产业占比、人均GDP等数据，用于不同目的的分析。

为了支持后续研究，以上参数均需要收集相应时间序列的数据，即从2005年至2050年的数据。对于历史数据，基本均可以由各城市的统计年鉴或国民经济和社会发展统计公报直接获得。统计年鉴中一般会提供户籍人口和常住人口两个统计口径下的数据，推荐使用常住人口数据。

对于未来数据的预测，则首先需要参考城市相关规划或城市所属省份及区域的发展规划。其次，可以参考其他城市，尤其是同类城市的发展水平，如可以借鉴均以第二产业为主或人口规模相近的城市的未来发展规划。第三，

可以根据历史增长趋势进行外推，同时参考国家的大政方针、整体发展趋势。一般来说，针对宏观经济发展的研究相对较多，也可以提供较明确的借鉴信息。例如，预测GDP增速时，如果城市没有明确的规划，首先可以参考地方科研院所、高校的相关研究；其次可以参考发达国家的人均GDP发展水平。例如，图7选取了2017年人均GDP排名前30、且人口3000万以下的发达国家²⁹，城市可以根据相应人口规模设定在未来某年达到同等人口规模的国家的人均GDP发展水平。同时，也应关注到国家经济发展的大趋势，经济合作与发展组织（OECD）³⁰、世界银行³¹、国际能源署³²等均提供了对中国至2050年的GDP增速水平的预测，随着国家经济增速的放缓，城市的经济增速也将在中长期内逐渐放缓。其他参数也可以按照预测GDP增速的方式进行测算。值得注意的是，宏观参数作为本研究的外生变量，不需要对其进行情景设置，默认各情景均基于相同的社会经济发展阶段。

图 7 | 30个发达国家2017年人口和人均GDP水平



注：气泡大小代表国家 GDP 总量。

2.2.3 交通需求

首先，合理的城市规划会有效缩短出行距离并减少不必要的出行活动，帮助降低或优化交通流量。在城市中，不同形式的土地利用会产生不同性质和强度的交通需求。制订城市整体规划、土地使用规划和交通专项规划，划设有效的城市管理边界，可以控制城市半径增长，防止城市无目的蔓延，引导城市精明发展。针对不同城市用地打造相应的基础设施和交通管理方案，可以缩短居民出行距离、减少小汽车出行需求及其活动量，并最终减少能源消耗和温室气体排放。

特别地，针对降低货运交通运输的需求，缩短交通运输工具的运输距离和改善物流关系与之最为密切。货运有关的物流解决方案包括使用高效的物流技术与组织，搭建物流信息平台和建立货运整合中心等。更广泛的城市及运输规划也可成为有效减少货运需求的手段。

交通需求管理通过调整出行时间和地点、出行方式，甚至包括是否出行的决策，或为出行人提供多种出行方式选择，也会减少道路系统内使用道路的车辆数，减少污染物排放，改善当地的空气质量，并缓解温室气体排放所带来的气候变化影响。交通管理部门通常考虑的交通方面的管理措施范围广泛（ADB, 2017），常见的有私家车需求管理政策、道路收费政策、拥堵收费政策和停车收费管理政策等，且管理效果显著。例如，根据各实施城市的经验，基于不同的收费系统设计，拥堵收费可以减少10%~30%的交通量，减少2.5%~22%³³的二氧化碳排放量。

专栏 4 | 深圳市交通需求管理手段之一 ——停车收费制度

深圳市根据不同区域的土地开发强度与道路交通状况，在全市划分不同的停车规划分区和停车收费分区，打造不同强度的停车供给与收费水平。在城市中心或在轨道站点500米半径范围内用地强度密集、混合度较高的区域提供较少的出行停车位，控制小汽车进入，引导使用公交出行。而在用地强度较低的以居住区为主的区域，则提供较宽松的出行停车位，适度满足居民的停车需求。经测试，在中心区等需要控制小汽车出行的地区，当停车收费标准提高至每小时15元时，小汽车分担率将下降10%，出现临界点，同时道路交通流量下降15%，也一定程度抑制了购车欲望³⁴。

以上政策措施对于交通出行的影响显著，在交通需求的模块分析中，将主要讨论其对以下几个关键参数的影响，城市可参考相应的分析思路进行预测。

客货运周转量

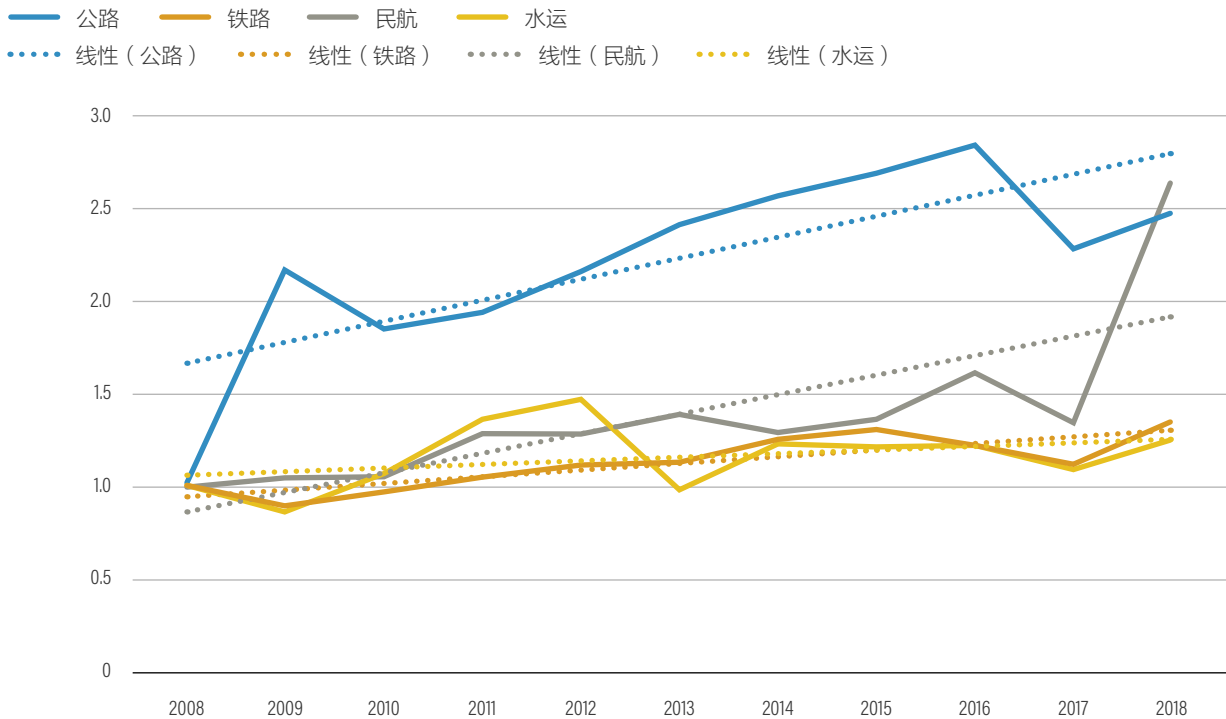
对客货运周转量的未来水平的测算可遵循以下思路。

客货运周转量为活动水平数据，体现一个城市交通活动的规模，会受到城市配套基础设施建设、政策引导等多种影响。因此，判断其未来趋势，首先应确定地方政府或行业对城市各项交通的定位，参考当地发展规划或者产业发展规划等相关政策、措施文件，主要资料来源为城市总体规划、交通运输发展规划、现代物流业发展规划等文件，或通过调研、咨询本地专家得到相应时间节点的规划数据。例如，武汉市将大力发展航空运输，设定了“中部地区枢纽机场、门户机场、航空物流中心”等定位，并在《武汉市城市总体规划（2016—2030年）》、《武汉机场门户枢纽发展战略规划》、《武汉市现代物流业发展“十三五”规划》等文件中均提出了航空运输能力等相关目标。

当规划数据不能完全满足模型应用的需求时，则需要进行一定的数字处理。具体有以下几种情况：（1）规划数据往往仅提供几个时间节点（如2020年、2025年、2030年）的数据，中间年份没有规划数据，且大多数情况下，城市少有远期至2050年的目标，因此，需要判断中间年份和后续年份的发展趋势。例如，假设两个时间节点间为线性增长或减少，并线性外推至2050年。（2）规划数据不是周转量数据，而是如客运量、货运量、吞吐量等其他形式的活动水平数据，此时需要通过计算将其折成周转量数据，如客货运量与平均运距相乘，同时需要对平均运距进行趋势判断。平均运距可依据历史数据的趋势进行预测，一般城市交通的平均运距会随着时间的推移而呈现缓慢增长的趋势，如图8所示，因此可以考虑采用时间序列分析方法进行未来数据的推算。（3）如果规划数据仅提供城市总体的交通运输客货运量或周转量数据，则需要乘以交通运输结构数据，得到分类型的交通运输量数据。

当城市没有相关交通规划数据时，则可以考虑其他方式：（1）参考国际或国内的先进水平，如国际城市机场、港口的运输水平，作为城市未来发展的参考值。例如，从人口规模相近的两个城市比较来看，武汉市2016年常住人口为1077万人，航空客运量为1300万人次，客运周转量为174亿人公里；深圳市2016年常住人口为1190万人，航空客运量为4354万人次，客运周转量为707亿人公里。深圳市民航客运规模为武汉市的3~4倍，可以推测武汉市航空运输业还有较大的发展空间，增长率可以保持在较高的水平。当然，在进行此类对标研究时，还要考虑

图 8 | 武汉市2008—2018年货物运输平均运距变化趋势



注：考虑到不同交通方式的运距的口径差异，采用无量纲化展示形式，历年运距数据调整为与2005年数据的比值（2005=1）；航空运输2018年运距有较大的提升，主要是因为2017年下半年武汉机场开通了新航站楼，运量显著增加。

数据来源：武汉市统计年鉴，平均运距数据由周转量与货运量相除得到



到不同城市的定位、所处地理位置等因素的影响，对结果进行适当的调整。（2）通过判断影响周转量的因素，采用与相关因素回归的方式，根据已知变量推算周转量。客运水平可能会与第三产业的发展水平、城市居民可支配收入、人均GDP等因素相关联，货运水平可能会与城市经济发展水平（GDP）、第二产业的发展水平、工业占比等因素相关联。因此，可以用相同的因变量（即周转量）和不同的自变量组合（即可能影响周转量的因素）对历史数据进行回归建模，并用相同的筛选方法³⁵对模型进行筛选，选择可信度更高及更合理的自变量，建立预测模型，从而根据已获取未来数据的自变量计算因变量。例如，若采用线性回归，则周转量与自变量间的关系如以下公式：

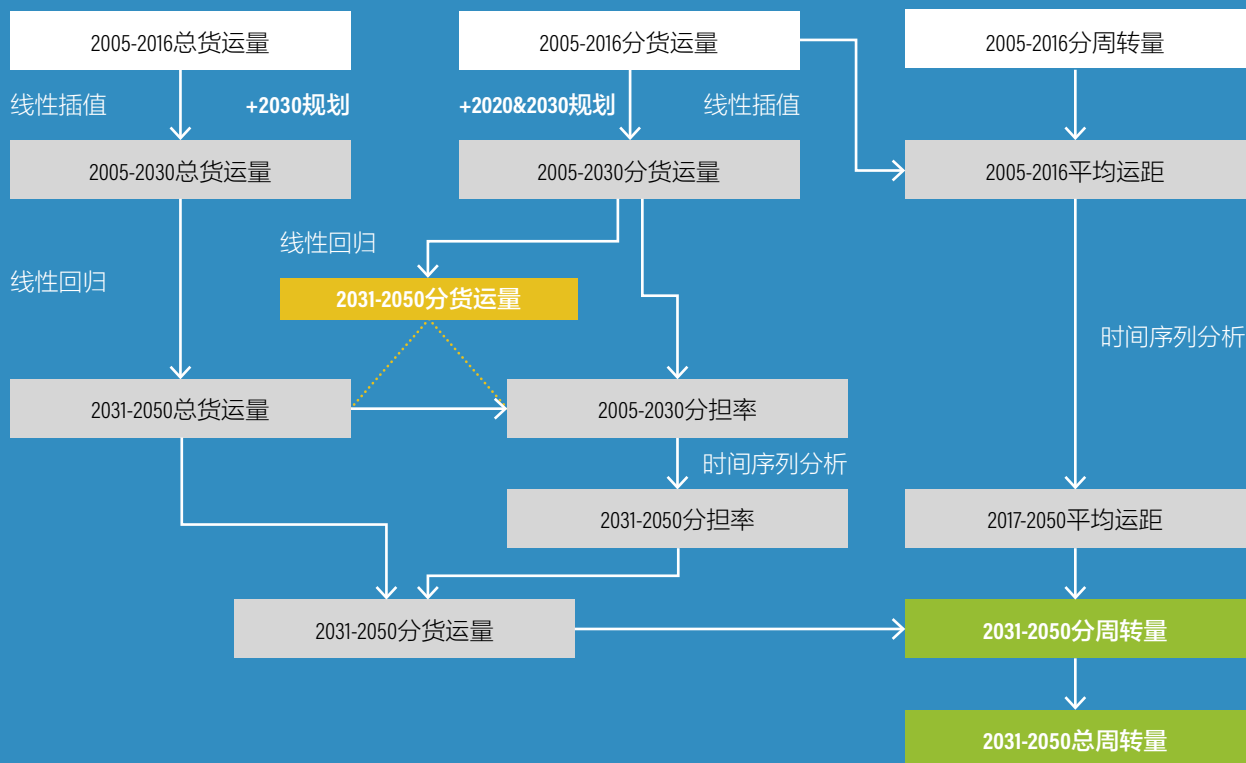
$$\text{周转量} = a_1 \times \text{自变量}_1 + a_2 \times \text{自变量}_2 + \dots + a_n \times \text{自变量}_n + b$$

