



MARCH 2019

# 武汉市交通碳排放 达峰路径研究

## WUHAN TRANSPORT SECTOR CARBON EMISSIONS ROADMAP STUDY

C4O  
CITIES



世界资源研究所  
WORLD RESOURCES INSTITUTE



# 目录

- 5 执行摘要
- 13 Executive Summary
- 21 前言
- 25 第1章 武汉市城市与交通发展概况
  - 25 城市发展现状
  - 26 交通需求特征
- 31 第2章 武汉市交通碳排放达峰路径分析方法学
  - 32 时间尺度
  - 32 核算边界
  - 32 排放源分类
  - 34 计算方法
  - 35 情景设置
  - 35 驱动因素
  - 35 局限性
- 36 第3章 武汉市交通碳排放达峰及达峰后路径
  - 37 交通能耗与碳排放现状
  - 40 未来驱动因素分析
  - 49 总体达峰路径
  - 51 关键影响因素
  - 57 减排潜力和投资分析
- 61 第4章 建议
  - 61 引导市民公共交通出行，减少私人交通出行需求
  - 62 优化城际交通运输结构，增加铁路水路运输比例
  - 62 加大新能源车推广力度，分时序推动各领域应用
  - 62 大力发展物流业的同时，抓住货运行业减排机遇
  - 63 推广应用清洁能源技术，促进能源结构加速优化
  - 63 探索交通减排机制创新，通过市场手段促进减排
  - 63 加强低碳交通能力建设，提供制度保障助力决策
- 65 附录 参数设置
- 77 参考文献

## 图目录

图 1	城市与达峰年目标 .....	22
图 2	武汉市及各区地图 .....	25
图 3	2005—2017年武汉市GDP及增速 .....	26
图 4	2015—2017年武汉市公路、铁路、民航和水运的旅客和货物周转量情况 .....	27
图 5	武汉市水运客流量 .....	27
图 6	武汉市私人小汽车增长情况 .....	28
图 7	武汉市地铁线路长度 .....	28
图 8	武汉市交通碳排放达峰路径研究总体技术路线 .....	31
图 9	武汉市交通排放源细分 .....	33
图 10	机动车、汽车和私人小汽车的具体含义 .....	34
图 11	交通减排驱动因素 .....	35
图 12	2005—2017年武汉市交通领域能源消耗量及变化率 .....	37
图 13	2005—2017年武汉市交通领域能源消耗结构变化 .....	38
图 14	2005—2017年武汉市交通领域碳排放及变化率 .....	38
图 15	2017年武汉市分交通类型碳排放 .....	39
图 16	2017年武汉市内交通分担率与排放占比 .....	39
图 17	2005—2017年武汉交通碳排放增长贡献 .....	40
图 18	国家中心城市汽车保有量 .....	41
图 19	2017年国家中心城市千人汽车保有量 .....	41
图 20	国内外主要城市交通排放及占比情况 .....	42
图 21	武汉市不同运输方式客货周转量及排放（达峰情景） .....	43
图 22	未来武汉市城际客运中各类交通方式占比预测 .....	44
图 23	未来武汉市城际货运中各类交通方式占比预测 .....	44
图 24	武汉市交通分担率 .....	45
图 25	各地区纯电动车单车年排放与普通燃油车对比 .....	46
图 26	武汉市交通碳排放达峰路径 .....	49
图 27	武汉市交通不同品种能源消费量达峰路径（全口径） .....	50
图 28	达峰情景下武汉市各类交通排放路径 .....	50
图 29	2018—2050年武汉市交通领域减排潜力 .....	51
图 30	武汉市汽车保有量预测 .....	51
图 31	武汉市私人小汽车碳排放达峰路径 .....	52
图 32	武汉市新能源汽车利用规模与减排量的关系 .....	53
图 33	武汉市货运交通二氧化碳排放趋势预测 .....	54
图 34	武汉市民航客货周转量变化趋势预测 .....	54
图 35	武汉市民航碳排放达峰路径 .....	55
图 36	武汉市民航运输排放因素分解 .....	56
图 37	航空生物燃料不同占比下的民航排放路径 .....	56

## 表目录

---

表1	不同交通类型采用的计算方法 .....	34
表2	主要城市限购、限行政策推行时间 .....	52
表3	交通政策减排潜力 .....	57
表4	交通政策投资需求 .....	58
表5	交通政策单位投资带来的减排量 .....	58
表6	经济、产业、人口及交通需求总量参数设置 .....	65
表7	电力结构和排放因子参数设置 .....	66
表8	汽车保有量参数设置 .....	67
表9	新能源汽车保有量参数设置 .....	68
表10	汽车年行驶里程（VKT）参数设置 .....	69
表11	机动车能源效率参数设置 .....	70
表12	公路相关参数设置 .....	71
表13	铁路相关参数设置 .....	72
表14	民航相关参数设置 .....	73
表15	水运相关参数设置 .....	74
表16	地铁相关参数设置 .....	75
表17	单位能耗碳排放 .....	76

## 专栏目录

---

专栏1	武汉市内水运情况 .....	27
专栏2	关于公路客运统计的相关规定 .....	32
专栏3	新能源汽车推广应用现状与目标 .....	47
专栏4	深圳如何构建全球最大的电动公交车队 .....	48
专栏5	换算吨公里的含义与转换方法 .....	72



# 执行摘要

## 主要结论

- 武汉市交通二氧化碳排放约占全市总排放的10%。随着城镇化进程的加快和生产生活运输需求的提升，武汉作为国家中心城市的定位以及建设门户枢纽、国家物流枢纽的规划也意味着未来交通二氧化碳排放的数量和占比还将继续增长。如果延续汽车化、公路化、燃油化的发展路径，武汉市的交通拥堵、空气污染、温室气体排放等问题都将更加严峻。
- 如果采取更强有力的措施，武汉整个交通领域碳排放可以在2029年达到峰值。如果不考虑铁路、水运和民航，可以提前至2025年达到峰值。然而，武汉市总体达峰目标为2022年，这需要能源、工业、建筑等领域的共同努力。
- 为促进武汉市交通低碳发展、尽早实现碳排放达峰，建议采取如下措施：引导市民公共交通出行，减少私人交通出行需求；优化城际交通运输结构，增加铁路水路运输比例；加大新能源车推广力度，分时序推动各领域应用；大力发展物流业的同时，抓住货运行业减排机遇；推广应用清洁能源技术，促进能源结构加速优化；探索交通减排机制创新，通过市场手段促进减排；加强低碳交通能力建设，提供制度保障助力决策。
- 武汉市交通领域碳减排需要城市 and 行业的共同作用。

## 背景

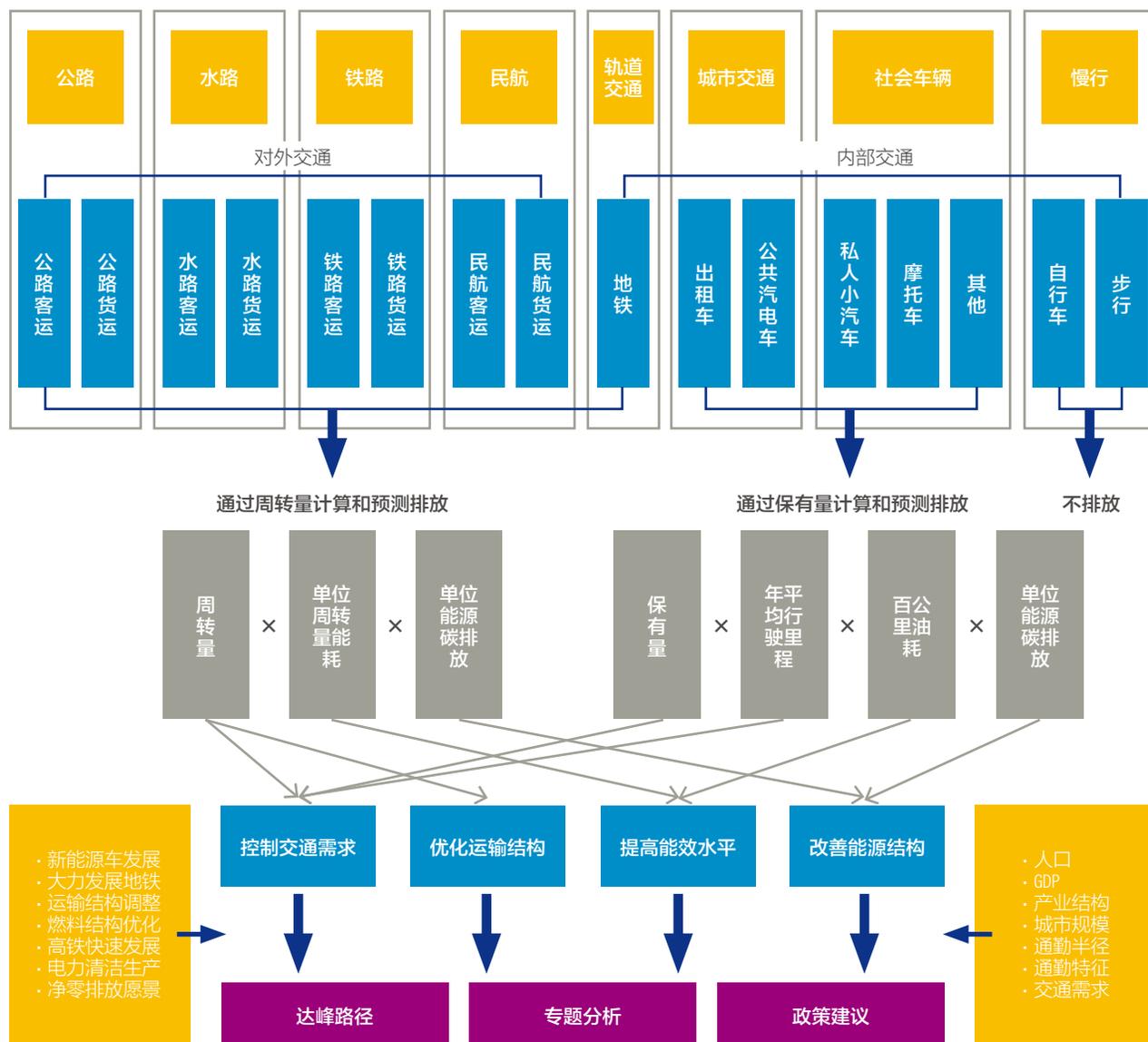
《巴黎协定》于2016年11月正式生效，其中提出全球各国应共同努力，确保将本世纪全球平均温升控制在2°C以内并争取控制在1.5°C以内。中国向国际社会承诺“二氧化碳排放2030年左右达到峰值并争取尽早达峰”，地方层面也积极做出承诺并展开行动，如今已经有80多个城市提出了达峰年份目标。

武汉市自2012年成为国家低碳试点城市以来，积极践行国家“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念，努力探索作为重工业特大城市的低碳发展路径。2015年

首届中美气候智慧型/低碳城市峰会上，武汉宣布了2022年左右碳排放达峰的目标。次年，这一目标被正式写入了《武汉市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》。2017年12月，武汉正式发布了《武汉市碳排放达峰行动计划（2017—2022年）》。武汉将力求通过推进产业低碳、能源低碳、生活低碳、生态降碳、低碳基础能力提升和低碳发展示范等工程，如期实现达峰。

城市碳排放达峰将有赖于工业、建筑、交通、能源等各个领域的贡献。尽管现在武汉市交通排放只占近10%的比例，但是随着城镇化进程的加快和生产生活运输需求的提升，交通碳排放将越来越成为影响城市达峰的重点和难点。

图 ES-1 | 武汉市交通碳排放达峰路径分析总体技术路线



## 关于报告

武汉市于2017年初开展了城市层面的总体达峰路径研究，但还缺乏对行业层面的深入分析。本研究将回答两个问题：武汉市交通领域碳排放何时达峰？达峰时候的碳排放量是多少？

本报告的研究对象为所有交通工具产生的二氧化碳排放，包括了所有范围一、范围二和范围三排放：

- 范围一排放：城市边界内交通活动化石燃料燃烧引起的排放；
- 范围二排放：城市相关交通活动消费的来自电网的电力产生排放；
- 范围三排放：城市相关跨边界交通活动引起的排放。

本研究中对交通排放的测算遵循“属地原则”，这与《城市温室气体核算国际标准》（GPC）中的“居民活动”法类似，例如，汽车排放只包括在武汉注册的车辆。

本研究分不同情景分析了2005—2050年武汉市交通领域的碳排放轨迹，最终选出如下两个情景进行介绍。每个情景下的具体参数设置请参见附录。

- 基准情景：为现有政策的延续；

- 达峰情景：采取更多更激进的措施，帮助武汉市交通领域化碳尽早达峰、低位达峰。

总体技术路线如图ES-1所示。

## 关键分析

### 历史排放

武汉市交通领域2005-2017年的碳排放路径见图ES-2，呈逐年增长趋势，年均增速约为11.6%。2017年武汉市交通领域能源消耗为715万吨标准煤，二氧化碳排放约为1600万吨，比上一年增长10%。

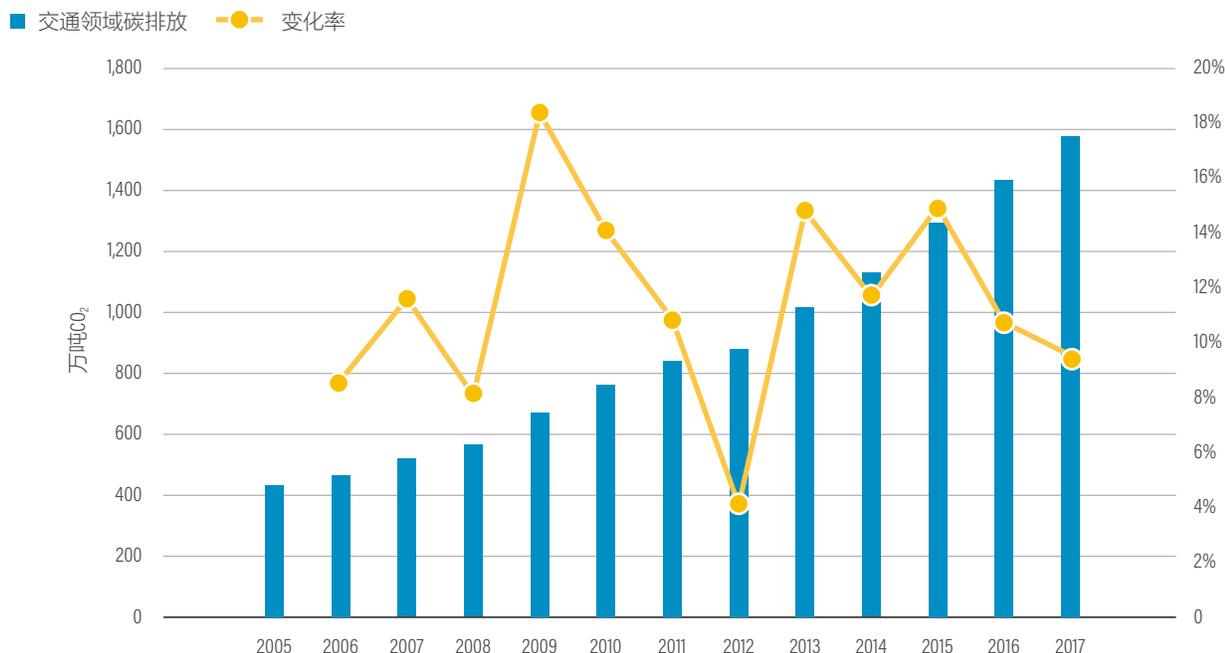
### 全口径交通和不含铁水空交通的排放预测

考虑到城市政府对交通排放的管辖权问题，本研究从两个尺度来预测武汉交通碳排放：

- 全口径：包括所有交通类型
- 不含铁路、民航和水运：只包含道路交通和城市内的地铁、摩托车等

考虑全口径大交通，在基准情景下，武汉市交通碳排放2035年达到峰值，达峰时排放约2800万吨，之后缓慢下降，到2050年降到约2500万吨。在达峰情景下，武汉市交

图 ES-2 | 2005—2017年武汉市交通领域碳排放及变化率



数据来源：课题组计算

图 ES-3 | 武汉市交通碳排放达峰路径

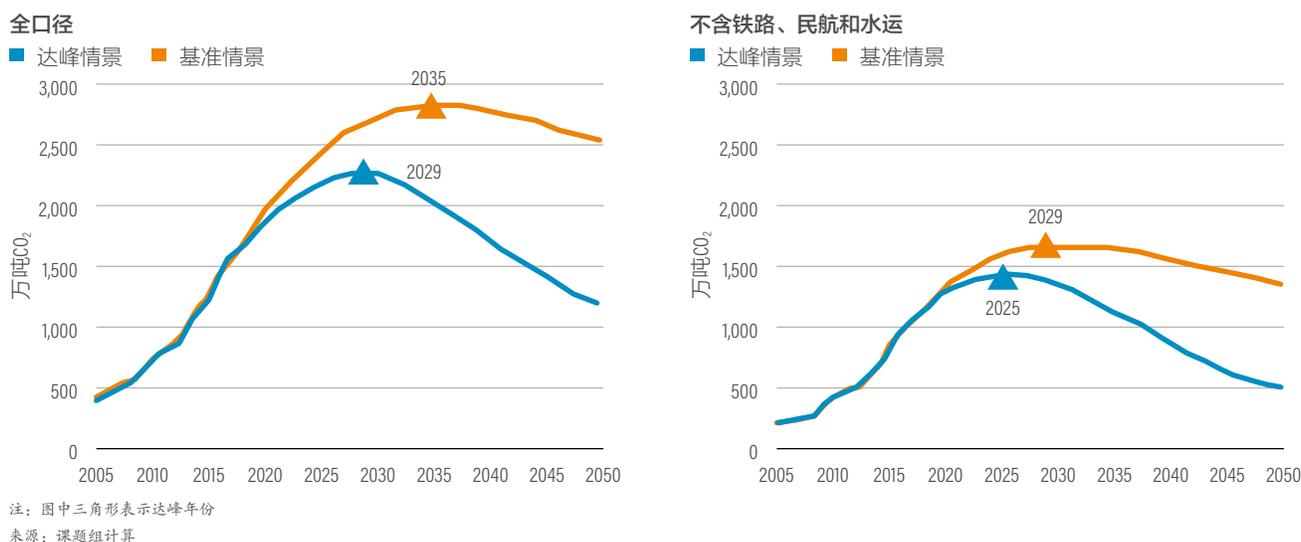
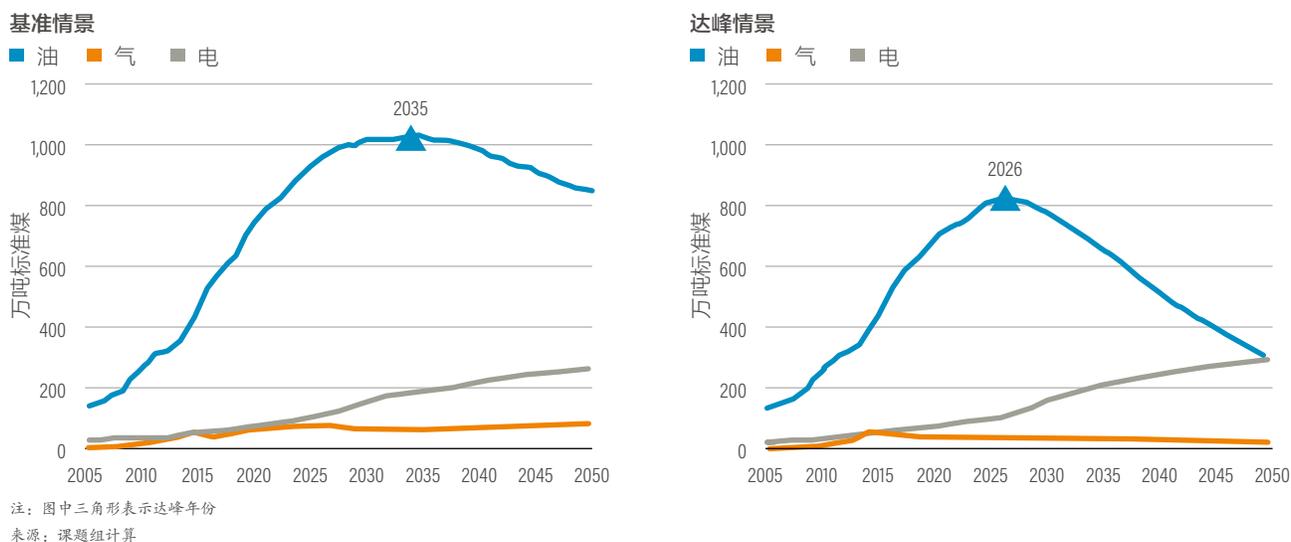


图 ES-4 | 武汉市交通不同品种能源消费量达峰路径（全口径）



通碳排放于2029年达到峰值，达峰时排放约2300万吨，之后呈现迅速下降趋势，到2050年降到约1200万吨，为基准情景2050年排放水平的一半左右（图ES-3，左）。如果不包含铁路、民航和水运，武汉交通碳排放的达峰年份都能提前若干年，基准情景下2029年达峰，达峰情景下2025年达峰，且2050年达峰情景是基础情景排放水平的40%左右，约为520万吨（图ES-3，右）。

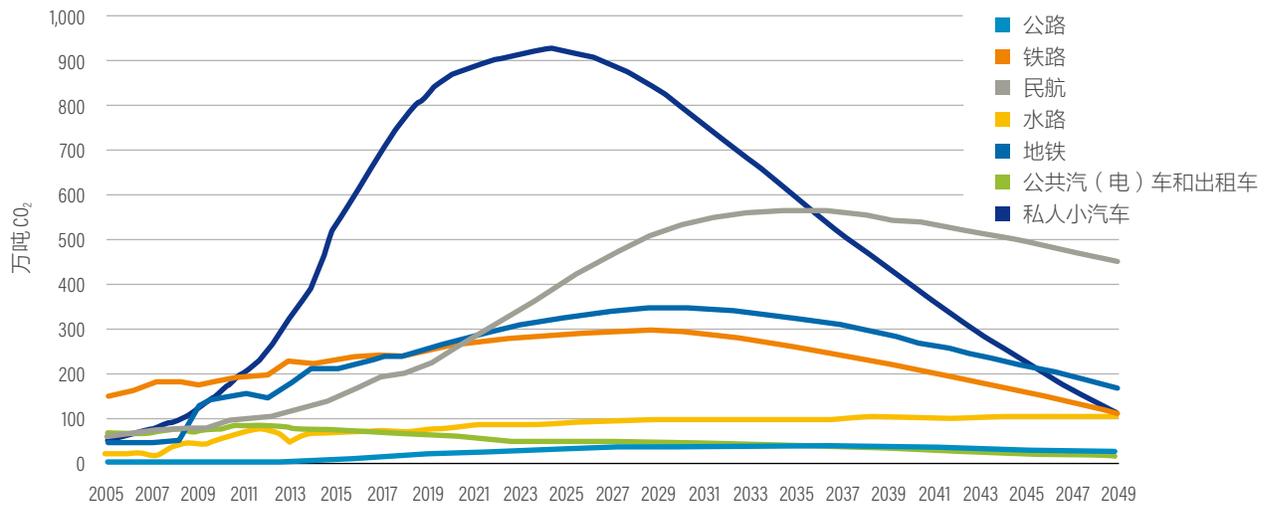
### 不同能源品种的排放预测

全口径交通口径下，从能源结构的历史趋势上看，油品毋庸置疑是交通用能的最大贡献者。油品占比一直在

80%左右波动，天然气占比从0.3%增长到8%，电力占比从16%下降到8%。天然气比重的提升是受到近年来清洁能源推广应用的影响，而电力所占比重下降则是由于武汉市交通用能的电耗主要来自铁路，武汉铁路局的电气化率本身比较高，提升空间有限，而其他交通领域如地铁、电动车的用电量还是相对较小。

如果不采取更强有力的措施（基准情景），油的消费量和相关排放会在2035年左右达峰，气和电呈缓慢增长趋势。在达峰情景下，由于新能源汽车的大规模应用，2026年左右油的消费量和相关排放会达到峰值，如图ES-4所示。

图 ES-5 | 达峰情景下武汉市各类交通排放路径



数据来源：课题组计算

### 不同交通类型的排放预测

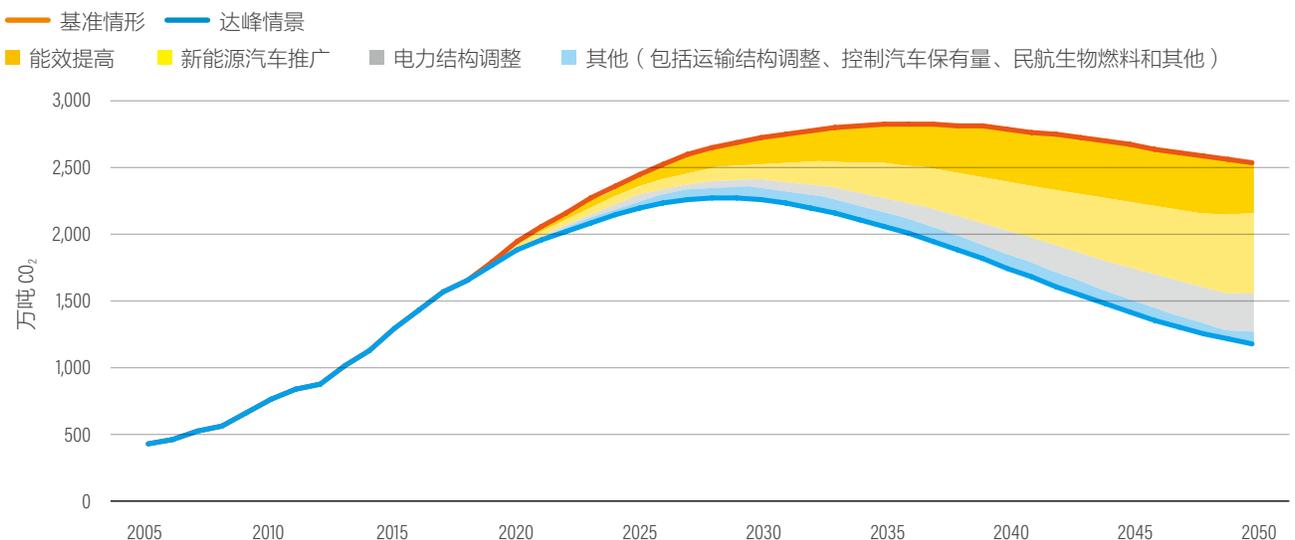
图ES-5显示了达峰情景下不同交通类型的排放轨迹。影响最大的是私人小汽车，2010年超过铁路成为最大排放源，之后排放迅速增长，远远超过其他排放源。在“十三五”和“十四五”期间，铁路和公路是第二和第三大排放源，但是民航将于2022年超过铁路和公路成为第二大排放源，并于2037年超过私人小汽车成为最大排放源。总体来看，水运和包括公共汽（电）车、地铁等在内的城

市公共交通的排放水平都不算太高，且这些交通方式的排放强度较低，对交通达峰起到了正向的贡献作用。

### 达峰情景下的减排潜力分析

考虑全口径交通，2019-2050年达峰情景可以比基准情景累计减排2.9亿吨二氧化碳，其中88%的减排潜力将来自新能源车、能源效率提升和电网清洁化的共同作用。其他减排潜力将来自运输结构调整、控制汽车保有量等。

图 ES-6 | 不同交通措施减排潜力贡献情况



数据来源：课题组计算

## 建议

为促进武汉市交通低碳发展、尽早实现碳排放达峰，本研究建议采取的措施如下：

- 引导市民公共交通出行，减少私人交通出行需求。具体措施包括鼓励市民乘坐公共交通工具出行，适当控制汽车保有量，优化共享单车使用，在城市规划中纳入减排考虑。
- 优化城际交通运输结构，增加铁路水路运输比例。具体措施包括发展武汉特色运输产品，提高或保持铁路和水路运输占比。
- 加大新能源车推广力度，分时序推动各领域应用。具体措施包括近期内实现公共汽（电）车和出租车纯电动化；利用政策和经济激励，大力推动电动城市物流配送车发展；解决电动车分时租赁面临的诸多难题；鼓励新能源汽车在私人小汽车车领域的应用。
- 大力发展物流业的同时，抓住货运行业减排机遇。具体措施包括优化物流体系，降低不合理的货物运输需求；抓住区域地理位置优势，大力发展多式联运，形成示范效应并辐射全国；大力提升载货车辆燃油经济性水平；注重发展绿色养护技术。
- 推广应用清洁能源技术，促进能源结构加速优化。具体措施包括在水运中应用液化天然气，在航空领域应用生物燃料，以及促进电力结构优化。
- 探索交通减排机制创新，通过市场手段促进减排。具体措施包括利用“碳宝包”积分制度推动市民绿色出行，为交通运输企业参与碳交易做好技术储备，创新保险收费机制。
- 加强低碳交通能力建设，提供制度保障助力决策。具体措施包括建立低碳交通统计核算监测体系，加强本地技术团队能力建设。







武漢長江二橋

武漢長江二橋

# EXECUTIVE SUMMARY

## Highlights

- The transport sector currently accounts for around 10% of carbon dioxide emissions in Wuhan, China. Accelerating urbanisation and increasing transport demand from the commercial and residential sectors in the city will continue to increase emissions rapidly over the coming years. If Wuhan's development continues to be dominated by automobiles and fossil fuel-based transport, traffic congestion, air pollution, and greenhouse gas emissions will become more serious problems.
- If appropriate environmental measures are implemented, the analysis shows it is possible for carbon dioxide emissions from Wuhan's transport sector to reach their peak in 2029. With the right changes, the level of emissions from road-based vehicles and the subway system could peak sooner, in 2025. In order for Wuhan to meet its commitment of peaking city-wide all-sector combined emissions in 2022, more ambitious low-carbon actions should be taken in other sectors, including the industrial and building sectors.
- Policy and actions that promote greater use of electric vehicles and public transport have the potential to bring the greatest reduction in emissions, along with increasing fuel efficiency and clean electricity, optimising freight distribution networks, and building capacity in data management and monitoring.
- Cleaning up Wuhan's carbon emissions will require action by both the city administration and the private sector.

## Background

In November 2016, 194 states and the EU signed the Paris Agreement on Climate Change, a global action plan to keep global average temperature rise to below 2°C and pursue efforts to limit warming to 1.5°C. China, as one of the world's largest greenhouse gas emitters, pledged to peak its carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions by around 2030 and is now aiming to peak earlier. Active commitments and actions at the sub-national level are also in place to support carbon emission reduction to reach the 2°C or 1.5°C goal of the Paris Agreement. More than 80 Chinese cities have now set peak year targets as well.

Wuhan is an industrial Chinese megacity which was identified in 2012 as one of the pilots for China's Low-carbon City Implementation Plan. At the first U.S.-Sino Climate Smart/Low-carbon City Summit in 2015, Wuhan announced it would aim to reach peak city-wide all sector-combined CO<sub>2</sub> emissions by 2022. The target was then formally included in the outline of Wuhan's 13th Five-Year Plan for Economic and Social Development in 2016 and the city administration developed a Carbon Dioxide Emissions Peak Action Plan (2017–2022) in December of 2017. The plan included a series of actions to promote low-carbon initiatives across industry, energy, lifestyles, capacity building, and demonstration projects in order to achieve the goal. These actions also align Wuhan with President Xi's 'Five Major Development Principles', a wider development plan for China to be 'innovative, coordinated, green, open, and inclusive'.

Rapid growth of the city risks destabilising Wuhan's emissions target. As a gateway hub and national logistics centre located in central China, growing urbanisation and rising average incomes means the demand for transportation will continue to increase. Currently all-transport in Wuhan only produces 10% of the city's CO<sub>2</sub> emissions, but these changes risk increasing emissions levels and, in turn, harming the city's peak emissions goal.

## About this report

In early 2017, Wuhan carried out a city-wide emissions scenarios analysis, yet it did not go into detail on how individual sectors can reduce CO<sub>2</sub> emissions, such as the industry, energy, building, and transport sectors. This report focuses on how the transport sector can reduce emissions and seeks to answer two questions: how soon can CO<sub>2</sub> emissions from Wuhan's transport sector peak, and what would the level of emissions be at the peak?

The report analyses and predicts the level of CO<sub>2</sub> emissions from different modes of transport in Wuhan between 2005–2050. It covers:

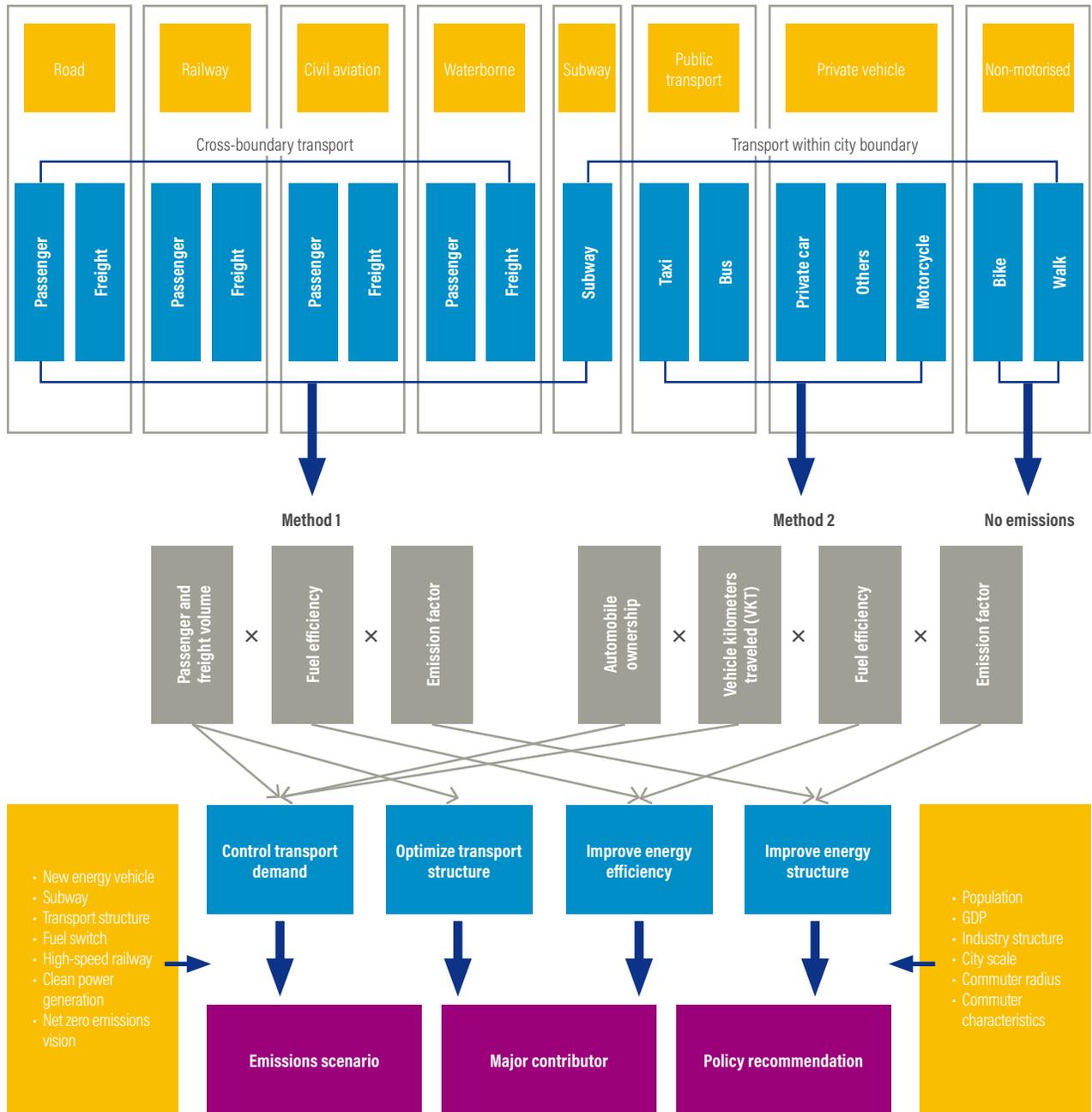
- **Scope 1 emissions:** emissions from fuel combustion for transportation within the city
- **Scope 2 emissions:** emissions from consumption of grid-supplied energy for all transportation
- **Scope 3 emissions:** emissions from the portion of transboundary journeys occurring outside the city

Only vehicles registered in Wuhan are included in this study, which is consistent with the 'resident activity' methodology set out in the Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC). A schematic representation of the methodology is provided in Figure ES-1.

