

The background of the cover is a blurred, high-speed photograph of a multi-lane highway with many cars, viewed from an elevated perspective. In the background, several modern glass skyscrapers are visible against a clear blue sky. A semi-transparent dark grey rectangular box is overlaid on the center of the image, containing the title text.

粤港澳大湾区交通净零碳排放 路线图研究报告

Guangdong-Hong Kong-Macao
Greater Bay Area Zero-Emission
Transportation Roadmap

2023年10月

广东省及粤港澳大湾区交通净零碳排放路线图研究项目

粤港澳大湾区(Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area) 是世界第四大湾区，是国家建设世界级城市群和参与全球竞争的重要空间载体。广东省为中国新能源汽车发展较为领先区域，尤其是珠三角城市群在交通净零碳排放进程中应起到带头作用。

本项目是在能源基金会的支持下由能源与交通创新中心发起，联合多家伙伴共同合作。项目聚焦广东省及粤港澳大湾区交通领域，以 2050/2060 为时间节点，制定净零碳排放路线图及政策建议，通过设定更积极的目标、开展试点示范项目以及制定可实施的路线图和行动计划，引领中国实现碳中和及净零碳排放目标。本项目覆盖道路与非道路交通领域，共分两期研究工作。一期研究聚焦道路交通领域，能源与交通创新中心联合中国科学院广州能源研究所、广东旭诚科技有限公司等专家团队共同开展研究。二期研究聚焦大湾区全口径交通领域，由能源与交通创新中心联合香港思匯政策研究所（Civic Exchange）等专家团队共同开展研究。

系列研究报告：

- 《广东省道路交通净零排放路线图》
- 《广东省道路交通长期能源与排放分析模型》
- 《广东省乘用车与商用车净零排放路线图研究》
- 《广东省清洁电能与新能源汽车融合发展路线研究》
- 《粤港澳大湾区交通净零碳排放路线图研究报告》
- 《香港交通净零碳排放路线图研究报告》

合作及交流事宜，可邮箱联系：info@icet.org.cn



能源与交通创新中心 ICET

能源与交通创新中心（ICET）是 2006 年在北京注册，在清洁交通、低碳经济和气候变化领域中具有领导力的非营利专业智库机构。核心使命是为各级决策者提供能够缓解能源和气候危机并创造绿色能源生态体系所亟需的创新型解决方案。在清洁交通领域，致力于加速中国交通向后石油时代与零排放转型。请登录网站了解更多详情 www.icet.org.cn



思匯
CIVIC EXCHANGE 思匯政策研究所

思匯政策研究所是成立于 2000 年的香港独立公共政策智库，致力于利用深入的研究和对话，为政策提供实证研究，并让持份者参与其中，以应对香港的环境和发展挑战。研究范围包括四个范畴：环境、经济、福祉指标及管治。自 2011 年起，思匯被宾夕法尼亚大学劳德研究所评为全球 50 大环保智库之一。

粤港澳大湾区交通净零碳排放路线图研究报告

Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Zero-Emission Transportation Roadmap

项目负责人： 安 锋 王雯雯

报告汇编： 秦兰芝 张梦媛 王雯雯

课题研究团队：

能源与交通创新中心 秦兰芝 安 锋 王雯雯 张梦媛

香港思匯政策研究所 曾詠 曾沛頤 姚俊業

致谢

感谢能源基金会为本项目提供资金支持。

感谢思匯政策研究所曾詠女士、姚俊業先生在香港交通零排放研究部分所做的深度研究和分析，并组织在港的深度调研和讨论会，为本研究提供了丰富的数据资料和实地调研数据。

由衷感谢以下专家（按姓氏字母排序）对报告内容提出的宝贵意见与建议。

成慧慧	亚洲清洁空气中心	刘胜强	交通运输部规划研究院
倪 红	环境科学研究院机动车排污监控中心	彭传圣	交通运输部水运科学研究院
唐云鹭	深圳市标准技术研究院	吴 焯	清华大学
邢子恒	国泰航空	于丹阳	交通运输部科学研究院
周新军	中国铁道科学研究院		

免责声明

若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。

目录

执行摘要.....	1
第一章 粤港澳大湾区交通发展概况.....	14
1.1 粤港澳大湾区整体概况.....	14
1.2 粤港澳大湾区交通概况.....	15
第二章 研究方法.....	24
2.1 研究范围.....	24
2.2 核算方法.....	26
2.3 情景设置.....	27
第三章 情景分析.....	29
3.1 减排路径.....	29
3.2 主要影响因素.....	35
3.3 粤港澳大湾区交通能耗与碳排放趋势.....	46
第四章 总结与政策建议.....	56
4.1 研究总结.....	56
4.2 政策建议.....	58
附录 1 “十四五”时期国家和大湾区出台的交通减排政策及目标（部分）.....	67
附录 2 主要参数设置.....	69
参考资料.....	84

图目录

图 1 粤港澳大湾区历年 GDP 及占全国比重情况.....	14
图 2 粤港澳大湾区各城市发展定位及优势产业概况.....	15
图 3 珠三角客、货运周转量趋势.....	16
图 4 粤港澳大湾区公路通车里程情况.....	17
图 5 粤港澳大湾区汽车保有量情况.....	18
图 6 粤港澳大湾区私人客车在客车总量中的比重变化.....	18
图 7 我国三大城市群铁路营业里程情况（2022）.....	19
图 8 粤港澳大湾区港口群定位及特点.....	20
图 9 珠三角九市水路客、货运周转量情况.....	21
图 10 香港和澳门历年港口货物运输量情况.....	22
图 11 粤港澳大湾区主要机场航班起降架次情况.....	22
图 12 粤港澳大湾区交通净零碳排放分析总体技术路线.....	24
图 13 道路运输的主要减排技术.....	29
图 14 粤港澳大湾区城市新能源汽车渗透率（2022）.....	30
图 15 铁路运输主要减排措施.....	32
图 16 我国铁路运输单位能耗发展趋势.....	32
图 17 水路运输主要减排措施.....	34
图 18 航空运输主要减排措施.....	35
图 19 广东省人均客运周转量与人均 GDP 趋势.....	36
图 20 粤港澳大湾区总人口变化趋势.....	37
图 21 粤港澳大湾区城市产业结构组成（2021）.....	37
图 22 广东省和珠三角人均货运量趋势.....	38
图 23 全球主要汽车市场汽车总保有量与千人保有量情况.....	39
图 24 粤港澳大湾区三地汽车千人保有量变化趋势.....	39
图 25 珠三角各类运输方式客、货运占比.....	41
图 26 我国乘用车车队平均燃料消耗量趋势与目标.....	42
图 27 中国民航吨公里油耗趋势.....	42
图 28 水运燃料结构组成（2050 净零碳排放情景）.....	45
图 29 粤港澳大湾区全口径交通碳排放趋势.....	47
图 30 粤港澳大湾区各类交通方式碳排放占比（2050 净零碳排放情景）.....	48

图 31 2050 净零碳排放情景下粤港澳大湾区不同交通方式能源消耗量趋势	48
图 32 粤港澳大湾区道路交通碳排放趋势	49
图 33 珠三角、香港和澳门三地道路交通碳排放趋势（基准情景）	51
图 34 不同情景下大湾区（珠三角）铁路碳排放趋势	51
图 35 粤港澳大湾区水路运输碳排放趋势	52
图 36 粤港澳大湾区民航运输碳排放趋势	53
图 37 粤港澳大湾区可持续航空燃料消耗量趋势	54
图 38 降低大湾区交通碳排放政策建议框架	58
图 39 道路交通持续减排政策建议	59
图 40 推动大湾区水运减排政策建议	62
图 41 降低大湾区民航碳排放政策建议	63
图 42 大湾区交通运输结构调整政策建议	65

表目录

表 1 粤港澳大湾区主要航空公司概况.....	23
表 2 不同交通运输方式及交通工具的核算范围界定.....	25
表 3 交通领域主要替代能源及其减排途径.....	26
表 4 各类交通方式的排放清单核算方法.....	26
表 5 本研究中主要数据来源汇总.....	27
表 6 不同措施的减排潜力细化分析.....	55
表 7 2050 净零碳排放情景下大湾区主要交通发展指标.....	56

缩略词

缩写词	释义
CCUS	Carbon Capture, Usage and Storage, 碳捕捉、利用和封存
CII	Carbon Intensity Indicator, 碳排放强度指数
CLP	China Light and Power Company, Limited, 香港中华电力有限公司
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, 国际民航碳抵消和减少计划
EASA	European Union Aviation Safety Agency, 欧盟航空安全局
EEXI	Energy Efficiency eXisting ship Index, 现有船舶能效指数
EPD	Environmental Protection Department, 特指香港环境保护署
GDP	Gross Domestic Product, 国内生产总值
HFCs	Hydrofluorocarbons, 氢氟碳化合物
IATA	International Air Transport Association, 国际航空运输协会
ICAO	International Civil Aviation Organization, 国际民用航空组织
IEA	International Energy Agency, 国际能源署
IMO	International Maritime Organization, 国际海事组织
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, 政府间气候变化专门委员会
ISCC	International Sustainability and Carbon Certification, 国际可持续发展和碳认证
LCFS	Low Carbon Fuel Standard, 美国加州低碳燃料标准
LNG	Liquefied natural gas, 液化天然气
LPG	Liquefied petroleum gas, 液化石油气
MEPC	Marine Environment Protection Committee, 海洋环境保护委员会
NEDC	New European Driving Cycle, 新欧洲驾驶循环
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration, 美国国家海洋和大气管理局
RFS	Renewable Fuel Standard, 美国可再生燃料标准
RSB	Roundtable on Sustainable Biomaterials, 可持续生物材料圆桌会议
SAF	Sustainable Aviation Fuel, 可持续航空燃料

执行摘要

研究背景

以二氧化碳（CO₂）为主的温室气体是造成全球气候变化的主要元凶。尽管全球各国纷纷提出越来越严苛的减排目标，碳减排仍然是一项异常艰巨的任务。美国国家海洋和大气管理局（NOAA）网站显示，2022年全球地表CO₂平均浓度上升了2.13 ppm，与过去十年观测到的速率大致相同，大气中的CO₂比工业化前的水平高出50%^①。国际能源署（IEA）的数据显示，2022年全球与能源相关的碳排放量同比增长了0.9%，达到368亿吨以上的新高^②。

交通部门对全球温室气体排放的贡献接近四分之一^③，2022年交通碳排放同比增长2.1%，增幅高于电力和供热以及工业这两大部门^④。在全球约45%的国家中，交通已经成为能源相关领域的首要排放源，在余下的其他国家中也已成为第二大排放源^⑤。即使现有和承诺的政策全部兑现，到2050年全球交通碳排放会增加20%，更激进的政策也难以使交通部门完全实现零排放^⑥。要实现《巴黎协定》中将全球平均温升控制在2°C以内并争取控制在1.5°C以内的目标，交通部门的减排至关重要。

粤港澳大湾区（以下简称“大湾区”）是世界第四大湾区，自2017年《深化粤港澳合作 推进大湾区建设框架协议》签署以来，大湾区统筹发展驶入快车道。大湾区是重要的交通枢纽，拥有国际领先的港口集群和机场集群。作为高度开放和自由的市场，大湾区也为推动交通可持续发展做出了积极有益的尝试。特别是位于大湾区核心位置的深圳市，在新能源汽车的推广应用方面全球领先，率先实现了公交、出租等多个场景的全面电动化。香港承诺力争在2050年前实现碳中和，并提出在2035年或之前年份停止燃油私家车的新登记。佛山是重要的氢能产业基地，以其为核心的广东省燃料电池汽车示范城市群建设将为氢燃料电池的应用积累宝贵经验。为巩固和提升香港作为国际航运中心的地位，香港特区政府也在积极探索航运减排措施。

然而，大湾区城市间发展差异巨大，一个区域、三种制度是大湾区在协同管理和政策落实方面的最大障碍。交通作为大湾区一体化协同发展的基础，推动交通减排和实现交通净零碳排放是大湾区可持续发展的重要任务。本研究将以数据分析为基础，结合港珠澳三地实际，提出大湾区交通净零碳排放路径和政策建议。

^① NOAA, <https://www.noaa.gov/news-release/greenhouse-gases-continued-to-increase-rapidly-in-2022>

^② IEA, CO₂ emissions in 2022.

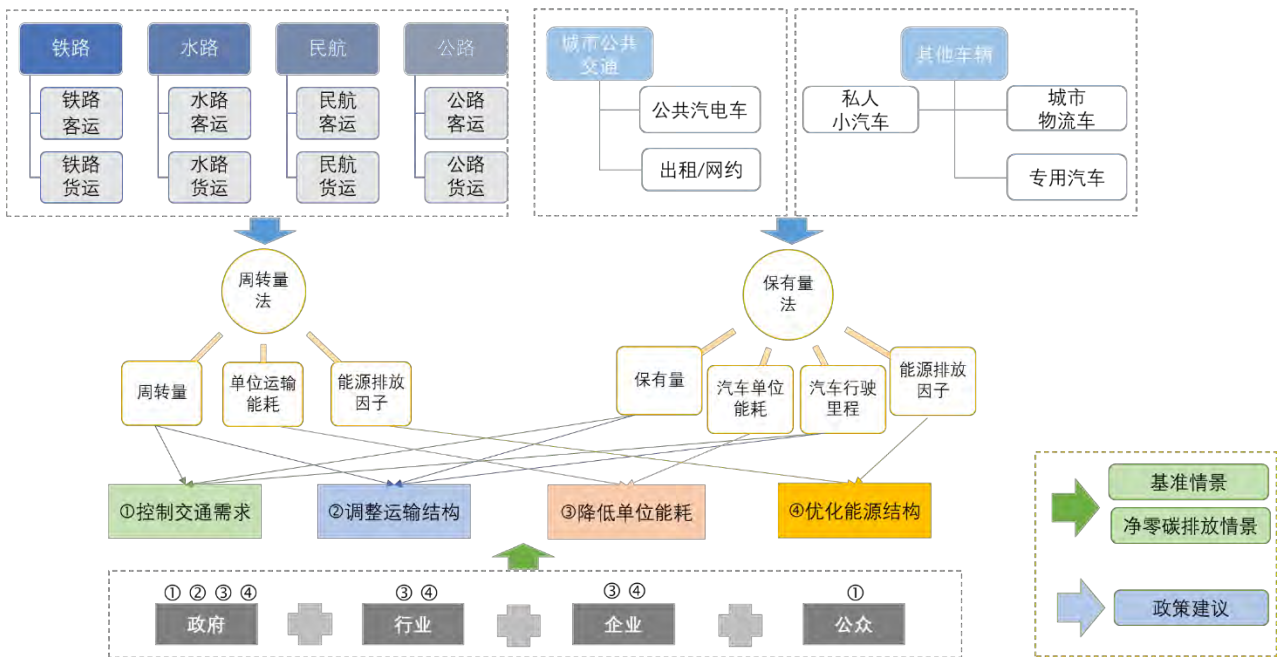
^③ UN, https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/media_gstc/FACT_SHEET_Climate_Change.pdf

^④ WEF, <https://www.weforum.org/agenda/2021/11/global-transport-carbon-emissions-decarbonise>

研究方法

本项目以粤港澳大湾区 11 个城市为研究对象，基于“自下而上”的方法构建了道路、铁路、水路和民航四种交通运输方式的能源消耗与碳排放核算模型，通过设置不同情景对大湾区交通减排路径进行分析，并识别不同措施的减排潜力，据此对大湾区中长期交通减排提出政策建议。

四种交通运输方式的碳排放计算方法如摘要-图 1 所示。本研究所指“交通”涵盖公路、铁路、水路、民航、城市公共交通（含城市客车、出租车和网约车，不含地铁等轨道交通）以及非营运交通。非营运交通主要包括私人乘用车、城市物流车辆、环卫车以及其他社会车辆。民航只包含商业航空，不含通用航空。其中，公路客货运、城市公共交通和非营运交通实际上都属于道路交通范畴，在研究中将其拆分是为了更细致地分析各自的排放特征。城市公共交通和其他车辆主要活动区域在所研究地区的地理边界内，属于“内部交通”，公路、铁路、水路和民航相关活动量的统计则往往跨越了所研究地区的地理边界，属于“对外交通”。内部交通的排放及减排贡献可以认为完全是在研究地区的地理边界内发生，而对外交通的排放和减排贡献则仅有部分发生在地理边界之内，二者不具备可比性。



注：珠三角地区四种交通运输方式的排放完全基于图中方法进行；香港和澳门地区没有运输周转量统计，故道路车辆碳排放均采用“保有量法”计算；摩托车是澳门地区最主要的出行方式之一，考虑到当地特征，将摩托车排放纳入澳门的道路交通排放范围，对珠三角和香港两地，摩托车的排放占比很小，本研究中忽略不计。

摘要-图 1 粤港澳大湾区交通净零碳排放分析总体技术路线

根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》，交通运输排放来自于移动源，即所有交通工具产生的排放。交通运输过程涉及到的固定源，如港口、机场、车站等产生的排放，并不归入交通排放总量。由于交通运输

产生的温室气体排放中，CO₂ 占比超过 99%，如无特别说明，本研究中交通排放仅指 CO₂ 排放（也称“碳排放”）。

交通工具产生的碳排放包括范围一、范围二和范围三排放。范围一排放包括大湾区城市边界内交通化石燃料燃烧产生的排放；范围二排放包括大湾区城市相关交通活动消耗电力产生的排放，未来这一排放的比重会越来越高；范围三排放的范围较广，在本研究中仅涵盖大湾区城市相关跨边界交通活动引起的排放，如大湾区内出发或到达的铁路、飞机、轮船等所产生的排放。在结果分析中，如无特殊说明，碳排放实际上为交通工具在使用环节产生的直接碳排放。对于非道路交通，目前技术条件下的碳减排主要依靠使用生命周期碳排放强度更低的绿色燃料实现，因而在研究中也会讨论非道路交通所使用燃料在其生命周期内的碳排放（研究中称之为“燃料周期碳排放”）。

情景设置

为评估现有政策对交通减排的影响，分析大湾区交通部门中长期减排潜力，研究设置如下三种情景，其中，珠三角地区包含全部三种情景，香港和澳门特区政府提出的碳中和时间节点在 2050 年前后，故仅包含基准情景和 2050 净零碳排放情景。

(1) 基准情景：仅考虑已出台的政策目标；

(2) 2060 净零碳排放情景：仅适用于珠三角城市，对应中国内地“力争 2060 年前实现碳中和”的目标；

(3) 2050 净零碳排放情景：以 2050 年实现粤港澳大湾区交通净零碳排放为目标，其中，香港已经明确表示力争于 2050 年前实现碳中和，澳门交通排放体量小并以陆路交通为主，相关研究认为到 2050 年左右澳门本地直接碳排放将实现中和。珠三角地区在中国内地的经济和社会发展程度均十分靠前，依托大湾区，在市场创新和政策落实方面具有较强优势，有基础提前实现交通碳中和。

摘要-表 1 列出了 2050 净零碳排放情景下大湾区交通相关的主要指标发展情况。对于每个指标内容，括号内的数据代表基准情景下的指标情况，以便与 2050 净零碳排放情景进行直观对比。

摘要-表 1 2050 净零碳排放情景及基准情景下大湾区主要交通相关指标情况

		2025	2030	2035	2040	2045	2050	性质
新能源私家车保有量占比 (%)	珠三角	14 (11)	43 (26)	74 (41)	92 (52)	99 (62)	100 (71)	目标性
	香港	16 (16)	28 (28)	30 (30)	40 (40)	80 (80)	100 (100)	目标性
	澳门	13 (3)	30 (4)	48 (5)	65 (6)	83 (8)	100 (10)	目标性
公路营运新能源车保有量占比 (%)	珠三角-客运	19 (15)	36 (26)	66 (42)	87 (50)	98 (51)	100 (52)	目标性
	珠三角-货运	9 (5)	33 (14)	60 (18)	82 (20)	96 (20)	98 (20)	目标性
公路货运周转量比重 (%)	珠三角	13.0 (13.0)	12.0 (13.0)	10.5 (13.0)	9.0 (13.0)	8.5 (13.0)	8.0 (13.0)	预期性
铁路客运周转量比重 (%)	珠三角	14.0 (13.0)	18.0 (13.0)	19.5 (13.0)	21.0 (13.0)	22.0 (13.0)	23.0 (13.0)	预期性
铁路电气化比例 (%)	客运	65 (65)	70 (65)	74 (65)	78 (65)	83 (65)	88 (65)	目标性
	货运	75 (75)	80 (75)	82 (75)	84 (75)	87 (75)	90 (75)	目标性
船用清洁燃料占比 (%)	珠三角	1.3 (0.4)	8.8 (1.1)	23.6 (3.8)	40.4 (7.1)	62.2 (10.8)	93 (14.6)	预期性
	香港		0 (0)		10 (0)	60 (0)	100 (0)	预期性
可持续航空燃料 (SAF) 使用量 (万吨)	大湾区	3 (3)	55 (15)	182 (39)	428 (66)	609 (96)	742 (127)	预期性

注：括号内数据对应基准情景下的数值；船用清洁燃料是指除传统燃料油外的其他清洁燃料，研究中包括电力、LNG、甲醇和氢能；SAF 使用量计算时仅考虑大湾区主要航空公司在国内航班的部分，不含澳门航空。

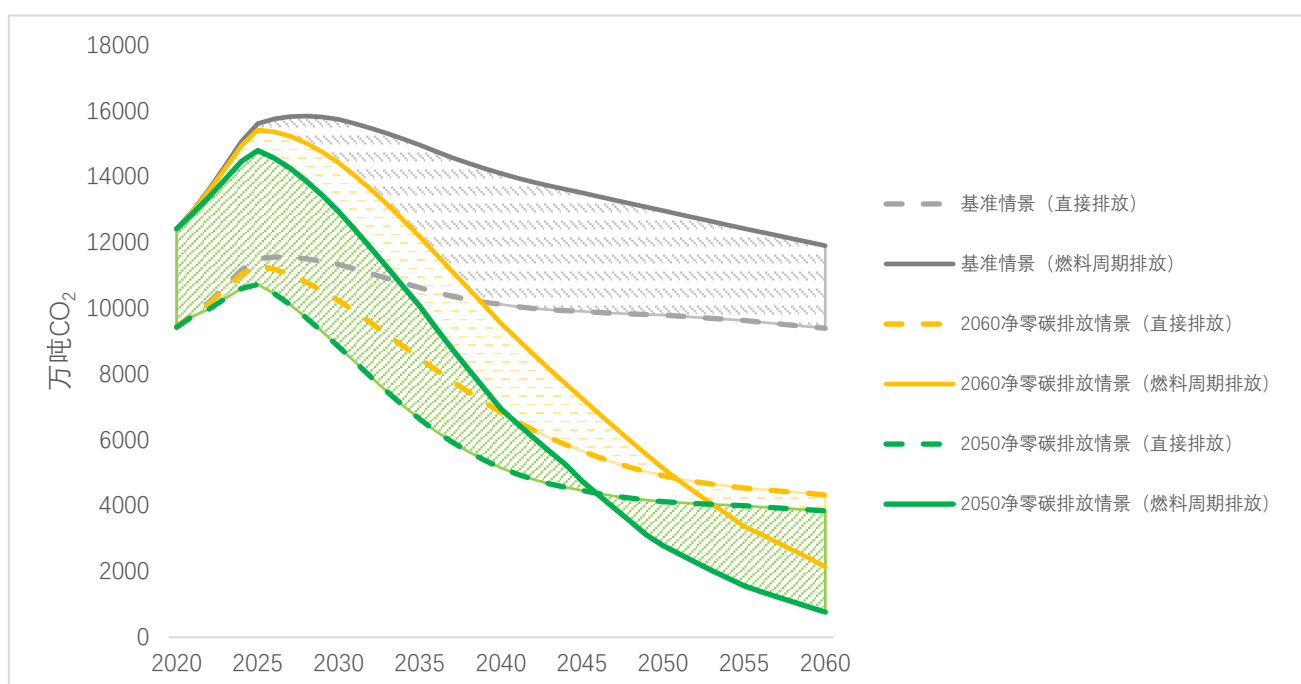
主要研究发现与结果

全口径交通碳排放

粤港澳大湾区交通碳排放将不晚于 2027 年达峰，但达峰后排放总量的下降仍需多种减排措施助力。若不施加更加严格的政策手段和目标，大湾区全口径交通碳排放将在 2027 年左右达到峰值，峰值排放量接近 1.1 亿吨，2060 年碳排放量较峰值水平仅下降 20%。换言之，现有政策难以推动达峰后交通碳排放量的持续快速下降。在 2050 净零碳排放情景下，通过车辆电动化、提升交通工具能效、交通能源转型等手段，大湾区全