注：a、b为回归测算出来的系数

在获得基准情景数据的基础上，通过调整周转量增速或目标值，可相应设置不同情景下的周转量水平。

专栏 5 | 武汉市周转量研究思路图

下图为计算武汉市货运周转量的思路图。



车辆保有量

有关车辆保有量³⁶的预测，已有研究主要使用以下几种模型或方法：（1）BP神经网络，运用机器学习的方法预测时间序列数据；（2）灰色预测，本质上是使用研究对象自身的时间序列建立模型；（3）指数平滑法，基本思想是先对原始数据进行平滑处理，再利用处理后的数据计算预测值；（4）多元回归，实质是对已有数据进行拟合，根据拟合趋势进行预测。在实际操作中，城市应采用多种方法进行交叉验证，然后选取趋势结果最为合理的方法。

在武汉案例中，经过多种方法的模拟、测算，最终选择使用多元回归分析方法，并参考了Bao-jun Tang等人运用的改进后的Gompertz模型³⁷。Gompertz模型基于两大假设：一是随着经济发展，汽车增长速度分为加速、减速和饱和三个阶段；二是收入也对增速产生影响，模型自动对不同收入阶段赋予不同曲率。基于上述原理，以武汉市数据为例进行说明。

首先建立Gompertz模型如下：

$$V(X) = \gamma e^{\alpha e^{\beta X}} \quad (1)$$

其中， $V(X)$ 为人均小汽车保有量（辆/人）， X 是人均GDP（万元/人）， α 和 β 是待估参数， γ 是汽车保有量饱和值。

将式（1）进行数学变换，可得到线性回归模型 M_1 ：

$$M_1: \ln(\ln \gamma - \ln(V(X))) = C + \beta_1 X \quad (2)$$

为避免遗漏变量偏误，建立三个优化模型 M_2 、 M_3 和 M_4 ：

$$M_2: \ln(\ln \gamma - \ln(V(X))) = C + \beta_1 X + \beta_2 X^2 \quad (3)$$

$$M_3: \ln(\ln \gamma - \ln(V(X))) = C + \beta_1 X + \beta_2 \ln(X) \quad (4)$$

$$M_4: \ln(\ln \gamma - \ln(V(X))) = C + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 \ln(X) \quad (5)$$

对武汉的数据进行M1、M2、M3三种线性回归模型的拟合，得到的结果见表4：

其中，M2的X、M3的ln(X)未通过显著性检验，M4的所有变量均通过显著性检验，并且拟合效果非常理想，R2最高达到0.994，故采用M4作为预估模型。

M4模型可以写为：

$$V(X) = \gamma e^{-e^{-C} \cdot X^{\beta_3} \cdot e^{\beta_1 X + \beta_2 X^2}} \quad (6)$$

代入所估计的参数值，得到预测模型：

$$V(X) = \gamma e^{-3.274 \cdot X^{-1.199} \cdot e^{0.399X - 0.023X^2}} \quad (7)$$

工业化国家的人均汽车保有量饱和值为0.62。考虑到武汉加强公共交通建设、低碳绿色发展的目标，在武汉的汽车保有量模型中，分别取 $\gamma=0.5、0.4、0.35、0.3$ ，即千人汽车保有量为500辆、400辆、350辆和300辆为小汽车保有量的饱和状态。预测结果如图9和表5所示。

根据研究判断，当 $\gamma=0.3$ 时，2020年比当时研究设定的基年2016年增加120万辆，相当于每年新增30万辆，

表 4 | Gompertz模型线性拟合结果

变量	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
X	-0.108 (0.006)	-0.034 (0.027)	-0.160 (0.027)	0.399 (0.170)
X ²	-	-0.006 (0.002)	-	-0.023 (0.007)
ln(X)	-	-	0.309 (0.156)	-1.199 (0.467)
常数项	1.206 (0.038)	1.004 (0.078)	0.998 (0.110)	1.186 (0.093)
N	11	11	11	11
R ²	0.976	0.988	0.984	0.994

图 9 | 武汉市汽车保有量预测

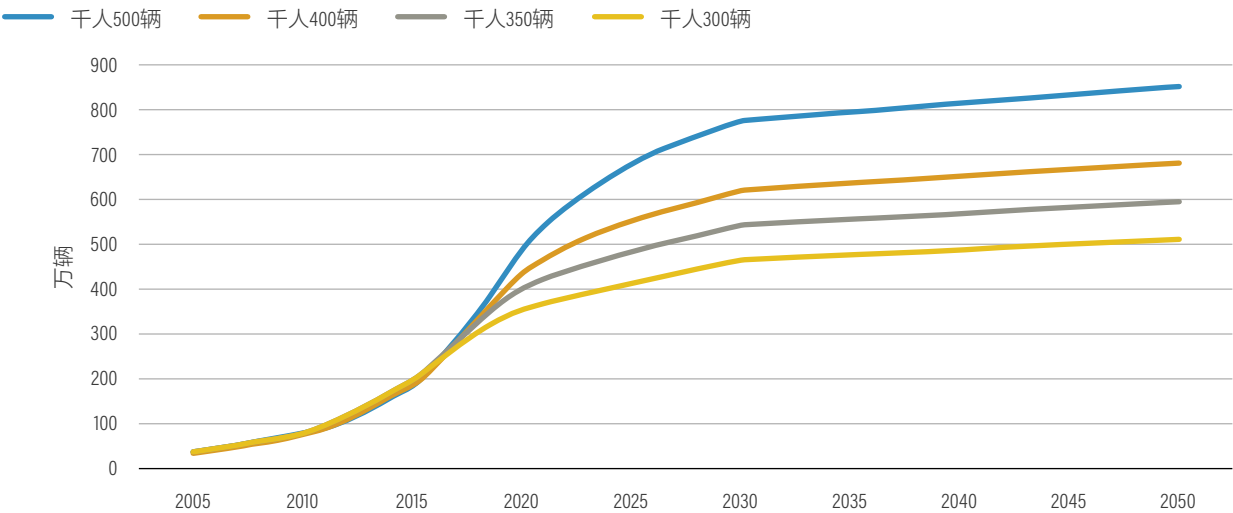


表 5 | 不同保有量数值下的未来汽车保有量预测

	每户人数（人）	每户拥有汽车数量（辆）	2020年汽车保有量（万辆）	2030年汽车保有量（万辆）	2040年汽车保有量（万辆）	2050年汽车保有量（万辆）
$\gamma = 0.50$	3.5	1.75	486	775	813	850
$\gamma = 0.40$	3.5	1.4	433	620	650	680
$\gamma = 0.35$	3.5	1.225	402	543	569	595
$\gamma = 0.30$	3.5 ³⁸	1.05	355	465	488	510

图 10 | 武汉汽车保有量Gompertz模型预测与实际对比图

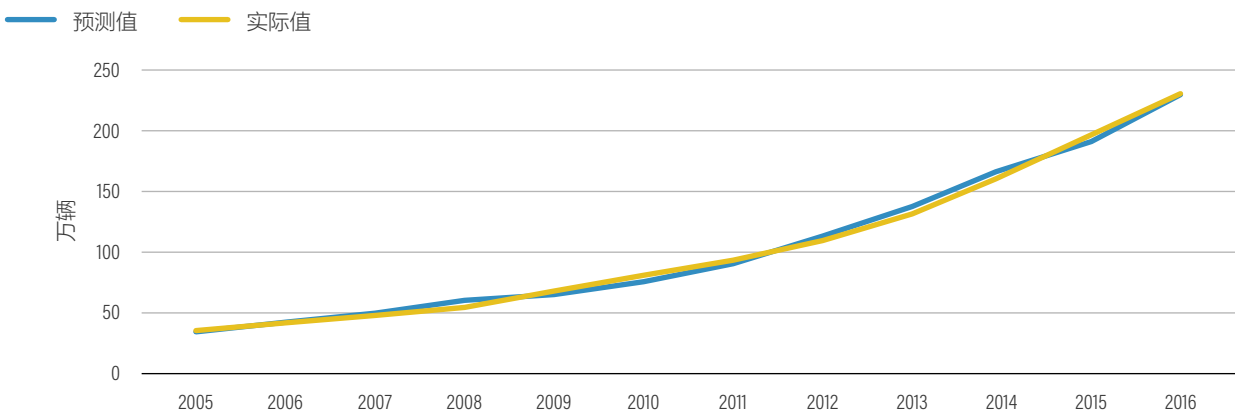


表 6 | 道路机动车年均行驶里程

机动车类型	年均行驶里程VKT（km）
微型、小型载客车	18,000
出租车	120,000
中型载客车	31,300
大型载客车	58,000
公交车	60,000
微型、轻型载货车	30,000
中型载货车	35,000
重型载货车	75,000
摩托车	6,000
低速货车	30,000

资料来源：《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南（试行）》

且千人300辆相当于每个家庭一辆车达到饱和，比较符合武汉可能的情况。

再将模型预测的历史数据和实际数据进行对比，如图10所示，基本符合。

年平均行驶里程（VKT）

城市各种车辆VKT数据可以来自车辆管理部门、科研院所等机构，应尽量采用本地数据，如果没有，可以考虑用区域或者国家平均数据代替。道路机动车年均行驶里程见表 6。

图 11 | 1983—2017年美国家庭出行调查

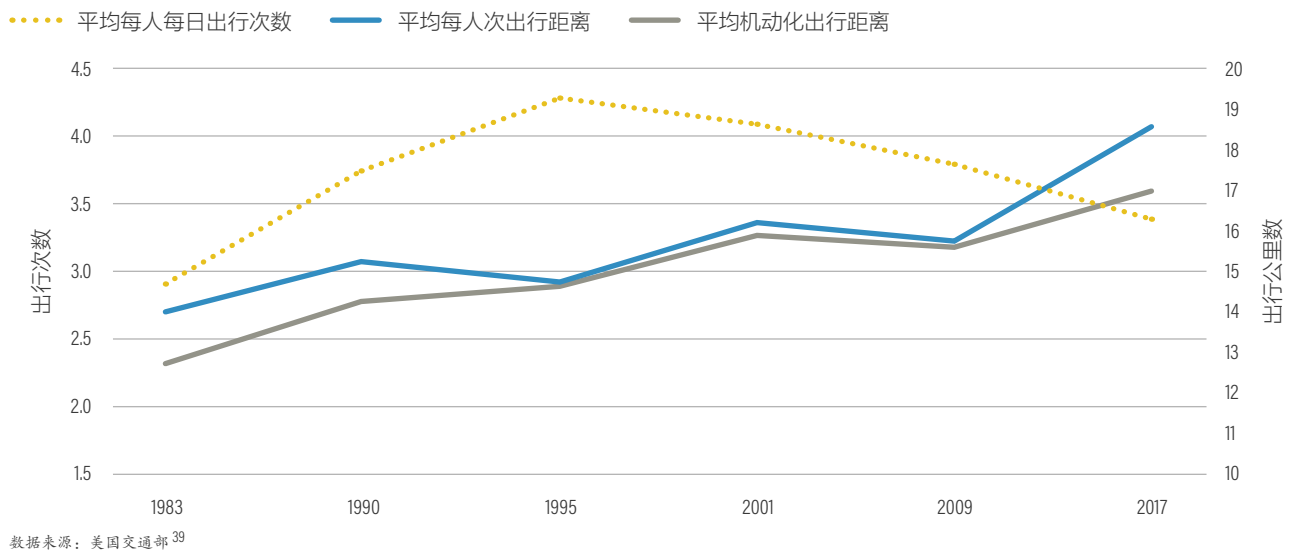


表 7 | 北京市摩托车管理规定演变

发布时间	文件	摩托车管理相关规定
1981年	《北京市道路交通管理暂行规则》（已废止） ⁴⁰	并未对摩托车出行的区域进行限制
1987年	《北京市道路交通管理规定》（已废止） ⁴¹	第二十条提出“驾驶京B号牌或外省市号牌的摩托车，不准进入三环路以内（不含三环路辅路）道路行驶”，限制摩托车在市内的使用
1992年	《北京市机动车和机动车驾驶员管理暂行办法》 ⁴²	其中第十八条规定“在城区、近郊区，不予核发二轮摩托车、后三轮摩托车和轻便摩托车牌照；在远郊区，可以核发二轮摩托车、轻便摩托车和市公安交通管理局确定的后三轮摩托车限制行驶区域的牌照”
1997年	《北京市机动车和机动车驾驶员管理办法》 ⁴³	延续了对于“限摩”的管理思路，继续提出“在城区、近郊区不予核发农用运输车和各种摩托车牌证”
2018年	《北京市大兴区人民政府关于对部分机动车采取交通管理措施降低污染物排放的通告》 ⁴⁴	部分区域禁止摩托车驶入

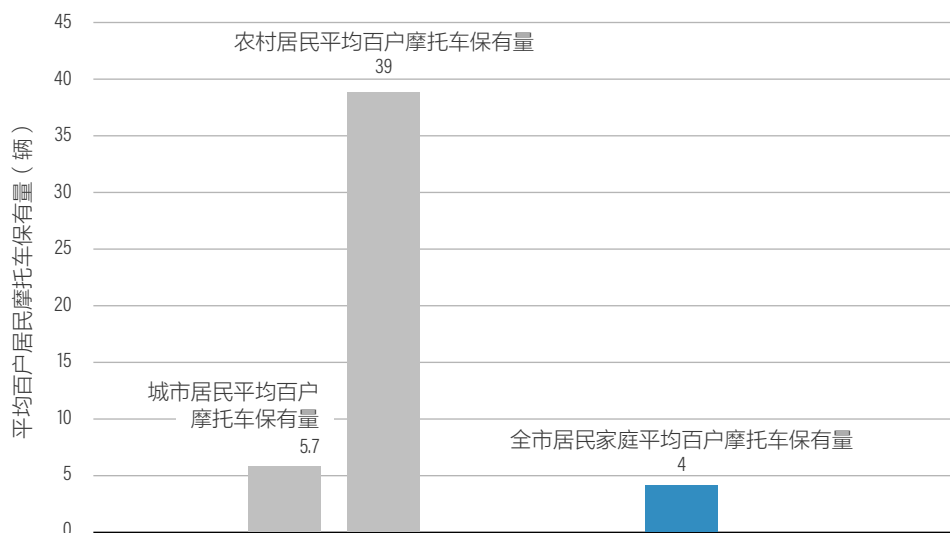
从中长期看，地区的交通活动水平不仅与交通政策相关，还受到人口数量、经济发展阶段和城市规划等宏观因素综合影响。从一般规律看，对于人口和经济平稳增长的地区，在城市范围扩展、机动化水平提高、生活质量提高带来新增非通勤目的的出行次数增长等多种因素影响下，市民的平均每日出行次数与平均出行距离会有一段平稳的增长（如图 11所示），导致机动化和非机动车出行次数和里程的全面增长。