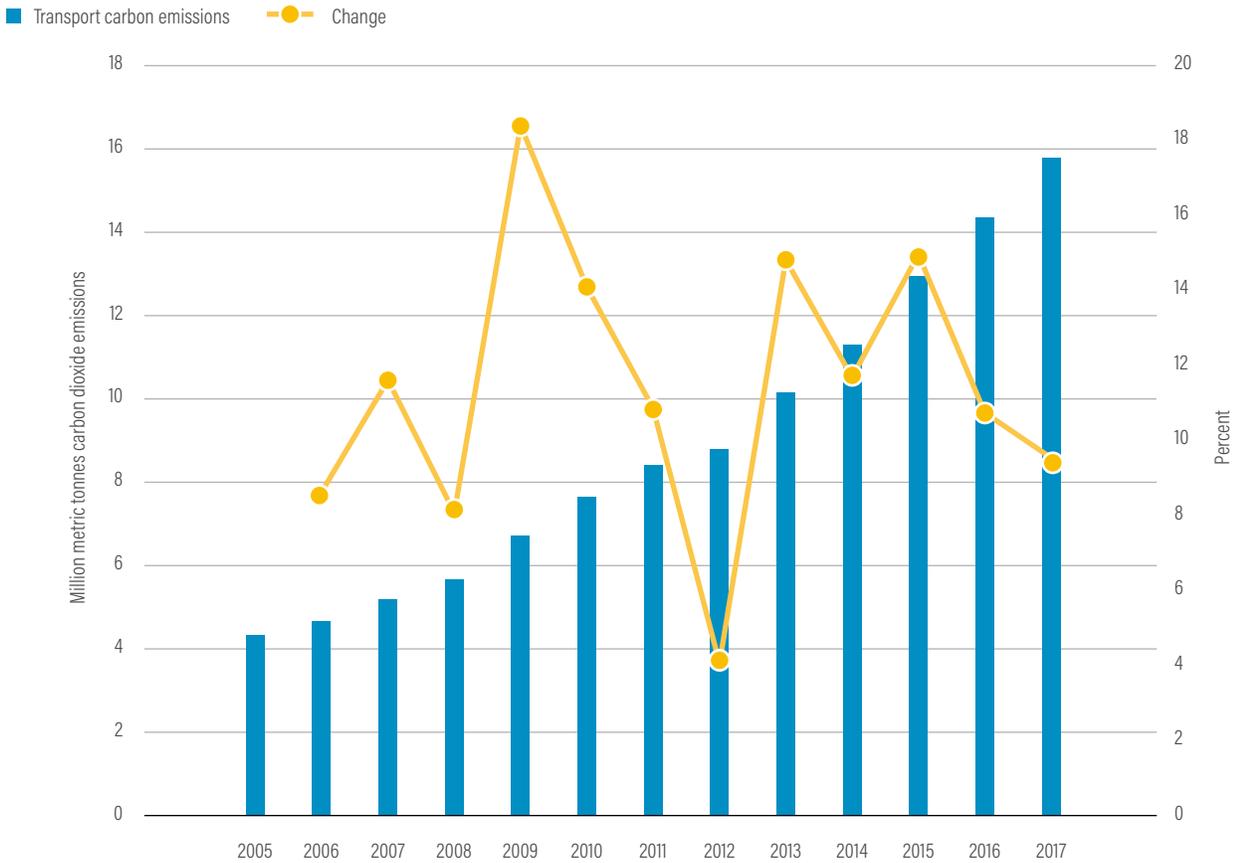
The report analyses the projected CO<sub>2</sub> emissions across two possible scenarios below, and detailed assumption are explained in the appendix.

- **Business as Usual (BAU) scenario:** the predicted effects of continuing to implement current policies with no additional actions.
- **Early Peaking scenario:** predicted effects of implementing more ambitious actions by both government and the private sector, designed to make emissions peak as early and as low as practically possible.

**Figure ES-1 | Methodology framework**



**Figure ES-2 | Carbon dioxide emissions from the transport sector in Wuhan, 2005-2017**



## Key findings

### Historical emissions

In 2017, Wuhan’s transport sector consumed about 7.15 million metric tons (MMT) of standard coal, resulting in CO<sub>2</sub> emissions of around 16 MMT, a 10% increase since 2016 (Figure ES-2).

### Projections for two scales of transport emissions sources

The report analyses projections for two different scales of emissions sources from the transport sector:

- ‘All Transport’ includes emissions from all modes of transport (Figure ES-3, left)
- ‘Road and Subway Transport’ is a subset of only the road and subway modes, excluding rail, civil aviation, and water transport (Figure ES-3, right) as cities do not have authority to manage this part

of carbon emissions. For each scale of emissions sources, we have produced a BAU projection and a more ambitious Early Peaking projection.

The analysis has been carried out on the assumption that Wuhan’s city government has, and will have, authority over transport emissions. If current policies continue on a BAU course and no other actions are implemented, we estimate that CO<sub>2</sub> emissions from All Transport will peak by 2035 at about 28 MMT and then decline slowly to 25 MMT in 2050. Achieving an earlier and lower peak will require Wuhan to take more ambitious actions, such as limiting car ownership, optimising freight modes, improving fuel efficiency, switching from natural gas to oil, and promoting greater use of electric vehicles. In the Early Peaking scenario, CO<sub>2</sub> emissions from All Transport will peak in 2029 at about 23 MMT, then decline to 12 MMT in 2050, amounting to nearly half of the emissions outlined in the BAU scenario.

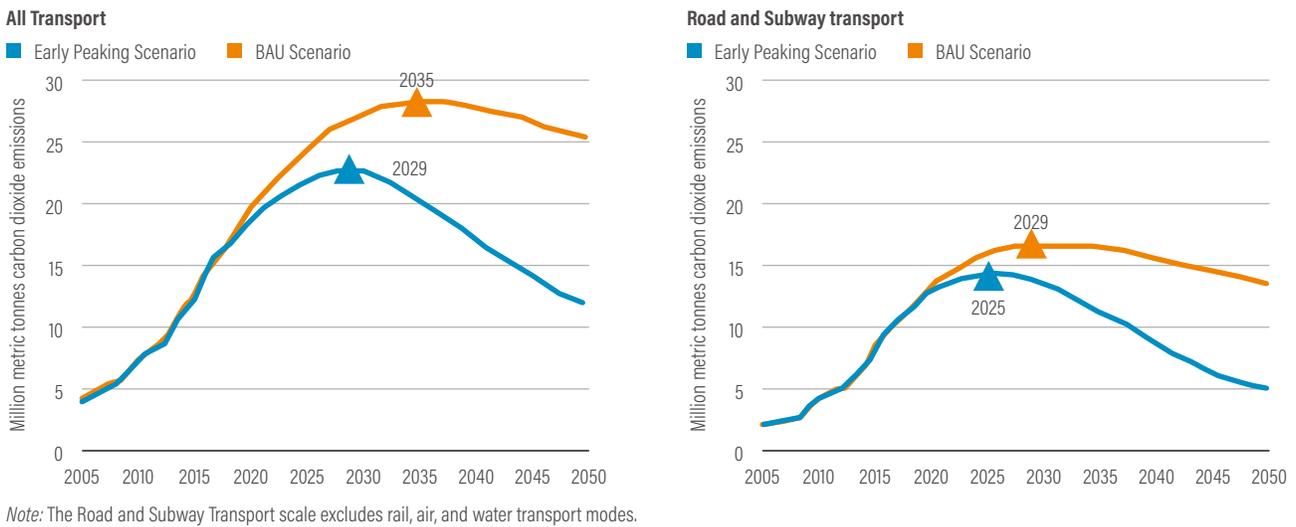
Road and Subway Transport projections are slightly more positive, with CO<sub>2</sub> emissions estimated to peak in 2029 under the BAU scenario and in 2025 under the Early Peaking scenario. The level of Road and Subway Transport emissions under the Early Peaking scenario in 2050 will be 5.2 MMT – around 37% lower than in the BAU scenario.

For all scales and scenarios, the peak years (2035, 2029, or 2025) for transport emissions occur after 2022 – Wuhan’s peak year emissions target for all sectors. If, as this report estimates, the transport sector will not meet the city’s peak year target, greater emissions reductions will be necessary from other sectors, including industry and buildings.

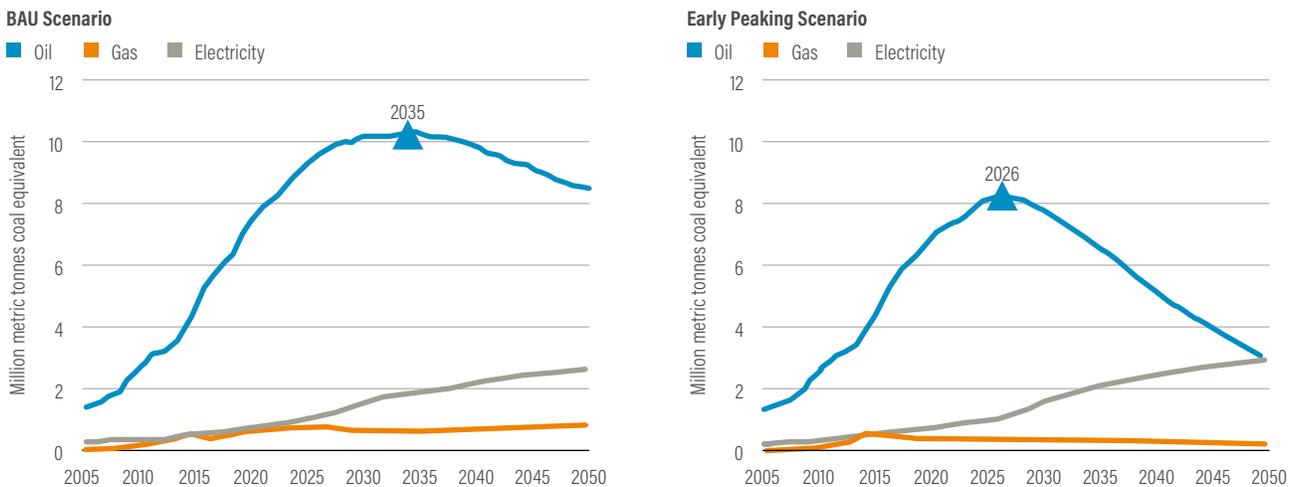
### Emissions projections by energy source

Looking at the energy sources for All Transport, oil is the most widely used, fluctuating at around 80% of total consumption in recent years. Natural gas use has increased from 0.3 to 8%, and that of electricity has dropped from 16% to 8%. The rise of natural gas stems from the promotion and use of compressed natural gas (CNG) and liquefied natural gas (LNG) vehicles in recent years. The relative decline of electricity is due to rail being the main electricity consumer in Wuhan’s transport sector, which has limited growth because the rail system in Wuhan is already highly electrified. Electricity consumption in other transport sectors, such as subways and electric vehicles, is relatively low.

**Figure ES-3 | Carbon dioxide emissions scenarios for the Wuhan transport sector**



**Figure ES-4 | Energy consumption scenarios for different energy sources**



The analysis shows that under the BAU scenario, emissions from oil consumption will peak around 2035. Without stronger measures taken, gas and electricity consumption will continue to grow slowly. Under the Early Peaking scenario, we project that if there are actions and policies to promote the widespread introduction of electric vehicles, oil emissions and consumption will fall and peak around 2026 (Figure ES-4).

### Emissions projections by transport mode

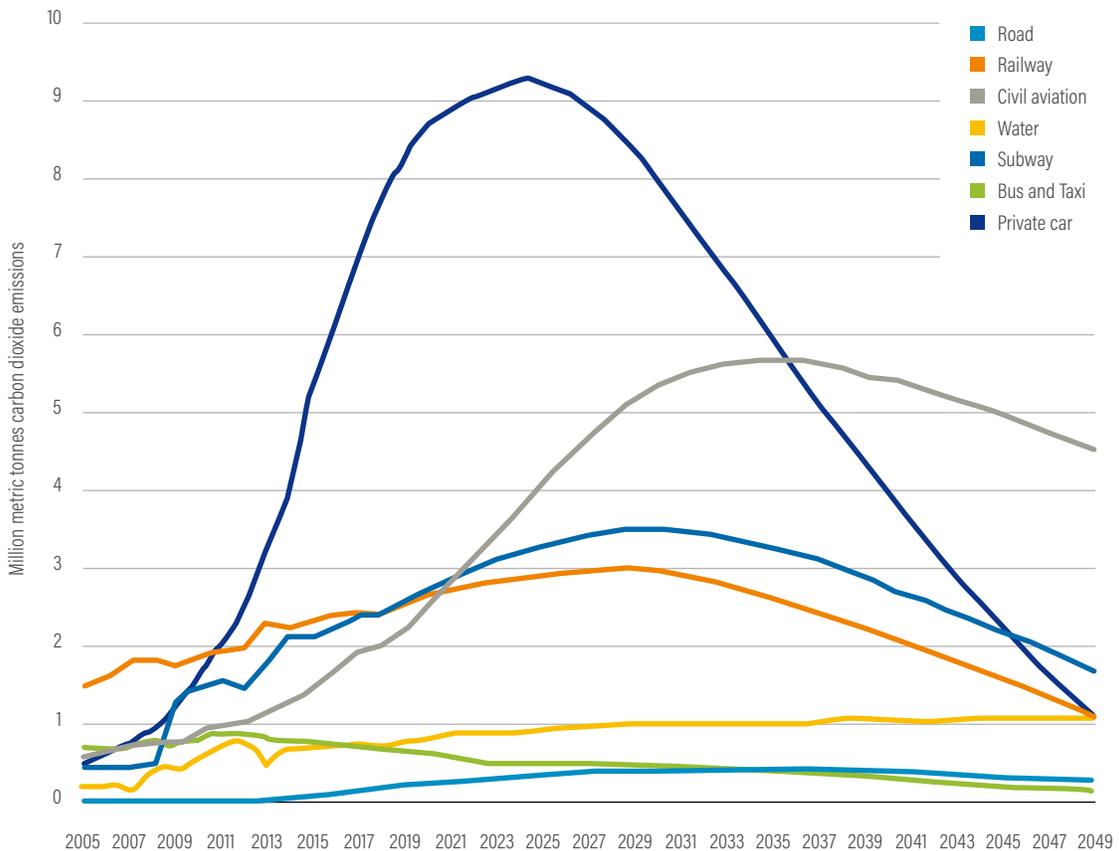
If we look at the emissions trajectory of different transportation modes in the Early Peaking scenario (Figure ES-5), the largest source of emissions comes from private cars, which displaced rail in 2010. The trajectory shows emissions from private cars will peak in 2022 and in turn be overtaken as the largest producer of transport-

sector emissions by civil aviation by 2037. Early Peaking policies would keep emissions from water transport and urban public transport, including buses and subway, generally low. A low emissions intensity (emissions per passenger kilometre) would also contribute positively to the transport CO<sub>2</sub> emissions peak.

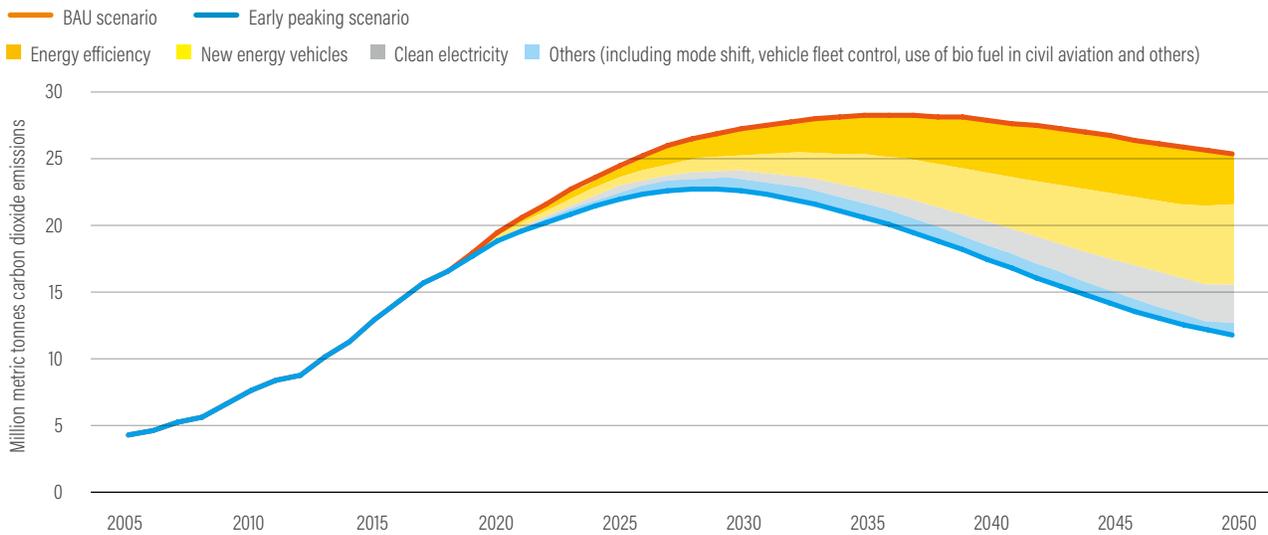
### Early Peaking predictions for cumulative emissions reductions

For all transport, we estimate that under the Early Peaking scenario, between 2019-2050 there could be a cumulative CO<sub>2</sub> reduction of 290 MMT. Eighty eight percent of that reduction would be contributed by electric vehicles, fuel efficiency, and clean electricity. Further reductions will be possible through, for example, encouraging modal shift and imposing limits on vehicle ownership (Figure ES-6).

**Figure ES-5 | Carbon dioxide emissions for different transport modes (Early Peaking scenario)**



**Figure ES-6 | Potential contribution of different measures to carbon dioxide emissions reductions**



## Recommendations

In order to promote the development of low-carbon transportation in Wuhan and achieve a CO<sub>2</sub> emissions peak as early as possible, we recommend the following policies:

- **Reduce demand for intra-city private transportation and encourage greater use of public transport, especially the subway.** Additional measures include timely and appropriate regulation of car ownership.
- **Optimise the modal share of inter-city transport.** Specific measures include appropriately reducing the proportion of freight transported by air and moving it to rail and water transportation.
- **Promote the use and prioritisation of electric vehicles.** Specific measures include achieving full electrification of buses and taxis in the near future, using regulation and economic incentives to vigorously promote the development of corporate electric buses to transport employees, overcoming obstacles to electric car sharing, and encouraging private car owners to purchase electric vehicles.
- **Pursue energy saving and emissions reductions in the freight transportation sector.** Specific measures include optimising distribution networks, reducing the demand for freight transport, capitalising on regional geographical advantages (such as Wuhan’s central location and proximity to water transportation routes), vigorously developing multimodal transport that can demonstrate a model for the country, improving the fuel efficiency of freight vehicles, and incorporating environment and sustainability as key considerations when planning, designing, constructing, and maintaining roads.
- **Promote and apply clean energy technologies.** Specific measures include introducing natural gas-fueled ships and shoreside power provision.
- **Explore mechanisms for innovation and promote emissions reduction through market-based means.** Specific measures include using a ‘carbon credits’ system to promote green travel to the public, encouraging transportation enterprises to prepare for participation in the emission trading system, and introducing innovative mechanisms, such as higher car insurance rates for vehicles that travel a high number of kilometres per year.
- **Strengthen capacity of decision-makers to implement low-carbon transport solutions.** Specific measures include collecting and maintaining low-carbon transport statistics, establishing a measuring and monitoring system for transport-related energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions, and strengthening the capacity of local technical teams.



# 前言

《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2℃以内并争取控制在1.5℃以内。中国向国际社会承诺“二氧化碳排放2030年左右达到峰值并争取尽早达峰”，地方层面也积极做出承诺并展开行动，如今已经有80多个城市提出了达峰年份目标，如图1所示。

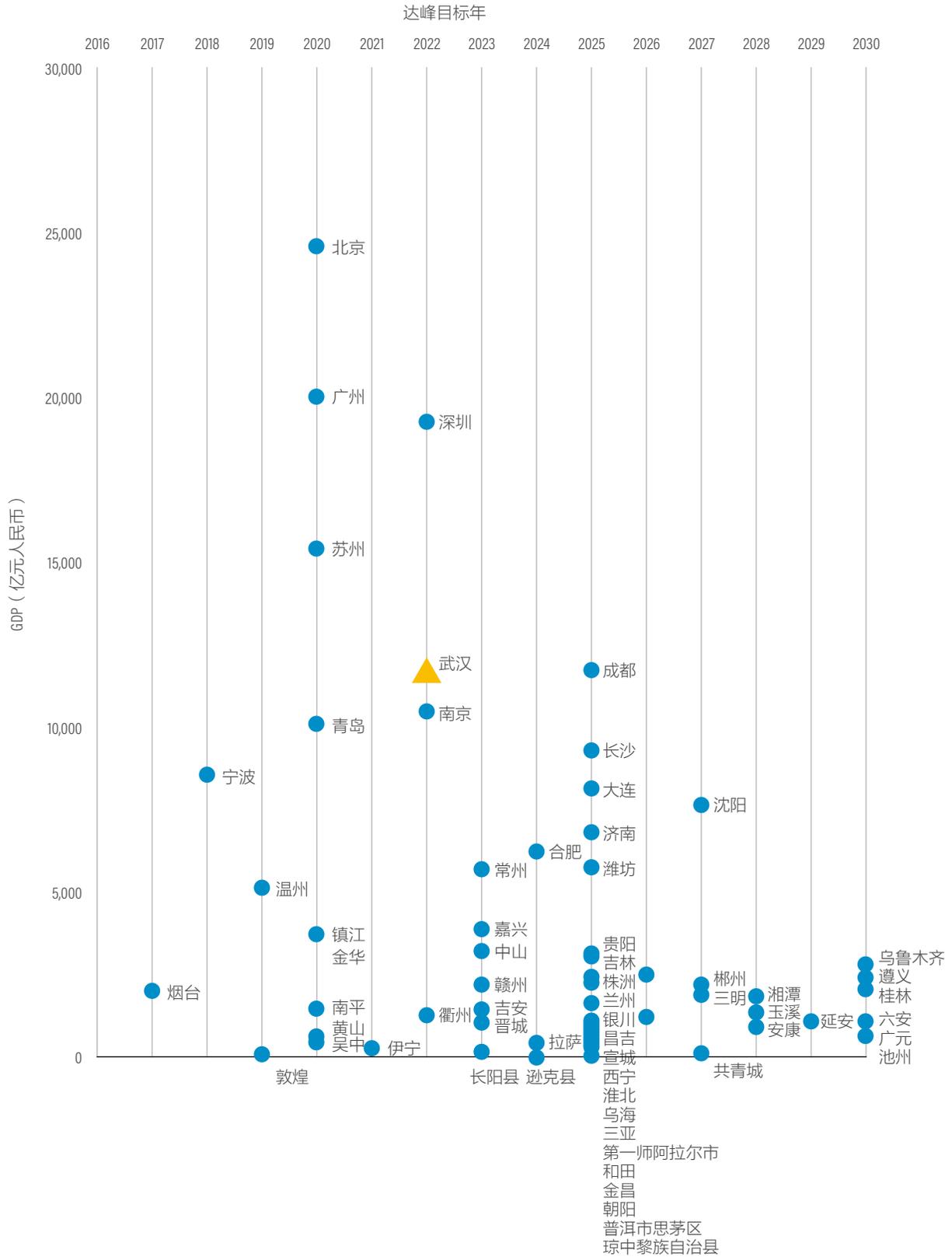
武汉市自2012年成为国家低碳试点城市以来，积极践行国家“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念，努力探索作为重工业特大城市的低碳发展路径。2015年首届中美气候智慧型/低碳城市峰会上，武汉宣布了2022年左右碳排放达峰的目标。次年，这一目标被正式写入了《武汉市国民经济和社会发展的第十三个五年规划纲要》。2017年12月，武汉正式发布了《武汉市碳排放达峰行动计划（2017—2022年）》。武汉将力求通过推进产业低碳、能源低碳、生活低碳、生态降碳、低碳基础能力提升和低碳发展示范等工程，如期实现达峰。

武汉市于2017年初开展了城市层面的总体达峰路径研究，但还缺乏对行业层面的深入分析。城市碳排放达峰将有赖于工业、建筑、交通、能源等各个领域的贡献。尽管现在武汉市交通排放只占近10%<sup>3</sup>的比例，但是随着城镇化进程的加快和生产生活运输需求的提升，交通碳排放将越来越成为影响城市达峰的重点和难点。武汉作为国家中心城市的定位以及建设门户枢纽、国家物流枢纽的规划也意味着交通需求还将持续增加。如果延续汽车化、公路化、燃油化的发展路径，交通拥堵、空气污染、

温室气体排放等问题都将更加严峻<sup>4</sup>。交通碳排放问题的紧迫性和可见性不如交通拥堵、空气污染等，但是需要认识到这些问题的解决具有协同效应，城市政府和交通部门应予以关注。

为此，在武汉市发展和改革委员会和武汉市交通运输委员会的指导下，在C40城市气候领导联盟的技术援助项目下，世界资源研究所（WRI）、C40城市气候领导联盟、落基山研究所（RMI）、能源基金会、自然资源保护协会（NRDC），以及武汉市交通科学研究所和武汉市节能监察中心等机构组成了联合课题组，深入调研武汉市情况，就武汉市交通碳排放达峰路径开展了深入研究，并为武汉市的低碳交通发展和碳排放达峰提出了建议。

图 1 | 城市与达峰年目标

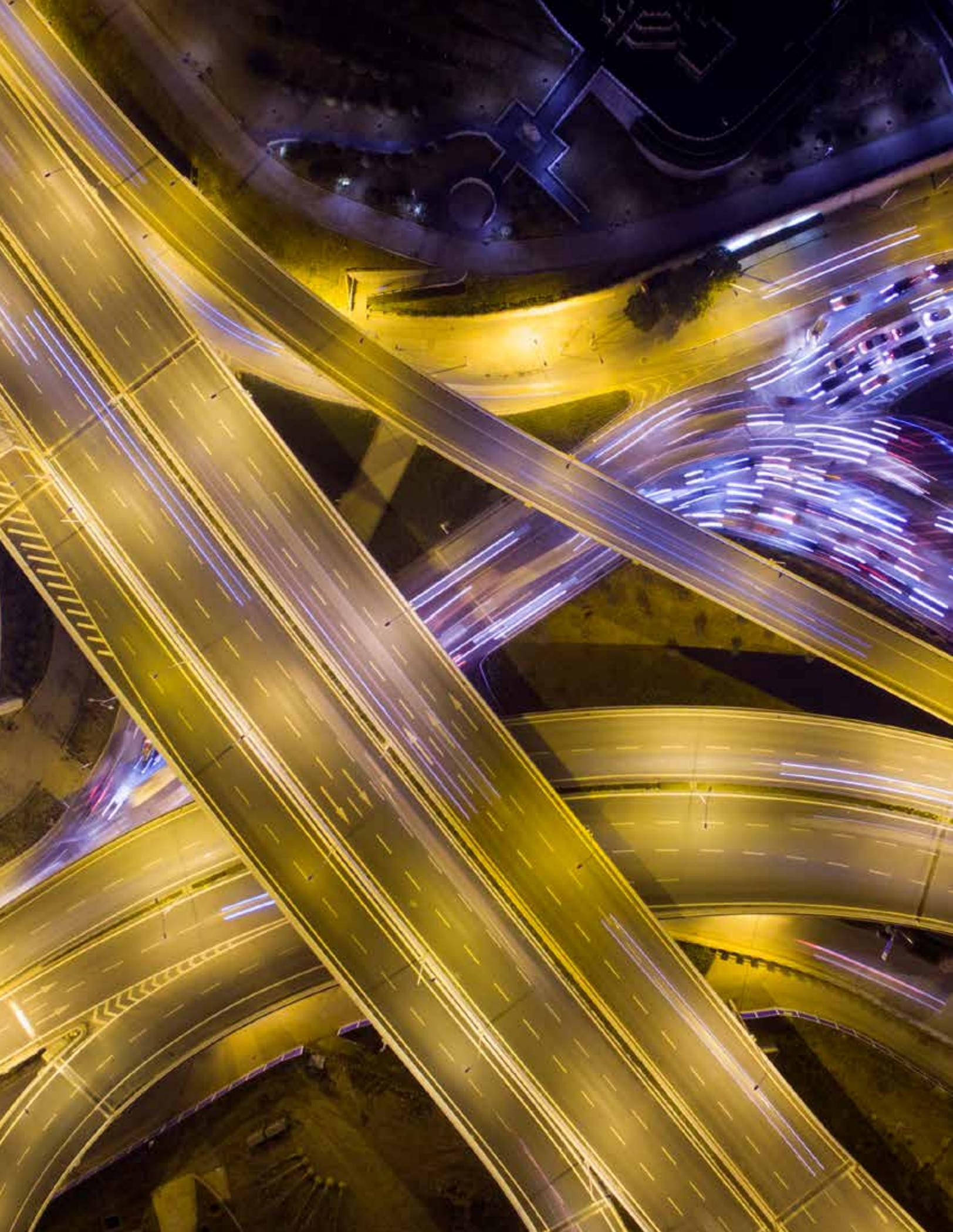


数据来源：根据公开资料整理。其中 GDP 为 2016 年数据，来自城市国民经济和社会发展统计公报。

武昌  
WU CHANG

出站口  
WAY OUT





## 第一章

# 武汉市城市与交通发展概况

### 1.1 城市发展现状

武汉地处中国中部，是长江中游特大城市、湖北省的省会，也是中国重要的工业、科教基地和综合交通枢纽。武汉辖江岸、江汉、硚口、汉阳、武昌、青山、洪山7个中心城区，东西湖、蔡甸、江夏、黄陂、新洲5个新城，以及武汉经济技术开发区、武汉东湖新技术开发区、武汉临空港经济技术开发区、武汉东湖生态旅游风景区和武汉新港5个功能区，如

图2所示。全市土地面积8494平方公里<sup>5</sup>，2017年末常住人口1089万<sup>6</sup>。2017年武汉市地区生产总值（GDP）13410.34亿元，比上一年增长8%<sup>7</sup>，如图3所示。武汉的高新技术产业、汽车产业和商贸流通产业在国内占有重要地位。

武汉因其特殊的地理位置，成为全国重要的水陆空综合交通枢纽，有“九省通衢”之称。武汉是中国高速铁路（简称“高铁”）的中心，乘坐高铁至北

图 2 | 武汉市及各区分区图

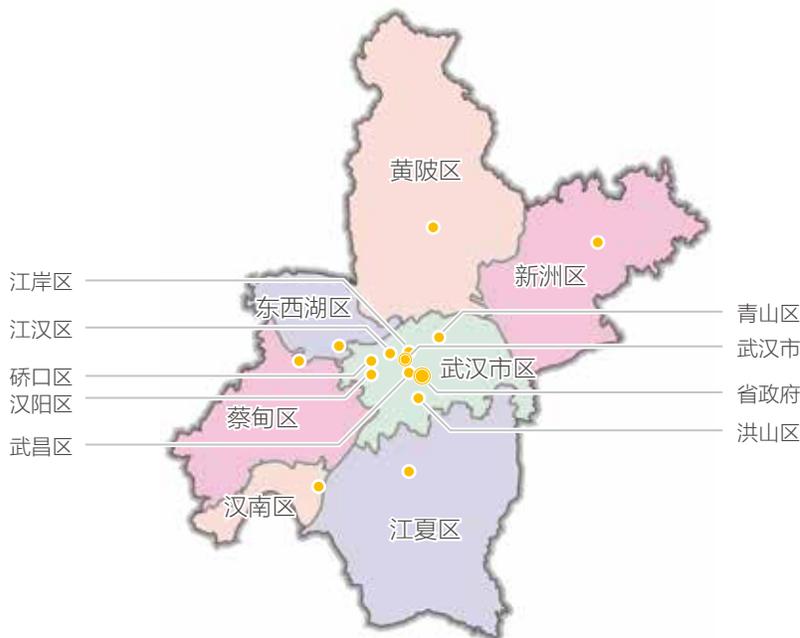
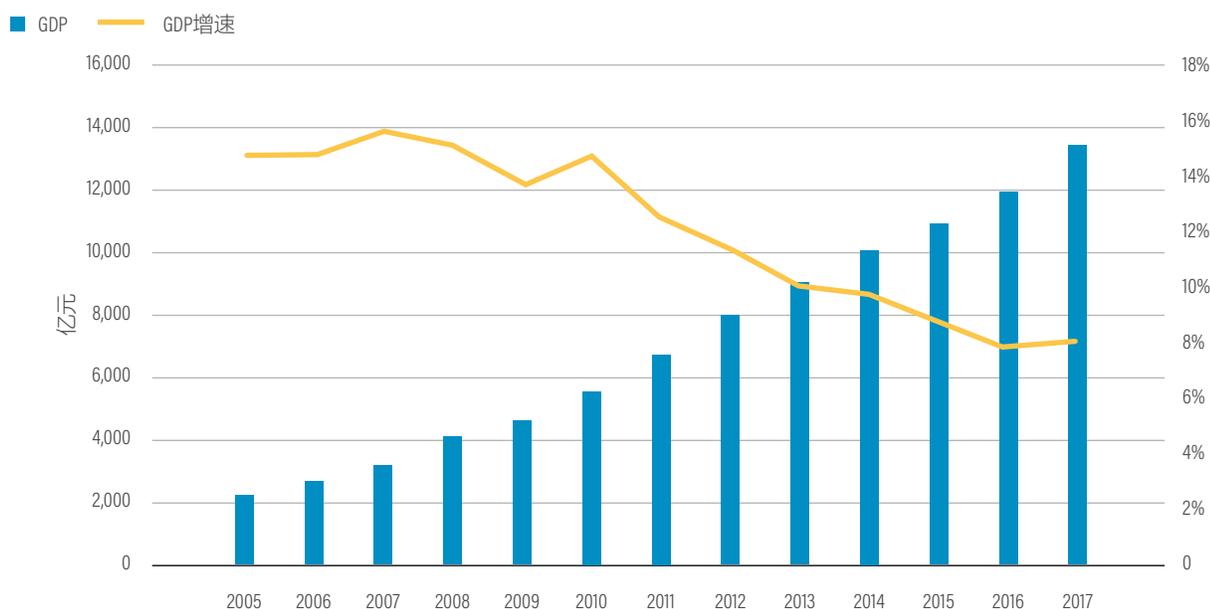