口径交通碳排放约在 2025 年实现达峰，其中，道路交通碳排放已经进入下降通道，至 2050 年基本实现零碳排放，届时全口径交通碳排放较峰值下降 60%。

若考虑交通燃料上游排放（即“燃料周期碳排放”），粤港澳大湾区全口径交通燃料周期碳排放不迟于 2028 年达峰，峰值碳排放量接近 1.6 亿吨。在 2060 及 2050 净零碳排放情景下，燃料上游碳排放量分别从 2051 年和 2046 年转为负值，表明从这一时期开始，低碳燃料上游的固碳量已经完全抵消了交通燃料生产所产生的碳排放，并可对直接碳排放进行逐步抵消。在 2050 净零碳排放情景下，至 2050 年大湾区全口径交通燃料周期碳排放较其峰值可下降 80%以上。

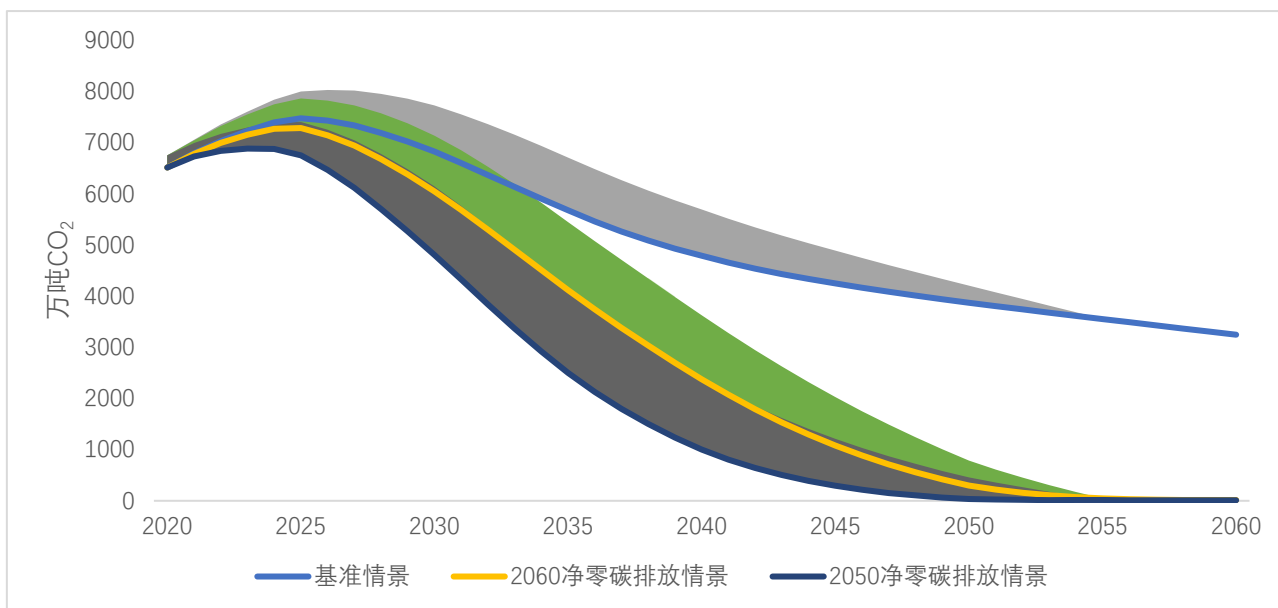


注：阴影部分表示交通燃料上游排放，澳门地区仅包括道路交通排放。

摘要-图 2 粤港澳大湾区全口径交通碳排放趋势

道路交通碳排放

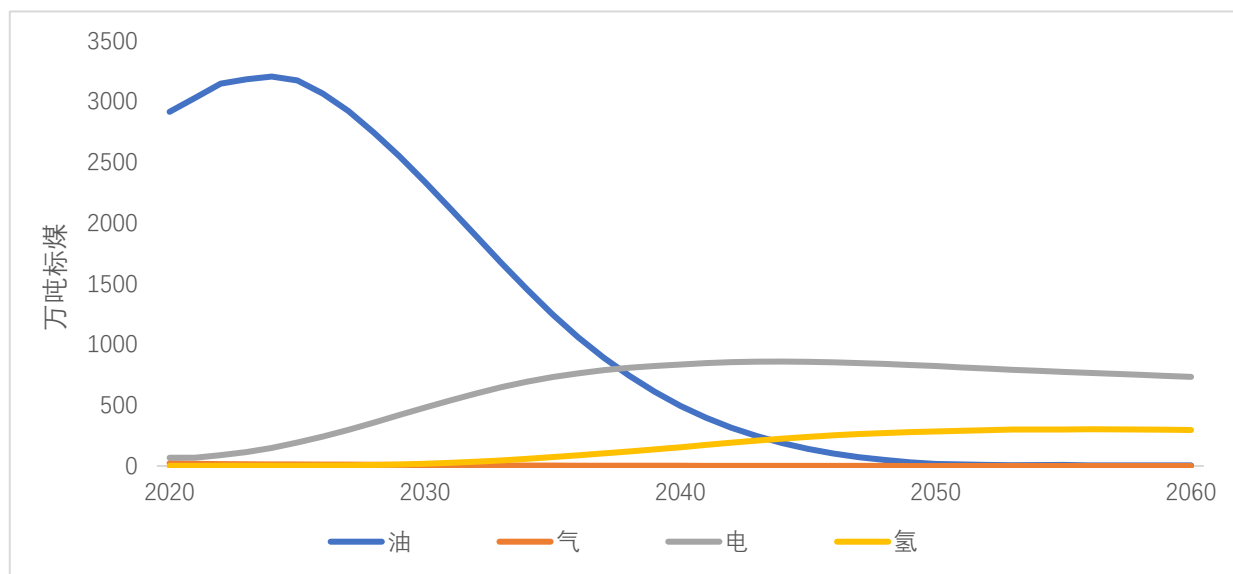
道路交通是现有政策框架内唯一可实现快速减排的领域。作为最主要的交通排放源，2020 年大湾区道路交通碳排放量在全口径交通总排放量的占比接近 70%。在基准情景下，大湾区道路交通碳排放量约在 2025 年前后达峰，峰值碳排放量较 2022 年增加 6%左右，约为 6800 万吨。从排放趋势来看，现有政策可推动大湾区道路交通碳排在达峰后持续下降。若在近期加快零排放汽车的推广，同时对传统车辆进行节能减排管理，大湾区道路交通碳排放量几乎不再上升，即已经进入平台期（2050 净零碳排放情景），后期则快速下降直至达到零碳排放。



注：曲线上方阴影指相应情景下来自所使用电力发电端的 CO₂ 排放量。

摘要-图 3 粤港澳大湾区道路交通碳排放趋势

如摘要-图 4 所示，道路交通对油类的综合消耗量最大，不过从 2024 年起油类消耗量由峰值水平开始下降，在 2039 年前后电力消耗量超过油类，成为道路交通最主要的能源类型。至 2050 年，电力在道路交通能耗中的占比达到 72%，届时氢能占比为 27%。



注：油包含汽油、柴油；气包括 LNG 和 LPG。

摘要-图 4 粤港澳大湾区道路交通能源消耗量趋势（2050 净零碳排放情景）

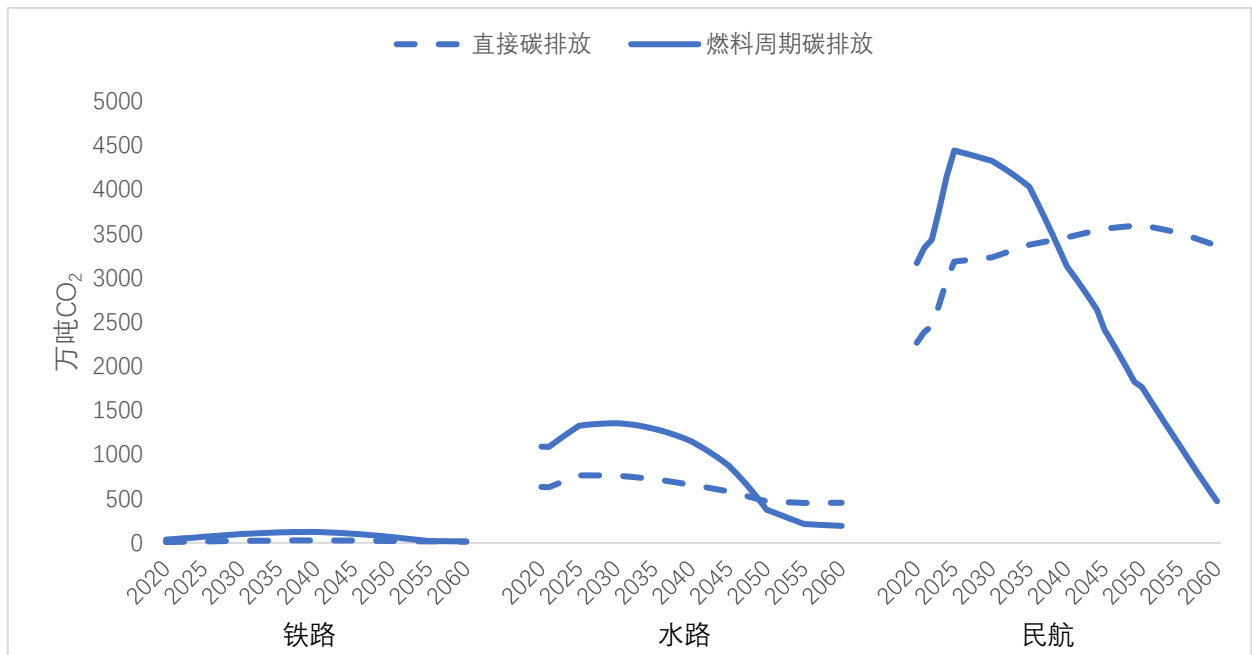
非道路交通碳排放

摘要-图 5 展示了非道路交通方式的碳排放量情况，由于非道路交通主要采用低碳或零碳燃料进行减排，直接碳排放量难以达到净零，需基于燃料生命周期评估。在 2050 净零碳排放情景下，非道路交通直接碳排放量仍将在 2040 年后才能达峰。若考虑燃料上游碳排放，非道路交通燃料周期碳排放将在 2025 年前后达峰，至 2050 年非道路交通燃料周期碳排放较峰值水平下降 60%以上。

铁路客运周转量在总的客运周转量中占比为 13%（仅珠三角），铁路货运周转量占比仅为 0.4%（仅珠三角），加之铁路单位周转量能耗较低，且铁路减排主要通过电力牵引实现，在 2050 净零碳排放情景下，至 2050 年铁路直接碳排放量仅为 20 万吨。

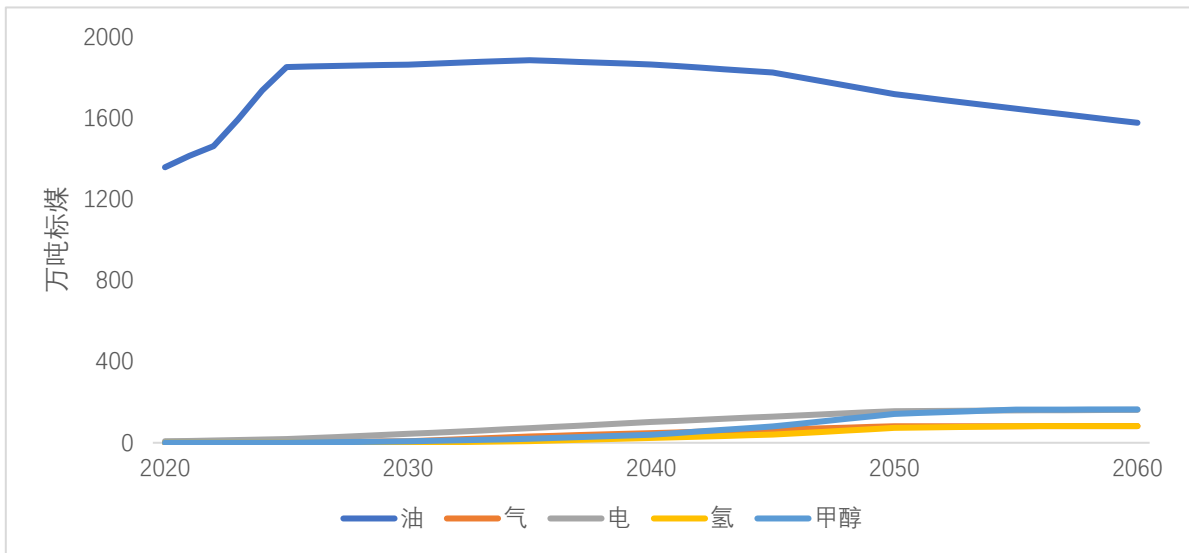
大湾区水路运输碳排放量在基准情景下一直保持缓慢上升趋势，2050 年水路碳排放量约为 925 万吨，占交通碳排放的比重为 10%。在净零碳排放情景下，由于对单位周转量能耗设定了更严格的目标，且认为船用燃料将由目前较为单一的燃料油向电力、LNG、甲醇、氢能等清洁能源多向发展，水路运输碳排放量较基准情景有比较明显的下降，整体碳排放有望在“十五五”期间达峰。然而即便在 2050 净零碳排放情景下，到世纪中叶大湾区水路运输的直接碳排放量依然可观。从燃料周期评估，上述清洁能源上游的固碳量在 2050 年以后才能抵消船用燃料生产过程产生的碳排放。这对船用燃料的生产提出了更高要求，应不断改进技术工艺，以降低燃料的生命周期碳排放强度，助力水路运输减排。

大湾区民航运输碳排放在基准情景下将会显著增长，至 2050 年将超过 5000 万吨，较 2020 年至少翻一倍。在 2050 净零碳排放情景下，一方面民航运输单位周转量能耗下降幅度更高，另一方面预测部分民航客运流量转向高铁运输，因而整体碳排放量增长放缓，但仍需要到世纪中叶前后才能实现直接碳排放达峰。SAF 作为民航碳减排的主要手段，虽然对直接碳排放的降低有限，但 SAF 在生产过程中可以吸收二氧化碳，因此若从 SAF 的生命周期考虑，大湾区民航燃料周期碳排放将在 2025 年左右达峰，至 2050 年民航燃料周期碳排放较 2025 年下降约 60%。



摘要-图 5 大湾区非道路交通碳排放趋势 (2050 净零碳排放情景)

能源消耗两方面，非道路交通对油类的总体消耗量远远高于其他能源类型，即便在 2050 净零碳排放情景下，油类消耗量也需要在 2035 年左右才能达峰。除铁路外，水运和民航对电力的利用程度有限，电力在非道路交通能耗中的占比较低，至 2050 年仅为 7%左右，届时氢能占比约为 3%，甲醇消耗量占比与电力相当。



注：油包含汽油、柴油、船用燃料油、传统航煤和 SAF；气包括 LNG 和 LPG，甲醇指使用在船舶上的燃料甲醇。

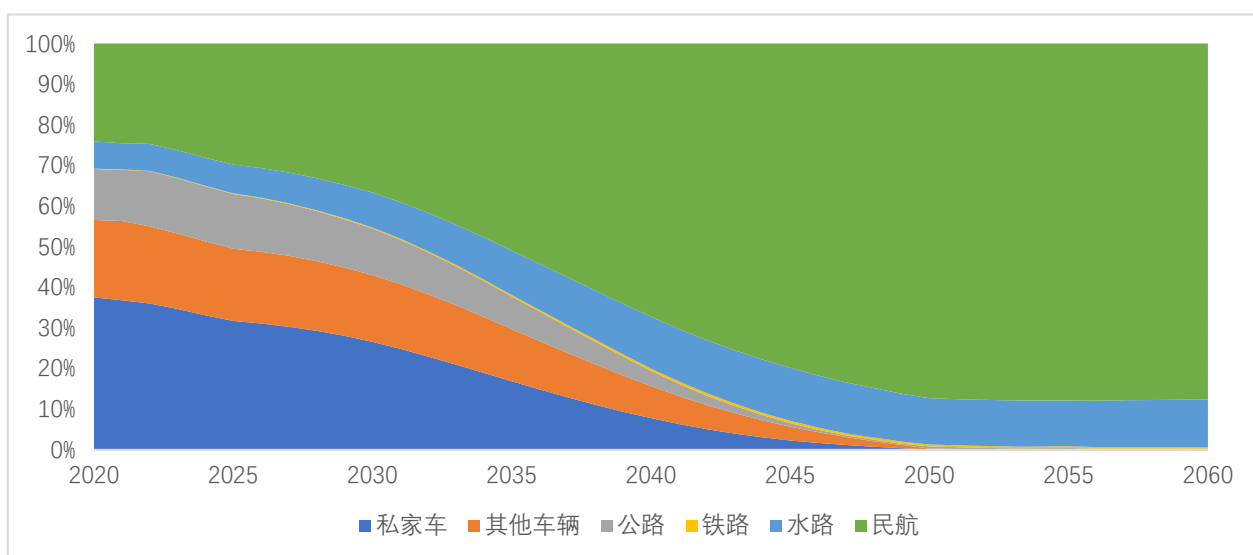
摘要-图 6 粤港澳大湾区非道路交通能源消耗量趋势 (2050 净零碳排放情景)

不同交通方式对碳排放的贡献

私家车是大湾区最大的交通碳排放源，2020 年对交通碳排放贡献率接近 40%。令人欣慰的是，随着电动汽车市场愈发成熟，私家车正加速向电动化转型，私家车碳排放量不断下降。其他道路车辆（含公路客、货运车辆）目前贡献了 32% 的碳排放量，这部分碳排放主要来自于中重型货车和环卫、渣土等专用车。

大湾区铁路运量占比不高，且由于铁路电气化程度不断提升，故在交通碳排放中的占比很低。

基于现有技术路径，净零碳排放情景可使道路车辆和铁路在对应时间节点接近零碳排放，但水路和民航运输的自身属性决定了其使用燃料的多元性，难以通过使用终端零排放的电力等清洁燃料实现净零碳排放。现阶段水路和民航碳排在总排放量中的占比分别约为 7% 和 25%。在 2050 净零碳排放情景下，民航和水运成为 2040 年后最主要的交通排放源。



注：图中排放数据是指直接碳排放

摘要-图 7 粤港澳大湾区各类交通方式碳排放占比（2050 净零碳排放情景）

不同措施的减排潜力

摘要-表 2 列出了不同措施在不同时间段内的减排潜力（指基准情景与 2050 净零碳排放情景下的排放差值）。表中柱状示意图展示了各类措施在每五年内的累计减排量，以识别各类措施在哪个时间段内具有最高的减排潜力，最高减排量在柱状图中以红色突出。

将基准情景作为排放量基准，2020~2060 年非营运车辆电动化可累计减排 5.8 亿吨 CO₂，占总减排量的 36%，公路营运车辆电动化贡献了 16% 的减排量。能效提升和运输结构调整分别贡献了 20% 和 19% 的减排量，能源结构优化（非道路）和控制私家车保有量对大湾区交通减排量的贡献分别占 5% 和 4%。

需要指出的是，控制私家车保有量和非营运车辆电动化这两种措施产生的减排量主要发生在研究区域之

内，即大湾区城市地理边界之内，而其他几类措施的主要施加对象是对外的城际交通，仅有部分排放量发生在大湾区地理边界内，二者不具备可比性。

从分时段减排潜力来看，与道路交通相关的减排措施在前期产生的减排量更高，这是因为多种车型在现有政策框架下已经有明确的零排放转型目标。控制私家车保有量这一措施的减排潜力在 2026-2030 年间便已经达到最高值，非营运车辆电动化的减排潜力在 2041-2045 年间发挥到最大，营运车辆电动化的最大减排量出现在 2046-2050 年间，这是因为营运车辆的电动化转型时间相对更加滞后。其他减排措施的每五年累计减排量则依据时间序列呈现递增状态。

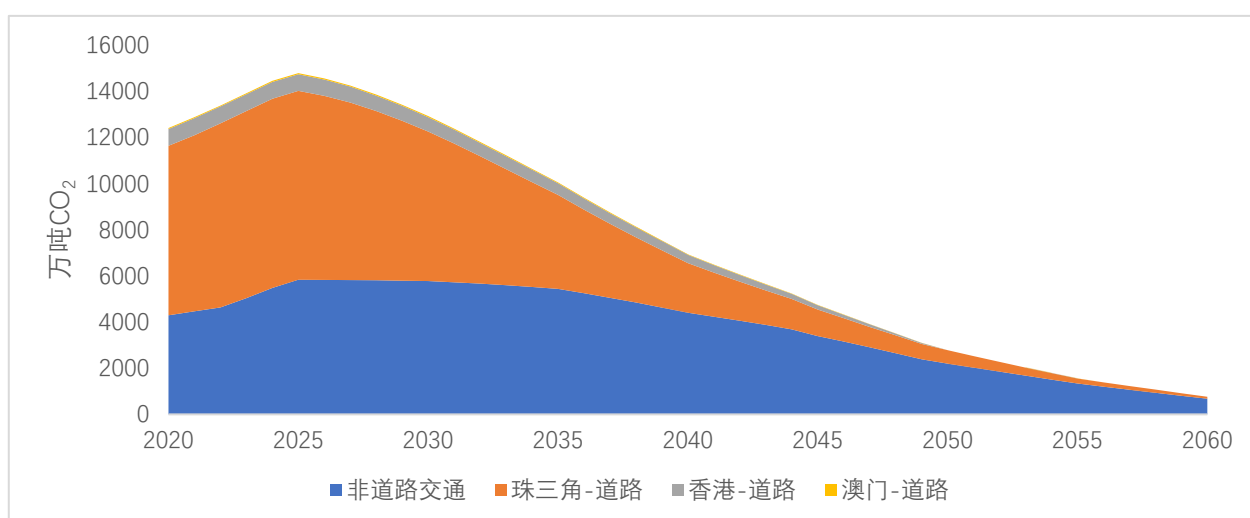
摘要-表 2 不同措施的减排潜力细化分析

单位: 万吨	2021-2025	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2045	2046-2050	2051-2055	2056-2060	减排潜力趋势图	累计	累计减排量占比
运输结构调整	25	1131	2681	4062	4949	5499	5854	6062		30262	19%
能效提升	359	1294	2330	3346	4428	5559	6745	7889		31950	20%
能源结构优化(非道路)	20	144	400	747	1124	1621	1889	1884		7831	5%
营运车辆电动化	159	1102	2549	3780	4650	4985	4798	4509		26533	16%
非营运车辆电动化	395	2928	6996	9977	10905	10258	8957	7557		57973	36%
控制私家车保有量	1042	2400	2199	1136	338	49	2	0		7166	4%
总计	2001	8999	17155	23048	26394	27971	28246	27902		161715	100%

注：减排潜力指基准情景与 2050 净零碳排放情景的差值，减排潜力趋势图中红色部分代表该措施在对应时间段内的减排量最高。

全口径交通碳排放净零仍需负碳技术助力

分析结果显示，在多种减排措施的加持下，大湾区全口径交通直接碳排放 2050 年仍难以实现净零。即便采用了生命周期碳强度更低的清洁燃料，至 2050 年大湾区交通领域燃料周期碳排放量还处在 2600 万吨/年的水平，这表明交通行业要在世纪中叶实现净零碳排放，仍需要借助林业、土壤等等生态碳汇的力量。



摘要-图 8 大湾区交通领域燃料周期碳排放趋势 (2050 净零碳排放情景)

政策建议

在基准情景下，大湾区交通碳排放将于 2027 年达到峰值，提前于国家提出的 2030 年整体碳达峰目标，但达峰后排放下降缓慢。主要原因在于现有政策的时间跨度较短，珠三角地区尤其明显，以五年政策框架居多，难以激励交通部门进行长远减排规划。若能针对各细分交通部门分别制定具体减排目标和相关政策，如不断提升能源效率、运输结构持续优化、明确电动汽车在商用车领域的应用目标等，大湾区交通排放有望于“十四五”未达峰，且达峰后排放总量能快速下降。