然而，要想判断道路行驶车辆VKT的未来趋势，还需

要考虑区域交通管理和规划政策，因为车辆的使用强度受到地区交通管理和规划政策的直接影响。

以北京市摩托车的保有和使用为例进行说明。与沿海城市的机动化进程不同，北京市较早地干预了市区摩托车的使用（见表 7），使得摩托车的用户发展和使用强度与其他未管制城市迥异，在城市机动化的过程中出现了保有量和VKT阶段性增长，然后快速下降的趋势，最终摩托车渐渐退出了市民出行的主流选择。

图 12 | 2004-2018年北京市居民平均百户摩托车保有量



数据来源：《北京统计年鉴 2005》、《北京统计年鉴 2019》

受到当地产业、经济基础和市民出行习惯影响，很多城市部分出行方式的交通趋势与北京相似，有较长的演变周期，并可能伴随反复。以北京为例，在政策影响下，摩托车由市民日常通勤且作为机动化主要选择的出行工具变成了基本无法承担通勤功能、更多具有市郊区域物流功能的工具，如图 12 所示。当管制政策、外部环境、出行方式和使用成本交叉影响，现状水平对于未来预测的借鉴程度降低时，需要熟悉当地政府交通管理思路的专家对于中长期预测进行把关。其他行业车辆（如物流车辆）也有同样的问题，其未来使用强度变化受当地经济活动变化的影响小于受当地交通管理政策的影响。因此，应该在对该方式未来使用强度进行多情景数学推测的基础上，结合专家判断，选取更加符合当地管理思路和发展路径的预测结果。

综上所述，城市可以对未来VKT的趋势判断设置不同情景：在基准情景下，考虑按照近段时期的趋势发展，设置一定的VKT年均增长率；而在达峰情景和深度减排情景下，考虑到交通管理措施对于控制交通排放的重要作用，因此VKT可以设置一定的下降率，并由相对更加清洁的公共交通等其他方式替代出行需求。

2.2.4 运输结构

除了关注各类交通方式自身的发展，城市也要兼顾各类交通运输方式的特性及其优劣势，以及城市发展对各类交通方式的定位，进行综合的结构把控。中短期内，城市难以建立跨区域的交通领域碳市场，对物流和客运产生的

社会成本进行结算。因此，在缺乏规划指导的情况下，交通运输市场的平衡将仅围绕直接运输成本，社会成本成为被动的隐形补贴。结构失衡的情形下，可能导致运输量的线性增长，却带来区域碳排放的超线性增长的不良后果。

货运组织

货运组织中，为了不断推进绿色交通，国家相关政策在大力推广铁路运输和水路运输。根据研究，航空运输的单位周转量能耗水平远高于铁路运输和水路运输，是水路运输的154倍、铁路运输的131倍（蒋小谦等，2019）。因此，为了优化货物运输结构，各城市应尽量鼓励铁路和水路承担更多的货物远距离运输需求。但是由于各类交通方式均有其独特的优势，即水路运输成本相对较低，铁路运输安全性高、稳定性强，航空运输时效性强、可大幅缩短运输时间，因此并不能一味地调低航空运输的占比。同理，客运中，铁路运输、航空运输四通八达、高效便捷，如果仅从节能减排的角度减少航空运输而推广铁路运输也是不现实的。综上所述，城市要综合衡量交通发展的趋势，合理设定各类交通方式的运输占比。

具体处理方式，首先按照城市规划搭建基准情景，加总四类交通方式的周转量得到总周转量，再计算各类交通方式周转量占总周转量的比例。在其他情景下，按需调整各类交通方式的占比，如适当增减0.5%，则获得不同情景下的各类交通方式的占比。如果没有直接的周转量数据，城市也可以对货运量或者客运量进行相同方式的处理。

表 8 | 武汉市货运结构示例

运输方式	2030年		2050年	
	基准情景	达峰情景	基准情景	达峰情景
公路运输	56.94%	56.94%	55.94%	52.75%
铁路运输	19.96%	21.98%	23.46%	26.00%
航空运输	0.16%	0.19%	0.24%	0.25%
水路运输	21.64%	20.89%	20.36%	21.00%

专栏 6 | 新型交通运输方式对货运结构的影响

从中长期来看，不同运输方式的单位运输效率会发生变化，同样的周转量水平可能会对应更高的货运量。目前物流服务市场竞争加剧，产生了多样化的运输场景，以及配送运营的精细化和复杂化。以电子商务物流服务改进为例，物流作为商品流通和供应链的末端，在上游流通效率改善之后，在未减少运量的基础上，减少了货物的无效物流成本和时间，提高了每车公里的物品运输总价值。F2C电商物流优化就是其中一个典型的案例。传统线下商品销售在最后流转到消费者手中之前，需要经过多个层次经销商的转运转存，没有增加商品对消费者的使用效用，但增加了中间物流里程和商品成本。F2C模式削减了线下模式的多层经销模式，即工厂到消费者中间的流转环节减少，即使运输方式没有变化，也使得商品非生产环节所包含的碳强度降低。再考虑到这样的运输方式会减少城市仓储物流用地，所产生的碳减排会更加显著。以年度双十一促销为窗口观察，中国电子商务的扩张趋势不减，线下物流需求仍在逐渐扩大，对于线下传统物流的替代性越来越高，新增物流效率的提升有望带来更高的减排量。

以武汉市为例，武汉针对航空运输设立了五大定位，如中部地区枢纽机场、区域经济增长的引擎，因此在情景设置时需要保持航空运输的增长趋势，以确保其大力发展的定位。由于武汉市的相关规划提供了2030年各类交通方式的货运量水平，未直接提供周转量水平，因此武汉市的研究中则采用货运量进行结构调整。在按照武汉市规划建立的基准情景下，课题组为了不改变航空运输的增长态势，且尽可能地选择单耗较低的铁水联运，则适当放缓航空运输增速，减少公路运输占比，并增加其他交通方式的占比，从而设置了达峰情景，见表 8。

客运组织

城市客流变化的影响因素很多，不仅包含城镇化、地区分工等会造成出行总量发生显著变化的因素，还包括

新增或改造城市对外交通基础设施等会引起客流在不同交通方式之间重新分配的因素，如地区新增或者调整高铁客运。与城际货运组织相似，客运量的分配不仅需要考虑不同交通方式在运输特性方面的互补性、在排放强度方面的差异性，还需要以满足城市发展定位为约束，平衡未来情景中各种交通方式之间的运量分担。

相比城际交通，城市对于市内交通的低碳和清洁化发展具有更强的规划和管理能力。近期虽然这一领域的排放总量正在随着城市化和机动化的普及和加深而快速增加，但中国城市在这方面的探索也卓有成就。

从客运组织来看，城市也要注意各类交通的结构把控，分析私家车和公共交通中的地铁、公交车、出租车，以及慢行交通的互补与替代关系，一般利用出行人次的数

据进行分担与调整。为了实现交通的深度减排和净零排放，在达峰情景及深度减排情景中，会给予慢行交通和公共交通更多的倾斜，设置较高的出行人次占比。

但还需注意的是，未来交通行业和科技发展也会成为城市交通方式变化的主要因素。受到多种经济业态和工程创新的联合影响，城市交通革命性变化的临界点可能就在眼前。无人驾驶被预测将会成为大幅降低民用和商用出行成本、改变出行习惯，甚至改变城市用地和形态的革命性技术⁴⁵，具体表现为以单次出行成本更低、效率更高的自动驾驶车队将代替人口稠密的城市地区内运行的大部分公交车、网约车、出租车和部分私家车⁴⁶。基于柏林城市车队的研究显示，一个拥有10万辆车的车队足以为全柏林市民提供高质量的出行服务，自动驾驶车辆对于普通车辆的替代率⁴⁷高达1:10。尤其是目前汽车行业主流观点大都认为自动驾驶能够有效减少汽车行驶过程中的二氧化碳排放，因为自动驾驶将有效提高出行效率和节省时间，从而减少能源消耗和运营成本。例如，德国工商协会（DIHK）的研究显示，自动驾驶每年将节省约83亿欧元，减少620万吨二氧化碳排放⁴⁸。同时，如果自动驾驶车辆采用没有直接排放的电池作为动力，对交通领域的碳减排将会有很大的贡献。美国伯克利劳伦斯国家实验室的研究团队对这类新型交通工具的使用进行了分析，如果到2030年，美国能大规模使用自动驾驶的电动出租车，那么每部这类车辆的碳排放量要比传统车辆降低87%至94%，与混合动力车辆相比也能降低63%至82%⁴⁹。因此，从实现交通深度减排的角度，无人驾驶技术将是未来重要的驱动力。多家车企都预测将于2025年前向市场推出可商用的无人驾驶车型，正式进入无人驾驶的红海竞争时代。临界点之后的道路运行变化无疑会在现有发展路径上有较大的偏移。因此，对于

中远期的预测，考虑行业发展和科技进步的因素，比单纯基于现状水平的、使用数学手段向后推移增量，更有前瞻性和准确性。

2.2.5 能源效率

根据对我国交通能源消费趋势的研究（张树伟等，2016），不论是对外交通还是对内交通，能源效率对减排潜力的贡献都是最大的。根据欧阳斌等人（2015）的研究，要实现交通运输整体的节能降耗，公路货运和内河货运是重中之重。减小交通工具每公里能源消耗，即提升能效，可以通过改进技术和设计、运用高效驾驶、改善交通运行管理等方式实现该目标。国际航空运输协会（IATA）2009年归纳提出了四项针对航空运输的节能减排策略，即技术、运营、基础设施和正向经济手段。事实上，这些手段也适用于其他交通运输方式提高相应的能源效率。当然，随着交通方式不同、运输目的不同，其节能方法和措施也各有侧重。

随着节能科技的不断发展，节能低碳的产品与技术逐渐在交通运输产业中得到实际应用，主要表现为一方面提升传统交通工具自身的能源利用效率，另一方面逐渐向能效水平更高的新能源交通工具转换。

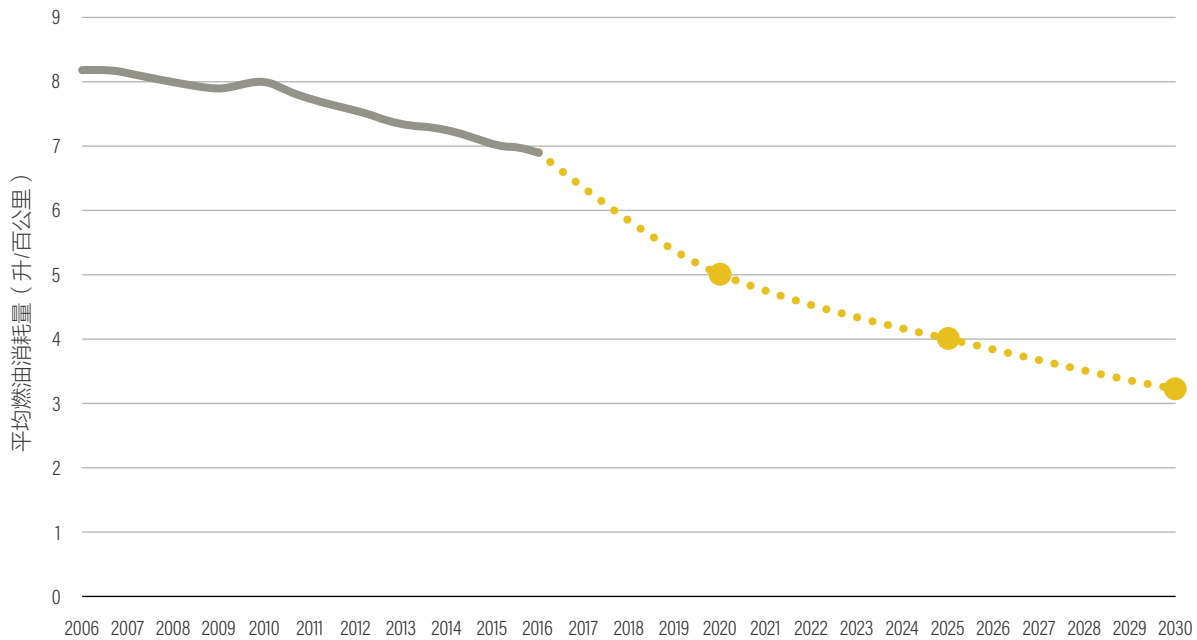
以道路交通为例，2017年工业和信息化部等部委联合颁布的《汽车产业中长期发展规划》对于汽车能源的消耗列出了要求（见表9），提出中国汽车节能标准的整体目标是2020年乘用车新车平均燃料消耗量需达到百公里5升、2025年达到百公里4升（见图13），直接对汽车的能源利用效率进行了约束。

表 9 | 传统燃油车的节能潜力（至2030年）

	2020年	2025年	2030年
总体规模	汽车年产销规模3000万辆	汽车年产销规模3500万辆	汽车年产销规模3800万辆
乘用车	油耗5L/100公里	油耗4L/100公里	油耗3.2L/100公里
商用车	节油10%以上	节油15%以上	节油20%以上
新能源汽车 产销占比	7%	20%	40%

注：2030年规划出自工信部委托、中国汽车工程学会牵头完成的《节能与新能源汽车技术路线图》研究⁵⁰

图 13 | 乘用车燃油经济性（百公里油耗）的年度变化



数据来源：2006—2015 年数据来自能源与交通创新中心《中国乘用车燃料消耗量发展年度报告 2016》，2016 年数据来自原中国汽车技术研究中心《中国节能与新能源汽车发展研究报告》