图 3 | 2005—2017年武汉市GDP及增速



数据来源：历年武汉市国民经济和社会发展统计公报

京、上海、重庆、深圳、香港等城市均在五小时左右。武汉是中国著名的江城，长江、汉江纵横交汇通过市区，形成武昌、汉口、汉阳三镇鼎立的格局，通称“武汉三镇”，武汉市内江河纵横，湖港交织，全境水域面积2217.6平方公里，占全市总面积的四分之一，构成了武汉滨江滨湖水域生态环境<sup>8</sup>。武汉还是中国中部航空枢纽，拥有逾50条境外直达航线，居中部地区首位<sup>9</sup>。

2014年7月，武汉市委十二届六次全会确立了“万亿倍增”目标，提出到2021年经济总量由一万亿元向两万亿元跨越，届时武汉人均GDP将达到25000美元<sup>10</sup>。2016年12月，国家发展和改革委员会（简称“国家发改委”）印发《促进中部地区崛起“十三五”规划》，其中提出支持武汉建设国家中心城市，武汉成为继北京、天津、上海、广州、重庆、成都之后的第七个国家中心城市。未来，武汉将建设具有国际竞争力的经济中心，打造国家先进制造业中心和国家现代服务业中心。上述目标决定了武汉仍将处于大建设、大发展阶段，城镇化的快速推进将是武汉下一阶段发展的主旋律<sup>11</sup>。2017年1月，武汉市召开第十三次党代会，提出建设“现代化、国际化、生态化”大武汉。其中具体目标包括，“到2018年，地区生产总值和城乡居民收入比2010年翻一番以上，人民生活品质明显提升，脱贫攻坚任务全面完成；到2021年，力争地区生产总值达到2万亿元左右，高水平全面建成小康社会，加快建设现代化、国际化、生态化大武汉，为复兴大武汉打下坚实基础。”<sup>12</sup>要建设国家中心城市、实现GDP翻番，又要实现2022年碳排放达峰，这对武汉而言

是一个挑战。此外，随着城市的进一步发展，经济大幅增长、人口增加、建成区面积扩大等，势必带来交通需求的成倍增长，这也给武汉市交通碳排放达峰带来了挑战。

## 1.2 交通需求特征

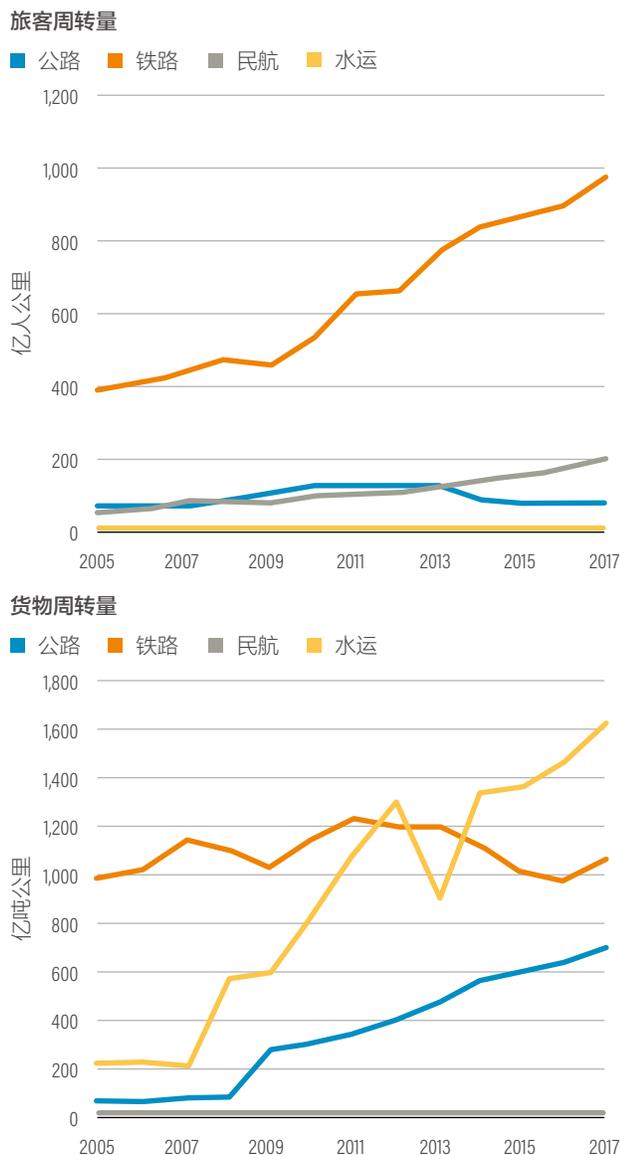
### 1.2.1 综合交通运输有序发展

过去10年，武汉市交通运输行业增长迅速。2017年武汉的客运量和旅客周转量<sup>13</sup>分别为3亿人和1245亿人公里，比2005年增长了94%和145%，货物运输量和货物周转量分别为5.7亿吨和3360亿吨公里，比2005年增长了192%和163%<sup>14</sup>。图4显示了2005—2017年武汉市公路、铁路、民航和水运的旅客和货物周转量情况。

近年来，由于高铁发展迅速，越来越多的旅客选择以高铁替代城际大巴出行，铁路的旅客周转量快速上升，公路的客运量有所下降。相反的，由于武汉市大力发展物流产业，公路货物运输量迅速增长。而受到经济下行趋势影响，大宗货物运输需求减少，导致2012年以来铁路货物运输量显著下降，回落到2005年水平。

武汉天河机场是我国中部地区国际航线最多、旅客吞吐量最大的国际机场<sup>15</sup>。2017年，武汉天河机场旅客吞吐量达2313万人次<sup>16</sup>，跻身全国大型繁忙机场行列，连续多年领跑中部地区。天河机场T3航站楼投运，跻身全国最高等级

图 4 | 2005–2017年武汉市公路、铁路、民航和水运的旅客和货物周转量情况



数据来源：历年武汉统计年鉴

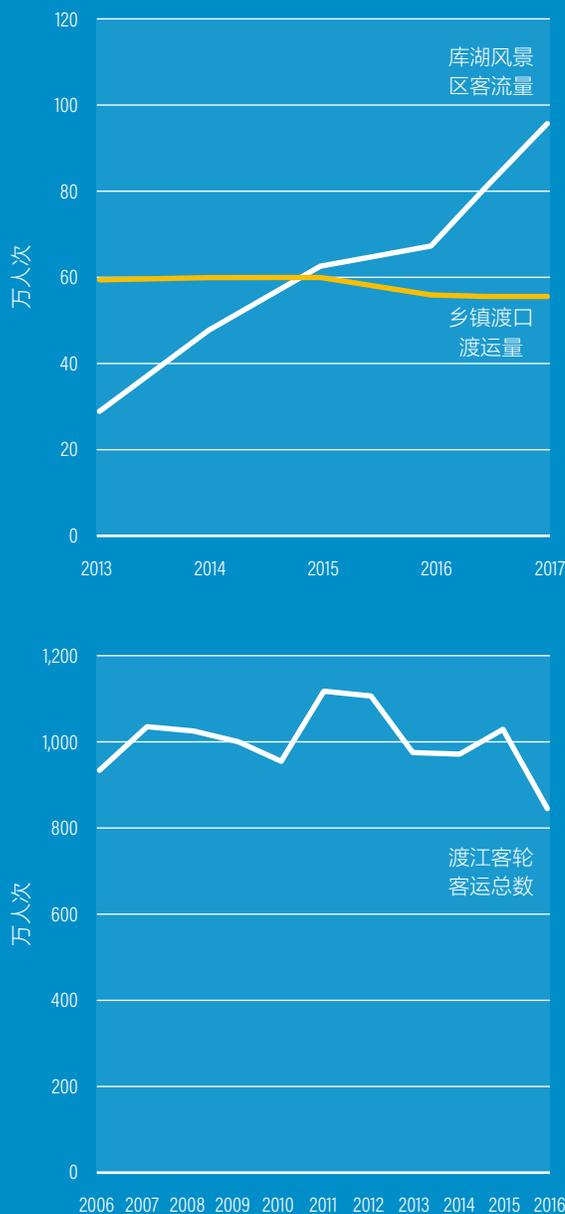
机场行列，新开通武汉至悉尼、圣彼得堡等7条国际航空航线，首次开通洲际全货机航线，直达美国芝加哥，武汉国际及地区客货运航线达到55条，国际及地区旅客吞吐量持续保持中部首位<sup>17</sup>。

武汉市被定位为长江中游航运中心<sup>18</sup>，武汉新港被打造成为辐射中西部地区、连接国际航运市场的区域性集装箱和大宗散货枢纽港口<sup>19</sup>。武汉港整体地位突出，在“十二五”末，武汉港已成为全国第一个突破百万标箱的内河港口<sup>20</sup>，更步入了世界内河集装箱港口的“第一方阵”<sup>21</sup>。同时，武汉也形成了一定规模的近洋航线网络，相继开通了“江海直达”、“沪汉台”、“东盟四国快班”、“日韩快班”等航线。

### 专栏 1 | 武汉市内水运情况

武汉市内水运旅客运输主要为城市内渡运，包括乡镇渡口运输和渡江运输，以及内湖水库等水上旅游观光运输，运输体量相对较小。图5展示了过去几年不同类别的水运客流量情况。库湖景区水运连年增长与武汉旅游业的快速发展息息相关，而作为通行目的使用的渡船运输则发展相对稳定。

图 5 | 武汉市水运客流量



数据来源：武汉市港航管理局及历年武汉统计年鉴<sup>22</sup>

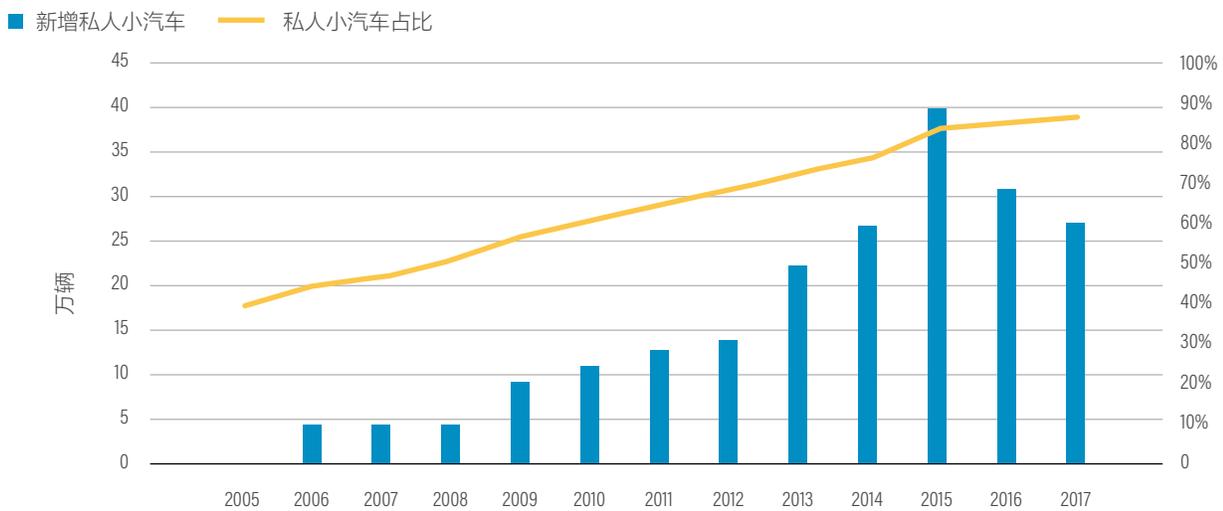
## 1.2.2 私人小汽车爆发性增长

收入水平提高使得越来越多的居民选择购买小汽车。武汉市私人小汽车保有量增速加快、占比提高。2017年武汉市私人小汽车保有量为223万辆，与2016年相比增加了27万辆，过去五年平均每年新增约30万辆，2005年以来年均增速在25%以上，处于爆发性增长阶段。2005年武汉市私人小汽车保有量占总汽车保有量的比例仅为40%，2017年这一比例上升至86%，如图6所示。但2015年以后，随着武汉市公共交通系统的逐渐完善，新增私人小汽车的速度也逐年放缓。

## 1.2.3 城市轨道交通发展迅猛

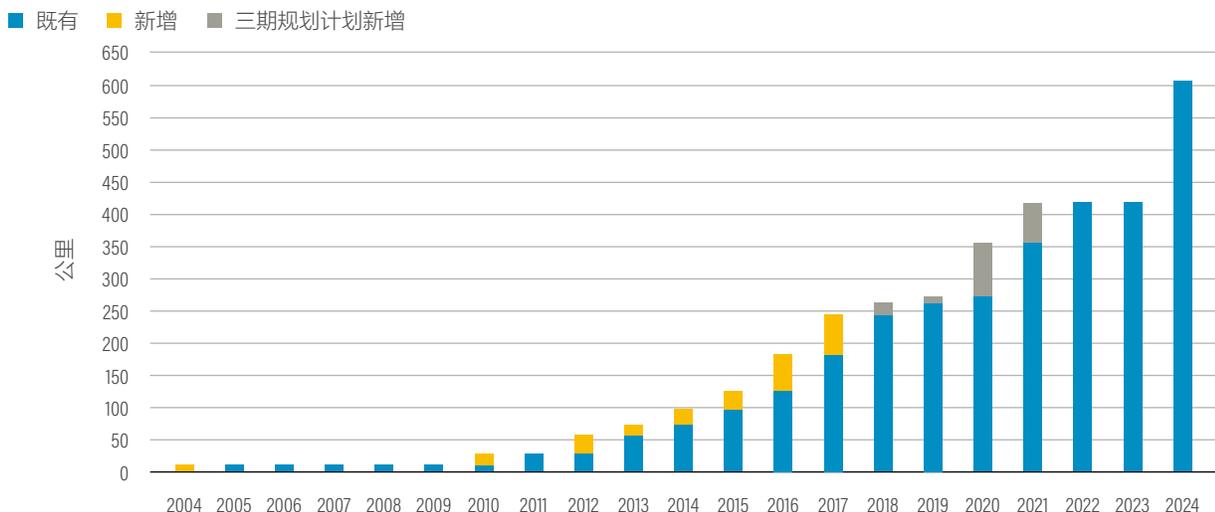
近年来武汉城市轨道交通建设加快，客流量大增。2004年7月，武汉首条地铁线路试运营。至2016年，武汉地铁从单线运营到环通三镇，逐渐成为市民出行的首选交通工具，日均客运量从0.78万乘次增长到200万乘次，全年客运量由100万乘次增长到5.68亿乘次，轨道交通客流占公共交通总客流量的比例由最初的0.12%增长至现阶段的25%以上。“十二五”期间，武汉市连续4年每年开通一条轨道交通线路。2016年轨道交通第三期建设规划线路全部开工，同时在建线路达到14条。2017年新开工轨道交通线

图 6 | 武汉市私人小汽车增长情况



数据来源：历年武汉市国民经济与社会发展统计公报

图 7 | 武汉市地铁线路长度



数据来源：历年武汉市国民经济与社会发展统计公报

路5条，建成通车3条，在建13条，地铁运营总里程237公里，比上年增长30.6%<sup>23</sup>。接下来，武汉的目标是建设“世界级地铁城市”，至2021年，武汉市将每年力争建成2条轨道交通线路，建成约400公里的城市轨道交通线网<sup>24</sup>，如图7所示。考虑到2018年底刚刚获得批复的《武汉市城市轨道交通第四期建设规划（2019-2024年）》<sup>25</sup>，到2024年武汉将形成14条线路运营、总长606公里的轨道网。此外，武汉对于轨道交通的远景年规划为1000公里<sup>26</sup>。

## 1.2.4 打造国家物流中心

作为中国内陆地区最大的交通枢纽，武汉市地处长江、汉江和京广高铁的交汇处，具有承东启西、接南转北、吸引辐射四面八方的区位优势。同时，武汉市已经形成了水运、公路、铁路和航空多位一体的综合运输网络。基于其优质的交通基础设施和商业贸易区位优势，武汉市已经成为华中地区的中心城市和商品集散地，具有物资流通量大、周转量大等特点，为发展现代物流业提供了充足的市场需求基础，是名副其实的内陆地区物流中心。

一方面，依托良好的交通基础设施和地理位置，武汉市持续推进现代物流业的发展。在国家政策的引导和市场机制的共同作用下，武汉市建立了较为完善的商贸物流服务体系，加强了多式联运、机场铁路水运以及冷链物流等多方面的物流基础设施建设，同时增强了多种所有制、多种服务模式、多层次的现代物流企业群体的发展，为带动整体行业进步打下了坚实的基础。在多方共同努力下，“十二五”期间武汉市铁路、水路、公路、航空货运量、货物周转量分别达到4.8亿吨、2952亿吨公里，分别较“十一五”期末增长19.6%和30%。在坚持顶层设计先行，产业发展规划、空间布局规划、园区控制性详细规划的支持下，武汉市“物流总部区+综合物流园区+专业物流中心+配送中心”的现代物流业发展架构基本形成，2015年全市社会物流总额达到2.8万亿元，物流业增加值突破1000亿元，分别为“十一五”期末的1.9和1.8倍<sup>27</sup>。截至2017年底，全市社会物流总额达到3.3万亿元，同比增长10.6%，物流业增加值达到1209亿元，同比增长9.7%<sup>28</sup>。“十三五”期间，武汉市继续推进其交通枢纽功能的升级，进一步统筹铁路、水路、公路、航空多种运输方式的全面发展，并将其物流枢纽和服务中心的功能进一步提升，初步建成国内物流供应链管理中心和全球供应链管理的重要节点框架。到2020年，武汉市的社会物流总额将达到5万亿元，物流业增加值将达到2000亿元<sup>29</sup>。

另一方面，我国2030年左右实现碳排放达峰目标的要求和武汉市自身2022年碳排放达峰目标的约束为武汉市货运和物流业快速发展提供了新的机遇和挑战。现阶段，武汉市的物流体系依然存在不健全的现象，企业组织化程度

低、运输车辆档次较低、信息化水平较低，给城市带来了污染、安全隐患和无序竞争。如何更好地借助区位优势和产业转型的机遇进一步规范物流业，实现降本增效，不仅有助于为物流业的发展创造更大的空间，更是对城市乃至国家碳排放达峰战略的贯彻和支持。

## 1.2.5 共享单车由迅速风靡到规范管理

2015年武汉公共自行车投入运营，2016年12月底摩拜单车、ofo小黄车等共享单车企业相继进入武汉。2017年6月底，武汉市共享单车投放总量逾60万辆<sup>30</sup>，到2018年6月，这一数字就增长到了103万辆<sup>31</sup>。

一方面，共享单车为推动城市慢行交通体系创新升级、全面引领“轨道公交+慢行”的低碳交通发展理念提供了有力保障，为市民出行提供了多样化的选择，彰显了城市活力。以摩拜单车数据为例，推行半年时间投放约20万辆单车，骑行量超过1.2亿人次，骑行总里程超过2亿公里，平均单次骑行距离为1.69公里。在武汉都市发展区3261平方公里范围内，摩拜单车已经基本实现建成区用地覆盖率100%，公交站盲区覆盖率100%，对公共交通起到了有益的支撑和补充作用，丰富了市民出行选择。此外，“轨道交通+共享单车”出行已经逐渐成为市民流行的出行组合模式。据统计，现状轨道站点客流中，早、晚高峰摩拜单车接驳比例已经分别达到10.6%和11.5%，较之前的2.2%和1.7%有大幅提升，成为轨道交通重要接驳方式之一，为市民提供便利的同时，也扩大了轨道交通客流吸引范围，强化了轨道交通优势<sup>32</sup>。

另一方面，共享单车给市民带来出行便利的同时，也存在着无序投放、乱停乱放等问题。考虑到共享单车发展规模已严重超出武汉市非机动车可停放区域承载能力，2017年9月，武汉市交通运输委员会要求共享单车企业暂停新增投放。2018年6月，又发布了武汉共享单车企业经营服务质量考核评估报告结果，并公布了武汉共享单车分批规模调减方案，年内首批调减15万辆<sup>33</sup>。

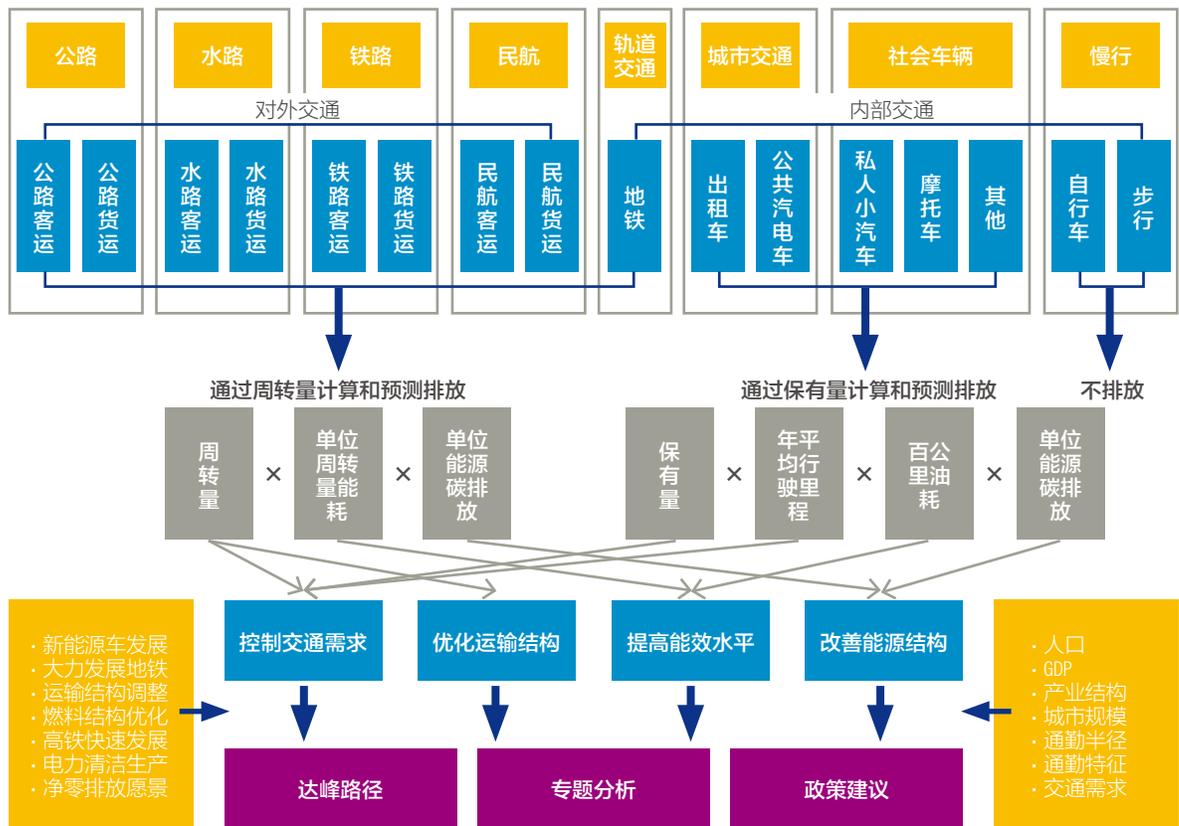


## 第二章

# 武汉市交通碳排放达峰路径分析方法学

本研究采用的总体技术路线如图8所示。本章将从时间尺度、核算边界、排放源分类、计算方法、情景设置和驱动因素六个方面对方法学进行简要说明，更详细的参数设置参见附录。

图 8 | 武汉市交通碳排放达峰路径分析总体技术路线



## 2.1 时间尺度

本研究涉及的历史数据年份为2005—2017年。考虑到武汉的交通运输需求在未来较长一段时间都会呈增长趋势，且本研究不仅致力于分析2022年城市达峰目标，还希望研究达峰后的排放路径，因此预测了到2050年的武汉市交通碳排放趋势。

## 2.2 核算边界

本研究涵盖全口径“大交通”，包括公路、铁路、民航、水运、城市轨道交通、公共汽（电）车、出租车和非营运交通。非营运交通包括私人小汽车、摩托车、物流车辆、环卫车辆和其他社会车辆等。由于数据可获得性原因，本研究不包括管道交通和非道路交通（off-road），民航只包括商业航空，不包括通用航空。

对于“交通碳排放”这一概念，“交通”是指交通工具即移动源，交通领域中的静止源如机场航站楼、港口设施等产生的排放并不在研究范围内。“碳排放”指化石燃料燃烧直接产生的，以及电力使用间接产生的二氧化碳排放。由于甲烷和氧化亚氮排放所占比例非常小，故进行了简化处理，未计算在内。

交通排放源最大的特征就是移动性，需要特别明确边界问题。本研究涉及的能耗和排放边界与统计数据边界一致，具体如下：

- 公路、民航、水运、公共汽（电）车、出租车和非营运交通采用属地原则，包括在武汉注册的车、船和民用航空器。其中，公路客运统计的相关规定可以参考专栏2。
- 由于铁路的运输量和能耗统计是以线路为单位而非以行政区划为单位，所以铁路排放无法区分城市边界。铁路的研究边界为武汉铁路局管辖范围，包括

湖北省全境和河南省、安徽省部分地区，与南昌局、上海局、郑州局、西安局、成都局和广铁集团相接线路，以及沪汉蓉铁路、漯阜铁路、湖北城际铁路、荆岳铁路、新港江北铁路、长荆铁路等6条线路。这一方法会高估武汉的排放，但考虑到武汉市也对武汉铁路局进行节能考核，且边界同武汉铁路局管辖边界一致，同时铁路能耗数据以城市作为边界进行区分较为困难，因此做上述处理。

- 城市轨道交通的研究边界为武汉地铁牵引能耗相关的排放。根据相关研究<sup>34</sup>和武汉实际数据，地铁牵引能耗占城市轨道交通总能耗的一半左右。

此外，核算边界还涉及“范围”的概念，本研究包含了范围一排放、范围二排放和范围三排放。范围一排放是指发生在武汉市行政边界内的相关排放，如汽车在武汉市内行驶使用汽油产生的排放；范围二排放是指发生在武汉市行政边界内的由于电力消耗产生的相关排放，如地铁消耗电力产生的排放；范围三排放是指由武汉市行政边界内的活动引起的跨边界或者边界外排放，如武汉市出发或达到的飞机、货车、轮船产生的相关排放。

## 2.3 排放源分类

由于武汉市在前期已经利用自上而下方式计算过了城市总体排放和分行业排放，本研究采用自下而上的方式计算排放，将排放源按照类别和燃料进一步细分，以得出更加详细的排放分析。例如，私人小汽车分别测算汽油车、电动车的排放，公共汽（电）车分别测算柴油车、CNG车、纯电动车的排放等，具体分类见图9。

此外，研究中需要明确机动车、汽车、私人小汽车等概念的范畴。机动车包括汽车、摩托车和其他车辆如挂车、农用车等，汽车则包括了私人小汽车、公共汽（电）车、出租车、其他载客汽车和载货汽车，具体含义如图10所示。

### 专栏 2 | 关于公路客运统计的相关规定

《公路水路运输量统计试行方案（2009）》中规定，“公路客运数量统计范围原则上为所有在公路上产生运输量的营运车辆。”，“仅在城市内道路上进行旅客运输的公共汽（电）车、出租客车不纳入公路运输量的统计范围。”

《公路水路运输量统计试行方案（2014）》中规定，“公路客运量、公路旅客周转量的统计范围调整为省际客运、旅游客运和郊区客运，市郊公交不再纳入客运量统计。”

图 9 | 武汉市交通排放源细分

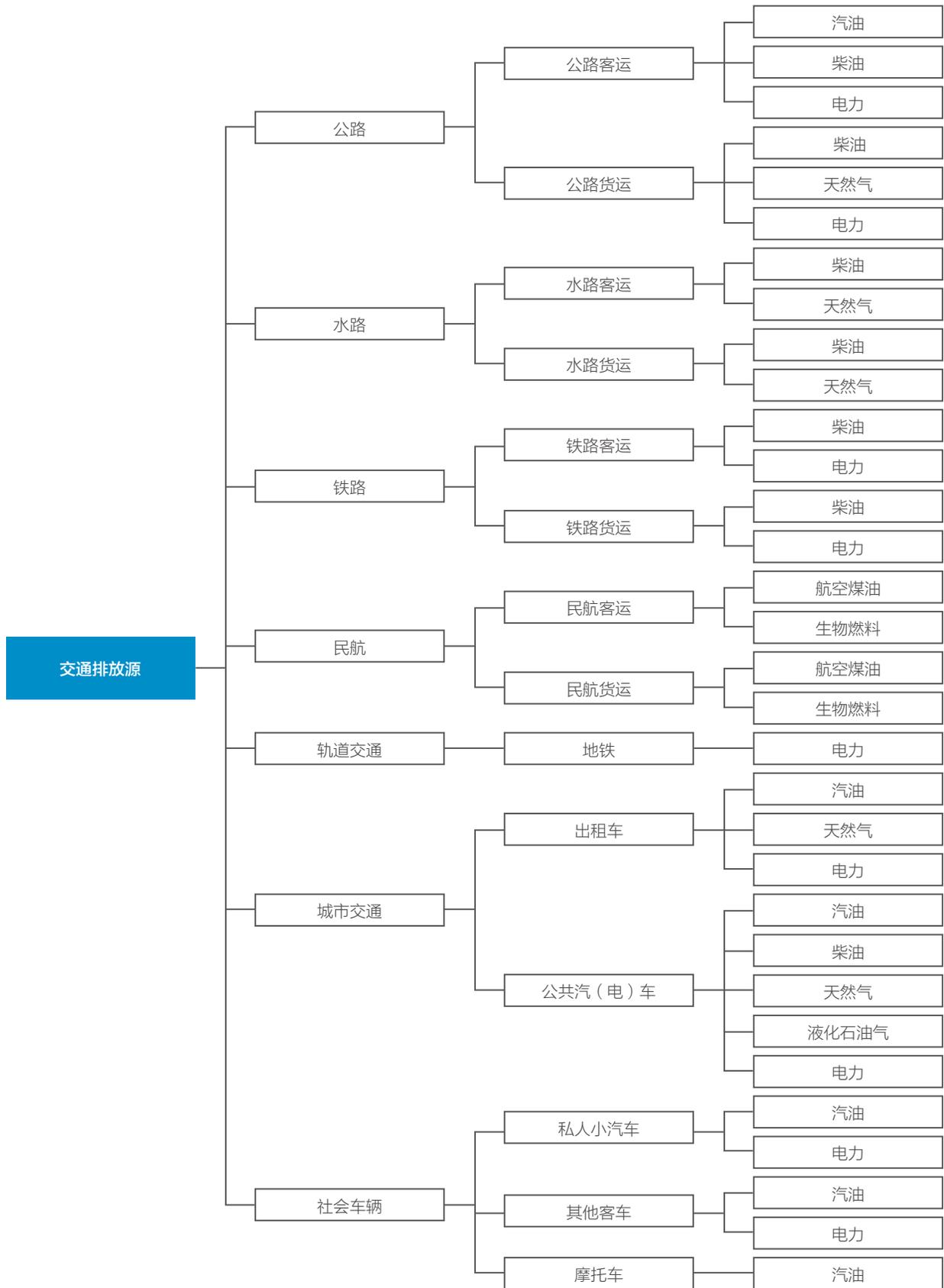
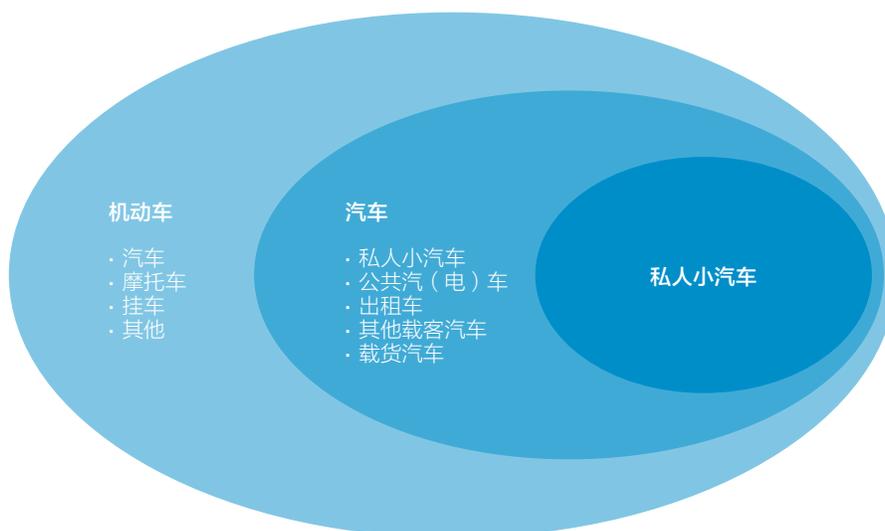


图 10 | 机动车、汽车和私人小汽车的具体含义



## 2.4 计算方法

本研究综合了两种计算方法：

利用周转量和相关参数计算排放：

$$\text{排放量} = \text{周转量} \times \text{单位周转量能耗} \times \text{单位能耗碳排放}$$

利用保有量和相关参数计算排放：

$$\text{排放量} = \text{汽车保有量} \times \text{年行驶里程} \times \text{百公里能耗} \times \text{单位能耗碳排放}$$

选择计算方法的原则是，优先利用周转量统计数据进行计算，没有周转量统计数据则采用保有量相关数据进行计算。不同交通类型采用的计算方法见表 1。

表 1 | 不同交通类型采用的计算方法

交通类型	利用周转量计算	利用保有量计算
公路	√	
铁路	√	
民航	√	
水运	√	
地铁	√	
公共汽(电)车		√
出租车		√
社会交通		√

## 2.5 情景设置

本研究在模型中设置了多个情景对不同政策行动的效果进行评估，最终选出两个情景进行介绍，即基准情景和达峰情景。基准情景考虑了截至目前所有已出台政策，达峰情景则是为了确保武汉市交通碳排放尽早达峰、低位达峰，同时朝着城市整体在本世纪中叶实现深度减排而建议武汉额外采取政策的情景。两个情景的主要差异在于汽车保有量、货运结构、能效进步、能源结构优化程度，以及新能源车推广应用程度等。