大湾区整体发展领先于全国，但城市间差异依然存在。香港在发展金融业的同时，也致力于重振其在国际航运和航空产业中的地位；澳门倚重第三产业，在交通减排方面的目标相对保守；广、深两市依托内地放眼全球，在减排目标及政策制定上更有雄心；其他珠三角城市面临平衡经济发展和节能减排的挑战，在制定减排计划时更加务实。因此，在制定相关政策过程中，既要考虑城市定位及其特殊性，也要在特定领域进行协调统一，促进大湾区不断交流融合，推动绿色发展。

为促进大湾区交通排放持续下降，研究基于量化分析结果，提出以下政策建议，具体见摘要-表 3。

摘要-表 3 粤港澳大湾区交通净零碳排放政策建议汇总

交通领域	主要问题	具体建议
道路交通	<ul style="list-style-type: none"> 电动商用车市场分散、经营成本压力大、补贴机制难以为继 三地充电标准不统一，车辆跨境阻力大 澳门车辆零排放转型进度十分缓慢 因土地资源受限港澳地区建设充电设施难度高 	<ul style="list-style-type: none"> 香港牵头，大湾区统筹，创新绿色金融方式，纾解企业在置换电动商用车前期的高额投资压力 试点深港、珠澳跨境零排放走廊，持续带动三地商用车电动化转型 推动大湾区充换电标准统一并与国际接轨，研究推动充电接口兼容标准 推动澳门建立更具体的车辆零排放转型规划 港澳地区基于道路车流量、停车热点等分析更详细规划公共补能站点建设，开放市场并允许符合条件的内地能源服务商进驻 允许将更多的服务于跨境车辆的补能基础设施建设在靠近珠三角城市一侧，减轻港澳地区的土地使用压力
铁路运输	<ul style="list-style-type: none"> 铁路在运输总量中占比低 	<ul style="list-style-type: none"> 建议从经济和交通规划等要素入手制定相应政策，以充分调用高铁资源。在城际铁路方面，进一步完善公交、地铁等公共交通线路与高铁站点的接驳，鼓励更多乘客使用高铁出行。“航空转高铁”方面，建议由铁路管理局牵头，研究制定分时分段弹性定价机制，将部分民航乘客分流至高铁。三地交通及环保部门也可组织本地“航空转高铁”意愿调研，收集意愿人群的意见和建议，作为后续政策制定的参考
水路运输	<ul style="list-style-type: none"> 减排主要依赖清洁能源，但船用清洁燃料多线发展，市场选择周期长，企业难以进行长期规划 	<ul style="list-style-type: none"> 由政府牵头，组织研究团队，对不同燃料路线进行技术和成本分析，研究包括产业发展所需投资、市场供需规模、燃料加注设施建设、船体改造成本、相关标准制定等问题，生成技术成本清单 基于城市定位、产业基础共同打造大湾区绿色燃料供给中心：深圳 LNG 产业链基本形成，建设国际航行船舶 LNG 加注中心；广州基于保税船油试点，建设国际航行船舶保税油供应基地；香港为建设大湾区绿色燃料产业链提供金融支持，主导构建大湾区绿色燃料标准体系并与国际接轨
民航运输	<ul style="list-style-type: none"> 中国尚未制定 SAF 应用要求，难以满足国际民航减排规划 中国内地航空公司严重依赖民航局对 SAF 的态度而未能制定 SAF 长期使用规划 大湾区内 SAF 产业链尚未建立 	<ul style="list-style-type: none"> 建议当地政府及民航局作为协调单位，推动国泰航空与其他航司之间在可持续航空燃料方面的讨论和交流；内地航司应在可持续航空燃料负责部门和专员的深度研究基础之上，尽快制定可持续航空燃料应用的长期规划，并在企业内部进行成本效益及排放等的综合评估，为资金、人员分配提供参考 建议对在大湾区新建或新落户的可持续航空燃料生产企业提供相应激励政策，可提供土地使用优

		<p>惠，加快土地使用审批进度，如需利用既有闲置厂房，可提供租金优惠政策。在企业投产前期，可通过减税、水电费用补贴等形式提供财政优惠，扶持一批 SAF 生产企业</p> <ul style="list-style-type: none"> • 与 ISCC 合作，建立中国本地化的 ISCC 标准认证体系 • 从源头出发，由主要航空公司、生物燃料生产企业以及标准制定机构等利益相关方组成工作小组，在源头数据、标准适应性等方面紧密协调合作，推动中国建立一套国际化的可持续认证机制 • 组织建立可持续航空燃料交易平台，在市场发展初期，跟踪国际不同地区不同工艺可持续航空燃料价格变化，在发展中期，纳入市场上主要的供需主体，为双方议价提供平台支持，同时建立与国际市场的联动机制，保障供需双方的权益最大化
全交通	<ul style="list-style-type: none"> • 运输模式缺乏统筹与优化 	<ul style="list-style-type: none"> • 发挥大湾区水路运输优势，发展水水中转集疏运、铁水联运和江海直达运输 • 推动香港、澳门国际机场与大湾区港口之间“海空货物联运” • 收集香港国际机场与东莞“海空货物联运”试点运行数据，完善操作流程，扩大海空联运规模

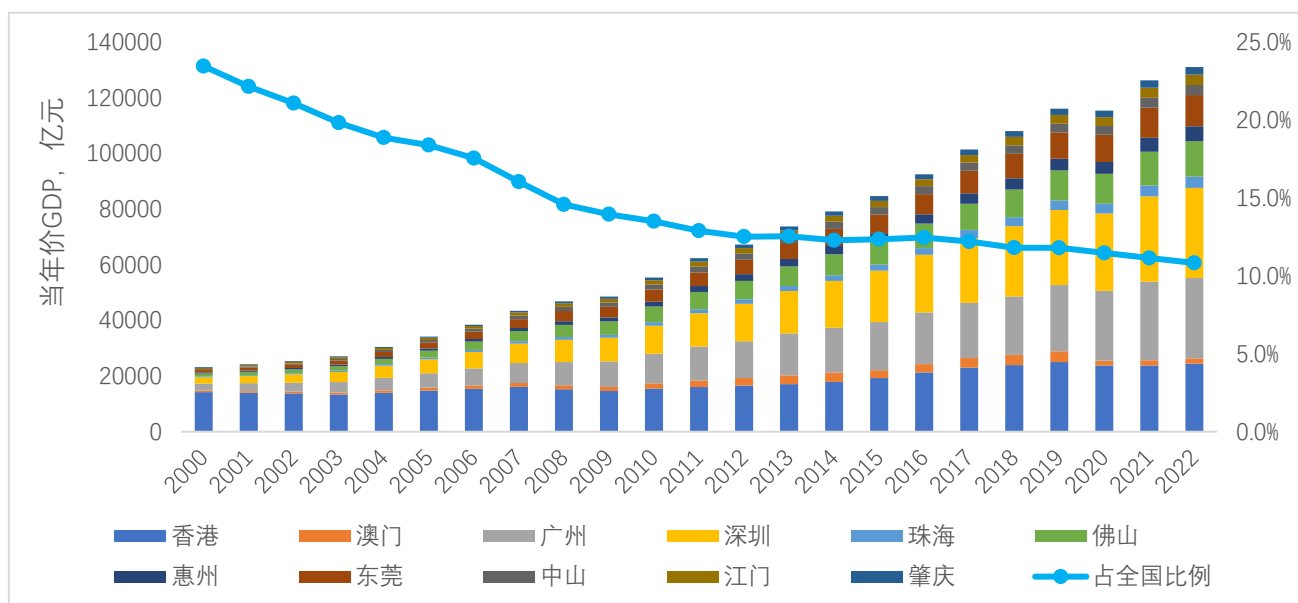
第一章 粤港澳大湾区交通发展概况

1.1 粤港澳大湾区整体概况

粤港澳大湾区是指由香港特别行政区、澳门特别行政区和广东省广州市、深圳市、珠海市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、江门市及肇庆市（即珠三角九市）共同组成的区域。“大湾区”于 2015 年在“一带一路”文件中首次提出，2017 年被纳入政府工作报告，2019 年中共中央和国务院共同印发《粤港澳大湾区发展规划纲要》，将推动粤港澳大湾区建设上升至国家级发展战略，将其打造成为继纽约湾区、旧金山湾区和东京湾区之后的全球第四大湾区。

粤港澳大湾区面积约 5.6 万平方公里（全国占比 0.6%），截至 2022 年底大湾区常住人口约 8262 万（全国占比 5.9%），2022 年经济总量达到 13.1 万亿元（全国占比 10.8%），是我国最具有经济活力的地区之一。

粤港澳大湾区经济总量的变化过程（见图 1）是进入 21 世纪以来我国经济发展的一个缩影。2007 年以前，港澳地区 GDP 占大湾区经济体量的 40%~64%，同期大湾区经济总量约占全国 GDP 的 16%~24%，这一期间，港澳仍然在经济上引领整个大湾区。2008 年以来，受国际金融危机影响，港澳地区经济经历了一段时间的低潮，与此同时，珠三角地区的经济高速发展，尤其是深圳和广州分别于 2017 年和 2020 年超过香港，成为大湾区经济发展新的领跑者。在这一时期，国内经济形势良好，大湾区经济体量占全国的比重持续下降。

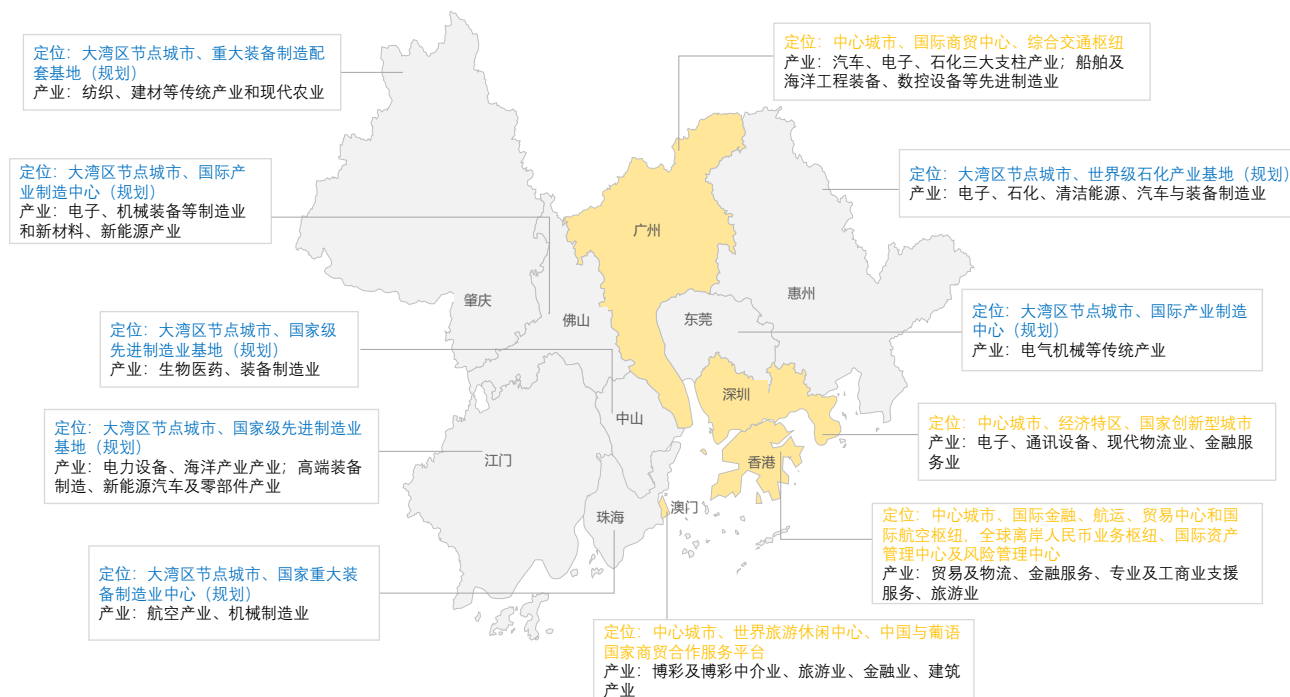


资料来源：各地统计局

图 1 粤港澳大湾区历年 GDP 及占全国比重情况

2019 年国务院印发了《粤港澳大湾区发展纲要》，对大湾区的战略目标定位为“充满活力的世界级城市群”、“具有全球影响力的国际科技创新中心”、“‘一带一路’建设的重要支撑”、“内地与港澳深度合作示范区”和“宜居

宜业宜游的优质生活圈”，在国家发展大局中具有重要战略地位。香港、澳门、广州和深圳为大湾区的中心城市，是区域发展的核心引擎，在湾区建设中既要继续发挥比较优势做优做强，同时要带动周边城市的发展。其他重要节点城市也要发挥自身优势，强化与中心城市互动的同时，带动周边特色城镇发展，共同将大湾区打造成国际一流湾区。



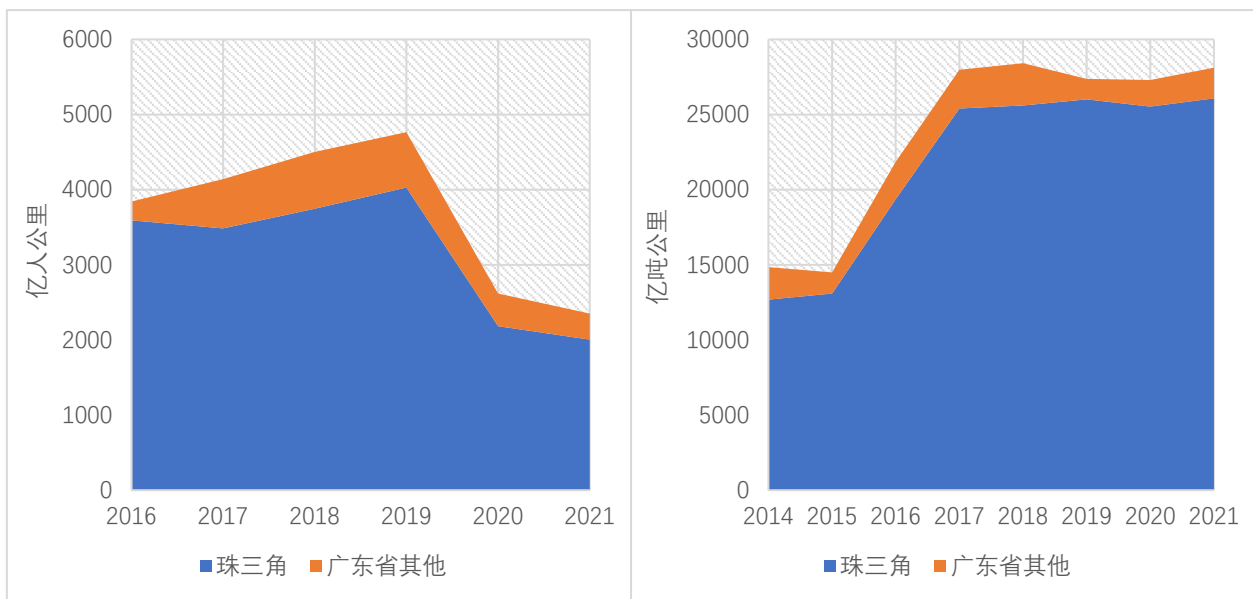
资料来源：《粤港澳大湾区发展纲要》《珠三角产业布局一体化》

图 2 粤港澳大湾区各城市发展定位及优势产业概况

1.2 粤港澳大湾区交通概况

粤港澳大湾区地处我国沿海开放前沿，区位优势十分明显，优越的地理位置使大湾区成为重要的交通枢纽。

珠三角九市是广东省内主要的客、货运周转地。统计数据显示，近五年来，珠三角各种交通运输方式下，旅客周转量占广东全省的 85%左右，货物运输周转量占广东全省的 90%以上，且近几年还呈现增长趋势。



数据来源：广东省及各地统计局

图 3 珠三角客、货运周转量趋势

香港地理位置优越，交通四通八达，是亚洲首屈一指的物流和海运枢纽，也是我国内地与世界各国进行贸易的门户。对外，香港是国际航空枢纽，全球约有半数人口的居住地与香港的距离在 5 小时飞行航程内，香港港口是全球最繁忙及最有效率的港口之一，具有包括自由港地位、高效海关和完善港口基建的竞争优势，按总吨位计，香港的船舶注册位列全球第四¹；对内，高铁、公路以及桥道建设进一步连通了香港、澳门和珠三角九市，香港增建了更多珠三角跨口岸，通关效率大大提升，由香港出发，不出三个小时就能抵达珠三角九市，再通过高铁便可无缝接驳至国内其他地区²。

1.2.1 公路交通

公路运输是承接中短途客、货运的主要方式，随着大湾区经济社会的发展，公路交通服务越来越发达，通车里程持续增长，同时公路运输规模也在不断扩大，客、货运运输量不断增加。

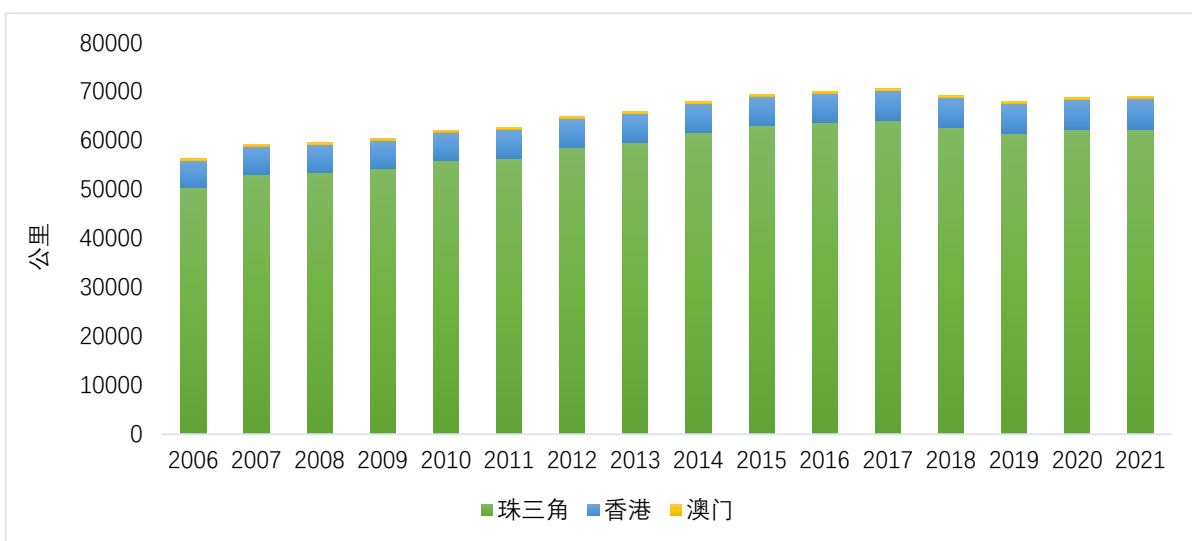
- 公路通车里程持续增长

截至 2021 年底，粤港澳大湾区公路通车里程接近 7 万公里，较 2006 年增长了 23%，其中，珠三角地区增速最快（24%），澳门其次（21%），香港第三（11%）。公路网的拓展进一步提升了交通运输活动的便捷性，2018 年底港珠澳大桥的通车使大湾区交通互通迈上新台阶。《广东省高速公路网规划（2020-2035 年）》提出要建设以“十二纵八横两环十六射”为主骨架的路网建设规划，以支撑粤港澳大湾区深度合作发展。

专栏一：连通粤港澳三地的桥梁——港珠澳大桥

港珠澳大桥于 2009 年开工建设，2019 年 2 月完成验收，同年 10 月正式开通。港珠澳大桥东起香港国际机场附近的香港口岸人工岛，向西横跨南海伶仃洋水域接珠海和澳门人工岛，止于珠海洪湾立交；桥隧全长 55 千米，其中主桥 29.6 千米、香港口岸至珠澳口岸 41.6 千米，是全球最长的桥隧组合跨海通道。港珠澳大桥建成后，穿梭香港及珠三角主要城市之间只需要三小时，香港口岸至珠海口岸及澳门口岸约 42 公里的路程，行车时间仅需 40 分钟左右。经统计，港珠澳大桥开通四年来，经港珠澳大桥珠海公路口岸出入境旅客累计近 2400 万人次，出入境车辆 470 万辆次。

2023 年，“港车北上”和“澳车北上”政策实施，该政策是指允许符合资格的香港和澳门地区的私家车经港珠澳大桥往来港澳和广东省。据统计，截至 7 月 24 日，海关累计监管验放经港珠澳大桥珠海公路口岸进出境的港澳单牌车超过 50 万辆次，进一步拉近了大湾区城市间的交流，促进三地人员车辆往来便利化。



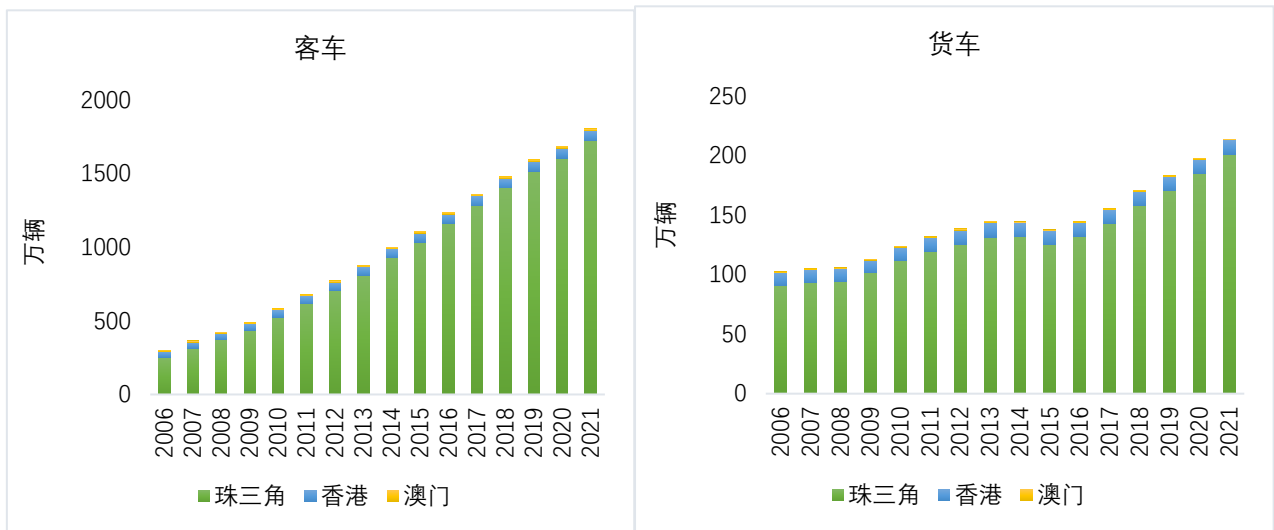
数据来源：各地统计部门

图 4 粤港澳大湾区公路通车里程情况

- 汽车保有量快速增加

近十五年以来，粤港澳大湾区整体汽车保有量迅猛增长。截至 2021 年底，客车保有量突破 1800 万辆，较 2006 年增长了五倍，其中珠三角增长了 582%，香港增长 74%，澳门增长了 59%；货车保有量达到 213 万辆，较 2006 年翻了一番，其中珠三角增长 122%，香港和澳门分别增长 8%和 16%。

汽车保有量的增长主要得益于私人汽车的快速增加，尤其是客车。据统计，私人客车在客车总量中的比重在过去十五年间由 81%提高至 91%，截至 2021 年底，珠三角、香港和澳门三地私人客车在客车总量中的比例分别为 91%、94%和 92%。