为了完成以上目标，国家也在逐渐提高车辆燃油品质的标准、改善车型及提升相应的排放标准。提升燃料质量、减少杂质和添加剂，将减少发动机积碳、降低发动机磨损、提高发动机使用寿命，并使得燃料燃烧更加充分，从而提升能源使用效率，降低油耗。根据生态环境部、国家发展和改革委员会、公安部等多部委于2018年12月30日相继发布的相关公告⁵¹，“自2019年1月1日起，全国全面供应符合国六标准的车用汽柴油，停止销售普通柴油和低于国六标准的车用汽柴油”。其中，国六标准汽油分为a、b两阶段实施，2019年将率先实施国六a这一过渡阶段，2023年将全面提供国六b汽油，即真正的国六标准汽油。提升车辆产生的污染物的排放标准，对提升能源利用效率也有一定的帮助。因为汽车发动机“汽油馏程50%蒸发温度限值的降低”⁵²，使得燃油的雾化效果更好，从而燃料燃烧也会更加充分，相应地可以降低一定的油耗。根据国家标准《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》（GB 18352.6—2016）⁵³，所有轻型汽车自2020年7月1日需符合国六a阶段排放限值要求，2023年7月1日将全面实施国六b阶段的排放标准。国家标准《重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》（GB 17691—2018）⁵⁴规定，自2019年7月1日起对重型燃气、柴油车辆分步实施国六a、b排放标准，2023年7月1日所有重型车辆均需达到国六b阶段排放限值。目前全国已有多个省市率先实施国六排放标准，例如北京市要求在京销售和

登记注册的所有车辆均需在2020年就达到国六b阶段的排放标准，提前三年完成国家规划的目标。

然而，虽然国家出台了上述政策，传统燃油车辆节能减排压力仍然非常大，如果要达到燃料消耗量目标，则需要纳入新能源车辆的节能潜力。因此，2017年工业和信息化部等五部委联合发布了《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》，即“双积分制度”，不仅促进了车企不断降低传统燃油车的平均燃料消耗量，更鼓励车企转向新能源汽车的生产。根据测算（蒋小谦等，2019），燃油车百公里油耗为8.8升，而电动车百公里电耗为16千瓦时，折合比燃油车的百公里能耗下降47%⁵⁵左右。因此，在道路交通领域，新能源汽车技术成为国家战略发展的重中之重，主要表现在发展混合动力汽车、纯电动汽车、氢燃料汽车等，这些新型车辆都受到了国家以及地方政府的大力扶持。特别地，由于整车制造商需要平衡新能源汽车的制造成本和技术创新，发展以电动汽车为主的新能源汽车技术受到了更多的青睐。

类似地，对铁路而言，节能降耗的关键也在于发展新能源交通工具。铁路最主要的能耗为机车能耗，1990年后机车单位工作能耗基本稳定在内燃机车36.4千克标准煤/万吨公里，电力机车13.7千克标准煤/万吨公里⁵⁶。因此，为提高铁路交通的能源效率，近几年来国家正在加快推动

专栏 7 | 普及绿色驾驶（节能驾驶）行为有助于提升能效

绿色驾驶行为也称生态驾驶行为，主要指以下这一过程：交通管理系统向驾驶员提供有关起步加速、换挡变速等的建议，促使驾驶员调整操作，实现能耗下降。⁵⁷北京交通节能减排平台可通过分析机动车行驶过程中与车辆技术、道路环境条件及车辆驾驶操作水平等有关的数据，精细识别驾驶员的驾驶行为，根据四层次综合评价模型得到驾驶员远评估报告，并以此为依据制定个性化的培训方式和教程，从而可指导驾驶员改善驾驶行为，减少机动车能耗和污染物排放。对出租行业27名驾驶员培训的结果显示，受过培训的驾驶员相同交通条件下车辆百公里油耗平均可下降0.74L，节约用油达7%。⁵⁸

铁路机车的电气化，用电力机车取代传统的内燃机车进行牵引，即“油改电”。电力机车的数量和比例近几年提升较快，未来也将会是我国铁路牵引的主力机车，推动铁路运输电气化的发展。

有关能源效率未来趋势的分析，参数设置相对单一，即调整单位交通运输量的能源消耗量这一指标，研究思路相对也比较简单。能源效率主要由行业整体发展水平决定，受城市地域差异影响较小，因此可以参考行业相关研究。

首先，不同类型交通方式能源效率发展趋势可以参考各类规划文件，如《交通运输节能环保“十三五”发展规划》提供了营运客货车、水路运输等的2020年能效提升目标，公路运输可参考《节能与新能源汽车产业发展规划（2012—2020年）》、《汽车产业中长期发展规划》等文件中提出的能效目标值，航空运输可参考《民航节能减排“十三五”规划》中提出的单位周转量油耗目标值，采用其平均下降率水平等。例如，根据规划文件，民航业“十二五”期间五年平均单位周转量油耗比“十一五”下

降了4.2%，同时设定了“十三五”比“十二五”下降4%的目标，因此，在后续年份能效的设置中，城市可参考这一能效提升速率。

其次，相关发达国家的能效数据也可以供设置参数时参考，如表 10所示，城市在设置未来年份能效水平时，如2025年或2030年，可参考欧盟2020年目标值。

同时，相关组织和研究机构的分析也可以提供一定经验，例如国际民航组织（ICAO）就提出过全球航空业燃油效率到2020年每年提高2%的目标，2020至2050年期间争取维持2%的年均增速。然而ICAO的研究表明，全球航空业在采取了各类技术、管理措施后，燃油效率每年也仅能提高1.39%⁵⁹，较难实现2%的目标。对于中国民航，其机队成立较晚、载运率相对较高，因而其燃油效率的提升空间更加有限⁶⁰。但是，正如中国民航节能减排五年规划中每五年都有单位周转量能耗下降率的定量指标，为了实现交通领域净零排放的目标，能源使用效率仍然有不断提升的需求，因此，中国城市可以在深度减排情景下设置较高的能效提升水平。

表 10 | 主要国家和地区汽车燃料消耗量标准目标对比（L/100km）

国家（地区）名称	欧盟	美国	日本	中国
2015年	5.2	6.7	5.9	6.9
2020年	3.8	6	4.9	5
年降幅（%）	5.4	3.5	3.3	5.5

来源：工业和信息化部，山西证券研究所

表 11 | 航空运输五年平均单位周转量油耗下降率

	2011-2015年	2016-2020年	2021-2025年	2025-2030年	2031-2035年	2036-2040年	2041-2045年	2045-2050年
基准情景	4.2%	4%	4%	4%	3%	3%	2.5%	2.5%
达峰情景	4.2%	4%	4.9%	4.9%	4%	4%	2.5%	2.5%
深度减排情景	4.2%	4%	6.8%	6.8%	4.9%	4.9%	4%	4%

注：根据测算，年均下降率为 2% 时，五年平均下降率为 9.6%；年均下降率为 1.39% 时，五年平均下降率为 6.8%；年均下降率为 1% 时，五年平均下降率为 4.9%；年均下降率为 0.8% 时，五年平均下降率约为 4.0%；年均下降率为 0.5% 时，五年平均下降率为 2.5%。

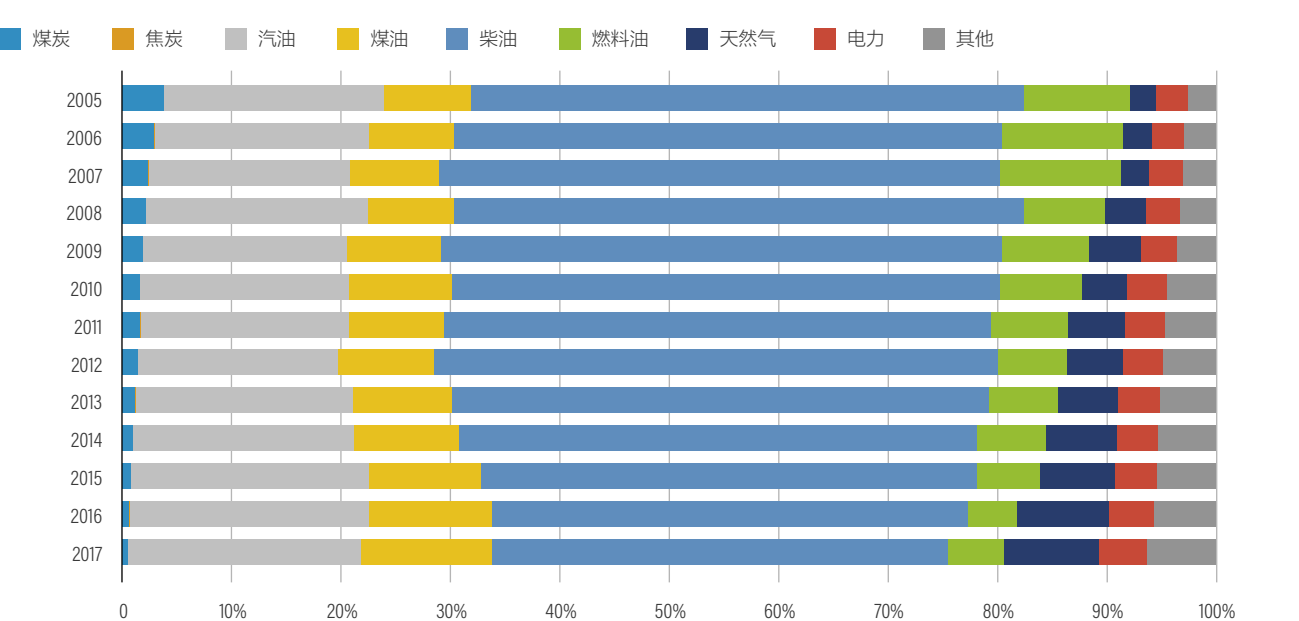
结合历史趋势和相关规划值、参考值，城市可以梳理历年能效提升的速率，从而开展趋势外推，推断未来能效提升的潜力，或在相应时间节点上设置能效水平必须达到的绝对值。根据以上思路，以航空运输为例，城市可以参考表 11 设置航空运输能效提升的参数。在深度减排情景下，设置近十年至少实现年均下降率1.39%的能效提升水平，后续年份由于能效提升空间有限，可相应降低年均下降率水平。基准情景下，认为若无重大技术突破，近十年基本维持过去十年的发展水平，后续年份能效提升空间更加有限，维持在年均下降率0.5%~0.6%的水平。达峰情景的能效设置则介于基准

情景与深度减排情景之间。对于其他交通方式，城市也可以参考以上方式设置相应的能效发展水平。

2.2.6 能源结构

自2005年始，交通运输能源消费结构得到了初步的改善与优化。若仅以能源平衡表中交通运输、仓储和邮政业的能源消费量⁶¹来看（见图 14），交通运输能源消费结构中柴油占比最大，其次为汽油、煤油、天然气及燃料油等。柴油占比自2012年开始呈下降趋势，煤油、天然气占比近

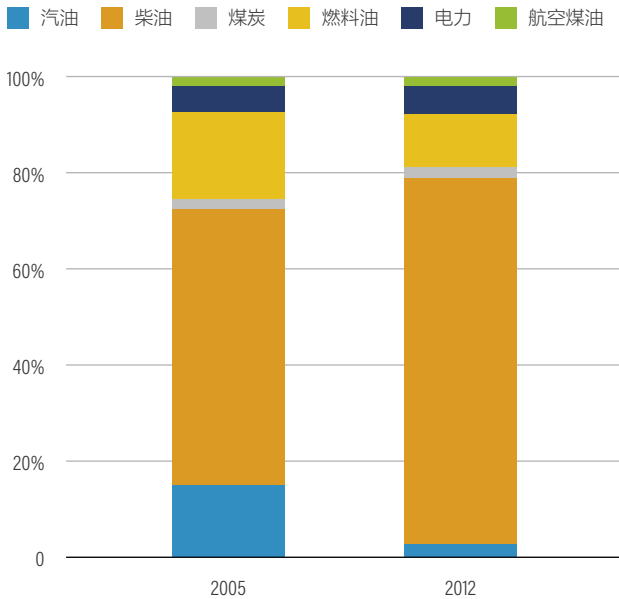
图 14 | 中国交通运输业能源结构历年变化



数据来源：国家统计局（交通运输、仓储和邮政业，终端消费量）、中国能源数据库

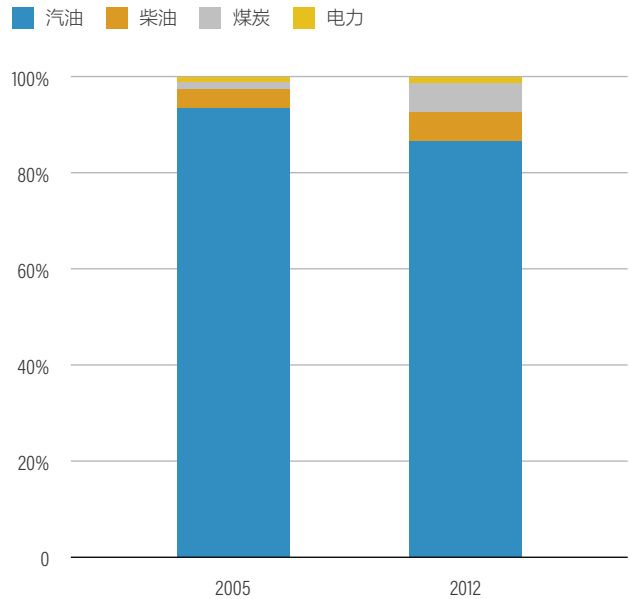
图 15 | 2005年和2012年交通能源消费结构对比

货运行业



数据来源：李忠奎等，中国交通低碳发展战略研究，2017

城市客运



几年逐渐提升。随着铁路电气化、城市轨道交通的快速发展，以及新能源交通工具的推广，电力消费稳步提升，但由于其相较于其他能源消耗增长速度缓慢，因而在整体行业能源消费中的占比上升趋势不太明显。