研究采用的活动水平历史数据来自历年《武汉统计年鉴》、《武汉交通统计年鉴》和《武汉市国民经济和社会发展统计公报》等。排放因子大多采用国家平均数据，来自历年《交通运输行业发展统计公报》、《铁道统计公报》、《民航行业发展统计公报》，以及《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南》等。

未来参数设置主要参考了《武汉市城市总体规划（2016—2030年）》、《武汉市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》、《武汉2049远景发展战略规划》、《武汉市碳排放达峰行动计划（2017—2022年）》、《武汉市交通运输发展“十三五”规划》、《武汉市低碳发展“十三五”规划（2016—2020年）》、《武汉国家“公交都市”试点城市建设实施方案》、《武汉市现代物流业发展“十三五”规划》、《武汉市门户机场枢纽发展战略规划》、《武汉市交委2017年工作报告》、《武汉市城市轨道交通第三期建设规划（2015~2021年）》等。在上述规划中未包含的信息，由咨询相关领域专家或通过其他估算方法得到。

如果读者希望了解更详细的参数设置情况，可以参考附录中的表格及说明。此外，第三章介绍武汉市交通碳排放达峰路径时也会对参数进行说明。

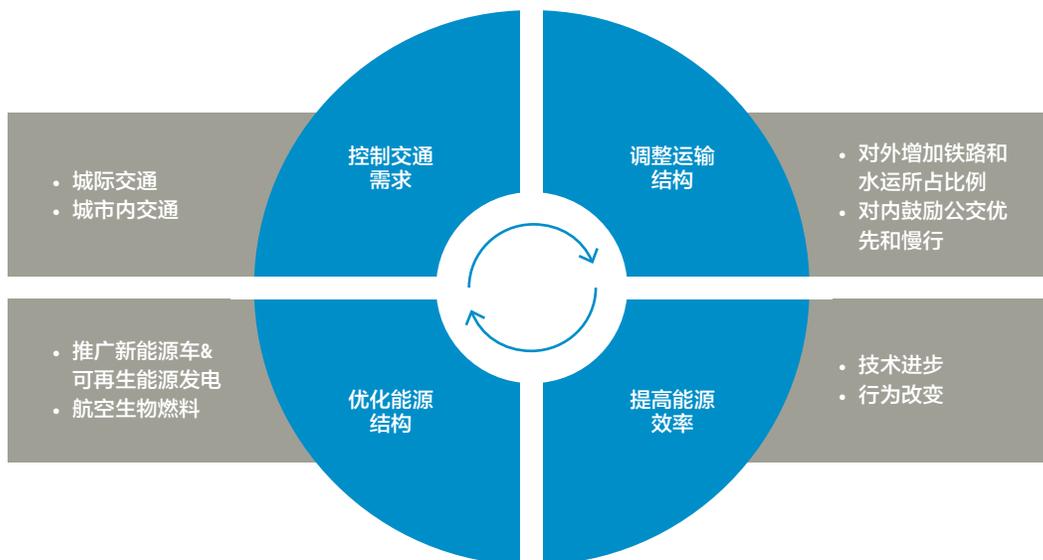
## 2.6 驱动因素

影响交通排放的因素主要包括交通需求、运输结构、能源效率和能源结构四个方面。控制交通需求可以从城际交通和城市内交通两个角度考虑；调整运输结构包括增加铁路和水运所占比重、鼓励公交优先和慢行等；提高能源效率可以通过技术进步和行为改变等方式；优化能源结构则包括新能源汽车的推广应用、可再生能源发电比例的提升、航空生物燃料的应用等。这些内容将成为情景分析中设置未来参数值的主要驱动因素，如图11所示。

## 2.7 局限性

尽管进行了大量研究分析工作，本研究还是存在一些不足，具体包括：受到数据可获得性的限制，只采用自下而上方法计算排放，未采用自上而下方法进行验证；在无法获得武汉本地数据的情况下，部分参数采用了国家平均值，如公路、民航、水运的单位周转量能耗，以及汽车百公里油耗等数据；在对未来的周转量、保有量等参数进行预测时，有规划数据的采用规划数据，没有规划数据的则根据历史趋势、专家判断等方式预测，存在一些不确定性；部分模型功能进行简化处理，如所有新能源汽车当作纯电动汽车处理，未考虑氢燃料、插电式混合动力汽车和燃料电池汽车。

图 11 | 交通减排驱动因素



往佛祖岭方向 L4 To Fozhuoling  
往城铁汤逊湖方向 L2 To Tangxunhu City Railway Station  
往常青藤路方向 To Changqingting Road



### 第三章

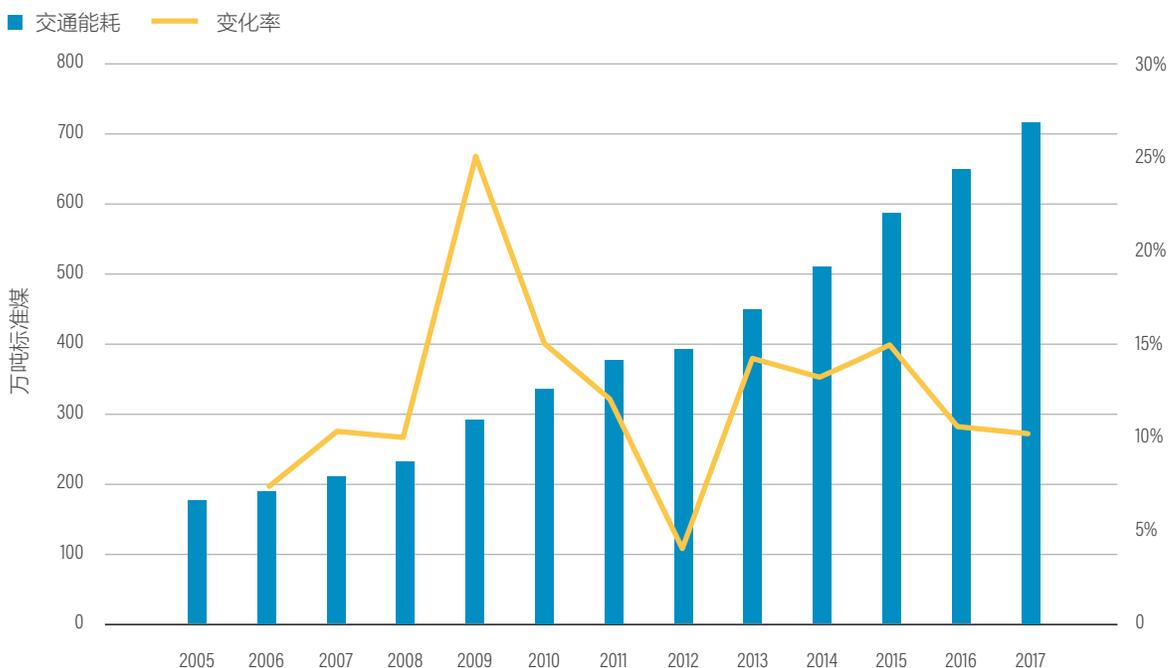
# 武汉市交通碳排放达峰及达峰后路径

## 3.1 交通能耗与碳排放现状

2017年武汉市交通能源消耗量为715万吨标准煤，比上一年增长10%。“十一五”期间武汉市交通能耗年均增长13.6%，“十二五”期间年均增长11.7%，“十三五”前两年年均增长10.4%，如图12所示。

从能源结构上看，油品毋庸置疑是交通用能的最大贡献者。油品占比一直在80%左右波动，天然气占比从0.3%增长到8%，电力占比从16%下降到8%，如图13所示。天然气比重的提升是受到近年来清洁能源推广应用的影响，而电力所占比重下降则是由于武汉市交通用能的电耗主要来自

图 12 | 2005—2017年武汉市交通领域能源消耗量及变化率



数据来源：课题组计算

铁路，武汉铁路局的电气化率本身比较高，提升空间有限，而其他交通领域如地铁、电动车的用电量还是相对较小。

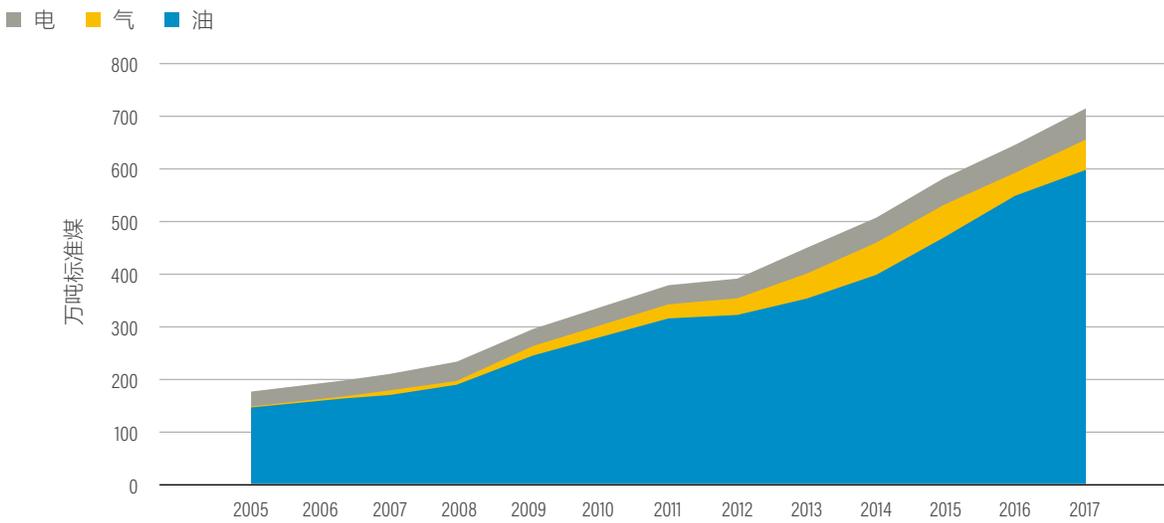
2017年武汉市交通领域二氧化碳排放约1600万吨，比上年增长10%。“十一五”期间武汉市交通碳排放年均增长12.2%，“十二五”期间年均增长11.3%，“十三五”前两年年均增长10.2%，如图14所示。

按照交通类型分类，2017年武汉市交通领域碳排放中排

在前几位的分别是私人小汽车700万吨（占44%），铁路243万吨（占15%），公路234万吨（占15%），民航192万吨（占12%），如图15所示。

值得一提的是市内交通，除了步行和自行车以外，地铁分担了近10%的市内出行和26%的公共交通出行，但只排放14万吨二氧化碳，占市内交通排放的1%，是非常清洁的出行方式。而私人小汽车分担了8.6%的市内交通出行，但是排放占市内交通排放的84%。2017年武汉市内交通分担率与排放占比如图16所示。

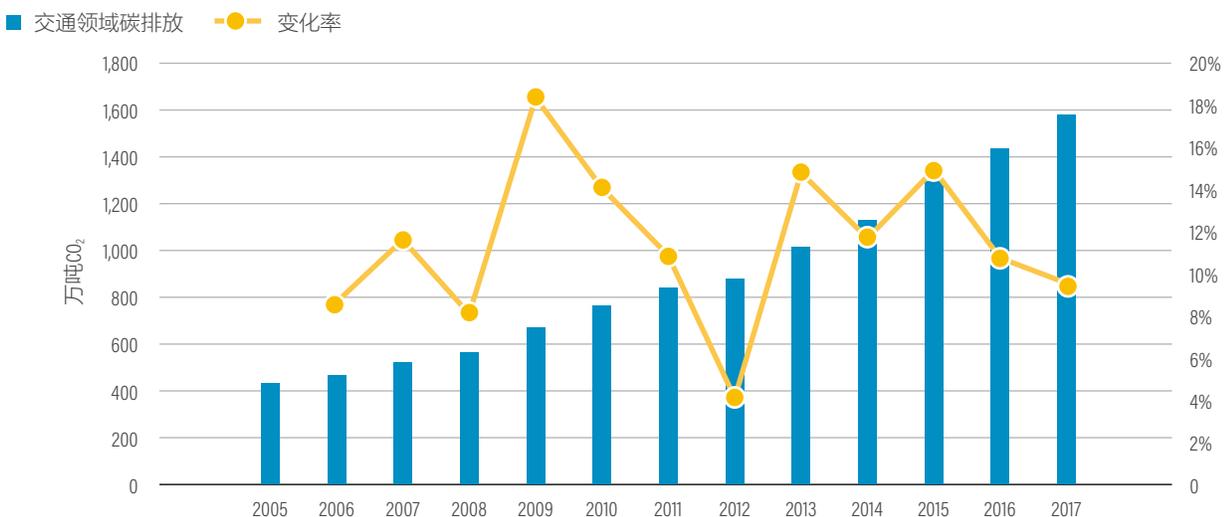
图 13 | 2005—2017年武汉市交通领域能源消耗结构变化



数据来源：课题组计算

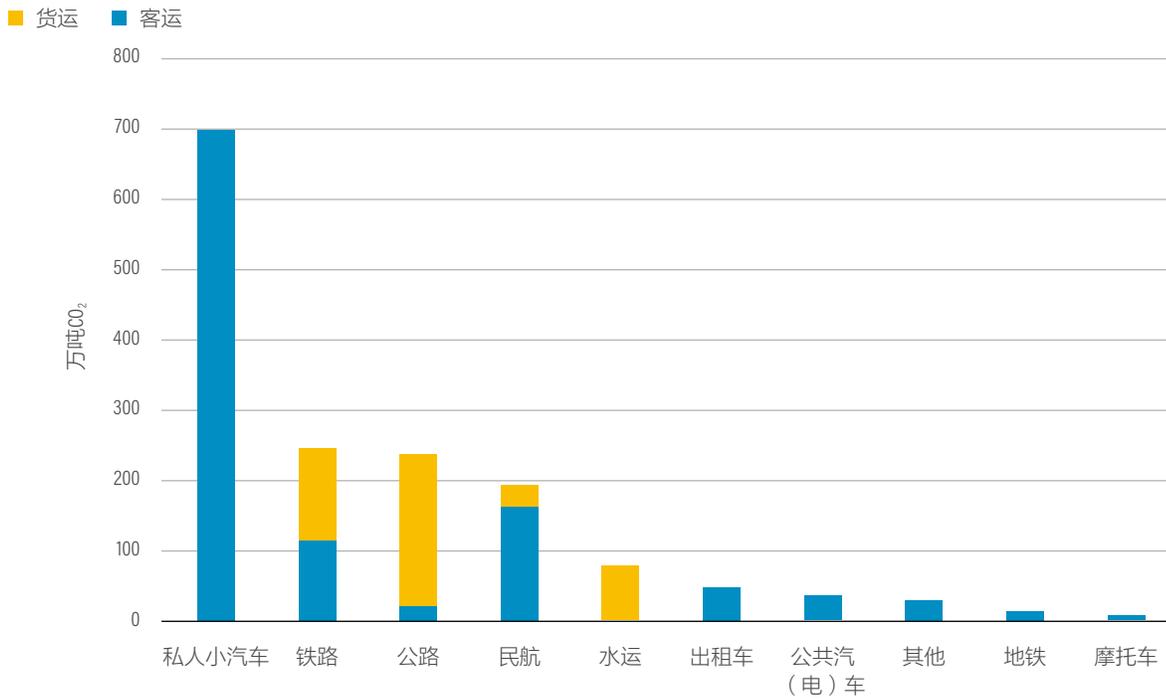
注：上述计算结果中，油包括了汽油、柴油和燃料油。但由于综合交通中的公路运输能源统计没有区分汽油和柴油，因此无法将油品进一步拆分和展示。

图 14 | 2005—2017年武汉市交通领域碳排放及变化率



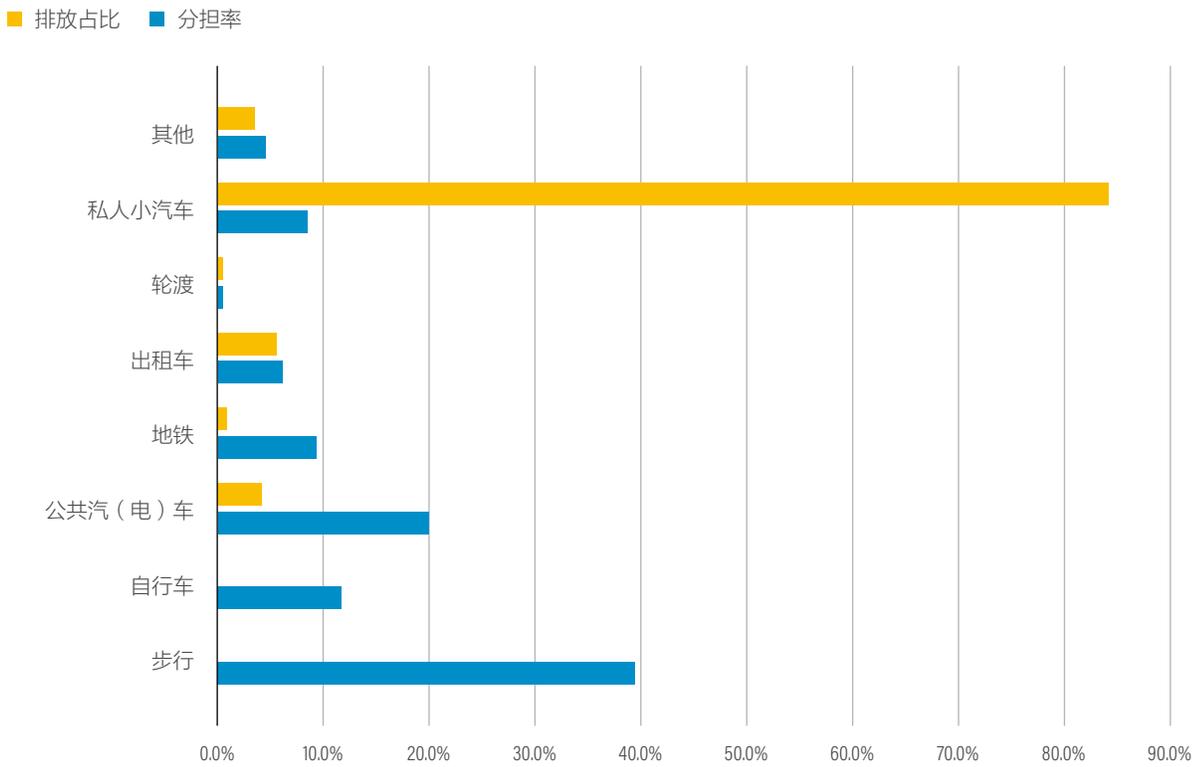
数据来源：课题组计算

图 15 | 2017年武汉市分交通类型碳排放



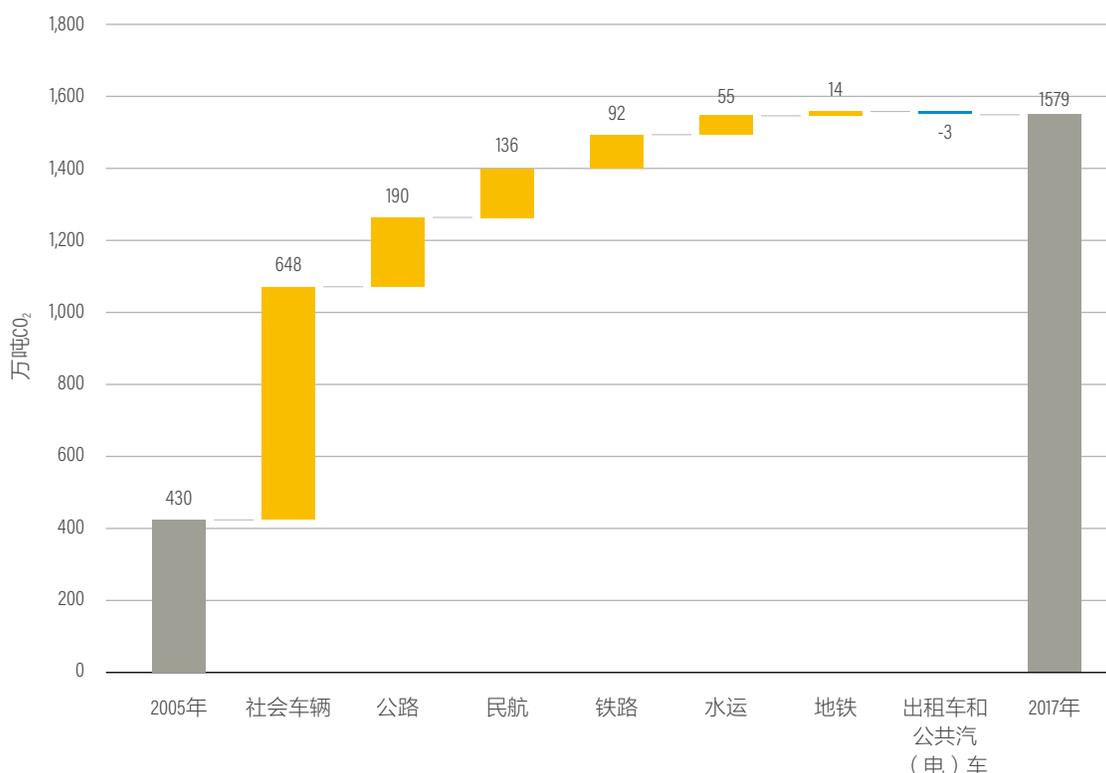
数据来源：课题组计算

图 16 | 2017年武汉市内交通分担率与排放占比



数据来源：分担率数据来自武汉市交通科学研究所，排放数据为课题组计算

图 17 | 2005—2017年武汉交通碳排放增长贡献



数据来源：课题组计算

从排放变化来看，2005—2017年私人小汽车贡献了最多的排放增量，其次是公路、民航、铁路、水运等，如图17所示。

## 3.2 未来驱动因素分析

现阶段，新能源汽车、民航生物燃料、共享汽车等由于技术、市场、商业模式、配套基础设施等因素还没有规模化应用，但都在以超乎想象的速度发展，比如国际上一些国家和城市政府发布了燃油车禁售令，中国也有汽车生产企业宣布了新能源汽车生产计划等。

### 3.2.1 交通需求

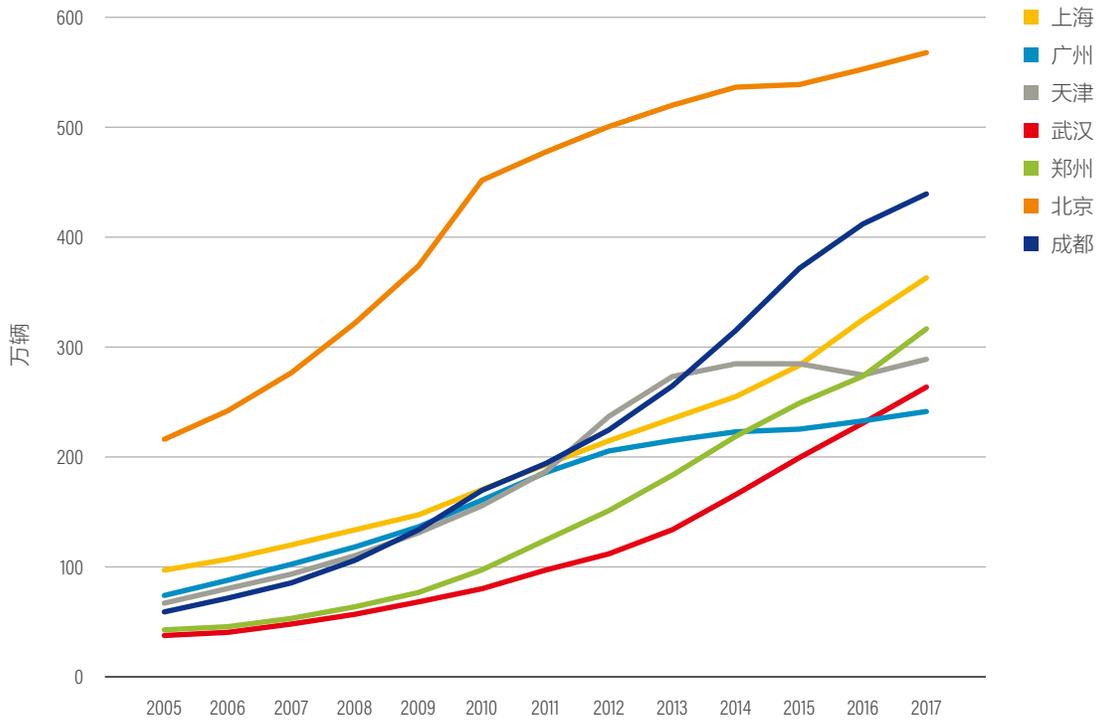
交通需求是排放的重要驱动因素之一，其中包括公路、铁路、民航和水运的客货运需求，以及城市汽车保有量的增长。

就城际交通而言，2017年武汉公路货运量为3.5亿吨，铁路货运量为6980万吨<sup>35</sup>，民航旅客吞吐量为2300万人次，货邮吞吐量为19万吨<sup>36</sup>。根据《武汉城市总体规

划（2016—2030年）》、《武汉市国民经济和社会发展的第十三个五年规划纲要》、《武汉市交通运输发展“十三五”规划》和《武汉市现代物流业发展“十三五”规划》等文件，预计2030年全市公路货运量将达4.55亿吨，在2017年基础上增长30%；铁路货运量达到1.76亿吨，比2017年增长150%；2020年天河机场旅客吞吐能力达4500万人次，货邮吞吐能力达50万吨，到2030年航空客运规模达到7500万人次，其中国际客运量超过30%，航空货运量将增至150万吨。此外，武汉还在积极建设国家物流中心。这些都意味着交通排放还会有大的增长。

从城市内交通来看，武汉的交通发展需要适应未来武汉人口、经济的大幅增长带来的交通需求的成倍增长。按照武汉市远景战略规划，至2049年武汉经济总量将由现在的约1万亿元增长至6万亿元，人口总量将由现在的约1000万人增长至2000万人左右<sup>37</sup>。随着经济、经济的大幅增长，武汉的汽车保有量和全市交通需求总量还将有不少的增长。2017年武汉的汽车保有量为261万辆<sup>38</sup>，与其他国家中心城市相比，由于广州实施了限购政策，武汉于2017年超过广州，但是仍然排在第七位。尽管武汉的汽车保有量是最少的，但是从千人汽车保有量上看，武汉排在中间位置，如图18和图19所示。

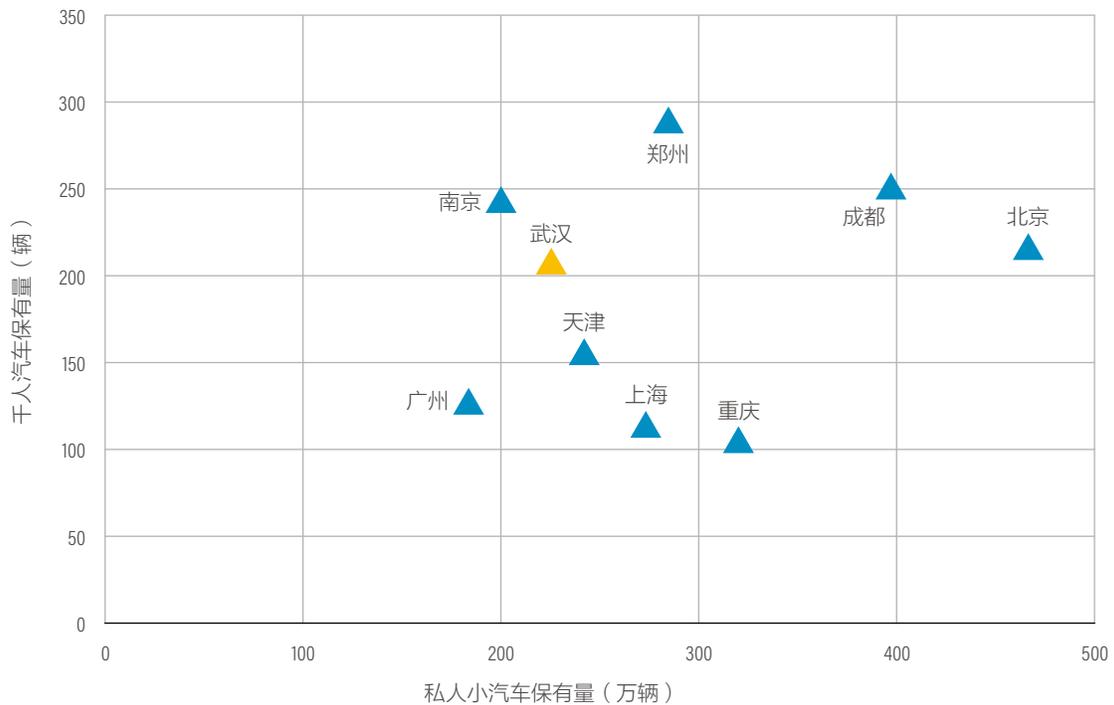
图 18 | 国家中心城市汽车保有量



数据来源：各城市历年国民经济和社会发展统计公报

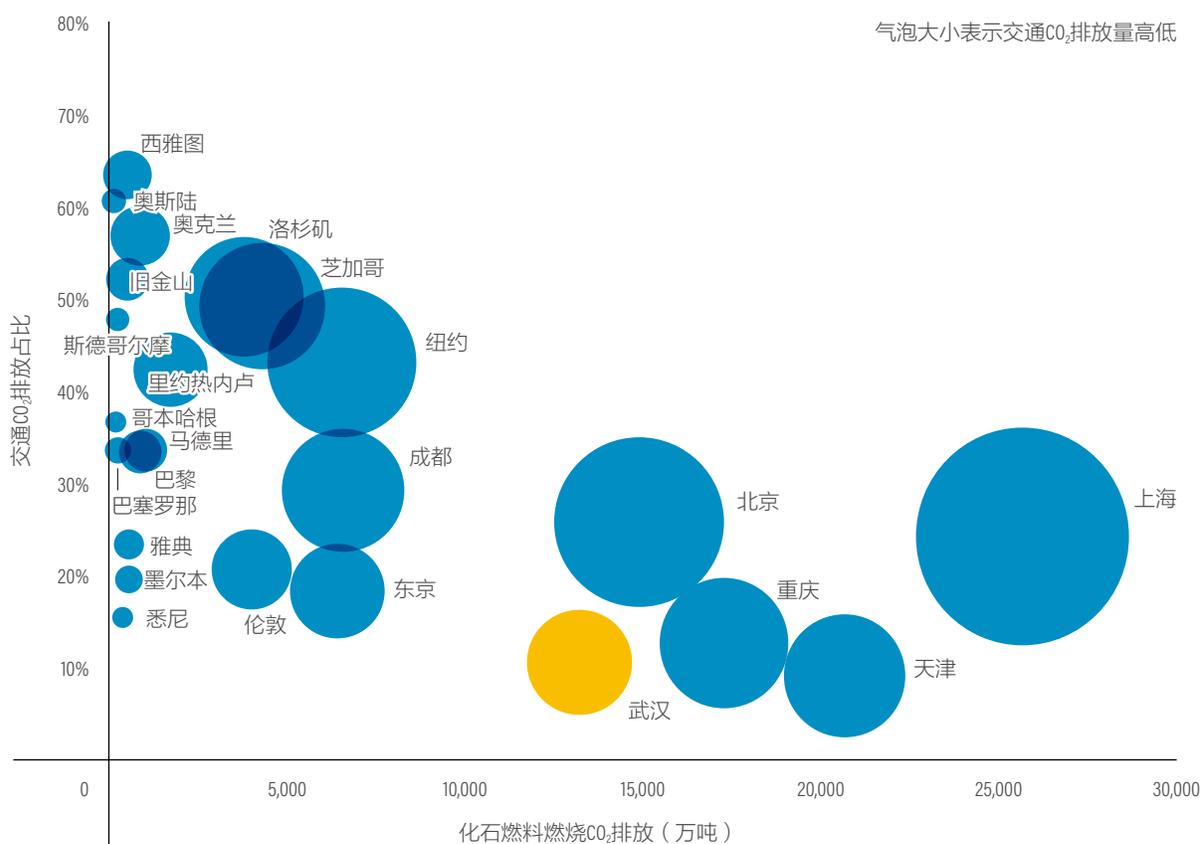
注：北京从 2011 年起实施了限购政策，汽车保有量增速从 2011 年开始放缓；上海由于早在 1994 年就开始实施牌照拍卖政策，汽车保有量远远低于北京

图 19 | 2017年国家中心城市千人汽车保有量



注：这里的汽车指的私人小汽车，与图 17 中的范围不同。

图 20 | 国内外主要城市交通排放及占比情况



数据来源：国外城市数据来自 C40 (<https://www.c40.org/other/gpc-dashboard>)，数据年份为 2012—2015 年不等。北京、天津、上海、重庆信息为课题组根据各地统计年鉴中的能源数据计算 2014 年情况，成都为 2015 年数据。武汉数据来自《武汉市低碳发展“十三五”规划（2016—2020 年）》。

根据发达国家的经验，工业、建筑和交通排放通常是“三分天下”，有的城市交通排放甚至超过60%。如图20所示，伦敦、悉尼、墨尔本等的交通排放占20%左右，东京、巴黎、马德里等占30%左右，纽约、里约热内卢占40%左右，斯德哥尔摩、洛杉矶、旧金山等占50%左右，奥斯陆、奥克兰、西雅图更是达到60%左右。国内城市中，北京、上海交通排放占25%左右，重庆占12%。而武汉只占约10%。因此，从发达国家的经验来看，武汉市的交通排放占比还会持续增长。

总的来说，不论是参考发达国家经验，还是武汉自身发展的要求和需求，武汉市的交通需求在未来都还会有大幅增长，这对于控制交通排放是一个挑战。武汉需要采取行动将交通需求控制在一个合理的范围内，如汽车保有量不能无限增长，公路货运需求可以适当转移到别的运输方式等。

### 3.2.2 运输结构

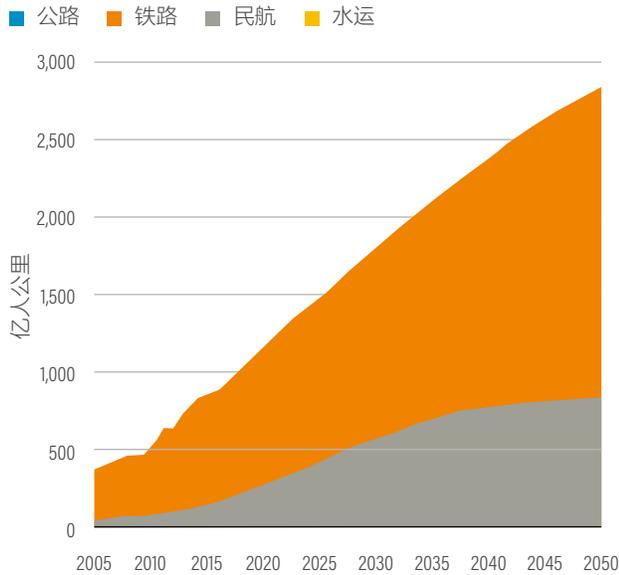
调整运输结构是交通领域节能减排的重要手段之一，原因在于不同运输方式的单位活动能效不同。交通