数据来源：各地统计部门

图 5 粤港澳大湾区汽车保有量情况

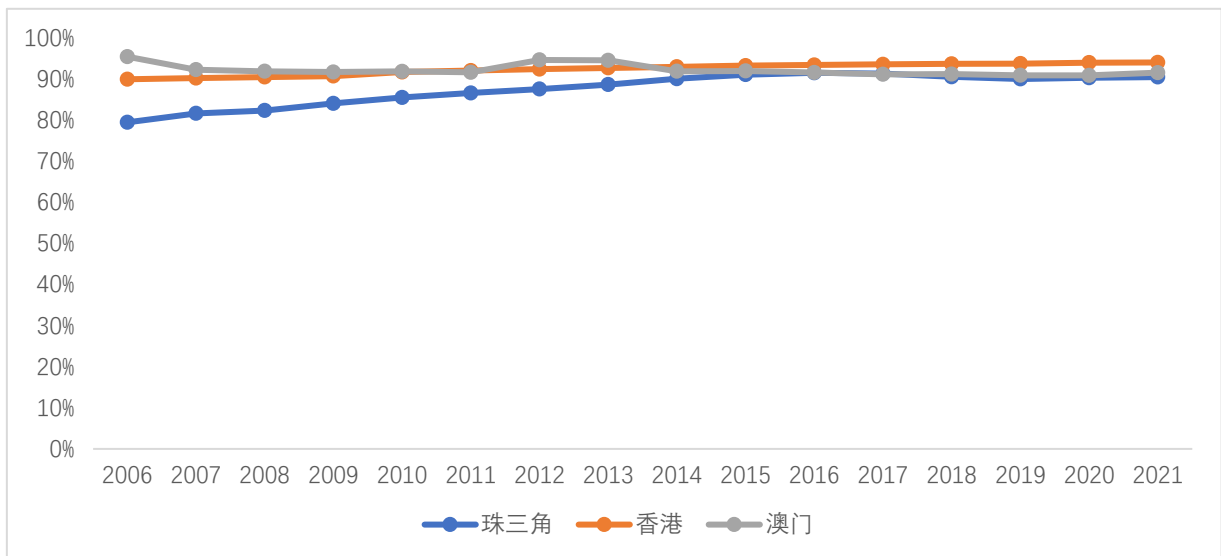


图 6 粤港澳大湾区私人客车在客车总量中的比重变化

- 客运下行，货运上行

根据中国内地现行统计口径，公路客运量、公路旅客周转量的统计范围包括省际客运、旅游客运和郊区客运，市郊公交、公共汽电车、出租车以及私人小汽车均不纳入公路客运的统计范围³。随着高速铁路的普及以及私人小汽车保有量的快速增长，公路客运量和旅客周转量均已进入缓慢下行通道，近三年受新冠疫情影响，公路客运更是遭受重创。2021年，珠三角公路客运量仅为1.8亿人次，较2016年下降71%，旅客周转量为165亿人公里，较2016年下降77%。按此口径，香港和澳门地区公路客运主要跨境（Cross-border）旅游巴士，受新冠肺炎疫情影响，自2020年以来跨境公路客运明显下滑。

公路货运则呈现出相反趋势。在疫情之前，2014年以来珠三角公路货运量和货物周转量逐年增长。2019年底，珠三角公路货运量和货物周转量分别为21.7亿吨和2267亿吨公里，较2014年分别增加19%和29%。疫情期间的活动受限致使公路货运量及周转量有所下降，但整体情况要好于公路客运。

1.2.2 铁路运输

铁路运输在粤港澳大湾区交通运输中所占份额较小。截至2022年大湾区铁路营业里程仅有2500公里左右⁴，同期京津冀和长三角则分别为10848公里⁵和13750公里⁶。不过，大湾区铁路中高速铁路所占比重在三大城市群中位列第一，达到57%，紧随其后的长三角接近50%，京津冀地区最低，仅为22%。

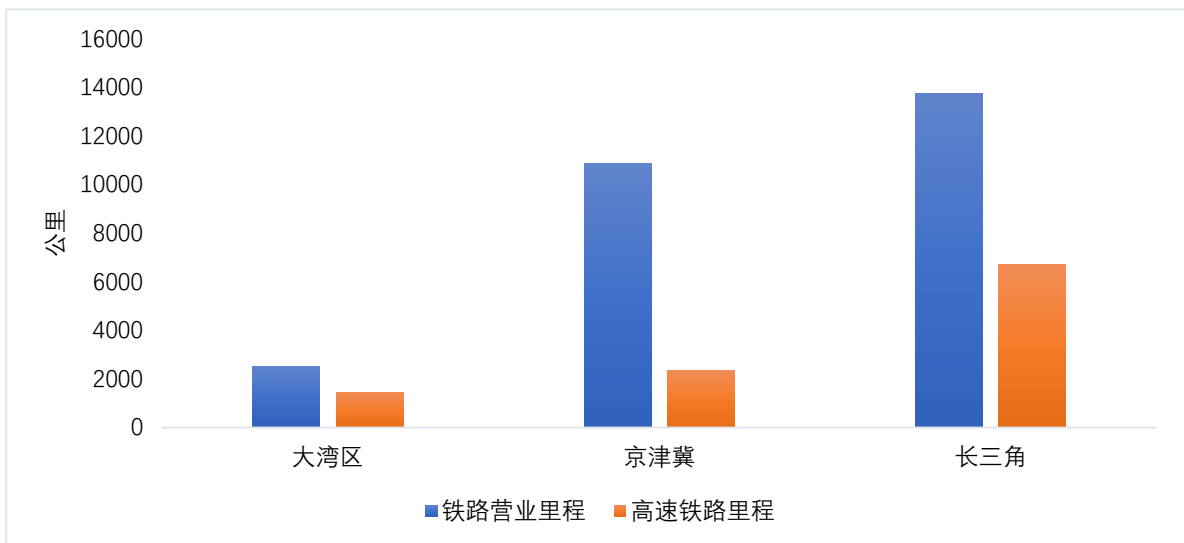


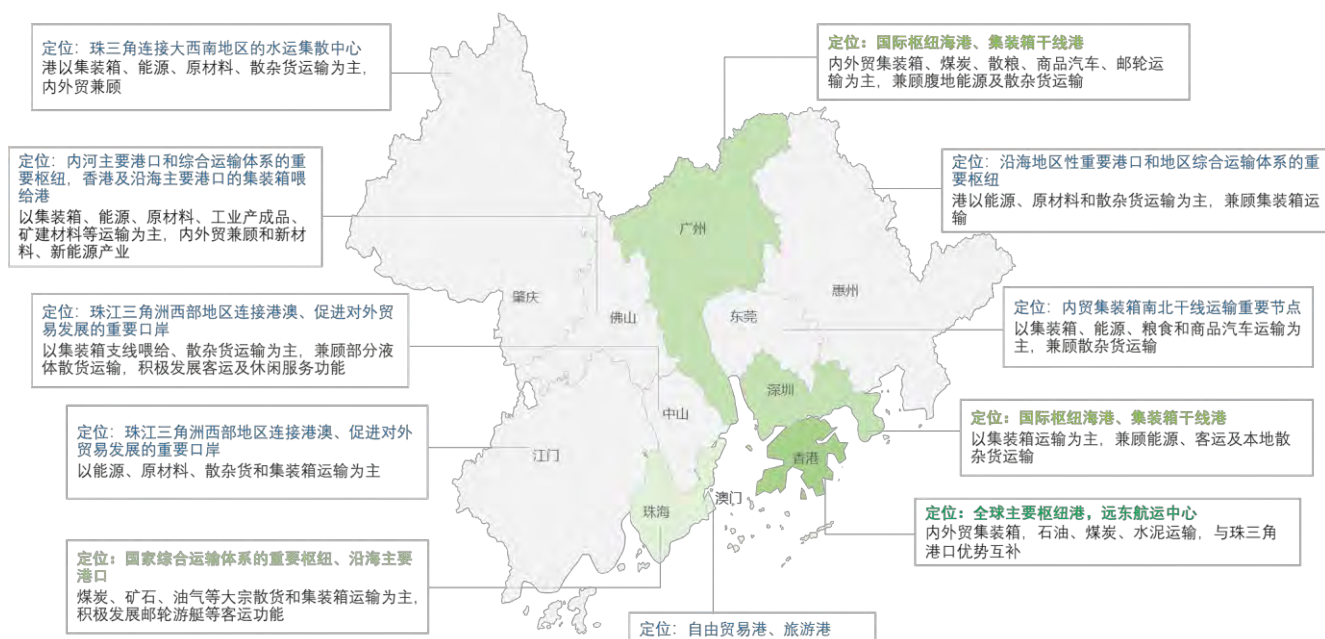
图7 我国三大城市群铁路营业里程情况（2022）

广州在铁路运输中具有重要位置，2017年5月由中国铁路总公司和广东省人民政府联合批复的《广州铁路枢纽计划（2016-2030年）》将广州枢纽定位为全国重要的、华南地区最大的铁路枢纽⁷，衔接京广铁路、广九铁路、广茂铁路、京广高速铁路、广深港高速铁路等干线。珠三角城市中，深圳、珠海、惠州等也是繁忙的铁路站点。香港境内的传统铁路主要为京九线香港段和广深港高速铁路香港段，澳门境内铁路主要为城市轻轨。

未来大湾区铁路建设还将进一步有序进行。2020 年国家发改委印发《关于粤港澳大湾区城际铁路建设规划的批复》⁸，同意在大湾区有序实施一批城际铁路项目，打造“轨道上的大湾区”。根据批复，到 2025 年大湾区铁路网运营及在建里程达到 4700 公里，全面覆盖大湾区中心城市、节点城市和广州、深圳等重点生活圈；远期到 2035 年，大湾区铁路网运营及在建里程达到 5700 公里，100%覆盖县级以上城市。与港澳口岸衔接方案方面，深圳市与香港特别行政区近期通过既有京九铁路、广深港高铁实现互联互通。珠海市与澳门特别行政区在珠海站、横琴站实现高铁、城际铁路与澳门轻轨衔接，届时大湾区各城市之间的互动将通过铁路进一步得到加强。

1.2.3 水路运输

粤港澳大湾区所处的珠江三角洲是由珠江三大支流西江、北江、东江等河流冲积形成的复合三角洲，具有漫长海岸线，良好的港口群以及广阔海域面，临近全球第一黄金航道，是东南亚乃至世界的重要交通枢纽。深圳港和广州港均位列我国前十大港口之列，香港港作为自由港，近年来受全球贸易疲软、码头用地不足等诸多因素影响，集装箱吞吐量不断下降，但香港港设施先进，货物装卸作业高效，目前仍是全球最繁忙和最高效的国际集装箱港口之一。《粤港澳大湾区发展规划纲要》提出要巩固提升香港国际航运中心地位，增强广州、深圳国际航运综合服务功能，与香港优势互补，提升珠三角港口群的国际竞争力。

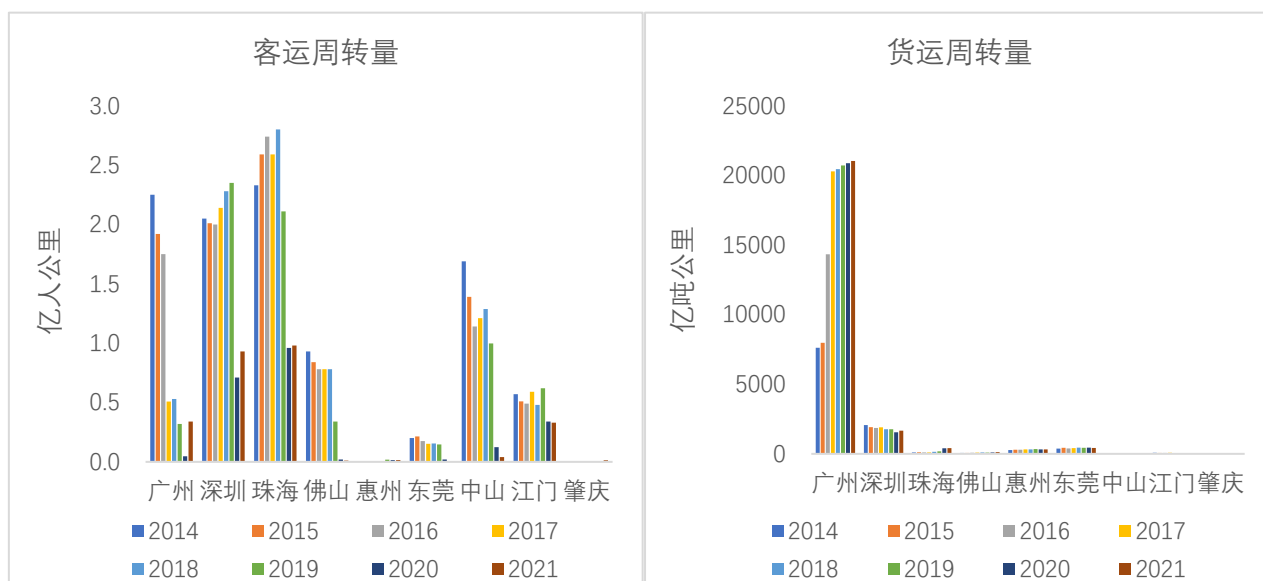


资料来源：广东省港口布局规划（2021-2035 年）、中国港口网

图 8 粤港澳大湾区港口群定位及特点

珠三角水路客、货运发达。统计数据显示，近年来珠三角九市水路客运周转量占到广东全省的 62%及以上，水路货运周转量占全省的 95%以上。珠海、深圳、广州、中山四市客运周转活跃，深圳和珠海尤其活跃，

疫情之前，这两市的年旅客周转量均超过 2 亿人公里。货运方面，广州一家独大，年均货物周转量占珠三角总量的 85%以上，深圳年均货物周转量占比也达到了 8%左右。

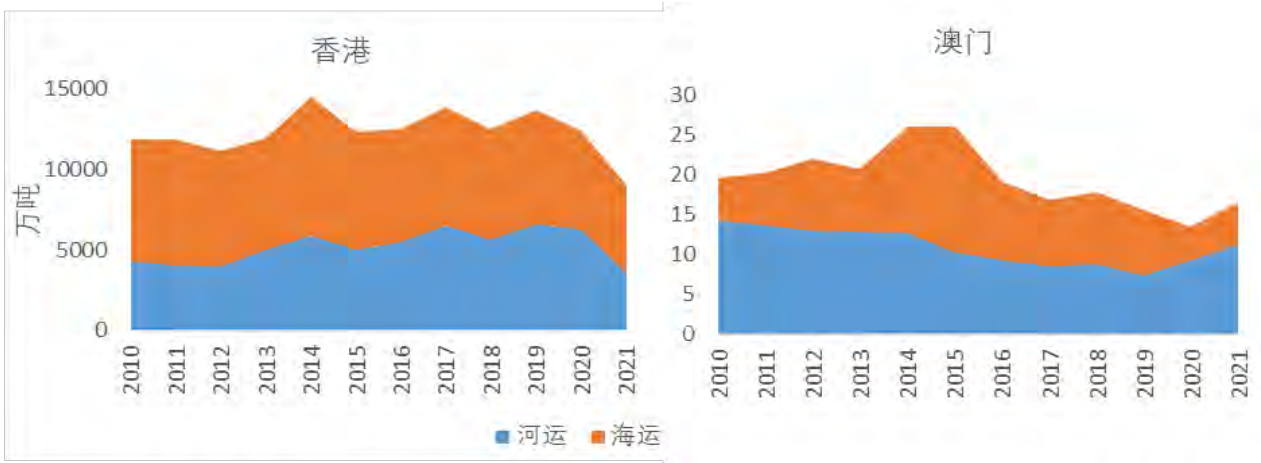


数据来源：各市统计局，货运周转量含内河、沿海和远洋数据。

图 9 珠三角九市水路客、货运周转量情况

香港、澳门本地的水路客运主要是指在城市内运行的客运渡轮，属于城市公共交通方式的一种。香港境内目前主要有新渡轮和天星小轮等渡轮服务公司，经营内港和离岛渡轮航线。澳门客运渡轮规模较小，主要经营港澳之间往来客运业务。2021 年香港渡轮年服务人次约 3550 万，较疫情之前略有下降。往来港澳的渡轮也在港珠澳大桥通车后受到打击，活跃渡轮数量大幅减少⁹。

香港水路货运也十分发达，香港港口年均货运量超过 1 亿吨，占全港货运总量（含空运、水运和道路运输）的 45%左右。2013 年之前，河运量占比约为 35%，2013 年之后，随着大湾区内互动进一步加强，该比例逐渐增加，2020 年一度达到 50%。海运也是香港十分重要的货物装卸渠道，疫情之前，香港海运货运量基本稳定在七千万吨以上。澳门陆地面积小，整体货运体量不大，货运主要依靠水路完成，水运货运量占澳门货运总量的比重超过 90%。

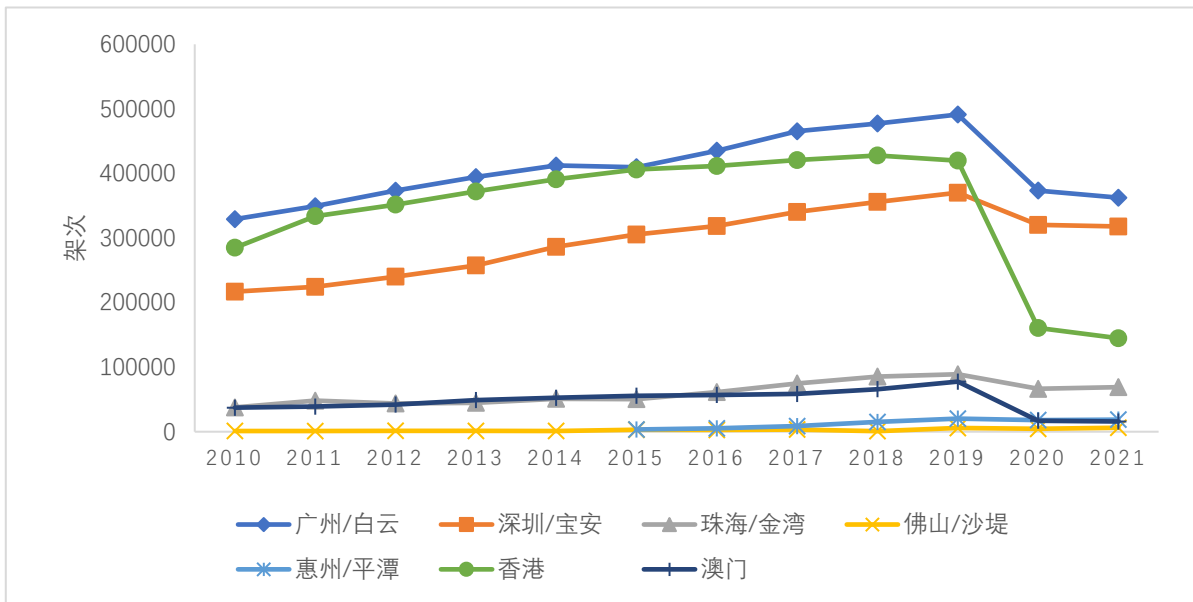


数据来源：香港、澳门统计年鉴/刊，含进口和出口货物量，CET 整理。

图 10 香港和澳门历年港口货物运输量情况

1.2.4 航空运输

粤港澳大湾区拥有 7 座运输机场，包括香港国际机场、广州白云国际机场和深圳宝安国际机场三座国际航空枢纽，澳门国际机场和珠海金湾机场两座干线机场，以及佛山沙堤机场和惠州平潭机场两座支线机场¹⁰。如图 11 所示，新冠疫情之前，广州、香港和深圳机场分别达到了 49 万、42 万和 37 万架次（2019 年），近两年受疫情影响，香港国际机场航班架次大幅下降，而广州和深圳受益于大量的国内飞行需求，机场航班架次受影响程度远低于香港。



数据来源：中国民用航空局，香港、澳门统计局

图 11 粤港澳大湾区主要机场航班起降架次情况

粤港澳大湾区也是多家航空公司的注册地。珠三角地区主要航空公司包括中国南方航空（“南航”）、深圳航空（“深航”）、顺丰航空，其中，南航和顺丰航空分别是国内民航客运和货运的翘楚（具体见表 1）。国泰航空（Cathy Pacific）则是香港地区最大的航空公司，截至 2022 年 6 月底，共拥有 228 架飞机，旗下航空公司直接连接香港至全球 35 个国家共 119 个目的地（疫情之前）¹¹，是全球排名前十的国际客运和国际货运航空公司。香港航空（Hong Kong Airlines）是香港地区第二家航司，主营亚太地区客运业务。澳门航空为地区性航空公司，主要航线覆盖中国大陆、台湾、东南亚和东北亚地区¹²。

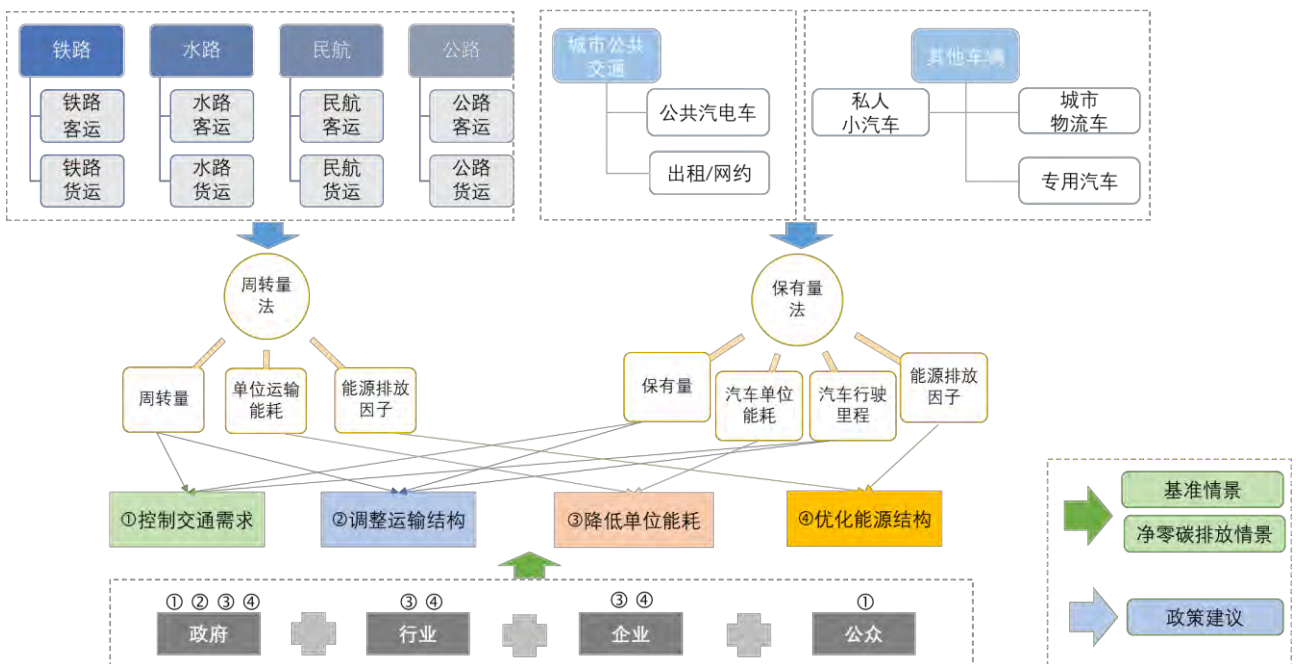
表 1 粤港澳大湾区主要航空公司概况

航空公司	注册地	主营业务	市场规模
中国南方航空股份有限公司	广州	国际、国内及港澳台客、货运输	国内三大国有航空公司之一，公司机队规模突破 900 架，其运输飞机规模、航线网络数量、年客运量长期处于国内首位
深圳航空有限责任公司	深圳	国际、国内及港澳台客、货运输	截至 2022 年 3 月末，公司经营航线达 226 条，机队规模增至 230 架 ¹³
顺丰航空有限公司	深圳	国际、国内货邮运输	目前国内运营全货机数量最多的货运航空公司，拥有以波音 747、767、757、737 机型组成的全货机机队，截至 2023 年 2 月，投入运行的全货机数量已达 78 架 ¹⁴
国泰航空有限公司	香港	国际、国内客、货运输	疫情之前为全球第八大国际客运航空公司及第三大国际货运航空公司
香港航空公司	香港	亚太地区客运	香港境内第二家在营航空公司，截至 2023 年 6 月现役机队 16 架 ¹⁵
澳门航空股份有限公司	澳门	亚太地区客运	截至 2021 年 1 月，澳门航空共运营国内外航线 30 条，拥有 22 架全空客客机

第二章 研究方法

本研究采用的交通净零碳排放分析技术路线如图 12 所示，下一章将对该技术路线中涉及的变量进行详细说明。

其中，城市公共交通工具和其他车辆主要活动区域在所研究地区的地理边界内，属于“内部交通”，公路、铁路、水路和民航相关活动量的统计则往往跨越了所研究地区的地理边界，属于“对外交通”。内部交通产生的排放可以认为完全是在研究地区的地理边界内发生，而对外交通产生的排放则仅有部分发生在地理边界之内，二者不具备可比性。