分行业来看，各类交通方式的能源消费结构也呈现显著的特征。根据相关研究（李忠奎等，2017），中国货运行业能源结构中，柴油占比最大，其次为燃料油，电力所占比例较小；在城市客运交通中，汽油则是最主要消耗的能源。2005年和2012年交通能源消费结构对比如图15所示。

综上所述可以看到，客运和货运交通对传统化石燃料仍然高度依赖，因此也相应具有较大的减排潜力。约束传统燃油交通工具的增长、推动能源结构的改变、减少传统能源的使用是实现交通领域净零排放的必经之路，多个国家（如法国、荷兰、德国）都公布了禁售燃油车时间表。中国也在展开相关研究，能源与交通创新中心的研究（安锋等，2019）提出中国有望在2050年实现传统燃油车的全面退出。

减少燃油车的使用意味着需要大力推进新能源或清洁能源的发展。优化交通运输的燃料结构是大趋势，改善交通能源上游消费结构、推广清洁能源是中国城市交通发展的主要方向。本文已在2.2.5节中从提升能源使用效率的角度论述了推广新能源交通工具的重要性，本节将主要关注

不同类型的新型能源。新型能源是在现用燃料基础上发展的代用燃料，如醇类（甲醇、乙醇）等液体代用燃料，压缩天然气（CNG）等气体代用燃料，以及驱动装置电气化后所依赖的电力，这些燃料大都属于清洁能源。能源清洁化是具有深远影响的技术转变，能从本质上减少交通对传统燃料的依赖、最大限度地降低排放，从而更好地服务可持续发展的交通体系。

城市应结合自身资源禀赋及发展条件，考虑不同新型能源的未来消费潜力。例如，成都地区天然气资源丰富，适宜发展CNG、LNG交通工具，而对于资源有限的地区，可考虑直接加大电力、氢燃料的消费占比。后文将围绕城市可以考虑的新型能源介绍分析思路。

天然气

天然气在交通工具中的应用主要有压缩天然气（CNG）和液化天然气（LNG）两种形式。CNG是气态的，目的是在有限的空间内压缩更多标准体积的天然气，从而提供更持久的运输动力，一般用于城市中的小型车辆。LNG是液态天然气，压缩比例更高，有限空间内可以存储更多的天然气，因而适合中远距离运输。目前，CNG和LNG汽车技术发展已较为成熟，发动机和整车都已实现商品化，已处于市场大规模应用的阶段。

天然气作为相对清洁的化石能源，对传统交通工具的排放效果改善很显著。例如，深圳市大力推动LNG在中重型货运车辆中的应用，从2013年开始陆续投入使用LNG混凝土搅拌车。在使用LNG车替代柴油车后，不仅经济效益明显，平均单车每年节约燃料成本9.07万元，且可以大幅降低车辆的尾气排放，减少环境污染。其中，一氧化碳减排90%以上，碳氢化合物减排70%以上，氮氧化物减排40%左右，二氧化碳减排60%以上，二氧化硫减排90%，细颗粒物排放几乎为零，社会效益明显⁶²。

除了道路交通，我国也在积极推动LNG在水路运输中的应用。交通运输部2018年8月发布的《关于深入推进水运行业应用液化天然气的意见（征求意见稿）》中，明确了LNG在我国内河船舶、江海直达船舶中的优先使用地位，到2025年新建公务船舶应用LNG比例达15%以上，部分内河水域新建内河和江海直达船应用LNG比例达10%以上。此外，中国作为缔约国之一的《国际防止船舶造成污染公约》（MARPOL公约）中“2020年前全球海域的燃料中硫含量占比不得超过0.5%（严控区不超过0.1%）”的严格规定，也为LNG技术在水运领域的发展提供了更有利的条件。

虽然天然气的应用无法实现零碳排放，而且推广过程中仍存在一定的阻碍，例如天然气供给水平不稳定导致无法保持燃料的经济优势，因而其在水运市场发展动力不足等，但天然气对于改善交通领域（尤其是远距离交通运输领域）能源和排放结构的意义重大，是在实现交通净零排放的进程中作为过渡阶段必不可少的环节。

目前，针对天然气的发展目标，现有研究大多是对整个行业的前景做出预判、提出建议，且有不同的参考资料。城市可参考行业的预测数据，结合经济、技术等方面的实际情况，对天然气在交通运输领域中的消费提出合理的目标，共同提高天然气在能源消费结构中所占的比重。以国家发展和改革委员会能源研究所主编的《重塑能源：中国》交通卷为例，通过构建两种不同的发展情景，结合

数据分析，提出了天然气在交通运输领域的应用前景，见表12。2030年基准情景下天然气消费占比可达6.5%，若需要采取更激进的措施以达到深度减排情景的要求，则应继续提高天然气的消费占比，可达到10%的水平。到2050年，随着社会经济的进一步发展和减排工作的深入开展，天然气的消费占比也将得以提高，以实现更严格的发展目标。基准情景下，其占比将从6.5%增加到13%，而在深度减排情景的要求下，可提高到21%。可见，随着应用难题的逐步攻克和减排目标的不断趋严，天然气作为清洁能源中的一种，其消费占比将逐步提高。各城市可参考前文提出的预测数据，合理安排和规划天然气在城市交通领域能源消费中的占比，提出切实可行的方案。

电力

随着电气化时代的到来，电力的应用会更加广泛。然而如果城市的发电结构仍以传统的煤电为主，而不转向清洁的能源，提升交通领域的电动化占比也并不能改善城市的能源消耗与排放情况。因此，城市在展开交通碳排放研究时也需要考虑本地电力生产及消费的情况。

有关城市未来各出行方式的用电占比情况：

- 铁路运输未来电气化水平会不断提升，《铁路“十三五”发展规划》中预计到2020年我国铁路电气化率将达到70%。事实上，有的城市目前已主要以电力机车为主，如中国铁路成都局集团有限公司电气化水平已达到94.5%⁶³，未来会逐渐向100%靠拢，而有的城市由于地理条件等因素的限制，电气化水平还有待提升，但铁路发展的趋势是未来内燃机车占比会不断减小。因此，城市应根据各地铁路部门的规划适当调整电力占比水平。
- 水路运输中电力应用主要集中在短途客运、轮渡及景区游览船舶，应用规模相对较小，目前还有待更多的技术研发及推广，因此在基准情景下可以暂不考虑。但在其他情景下，应考虑到电动船舶未来也可以具备一定的商业规模，

表 12 | 天然气消费占比发展趋势

情景	2017年	2030年	2050年
基准情景	3.9%	6.5%	13%
深度减排情景	3.9%	10%	21%

参考资料：《重塑能源：中国》交通卷

中国也在不断研发大功率电动船舶，早在2015年就设计了500吨级纯电动驱动内河航运货船，2017年又成功吊装下水了全球首艘2000吨级纯电动散货船⁶⁴。因此，课题组建议城市视需要可以适当增加一定的水路运输电力占比。

- 航空运输中，目前电动飞机也逐渐成为了航空公司和创业公司关注的热点，例如，西门子公司与空中客车公司于2016年签订了航空电气化项目，计划在2030年之前要实现混合动力驱动系统在百座左右客机上的应用，并且在此之前为电动商业客机规划好航线网络⁶⁵。目前，相关技术还仅仅处于研发阶段，离实现大规模、远距离的商业应用还存在较大的差距⁶⁶。因此，仅建议城市在探索非常激进的减排手段时，可以在远期的航空运输用能结构中增加一定的电力占比。
- 公路运输中，新能源汽车的广泛应用是未来发展的主要趋势，同时也应注意低速电动车、电动自行车的发展态势，其在城市交通出行方式中的地位也不可小觑。虽然目前对此类出行方式的统计还不完善，但根据中国自行车协会的数据，中国目前电动自行车保有量达2.5亿辆左右⁶⁷，且未来还将有迅猛的发展。因此，随着电动车对其他出行方式的替代，电力消费占比会不断增加。

在确定了交通能源消费中电力结构占比后，则需要对城市自身的发电结构展开分析。不同的发电结构对应不同的电力排放因子，因而会影响电力的清洁程度。对于电力净调出城市，主要受到本地发电结构（即不同能源占比）和发电机组用能效率这两个参数的影响；而对于电力净调

入城市，则还需要考虑外调电比例及区域电网排放因子的变化。因此，城市应首先参考本地及所属区域的能源发展规划、电网规划等资料，其次可以参考行业的发展水平。相对来说，针对本地未来电力行业发展的研究比较少，而针对中国整体电力行业的研究较多。关于发电结构，国家能源局公布的《能源生产和消费革命战略（2016—2030）》提出到2030年非化石能源发电量占比力争达到50%；《重塑能源：中国》预计中国2050年非化石能源占发电行业能源消费量的83%；国家发站和改革委员会能源研究所在“中国2050年高比例可再生能源发展情景暨途径研究”⁶⁸中预测，2050年非化石能源占发电行业能源消费量的91%，可再生能源发电占比86%。因此，城市可以参考这些研究成果中给出的比例水平。有关发电机组的用能效率所影响的度电标煤耗水平，随着发电机组技术的进步，运行效率不断提升，因此度电煤耗会不断下降。《电力发展“十三五”规划（2016—2020年）》要求到2020年全国所有现役电厂每千瓦时平均煤耗低于310克、新建电厂平均供电煤耗低于300克。《2015—2030年电力工业发展展望》提出2030年供电煤耗降到300g/kWh以下⁶⁹。因此城市供电煤耗可以参考行业平均水平，于2020年达到310g/kWh，2030年达到300g/kWh。后续年份可以根据城市本地历史能效提升的速率，相应调整供电煤耗水平，如假设2030年后每年提升0.5%，2050年则达到271g/kWh。达峰情景下，假设2020年机组达到现役和新建机组的平均标准水平，即305g/kWh，2030年相应减少10g/kWh，2030年以后在295g/kWh的基础上每年提升0.5%，2050年将达到267g/kWh，见表13。事实上，国内目前已具备百万千瓦超超临界机组供电煤耗达到256.2g/kWh的世界领先水平⁷⁰，因此假设深度减排情景下2050年中国机组的平均供电

表 13 | 电力排放因子参数参考值

参数	情景	2020年	2030年	2050年
非化石能源占比 (%)	基准情景	30%	50%	70%
	达峰情景	32%	55%	80%
	深度减排情景	35%	60%	90%
供电煤耗 (g/kWh)	基准情景	310	300	271
	达峰情景	305	295	267
	深度减排情景	300	290	256

煤耗可以达到此先进水平。有关外调电比例及电力调入区域的排放因子，则需要根据历史数据确认本地和调入区域电网的清洁程度，如果调入区域的电网更为清洁，则可以在未来参数设置中适当增加调入电的占比，反之则鼓励减少调入电的使用，而调入区域的电力排放因子也可以根据前文所述进行非化石能源占比和供电煤耗的处理，以进行相应的计算。

生物燃料

生物质能转换而成的生物燃料包括生物质汽柴油、生物航空煤油等，可以直接与传统的汽柴油混合，且不需要对现有交通工具进行改造即可直接加注到油箱中，或者单独在经过改造的车型或机型中使用，具有方便快捷而、节能环保的特点，也是国内外大型石油企业逐渐向能源企业转型的主要发展领域。国际能源署（IEA）在《交通用生物燃料技术路线图》⁷¹中预测，到2050年生物质燃料在全球交通运输业中的占比会达到27%，是2011年的7倍。中国也相继出台了支持生物质燃料发展的政策，2017年发布了《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案》，2019年初发布了《关于在部分地区开展甲醇汽车应用的指导意见》等，在《能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）》中也明确提出了生物质能利用技术创新路线图，未来发展战略的重点是生物航油制取、绿色生物炼制技术、生态能源农场构建等方面。因此，生物质燃料在交通领域中将会越来越受重视，相关技术与政策也会不断完善。

特别地，对于改善重型交通、远距离运输的能耗与排放情况，生物质燃料具有举足轻重的地位。全球能源转型委员会（Energy Transition Commission，2018）提出，未来远距离的水路运输和航空运输要想实现净零排放，必将需要生物质燃料。根据国际民航组织

（ICAO）的测算，航空生物燃料相比传统航空燃料，从全生命周期的角度可以减少80%甚至到100%的二氧化碳排放，具有较好的替代性。因此，ICAO曾提出2025年全球生物航油占航空燃料的比例达到2%，2040年达到32%，2050年达到50%的愿景。然而这一目标在2017年第二次国际民航组织航空代用燃料会议上被否决，因为部分成员国家及组织认为ICAO目标过于激进，目前生物航油的生产和应用还存在较大的争议，如原料供应不稳定、影响粮食供应、打破土地利用平衡、生产成本高于传统航油2~3倍等，所以认为生物航油较难形成大规模的应用。事实上，这也是当下所有不同用途的生物质燃料共同面临的挑战。为了应对以上问题，中国在开发生物燃料的过程中积极探究非粮生物燃料等范围更广的原材料生产技术，中国石化2015年创新性地研发了“变废为宝”的技术，将餐饮废油等转化为航油（中国石化，2015），实现了一举多得的目的。生物燃料对于实现交通领域节能减排的目标是必不可少的，随着技术的发展，其有望也必将实现对传统燃料的大规模替代。

鉴于此，在开展交通领域节能减排的研究中，课题组建议应考虑生物燃料的大力发展，尤其是达峰情景和深度减排情景，应显著增加生物燃料的利用水平。以航空运输为例，基准情景下，虽然中国已成功开展了生物航油的商业载客飞行，但是目前还没有其利用规模的相关规划。例如，《中国民用航空发展第十三个五年规划》中仅提出“积极推进航空生物燃料研发应用”，因此设置其比例时，可在远期适当引入，如在2030年开始达到1%的应用规模。其他情景下，可以参考其他国家、地区或国际组织制定的相关目标。虽然ICAO初期的目标被否决，但普遍认为2025年达到2%的目标是合理可行的（Greenair，2017）。同时，欧盟提出2020年生物航油占比达到3.5%⁷²，挪威提出2019年1%、2030年30%的目标⁷³，德国提出2025年达到10%⁷⁴，印度尼西亚提出2018年2%、2025年5%的目标⁷⁵，