运输部《关于全面深入推进绿色交通发展的意见》中提出，要持续优化客货运输结构，到2020年铁路和水运在大宗货物长距离运输中承担的比重进一步提高，铁路客运出行比例逐步提升。在国务院发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》也提到，要“优化调整货物运输结构。大幅提升铁路货运比例。到2020年，全国铁路货运量比2017年增长30%”。

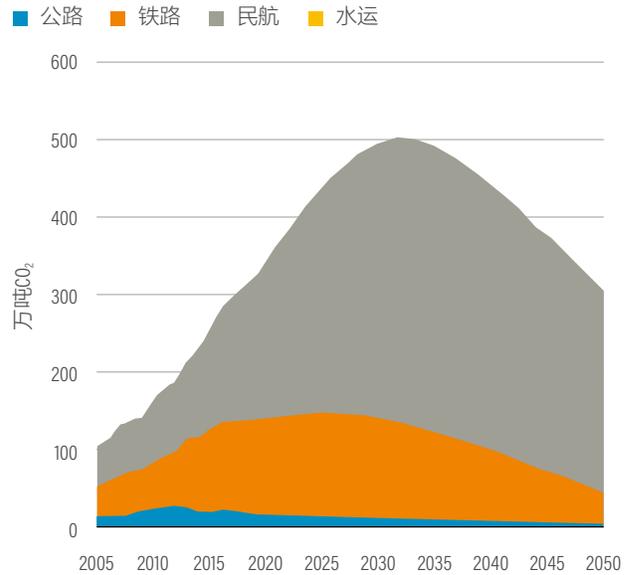
就城际交通而言，水运、铁路、公路和民航的单位周转量能耗由低到高，2015年数据分别为水运28千克标准煤/万换算吨公里、铁路33千克标准煤/万换算吨公里、公路204千克标准煤/万换算吨公里、民航4326千克标准煤/万换算吨公里。以水运为基准，铁路是水运的1.2倍，公路是水运的7.3倍，民航是水运的154倍。结合图21中的4个小图可以看出单位周转量能耗对于排放的影响。在客运中（图21左上和右上），尽管铁路的周转量最大，民航其次，但民航却成为最主要的排放源，排放高峰期时达到铁路的数倍。在货运中（图21左下和右下），尽管铁路和水运所占的周转量比例最大，但公路和民航的排放更大，尤其是民

图 21 | 武汉市不同运输方式客货周转量及排放（达峰情景）

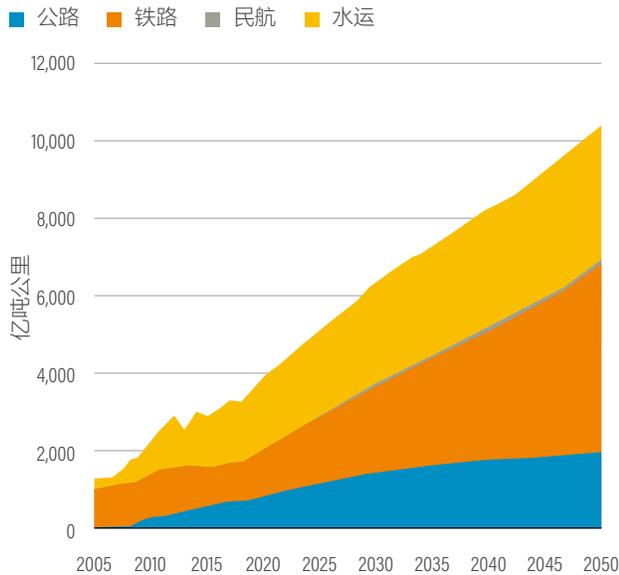
旅客周转量



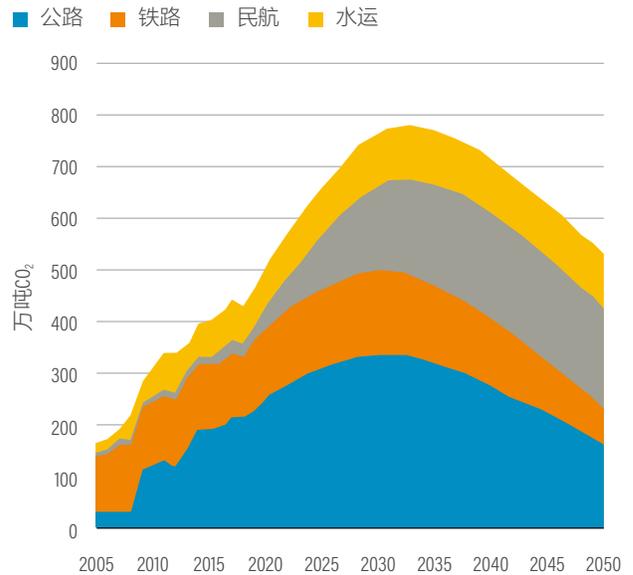
客运排放



货物周转量



货运排放



数据来源：课题组测算

航以微乎其微的货运量和占据近1/4的排放形成了鲜明的对比。由此可见，在同样的运输需求总量下，运输结构调整能够带来非常大的减排潜力。

在城际客运领域，未来铁路和民航将在武汉的旅客运输中起主要作用。高铁给人民生活带来巨大便利，其优势在

1000公里以内出行，与公路相比有时间优势，与民航相比有价格优势、能源效率优势和时间成本优势，且受天气影响更小。未来随着全国高铁网的贯通，2000公里以内出行时，高铁都可能更加具有竞争优势。民航运输现阶段以旅客运输为主，由于快速高效及四通八达而受到欢迎。很多研究表明，民航在出行距离1500公里以上时具有绝对优势<sup>39</sup>，而1500公

图 22 | 未来武汉市城际客运中各类交通方式占比预测

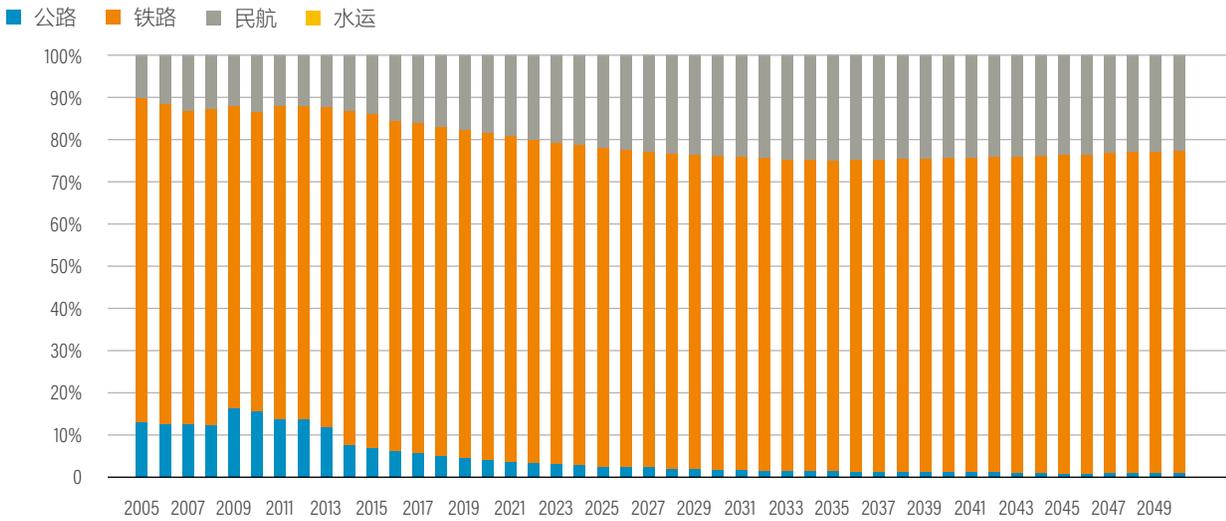
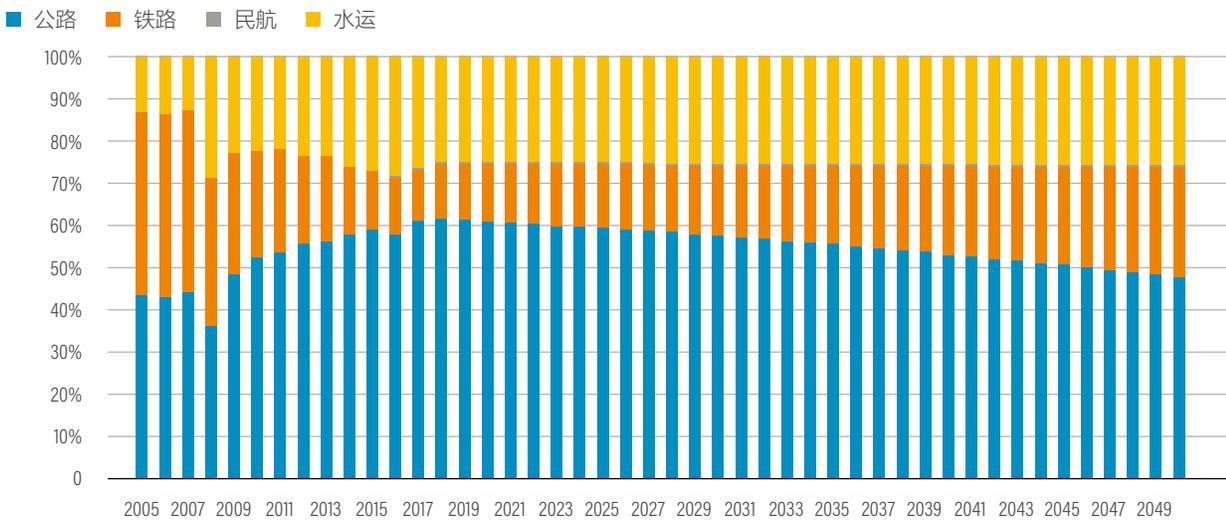


图 23 | 未来武汉市城际货运中各类交通方式占比预测

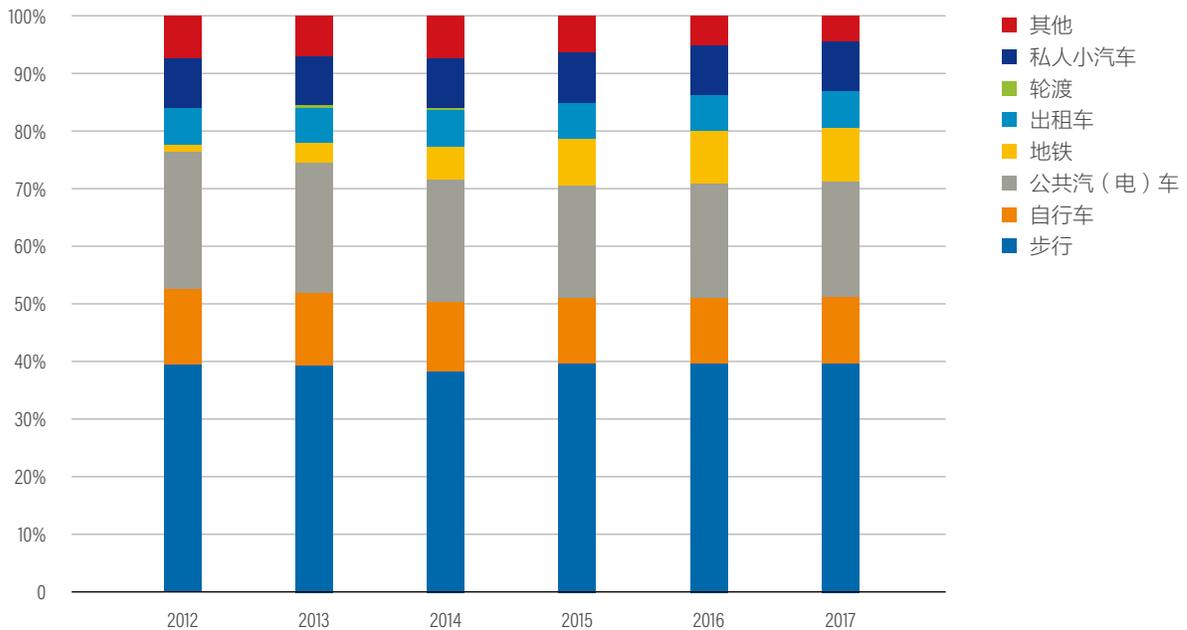


里以内其竞争力会相应减弱，易被铁路（尤其是高铁）、公路等运输方式替代。因此，本研究中假设未来公路客运占比会逐渐下降，铁路客运占比会进一步提升，如图22所示。

在城际货运领域，铁路在武汉货运结构中起着至关重要的作用，相较其他运输方式承担了最多的货物运输周转量。尽管在过去几年中铁路货运出现了“双降”的趋势，即货运量和占比都下降，但是未来铁路仍将发挥很大作用。随着水运的发展，水路货运也将在武汉整体货运中承担更多的货运周转需求。此外，随着物流中心的建设，公路货运量也将持续增长。在这些运输方式中，铁路适合长距离运输，因其具有安全性高、稳定性强、运输速度快、

空气污染少等优点，货物运输距离在1000公里以上时，客户基本上选择铁路运输方式。公路运输具有灵活便捷、快速直达、适应性强等特点，水运成本相对较低，航空运输极大缩短远程运输时间。但根据对武汉的调研情况看，在几种运输方式中，铁路运输成本并不占优势。在不考虑企业单笔货物运距的情况下，平均每吨货物采用铁路、公路、水路、航空运输方式的运费比大致为3: 1: 0.8: 10。实际运输中，铁路运距要大于公路，企业账面成本虽略小于公路运输，但由于公路运输存在超载现象，加上可省去中间转运环节，导致实际成本反而小于铁路运输方式<sup>40</sup>。因此，本研究中假设未来在货运结构中铁路和水运的比例将进一步提升，如图23所示。

图 24 | 武汉市交通分担率



数据来源：武汉市交通科学研究所

对城市内交通而言，过去几年最明显的交通分担率变化趋势是地铁所占比例越来越大，从2012年的1%增长到2017年的9%，如图24所示。引导市民地铁出行可以代替私人小汽车或出租车出行从而减少排放。以武汉市2015年数据为例，乘坐地铁出行的排放强度为0.03千克二氧化碳/人公里，如果只考虑牵引电耗，排放强度还会减半，乘坐公共汽（电）车出行的排放强度为0.02千克二氧化碳/人公里，乘坐出租车或私人小汽车出行的排放强度为0.08千克二氧化碳/人公里，显然公共汽（电）车和地铁是都是碳强度最低的机动化交通方式。如果利用自行车或者步行出行，更是不产生排放。

根据《武汉市交通运输发展“十三五”规划》，未来，“到2020年，主城区公共交通占机动化出行比例超过60%”，根据《武汉市城市总体规划（2016—2030年）（征求意见稿）》，2030年要“通过慢行系统的逐年建设完善，力争实现中心城区既有道路慢行系统规模和出行空间‘只增不减’，机动车出行空间‘只减不增’，新建道路慢行空间与机动车空间同步增长。建立‘60/60’的出行方式结构，即公共交通出行比例达到60%、轨道交通占公共交通出行比例达到60%”。此外，武汉市城市总体规划（2016—2030年）（征求意见稿）中也提到未来武汉市交通发展的“4、4、2”目标，即公共交通（公共汽（电）车和地铁）、慢行（步行和自行车）、机动车的占比分别为40%、40%、20%的发展目标。

### 3.2.3 能源效率

能源使用效率也是影响交通能源消耗及排放的关键因素。如上节所述，民航的单位周转量能耗最高，其次是公路、铁路和水运。除了不同交通方式之间的比较，每一种交通出行方式的能效也会随着出行工具设计的优化、技术的进步、运营管理的完善而不断改进，即行驶相同的距离，能源使用量减少，或者消耗相同量的能源，提供更远的行驶距离。

根据《交通运输节能环保“十三五”发展规划》，中国到2020年交通行业能源利用效率不断提高是总体发展目标之一，特别地，该规划提出，2020年与2015年相比，营运客车单位运输周转量能耗下降2.1%、营运货车下降6.8%、营运船舶下降6%等具体目标。《民航节能减排“十三五”规划》中也提到，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%，并指出“十三五”比“十二五”的五年平均水平应继续下降4%。

就小汽车而言，能源使用效率也是影响交通能源消耗及排放的关键因素。随着交通出行工具设计的优化和技术的进步，能源使用效率不断改进。目前国家提出的标准是2020年工况油耗目标为百公里5升，2025年达到4升。这是综合了包括新能源汽车在内的所有汽车的平均油耗，燃油汽车的实际油耗比工况油耗通常高出20%左右。本研究

内假设燃油小汽车2050年的实际百公里油耗分别为基准情景下达到6升、达峰情景下达到5升。

此外，小汽车能效提升一方面来自燃油车本身的燃油经济性改善，另一方面则来自新能源汽车替代产生的能效提升。以燃油车百公里油耗8.8升<sup>41</sup>和电动车百公里电耗16千瓦时<sup>42</sup>为例，后者相当于单位距离能耗下降了47%<sup>43</sup>。同时，电动车本身的能源效率也在逐年改善。此外，驾驶行为的改变也能够帮助提高能效，根据北京市的相关追踪结果，对驾驶员进行培训可以提高7%的能效<sup>44</sup>。

因此，中国交通行业的能效水平还存在提升的空间。不过长期来看，随着技术不断逼近理想水平，能效改善的空间会趋于有限，因此本文在设定远期能效水平时，会适当控制能效提升的增幅比例。

### 3.2.4 能源结构

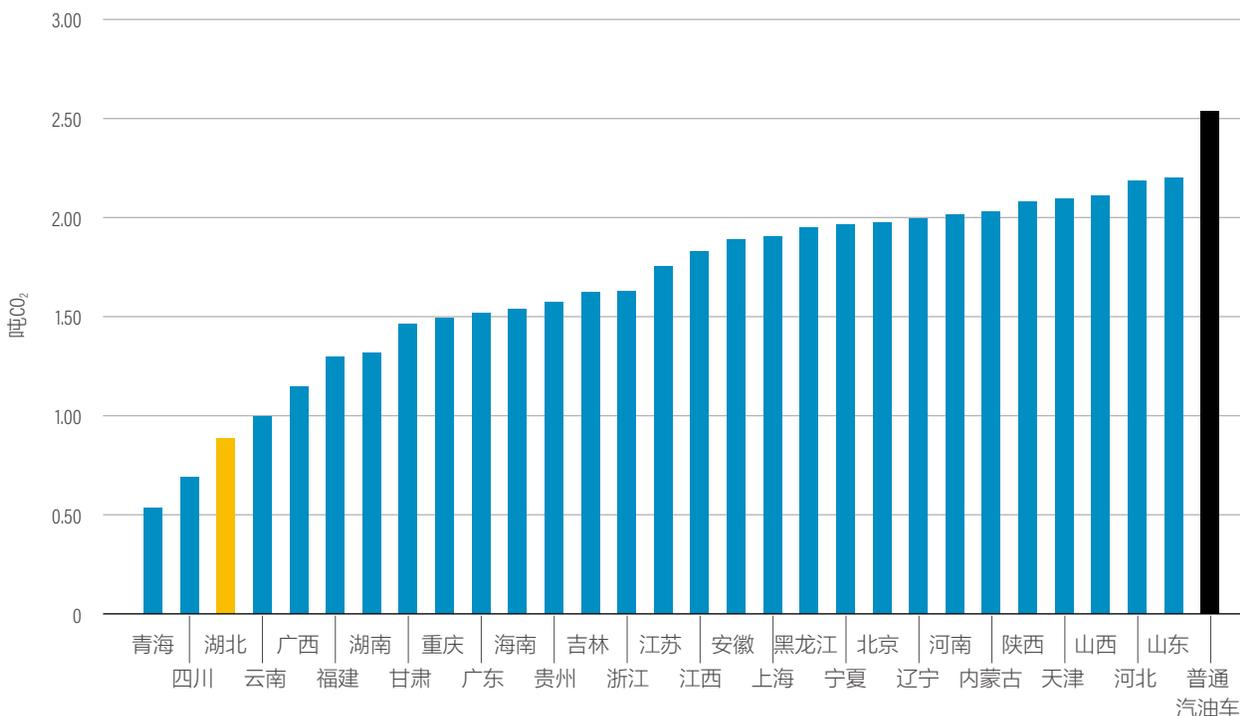
交通运输工具的燃料结构优化是大趋势，对武汉交通减排起到较大作用的主要是汽车电动化和生物燃料在航空领域的应用。此外，可再生能源在发电领域的应用会影响交通领域中耗电相关的排放。

## 新能源汽车

从汽车使用环节来看，新能源汽车的减排量取决于新能源汽车本身的能源效率、电力中可再生能源的比例和新能源汽车的应用规模。单车减排效果方面，以一辆普通燃油小汽车一年行驶1.5万公里、百公里油耗8.8升为例，一年的排放为2.54吨二氧化碳<sup>45</sup>。一辆纯电动小汽车百公里大约需要耗电16kWh<sup>46</sup>，以武汉市所在华中电网2012年排放因子0.5257 kg CO<sub>2</sub>/ kWh计算<sup>47</sup>，一年排放1.28吨二氧化碳，即武汉市一辆纯电动小汽车一年可以减排55%左右。

城市所在电网的电力越清洁，新能源汽车带来的减排效果就越明显。从图25中可以看到，青海、四川、湖北、云南等地的纯电动小汽车年排放量最小，这是由于这些地区水电比重较大，所在电网的排放因子较小，青海一辆纯电动车一年的排放只有0.54吨，可以减排79%。如果在火电比例相对较高的山东、河北、山西等地，新能源车的减排效果则没有那么明显。以山东为例，一辆纯电动车一年的排放为2.22吨，减排13%。各地的新能源汽车单车减排效果与年行驶里程、百公里油耗/电耗、电力排放因子等参数有关，不同车型如小汽车、环卫车、物流车、公共汽

图 25 | 各地区纯电动车单车年排放与普通燃油车对比



注：以一年行驶15万公里、百公里电耗16kWh为假设，按照国家发改委发布的2010年区域电网排放因子计算。由于2010年以后国家发改委没有再发布区域排放因子数据，因此2010年数据是目前可获得的最新数据。

(电)车等所带来的减排效果也不相同,城市可以根据实际情况进行更准确的测算。此外,即使电网中电力不是相对清洁,在城市使用电动车还是很有意义,主要体现在改善空气质量方面。在高密度地区使用电动车,可以减少居民在交通空气污染中的暴露风险。

未来交通领域将出现一系列重大变革,这些革新性的变化将对交通碳排放产生决定性影响。新能源汽车、无人驾驶汽车、共享汽车等将大规模应用,这些趋势将大大降低传统燃油车产生的排放。尽管目前这些应用还有着技术、成本、市场、机制等诸多问题需要解决,但是从智能手机、共享单车等的应用可以看到,一旦技术、市场成熟度达到一个拐点,其推广应用的速度不可想象。目前已有越来越多的政策和市场信号,如欧洲国家宣布禁售燃油车,长安、北汽集团宣布将在2025年全面停售自主品牌传

统燃油车等,奔驰表示2022年起旗下所有车型都只提供混合动力或者纯电动版本,并且届时将会至少再增加50个全新的电动车车型;福特旗下的豪华汽车品牌林肯也同样将2022年作为时间节点,将会把所有车型都改造成电动或混合动力版本;捷豹路虎也表示,将加快电动汽车的车型研发,到2020年所有型号的捷豹路虎汽车都将有电动或混合动力版本可供选择<sup>48</sup>。

本研究在基准情景下设置2050年新能源汽车保有量占比约为45%,在达峰情景下占比达到85%。新能源汽车的推广力度和时序按照公共汽(电)车、出租车、物流和环卫等市政用车、公务车、市场用车(如分时租赁汽车、共享汽车等),最后是私人小汽车。由于货运领域新能源汽车利用不确定性较大,本研究在公路货运中只考虑了非常低比例的新能源汽车。

### 专栏 3 | 新能源汽车推广应用现状与目标

2017年中国新能源汽车全年累计总销量为77.7万辆,同比增长53%。其中,纯电动汽车销量为14.4万辆,全年累计销量为65.2万辆,插电式混合动力汽车销量为1.9万辆,全年累计销量为12.5万辆<sup>49</sup>。

从城市层面来看(2016年数据),上海、北京和深圳位列新能源汽车保有量三甲,数量分别为11万辆、10万辆和8万辆。天津、杭州、广州紧随其后,保有量分别为3.85万辆、3万辆和2万辆。武汉排在全国第七位,截至2016年底,全市新能源车汽车保有量为15599辆。上海和北京的新能源汽车推广应用主要受益于限购政策,私人拥有新能源汽车的数量较多,截至2017年6月底,北京新能源汽车保有量达到13.54万辆,其中私人拥有纯电动汽车8.65万辆左右。深圳则是公认的新能源汽车推广应用最好的城市。此外,太原是全国首个出租车全部纯电动化的城市,且在2016年就完成了这一目标。

全国主要城市的新能源汽车推广目标如下:

北京:2020年新能源汽车保有量达到40万辆<sup>50</sup>,2022年达到50万辆<sup>51</sup>。此外,北汽集团负责人在2017年12月举行的北京市新能源汽车技术创新中心成立仪式上表示:到2020年率先在北京市全面停止销售自主品牌传统燃油乘用车,到2025年在中国境内全面停止生产和销售自主品牌传统燃油乘用车<sup>52</sup>。

深圳:2017年底已经实现公交车100%电动化。2020年底实现出租车100%电动化,物流车电动化率达50%。2020年全市新能源汽车保有量达到12万辆<sup>53</sup>。

广州:2018年公交、出租、环卫等公共服务领域推广应用新能源汽车约1万辆,2020年达到3万辆。全市新能源汽车保有量2018年达到10万辆,2020年达到20万辆<sup>54</sup>。

武汉:2017年、2018年、2019年、2020年新增新能源车3000辆、4000辆、5000辆、6000辆,总量达到约3.5万辆<sup>55</sup>。

来源:根据相关资料整理,具体来源见尾注

## 专栏 4 | 深圳如何构建全球最大的电动公交车队

世界资源研究所正在包括中国、印度、巴西、非洲等在内的多个发展中国家和地区推动电动汽车和电动公交车的普及。中国深圳克服电动公交车购置成本较高、充电桩基础设施缺乏等困难，实现公交全面电动化，其宝贵经验吸引了全球其他城市的广泛关注。

柴油公交车及其排放的污染物曾经是国内外城市常见的场景。但如今，中国深圳却是例外。去年末，深圳宣布该市16359辆公交车已全部实现电动化。深圳成为全球首个拥有100%电动公交车的城市，也是全球电动公交车数量最多的城市——其数量超过了纽约、洛杉矶、新泽西、芝加哥和多伦多电动公交车之和。

### 电动公交车的环境效益

柴油公交车虽仅占城市道路交通的一小部分，但由于其运营时间和里程比私家车长，因此对环境有着巨大影响。在深圳，柴油公交车占全市车辆总量的0.5%，但却占全市交通CO<sub>2</sub>排放的20%，原因是这些车辆比私家车运营时间和行驶里程更长。

公交车电动化为深圳治理空气污染提供了重要措施。柴油公交车是城市细颗粒物、氮氧化物、二氧化硫的主要来源之一。所以，包括伦敦和加利福尼亚州在内的全球城市及省州都在通过大力发展电动公交车，推动实现大气质量目标。

但电动公交车对传统柴油公交车的替代之路困难重重。在国内，电动公交车的购车成本是传统柴油公交车的2至4倍。同时，电动公交车需要充电桩配套设施，以解决其续航里程短的问题，但充电桩因为公交场站用地匮乏而捉襟见肘，不足以满足电动公交运营中充电的需求；而且电动公交在其生命周期中，至少需要更换一次电池。电池费用之高，通常是电动车车辆价格的一半。

### 深圳：打造全球最大的电动公交车队

尽管如此，深圳还是成功地实现了公交车的电动化。值得借鉴的四个策略如下：

#### 1. 国家和地方补贴

对于深圳和其他许多中国城市而言，国家和地方补贴等政策激励措施在缩小电动公交车和传统柴油公交车成本差距方面发挥了重要作用。2016年以前，政府为每辆12米长的电动公交车补贴15万美元，相当于车辆价格的一半以上。

此外，一些研究表明，随着电动公交技术进步，即便补贴减少的情况下，电动车在全生命周期的成本优势正逐步显现。世界银行和全球环境基金（Global Environment Facility）进行的一项研究表明，截止2016年，深圳市电动公交车的生命周期成本（包括8年期间的采购、充电和维保成本）为375,457美元，几乎与柴油公交车的生命周期成本（342,855美元）相当。也就是说，在深圳，虽然电动公交车前期购置投入成本较高，但运营和维护成本却比柴油公交车低得多，二者正逐渐抵消。

#### 2. 通过租赁减少前期投资

与许多中国城市直接通过政府补贴（大约9万至12万美元）采购电动公交车不同的是，深圳的公交公司选择以融资租赁的方式，从车辆厂商或融资租赁公司租赁整车（或裸车——即不含电池）。这种做法将高昂的购车成本分摊到每年，同时通过融资租赁运作，将车辆与电池的维保从公交集团身上剥离，对财务实力有限的公交集团起到了很大的激励作用。

#### 3. 优化充电与运营

电动公交车队的运营模式与柴油公交车差异巨大。由于电动公交车续航里程较短，而且需要充电，国内城市电动公交车的运营效率只有柴油车的一半。也就是说，运营一个电动公交车队往往要比传统柴油公交车多出一倍以上的车辆，这就增加了采购、运营和维护成本。深圳通过优化电动公交车的运营和充电模式，几乎完全消除了额外成本，将电动车的运营效率提升到柴油车水平。

深圳采用的电动公交车型能够在充电5小时后行驶250公里，几乎可以维持全天运营。但是为了避免白天车辆补电对公交正常运营造成影响，政府、公交公司与充电基础设施供应商协同合作，在2016和2017年增加了公交场站，并在场站内对大多数公交线路配备充电设备。目前，充电站与电动公交车的比例为1:3。充电设备同时面向私家车开放，以提高充电基础设施的资金收益。

公交车运营商根据运营时刻表安排充电时间，所有电动公交车都在电价夜间低谷时段充满电，白天则选择非出行高峰时段、电价平峰期在公交场站补电。同时，深圳巴士集团通过网式快充（即一个充电桩可以同时为3辆车进行充电，并通过不移动车辆进行充电），极大缩小了对充电桩数量和公交场站面积的需求。

#### 4. 生命周期电池保修

由于电动公交车技术仍不成熟，且需要公交车8年的使用年限中至少更换一次电池，从而导致电动公交车生命周期成本的上升。传统上这些费用由公交公司承担。但在深圳，根据公交运营商在采购环节提出的要求，公交车制造商为电池提供终身保修。事实上，将电池的风险转嫁给公交车制造商或电池厂商可以形成一个合理的激励机制，促使其通过不断创新电池技术，提升电池性能。

### 发展环保公交 创建美好城市

深圳的经验表明，城市完全有可能成功实现公交车队的电动化。广大市民既能乘坐环保公交出行，又享受到清洁空气：2016年和2017年，深圳均实现了空气质量改善目标。

来源：2018-04-27 WRI, World Bank, 鹿璐、薛璐璐、周为民，英文原文刊登于 Clean Technica。

## 生物航油

国际民航组织（ICAO）于第二次国际民航组织航空代用燃料会议上提出，仅通过技术创新与合理运营并不足以实现ICAO提出的2020年目标，即从2020年开始国际航空业实现二氧化碳排放的零增长，而需要可持续航空燃料来弥补差距。可持续航空燃料通常即指航空生物燃料，其全生命周期相较于传统航空煤油可以减少80%的二氧化碳排放，是航空业减排的重要手段。ICAO曾提出“2050可持续航空燃料愿景”，即全球生物航油占航空燃料的比例到2025年达到2%，2040年达到32%，2050年达到50%。然而，航空生物燃料目前原料不稳定、产量不足，且成本高于传统航空燃油2~3倍，还未形成大规模的产业链，也没有得到广泛的应用。因此，此愿景未得以通过，而是在2017年10月商定的新的“2050愿景”中将目标改为“大幅提高生物航油替代传统航空燃料的比例”。截至2018年，全球已实现超过10万次航班应用了生物航油。ICAO希望到2020年全球有100万次航班应用生物航油，到2025年有10亿旅客乘坐过生物航油航班。国际上2005年开始研发航空生物燃料，并于2011年6月首次进行商业应用，荷兰皇家航空成为全球第一家应用生物质燃料的航空企业。中国于2009年左右起由中国石化率先涉足生物质航油领域，并通过创新性的研发，将餐饮废油等转化为航油。我国首次使用生物质航油的商业载客飞行由海南航空于2015年3月进行，即

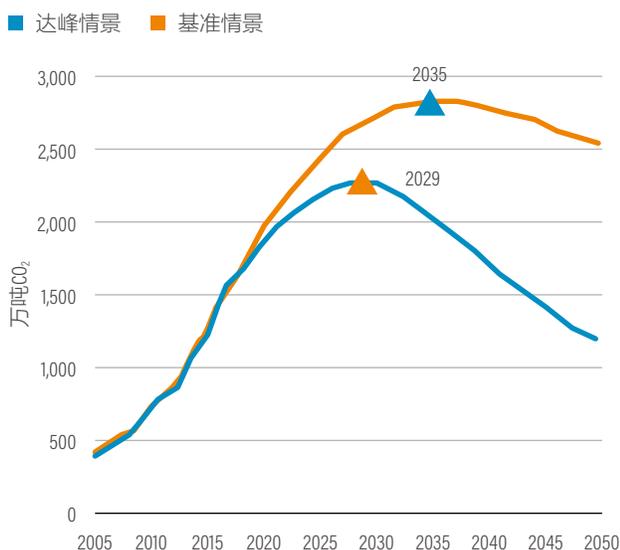
采用了含有餐饮废油炼制的国产1号生物航空煤油。中国石化已经具备了国内第一个生物航空煤油适航许可证，且其技术原料范围广泛，并积极探索非粮生物燃料，可以规避粮食、土地供应等问题（中国石化，2015）。因此，虽然目前中国的航空企业仍以传统航空煤油为主，但新能源应用在优化能源结构、推进民航绿色发展方面至关重要，可以预见未来中国生物航油将得到大力发展（中国民用航空局，2017）。

## 3.3 总体达峰路径

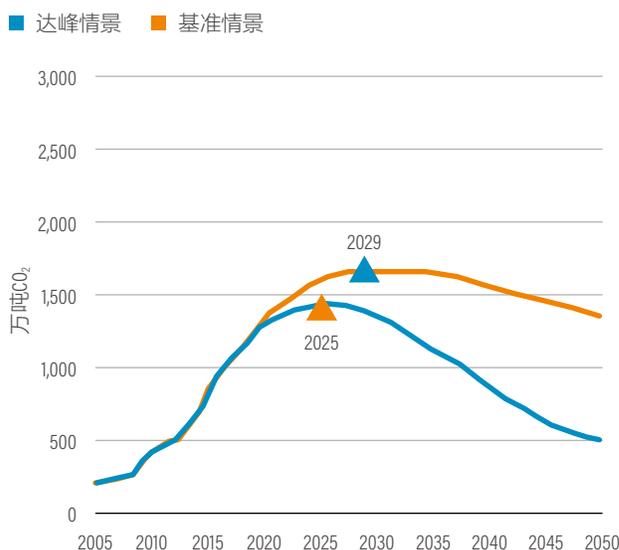
考虑到城市政府对交通排放的管辖权问题，本研究从两个尺度来预测武汉交通碳排放：一是全口径，包括所有交通类型。在基准情景下，武汉市交通碳排放2035年达到峰值，达峰时排放约2800万吨，之后缓慢下降，到2050年降到约2500万吨。在达峰情景下，武汉市交通碳排放于2029年达到峰值，达峰时排放约2300万吨，之后呈现迅速下降趋势，到2050年降到约1200万吨，为基准情景2050年排放水平的一半左右（图26左）。二是不包含铁路、民航和水运。武汉交通碳排放的达峰年份都能提前若干年，基准情景下2029年达峰，达峰情景下2025年达峰，且2050年达峰情景是基础情景排放水平的40%左右，约为520万吨（图26右）。