注：香港和澳门的统计方法与中国内地不同，港澳地区的车辆相关排放均采用“保有量法”计算。

图 12 粤港澳大湾区交通净零碳排放分析总体技术路线

2.1 研究范围

2.1.1 核算边界

根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》，交通运输排放来自于移动源，即所有交通工具产生的排放。交通运输过程涉及到的固定源，如港口、机场、车站等产生的排放，并不归入交通排放总量。

本研究所指“交通”涵盖公路、铁路、水路、民航、城市公共交通（含城市客车、出租车和网约车，不含地铁等轨道交通）以及非营运交通。非营运交通主要包括私人乘用车、城市物流车辆^⑤、环卫车以及其他社

^⑤ 按照《交通运输部办公厅关于取消总质量 4.5 吨及以下普通货运车辆道路运输证和驾驶员从业资格证的通知》，2019 年 1 月 1 日起各地

会车辆。民航只包含商业航空，不含通用航空^⑥。其中，公路客货运、城市公共交通和非营运交通实际上都属于道路交通范畴，在研究中将其拆分是为了更细致地分析各自的排放特征。香港和澳门两地市内的铁路主要是轨道交通，在本研究中不予考虑。在澳门地区，电单车（摩托车）是当地居民主要的交通工具，交通出行占比高，因而将这部分排放纳入澳门道路交通排放计算之中。而对于其他城市，摩托车排放占比很低，在本研究中暂时不计入。

结合数据获取情况，本研究根据以下原则核算不同交通工具的数量和营运强度。公路（营运）、公共汽电车、非营运车辆、出租和网约车、水路及航空运输均基于属地原则来统计运输活动。铁路略有不同，我国铁路的运输量及能耗统计是以铁路局为单位，大湾区铁路主要为广州铁路局管辖范围，但在实际操作中无法掌握相应数据，故基于统计局公布的城市车站发送的客、货运量相关数据进行核算。

表 2 不同交通运输方式及交通工具的核算范围界定

运输方式	交通工具核算原则	具体范围
公路（营运）	属地原则	在大湾区城市注册的营运性客车和货车所发生的运输活动
公共汽电车		在大湾区城市内从事公交服务的客车所发生的运输活动
非营运车辆		在大湾区城市内注册的非营运类车辆所发生的运输活动
出租/网约车		在大湾区城市内从事巡游出租和网络预约出租服务的小客车所发生的运输活动
水路		在大湾区城市内经营的水运企业和由其组织的其他单位所发生的水上运输活动
航空		在大湾区城市注册的商业航空公司所拥有的飞行器所发生的运输活动
铁路	行政区（此处与铁路局统计不同）	经大湾区城市各车站发送的旅客和货物运输活动

为缓解能源压力，减少温室气体排放，交通用能日趋多元，交通活动所消耗能源的直接排放可能并不完全反映交通排放的真实情况。如在电力实现 100%可再生之前，电力上游排放仍有可能被交通行业所关注，但本着“能源先行”的原则，电力作为社会用能的重要组成，势必需要更加严格的减排战略以支撑其他部门实现净零碳排放。对航空业而言，可持续航空燃料（SAF）被认为是未来航空减排的重要手段，而就直接排放而言，可持续航空燃料较传统航煤并不具备优势。但从生命周期的角度来看，其减排潜力平均可达 80%¹⁶。在本研究中，核算直接碳排放时，电力、氢能的碳排放因子为零；在核算燃料周期碳排放时，发电、制氢环节的碳排放将被计入，其他燃料则使用生命周期碳排放因子进行计算。

按照世界资源研究所对排放范围的定义及划分¹⁷，研究包含范围一、范围二和部分范围三的排放。范围

交通运输管理部门不再为总质量 4.5 吨及以下普通货运车辆配发道路运输证。

^⑥ 通用航空是指使用民用航空器从事公共航空运输以外的民事航空活动，包括从事工业、农业林业、渔业和建筑业的作业飞行以及医疗卫生、抢险救灾、气象探测、科学实验、文化体育等方面的飞行活动。

一排放是指在粤港澳大湾区行政边界内产生的排放，范围二排放是指发生在粤港澳大湾区行政边界内的由于电力消耗产生的排放，范围三排放的覆盖范围很广，在本研究中仅指大湾区内出发或到达的铁路、飞机、轮船等所产生的排放。

表 3 交通领域主要替代能源及其减排途径

替代能源种类	应用领域	实现减排途径
电力	<ul style="list-style-type: none"> • 道路交通（纯电动及混合动力汽车） • 铁路（电力牵引机车） • 水路（电动船，近期内应用在内河航运） • 航空（电动飞机，可能应用在通勤/地区航班） 	<ul style="list-style-type: none"> • 终端净零碳排放 • 中长期可实现生命周期净零碳排放
氢能	<ul style="list-style-type: none"> • 道路交通（燃料电池汽车） • 铁路（氢内燃机车，有发展可能） • 水路（氢燃料动力船舶，示范项目） • 航空（氢燃料电池飞机，氢动力飞机，研究阶段） 	<ul style="list-style-type: none"> • 终端净零碳排放 • 中长期可实现生命周期净零碳排放
可持续燃料	<ul style="list-style-type: none"> • 道路交通（生物燃料，未来大部分将被取代） • 航空（可持续航空燃料，重点发展方向） • 水路（绿氨，绿色甲醇，e-fuels 等） 	<ul style="list-style-type: none"> • 终端并不具备较大减排优势 • 生命周期的减排潜力巨大

2.1.2 排放物核算种类

京都议定书规定了 6 种温室气体，即二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、氧化亚氮 (N₂O)、氢氟碳化合物 (HFCs)、全氟碳化合物 (PFCs)、六氟化硫 (SF₆)。其中，我国交通运输温室气体排放中，二氧化碳的比重达到 99.9%，甲烷、氧化亚氮排放占比很低¹⁸，因此在本研究中仅讨论二氧化碳排放（本报告中同“碳排放”）。

2.2 核算方法

本研究基于“自下而上”的方法对大湾区交通运输过程产生的排放进行核算。对于不同的交通运输方式，采用的“自下而上”具体方法并不相同（见表 4）。结合研究掌握的数据情况，在本研究中：1) 对非营运车辆，采用里程法（保有量法）；2) 对其他交通方式，采用周转量法。

表 4 各类交通方式的排放清单核算方法

	营运道路		非营运道路		轨道		水运		民航	
	CO ₂	污染物	CO ₂	污染物	CO ₂	污染物	CO ₂	污染物	CO ₂	污染物
能耗法	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
周转量法	√				○	○	○	○	√	
里程法	○	○	○	○	√		√		√	
路网清单法	○	○	○	○						
起降法									○	○

注：参考《城市交通大气污染物与温室气体协同控制技术指南（1.0 版本）》，○为该指南推荐城市采用的一致性计算方法，√为各类交通方式可以适用的其他计算方法。

底层数据是支撑核算过程的关键。为了获取粤港澳大湾区的本地化数据，研究团队进行了广泛的专家咨询和实地调研。表 5 展示了研究所用数据的具体来源。整体上看，主要数据来自于各地统计年鉴/年刊，珠三角与港、澳地区的统计口径存在一定差异，需要进行比对和统筹分析。

表 5 本研究中主要数据来源汇总

具体指标	数据/资料来源
道路交通工具（汽车）数量	<ul style="list-style-type: none"> 各地统计年鉴/年刊（公开） 上险数据（非公开）
汽车百公里油耗/电耗	<ul style="list-style-type: none"> 工信部网站、报告 车企官网 行业研究
汽车年行驶里程	<ul style="list-style-type: none"> 行业研究 官方通报（公共交通）
公路单位客、货运能耗	<ul style="list-style-type: none"> 行业统计公报 专家咨询
铁路单位客、货运能耗	<ul style="list-style-type: none"> 行业统计公报
水路单位客、货运能耗	<ul style="list-style-type: none"> 行业统计公报（已断更）
航空单位客、货运能耗	<ul style="list-style-type: none"> 行业统计公报 航空公司
铁路客、货运周转量	<ul style="list-style-type: none"> 各地统计年鉴/年刊
航空客、货运周转量	<ul style="list-style-type: none"> 各地统计年鉴/年刊
水路客、货运周转量	<ul style="list-style-type: none"> 各地统计年鉴/年刊
交通工具数量、单位能耗、活动水平	<ul style="list-style-type: none"> 已有政策/标准 专家咨询 模型预测
运输结构变化	<ul style="list-style-type: none"> 已有政策导向 专家咨询

2.3 情景设置

本研究设置三种情景，包括用于评估现有政策影响力的基准情景，和以实现交通碳排放净零为目标两个净零碳排放情景，即 2060 净零碳排放情景和 2050 净零碳排放情景。

基准情景参考了近二十份国家和地方出台的规划文件（详见附录 1），考虑了截至目前所有出台的政策，以评估现有政策对交通领域减排潜力的影响。作为其他减排情景比较的基准，基准情景中只考虑目前明确提出的定量化指标，如香港在《香港气候行动蓝图 2050》针对私家车提出“2035 年或之前停止新登记燃油和混

合动力私家车”的目标，那么该政策在基准情景中有所体现，而对于其他车类由于没有明确的目标，那么在基准情景下其电动化率将保持现状或仅缓慢增加。

在两种净零碳排放情景下，由于有明确的目标压力，对单位运输能耗和排放的要求更加严格，运输结构也将进一步调整和优化。需要明确的是，由于香港率先提出了 2050 年碳中和目标，澳门的相关研究也将碳中和目标定位在 2050 年前后，因此，“2060 净零碳排放情景”仅适用于珠三角地区。换言之，在“2060 净零碳排放情景”下，大湾区交通碳排放数据是指珠三角地区在“2060 净零碳排放情景”下的数据和香港、澳门地区在“2050 净零碳排放情景”下相应数据的加和。

主要情景参数设置详见附录 2。

第三章 情景分析

3.1 减排路径

受多重因素影响，不同交通方式在减排方式和路径之间有明显差异。整体上看，电动化技术在道路交通领域的可行性程度很高，且目前的技术、市场都相对成熟，被认为是实现净零碳排放的主要技术路线；铁路方面，电气化率逐年提升，城际铁路建设也将进一步推动粤港澳大湾区铁路的电气化发展，进而实现减碳；水运方面考虑小型船舶的电动化，同时加速淘汰老旧船舶，提高传统船舶能效等方式都是减排的重要措施；航空运输的特殊性致使其减排难度高，在短途航班上使用电力或氢燃料的安全性仍有待探索，使用生命周期碳排放强度更低的可持续航空燃料是国际航空界更为认可的减排措施。

3.1.1 道路运输减排

道路运输碳减排途径主要包括四类：(1) 降低汽车整体保有量水平；(2) 减少汽车出行距离；(3) 降低单车能耗与排放，若仅考虑交通工具的直接排放，该部分则主要是指不断降低传统燃油车辆的能耗；(4) 使用碳强度更低的燃料，如使用生物燃料，推广和应用新能源汽车等。

如图 13 所示，在道路运输领域目前主流的技术路径包括纯电动、插电式混合动力、传统混合动力、燃料电池和零碳内燃机技术。其中，纯电动和燃料电池技术车辆在使用环节均不产生 CO₂ 以及污染物排放，这两类车辆即为零排放汽车。除此之外，国内目前正处于探索阶段的零碳内燃机，欧洲讨论较多的合成燃料 (e-fuels) 等，从生命周期来看也可实现零排放，不过这类技术的应用前景尚不能确定，相关资料也较为欠缺。插电式混合动力目前在乘用车领域有一定的应用，在商用车领域讨论较少。未来很长一段时间内燃油汽车仍将占据市场主体，传统混合动力技术则是对燃油汽车节能减排的重要加持。

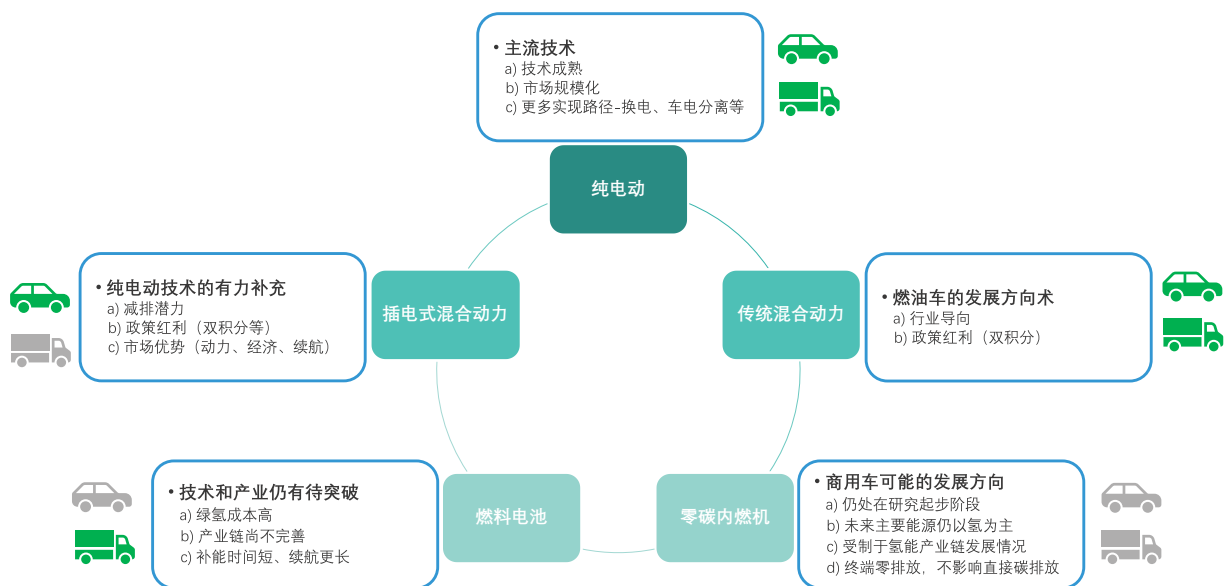
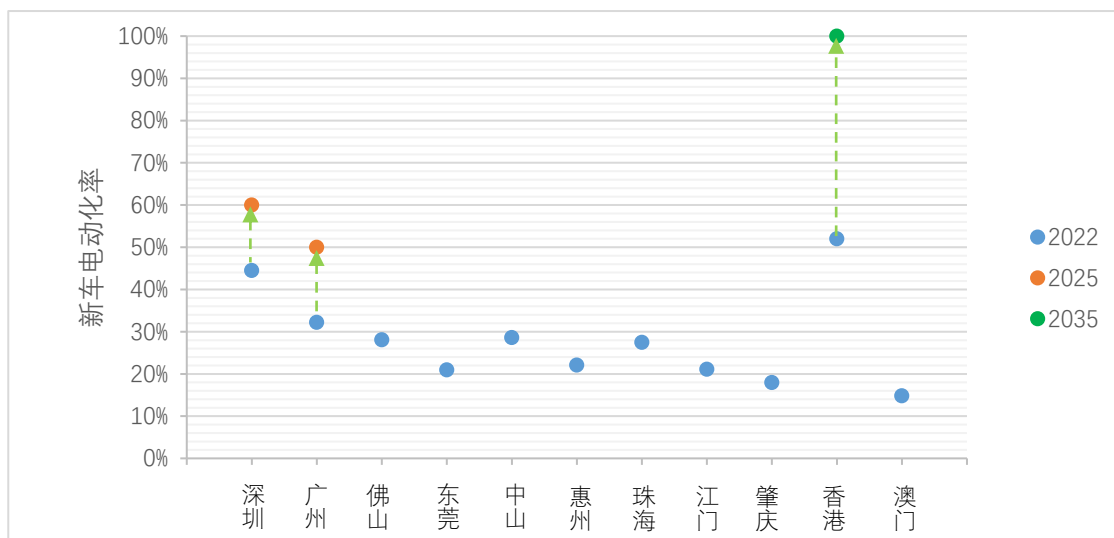


图 13 道路运输的主要减排技术

粤港澳大湾区城市中，珠三角九市汽车电动化的步伐较快，2022 年珠三角新能源乘用车共登记注册超过 66 万辆，新能源汽车在乘用车领域的渗透率达到 31%，深圳和广州新能源乘用车渗透率分别达到 45%和 32%。香港在 2022 年共销售电动私家车 19795 辆，新车电动化率高达 52%，但澳门的电动汽车销量不足千辆（2021）。在大湾区城市中，目前，香港提出 2035 年或以前停止燃油私家车登记，深圳和广州则提出了 2025 年的具体电动化目标。



注：澳门电动化率现状为 2021 年统计数据，来自当地统计年刊，数据包含轻型汽车和重型汽车；其他城市为 2022 年数据，来自乘用车上险数，其中，香港数据仅包含私家车。深圳和广州 2025 年电动化率目标数据分别来自于深圳市《新能源汽车推广应用工作方案（2021-2025 年）》和《广州市智能与新能源汽车创新发展“十四五”规划》，香港则在《香港电动车普及路线图》中提及“在 2035 年或以前停止新的燃油私家车登记”。

图 14 粤港澳大湾区城市新能源汽车渗透率（2022）

专栏二：香港汽车电动化转型

香港连续多年获评全球最自由经济体，市场灵活度高。与中国内地相比，香港汽车电动化呈现出较强的当地特色。

在私家车领域，香港电动化发展受市场成熟度影响大，私家车电动化渗透率呈现出典型的“先缓后快”的市场发展规律。2016年，香港新登记私家车中，电动汽车占比仅为7.3%，2022年这一比例迅速提升至52%，远高于中国内地乘用车市场的电动化渗透率水平（28%），2023年前5个月这一比例进一步增加至62%。据香港环境保护署（EPD）官员介绍，香港特区政府正在考虑是否将“2035年或之前停止燃油私家车登记”的时间节点进一步提前。

与之相对地，电动汽车在香港公交、货车等领域的应用则明显“遇冷”。能源与交通创新中心联合香港思匯政策研究所于2023年7月在香港举办了“香港道路交通净零排放”圆桌讨论，邀请了当地的多个利益相关方参与讨论，包括香港主要的巴士公司如九龙巴士和城巴，部分汽车企业如沃尔沃、Wisdom Motors，货主企业 Swire Coca-Cola 等。与内地不同，香港巴士为商业化运营，制约其电动化的最主要因素是成本，在缺乏政府高额补贴的情况下，企业难以通过自身来消化电动车辆与燃油车辆成本之间的差额，除非将这部分成本转嫁到乘客身上，而这将可能致使其流失大量的客流量。因此，香港巴士公司在电动化转型方面迟迟难以突破。在货车方面，电动货车整体市场仍处在发展初期，全球都面临着几乎类似的转型挑战，如成本高昂、充电时间较长等。

为鼓励汽车电动化转型，香港特区政府也出台了一系列利好政策，在商用车方面最重要的支持是于2011年设立的“绿色运输试验基金”，现更名为“新能源运输基金”。该基金面向运输营运商及慈善/非营利机构提供两种申请方式，包括“试验申请”和“应用申请”，以资助运输单位购买和应用具备减排潜力的新能源交通工具。基金详情及具体资助名单均可在香港生态及环境局网站查询

(<https://www.eeb.gov.hk/tc/new-energy-transport-fund.html>)。但根据能源与交通创新中心的调研，部分企业反映政府对上述基金申请的审批时间较长，效率有待提升。

3.1.2 铁路运输减排

铁路运输部门是单位能耗较低的部门，低于航空运输和公路运输¹⁹，因此从交通协同的角度来看，公路和航空运量转移到铁路，可以实现交通整体能耗和排放的降低。从铁路运输本身来看，减排路径与道路运输类似，包括降低单位运输能耗、进一步提升铁路电气化率，使用排放强度更低的清洁燃料等。

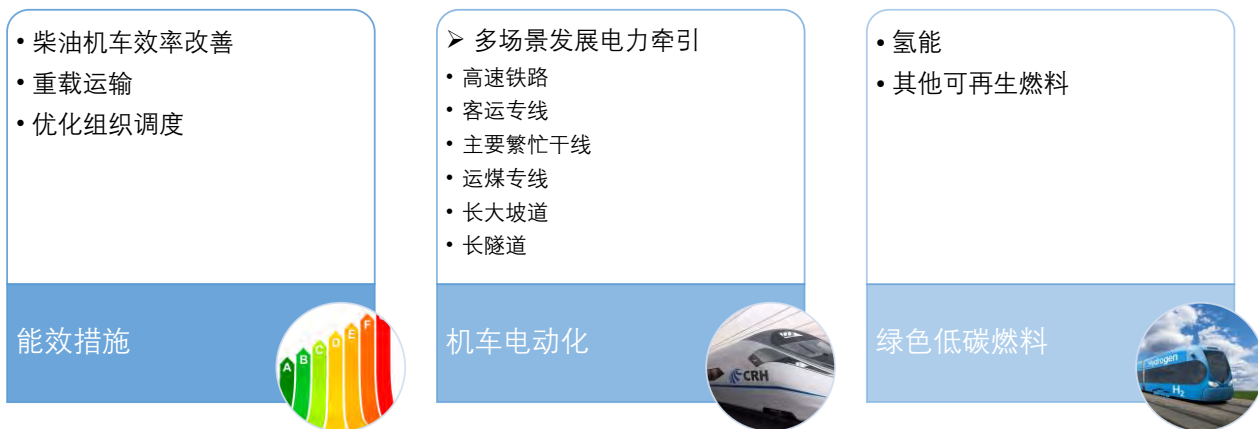
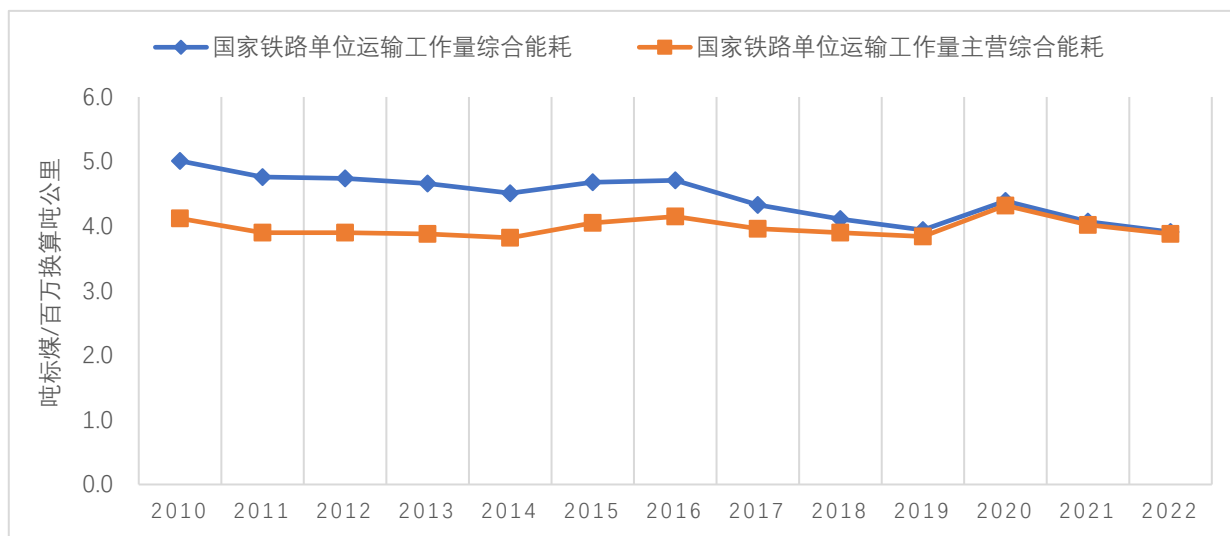


图 15 铁路运输主要减排措施

铁路运输单位能耗趋势如图 16 所示，我国铁路单位运输工作量主营综合能耗自 2010 年的 4.12 吨标煤/百万换算吨公里下降至 2019 年的 3.84 吨标煤/百万换算吨公里。受新冠疫情等多因素影响，2020 年铁路运输单位能耗略有回升，2021 年以来铁路运输单位能耗又呈现快速下降趋势，2022 年国家铁路单位运输工作量主营综合能耗降至 3.88 吨标煤/百万换算吨公里，与疫情前基本持平。



数据来源：历年《铁道统计公报》

图 16 我国铁路运输单位能耗发展趋势

发展电气化铁路，使用更加清洁、排放强度更低的电力替代柴油，是铁路运输减排的重要措施。我国的铁路电气化率已经达到 73.8% (2022 年)²⁰，处在全球领先地位。电气化铁路建设成本高昂，在某些区域接触网系统的需求可能超出区域电网负荷。为保证铁路运输系统的持续稳定，中国²¹、德国²²等国家也在积极试验零碳燃料机车，如氢能机车。罗兰贝格在《铁路环境下燃料电池和氢能使用》²³的研究中认为，到 2030 年，燃料电池和氢能可能取代 30% 的柴油机车。对大湾区而言，依托国内成熟的铁路电气化经验和越来越清洁的