表 14 | 生物航油占比参考值

情景	2020年	2025年	2030年	2040年	2050年
基准情景			1%	2%	3%
达峰情景	1%	2%	5%	25.6%	40%
深度减排情景	1.25%	2.5%	6.25%	32%	50%

澳大利亚提出2050年达到50%⁷⁶，以色列提出2025年20%⁷⁷的目标，美国也提出2018年以后每年应用10亿加仑可再生航空用油的目标，相当于2018年用油量的1.7%⁷⁸。以上各国均展现了对生物航油的积极态度，本研究课题组以此为参考，设定达峰情景可以实现ICAO的2025年短期目标，并实现原2040年、2050年目标的80%，而深度减排情景则可以实现ICAO的远期愿景，见表14。城市也可以在不同情景中自行加大生物航油的消费占比。

氢能源

氢是一种二次能源，是高效清洁的燃料，且来源广泛，可利用太阳能、风能等可再生能源分解水制成；而燃料电池具有转换效率高、有害气体排放极少等特点。因此，氢燃料电池被公认为极具发展前景，并且其续航能力强、加氢速度快的特点，也将为其赢得在交通领域施展的广阔发展空间。从美国的《全面能源战略》、日本的《面向2030年能源环境创新战略》、欧盟的《2050能源技术路线图》等能源技术创新计划中都可以看到未来转向氢能源

是大势所趋，且普遍思路为从氢燃料电池入手，直至发展出一套较为完善的氢能源利用体系。因此，氢燃料将是交通运输清洁高效发展的重要驱动力。

当前，氢燃料发展的技术难题在于氢气的制备、储存工艺等，以及现有的加氢站数量少，截至2019年1月，中国已建和在建的加氢站仅有44所⁷⁹，再加上氢燃料电池寿命短、成本高，氢燃料电池汽车至今还没能进入较为成熟的商业化推广阶段。但是，根据国家能源局印发的《能源技术创新行动计划（2016-2030年）》，中国提出了明确的氢能源及燃料电池技术创新路线图，其中涉及交通领域的发展路径见表 15。可以看到，目前氢燃料的发展仍处于技术攻坚阶段，围绕基于可再生能源及先进核能的制氢技术、分布式制氢技术、储氢材料装备等关键问题进行研究开发与开发；但展望到2030-2050年，将可以达到预期，实现氢能和燃料电池的普及应用。此外，目前氢能已在工业部门实现了规模化应用，因此，随着技术的进步与优化，氢能在交通领域的发展指日可待。氢燃料电动汽车有望在中远期引领交通领域的变革，为减少交通领域100%的污染物及碳排放作出重要的贡献。

表 15 | 氢能创新路线图

时期	2016-2020年	2020-2025年	2025-2030年	2030-2050年
创新阶段	集中攻关	实验示范	应用推广	达到预期
预期成果	氢的制取、储运及加氢站			
	大规模制氢技术	实现交通部门的革命性减排，并推动战略性新兴产业发展		
		突破制氢关键技术		
		开展新一代煤催化气化制氢和甲烷重整/部分氧化制氢技术		
	分布式制氢技术	电解池寿命超过5000h，实现数十立方米每小时的可再生能源电解水制氢示范和推广应用		
	氢的储运技术	实现可再生能源大规模制氢、储存、运输、应用一体化，实现加氢站现场储氢、制氢模式的标准化和推广应用		
	先进燃料电池			
	PEMFC技术	接近质子膜燃料电池的操作温度、储氢容量高于5wt%的储氢材料技术。实现长距离、大规模液态氢储存与运输技术		
	MFC技术			

参考资料：《能源技术创新行动计划（2016—2030年）》

目前有关交通领域能源应用的研究中，仍相对较少地提及氢能源的推广使用，但是也有部分城市已超前将其纳入发展计划中，体现了使用氢能的决心。以广州市为例，在《广东省交通运输节能减排“十三五”发展规划》和《广州市综合交通发展第十三个五年规划》中明确提出要推进氢燃料车辆的试点示范，并将氢能纳入未来广州市公路货运的能源类型中。因此，2018年开展的广州市交通运输领域低碳发展路径研究中纳入了氢燃料应用的分析，提出了不同情景下的使用情况。在达峰情景下，预计2030年氢燃料车辆在公路客货运中的占比将达到2%左右，而到2050年时，该比重将高达20%，见表16。在深度减排情景下，公路货运中氢燃料车辆的占比甚至有望达到30%，与此同时，在公路客运中氢燃料客车辆数预计占比为20%以上。从这些数据可以看出，广州市对于氢能在交通领域的发展十分重视，并且将努力实现以上目标。其他城市也可以此为参考，分析预测氢能源在本城市的应用前景，并制定合理的规划，努力转型成为低碳交通城市。

综上所述，新能源在交通运输领域的应用水平是新能源交通工具产业链、相关政策、环境压力、与替代能源的竞争等多重因素共同作用的结果。国务院2014年发布的《能源发展战略行动计划（2014—2020年）》中强调坚持煤基替代、生物质替代和交通替代并举的方针，通过加快发展纯电动汽车、混合动力汽车和船舶、天然气汽车和船舶等，扩大交通领域燃油替代的规模。推动清洁能源在交通领域的使用，除了关注交通工具本身的研发与生产，政府及行业还应采取其他有效措施保障基础设施建设，并结合经济及市场手段刺激相关产业的发展。例如，影响电动车使用的一个主要挑战是充电设施的便利性，政府及行业应确保商用、民用电动车充电设施的普及及规范。这不仅需要行业尽快制定如统一充电接口等相关的标准，更需要地方政府发展广泛的融资机制及商业模式，满足清洁能源汽车基础设施建造的资金需求（中国清洁空气联盟，2014）。对于消费者主动选择使用新能源的积极性这一挑战，更离不开地方政府的引导，可通过财税补贴政策、新能源阶梯价格机制等刺激消费者转向新能源的应用。

表 16 | 广州市氢能源占交通行业能源消费量比重参考值

情景	投入使用时间	2030年	2040年	2050年
基准情景	未考虑			
达峰情景	2026年	公路客货运中 均占2%	公路客货运中 均占10%	公路客货运中 均占20%
深度减排情景	2023年	公路客货运中均 占4%	公路客货运中均 占18%	公路客货运中均 占30%

参考资料：广州市交通运输领域低碳发展路径研究成果
注：由于行业资料相对较少，较难提炼出行业通用的氢燃料消费目标值，因此仅分享案例城市数据供参考。





第三章

实现交通净零排放的关键举措

3.1 传统交通政策措施

全球必须在本世纪后半叶实现二氧化碳净零排放，达成《巴黎协定》的目标，这已是大多数政策制定者和学者的共识。而要实现这一目标，国家、地方、行业均应尽早制定相应的中长期发展战略及具体的行动路线图，这其中也应包括交通行业实现净零排放的行动路径，从而作为未来发展的指导依据。

目前已有部分国家和地区提出了交通净零排放路径图，一些研究机构也围绕净零排放开展了相关研究。例如，**英国交通部**于2018年出台了“**The Road to Zero（零排放之路）**”发展战略，提出了英国道路交通的净零愿景，即到2040年所有新增车辆能够有效实现零排放，到2050年所有道路车辆实现零排放。英国交通部期待此项转型将由行业及消费者主导，并受到政府相关政策的支持，具体措施见表 17。**美国旧金山市**于2019年提出了全市重点行业实现净零排放的路径，根据研究，其交通行业到2050年相比于基准情景可减排81%，其中交通运输结构、模式转换贡献41%，能源转换贡献40%，同时其道路交通是可以实现净零排放的。然而，剩余19%的排放主要来自远洋船舶和非道路（机械）交通工具，因为以上交通行为不完全受市政府管理，而需要依靠区域的合作联控与行业的技术发展。**能源转型委员会**于2018年发布的报告《可完成的使命：到本世纪中叶实现难减排行业净零碳排放》将视角放在了重型道路货运、航空运输和水路运输实现净零排放的发展路径，明确提出公路运输以及短距离航空

运输和水路运输主要依靠电动化，而长距离航空运输和水路运输则主要依靠生物燃料、氢燃料、合成燃料等零排放燃料，以实现零碳排放。

除此之外，围绕交通低碳发展、尽早达峰、深度减排的研究已经很多。例如，国际能源署（IEA）于2010年提出的交通BLUE路线图旨在实现全球2050年相比2007年降低50%的二氧化碳排放，德国国际合作机构（GIZ）于2014年详细总结了可持续低碳交通的政策工具，欧盟于2016年提出了提升交通系统效率、加速应用低排放可替代燃料、转向零排放交通工具三大低排放交通战略。

结合现有交通行业的主流研究，以及针对中国交通低碳发展的研究（如交通运输部科学研究院开展的中国交通低碳发展战略研究），世界资源研究所开展的不同城市的交通碳排放达峰路径研究中的结论，课题组汇总整理了交通领域主要的节能减排政策措施（见表 18）。城市在基于第二章分析框架探索交通净零排放路线图时，可加强或减弱有关措施的实施强度，并相应调整关键参数的设置。

政策、措施的实施需要考虑多方面因素，包括减排效果、时间周期、管辖权、协同效应等。减排效果即识别对实现净零排放的贡献程度。时间周期即为了实现净零排放，建议实施各项措施的时间安排，需识别是近期（至2025年）、过渡期（至2035年）还是远期（至2050年）应开展的手段，反映了政策措施实施的紧迫性与优先性，因为有些减排措施可能近几年有效，未必对未来有效，有些手段目

表 17 | 英国交通部道路交通零排放战略

车辆供给与需求侧	
减少路上已有交通工具的排放	· 提升低碳能源品种的使用 · 对现有车辆进行技术改造 · 改变驾驶行为
确保新增车辆的清洁度	· 出台相关规章制度确保新能源汽车行业发展 · 提供金融刺激 · 确保企业与消费者间的信息互通 · 政府用车零排放先行
减少重型货车的排放	· 近期通过改进车辆技术减少排放 · 发展替代能源（天然气、生物质燃料） · 长期发展零排放车辆技术（电动、氢能源）
设计和制造零排放车辆	· 加大创新研发 · 搭建国内外产业链
基础设施层面	
拓展电动车基础设施网络	
发展氢能源	
提升各级领导力	

前城市还不具备实施条件，因此需要在远期开始实施。管辖权即明确是否为地方政府可以管控的措施，还是需要区域联控，或者行业层面的管理。同时还应明确政策措施的实施管理机构，如交通部门、城市规划部门、住建部门、能源部门等。

在众多措施中，减排潜力较高的为发展多式联运、推广节能技术与管理优化、提升燃料品质、采用新能源。其次，优化城市规划、优化货运运输（如货运甩挂等）、推行公交优先、实施低碳交通标准（如排放标准、油耗标准等）、推广天然气⁸⁰都将起到一定的作用。同时可以发现，行业主导的政策措施的减排潜力普遍高于城市政府主导的本地化措施的减排潜力。例如，推广节能技术与管理优化、采用新能源、提升燃料品质均有赖于交通行业的整体技术性突破，由行业协会、行业研究院所主导，不受地域限制；而城市主导的政策措施则主要面向城市自身发展方向转变，如优化城市规划、管理市内交通需求等。因此，城市在开展路径分析时，应在深度减排情景中大力发展减排潜力大的措施，并参考行业发展的最先进水平设置相关参数。

3.2 补充手段：碳吸收与市场机制

另外值得注意的是，城市在实现交通净零排放的道路上，除了要依赖交通行业的传统减排措施，也需要与其他创新手段相结合，保证余量排放的消除。

一是借助碳吸收手段。事实上，在实现各行业全面利用非化石能源的愿景之前，为了实现净零排放目标，除碳技术是不可或缺的。一方面，尽管新能源汽车的应用普及率到2050年会大幅提高，但燃料类交通工具（包括燃料型汽车、船舶、飞机）仍然存在。因此，对于传统燃料型交通工具的碳排放，未来可以尝试采用尾气过滤装置技术实现碳去除。这种装置主要通过物理手段和化学手段相结合，减少交通工具尾气中的碳排放。虽然这类尾气过滤装置目前还未进入大规模生产及商业化应用阶段，但其对于实现交通净零排放的意义是显著的，并具有良好的应用前景。另一方面，对于电力驱动的交通工具有，如前文所述，需关注上游电力生产的清洁度。因此，针对化石能源发电过程中的能源消耗所产生的碳排放，也应采用碳吸收技

表 18 | 交通净零排放措施潜力评估

序号	措施	措施类型	监管层面	主要实施机构	时间安排	减排效果	影响参数
1	优化城市规划	政策	城市	城市建设管理部门、 城市规划和自然资源部门	近期	中等	周转量、年平均 行驶里程
2	管理市内 交通需求	政策	城市	城市交通运输部门	近期	较低	汽车保有量、 运输结构、 客货运周转量
3	设立低排区	政策	城市	城市交通运输部门	中期	较低-中等	周转量、年平均 行驶里程
4	推行公交优先	政策	城市	城市交通运输部门	近期	中等	汽车保有量、 运输结构、 年平均行驶里程
5	鼓励共享出行	政策 +技术	城市	城市交通运输部门	近期-中期	较低-中等	汽车保有量、 运输结构
6	优化货运运输 (货运甩挂等)	技术	行业	城市交通运输部门	近期	中等	货运周转量
7	发展多式联运	政策	城市 +行业	城市交通运输和港口 管理部门、铁路部门	近期	中等-较高	货运周转量、 运输结构
8	发展新能源交通 工具	政策 +技术	城市 +行业	城市经济和信息化部门、 城市交通运输部门	近期	较高	汽车保有量、 能源效率
9	推广节能技术与 管理优化	技术	城市 +行业	城市发展和改革部门、 城市交通运输部门	近期	中等-较高	能源效率
10	提升燃料品质	技术	行业	城市交通运输部门	近期	中等-较高	能源效率
11	实施低碳交通标 准(排放标准、 油耗标准等)	政策	城市	城市交通运输部门	近期	中等	能源效率
12	鼓励绿色 驾驶行为	政策	城市	城市交通运输部门	近期	较低-中等	能源效率
13-16	采用新能源			城市发展和改革部门、 城市生态环境部门、 城市能源部门			
13	推广天然气	技术 +政策	城市+ 行业		近期	中等	能源结构
14	推广高比例 可再生电能		城市 +区域 +行业	电力企业	中期-远期	较高	
15	推广氢燃料		行业		中期-远期	较高	
16	推广生物质燃料 (及合成燃料)		行业	民航部门	中期-远期	较高	