图 26 | 武汉市交通碳排放达峰路径

### 全口径



### 不含铁路、民航和水运



注：图中三角形表示达峰年份  
来源：课题组计算

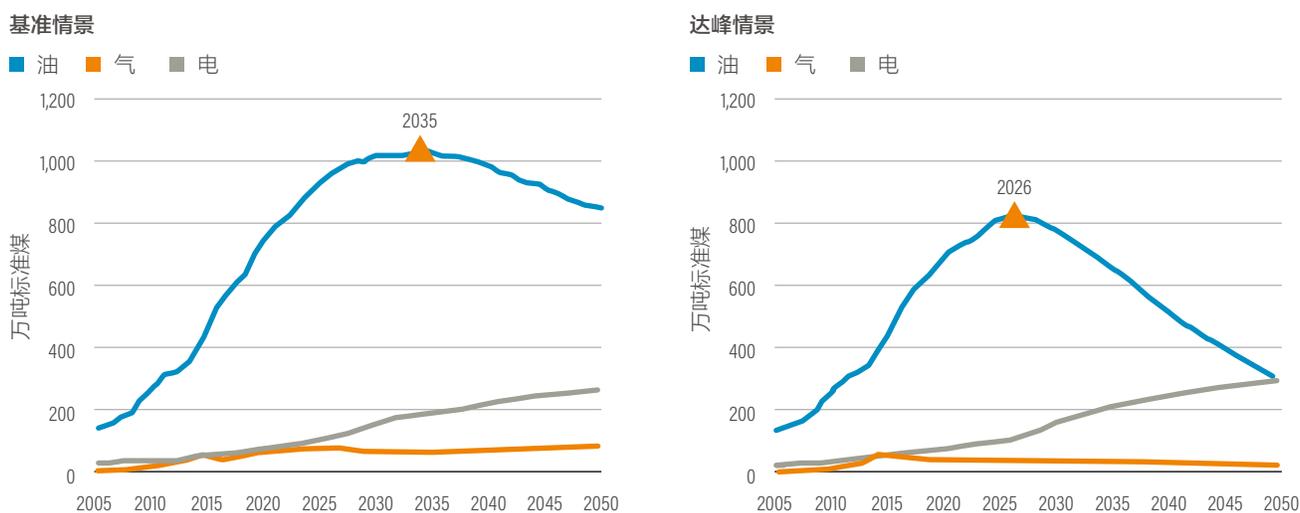
按照能源品种来看，如果不采取更强有力的措施，油的消费量和相关排放会在2035年左右达峰，气和电呈缓慢增长趋势。在达峰情景下，由于新能源汽车的大规模应用，2026年左右油的消费量和相关排放会达到峰值，如图27所示。

图28展示了在达峰情景下武汉市各种交通类型的排放轨迹。可以看到，影响最大的是私人小汽车，2010年超过铁路成为最大排放源，之后排放迅速增长，远远超过其他排放源。在“十三五”和“十四五”期间，铁路和公路是第二和第三大排放源，但是民航将于2022年超过铁路和公

路成为第二大排放源，并于2037年超过私人小汽车成为最大排放源。总体来看，水运和包括公共汽（电）车、出租车、地铁等在内的城市公共交通的排放水平都不算太高，且这些交通方式的排放强度较低，对交通达峰起到了正向的贡献作用。

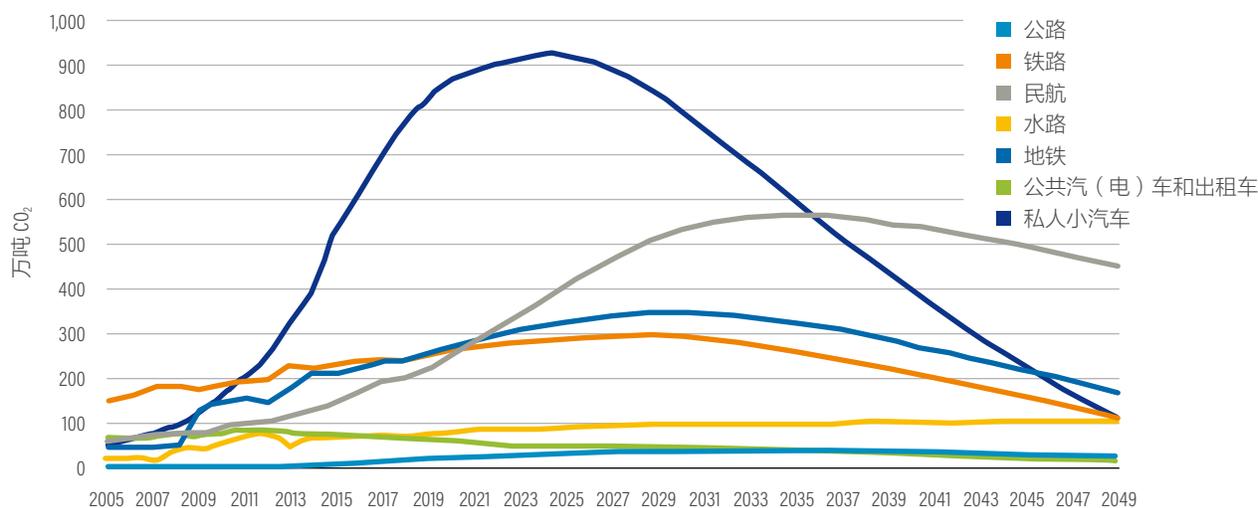
从减排潜力的角度，私人小汽车的减排潜力是最大的，尤其是现阶段到2030年之前，减排潜力占比逐渐增加。近期来看，除了私人小汽车以外，公路货运、出租车和公共汽（电）车的减排潜力也非常大，如图29所示。

图 27 | 武汉市交通不同品种能源消费量达峰路径（全口径）



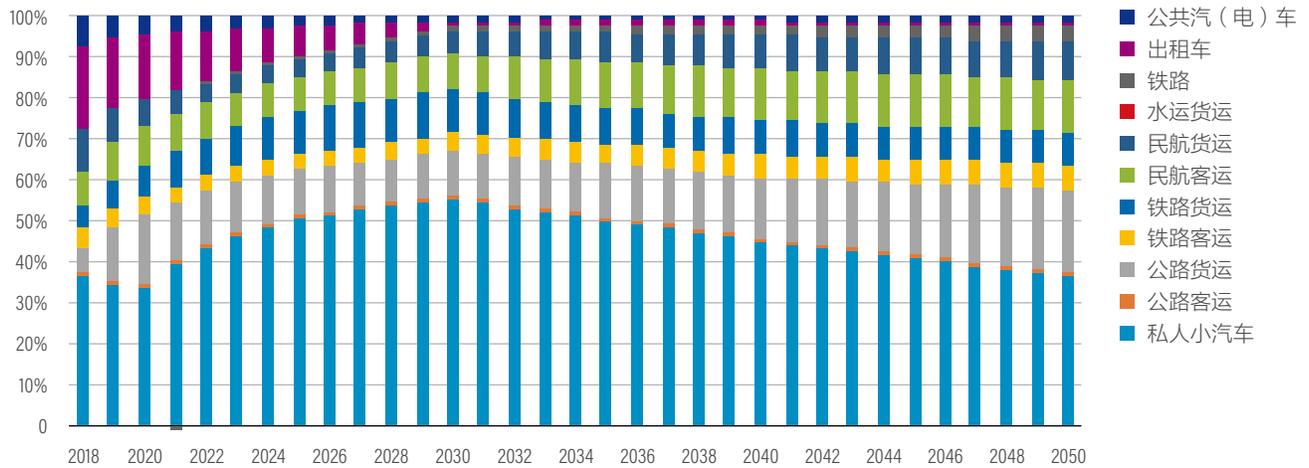
注：图中三角形表示达峰年份  
来源：课题组计算

图 28 | 达峰情景下武汉市各类交通排放路径



数据来源：课题组计算

图 29 | 2018—2050年武汉市交通领域减排潜力



注：图中三角形表示达峰年份  
来源：课题组计算

### 3.4 关键影响因素

下文将重点介绍私人小汽车、新能源汽车、货运和民航这几个关键影响因素。

#### 3.4.1 私人小汽车

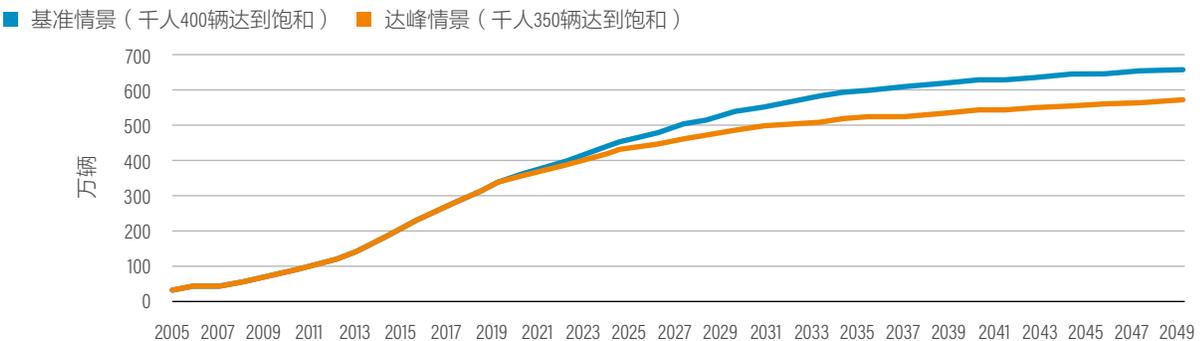
私人小汽车的排放路径主要受到保有量、行驶里程 (VKT)、能效和能源结构 (新能源汽车比例和电网清洁能源) 这几方面因素的影响。由于能效和电网清洁能源这两个因素的改善主要是受到行业层面的影响，城市政府能够发挥的作用有限，因此这里主要对私人小汽车保有量、行驶里程进行讨论。

武汉市目前的私人小汽车保有量还有发展空间，但无限制的发展也会带来交通拥堵、污染物和温室气体的排放等一系列问题，因此应该在满足人民生活水平提升需求的

前提下，合理控制私人小汽车保有量。

判断城市私人小汽车保有量水平的一个重要指标是千人汽车保有量。按照发达国家经验，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，千人汽车保有量随着经济社会发展会达到一个饱和值，之后不再增长。发达国家的千人汽车保有量可以达到500辆甚至更高。2017年武汉市私人小汽车拥有量为226万辆，千人汽车保有量为207辆。考虑的中国的发展阶段，本研究假设基准情景下武汉千人汽车保有量饱和值为400辆，这意味着2020年武汉私人小汽车保有量350万辆，2030年、2050年分别达到530万辆和660万辆。假设达峰情景下武汉千人汽车保有量饱和值不超过350辆，这意味着2020年汽车保有量达到350万辆，2030年和2050年分别达到480万辆和570万辆，同时也意味着武汉需要在若干年后实施限购政策，如图30所示。结合武汉市每户家庭人数为3.5人左右<sup>56</sup>，上述两个情景设置都可以满足每个家庭至少拥有一辆车的需求。

图 30 | 武汉市汽车保有量预测



目前，武汉市私人小汽车年均行驶里程约为1.5万公里。但考虑到未来武汉市可能出台限行政策、公共交通特别是地铁的发展促使居民更多地使用公共交通而放弃私人小汽车出行，以及不断打造的绿道工程（如东湖绿道、青山绿道也会为慢行交通提供更好的平台）等原因，私人小汽车年均行驶里程将会有所下降。考虑到公共交通将更多的替代私人小汽车出行从而使得私人小汽车的使用减少，达峰情景下，预计未来私人小汽车年均行驶里程将减少到1万公里。此外，达峰情景下还加入了限行政策，这也意味着行驶里程会进一步下降。

综合上述考虑，武汉市在基准情景下，私人小汽车2030年左右排放能够达峰，在达峰情景下，私人小汽车2025年左右即可达峰，2030年后迅速下降。

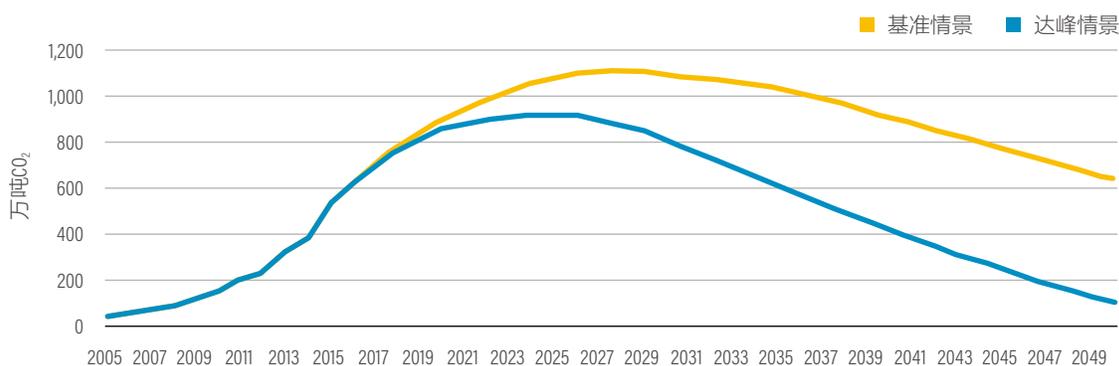
目前国内城市为限制汽车保有量通常采取的行政手段包括限行和限购。2017年武汉的千人汽车保有量约为207辆（私人小汽车），还没有实施限购政策，限行政策也只是在长江大桥、江汉一桥实施单双号限号，而非市域范围内

执行。参考国内其他城市，早于这个阶段实施限行、限购政策的城市有上海、北京、天津、成都和贵阳，晚于这个阶段或同阶段实施限行、限购政策的城市有广州、杭州和深圳，见表2。汽车制造业是武汉的支柱产业之一。2016年武汉汽车产量达177万辆，增幅24%。过去5年，武汉汽车产业发展一直保持强劲动力，产值年均增速超过20%，远高于武汉市同期工业总产值增速；自2010年超越钢铁产业成为武汉首个千亿产业以来，汽车产业已经连续7年保持武汉第一大支柱产业地位<sup>57</sup>。与武汉类似的成都，汽车生产也是其主要产业之一，2015年汽车保有量已经达到370万辆，但只采取了限行政策，并未采取限购政策。限购政策的初衷主要是缓解交通拥堵，而限行政策的初衷主要是解决空气污染问题，如很多城市在空气重污染预警下会实施临时限行措施或者将原有限行力度扩大。

### 3.4.2 新能源汽车

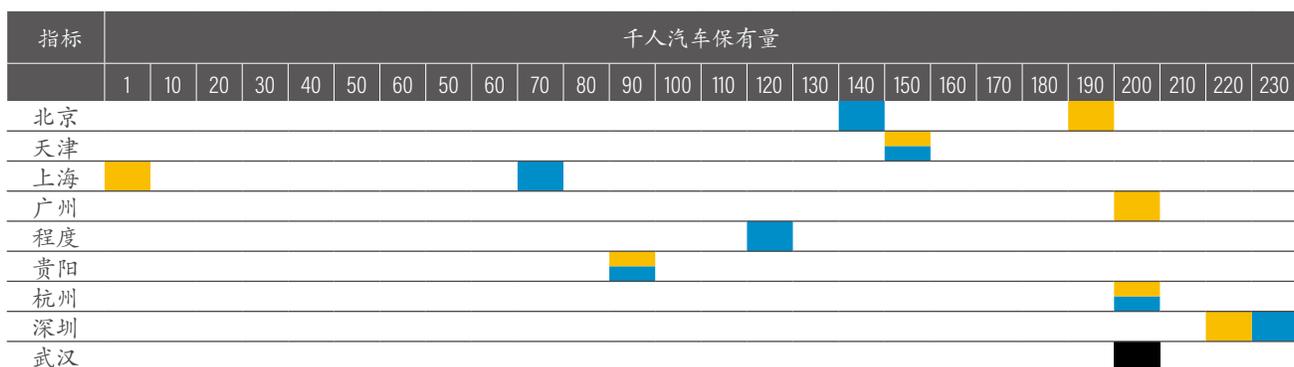
2017年9月，工业和信息化部、财政部等五部委发布《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理

图 31 | 武汉市私人小汽车碳排放达峰路径



数据来源：课题组计算

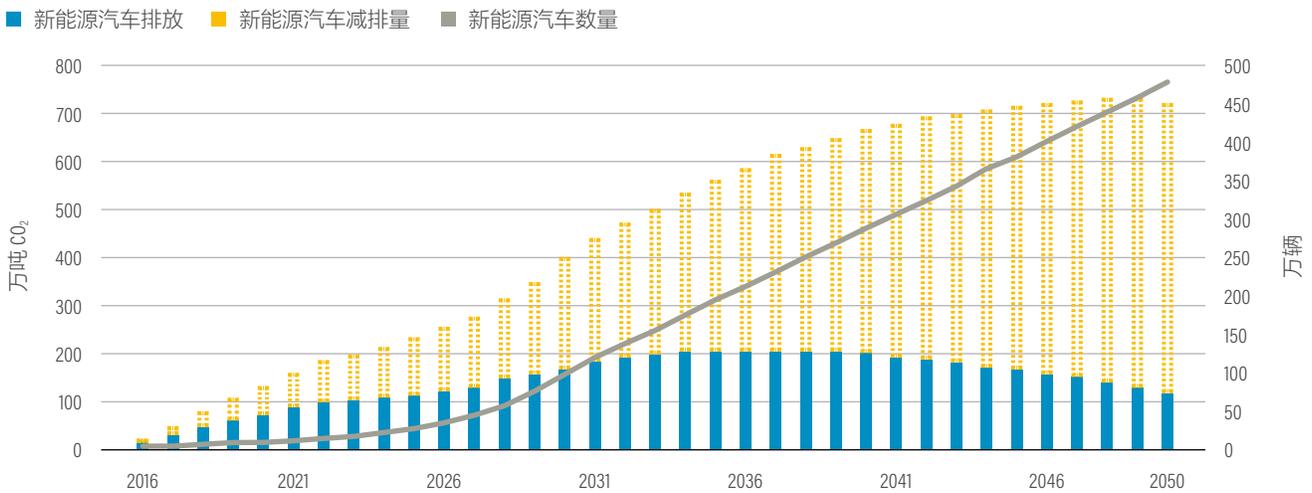
表 2 | 主要城市限购、限行政策推行时间



■ 开始实施限购政策 ■ 开始实施限行政策

注：黑色方框表示武汉现阶段的千人汽车保有量。此外，广州于2018年实施了外地车“开四停四”限行政策，但由于暂时没有2018年私人小汽车保有量和人口数据，故未在表中体现。

图 32 | 武汉市新能源汽车利用规模与减排量的关系



数据来源：课题组测算  
注：图中新能源汽车数量为达峰情景下的保有量

办法》，油耗积分考核已于2018年4月开始，新能源汽车积分考核已于2019年开始，并于2020年结算。双积分制从政策面确定了电动化的基本方向，从供给侧来推动新能源汽车行业的发展<sup>58</sup>。在考虑了新能源汽车利用规模、能效提升，以及电网日益清洁等趋势后，图32展示了武汉市新能源汽车保有量、排放量与减排量的关系。2020年武汉的新能源汽车保有量如果达到7万辆，其排放为64万吨，减排49万吨；2030年武汉市新能源汽车如果达到100万辆，其排放为130万吨，带来减排210万吨；2050年如果新能源汽车达到480万辆，其排放为110万吨，带来减排780万吨。可见，随着新能源汽车利用规模的逐渐增大，以及未来电网更加清洁化，新能源汽车带来的减排潜力将是巨大的。此外，新能源汽车对污染物（NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>）的缓解效果也更明显。作为汽车产业的重要基地，推广新能源是武汉未来产业升级的重要方向。

### 3.4.3 货运

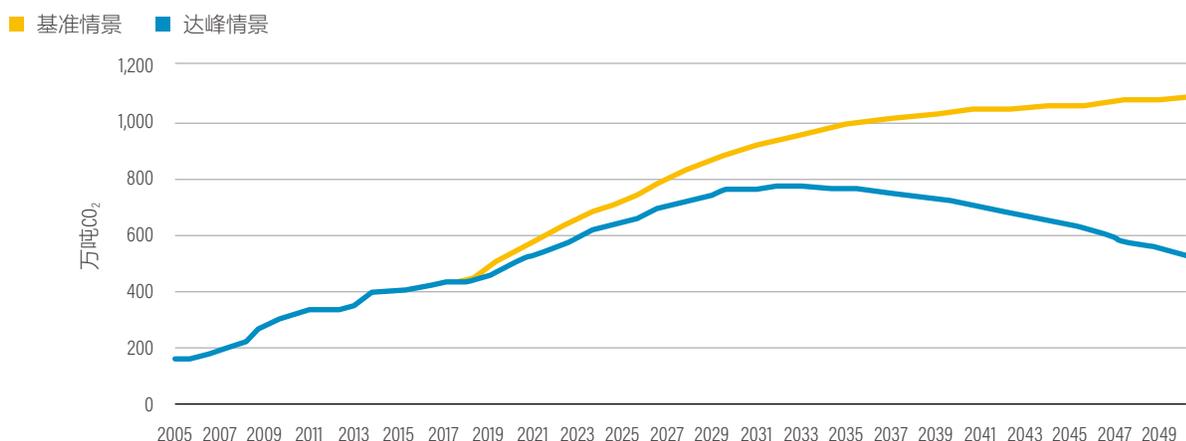
作为中国内陆地区最大的交通枢纽，武汉市地处长江、汉江和京广高铁的交汇处，具有承东启西、接南转北、吸引辐射四面八方的区位优势。同时，武汉市已经形成了水运、公路、铁路和航空多位一体的综合运输网络。基于其优质的交通基础设施和商业贸易区位优势，武汉市已经成为华中地区的中心城市和商品集散地，具有物资流通量大、周转量大等特点，为发展现代物流业提供了充足的市场需求基础，是名副其实的内陆地区物流中心。

一方面，依托良好的交通基础设施和地理位置，武汉市持续推进现代物流业的发展。在国家政策的引导和市

场机制的共同作用下，武汉市建立了较为完善的商贸物流服务体系，加强了多式联运、机场铁路水运以及冷链物流等多方面的物流基础设施建设，同时增强了多种所有制、多种服务模式、多层次的现代物流企业群体的发展，为带动整体行业进步打下了坚实的基础。在多方共同努力下，“十二五”期间武汉市铁路、水路、公路、航空货运量、货物周转量分别达到4.8亿吨、2952亿吨公里，分别较“十一五”期末增长19.6%和30%。在坚持顶层设计先行，产业发展规划、空间布局规划、园区控制性详细规划的支持下，武汉市“物流总部区+综合物流园区+专业物流中心+配送中心”的现代物流业发展架构基本形成，2015年全市社会物流总额达到2.8万亿元，物流业增加值突破1000亿元，分别为“十一五”期末的1.9和1.8倍<sup>59</sup>。“十三五”期间，武汉市继续推进其交通枢纽功能的升级，进一步统筹铁路、水路、公路、航空多种运输方式的全面发展，并将其物流枢纽和服务中心的功能进一步提升，初步建成国内物流供应链管理中心和全球供应链管理的重要节点框架。到2020年，武汉市的社会物流总额将达到5万亿元，物流业增加值将达到2000亿元<sup>60</sup>。

另一方面，我国2030年左右实现碳排放达峰目标的要求和城市自身碳排放达峰目标的约束为武汉市的货运和物流业快速发展提供了新的机遇和挑战。现阶段，武汉市的物流体系依然存在不健全的现象，企业组织化程度低、运输车辆档次低、信息化水平低；城市污染严重、安全隐患严重、无序竞争严重。如何更好地借助区位优势和产业转型的机遇进一步规范货运和物流行业，实现降本增效，不仅有助于为物流业的发展创造更大的空间，更是对城市乃至国家碳排放达峰战略的贯彻和支持。

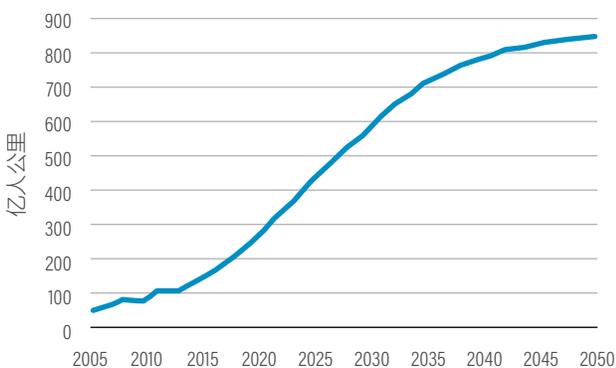
图 33 | 武汉市货运交通二氧化碳排放趋势预测



数据来源：课题组计算

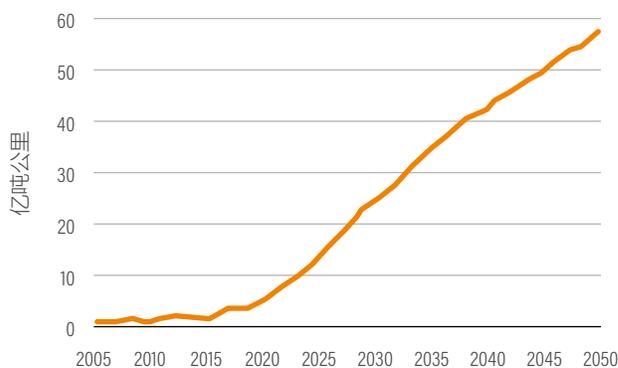
图 34 | 武汉市民航客货周转量变化趋势预测

民航旅客周转量预测



数据来源：课题组计算

民航货物周转量预测



在基准情景下，武汉市2050年货运交通二氧化碳排放是2017年的2.5倍，年复合增长率达到2.8%。尽管单位周转量能未来将随着能效的提升、组织结构的优化等上升，但日益增长的货运需求将抵消单位能效提升带来的排放降低，甚至带来总排放量的持续增加，且之后并未出现下降趋势，见图33。在达峰情景下，由于货运结构的优化，即由铁路、水运分担一部分公路运输的压力，且能效得到了进一步的提升，能源结构更加清洁，武汉市2050年货运交通二氧化碳排放约为530万吨，并将在2033年达到峰值，略晚于交通部门整体达峰时间。

### 3.4.4 民航

在近年稳定扩张的趋势下，武汉市民航运输在未来将有进一步大力发展的态势。武汉市民航事业有五大定位，分别是中部地区枢纽机场、中部地区门户机场、中部地区

航空物流中心、现代综合交通枢纽和区域经济增长的引擎。同时，武汉市委十二届九次全会明确要求武汉交通在航空领域要做到中部第一，在航空国际、国内航线方面走在全国前列。武汉市近几年在民航周转量、经济地位和基础建设方面也都作出了要求。在民航周转量方面，到2020年，天河机场旅客吞吐能力将达到4500万人次，货邮吞吐能力将达到50万吨；到2030年，航空客运规模将达到7500万人次/年，其中国际客运量超过30%，航空货运量将增至150万吨。在经济地位方面，《武汉机场门户枢纽发展战略规划》要求2020年航空经济区的经济总量占全市地区生产总值的8%，2030年航空经济区的经济总量占全市地区生产总值的10%。在基础建设方面，《武汉机场门户枢纽发展战略规划》提出2030年的基础设施保障能力需要满足年旅客吞吐量8000万人次、年货邮吞吐量150万吨、年起降保障架次60万架次的业务需求<sup>61</sup>。为此，本研究就武汉市民航的客货周转量进行了预测，具体如图34所示。

航空业减排措施可分为四类。一是创新技术，包括机身、引擎、新燃料等。其中，机身引擎的创新技术、运作模式的改善及配套设施的改进，均是从节约能源、提高能源使用效率的角度来控制民航排放。二是改善运作模式，包括效率最大化、承重最小化。三是改进设施配套，包括航路设计、空中交通管理、机场程序。四是市场机制，如碳补偿与交易、奖励措施等<sup>62</sup>。然而，中国民航机队成立较晚、载运率已经较高，因此通过提高燃油效率以减少能源使用及排放的空间非常有限<sup>63</sup>。根据ICAO于2010年提出的目标，全球航空业燃油效率到2020年平均每年提高2%，从2021年到2050年争取每年提高2%。有专家指出<sup>64</sup>，中国民航在最乐观的情况下，即各种技术措施、系统化运营和管理措施都实施的情况下，燃油效率也仅能每年提高1.39%，较难实现2%的目标，这更加说明中国民航业能效水平已相对较高，提升的空间较小。《民航节能减排“十三五”规划》中提出到2020年，行业单位运输周转量能耗五年平均比“十二五”期间下降4%左右。鉴于飞机技术的发展在全国范围内没有地域性差异，武汉市民航能耗水平也参考行业平均水平。本研究在设置能效提升速率的时候折中参考了以上情况，基础情景和达峰情景下，2021至2050年平均每年能效提升分别为1.1%和1.6%。

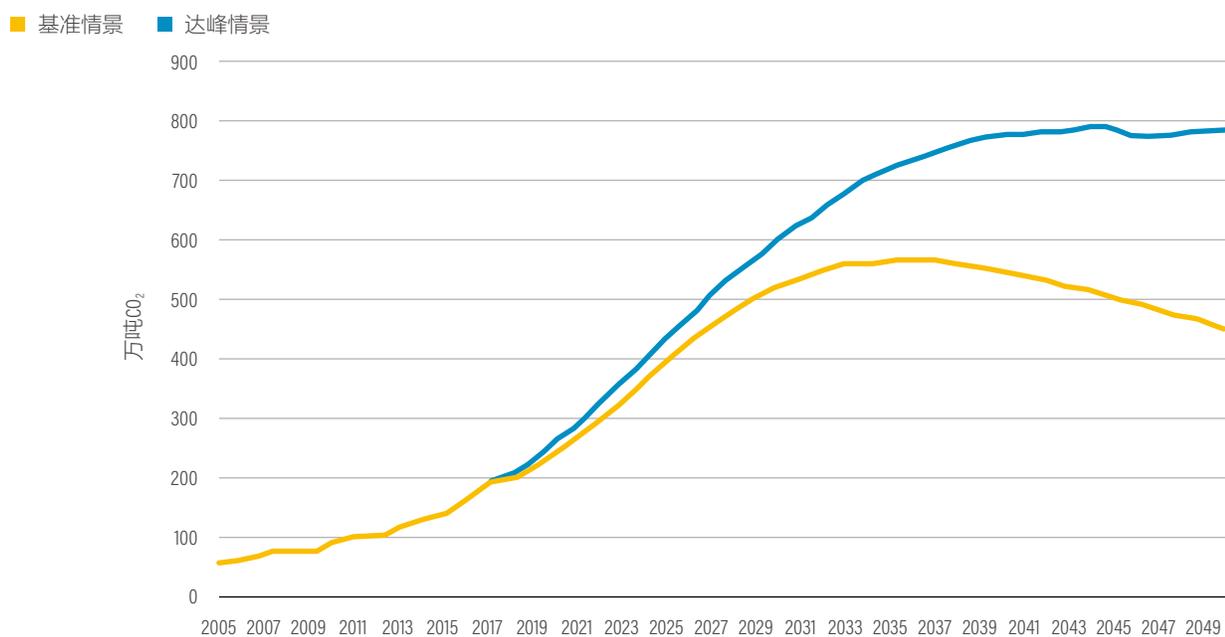
从能源结构来看，民航目前主要采用航空煤油，而为了实现全球航空业的减排目标，ICAO（2016）、国际可再生能源机构（2017）等研究均表明未来需要显著提高生物

质航油的生产与使用。因此本研究出于排放尽早达峰的考虑，在达峰情景中设定中国民航在其长期发展中将增加生物质航油的应用，从而降低民航业的碳排放水平。如前文所述，ICAO曾提议生物航油占比至2025年达到2%、2040年达到32%、2050年达到50%的目标，虽然被一些国家及组织否决而未能通过，但是ICAO秘书处认为2025年目标是合理的（Greenair，2017），同时有些国家及地区也积极制定了相关目标，如欧盟提出2020年生物航油占比达到3.5%<sup>65</sup>，挪威提出2019年1%、2030年30%的目标<sup>66</sup>。因此，本文参考国际先进目标水平并结合中国行情，设定达峰情景可以实现ICAO的2025年短期目标，并实现原长期目标的80%，即2050年生物航油占比达到40%。

此外，达峰情景下还适当控制了2040—2050年民航货运的发展规模。

综合上述考虑，武汉市2017年民航运输产生192万吨二氧化碳排放，占武汉市交通总排放的12%，相比公路、铁路，排放规模较小。然而，随着未来武汉市大力发展民航，民航排放占比将不断提高。图35展示了武汉市民航碳排放的路径，基准情景下，二氧化碳排放于2045年达峰，峰值水平约为790万吨，之后进入平台期，排放缓慢下降。达峰情景下，民航排放提前至2036年达峰，峰值水平约为560万吨，之后有比较明显的下降趋势，主要受益于更多的能效提升和生物燃料的应用。