电网系统，电气化仍将是未来铁路减排的主要方向。

3.1.3 水路运输（航运）减排

在公路、铁路、水路和航空四大交通领域，水路运输的碳排放强度最低²⁴。全球航运业碳排放约占总排放量的 2~3%²⁵，且增长较快，航运业具有高度流动性和跨国性特征，减排难度大²⁶。在我国的统计资料中，水路运输按照经营区域划分为内河运输、沿海运输和远洋运输，其中前两者属于国内运输，后者需要跨国流动。《京都议定书》没有将远洋船舶纳入义务减排的框架之中，而是将这个权力赋予了国际海事组织（IMO），该组织在第 70 届海上环境保护委员会（MEPC）上，通过了船舶温室气体减排战略路线图，确定了“到 2030 年，全球海运每单位运输活动的平均二氧化碳排放与 2008 年相比至少降低 40%，并努力争取到 2050 年降低 70%”的目标。基于这一目标，IMO 在 2018 年的 MEPC 72 上通过了船舶温室气体减排初步战略，并提出了短期、中期和长期减排措施。2023 年 7 月，IMO 通过了温室气体减排战略修订案，成员国一致通过“到 2050 年前后实现温室气体净零排放”的目标，并设置了 2030/2040 中期减排节点目标²⁷，标志着航运减排进程将有望进一步加速。

水路运输主要减排措施可分为五类（见图 17）：

- (1) 能效措施：又分为技术能效措施和营运能效措施。IMO 要求从 2023 年起所有适用船舶既要满足技术能效（EEXI）要求，还需要满足营运能效（CII）要求。
 - 技术能效措施是通过降低船舶阻力、提高推进装置效率等技术的应用，从而提高船舶整体能效水平，具体措施包括型线优化、船舶轻量化、气膜减阻、涂层减阻、高效推进装置、水动力节能装置等技术。技术能效措施具有较高的减排潜力，但投资成本也较高，主要用于新造船。
 - 营运能效措施可在船舶营运过程中从操作管理层面提高船舶能效水平，主要措施包括航速优化、纵倾优化、货物操作优化、设备管理优化等。营运能效措施的整体投资成本较低，更适合现有船进行减排。
- (2) 应用船用清洁燃料：主要包括 LNG、甲醇、生物柴油、氢和氨燃料，被认为是未来水运减排的主要措施之一。
- (3) 动力装置与系统优化：既包括对传统内燃机的优化，也包括创新应用燃料电池、锂电池等新能源动力装置。
- (4) 碳捕捉、利用与封存：即 CCUS，船舶 CCUS 系统一般由 CO₂ 捕捉、CO₂ 分离、CO₂ 液化存储和 CO₂ 利用封存四个部分。但由于在船舶上的应用存在多种挑战，未来前景存在一定不确定性²⁸。

- (5) 其他推动机制，如欧盟正式通过了将航运业纳入欧盟碳交易体系的立法提案²⁹，我国上海碳排放交易市场也已经将水运纳入进来³⁰。



图 17 水路运输主要减排措施

3.1.4 航空运输减排

航空运输需要极高的投资成本、较长的研发应用周期和超过的安全性要求，因而被认为是最难减排的领域之一³¹。目前，国际航空业碳排放约占总排放量的 2.5%³²，且仍处于快速增长阶段。全球航空业已经制定了积极目标，提出到 2050 年实现净零排放^{33,34}。要实现这一目标，需要长期明确的减排规划，以及合理高效的减排技术手段来支持。

国际航空业目前公认的碳减排措施主要包括以下四类（见图 18）。

- (1) 技术革新：既包括在现有技术的基础上继续提高机身和推进效率，也包括开发和试验纯电动、氢能、混合动力等新能源动力系统。技术革新对航空运输的减排将贯穿行业迈向净零排放的整个时期。
- (2) 更高效运营和基础设施：飞行阶段运营效率的提升包括提供空中管制效率以及制定更精确的飞行计划，减少飞机飞行时间从而减少用油量；在地面部分可以使用低排放和零排放车辆以降低排放。

- (3) 可持续航空燃料 (SAF): SAF 一直被认为是航空运输减排的主要措施之一。
- (4) 碳抵消计划及 CCUS: 这也是技术手段之外的其他减排推动机制, 目前效果虽未经核证, 但从长期来看仍然是国际航空业减排政策工具包的重要组成。



图 18 航空运输主要减排措施

3.2 主要影响因素

3.2.1 交通运输需求

交通运输需求是经济、社会发展的重要体现, 也是影响交通排放的主要因素之一。粤港澳大湾区社会高度开放, 经济十分发达, 未来交通需求还有十分巨大的增长空间。

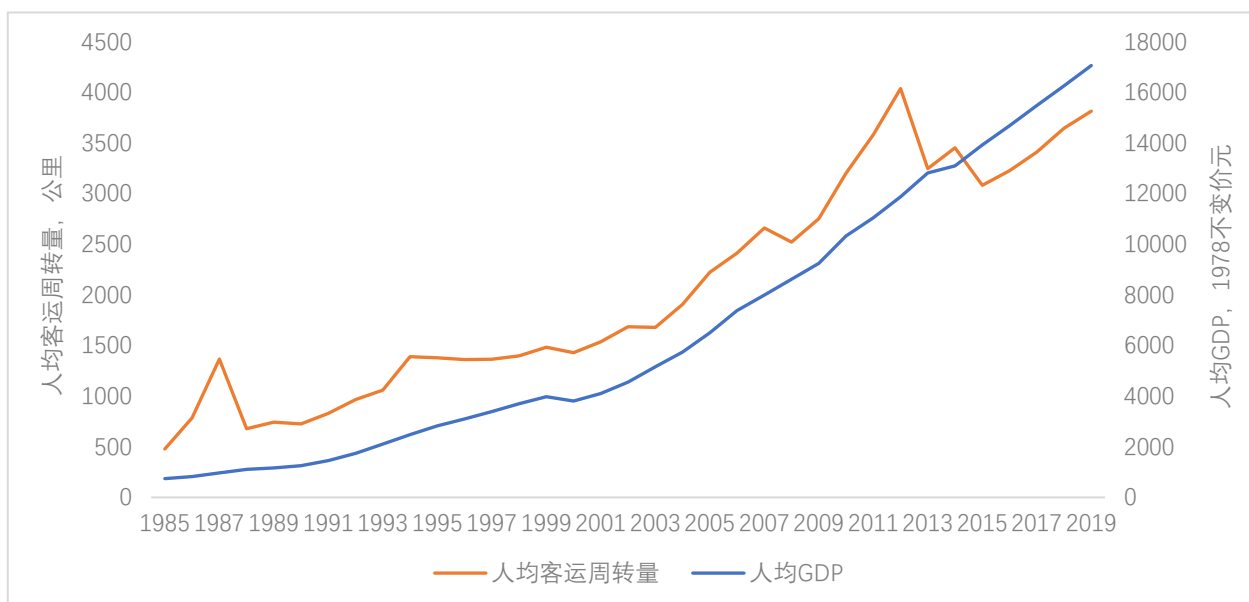
客运方面, 2019 年珠三角地区客运周转量超过 4000 亿人公里^⑦, 2020-2021 年受新冠疫情等因素影响客运周转量大幅下滑, 随着新冠病毒感染实施“乙类乙管”, 人员流动得到逐步恢复, 未来客运需求还将进一步回暖。香港作为重要的国际贸易和旅游城市, 每年抵港旅客在疫情之前超过 1.5 亿人次, 澳门第三产业发达, 疫情之前每年旅客人数也接近 4000 万人次^⑧。

有研究发现, 一些发达国家在完成工业化后人均客运周转量呈现平稳状态, 从历史增长来看, 美国、日

^⑦ 课题组根据统计年鉴数据统计得出。

^⑧ 课题组根据香港统计年刊和澳门统计暨普查局网站数据统计得出。

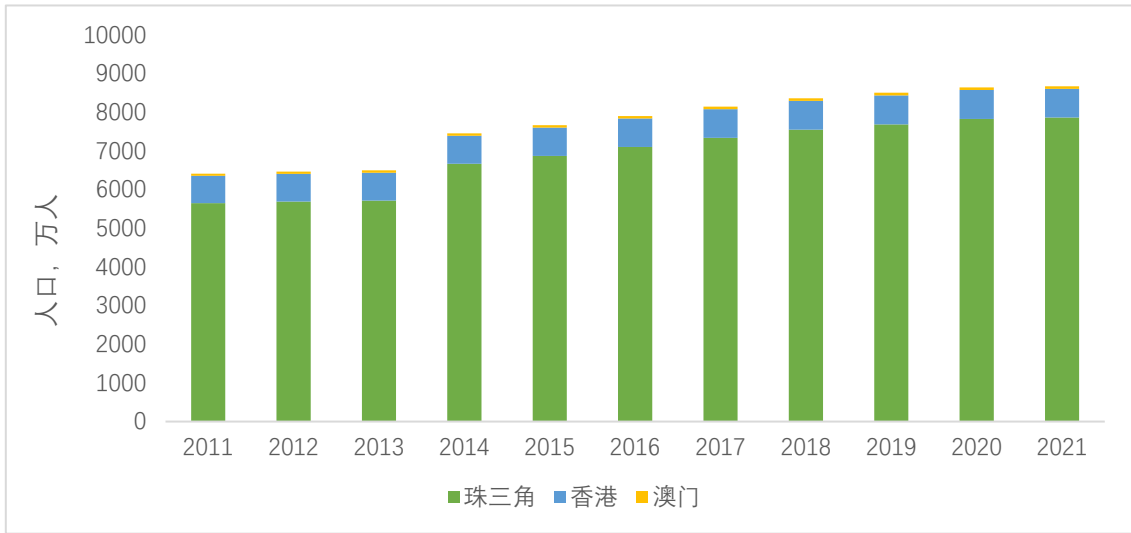
本等发达国家人均 GDP 增幅高于客运周转量增幅³⁵。广东省人均 GDP 自 1985 年以来增长了 22 倍，人均客运周转量只增加了不到 7 倍，人均 GDP 增幅远远高于人均客运周转量增加的幅度。



数据来源：广东省统计年鉴

图 19 广东省人均客运周转量与人均 GDP 趋势

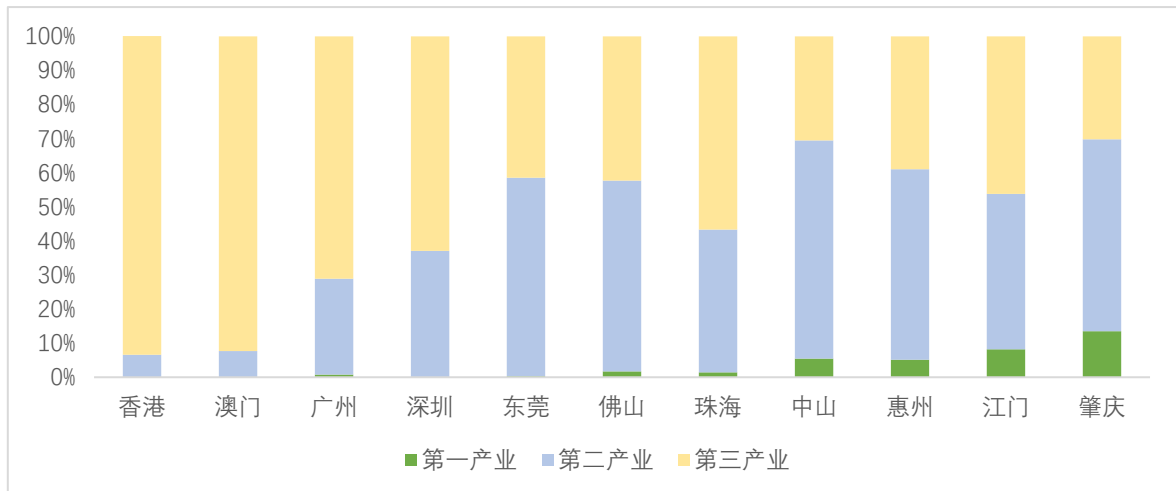
未来粤港澳大湾区客运量将受三大需求驱动：一是本地出行需求增长，粤港澳大湾区人口总量近年来呈现较快增长态势（见图 20），第七次全国人口普查结果以及《中国城市活力研究报告》³⁶均显示，广东省，尤其是珠三角具有很强的人口吸引力，在 2021 年度全国人口吸引力城市排名中，深圳和广州分列一、二位，东莞和佛山也跻身前十强。二是粤港澳大湾区都市圈的互动需求将进一步释放，《粤港澳大湾区发展规划纲要》提出要“构筑大湾区快速交通网络，力争实现大湾区主要城市间 1 小时通达”，港珠澳大桥、横琴口岸、深港陆路口岸等关键设施和服务也为大湾区城市间人员流动提供了极大便利。三是国际交流增长也将带来可观的客运需求，广东省实施的“144 小时便利签证”³⁷和“144 小时过境免签”政策³⁸极大方便了国际旅客，未来粤港澳大湾区凭借优越的地理、人文和经济环境还将带动更多的国际性人员流动。《广州市交通运输“十四五”规划》提出到“十四五”期末，实现航空旅客吞吐量 10000 万人次/年，铁路旅客发送量 1.6 亿人次。《深圳市综合交通“十四五”规划》提出到 2025 年实现机场旅客吞吐量达到 7000 万人次，港口集装箱吞吐量 3300 万标箱的目标。



数据来源：各地统计年鉴

图 20 粤港澳大湾区总人口变化趋势

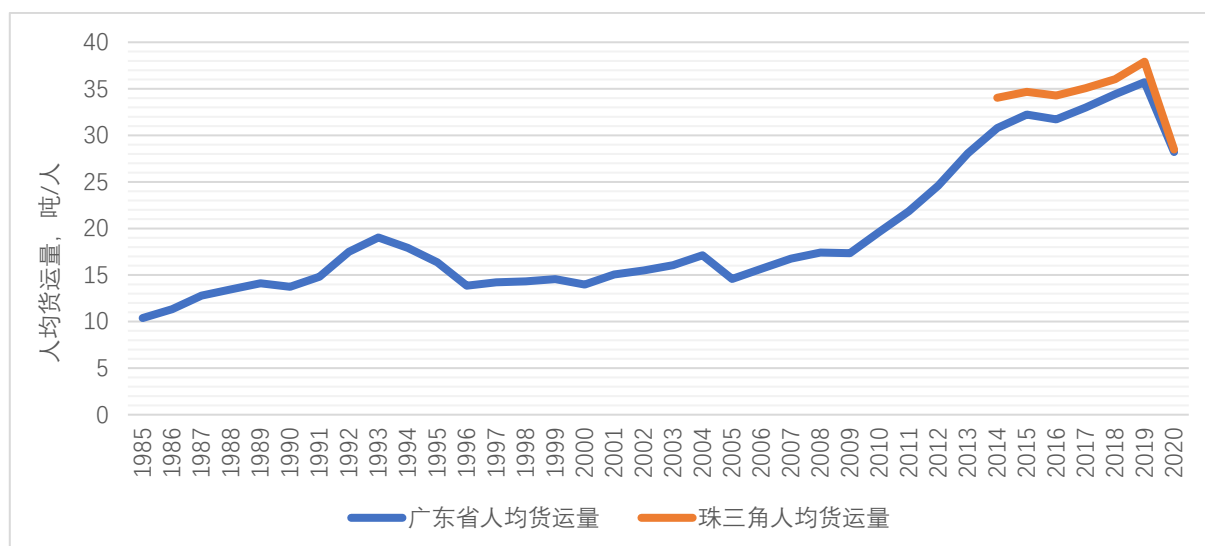
货运需求与经济发展之间的关系更加密切。大湾区城市中，第一产业增加值占地区生产总值比重远低于国家平均水平，第二产业和第三产业高度发达，决定了大湾区拥有旺盛的物流需求。珠三角城市间货运量位列全国城市群第二，物流需求强劲，从需求层面来看，电商和第三方物流需求覆盖珠三角九市，广州、深圳和东莞有大量的进出口物流需求，发达的制造业集群也是珠三角货运需求的一个重要推动因素³⁹。2021 年珠三角九市货运周转量达 2.61 万亿吨公里（含远洋运输），较 2016 年增长 35%。香港一直是国际贸易和物流中心之一，IATA 数据显示，2022 年香港国际机场全年共处理 420 万吨货物，成为全球最繁忙货运机场⁴⁰。澳门货运体量虽小，但随着《横琴粤澳深度合作区建设总体方案》⁴¹的出台，澳门也将进一步深化与珠海等内地城市之间的物流合作，为澳门货运增长提供新的契机。



数据来源：各地统计局

图 21 粤港澳大湾区城市产业结构组成 (2021)

发达国家到了后工业化阶段，人均货运量围绕在 50 吨/人左右的水平波动³⁵，广东省人均货运量在 2019 年达到 35.7 吨/人，珠三角人均货运量高于全省平均，2019 年为 37.9 吨/人。本研究预测，珠三角在完成工业化后人均货运量也能达到 50 吨/人左右的水平。



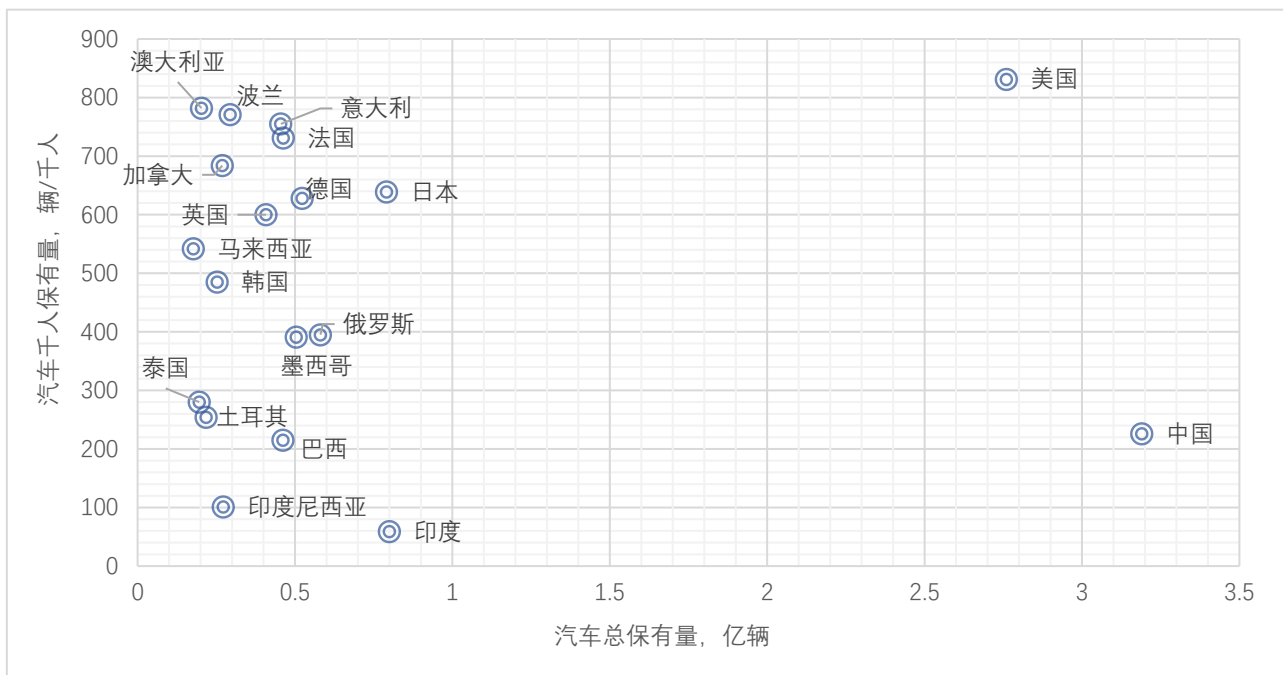
数据来源：广东省及各市统计年鉴，珠三角人均货运量不含远洋部分。

图 22 广东省和珠三角人均货运量趋势

3.2.2 汽车保有量

在所有交通工具中，汽车保有量最大，产生的排放最高，因而也是交通碳减排的重点。近十几年粤港澳大湾区汽车保有量实现了飞跃式增长，2021 年汽车总保有量超过 2016 万辆，较 2006 年增长了 4 倍之多，尤其以珠三角九市增长最为迅速。

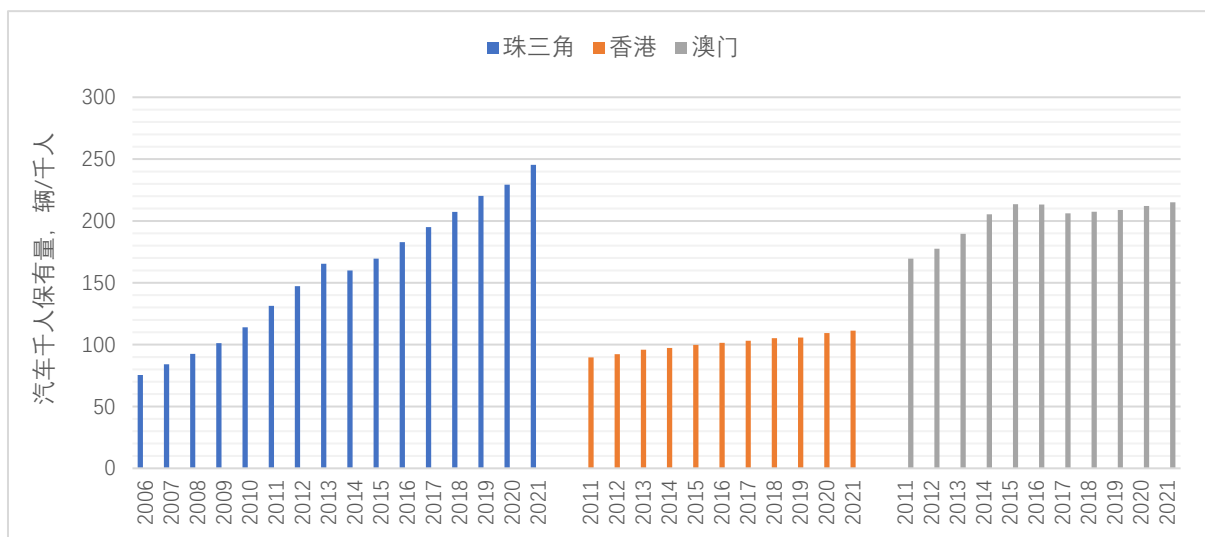
千人保有量可以在一定程度上反映地区的经济发展水平，也是国际上常用的用于预测汽车总保有量的重要指标参数。如图 23 所示，在全球主要汽车市场中，美国汽车总保有量约为 2.8 亿辆，千人保有量高达 831 辆，澳大利亚和波兰两国汽车千人保有量分别列二三位，达到 782 辆和 771 辆，日本和韩国汽车千人保有量分别为 639 辆和 485 辆。我国的汽车总保有量最高，达到 3.19 亿辆（2022 年底数据），但千人保有量仅为 226 辆，远远低于欧美日等发达国家和地区。



数据来源：CET 根据公开资料整理，图中 20 个国家的汽车保有量位于全球前二十。

图 23 全球主要汽车市场汽车总保有量与千人保有量情况

根据统计数据测算，珠三角九市汽车千人保有量从 2006 年的 75 辆增加至 2021 年的 245 辆，略高于全国平均水平，香港和澳门地区陆地面积小，人口稠密，且已经高度工业化，汽车千人保有量较低且增幅不大。一些分析认为，我国汽车千人保有量上限（即饱和值）约为 400~450 辆⁴²，以此为基础推算，粤港澳大湾区汽车总保有量未来还将有很大增长空间。