注：减排效果的评判标准是实现交通净零排放的减排贡献程度。通过总结各研究的相关测算，减排贡献程度可分为较低（小于城市总减排量的 5%）、中等（城市总减排量的 5% ~ 20%）或者较高（大于城市总减排量的 20%，一般较少出现单项措施减排贡献程度高于 50% 的情况）。

术，即碳捕获与封存（CCS）技术以实现净零排放。CCS技术被认为是目前唯一能够实现化石能源利用中二氧化碳大规模减排的有效技术，到2100年，没有CCS技术的化石燃料发电可能会被完全淘汰⁸¹。CCS技术在中国目前尚以示范项目的形式存在，未步入大规模应用阶段，但其在中国存在着巨大的发展潜力。虽然交通领域并无法直接应用CCS技术，但化石能源发电辅以CCS技术所提供的清洁电力对于交通领域至关重要。

二是关注交通行业与碳市场等经济激励政策的结合。碳价机制是当前兴起的控制温室气体排放的经济手段，一般有碳税和碳交易市场两种形式，“碳价较高的国家均实施碳税，而碳价较低的国家地区则是碳交易市场”⁸²，中国则主要采用碳交易市场形式。应用碳排放权交易市场推动交通领域的减排工作也是目前很多国家和地区正在开展的一项前沿工作，可以影响交通领域的出行需求、能效水平等多个方面。欧盟早在2012年正式将航空业纳入碳排放交易的范畴；美国加利福尼亚州于2015年正式将燃料供应企业纳入碳交易的框架之中；中国的碳交易试点城市中，上海和北京率先在2016年前后将部分交通部门纳入碳交易体系，其中上海主要为航空、港口行业，北京包括轨道交通等移动排放源。通过碳排放交易，交通运输企业将自发地争取减少排放，从而避免较高的交易成本。据统计，欧盟航空碳交易体系每年可贡献超过1700万吨二氧化碳的减排量。⁸³虽然该政策在中国的系统性评估还没有完成，但从目前已有的欧洲航空碳交易的经验来看，交通行业碳市场具有一定的推广意义，将会为城市带来进一步的减排契机。







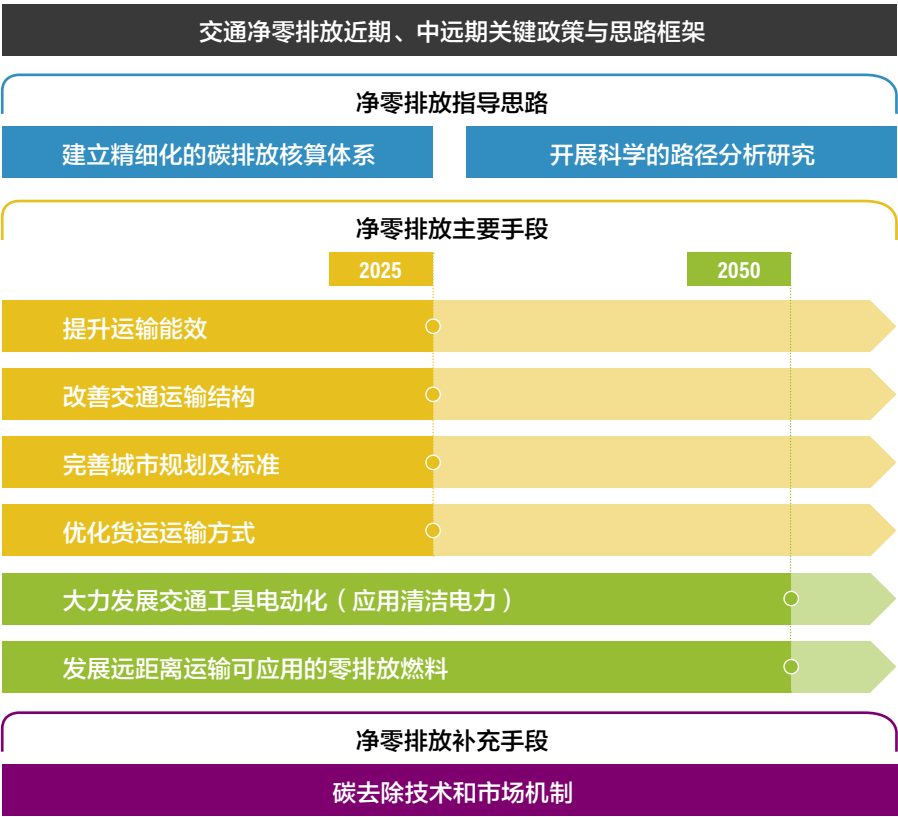
第四章

未来交通净零排放的对策建议

为了更好地制定城市本地的交通发展方案，城市应首先在近期加强基础能力建设，建立精细化的碳排放核算体系，开展科学的路径分析研究，为实现交通领域净零排放目标奠定重要的理论基础。

在此基础上，结合前文路径分析思路，城市应主要关注以下影响城市交通行业实现净零排放的关键驱动力与主要举措（见图16）：

图 16 | 对策建议示意图



4.1 近期（至2025年）

提升运输能效。近期内，城市应侧重各类交通运输方式的节能手段，以提升运输能效。虽然节能技术主要由交通行业主导，且其发展空间有限，但是城市仍可以鼓励交通领域的龙头汽车制造商等企业自主研发、不断改进工艺流程，鼓励交通运输单位不断完善管理、提升交通运行效率。

改善交通运输结构。其次，城市应注重改善交通运输结构，且以推广货运多式联运、倡导市内公交优先为主。城市一般较易推行此类措施，可以通过规划或者行政命令手段进行调控，并且实施成本也相对较低。事实上，结构调整与转移也会直接影响交通活动水平，一般体现在汽车保有量及其年均行驶里程上的变化，且其比单纯控制交通需求（如通过限购方式控制汽车保有量和通过限行方式控制出行距离）具有更大的减排潜力。因此，**这是近期城市可以采取的实现交通领域净零排放最主要的驱动措施。**

完善城市规划及标准。城市还可以通过制定具有前瞻性的城市规划并结合低碳出行标准，全面深化交通领域的减排潜力。此类措施成本低，且易于管控，但是应注意到，城市在提出实现净零排放路径的时候，现在的决策将影响后续多年的情况，因此最重要的是要避免政策措施的“锁定效应”，尤其是基础设施相关的措施。交通领域中城市规划往往容易出现锁定效应，例如，城市在开展街道规划和设计时，如果仅考虑道路汽车的便利性，给予更多的路权，则将导致后期道路交通的大量排放及其他相关问题。因此，城市规划应统筹考虑多重因素，如交通安全性、便利性、通达性、低碳性等，尽量做到“无悔”选择，否则一旦施工建设完成，后续如需改造，将产生高额成本并给民众生活带来诸多不便。

优化货运运输方式。优化货运运输方式包括采取公路货运甩挂运行、应用更高品质的燃料等技术类措施。这些措施主要是交通行业的同质化行为，城市管控度较小，且技术类措施成本一般会较高，但是如果不实施此类措施，城市近期的减排空间将会缩小。因此，城市应与行业紧密合作，共同推进该类措施的全面应用。

4.2 中远期（至2050年）

大力发展电动化交通工具。虽然电动化主要是城市内交通，包括乘用车领域、公共交通、城市物流和轨道交通的发展趋势，但是公路、水路和航空的短距离城际运输也将可以大规模应用电动化交通工具。实现净零排放，不仅需要城市全面推广交通工具的电动化，同时很大程度上依赖于电网的清洁程度，而这应是城市、区域和行业共同努力的结果。目前，全球已有40多个城市发电应用了100%的可再生能源⁸⁴，因此城市有能力管辖本地的发电结构。然而，有些城市本地供电无法满足自身需求，需要外调电力，这就需要城市与周边省市和行业协作，不断提高区域电网的可再生能源发电占比。事实上，还有些城市由于受到多方面条件的制约，即使到2050年也难以实现100%的清洁电力，仍会有一部分电力来自于传统的化石能源，因此，这部分火力发电就将需要结合CCS技术，使发电过程中所产生的二氧化碳排放被相应捕获与利用，从而保障净零排放的实现。随着相关配套措施及技术的不断完善，高昂的实施成本也将下降到城市和民众可以接受的范围之内，因此，**电动化将会是中远期内实现交通领域净零排放最主要的推手。**

发展远距离运输可应用的零排放燃料。对于远距离运输，包括公路运输、水路运输及航空运输，其实现净零排放将主要依靠氢燃料、生物质燃料和合成燃料的应用，同时生物质燃料与合成燃料的生产需要零碳原料。这些新型燃料应用的可行性都得以证实，目前存在的主要问题是原材料的供应量和成本问题，即能否支撑整个行业传统燃料的替换。虽然城市对于这类措施的话语权较弱，主要依赖于行业与市场的供给能力，但也可以通过鼓励本地科研院所加强相关领域的研究、突破瓶颈，鼓励本地交通运输行业率先应用新型燃料，加快该类措施的实施进程。

综上，中远期主要是通过优化能源结构、搭配使用不同的清洁能源来实现交通领域各类运输方式的净零排放。城市应紧密关注交通行业、能源行业的整体发展，以行业发展驱动城市减排。但城市仍应注意到政策措施的“锁定效应”，全面推广电动化或者清洁化能源虽然解决了环境问题，但是城市交通拥堵仍将是较大的挑战。因此，城市还需结合近期手段综合管理，运输结构调整、城市规划及低碳出行标准都具有改善交通拥堵、提升出行安全等其他协同效益。



hydrogen
bus

TOWER GATEWAY
RV1 78 42

30

参考文献

1. Climate Action Tracker. 2017. <https://climateactiontracker.org/publications/improvement-warming-outlook-india-and-china-move-ahead-paris-agreement-gap-still-looms-large/>
2. UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. 2015. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
3. IEA. Energy Technology Perspectives 2017. 2017. <https://www.carbonbrief.org/iea-world-can-reach-net-zero-emissions-by-2060-meet-paris-climate-goals>
4. IEA. World Energy Outlook 2018. 2018. <https://www.iea.org/weo2018/>
5. Energy Innovation. 2019. US Policy Solutions. <https://us.energypolicy.solutions/scenarios/home>
6. 蒋小谦、奚文怡、房伟权等. 武汉市交通碳排放达峰路径研究. 2019. 北京: 世界资源研究所.
7. Lefevre, B., A. Enriquez. Transport Sector Key to Closing the World's Emissions Gap. Blog: World Resources Institute. 2014. <https://www.wri.org/blog/2014/09/transport-sector-key-closing-world-s-emissions-gap>
8. 高德地图、中国社会科学院等. 2018年度中国主要城市交通分析报告. 2019.
9. 中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告. 2016. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/201904/P020190419522735276116.pdf>
10. 张树伟、姜克隽、刘德顺. 中国交通发展的能源消费与对策研究[J]. 中国软科学, 2006(05): 58-62.
11. 欧阳斌、凤振华、李忠奎、毕清华、周艾燕. 交通运输能耗与碳排放测算评价方法及应用——以江苏省为例[J]. 软科学, 2015, 29(01):139-144.
12. 周乃杰. 公路运输节能降耗发展策略研究[J]. 黑龙江科技信息, 2017(14):251.
13. 侯珏. 水运行业节能减排现状及发展趋势分析[J]. 交通节能与环保, 2017, 13(01):9-13+22.
14. 国家发展和改革委员会、国家能源局. 能源技术革命创新行动计划(2016—2030年). 2016. http://www.nea.gov.cn/2016-06/01/c_135404377.htm
15. 王颖、宋苏、邱诗永等. 拥堵收费和低排放区国际经验研究. 2016. 工作报告, 北京: 世界资源研究所.
16. 邱诗永、宋苏、王颖等. 北京低排放区和拥堵收费政策减排效果方法研究. 2018. 工作报告, 北京: 世界资源研究所.
17. 北京交通需求管理政策. 亚洲开发银行. 2017.
18. 李忠奎、周晓航、郭杰等. 中国交通低碳发展战略研究. 2017.
19. 安锋、康利平、秦兰芝等. 中国传统燃油汽车退出时间表研究. 能源与交通创新中心(ICET). 2019.
20. Department for Transport (英国交通部). The Road to Zero: Next steps towards cleaner road transport and delivering our Industrial Strategy. 2018.
21. San Francisco Department of the Environment (旧金山市环境局). Focus 2030: A Pathway to Net Zero Emissions. 2019. https://sfenvironment.org/sites/default/files/fliers/files/sfe_focus_2030_report_july2019.pdf
22. Energy Transition Commission (能源转型委员会). Mission Possible - Reaching Net-Zero Carbon Emissions from Harder-to-Abate Sectors by Mid-Century. 2018.
23. 白尔铮. 费托合成燃料的经济性及发展前景[J]. 化工进展, 2004, 04:370-374.
24. 中国清洁空气联盟. 改善城市交通, 遏制中国空气污染. 2014. <http://www.cleanairechina.org/product/6842.html>
25. 蔡闻佳、王灿、陈吉宁. 中国公路交通业CO2排放情景与减排潜力[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007(12):2142-2145.
26. 方伟、曹学伟、高晓巍. 技术预测与技术预见:内涵、方法及实践[J]. 全球科技经济瞭望, 2017(3).
27. Örjan Lönngren, Charlotta Hedvik and Adi Musabasic. Stockholm action plan for climate and energy 2010-2020. City of Stockholm, 2010. DOI: 10.13140/RG.2.2.10113.45920.
28. European strategies. Commission publishes Strategy for low-emission mobility. 2016. https://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/news/2016-07-20-decarbonisation_en