图 35 | 武汉市民航碳排放达峰路径

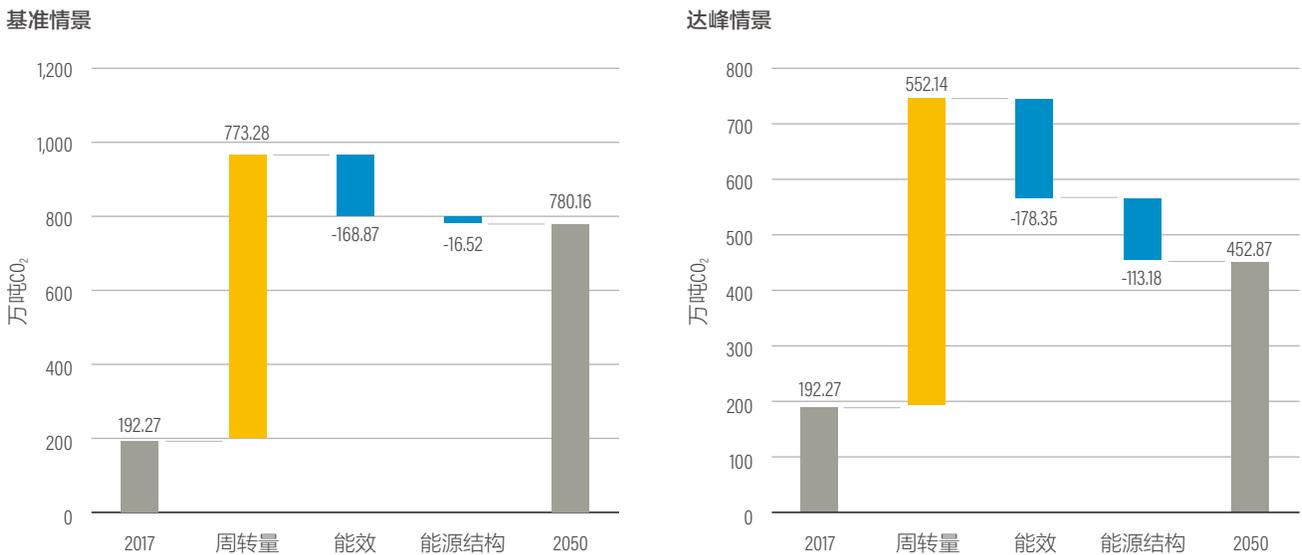


数据来源：课题组计算

如果采用较保守的发展战略，假设2031年才开始应用生物质航油，且至2050年占比不超过5%（如图36左），生物航油的减排贡献只有16万吨。如果朝着ICAO的原目标努力，假设中国略微滞后于国际水平，2020年开始使用生物质航油，2050年占比达到40%，可以看到传统航油到生物质航油的转移可以有效帮助减少民航碳排放（如图36右）。

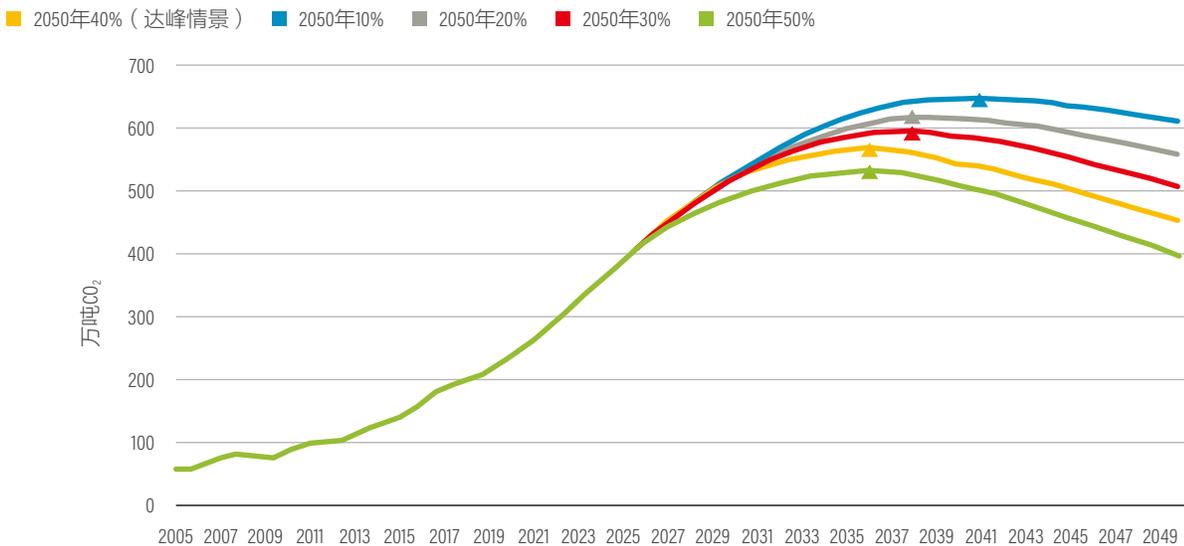
为了进一步检验民航能源结构的调整对航空碳排放的影响，本研究还测试了到2050年生物质航油不同占比下的排放路径。图37中，如按照ICAO提议的原目标，2040年达到32%、2050年达到50%，民航排放可以进一步减少，相较于达峰情景，每年平均减少二氧化碳排放约为37万吨。相反，降低生物质航油的占比不仅会增加民航的排放水平，更会推迟达峰年份，2050年生物质航油占比平均每减少10%，二氧化碳排放会增加约53万吨。

图 36 | 武汉市民航运输排放因素分解



数据来源：课题组计算

图 37 | 航空生物燃料不同占比下的民航排放路径



数据来源：课题组计算

因此，在确保粮食供应、不产生额外环境影响的前提下，如利用餐饮废物等非粮原料，从减少化石能源的使用及温室气体排放的角度来看，推广生物质航油以替代传统航油作为飞行燃料这一举措具有深远的影响。不像其他交通方式现阶段可以采用电能、天然气等其他相对清洁的能源，目前商业航空领域仅识别了生物质航油这一替代燃料的可行性<sup>67</sup>，当然其未来也有可能突破电动飞机等更先进的技术。因此虽然普及生物质航油的使用还存在较大的困难，但其前景广阔，应受到政府、科研机构及企业的大力关注。

### 3.5 减排潜力和投资分析

本研究选取了以下措施，从减排潜力和投资需求两个方面对上述政策措施进行评估，并通过时间序列展示结果。

- 控制汽车保有量：千人汽车保有量饱和点的设置实际也是对总量的控制，在达峰情景中相当于从“十四五”开始实施限购政策。
- 运输结构调整：减少公路货运，加大铁路和水运所占比例。
- 发展地铁：考虑未来轨道交通建设规划，之后也对地铁发展有所展望。

- 鼓励慢行：通过非机动车出行替代机动车出行来测算减排量。
- 提高能效：达峰情景和基准情景能效提升不同。
- 新能源汽车推广应用：包括新能源汽车在公交车、出租车、公务车、物流车、环卫车、私人小汽车、分时租赁汽车等领域的应用。
- 民航生物燃料应用：基准情景生物燃料没有大规模应用，达峰情景参考国际相关目标，2050年达到40%左右。
- 电力结构优化：随着交通工具的电动化，从电力生产端降低排放也是减少交通排放的重要手段之一，这主要是通过提高非化石能源发电占比来实现。

表3汇总了各种政策的减排潜力。总体来看，新能源汽车推广应用、提高能效、电力结构优化和控制汽车保有量将成为重要的减排驱动力。

表4是各类交通政策的投资需求以及占GDP的比例。发展地铁的投资需求最大，而行政命令基本相当于零成本，例如控制汽车保有量，还有一些政策的投资需求比较难以量化，比如运输结构调整等。此外，电力结构优化的政策虽然并非针对交通行业本身，但受到减排影响的涉及使用电力的

表 3 | 交通政策减排潜力

万吨CO <sub>2</sub>	2016-2020	2021-2025	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2045	2046-2050	总计
控制汽车保有量	0	189	418	502	445	309	159	2023
运输结构调整	19	84	120	109	77	47	20	475
发展地铁	150	196	244	256	238	191	120	1393
鼓励慢行	159	191	232	222	184	139	89	1215
提高能效	55	420	1000	1626	2103	2376	2333	9912
新能源汽车推广应用	132	389	735	1403	2062	2712	3441	10873
民航生物燃料应用	0	2	8	26	53	74	86	249
电力结构优化	18	77	419	419	765	1148	1549	4154
总计	532	1548	4563	4563	5926	6995	7797	30295

数据来源：课题组测算。减排潜力为基准情景与达峰情景的差值。

表 4 | 交通政策投资需求

亿元人民币	2016-2020	2021-2025	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2045	2046-2050	占GDP比例
控制汽车保有量	-	-	-	-	-	-	-	-
运输结构调整	-	-	-	-	-	-	-	-
发展地铁	1951	2881	1338	325	325	325	325	0.54%
鼓励慢行（修建绿道）	2	3	3	3	3	3	3	0.00%
提高能效（汽车）	90	160	171	185	200	218	240	0.09%
新能源汽车推广应用	167	154	147	106	396	302	453	0.12%
民航生物燃料应用	-	6	15	40	59	52	34	0.01%
电力结构优化	80	88	97	106	115	123	130	0.05%
总计	2290	3293	1772	765	1098	1023	1186	0.83%

注：投资需求测算的是达峰情景下减排政策的投资需求。其中，“控制汽车保有量”为零成本。“运输结构调整”受到多方面的影响，较难核算其成本。“鼓励慢行”的投资测算只包括了修建绿道，“提高能效”只包括汽车。

数据来源：课题组测算

表 5 | 交通政策单位投资带来的减排量

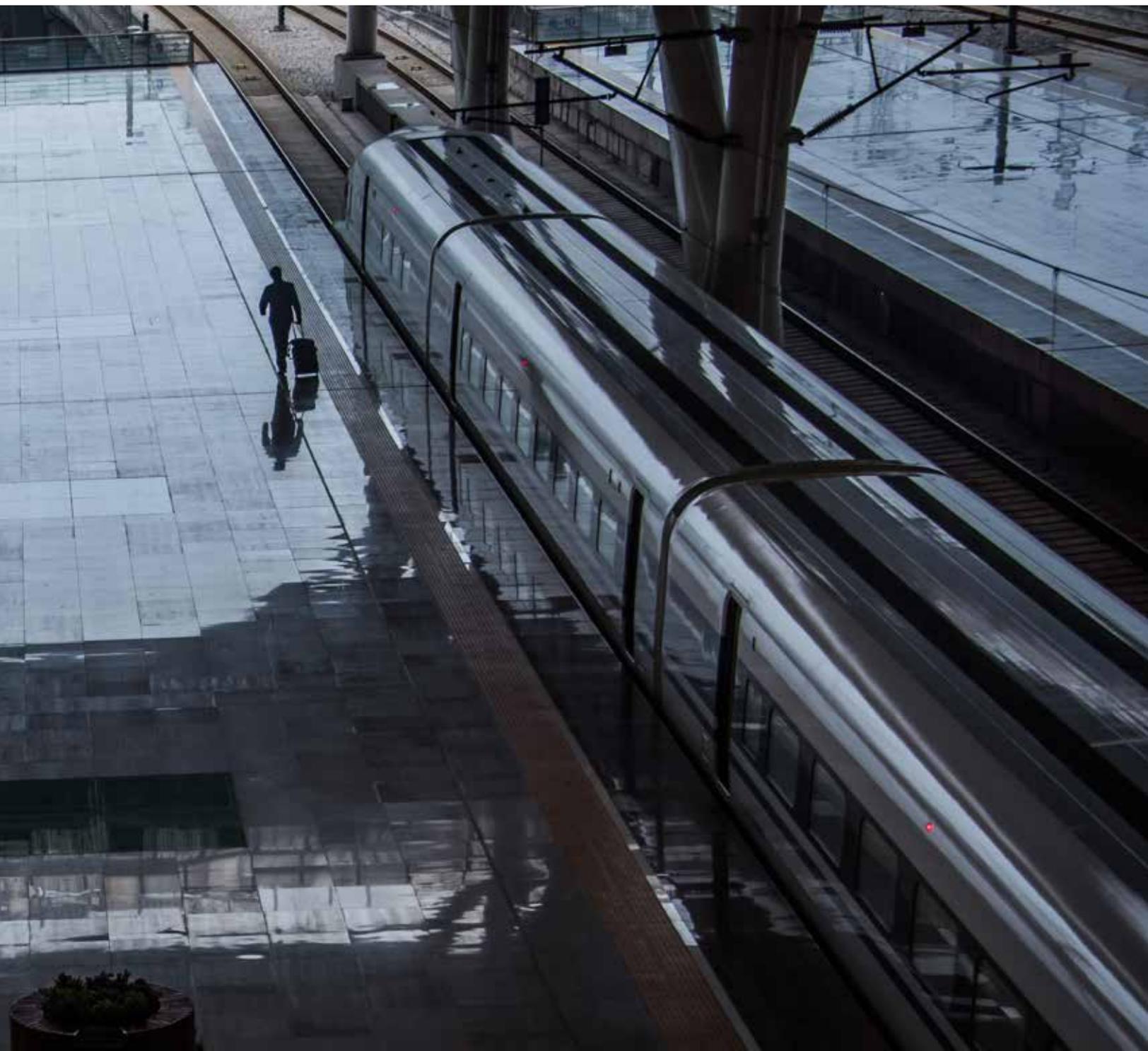
吨CO <sub>2</sub> /万元	2016-2020	2021-2025	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2045	2046-2050	平均
控制汽车保有量	-	-	-	-	-	-	-	-
运输结构调整	-	-	-	-	-	-	-	-
发展地铁	0.08	0.07	0.18	0.79	0.73	0.59	0.37	0.40
鼓励慢行	-	-	-	-	-	-	-	-
提高能效	-	-	-	-	-	-	-	-
新能源汽车推广应用	0.79	2.53	4.99	13.18	5.21	8.98	7.59	6.18
民航生物燃料应用	-	0.39	0.51	0.65	0.90	1.43	2.58	1.08
电力结构优化	-	0.87	1.84	3.96	6.68	9.35	11.90	5.77

注：按照表 3 和表 4 中的数据计算所得。“控制汽车保有量”与“运输结构调整”为空，原因同表 4。尽管“鼓励慢行”和“提高能效”这两项措施都分别测算了减排量和投资总量，但由于数据可获得原因，投资总量的测算口径和减排量不一致，故未计算这两项措施的单位投资减排量。

数据来源：课题组测算

各行各业，这里是做总体投资测算，没有区分。综合表中几项政策，可测算投资量相当于武汉市GDP的0.8%。

表5是各类政策单位投资带来的减排量。新能源汽车推广、电力结构优化排在前两位。长期来看，随着技术进步、商业模式等条件的成熟，单位投资所带来的减排量会越来越大。





## 第四章

# 建议

现有政策延续下，武汉市交通领域将在2035年左右出现碳排放峰值，比2022年城市总体达峰的目标滞后10多年，达峰后排放缓慢下降。如果能够适当控制交通需求和汽车保有量、调整运输结构、更多提升能源效率、更大力度推广新能源汽车、推动生物燃料的应用，武汉市交通碳排放可在2030年前达到峰值，达峰时排放量为2200万吨左右，之后呈现明显下降趋势。如果不考虑铁路、民航和水运，武汉市交通碳排放的达峰年份能略微提前，基准情景下2035年达峰，达峰情景下2028年达峰。因此，尽早达峰、低位达峰还需要更严格的减排措施。为促进武汉市交通低碳发展、尽早实现碳排放达峰，本研究建议采取的措施如下：

### 4.1 引导市民公共交通出行，减少私人交通出行需求

**鼓励市民乘坐公共交通工具出行。**力争2020年前实现“4、4、2”和“60/60”目标，即公共交通（常规公交车和地铁）、慢行（步行和自行车）、机动车的占比分别为40%、40%、20%；公共交通出行比例达到60%、轨道交通占公共交通出行比例达到60%。地面公共交通方面，可注重大、小型公共汽（电）车搭配应用，发展多层次、多样化的公共交通服务，改善公共交通线路和站点的设置及布局，提升多模式换乘效率和体验，增强公共交通的吸引力。地铁方面，可研究尝试实施地铁票价优惠政策。此外，还应该促进轨道交通、常规公共汽（电）车，甚至是共享单车之间换乘优惠政策的实施，如乘坐地铁后一

定时间内可以免费换乘公共汽（电）车和免费骑行共享单车等。同时，城市也应加强客运枢纽的建设，提高不同交通方式衔接的便捷性，如地铁站与公交站的衔接。

**适当控制汽车保有量。**根据发达国家经验，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。武汉市2017年千人汽车保有量约为207辆，长期来看应控制在350辆以内，这样既能满足居民用车需求，即每个家庭至少一辆车，部分家庭两辆车，也能确保武汉市交通碳排在相对较早的时间以较低水平达到峰值。2017年武汉市汽车保有量为261万辆，建议武汉市2020年汽车保有量控制在350万辆，2025年控制在420万辆，2030年控制在480万辆，2050年控制在560万辆。可供参考实施的政策包括行政手段（如限购）和经济手段（如拥堵收费和停车收费政策）。

**优化共享单车使用。**共享单车解决了“最后一公里”问题，提升了城市公共交通的使用率。在共享单车投放接近饱和的情况下，可以通过提高共享单车分担率和骑行渗透率来增强减排效果。一是改善骑行环境，如规划增加自行车专用道，可结合骑行热力图优先开展热点地区慢行道建设。同时加强自行车可达性，如在高铁站内增设自行车存放点，增加停放区供给和加强管理等。二是要求企业进行精细化管理，改善用户体验，如加快故障车修理进度等。

**在城市规划中纳入减排考虑。**城市“摊大饼”式的发展模式是造成交通需求增加的重要因素之一。

武汉应在未来的规划与建设中考虑节能减排因素，设计资源紧凑型、功能混合型的城市空间和形态，考虑拆除封闭小区，在满足社会生产生活需要的基础上有效减少交通需求，从而减少排放。

## 4.2 优化城际交通运输结构，增加铁路水路运输比例

**提高或保持铁路、水路运输占比。**货运领域，铁路运输2020年、2030年、2050年分别占15%、17%和25%，水运保持不低于25%。客运领域，铁路运输占比不低于75%。此外，还需要适当控制民航货运增长。不同于旅客运输，货物运输这一商业行为可以受到管理机构的有效调度与管控，比如可以要求或引导企业选择铁路运输而尽量减少航空运输的使用。货运主要是出于时效性及通达性的考虑才选择成本较高的航空运输，因此与其他运输方式相比，民航货物运输占据较小的市场份额，其历史发展也相对稳定，未出现活动水平激增的现象。民航的运输量虽然没有公路和铁路那么大，但由于其单位周转量能耗非常高，是水运的154倍、铁路的128倍、公路的21倍，加上武汉市发展国际门户枢纽的定位，航空未来的排放和减排潜力非常大。适当控制民航货运增长可以有效减少排放。

**发展武汉特色运输产品。**依据武汉得天独厚的内湖水运优势，适当推广具有武汉特色的运输产品，如水上公共交通产品、水陆联运旅游产品，在缓解路面交通的压力的同时，也可以有效降低排放水平。同时，信息技术的应用将为交通出行带来更多的选择与便利，进一步实现智慧交通的理念。

## 4.3 加大新能源车推广力度，分时序推动各领域应用

城市公共交通电动化可以在近期带来较大减排潜力，短期内应以推动公交车和出租车纯电动化为主要目标。现有政策延续的结果是预计2030年武汉市完成公交车和出租车的电动化，但如果能提前至2022年前全部完成，那么“十三五”期间交通领域的减排潜力有近30%都是来自这一领域。武汉市所处的华中电网地区电力较为清洁，新能源汽车相比传统燃油汽车有更大的减排作用。根据新能源汽车推广的趋势以及其他城市经验，城市公共交通应该发挥领头羊作用。武汉需要加大纯电动车在城市公交车、出租车行业的应用。尽管目前看来有一定困难，但是相比新能源汽车在社会车辆领域的推广，城市公共交通电动化更多取决于政府的决心和力度。建议现在启动公交车和出租车领域纯电动车更换，2022年实现城市公共交通100%纯电动化。

### 政策和经济激励大力推动电动城市物流配送车发展。

随着城市化的进展和人民生活水平的提高，未来很大比例的货运增长需求将来自于城市内部，并由城市配送完成。城市配送具有里程短、频率高、启停多、配送货物重量和体积偏小等特征，是电动车推广的优先场景。目前，如何降低物流企业购买和使用电动物流车的成本，完善快速充电桩建设，提升电动物流车辆配送服务水平，以经济手段和政策手段大力鼓励城市电动物流车发展，是武汉市可以重点思考的机遇所在。

**解决电动车分时租赁面临的诸多难题。**共享汽车、新能源汽车和无人驾驶汽车是未来交通发展的三大趋势。武汉目前有几家汽车租赁企业，但投放规模不大，且使用上还存在诸多问题，如站点少、充电桩建设滞后、部分企业不允许异站还车、停车难、调度不及时等，需要政府和企业合作，抓紧研究制定分时租赁相关政策，规范分时租赁市场，确保其健康有序发展。

**鼓励新能源汽车在私家车领域的应用。**长期来看，新能源汽车大规模应用可以发挥巨大减排作用，但要想产生显著影响（如百万吨级别的减排潜力），新能源汽车必须达到百万辆以上规模，这部分潜力需要在私家车群体中才能得以实现。中长期内，武汉市应利用财政手段设计适当的新能源补贴和税收优惠政策，还应该将充电桩建设纳入城市规划。2020年、2030年和2050年武汉市新能源汽车保有量目标分别为3.5万辆、80万辆（20%）和450万辆（85%）。

## 4.4 大力发展物流业的同时，抓住货运行业减排机遇

**优化物流体系，降低不合理的货物运输需求。**《武汉市现代物流业发展“十三五”规划》将武汉定位为至2020年末，基本建成带动城市圈、引领长江经济带中游地区、连通东西部、对接全国乃至全球市场的现代物流体系，成为国际知名、国内领先、区域龙头的国家物流中心。在规划和建设阶段，应优化物流配送中心的布局位置，保障物流园区、中心、节点与综合交通网的快速衔接。同时，做大做强华中最大的物流交易所，通过整合物流资源、建立物流信息共享平台，以降低返程空载率。出台规范减少过度包装，将设施、仓储、运输成本与服务及时响应成本进行平衡，降低不必要的货物运输需求，从而节约资源、提高效率。

**抓住区域地理位置优势，大力发展多式联运，形成示范效应辐射全国。**武汉地处腹地中心，距离上海、北京、重庆、广州均在1000公里左右。作为全国为数不多的集

铁路、水路、公路、航空为一体的城市，位居长江经济带中心位置。“十二五”期间，武汉多式联运发展迅速，以港口、铁路、航空三大节点为中心的多式联运模式初步形成。依托武汉地域特色不断完善公路、铁路、水路的多式联运通道建设，大力发展多式联运机制，将在全国范围内形成示范效应，在降低物流成本、提升物流效率的同时提升物流行业服务水平，有利于促进长江经济带加速发展。

**大力提升载货车辆燃油经济性水平。**柴油货车在过去几十年效率提升显著，但依然有提升空间。未来在更加严格的车辆排放标准和燃油经济性水平要求下，政府可以规范和鼓励企业通过一揽子技术措施如采用低滚阻轮胎、改进牵引车和挂车的空气动力学设计等，进一步提升中型和重型货车的燃油经济性水平。

**注重绿色建养技术。**虽然绿色建养技术主要针对公路的建设及维护阶段，但是由于货运车辆往往会影响到道路的使用状态及寿命，道路的质量也会影响车辆的行驶效率，因此应在规划、设计、施工及维护环节关注道路的环境成本及可持续性，以推动公路运输的高效发展。

## 4.5 推广应用清洁能源技术，促进能源结构加速优化

**液化天然气在水运中的运用。**据武汉市港航管理局介绍，武汉市曾尝试使用液化天然气（LNG）船，但发展效果不好<sup>68</sup>，因此仍以柴油船舶为主。交通运输部在《交通运输部关于推进水运行业应用液化天然气的指导意见》中明确提出应“把推广应用LNG作为水运行业节能减排和生态文明建设的重要抓手”，很多省市也在积极推进内河运输应用液化天然气，如江苏省在大力推进内河船舶“油改气”、港口水平运输机械“油改气”。因此，建议武汉市应加强LNG船舶应用的发展，开展重点水域、港口加注站点的布局规划与建设，形成配套支持政策与管理办法。

**生物燃料在航空领域的应用。**虽然武汉市政府对民航的管辖权有限，但可以通过引导、激励等作用，改变消费者、货物运输企业、民航企业的行为。比如，可以鼓励注册在武汉的中国东方航空武汉有限责任公司积极参与航空生物燃料的研发与利用，而东方航空正是我国第一家利用航空生物燃油进行试飞验证的公司。

**电力结构优化。**由于未来交通的发展方向是电气化，清洁电力对减排的影响非常显著，只有在可再生能源高比例应用于发电行业的时候，交通行业才能实现更低排放，因此需要多部门协作，共同努力加大电力生产清洁化进程。尽管在全国来看，湖北省电网和华中电网的清洁程度

已经很高，但是仍有提升空间。此外，目前武汉市内的可再生能源发电占比仅为1%，在未来中长期应该加强电源结构的优化，促进可再生能源发电。

## 4.6 探索交通减排机制创新，通过市场手段促进减排

**利用“碳宝包”积分制度推动市民绿色出行。**可将共享单车、公共汽（电）车、地铁等绿色出行方式与“碳宝包”制度相结合，实现碳积分兑换骑行、公共汽（电）车票、地铁票，甚至是话费充值和其他品牌认可的积分制度等，通过市场驱动减排。

**为交通运输企业参与碳交易做好技术储备。**尽管目前全国碳市场仅涵盖电力行业，但根据以往CDM市场、自愿减排市场的规则，以及其他城市的经验（如深圳曾在碳市场规则设立之初将交通纳入，后来由于和限购政策冲突暂未将交通纳入），武汉可以在交通碳市场方法学、企业碳盘查，甚至是初步试点交通企业碳交易方面有所探索。

**保险收费创新机制。**现有车辆保险费率主要考虑事故率等因素，未来可以鼓励企业加入根据年行驶里程、是否为新能源汽车等来制定保险优惠措施。

## 4.7 加强低碳交通能力建设，提供制度保障助力决策

**建立低碳交通统计核算监测体系。**对现有确实数据体系需要不断进行完善，一是将排放因子数据本地化，目前排放因子大多使用国家值或者区域值，对结果准确度有一定影响。二是获得城市内物流配送相关数据，目前这部分排放因为没有数据而没有进行估算。未来随着快递业的发展，这部分排放还将迅速增长，所占比重将越来越大。

**加强本地技术团队能力建设。**形成一个由能源、低碳、交通等领域专家组成的综合技术团队，在此研究基础上以后每年或者定期更新数据，及时追踪进展。



## 附录

# 参数设置

附录中的表6至表17列出了武汉交通碳排放达峰情景分析中的所有参数设置及解释。

历史数据来自历年《武汉市国民经济和社会发展统计公报》。其他年份数据中，上标为1的数据来自《武汉市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》，上标为2的数据来自《武汉市城市总体规划（2017—2030）》（征求意见稿），上标为3的数据来自《武汉2049远景发展战略规划》，上标为4的三个数据即2020年、2030年和2050年的城市交通需求是根据人口和人均出行次数（2.5次/天）进行计算得出。其他2020年、2030年和2050年数据为结合历史趋势和专家判断推算得出。

表 6 | 经济、产业、人口及交通需求总量参数设置

指标	单位	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年
GDP	亿元	261	5566	10906	19000 <sup>1</sup>	40000	60000
二产占比	%	45.4	45.5	45.7	42.0 <sup>1</sup>	35.0 <sup>2</sup>	20.7
三产占比	%	49.8	51.4	51.0	55.0 <sup>1</sup>	63.0 <sup>2</sup>	77.6
人口	万人	858	979	1,060	1,200	1,550 <sup>2</sup>	1,700 <sup>3</sup>
城市交通需求	万人次/日	-	-	2300 <sup>2</sup>	2800 <sup>4</sup>	3800 <sup>4</sup>	4500 <sup>4</sup>
客运总量	亿人	1.5	2.3	2.8	3.2	4.7	8.1
货运总量	亿吨	2.0	4.0	4.8	6.5	8.0	8.7

表 7 | 电力结构和排放因子参数设置

指标		单位	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年
非化石能源发电占比	基准情景	%	-	-	1	18	45	60
	达峰情景	%	-	-	1	20	50	83
火电效率	两个情景一致	g/kWh	370	333	312	310	300	271
电力排放因子	基准情景	kg CO <sub>2</sub> / kWh	0.5257	0.5257	0.5257	0.4859	0.4063	0.2699
	达峰情景	kg CO <sub>2</sub> / kWh	0.5257	0.5257	0.5257	0.4736	0.3694	0.1134

关于电力排放因子的使用，由于国家发改委只公布了2010—2012年的区域电网排放因子和2010年的省级电网排放因子，为简化处理，本研究计算2005—2015年的电力排放时统一使用了2012年的华中电网排放因子（0.5257 kgCO<sub>2</sub>/kWh）。未来排放因子的取值取决于两个因素。一个因素是电源结构，随着电网的清洁化，排放因子会降低。本研究没有单独对武汉或华中电网进行研究，而是采用了国家层面的研究结果，达峰情景下2050年非化石能源占比为83%。这一假设参考了国家发改委能源研究所的两个研究，一是《重塑能源：中国——面向2050年能源消费和生产革命路线图》中，2050年非化石能源占发电行业能源消费量的83%，二是《中国2050高比例可再生能源发

展情景暨路径研究》，该研究认为2050年非化石能源占发电行业能源消费量的91%。影响未来排放因子的另一个因素是火电效率。随着火电机组运行效率的提升，发电煤耗会不断下降。参考《湖北省能源发展“十三五”规划》，2015年全省煤电机组供电煤耗为312g/kWh<sup>69</sup>。《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<sup>70</sup>。综合上述方案，设定武汉市供电煤耗参考行业平均水平，于2020年达到310g/kWh，2030年达到300g/kWh，后续每年提升0.5%，2050年达到271g/kWh。

表 8 | 汽车保有量参数设置

指标	情景	单位	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年
千人汽车保有量	基准情景	辆	43	83	186	290	340	388
	达峰情景	辆	43	83	186	273	310	335
汽车保有量	基准情景	万辆	37	81	198	350	530	660
	达峰情景	万辆	37	81	198	350	480	570
私人小汽车保有量	基准情景	万辆	15	49	165	300	480	580
	达峰情景	万辆	15	49	165	300	430	490
出租车保有量	两个情景假设一致	万辆	1	1.4	1.7	2	2.7	3.4
公共汽(电)车保有量	两个情景假设一致	万辆	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1	1.5

历史数据来自历年《武汉市国民经济和社会发展统计公报》和《武汉交通统计年鉴》。对于未来预测，汽车保有量的预测结合了人口和千人汽车保有量，基准情景下假设千人汽车保有量饱和值不超过400辆，达峰情景下假设千人汽车保有量饱和值不超过350辆，具体方法在章节3.4.1中有所介绍。私人小汽车则参考了每年新增数量的历史趋势，结合汽车保有量和其他车辆增长得到。出租车是参考了历史增长趋势和“千人2辆”的标准进行预测，公共汽(电)车也是参考历史趋势和“万人15标台”的标准进行预测。

表 9 | 新能源汽车保有量参数设置

		单位	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年
新能源汽车 总保有量	基准情景	万辆	-	-	1	5.5	80	300
		%	-	-	0.5	1.6	15	45
	达峰情景	万辆	-	-	1	7	95	480
		%	-	-	0.5	1.5	20	85
私人小汽车 保有量	基准情景	万辆	-	-	0.7	3.2	72	290
	达峰情景	万辆	-	-	0.7	3.3	86	440
公交车保 有量	基准情景	万辆	-	-	0.1	0.4	1.1	1.5
	达峰情景	万辆	-	-	0.1	0.7	1.1	1.5
出租车保 有量	基准情景	万辆	-	-	0.05	0.25	2.7	3.6
	达峰情景	万辆	-	-	0.05	1.6	2.7	3.6
公务车保 有量	基准情景	万辆	-	-	0.03	0.05	0.1	0.2
	达峰情景	万辆	-	-	0.03	0.07	0.2	0.4
环卫车保 有量	基准情景	万辆	-	-	0.01	0.01	0.02	0.04
	达峰情景	万辆	-	-	0.01	0.02	0.05	0.1
通勤车保 有量	基准情景	万辆	-	-	0.1	0.3	0.5	0.8
	达峰情景	万辆	-	-	0.1	0.4	0.9	1.9
分时租赁汽 车保有量	基准情景	万辆	-	-	0.15	0.7	1.7	3.7
	达峰情景	万辆	-	-	0.15	0.9	2.9	6.9
物流车（轻 型货运）保 有量	基准情景	万辆	-	-	0.05	0.6	1.9	4.5
	达峰情景	万辆	-	-	0.05	2.0	6.5	15

注：还有一部分“其他”新能源车未在表中列出，因此表中所有分类型车辆数量相加略小于总数。在章节 2.7 局限性中有所介绍，模型做了简化处理，假设所有新能源车为纯电动车，未考虑氢燃料汽车、插电式混合动力汽车和燃料电池汽车。考虑到双积分制很快实施，将从供给端促进新能源汽车的推广应用，因此假设基准情景下，2030 年新能源汽车占比达到 15%，2050 年达到 45%。而在达峰情景下，受到技术突破和政策推动，2030 年新能源汽车占比达到 20%，2050 年达到 85%。

表 10 | 汽车年行驶里程 (VKT) 参数设置

指标	单位	国家平均数据	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年	
私人小汽车年行驶里程	基准情景	公里	18000	18000	16000	15000	14700	14000	13000
私人小汽车年行驶里程	达峰情景	公里	18000	18000	16000	15000	14200	12800	10000
出租车年行驶里程	两个情景一致	公里	120000	153764	153764	153764	153764	153764	153764
公共汽(电)车年行驶里程	两个情景一致	公里	60000	73330	73330	73330	73330	73330	73330

历史数据中，私人小汽车数据来自武汉市环境保护科学研究院，出租车、公共汽（电）车数据来自《武汉交通运输年鉴》中2010—2015年数据的平均值。其中，出租车和公共汽（电）车的武汉当地值都高于国家平均值。国家平均数据来自《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南》。未来预测中，出租车和私家车由于数量较小而进行简化处理，两个情景使用统一数据，且和历史数据保持一致，增加的出行需求主要体现在车辆的保有量上。模型中只对私人小汽车的年行驶里程进行分别预测，由于受到公共交通的替代，私人小汽车的年行驶里程会减少，具体数据假设参考Huo,H.,etal.,Vehicle-use intensity in China: Current status and future trend. Energy Policy(2011)中的预测，基准情景下2050年下降至13000公里，达峰情景下2050年下降至10000公里。

表 11 | 机动车能源效率参数设置

	指标	单位	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年
基准情景	私人小汽车/出租车能源效率 (汽油车)	升/百公里	8.6	8.6	8.8	8.3	7.5	6
	私人小汽车/出租车能源效率 (电动车)	千瓦时/百公里	-	-	18	18	16.8	14.4
	公共汽车能源效率 (汽、柴油车)	千克标准煤/百公里	48.5	48.5	48.9	47.4	44.6	39.1
	公共汽车能源效率 (电动)	千瓦时/百公里	-	-	100	100	93	80
达峰情景	私人小汽车/出租车能源效率 (汽油车)	升/百公里	8.6	8.6	8.8	8.2	7	5
	私人小汽车/出租车能源效率 (电动车)	千瓦时/百公里	-	-	18	17	15.3	11.7
	公共汽车能源效率 (汽、柴油车)	千克标准煤/百公里	48.5	48.5	48.9	46.5	41.5	31.5
	公共汽车能源效率 (电动)	千瓦时/百公里	-	-	100	95	85	65

历史数据中，私人小汽车和出租车数据来自能源与交通创新中心 (iCET) 的《中国乘用车燃料消耗量发展年度报告2017》，2015年公共汽车数据来自当年的《交通运输行业发展统计公报》。2014年以前的《交通运输行业发展统计公报》没有相关数据，因此2005年和2010年采用2014年数据。