数据来源：CET 根据统计年鉴数据测算

图 24 粤港澳大湾区三地汽车千人保有量变化趋势

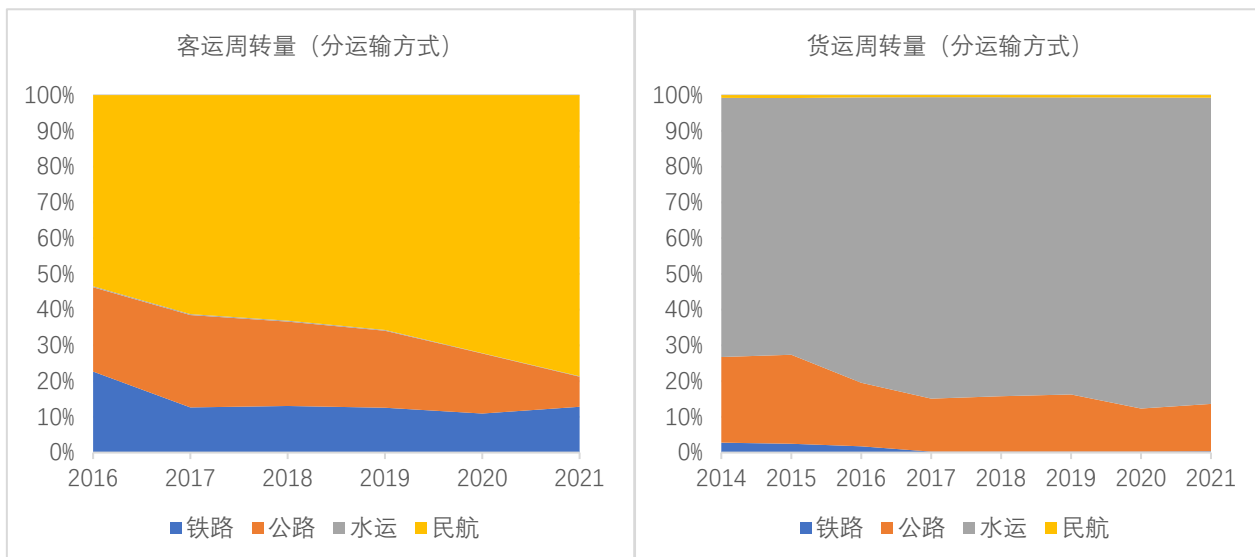
3.2.3 运输结构

由于不同运输方式的单位能耗之间存在较大差异，在同样运量下，运输结构优化将能使总体碳排放量显著下降。根据相关行业统计和专项调查，公路营运车辆单位周转量能耗为 170 千克标煤/万换算吨公里（2021 年，公路专业货运企业数据），水运为 26 千克标煤/万换算吨公里（2019 年，远洋和沿海货运企业数据），铁路为 40 千克标煤/万换算吨公里（2021 年，国家铁路单位运输工作量主营能耗数据），航空则高达 3090 千克标煤/万换算吨公里（2021 年，行业统计公报数据）。公路在我国的货运体系中占据重要地位，而铁路和水运单位周转量能耗明显低于公路，为降低排放，我国自 2018 年以来大力推行大宗货物“公转铁”“公转水”，取得了积极成效。

迈入“十四五”，国家和地方层面继续强调优化货运组织结构，提升多式联运发展水平。交通运输部印发了《综合运输服务“十四五”发展规划》，国务院印发了《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》，广东省也通过《广东省“十四五”现代物流体系建设实施方案》《广东省综合交通运输体系“十四五”发展规划》《广东省推进多式联运发展优化调整运输结构实施方案》等多个政策文件提出大力发展多式联运，促进大宗货物及中长距离货运“公转铁”“公转水”。

运输结构调整主要是指对外城际交通的运力分配和调整，这部分交通运输所产生的排放仅有部分发生在大湾区城市之内。历史数据显示，在客运方面，珠三角（属地）民航客运周转量占比最高，2017-2019 年均超过 60%（不含国际客运），2020-2021 年民航客运周转量比例突破 70%，铁路客运周转量占比维持在 13% 左右，公路客运周转量在新冠疫情期间持续下降，2021 年一度低于 10%。由于客运周转量统计中并不包含私人汽车和城市内部交通，而随着经济水平的提高，私家车在探亲、周边游等中短途出行中的使用比例逐步提升⁴³，公路客运量的变化趋势也在预期之内。货运方面，珠三角水运发达，在货运方面水运占比最高，2016 年以来水运周转量占比均超过 80%，公路货运周转量占比降到 15%以下^⑨，民航货运周转量占比未突破 1%，铁路货运周转量占比近几年不足 0.5%。

^⑨ 根据内河、沿海和与远洋货运历史占比数据调整水运数据后结果



注：数据来自各地统计部门，统计数据中未对水运细分方式（内河、沿海和远洋）作区分，在研究中基于广东省往年情况，粗略地将水路货运总周转量的 50%作为内河及沿海周转量数据；民航统计数据包含国际部分，在研究中参考南航历年国内和国际客运周转量占比进行拆解。

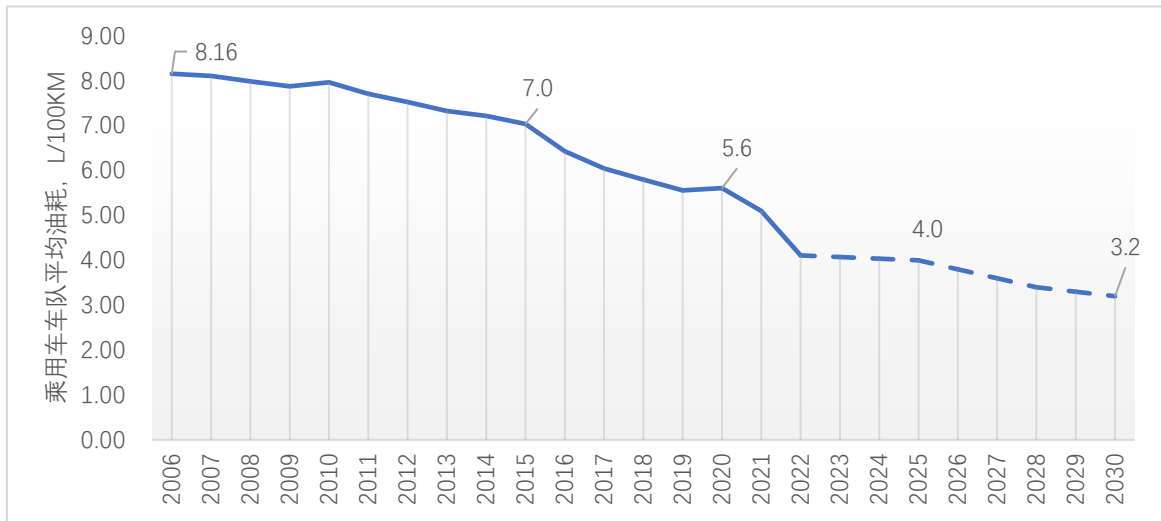
图 25 珠三角各类运输方式客、货运占比

香港和澳门两地土地面积小，内部交通方式主要以道路交通和城市轨道交通为主，城市内水路客运规模很小，几乎可以忽略不计。依据《粤港澳大湾区城际铁路建设规划》⁴⁴，未来大湾区主要城市间将能实现 1 小时通达，铁路在客运方面的地位还将进一步加强，尤其是随着广深高铁香港段长途服务的全面恢复，截至 2023 年 3 月，内地 66 个城市可乘坐高铁直接到达香港西九龙站⁴⁵，高铁出行有望在一定程度上替代航空，实现“航空转高铁”的结构性调整。

研究中假设铁路客运周转量比例将进一步提升，公路客运周转量则缓慢下降但仍将占据一定比例，以满足差异化出行需求，民航客运单耗虽高，但在长距离、时效性强的出行需求方面无法被取代，客运周转量占比仍将有一定增长空间。货运方面，随着多式联运，尤其是铁水联运⁴⁶体系不断完善，研究预测未来水运在大湾区货物运输方面的主体地位还将进一步加强，公路货运周转量比例略有下降，但由于大湾区内公路货运占比本身不高，且公路有时效性强、灵活等诸多优势，未来还将是货物运输的一个重要途径。

3.2.4 单位运输能耗

单位运输能耗是指单位运输周转量或单位运行里程所消耗的能源，不同交通工具之间差异巨大。对非营运车辆而言，百公里能耗是最主要的衡量标准。我国（非港澳台地区）通过《燃料消耗量限值标准》来促使新车能耗不断下降，其中，乘用车需满足 2025 年新车平均燃料消耗量水平降至 4.0 L/100km（基于 NDEC 循环）的目标⁴⁷。

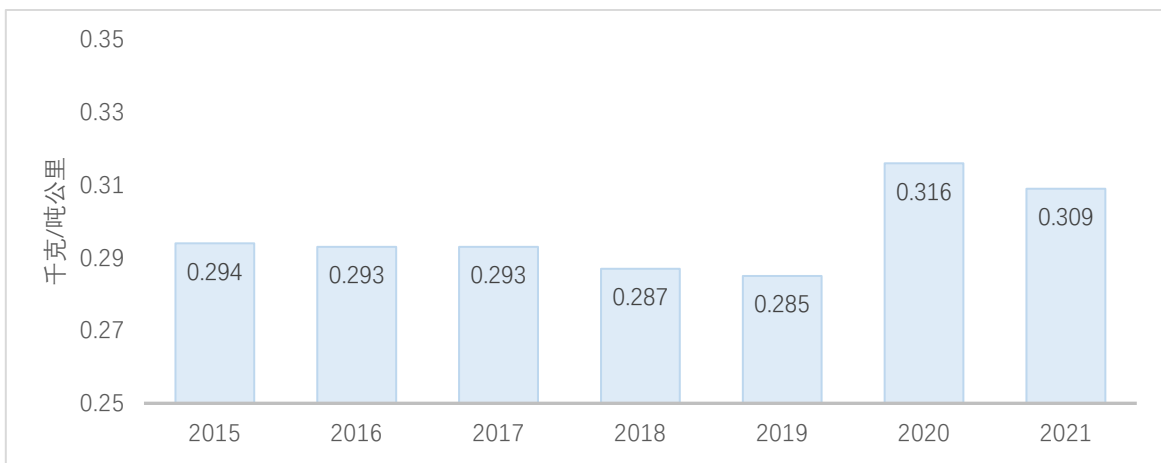


数据来源：工信部及相关目标文件，乘用车平均燃料消耗量核算中包含新能源汽车能耗及产量倍数的优惠折算，CET 整理。

图 26 我国乘用车车队平均燃料消耗量趋势与目标

单位运输能耗的降低是驱动交通碳排放不断下降的重要因素之一。《绿色交通“十四五”发展规划》⁴⁸中提出，到 2025 年营运车辆和营运船舶单位运输周转量二氧化碳排放较 2020 年下降 5%和 3.5%的目标，《2030 年前碳达峰行动方案》⁴⁹指出，2030 年国家铁路单位换算周转量综合能耗较 2020 年下降 10%，营运交通工具单位换算周转量碳排放强度较 2020 年下降 9.5%。

民航是单位运输能耗最高的交通部门，目前仍以传统航煤为主要燃料，因此单位运输能耗的下降对民航减排至关重要。2019 年我国民航单位周转量油耗为 0.285 千克/吨公里，达到历史最优，在全球主要航空大国中也处于领先。2020-2021 年受新冠疫情影响，民航运输客座率、载运率、飞机日用率等指标大幅下降，造成民航能源消费和碳排放总量及强度值的异常。《“十四五”民航绿色发展专项规划》⁵⁰对民航绿色发展提出预期性指标，2025 年机队吨公里油耗达到 0.293 千克。



数据来源：《民航行业发展统计公报》，CET 整理。

图 27 中国民航吨公里油耗趋势

3.2.5 能源结构

从上文对各类交通方式减排路径的分析来看，向更清洁、更低碳的能源转型是未来交通减排的重要任务。不同交通方式对能源的需求不同，但最终都将由传统化石能源向终端零排放的电力、氢能以及生命周期近零排放的绿色能源转变。

道路交通和铁路目前的能源转型方向已经很明显，电力和氢能是未来最主要的能源利用形式。截至 2023 年上半年，我国纯电动汽车保有量达 1259.4 万辆，占汽车总量的 3.8%⁵¹。电力是我国最重要的终端能源类型之一，2021 年全国电能占终端能源消费总量比重为 26.9%⁵²，预计到 2060 年这一比例将提升至 66%~70%⁵³。⁵⁴ 电力零碳排放是我国实现碳中和目标的前提，我国电力生产系统清洁化程度不断提升，火力发电占比已经从 2012 年的 78.72% 下降到 2022 年的 66.5%，火电装机容量占比下降至 52.07%⁵⁵，全国单位发电量二氧化碳排放量约 541 g/kWh，较 2005 年下降 36.9%⁵⁶。氢能被认为是 21 世纪“终极能源”，具有清洁低碳、热值高、来源多样和储运灵活等特点。我国发布的《氢能产业发展中长期规划（2021-2035）》⁵⁷ 中明确了氢能战略地位，强调坚持清洁低碳的原则重点发展可再生能源制氢（绿氢）技术。受制于高昂的成本因素，利用风电、水电、太阳能等可再生能源通过电解水制备的绿氢在全球氢能产业的占比很低。广东省是燃料电池汽车示范城市群，在产业链、技术和应用方面积累了丰富经验，香港特区政府也将氢能作为道路交通零排放的重要选项^⑩。未来在顶层设计、政策利好的驱动下，氢能在交通领域的应用前景比较乐观。

电池技术往往适用于短距离和小规模操作，对水运而言，电气化难以应用到远洋航行，在内河航运中有较大优势，尤其是在旅游客船、公务船和吨位较小的货船上未来可得到广泛应用⁵⁸。例如，连接港岛和九龙间的重要交通工具——天星小轮就被香港特区政府督促换成电动渡轮。综合考虑到续航、安全性等因素，LNG、甲醇、氨等燃料在船舶应用的研究和试点工作也在陆续开展。在近期，LNG 清洁燃料也是国际航运业减排的重要选择之一，LNG 船队订单增幅远高于其他船队⁵⁹，但 LNG 直接燃烧对碳减排的贡献有限，使用过程中甲烷逃逸也会增加温室气体排放，而且供应及价格不稳定²⁶。交通运输部在 2013 年出台的《关于推进水运行业应用液化天然气的指导意见》⁶⁰ 中指出，“到 2020 年内河运输船舶能源消耗中 LNG 的比例达到 10% 以上”，但据相关专家介绍，目前我国仅有几百艘船舶可用 LNG，且仅有部分可实际使用^⑪。氨虽然作为化肥已经被广泛应用和交易，但液氨易挥发，且有毒性和腐蚀性，作为水运燃料的前景并不乐观。Longspur Research 在《甲醇和航运》这一报告中，从减排能力、能源密度、成本和易用程度四个维度对比了不同船用燃料，甲醇因技术成熟、基础设施改造难度费用低、使用安全、成本低等诸多优势，被认为是目前航运领域绿色燃料的最佳选择⁶¹。

^⑩ 观点整理自能源与交通创新中心与香港交通运营企业及环境保护署官员的交流。

^⑪ 观点和数据来自于专家采访。

专栏三：港珠澳电力清洁化发展目标

南方电网——南方电网供电区域为广东、广西、云南、贵州、海南五省及港澳地区，是大湾区清洁电力的最重要供应者。“十四五”期间，《南方电网公司碳达峰行动方案》发布，文件指出要“全力服务支撑南方五省区及港澳地区 2030 年前实现碳达峰，2060 年前在全国率先实现碳中和”。2022 年，南方电网经营区域内非化石能源装机占比 57.9%，非化石能源电量占比 52%，可再生能源发电利用率达 99.83%。

香港电力——香港所用电力有两大来源，一是本地发电厂，另一个是由中国内地进口（来自南方电网）。2021 年，香港电力消费量为 164578 太焦耳，其中，27.5%来自于内地进口。香港本地有两家电力供应公司，中华电力有限公司（CLP，下称“中华电力”）和香港电灯有限公司（下称“港灯”），这两家公司由投资者拥有，不以专营权方式运营，并已自愿与政府就财政事宜订立相互协议（管制计划协议）。中华电力于 1901 年成立，为九龙及新界，包括大屿山、长洲和大部分离岛供应电力，港灯于 1889 年成立，供应电力予港岛、鸭脷洲和南丫岛。2021 年，中华电力和港灯在香港本地售电量占比分别为 77.3%（内地进口电力由中华电力负责）和 22.7%。香港发电燃料以天然气为主，占比 48%（2020 年，下同），核能（大亚湾核电站使用）及可再生能源占比 28%，煤电占比 24%。为配合碳中和目标，中华电力不断更新《气候愿景 2050》，致力于 2050 年底前，在整个价值链中实现净零温室气体排放，港灯也承诺“在 2035 年或之前将生产每度电的范畴 1 温室气体排放量较 2019 年水平下降 68.4%”并计划“在 2050 年前令业务运营全面达至碳中和”。

澳门电力——澳门电力股份有限公司（简称“澳电”）是在澳门特别行政区提供输送、分配及出售高、中和低压电力公共服务的专营机构。澳门电力主要来源于南网购电和本地发电厂，其中，南网购电在澳门电力消费中的占比由 2010 年的 73%提高至 2021 年的 92%，澳门本地发电机组主要为重油机组和天然气机组。根据澳电披露数据测算，2021 年澳门电力系统平均碳排放强度为 513.2 g CO₂e/kWh。为实现碳中和目标，澳门电力系统未来将在源头减碳（清洁能源替代）、完善输配电网以及采用其他减排措施（碳交易、造林碳汇等）等方面不断加强，力争在 2050~2060 年间实现碳中和。

研究团队从香港环保署官员处了解，香港特区政府更倾向于甲醇作为未来船用绿色燃料的首选，不过对于内河使用的渡轮仍将以电动船舶为替代首选。2023 年香港《行政长官 2023 年施政报告》指出要“推动新能源交通产业”，其中，重点提及要研究为本地船舶及远洋船提供绿色甲醇加注的可行性，并建设加注设施和供应链⁶²。

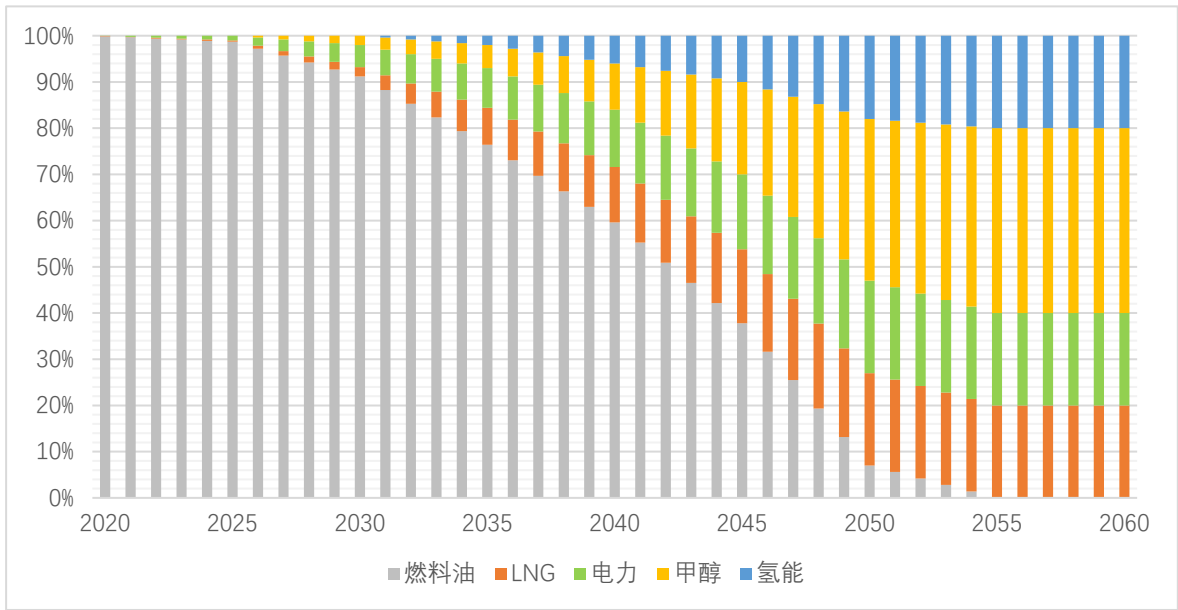


图 28 水运燃料结构组成 (2050 净零碳排放情景)

航空运输的特殊性决定了其对能源要求的严苛。从减排角度而言，电动飞机或氢能飞机无疑具备最大的减排潜力，但在技术层面仍有多重障碍，应用在长途飞行中的难度也极大。国际民用航空组织 (ICAO)、国际航空运输协会 (IATA) 均将 SAF 作为长期且可持续的航空减排选择：前者发起的“国际航空业碳抵消与削减机制” (CORSIA) 从 2021 年起允许航空运营商使用 SAF 冲抵碳排放抵消量⁶³；后者研究认为要实现 2050 年航空碳排放净零，SAF 将贡献 65%的减排量⁶⁴。目前，SAF 的添加比例一般被要求不超过 50%，不过，从技术角度来说，未来可以实现 100% 使用 SAF 替代传统航煤。例如，波音公司在 2018 年就已经测试过飞机 100% 使用 SAF⁶⁵，并积极推动实现到 2030 年其所有机型均支持使用 100%的 SAF⁶⁶，以致力于航空减碳事业。

专栏四：不同国家、地区和航空公司对 SAF 使用比例提出了要求

欧洲——欧盟委员会在 2021 年提出的“Fit for 55”一揽子政策中，建议在航空运输中使用 SAF，拟议的规则规定了燃料供应商和航空公司在欧盟层面的义务，通过引入一项适用于所有从欧洲机场起飞的航班的指令来扩大 SAF 的应用。SAF 的应用比例将从 2025 年 2% 增加至 2050 年 63%，并设定了合成燃料（e-fuels）的最低比例，据欧盟航空安全总署（EASA）官网解释，合成燃料是由风能、太阳能等可再生能源与水电解后产生的氢和 CO₂ 合成的燃料。在 SAF 中添加合成燃料将能降低排放，也是未来将可再生氢能应用在航空运输中的重要选项。

美国——美国《可再生燃料标准》（RFS）以及加州《低碳燃料标准》（LCFS）中都将 SAF 作为“opt-in”燃料，生产或销售商可以通过 SAF 获得相应积分并出售。2021 年，拜登政府宣布了一系列针对 SAF 的支持政策，包括 SAF 税收抵免（tax credit），通过 Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge 战略激励 SAF 生产，以满足 2030 年至少 30 亿加仑的供应，到 2050 年 SAF 生产能够 100% 满足航空燃油需求（约 350 亿加仑/年）。

中国——《“十四五”民航绿色发展专项规划》预期，2025 年可持续航空燃料消费量 5 万吨，2021 年中国民航燃油消费量共计 2647 万吨，假设这一基数不变，届时 SAF 在中国民航燃油中的占比仅为 0.19%，远低于其他国家和地区的要求。据了解，中国民航局将有望于 2023 年底出台 SAF 应用的相关文件，具体内容和目标暂未对外公开。