注释

1. IPCC. Global Warming of 1.5°C. 2018. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
2. 本文后续所指的城市交通，除了包括传统意义上的城市市内交通，也包括与城市活动相关的城际交通，即公路运输、铁路运输、航空运输和水路运输。
Urban transport referenced in this paper includes not only traditional urban traffic, but also the intercity traffic such as long-distance passenger and freight on-road transport, railways, civil aviation and water transportation.
3. 蒋小谦、奚文怡、房伟权等. 武汉市交通碳排放达峰路径研究. 2019
Jiang, X., W. Xi, W. Fong, etc. Wuhan Transport Sector Carbon Emissions Roadmap Study. 2019. http://wri.org.cn/en/Wuhan_Transport_Sector_Carbon_Emissions_Roadmap_Study_EN
4. 成都市与广州市的研究为内部资料，未对外发布。
Studies for Chengdu and Guangzhou are not available to the public.
5. This part is not described in detail in this paper. More information can be found in Technical Guidance for Collaborative Control of Urban Traffic Air Pollutants and Greenhouse Gases, Wuhan Transport Sector Carbon Emissions Roadmap Study and other papers.
6. 国际货币基金组织、中国国家统计局，由EPS全球统计数据库整理
7. 国际货币基金组织、中国国家统计局，由EPS全球统计数据库整理
8. 中国排放数据为2017年数据，世界资源研究所基于《中国能源统计年鉴2018》进行测算
9. NDC (National Determined Contribution)，指的是每个国家为减少温室气体排放和适应气候变化所做的努力。
10. EIA，<https://www.eia.gov/environment/emissions/carbon/>
11. <http://climateactiontracker.org/countries/usa.html>
12. Statista，<https://www.statista.com/statistics/449823/co2-emissions-sweden/>
13. Statista，<https://www.statista.com/statistics/449787/co2-emissions-norway/>
14. <http://climateactiontracker.org/countries/norway.html>
15. 世界银行，<https://data.worldbank.org/indicator/EN.CO2.TRAN.ZS>
16. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0301&sj=2018>
17. http://www.gov.cn/xinwen/2019-01/13/content_5357441.htm
18. http://www.guancha.cn/economy/2017_11_07_433904.shtml
19. 此处的货运交通包括了注册在广州的汽车、火车、飞机、船舶的公路、铁路、水路和航空货物运输。
20. 中国科学院广州能源研究所. 广州市交通运输领域低碳发展路径研究. 2018
21. <https://www.thediscourse.ca/scarborough/full-cost-commute>
22. 北京市生态环境局. 2018年北京市生态环境状况公报. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/resource/cms/2019/05/2019050915390769405.pdf>
23. 2012年交通二氧化碳排放为78863万吨二氧化碳当量，甲烷排放为168万吨二氧化碳当量，一氧化二氮排放为620万吨二氧化碳当量。
24. <http://www.forestry.gov.cn/main/395/content-979039.html>
25. <http://stock.eastmoney.com/news/1437/20170713755775176.html>
26. <https://us.energypolicy.solutions/scenarios/home>
27. 根据数据可获得性确定计算方法，优先利用周转量统计数据计算，没有周转量统计数据则采用保有量相关数据进行计算；一般城市会提供城际交通的周转量数据。
28. 城市轨道交通中的地铁场站能耗（如场站照明）一般纳入固定能源核算中，仅有地铁牵引能耗算作移动源能耗。然而，在搜集部分城市牵引能耗数据时，只能获得地铁站总能耗数据，即包括了牵引能耗和场站能耗，且无法细分。该情况下，可以将总能耗一并纳入城市轨道交通的统计中，但需要加以说明。
29. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1607967702026326398&wfr=spider&for=pc>
30. 根据OECD数据库历年GDP预测值推算五年平均增速. <https://data.oecd.org/gdp/gdp-long-term-forecast.html>
31. <http://www.worldbank.org/en/publication/global-economic-prospects>
32. 国际能源署的《世界能源展望2017》、《能源技术展望2017》<https://www.iea.org/etp/etpmodel/assumptions/>
33. 《北京市汽车限行的环境和经济效益分析》赵峰侠，徐明，齐晔
34. 深圳市道路交通管理中心https://www.szrtc.cn/infoopened/hot-news/201504/20150423_1602186.html
薛博，深圳市停车发展对策与实践，深圳市都市交通规划设计研究，2015

35. 筛选方法可以规定：首先，根据F检验和t检验对模型进行统计学上的筛选，选取的显著性水平为95%。其次，根据自变量与因变量之间关系进行合理性上的筛选。例如，一般认为城市经济发展水平提升，交通运输水平也会提升，如果两者系数为负数，则认为两者间的回归结果存在一定的不合理性。最后，根据R²大小进行可信度上的筛选，一般选择R²较高的模型。
36. 目前车辆保有量主要指汽车和摩托车，摩托车主要指机动摩托车，未考虑电动摩托车，这是因为目前城市统计口径中还未纳入电动摩托车/自行车保有量的统计。很多城市从2018年才开始实施电动摩托车/自行车牌照制度，随着交通管理部门统计工作的完善，城市后期也应纳入电动摩托车/自行车保有量的统计。
37. Tang B J, Wu X F, Zhang X. Modeling the CO₂ emissions and energy saved from new energy vehicles based on the logistic-curve[J]. Energy Policy, 2013, 57(6):30-35.
38. 按武汉市常住人口除以户籍总户数所得。
39. McGuckin, N., & Fucci, A. (2018). Summary of Travel Trends: 2017 National Household Travel Survey. Retrieved from https://nhts.ornl.gov/assets/2017_nhts_summary_travel_trends.pdf
40. 法律图书馆. (1981). 北京市人民政府关于公布《北京市道路交通管理暂行规则》的通知. Retrieved November 1, 2019, from http://www.law-lib.com/law/law_view.asp?id=155493
41. 北京市人民政府. (1987). 北京市道路交通管理规定. Retrieved July 28, 1988, from http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201905/t20190522_56440.html
42. 北京市人民政府. (1992). 北京市机动车和机动车驾驶员管理暂行办法. Retrieved November 1, 2019, from http://www.beijing.gov.cn/zhengce/gfxwj/201905/t20190522_56269.html
43. 北京市人民政府. (1997). 北京市机动车和机动车驾驶员管理办法. Retrieved November 1, 2019, from http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201905/t20190522_56390.html
44. 北京市大兴区人民政府. (2018). 北京市大兴区人民政府关于对部分机动车采取交通管理措施降低污染物排放的通告. Retrieved November 1, 2019, from <http://www.bjdx.gov.cn/bjdxqrmzf/zfwf/zcwj/zfwj/634316/index.html>
45. Heinrichs D. (2016) Autonomous Driving and Urban Land Use. In: Maurer M., Gerdes J., Lenz B., Winner H. (eds) Autonomous Driving. Springer, Berlin, Heidelberg
46. Litman, T. (2019). Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning. In Victoria Transport Policy Institute. Retrieved from <https://www.vtpi.org/avip.pdf>
47. Bischoff, J., & Maciejewski, M. (2016). Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin. Procedia Computer Science, 83, 237-244. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2016.04.121>
48. http://www.sohu.com/a/242390189_118392
49. http://www.sohu.com/a/21709527_114771
50. <https://wenku.baidu.com/view/b73fea124afe04a1b171de74.html>
51. 国家发展和改革委员会等. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201812/t20181229_924878.html
生态环境部等.《柴油货车污染治理攻坚战行动计划》<http://www.mee.gov.cn/xgk/2018/xgk/xxgk03/201901/W020190104656772362578.pdf>
52. <http://finance.sina.com.cn/roll/2018-06-20/doc-ihfphqk4904579.shtml>
53. 《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》（GB 18352.6—2016），http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqhbh/dqdywrwpfbz/201612/t20161223_369476.shtml
54. 《重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》（GB 17691—2018），http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/sthjbgg/201807/t20180703_445973.htm
55. 汽油按照密度0.725g/mL、折标准煤系数1.4714kgce/kg进行计算，电折标准煤系数按照2017年全国供电煤耗309gce/kWh进行计算。
56. 马超云,梁肖,毛保华,贾顺平.铁路运输能源消耗现状分析[J].中国铁路,2010(11):51-55.
57. Matthew Barth,Kanok Boriboonsomsin. Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system[J]. Transportation Research Part D,2009,14(6).
58. 首都建设报. (2015). 交通节能减排首建监测平台. http://sdjsb.bjd.com.cn/html/2015-11/13/content_327377.htm
59. ICAO. https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/Env-Seminars-Lima-Mexico/Mexico/08_UnitedStates_EnvironmentTrends.pdf
60. 中国民航大学中国民航环境与可持续发展研究中心赵凤彩，《中国民航业面临的节能减排形势与挑战》

61. 实际上，能源平衡表中其他行业也包含了交通运输消耗的能源，应对各行业的能耗量进行一定比例的拆分再加总，即可得到交通行业全口径的能耗量。由于本图仅需要展示大致的能源结构，因此采取简化处理，仅包含了交通运输、仓储和邮政业的能耗数据，但值得注意的是，这其中也包含了部分建筑能耗。
62. 广东省交通科技网，LNG天然气清洁能源节能减排示范项目，2014. <http://jtkj.gdcd.gov.cn/net/projectprocess/detail.action?projectprocessId=15640163634443410&mainType=12>
63. 中国铁路成都局集团有限公司提供信息
64. <http://finance.sina.com.cn/money/future/fmnews/2019-01-04/doc-ihqfskcn3990390.shtml>
65. 西门子与空客合作开发混合动力推进系统[J].变频器世界,2016(04):35.
66. <http://www.myzaker.com/article/59e69c261bc8e00858000016/>
67. <http://auto.sina.com.cn/zz/7x24/2018-10-28/detail-ihnaivxp7680140.shtml>
68. http://www.nea.gov.cn/2012-11/19/c_131984210.htm
69. <http://www.chinapower.com.cn/informationzxbg/20160106/16229.html>
70. <http://news.bjx.com.cn/html/20151120/683337.shtml>
71. http://www.nea.gov.cn/2012-05/31/c_131621852.htm
72. https://biofuels-news.com/display_news/10116/norways_oslo_airport_begins_jet_biofuel_delivery_for_all_airlines/
73. https://avinor.no/globalassets/_konsern/om-oss/rapporter/en/avinor-rapport_uk_v1.pdf
74. <http://aireg.de/en/home-en/>
75. http://caafi.org/resources/pdf/Biennial_Meeting_Oct252016_Special_Guest_Comment1.pdf
76. 国际可再生能源机构（IRENA）. 2017. Biofuels for Aviation Technology Brief. http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_biofuels_for_aviation_2017.pdf
77. 国际可再生能源机构（IRENA）. 2017. Biofuels for Aviation Technology Brief. http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_biofuels_for_aviation_2017.pdf
78. Winchester, N., D. McConnachie, et al. Economic and emissions impacts of renewable fuel goals for aviation in the US.
79. 《我国氢能产业发展的技术经济分析》，<https://www.gongkongke.com/posts/B8Yu9PCkic0F/>
80. 如前文所述，推广天然气对于实现净零排放是一种过渡手段，天然气应用比较适合天然气资源丰富的地区，帮助其快速减碳。但是，资源有限的地区应审慎考虑天然气的大规模应用，避免“锁定效应”。
81. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). Climate change 2014: mitigation of climate change (Vol. 3). Cambridge University Press
82. <http://www.china-nengyuan.com/news/124974.html>
83. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation_en
84. <http://www.csplaza.com/article-11562-1.html>

致谢

作者由衷感谢以下人士，在本文编写的过程中给予了大力支持、提供了诸多宝贵的意见与建议。

包括世界资源研究所的同事：方莉、房伟权、薛露露、宋苏、李相宜、徐嘉忆、李来来（前世界资源研究所同事）、温华（前世界资源研究所同事）。

外部专家：凤振华（交通运输部科学研究院），刘宇环（北京交通发展研究院），田智宇（国家发展和改革委员会能源研究所）、冯相昭（生态环境部环境与经济政策研究中心）。

此外，作者还想感谢项目实习生吴怡、周彦欣、马文静在前期政策梳理与数据收集的过程中，以及易文、吴楚盈在文字校对与格式整理的过程中提供的帮助。感谢谢亮对文章的文字编辑，以及张烨对文章的排版设计。

最后，作者要感谢世界自然基金会（WWF）对此工作提供的资金支持。

作者介绍

奚文怡是世界资源研究所（美国）北京代表处副研究员。
电子邮件：wenyi.xi@wri.org

蒋慧是世界资源研究所（美国）北京代表处助理研究员。
电子邮件：hui.jiang@wri.org

鹿璐是世界资源研究所（美国）北京代表处助理研究员。
电子邮件：lu.lu@wri.org

蒋小谦是世界资源研究所（美国）北京代表处项目总监。
电子邮件：xqjiang@wri.org

支持机构



世界自然基金会WWF

图片说明

Cover Unsplash/Tony Wan; pg. i Unsplash/Denys Nevozhai;
pg. iv Unsplash/Jake To; pg. ix Unsplash/JJ Ying; pg. x Unsplash/Yiran Ding;
pg. xv Flickr/vladpl; pg. xvi Flickr/kehao0627; pg. 2 Flickr/onion83;
pg. 7 Unsplash/zhang kaiyv; pg. 8 摄图网; pg. 16 Xi Wenyi;
pg. 33 Flickr/kevho86; pg. 34 Flickr/dcmaster; pg. 39 摄图网;
pg. 40 摄图网; pg. 43 Flickr/sludgeulper.

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性意义。

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。

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。



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