表 12 | 公路相关参数设置

	指标	单位	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年
公路客运	客运量	万人	10293	14730	11381	8800	6200	4500
	旅客周转量	亿人公里	69	120	81	70	60	55
	能效水平 (基准情景)	千克标准煤/ 千人公里	18.53	10.74	12.60	12.34	11.85	10.93
	能效水平 (达峰情景)	千克标准煤/ 千人公里	18.53	10.74	12.60	12.00	10.83	8.82
公路货运	货运量 (基准情景)	亿吨	0.85	2.11	2.85	4.41	5.04	5.23
	货运量 (达峰情景)	亿吨	0.85	2.11	2.85	4.26	4.82	4.34
	货物周转量 (基准情景)	亿吨公里	66	308	597	900	1522	2424
	货物周转量 (达峰情景)	亿吨公里	66	308	597	869	1455	2009
	能效水平 (基准情景)	千克标准煤/ 百吨公里	2.73	2.28	1.90	1.77	1.54	1.16
	能效水平 (达峰情景)	千克标准煤/ 百吨公里	2.73	2.28	1.90	1.70	1.38	0.90

注：公路客运两个情景下周转量一致，而公路货运结构有所调整，所以两个情景下周转量水平不同。

2015年公路单位周转量能耗数据来自当年的《交通运输行业发展统计公报》。2011年以前的《交通运输行业发展统计公报》没有提供单位周转量能耗数据，因此，2005—2010年的公路货运和水运货运数据为根据2011—2017年趋势回算。对于未来预测，《交通运输节能环保“十三五”发展规划》中提到，“与2015年相比，营运客车单位运输周转量能耗和二氧化碳排放分别下降2.1%和2.6%，营运货车单位运输周转量能耗和二氧化碳排放分别下降6.8%和8%。”因此，基准情景下2020年能效水平按照这一要求进行设置。后续年份设置每五年下降率基本维持此水平，即客运单位周转量能耗下降约2%，货运单

位周转量能耗下降约7%，相当于2050年相比2015年分别下降13%和36%。达峰情景下，设置能效水平提升较高，客运和货运平均每五年下降约10%和16%。同时，公路运输中随着纯电动重型卡车等车型的研发问世<sup>71</sup>，也设置了相应的电气化率，基准情景下到2050年电力消费占比达2.5%；达峰情景下认为电动客车、电动货车等会得到较大规模的推广，设置电力消费占比达50%。

表 13 | 铁路相关参数设置

	指标	单位	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年
铁路客运	客运量	万人	4626	7281	15083	21855	37281	72374
	周转量	亿人公里	388	529	869	1192	1853	2895
	能效水平 (基准情景)	吨标准煤/百万 换算吨公里	6.02	4.94	4.68	3.10	2.74	2.17
	能效水平 (达峰情景)	吨标准煤/百万 换算吨公里	6.02	4.94	4.68	2.97	2.41	1.58
铁路货运	货运量 (基准情景)	亿吨	0.85	1.01	0.66	0.95	1.60	2.05
	货运量 (达峰情景)	亿吨	0.85	1.01	0.66	0.93	1.40	2.36
	周转量 (基准情景)	亿吨公里	987	1145	996	1298	2620	4203
	周转量 (达峰情景)	亿吨公里	987	1145	996	1270	2297	4846
	能效水平 (基准情景)	吨标准煤/百万 换算吨公里	6.02	4.94	4.68	3.10	2.74	2.17
	能效水平 (达峰情景)	吨标准煤/百万 换算吨公里	6.02	4.94	4.68	2.97	2.41	1.58

注：铁路客运两个情景下周转量一致，而铁路货运结构有所调整，所以两个情景下周转量水平不同。

2015年铁路单位周转量能耗数据来自当年的《交通运输行业发展统计公报》，2010年数据来自当年的《铁道统计公报》。2006年以前的《铁道统计公报》没有公布能耗数据，因此2005年数据为根据2007—2016年趋势回算。单位周转量能耗是考虑了内燃机车和电力机车的综合值，

按照历史能效提升速率，设置达峰情景下单位周转量能耗每五年平均下降约6%；达峰情景下，能效提升速率较快，即单位周转量能耗每五年下降约10%。在对未来情景进行预测时，也考虑了电气化率发展水平。

## 专栏 5 | 换算吨公里的含义与转换方法

换算吨公里是交通运输部门用来表示客货运总周转量的计量单位。交通运输包括旅客运输和货物运输两个方面，为了综合考核交通运输部门的客货周转总量、运输成本、劳动生产率和运价，有必要将反映旅客周转量的人公里数按一定的换算比率折合成反映货物周转量的吨公里数，将两者相加，其合计计数即为整个交通运输部门的换算吨公里数。各种运输方式的换算比率不同。换算规定如下：

铁路：1换算吨公里=1货运吨公里=1客运人公里

公路：1换算吨公里=1货运吨公里=10客运人公里

水运：1换算吨公里=1货运吨公里=1卧铺人公里或3座位人公里

民航：1换算吨公里=1货运吨公里=13.3人公里（国际）/13.8人公里，即1人公里等于0.09吨公里

来源：我国铁路发展与改革研究、百度百科

<https://baike.baidu.com/item/%E6%8D%A2%E7%AE%97%E5%90%A8%E5%85%AC%E9%87%8C/22491471?fr=aladdin>、中国物流交易中心 <http://www.56135.com/56135/known/knowdetail/230152.html>

表 14 | 民航相关参数设置

	指标	单位	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年
民航客运	客运量	万人	494	885	1163	1800	3800	4300
	周转量	亿人公里	51	99	152	270	580	840
	能效水平 (基准情景)	千克油耗/吨 公里	0.334	0.293	0.294	0.271	0.247	0.193
	能效水平 (达峰情景)	千克油耗/吨 公里	0.334	0.293	0.294	0.259	0.227	0.160
民航货运	货运量 (基准情景)	万吨	6	9	11	35	130	229
	货运量 (达峰情景)	万吨	6	9	11	31	126	225
	周转量 (基准情景)	亿吨公里	0.7	1	2	6	25	58
	周转量 (达峰情景)	亿吨公里	0.7	1	2	5	24	57
	能效水平 (基准情景)	千克油耗/吨 公里	0.334	0.293	0.294	0.271	0.247	0.193
	能效水平 (达峰情景)	千克油耗/吨 公里	0.334	0.293	0.294	0.259	0.227	0.160
	基准情景	%	0	0	0	0	1	5
	达峰情景	%	0	0	0	1	5	40

注：民航客运两个情景下周转量一致，而民航货运结构有所调整，所以两个情景下周转量水平不同。

关于民航在模型中的设置，假设政府无法对居民乘坐飞机出行产生影响，因此民航客运周转量在两个情景下一致。假设政府可以通过规划调整等方式适当控制货运周转量，因此两个情景下民航货运周转量设置不同。两个情景下能效水平不同，2015年数据来自当年的《民航行业发展统计公报》，2005年数据按照《2015年民航行业发展统计公报》中“2015年较2005年（行业节能减排目标基年）下降13.5%”的表述进行推算。《民航节能减排“十三五”规划》中提到，“十二五”期间五年平均单位周转量油耗为0.293千克，比“十一五”下降4.2%，计算得到“十一五”期间五年平均单位周转量油耗为0.305

千克。2006—2014年在满足五年平均值的基础上插值所得。该规划同时提出到2020年，行业单位运输周转量能耗五年平均比“十二五”下降4%左右的目标。民航业2021—2050年能源水平及生物燃料应用情况已经在章节3.4.4中有所介绍。

表 15 | 水运相关参数设置

	指标	单位	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年	
水运客运	客运量	万人	3516	1019	1148	1133	1195	1001	
	周转量	亿人公里	0.35	0.10	0.12	0.13	0.16	0.15	
	能效水平 (基准情景)	千克标准煤/ 千吨公里	5.28	4.00	2.81	2.64	2.37	2.03	
	能效水平 (达峰情景)	千克标准煤/ 千吨公里	5.28	4.00	2.81	2.58	2.22	1.75	
水运货运	货运量 (基准情景)	亿吨	0.26	0.90	1.31	1.61	1.73	1.78	
	货运量 (达峰情景)	亿吨	0.26	0.90	1.31	1.78	2.15	2.36	
	周转量 (基准情景)	亿吨公里	224	810	1358	1580	2088	2637	
	周转量 (达峰情景)	亿吨公里	224	810	1358	1746	2592	3502	
	能效水平 (基准情景)	千克标准煤/ 千吨公里	5.28	4.00	2.81	2.64	2.37	2.03	
	能效水平 (达峰情景)	千克标准煤/ 千吨公里	5.28	4.00	2.81	2.58	2.22	1.75	
	液化天然气 应用	基准情景	%	0	0	0	0	1.8	5.8
		达峰情景	%	0	0	0	1	6.9	20

注：民航客运两个情景下周转量一致，而民航货运结构有所调整，所以两个情景下周转量水平不同。

水运2010年和2015年能效水平数据来自当年的《交通运输行业发展统计公报》，公报中的数据单位为千克标准煤/千吨海里，本研究将海里折算为公里，折算系数为1海里=1.852公里。2005年的《交通运输行业发展统计公报》没有提供单位周转量能耗数据，因此2005数据为根据趋势回算。对于未来能效水平的假设，《交通运输节能环保十三五发展规划》中提到2020年比2015年下降6%，因此，基准情景参考这一比例，之后每五年的下降率分别为5.5%、5%、4.5%、4%、3.5%和3%，这个下降幅度相当于为2050年在2015年基础上下降20%。达峰情景下，设置2020年比2015年的能效提高达到8%，之后每五年分别

提高7.5%、7%、6.5%、6%、5.5%和5%，相当于2050年在2015年的基础上下降30%。水运能源利用情况参考交通运输部2013年11月提出的《关于推进水运行业应用液化天然气的指导意见》，即到2020年内河运输船舶能源消耗中LNG的比例超过10%。由于还要考虑近海及远洋运输的能耗，LNG占比仍然较小。

表 16 | 地铁相关参数设置

指标	单位	2005年	2010年	2015年	2020年	2030年	2050年	2050年
运营里程	公里	10	29	96	396	1045	1200	6
客流量 (基准情景)	万人次/日	1	9	120	350	730	1500	14.4
客流量 (达峰情景)	万人次/日	1	9	120	400	860	1800	39.1
平均运距	公里	7.16	7.72	10.28	14.53	23	40	80
能效 (基准情景)	千瓦时/人公里	0.1611	0.1132	0.0603	0.0505	0.0382	0.0297	5
能效 (达峰情景)	千瓦时/人公里	0.1611	0.1132	0.0603	0.0467	0.0302	0.0173	11.7

历史数据来自武汉地铁集团。未来预测中，运营里程结合四期规划以及其他城市地铁运营里程情况进行预测，客流量结合武汉市人口、日均出行次数以及地铁出行占比进行预测。能效水平按照每五年年均下降率设置，基准情景下，2020—2050年间每五年的年均下降率设置为3.5%、3%、2.5%、2%、1.5%、0.5%，达峰情景下，每五年的年均下降率设置为5%、4.5%、4%、3.5%、3%、2.5%。

表 17 | 单位能耗碳排放

能源品种	单位	实物量排放因子
汽油	吨CO <sub>2</sub> /吨	3.042
煤油	吨CO <sub>2</sub> /吨	3.168
柴油	吨CO <sub>2</sub> /吨	3.147
燃料油	吨CO <sub>2</sub> /吨	3.055
天然气	吨CO <sub>2</sub> /万立方米	21.655
液化天然气	吨CO <sub>2</sub> /吨	2.588

本研究涉及的燃料品种包括汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和液化天然气，其实物量排放因子是按照《综合能耗计算通则》(GB/T2589—2008)、《中国能源统计年鉴2016》、《2005中国温室气体清单研究》、《省级温室气体清单编制指南(试行)》和《2006年IPCC国家温室气体清单指南》、《能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南(2.1版)》等文件中给出的平均低位发热量、单位热值含碳量和碳氧化率计算得到。具体方法参见世界资源研究所技术论文《中国气候变化目标进展分析》<sup>72</sup>。

## 参考文献

1. 2009年武汉统计年鉴
2. 2010年武汉统计年鉴
3. 2011年武汉统计年鉴
4. 2012年武汉统计年鉴
5. 2013年武汉统计年鉴
6. 2014年武汉统计年鉴
7. 2015年武汉统计年鉴
8. 2016年武汉统计年鉴
9. 武汉交通运输年鉴2011
10. 武汉交通运输年鉴2012
11. 武汉交通运输年鉴2013
12. 武汉交通运输年鉴2014
13. 武汉交通运输年鉴2015
14. 武汉交通运输年鉴2016
15. 2008年武汉市国民经济和社会发展统计公报
16. 2009年武汉市国民经济和社会发展统计公报
17. 2010年武汉市国民经济和社会发展统计公报
18. 2011年武汉市国民经济和社会发展统计公报
19. 2012年武汉市国民经济和社会发展统计公报
20. 2013年武汉市国民经济和社会发展统计公报
21. 2014年武汉市国民经济和社会发展统计公报
22. 2015年武汉市国民经济和社会发展统计公报
23. 2016年武汉市国民经济和社会发展统计公报
24. 武汉市人民政府. 武汉市2016年新能源汽车推广应用实施方案. 2016
25. 武汉市城市轨道交通第三期建设规划（2015~2021年）
26. 武汉市城市轨道交通第四期建设规划（2019—2024年）（武汉市交通发展战略研究院）
27. 武汉市城市总体规划（2016—2030年）（征求意见稿）
28. 武汉市低碳发展“十三五”规划（2016—2020年）
29. 武汉市发展和改革委员会. 武汉市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要. 2018
30. 武汉市人民政府. 武汉市交通运输发展“十三五”规划. 2017
31. 武汉市人民政府. 武汉市综合交通体系三年攻坚实施方案（2018—2020年）. 2018
32. 武汉市交通运输委员会. 武汉市交委2017年工作报告
33. 武汉市发展和改革委员会. 能源发展“十三五”规划. 2017
34. 武汉市人民政府. 武汉市新能源汽车推广应用和产业化工作实施方案（2017—2020年）. 2017
35. 武汉市人民政府. 武汉市新能源汽车推广应用示范工作实施方案. 2014
36. 武汉市人民政府. 武汉市碳排放达峰行动计划（2017—2022年）. 武政〔2017〕36号. 2017
37. 张铁映. 城市不同交通方式能源消耗比较研究. 北京交通大学. 2010
38. 生态环境部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南（试行）. 2014
39. 国际可再生能源机构. Biofuels for Aviation Technology Brief. 2017. [http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena\\_biofuels\\_for\\_aviation\\_2017.pdf](http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_biofuels_for_aviation_2017.pdf)
40. 国际民航组织（ICAO）. 2016环境报告On Board A Sustainable Future. 2016. [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAOEnvironmental\\_Brochure-IUP\\_Final.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAOEnvironmental_Brochure-IUP_Final.pdf)
41. 国务院. 打赢蓝天保卫战三年行动计划. 国发〔2018〕22号. 2018
42. 蒋乐、车丽彬、李丹. 武汉市践行慢行交通建设的经验与总结. 城市道桥与防洪. 2018: 5-9
43. 交通运输部. 加快推进绿色循环低碳交通运输发展指导意见. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content\\_2466586.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2466586.htm)
44. 交通运输部. 关于全面深入推进绿色交通发展的意见. 2017. [http://www.mot.gov.cn/zhengcejiedu/quanmiansrtijsjtjz/xiangguan-zhengce/201712/t20171206\\_2945939.html](http://www.mot.gov.cn/zhengcejiedu/quanmiansrtijsjtjz/xiangguan-zhengce/201712/t20171206_2945939.html)
45. 绿色健身步道：预想“使命”能否实现？. [http://news.ifeng.com/a/20140723/41264846\\_0.shtml](http://news.ifeng.com/a/20140723/41264846_0.shtml)
46. 马超云、梁肖、仝海强. 铁路机车单耗测算模型研究. 铁道运输与经济. 2011: 33-37.
47. 中国民用航空局. 民航节能减排“十三五”规划. 2017
48. 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. 2017
49. 世界大城市交通发展论坛演讲材料. 2016

50. 宋锦玉、于万舒、裴永浩等.我国航空生物燃料的开发情况.应用化工.2016: 340-344.
51. 孙海洋、苏海佳、谭天伟等.我国航空生物燃料的现状 & 思考.生物产业技术.2013: 7-12.
52. 王尔德.2050年燃油效率每年提高2%. <http://finance.sina.com.cn/roll/20101019/07008800756.shtml>
53. 邱诗永、宋苏、王颖等.北京市低排放区和拥堵收费政策减排效果方法研究.2018.北京:世界资源研究所. <http://www.wri.org.cn/publications>
54. 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. <http://www.wri.org.cn/publications>
55. “我国交通运输系统中长期节能问题研究”课题组.我国交通运输系统中长期节能问题研究.2011
56. 武汉大学、华中科技大学、绿色创新发展中心等.武汉CO<sub>2</sub>提前达峰行动方案.2016
57. 武汉电动汽车示范运营有限公司. <http://www.whddqc.com/index.php>
58. 武汉市人民政府.武汉机场门户枢纽发展战略规划.2013
59. 武汉市共享单车调减计划今日落地,15万辆共享单车大多已入库. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1607514355141386120&wfr=spider&for=pc>
60. 武汉市交通发展战略研究院、摩拜单车.2017年武汉市共享单车出行报告
61. 奚文怡、蒋小谦、房伟权.中国气候变化目标进展分析.2017.技术论文,北京:世界资源研究所. <http://wri.org.cn/tracking-china-climate-actions>
62. 谢汉生、满朝翰、高一帆.地铁主要能耗影响因素及节能措施分析研究.现代城市轨道交通.2013: 65-67.
63. 谢泗薪、张洁.高速铁路的发展对民航的冲击及反思.铁路采购与物流.2010
64. 薛露露、张海涛.青岛低碳和可持续交通发展战略研究.北京:世界资源研究所.2014
65. 薛美根、程杰、朱洪等.上海市小客车管理政策研究.城市交通.2014: 1-6.
66. 姚国欣.加速发展我国生物航空燃料产业的思考. <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-SYZW201104004.htm>
67. 伊文婧、朱跃中、田智宇.我国交通运输部门重塑能源的潜力路径和实施效果.中国能源.2017
68. 伊文婧.我国交通运输能耗及形势分析.综合运输.2017: 9-13.
69. 张子培、韩雄俊、刘庆元.基于情景分析法的武汉市交通政策研究.2015年中国城市交通规划年会暨第28次学术研讨会
70. 赵凤彩.国际民航减排政策趋势.2017年中国民航环境与可持续发展论坛. [http://www.caacnews.com.cn/special/3686/3692/201706/t20170623\\_1217604.html](http://www.caacnews.com.cn/special/3686/3692/201706/t20170623_1217604.html)
71. 赵凤彩等.中国民航业面临的节能减排形势与挑战. [http://www.caacnews.com.cn/zk/zj/zfc/201610/t20161020\\_1202734.html](http://www.caacnews.com.cn/zk/zj/zfc/201610/t20161020_1202734.html)
72. 赵静、宋苏、薛露露、张海涛.成都市小汽车拥有与使用政策战略研究.北京:世界资源研究所.2014. <http://www.wri.org.cn/publication/Smart-Strategiesfor-Private-Vehicle-Ownership-and-Usage-in-Chengdu>
73. 中国民航局.民航新型能源应用取得重要进展.2017 [http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/201711/t20171123\\_47709.html](http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/201711/t20171123_47709.html)
74. 周新军、薛峰.铁路“以电代油”效应评价及未来发展趋势.华北电力大学学报(社会科学版).2010
75. 朱跃中、伊文婧、田智宇.重塑能源:中国——面向2050年能源消费和生产革命路线图.交通卷
76. Greenair. States agree not to set targets as ICAO unveils its long-term vision on sustainable aviation fuels deployment. 2017. <http://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=2417>
77. Huo H, Zhang Q, He K, et al. Vehicle-use intensity in China: Current status and future trend. Energy Policy. 2012: 6-16.
78. IATA. <https://www.iata.org/pressroom/pr/Documents/saf10-infographic.pdf>
79. ICAO. 国际民航组织可持续代用燃料会议商定新的2050愿景,指导未来开发和部署.2017. <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ZH/ICAO-Conference-on-sustainable-alternative-fuels-agrees-on-new-2050-Vision-to-guide-future-development-and-deployment.aspx>
80. 宋苏. Transport Emissions & Social Cost Assessment: Methodology Guide. 北京:世界资源研究所.2017. <https://www.wri.org/publication/transport-emissions-social-cost-assessment-methodology-guide>

## 注释

1. 按照城市温室气体核算国际标准（GPC）编制的武汉市2015年温室气体排放清单
2. 朱跃中等，重塑能源：中国——面向2050年能源消费和生产革命路线图 交通卷
3. 武汉市温室气体排放清单
4. 朱跃中等，重塑能源：中国 面向2050年能源消费和生产革命路线图 交通卷
5. 武汉市人民政府网站[http://www.wuhan.gov.cn/whszfwz/zjwh/whgk/201609/t20160901\\_87226.html](http://www.wuhan.gov.cn/whszfwz/zjwh/whgk/201609/t20160901_87226.html)
6. 2017年武汉市国民经济和社会发展统计公报
7. 2017年武汉市国民经济和社会发展统计公报
8. 《2016年武汉交通运输年鉴》
9. 武汉市人民政府网站[http://www.wuhan.gov.cn/whszfwz/zjwh/whgk/201609/t20160901\\_87226.html](http://www.wuhan.gov.cn/whszfwz/zjwh/whgk/201609/t20160901_87226.html)
10. 按照汇率6.8、人口年均增长1.6%预测。
11. 《武汉市“十三五”低碳发展规划》
12. 武汉市第十三次党代会报告
13. 旅客运输量包括客运量和旅客周转量两个指标。客运量是指在一定时间内运送旅客的数量，计量单位以“人”表示。旅客周转量是指在一定时期内运送旅客数量与平均运距的乘积，计量单位是“人公里”。
14. 2017年武汉市国民经济和社会发展统计公报
15. 《武汉市交通运输发展“十三五”规划》
16. 中国民用航空局，2017年民航机场吞吐量排名
17. 武汉市交通科学研究所
18. 《湖北省综合交通运输“十三五”发展规划纲要》，《武汉市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》，《武汉市交通运输发展“十三五”规划》和《武汉市市委2017年工作报告》
19. 《武汉市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》
20. 《湖北省综合交通运输“十三五”发展规划纲要》
21. 《武汉市交通运输发展“十三五”规划》
22. 武汉市乡镇渡口和湖库景区客船由武汉市港航管理局管理；渡江客轮由长江海事局管理，且自2002年起其统计数据划分至公共交通统计口径中。
23. 2017年武汉市国民经济和社会发展统计公报
24. 武汉市交通发展战略研究院，2016武汉市交通发展年度报告。<http://www.whtpi.com/Results/9/1258.html>
25. 国家发展改革委关于武汉市城市轨道交通第四期建设规划（2019-2024年）的批复[http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201901/t20190104\\_925178.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201901/t20190104_925178.html)
26. 武汉市交通发展战略研究院
27. 《武汉市交通运输发展“十三五”规划》。
28. [http://www.hb.xinhuanet.com/2018-05/12/c\\_1122822864.htm](http://www.hb.xinhuanet.com/2018-05/12/c_1122822864.htm)
29. 《武汉市交通运输发展“十三五”规划》
30. 武汉市交通发展战略研究院、摩拜单车，2017年武汉市共享单车出行报告
31. 武汉市城管委，[http://cgwwuhan.gov.cn/html/cgdt/cgxw/201806/t20180615\\_208551.shtml](http://cgwwuhan.gov.cn/html/cgdt/cgxw/201806/t20180615_208551.shtml)
32. 武汉市交通发展战略研究院、摩拜单车，2017年武汉市共享单车出行报告
33. 武汉市城市管理委员会，[http://cgwwuhan.gov.cn/html/cgdt/cgxw/201806/t20180615\\_208551.shtml](http://cgwwuhan.gov.cn/html/cgdt/cgxw/201806/t20180615_208551.shtml)
34. 北京交通大学，2009，不同交通方式能耗与排放因子及其可比性研究
35. 2017年武汉市国民经济和社会发展统计公报
36. 中国民用航空局，2017年民航机场吞吐量排名
37. 《武汉2049远景发展战略规划》
38. 注意，这里是汽车保有量而非机动车保有量，2017年武汉市机动车保有量为274万辆
39. 谢泗薪、张洁，《高速铁路的发展对民航的冲击及反思》
40. 武汉市统计局，2014年武汉铁路货物运输量下降原因分析，<http://www.whtj.gov.cn/details.aspx?id=2524>
41. 来自能源与交通创新中心（iCET）报告《乘用车实际油耗与工况油耗差异年度报告2017》2015年实际油耗
42. 武汉电动汽车示范运营有限公司提供数据
43. 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
44. 北京交通发展研究院提供数据
45. 按照汽油密度0.725g/mL，汽油排放因子2.925吨CO<sub>2</sub>/吨计算。

46. 武汉电动汽车示范运营有限公司提供数据
47. 国家发改委提供数据
48. 网络新闻[http://www.sohu.com/a/192848692\\_132279](http://www.sohu.com/a/192848692_132279)
49. 中国产业发展研究网 <http://www.chinaidr.com/tradenews/2018-08/122077.html>
50. 北京市2018年7月发布的《关于全面加强生态环境保护坚决打好北京市污染防治攻坚战的意见》
51. 北京交通发展研究院提供数据
52. 网络新闻[http://www.sohu.com/a/192848692\\_132279](http://www.sohu.com/a/192848692_132279)
53. 中国产业发展研究网 <http://www.chinaidr.com/tradenews/2018-08/122077.html>
54. 北京市2018年7月发布的《关于全面加强生态环境保护坚决打好北京市污染防治攻坚战的意见》
55. 北京交通发展研究院提供数据
56. 根据武汉市人口和户数数据测算
57. 相关报道<http://xw.xinhuanet.com/news/detail/549369/>
58. <http://www.chinaidr.com/tradenews/2018-08/122077.html>
59. 《武汉市交通运输发展“十三五”规划》。
60. 同上
61. 《武汉市国民经济和社会发展的第十三个五年规划纲要》、《武汉市交通运输发展“十三五”规划》、《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》、《武汉市城市总体规划（2016—2030年）》
62. 资料来源：磐之石环境与能源研究中心
63. 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》
64. 2017年中国民航环境与可持续发展论坛中赵凤彩相继提出
65. [https://biofuels-news.com/display\\_news/10116/norways\\_oslo\\_airport\\_begins\\_jet\\_biofuel\\_delivery\\_for\\_all\\_airlines/](https://biofuels-news.com/display_news/10116/norways_oslo_airport_begins_jet_biofuel_delivery_for_all_airlines/)
66. [https://avinor.no/globalassets/\\_konsern/om-oss/rapporter/en/avinor-rapport\\_uk\\_v1.pdf](https://avinor.no/globalassets/_konsern/om-oss/rapporter/en/avinor-rapport_uk_v1.pdf)
67. 刘疏桐，《航空新能源推动者波音如何看生物航油？》
68. 根据武汉市港航管理局统计，武汉市内河运输船舶有400余条，曾经仅有过2条LNG船，后由于运行不便、发展效果不好而被淘汰。
69. [http://www.hubei.gov.cn/govfile/ezf/201711/t20171109\\_1221268.shtml](http://www.hubei.gov.cn/govfile/ezf/201711/t20171109_1221268.shtml)
70. <http://www.chinapower.com.cn/informationzxbg/20160106/16229.html>
71. <http://www.360che.com/news/171117/86208.html>
72. 《中国气候变化目标进展分析》下载地址：<http://www.wri.org.cn/tracking-china-climate-actions>

## 致谢

在本报告的研究与编写过程中，能源和交通领域的众多专家、学者给予了大力支持并提供了宝贵建议，在此，我们向各位专家表示由衷的感谢。

同时，世界资源研究所的各位领导和同事也给予了大力支持和指导。在此特别向世界资源研究所（美国）北京代表处首席代表李来来、首席代表特别助理徐嘉忆以及其他各位同事表示诚挚的谢意。还要感谢实习生周舒玥、宋欣珂、梁迪隽、李慧、康珊珊和赵琦对研究提供的数据支持与帮助。

此外，本研究是在C40城市气候领导联盟的“核算与规划技术援助项目”下开展，在此向C40城市气候领导联盟北京代表处首席代表谢鹏飞、气候行动计划项目主任孙璐、气候行动计划高级项目经理汪明明等同事表示诚挚的谢意！

最后，我们要感谢英国儿童投资基金会（CIFF）对本研究提供的资金支持。

对本报告做出重要贡献的专家和同事名单如下：

### 指导委员会

<b>田雁</b>	武汉市发展和改革委员会
<b>马鹏程</b>	武汉市交通运输委员会
<b>项定先</b>	武汉市节能监察中心
<b>谢鹏飞</b>	C40城市气候领导联盟
<b>李来来</b>	世界资源研究所（美国）北京代表处

### 评审和咨询专家

<b>胡浩宇</b>	武汉市交通运输委员会
<b>李林清</b>	武汉市人民政府汽车产业发展办公室
<b>薛峰</b>	中国铁路武汉局集团有限公司
<b>李伟</b>	武汉市港航管理局
<b>卢腾飞</b>	武汉市节能监察中心
<b>朱宏伟</b>	武汉市交通科学研究所
<b>余世英</b>	武汉市交通发展战略研究院研究室
<b>黄宇</b>	武汉市环境科学研究院环境政策研究室
<b>陈卫斌</b>	中国质量认证中心武汉分中心
<b>赵光洁</b>	中国质量认证中心武汉分中心
<b>张继红</b>	武汉大学
<b>谭秀杰</b>	武汉大学
<b>龙妍</b>	华中科技大学
<b>郭亮</b>	武汉电动汽车示范运营有限公司
<b>苏田</b>	武汉电动汽车示范运营有限公司
<b>熊小平</b>	国家发改委能源研究所

<b>凤振华</b>	交通运输部交通科学研究所
<b>刘宇环</b>	北京交通发展研究院
<b>王克</b>	中国人民大学
<b>刘雪野</b>	C40城市气候领导联盟
<b>王志高</b>	能源基金会（美国）北京办事处
<b>林微微</b>	能源基金会（美国）北京办事处
<b>龚慧明</b>	能源基金会（美国）北京办事处
<b>辛焰</b>	能源基金会（美国）北京办事处
<b>康利平</b>	能源与交通创新中心
<b>Hyoungmi Kim</b>	自然资源保护协会（美国）北京代表处
<b>蒋慧</b>	世界资源研究所（美国）北京代表处
<b>李相宜</b>	世界资源研究所（美国）北京代表处
<b>宋苏</b>	世界资源研究所（美国）北京代表处
<b>温华</b>	世界资源研究所
<b>Emily Matthews</b>	世界资源研究所

### 项目组

C40城市气候领导联盟

<b>汪明明</b>
<b>孙璐</b>
<b>Max Jamieson</b>
<b>Michael Doust</b>

世界资源研究所（美国）北京代表处

<b>房伟权</b>
<b>蒋小谦</b>
<b>徐嘉忆</b>
<b>奚文怡</b>
<b>宋婧</b>

## 作者介绍

**蒋小谦**是世界资源研究所（美国）北京代表处研究员。电子邮件：[xqjiang@wri.org](mailto:xqjiang@wri.org)

**奚文怡**是世界资源研究所（美国）北京代表处研究分析员。电子邮件：[wenyi.Xi@wri.org](mailto:wenyi.Xi@wri.org)

**房伟权**是世界资源研究所（美国）北京代表处副首席代表，高级研究员。电子邮件：[wkfong@wri.org](mailto:wkfong@wri.org)

**宋佳茵**是落基山研究所（美国）北京代表处高级咨询师。电子邮件：[jsong@rmi.org](mailto:jsong@rmi.org)

**王喆**是落基山研究所（美国）北京代表处高级咨询师。电子邮件：[zwang@rmi.org](mailto:zwang@rmi.org)

## 图片说明

Cover \*\*\*\*\*; pg. i Flickr/chachawei; pg. iv Flickr/vladpl; pg. 6 Flickr/kehao0627; pg. 12 Flickr/onion83; pg. 14 \*\*\*\*\*; pg. 17 Flickr/andresfib; pg. 18 Flickr/kehao0627; pg. 24 Wuhan Yearbook (2017 volume)/Zhangbin; pg. 30 \*\*\*\*\*; pg. 53 Flickr/time-to-look; pg. 54 \*\*\*\*\*; pg. 58 Flickr/neil\_gr.

## 出资方



# C40核算与规划技术援助项目

受英国儿童投资基金会（CIFF）资助，C40城市气候领导联盟在全球多个城市开展“核算与规划技术援助项目”。项目包括两项内容，一是按照全球通用的《城市温室气体核算国际标准》（Global Protocol for Community-Scale GHG Emission Inventories，简称GPC）的要求编制城市温室气体清单，二是设定减排目标并制定减排路径和行动方案。受C40委托，世界资源研究所负责在C40中国成员城市开展项目实施。

## 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。

## C40城市气候领导联盟

C40是一家国际间城市合作组织，其工作致力于应对气候变化、推动城市低碳发展、提高居民健康和幸福指数。

### 集结全球政治力量，共同应对气候变化

2005年，C40在时任伦敦市长利文斯通、美国前总统克林顿等政要的倡议下成立。C40的历届主席由成员城市市长竞选出任，目前的主席和副主席分别由巴黎市长安娜·伊达尔戈女士和伦敦市长萨迪克·汗先生担任。董事会主席由联合国气候变化问题特使、纽约前市长、彭博基金会主席迈克尔·布隆伯格先生担任。

### 连接全球大型城市，搭建交流共享平台

目前C40在全球共有94个成员城市，涵盖了欧、亚、北美、拉美、大洋、非洲六大区域的主要世界级大城市，覆盖近七亿人口，占全球经济总量的四分之一。中国目前已有13座城市加入，通过C40网络与世界上最先进的城市交换最佳实践经验、开拓合作机会。

### 提高城市能力建设，协助领跑气候行动

依托全球城市网络，C40拥有成熟、专业、全方位促进城市气候变化的服务体系。通过17主题行动网络，C40为成员城市提供点对点的学习和知识共享平台，以及科研、技术、人才、融资等方面的专项服务和支持，帮助成员城市规划和实施更雄心勃勃的气候行动和项目。

### 城市品牌国际推广，提高城市影响力

通过组织国内外会议、论坛、研讨会、评奖活动等，C40帮助城市走向国际。同时通过科学研究和影响评估，倡导宣传城市在全球气候治理中扮演的重要角色，为城市争取更多的发言权和吸引力。

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。



C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP  
3 QUEEN VICTORIA STREET  
LONDON EC4N 4TQ  
UNITED KINGDOM  
[WWW.RESOURCECENTRE.C40.ORG](http://WWW.RESOURCECENTRE.C40.ORG)  
[PLANNING@C40.ORG](mailto:PLANNING@C40.ORG)



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](http://WWW.WRI.ORG.CN)