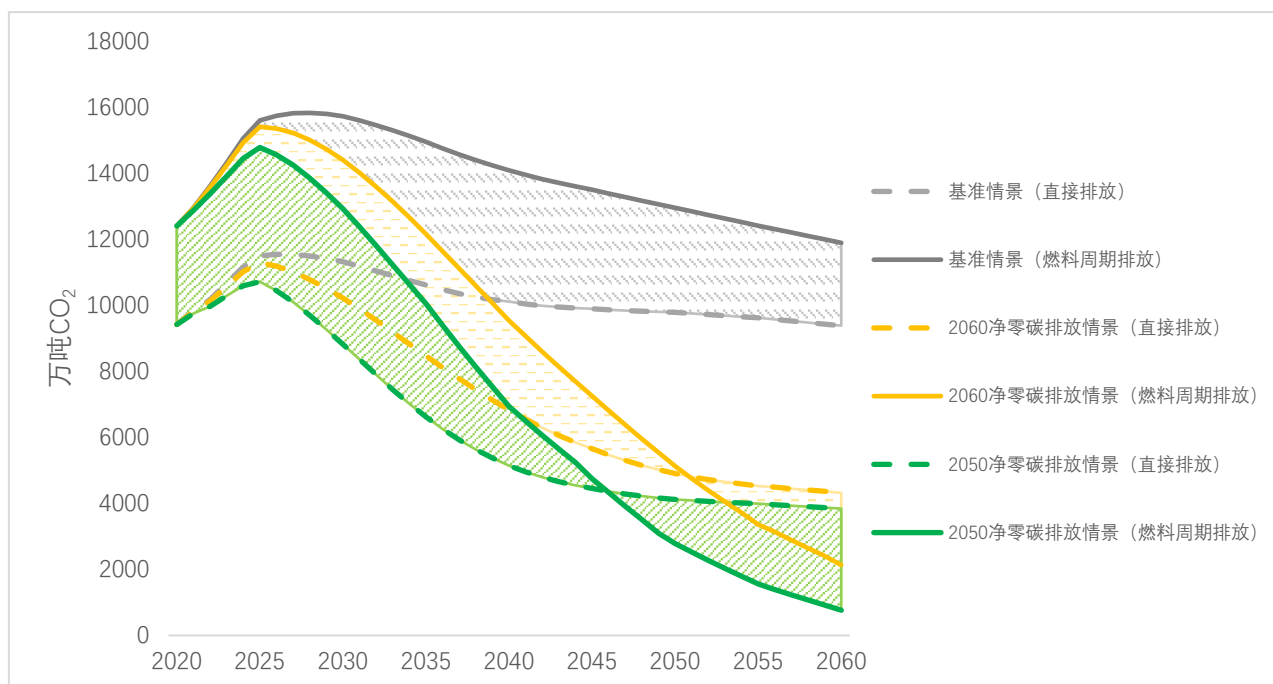
《全球可持续航空燃料宣言》——2022 年 2 月，空中客车、罗尔斯·罗伊斯、赛峰与新加坡航空在新加坡航展期间签署了《全球可持续航空燃料宣言》，承诺促进 SAF 的开发、生产和使用。空中客车首席技术官 Sabine Klauke 表示：“空中客车致力于在 2050 年前实现航空业碳中和这一共同目标。为实现这些目标确定了一些举措，而使用可持续航空燃料是实现脱碳道路上的主要支柱之一，在整个可持续航空燃料生命周期中，可减少高达 80% 的二氧化碳排放。目前，所有空客飞机已获得使用 50% 可持续航空燃料飞行的认证，而这一比例将于 2030 年达到 100%。目前的挑战是在全球范围内进一步提升可持续航空燃料的使用，并通过一些激励措施及长期政策提升号召力。该宣言将完全支持这一点，空客也正在邀请更多业内参与者加入该倡议。”

3.3 粤港澳大湾区交通能耗与碳排放趋势

3.3.1 全口径交通碳排放

2020 年，大湾区交通整体碳排放量接近 9000 万吨，其中珠三角排放贡献比例高达 93%。若不施加更加严格的政策手段和目标，大湾区全口径交通碳排放将在 2027 年左右达到峰值，至 2060 年碳排放较峰值水平下降 20%，届时仍将产生大量的碳排放。换言之，现有政策难以推动达峰后交通碳排放量的持续快速下降。在 2050 净零碳排放情景下，大湾区全口径交通碳排放约在 2025 年达峰，到世纪中叶，道路交通基本实现净零碳排放，全口径交通碳排放较峰值下降 62%。

若考虑交通燃料上游排放（即“燃料周期碳排放”），粤港澳大湾区全口径交通燃料周期碳排放不迟于2028年达峰，峰值碳排放量接近1.6亿吨。在2060及2050净零碳排放情景下，燃料上游碳排放量分别从2051年和2046年转为负值，表明从这一时期开始，低碳燃料上游的固碳量已经完全抵消了交通燃料生产所产生的碳排放，并可对直接碳排放进行逐步抵消。在2050净零碳排放情景下，至2050年大湾区全口径交通燃料周期碳排放较其峰值可下降80%以上。

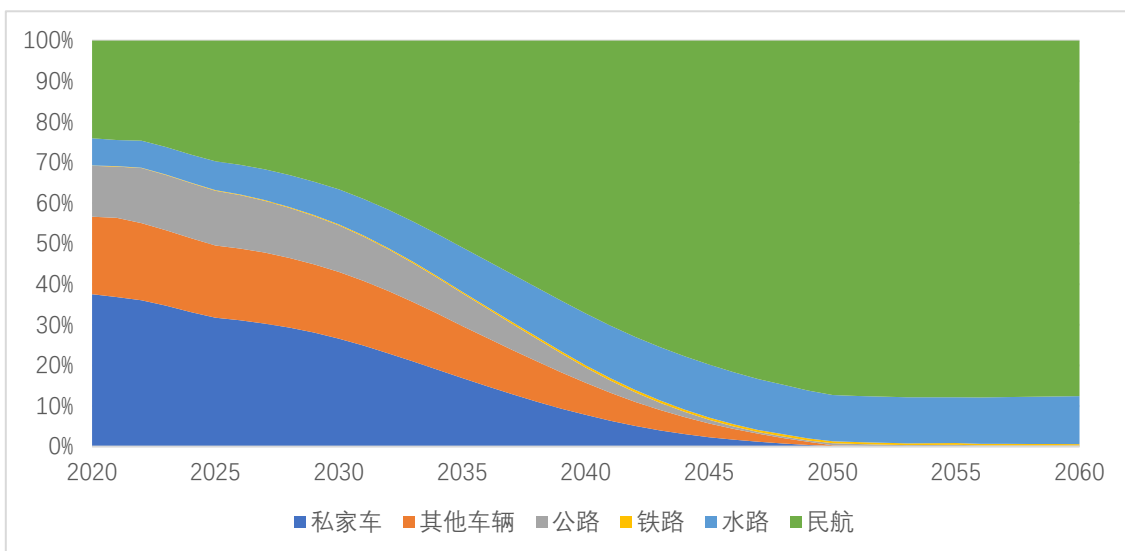


注：阴影部分表示交通燃料上游排放，澳门地区仅包括道路交通排放。

图 29 粤港澳大湾区全口径交通碳排放趋势

私家车是大湾区最大的交通碳排放源，2020 年对交通碳排放贡献率达到 40%，令人欣慰的是，私家车正加速向电动化转型，越来越成熟的电动汽车市场以及香港“2035 年或之前停止燃油私家车登记”等政策也促使私家车碳排放量不断下降。其他道路车辆（含公路客货运车辆）目前贡献了 28%的碳排放量，这部分碳排放主要来自于中重型货车和环卫、渣土等专用车。大湾区铁路运量占比不高，且由于铁路电气化程度不断提升，故在交通碳排放中的占比很低。

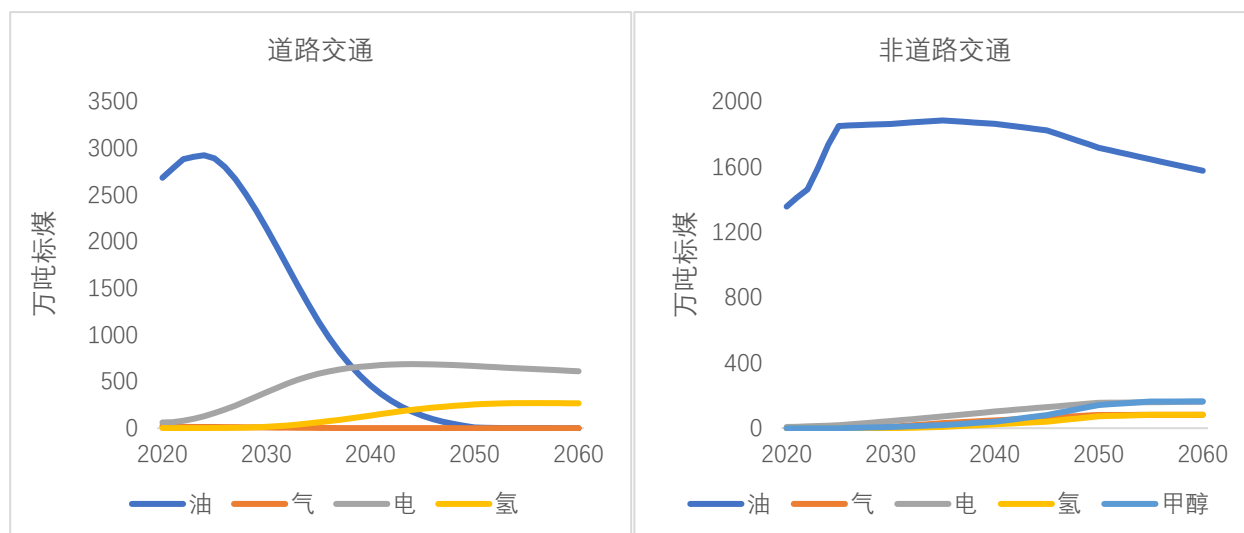
基于现有技术路径，净零碳排放情景可使道路车辆和铁路在对应时间节点接近零排放，但水路和民航运输的自身属性决定了其使用燃料的多元性，难以通过使用终端零排放的电力等清洁燃料实现净零碳排放。现阶段水路和民航碳排放占总排放量中的占比分别约为 7%和 25%。在 2050 净零碳排放情景下，民航和水运成为 2040 年后最主要的交通碳排放源。



注：图中排放数据是指直接碳排放

图 30 粤港澳大湾区各类交通方式碳排放占比 (2050 净零碳排放情景)

图 31 展示了各类交通方式的能源消耗量情况。对道路交通而言，油类的综合消耗量最大，不过从 2024 年起油类消耗量由峰值水平开始下降，在 2039 年前后电力消耗量超过油类，成为道路交通最主要的能源类型。至 2050 年，电力在道路交通能耗中的占比达到 72%，届时氢能占比为 27%。对非道路交通而言，油类的总体消耗量远远高于其他能源类型，即便在 2050 净零碳排放情景下，油类消耗量也需要在 2035 年左右才能达峰。除铁路外，水运和民航对电力的利用程度有限，电力在非道路交通能耗中的占比较低，至 2050 年仅为 7%左右，届时氢能占比约为 3%。



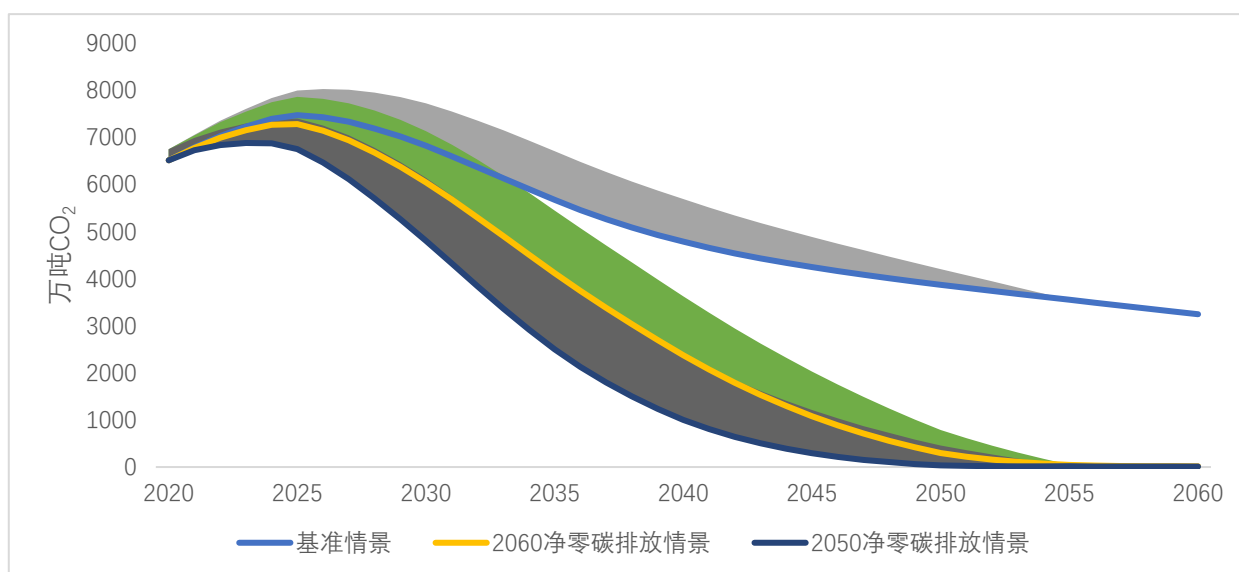
注：油包含汽油、柴油、船用燃料油、传统航煤和 SAF；气包括 LNG 和 LPG，甲醇指使用在船舶上的燃料甲醇。

图 31 2050 净零碳排放情景下粤港澳大湾区不同交通方式能源消耗量趋势

3.3.2 道路交通碳排放

道路交通是最主要的交通排放源，2020 年大湾区道路交通碳排放量占全口径交通总排放量的比例接近 70%。在基准情景下，大湾区道路交通碳排放量约在 2025 年前后达峰，峰值碳排放量较 2022 年增加 6%，约为 6800 万吨。现有政策可促使大湾区道路交通排放在达峰后呈现比较明显的下降趋势，至 2060 年道路交通碳排放量下降至 2590 万吨，较峰值水平降低 62%。

若在近期加快零排放汽车的推广同时对传统车辆进行节能减排管理，大湾区道路交通碳排放量几乎不再上升，即已经进入平台期（2050 净零碳排放情景），后期则快速下降直至达到零碳排放。



注：曲线上方阴影指相应情景下来自所使用电力发电端的 CO₂ 排放量。

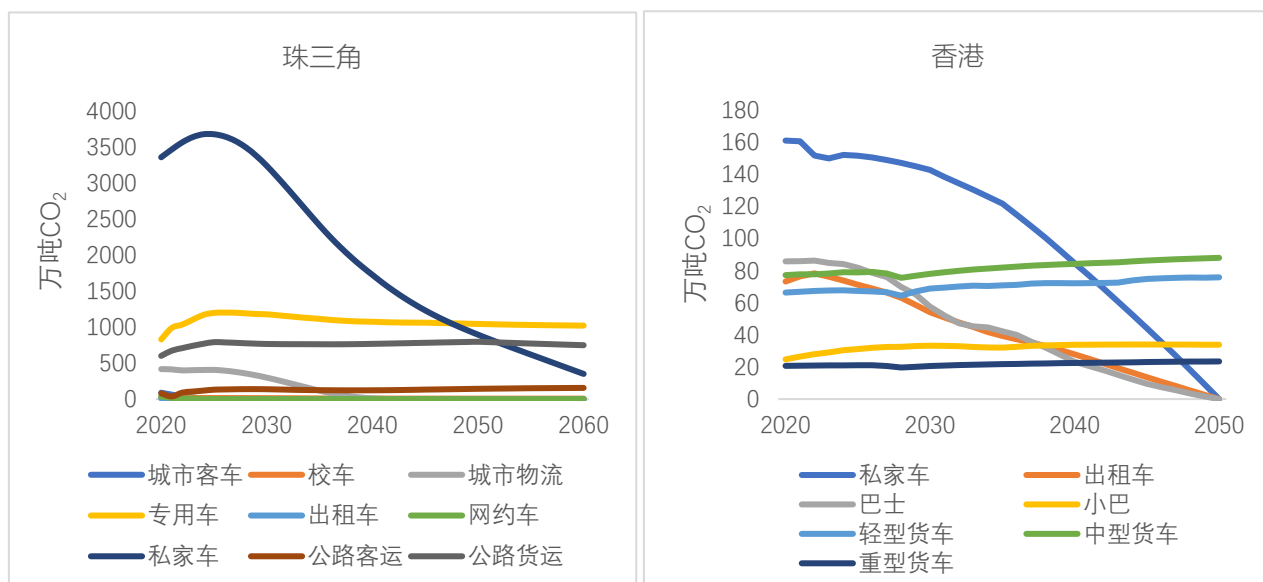
图 32 粤港澳大湾区道路交通碳排放趋势

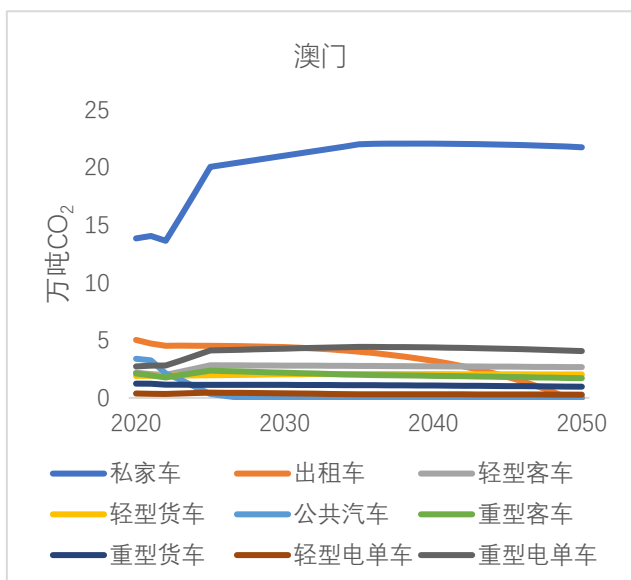
在道路交通领域，私家车排放占比最高，降低私家车碳排放也是促进道路交通减排的主要任务之一。在珠三角地区，私家车电动化发展趋势良好，尤其是深圳和广州两座大城市在电动化汽车的推广方面做出了很好的示范。2023 年上半年深圳市新能源汽车渗透率超 60%⁶⁷，广州市新能源乘用车渗透率超过 43%（2023 年 4 月数据）⁶⁸，超预期实现《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》中提出的“2030/2035 年新能源乘用车新车市场占比分别达到 40%、50%”的预期性目标。在现有政策和电动汽车市场规模化的双重加持下，基准情景下珠三角地区私家车排放也能快速达峰并持续下降。受公共领域全面电动化政策的引导，城市客车和出租车已经进入燃油汽车的存量替代阶段，城市物流车也能在 2040 年左右实现全面电动化。现有政策对专用车（环卫等公共领域除外）、公路货运车辆（中重型货车为主）等还未出台更具体的约束性减排目标和政策，在基准情景下这两大类场景将成为道路交通后期的主要减排领域。

对香港而言，现有政策可以驱动私家车、出租车和巴士车辆通过应用零排放车辆进行减排。2020 年，香

港私家车碳排放量超过 160 万吨，在所有车辆中占比达 30%，由于香港特区政府提出“2035 年或之前停止燃油私家车登记”的政策，2050 年香港私家车将完成零排放转型，并实现净零碳排放。货车在香港汽车保有量中的占比为 15%，但对碳排放的贡献率却达到 30%，且现有政策中并没有对货车的零排放转型提出针对性的约束目标，在基准情景下货车的碳排放量仍将缓慢增加。要实现 2050 年碳中和目标，香港特区政府必须要为这类车辆制定严格的减排目标。

澳门道路交通零排放转型的步伐在大湾区三个主要区域中最慢。在基准情景下，公共汽车能通过电动化替代在五年内实现净零碳排放，出租车在 2050 年可完成零排放转型，其他车辆碳排放量仍将持续缓慢增长。从交通工具来看，由于营运性的客车和货车数量很少，澳门道路交通排放主要来自以私家车、摩托车为代表的私人出行领域。要推动交通不断减排，澳门未来的电动化政策有必要对私人领域有所侧重，如提高私人充电设施安装的便利性，从丰富电动摩托车产品及提供电动摩托车购置补贴等方面促进私家车和摩托车的电动化转型。





注：澳门所称“电单车”实际上是指燃油摩托车

图 33 珠三角、香港和澳门三地道路交通碳排放趋势（基准情景）

3.3.3 铁路碳排放

粤港澳大湾区城际铁路运输以珠三角为主，排放计算中仅考虑珠三角铁路排放。基于统计年鉴数据，珠三角铁路客运周转量在总的客运周转量中占比为 13%，铁路货运周转量占比仅为 0.4%，加之铁路单位周转量能耗较低，在不考虑牵引电力排放的情况下，铁路碳排放对整体排放量的贡献极低。尽管受运输结构调整而增长的铁路运输周转量将使铁路整体排放量持续走高，2050 年铁路碳排放仅为 20 万吨左右。

在 2050 净零碳排放情景下，一方面运输结构的进一步优化调整将使铁路运输周转量持续增加，另一方面铁路整体运输能效更加高效，电气化比例也将不断提升，化石能源的消耗量以及相应碳排放将在 2040 年前后达到峰值。

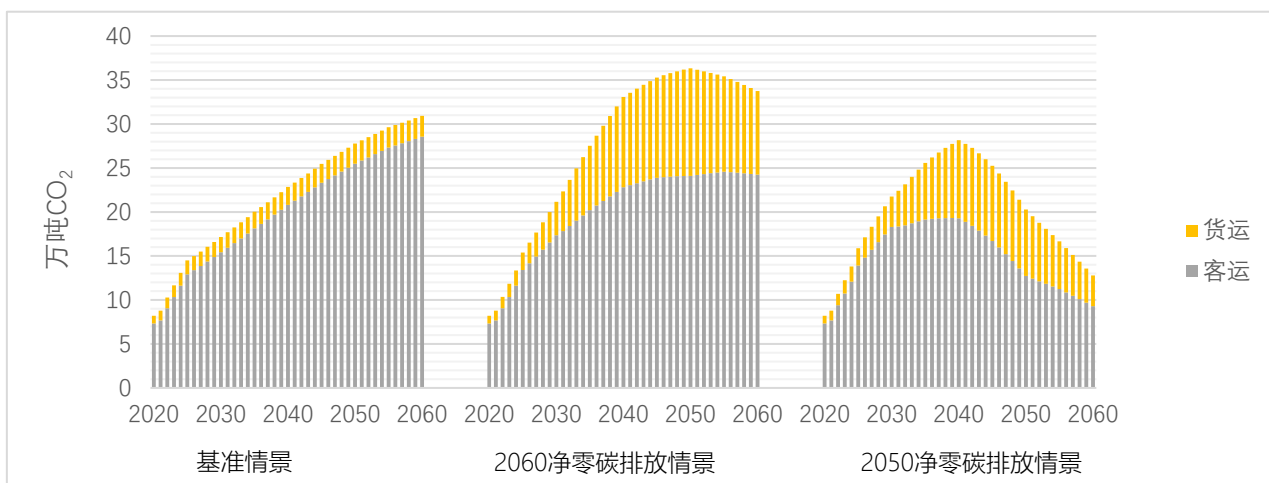


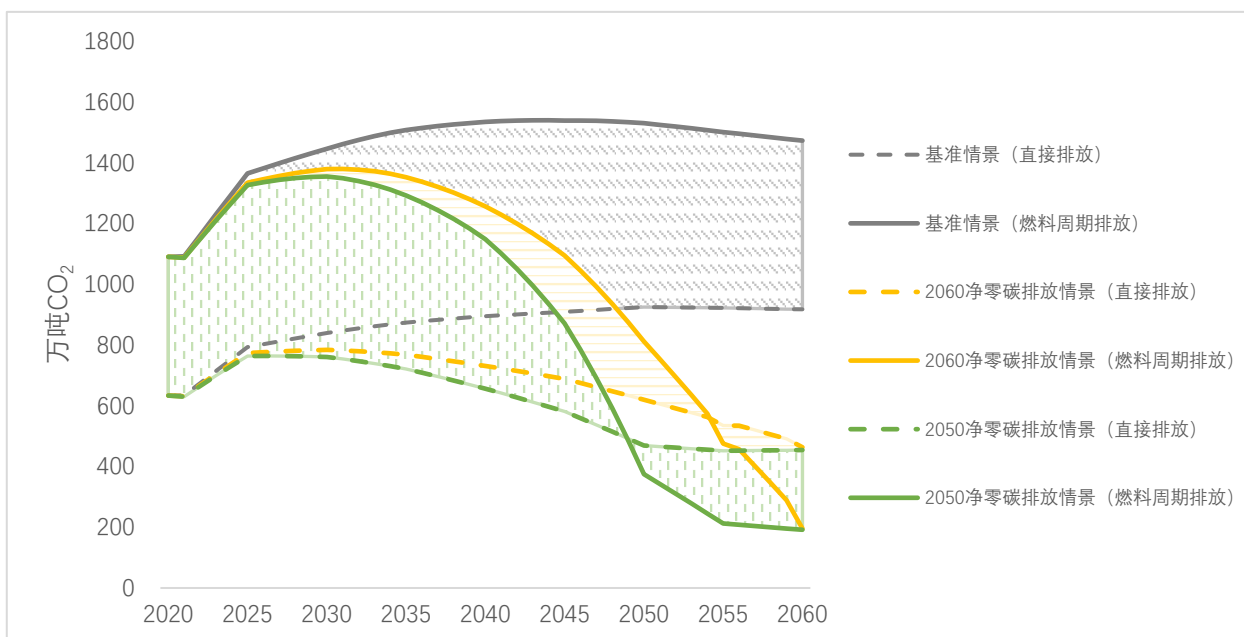
图 34 不同情景下大湾区（珠三角）铁路碳排放趋势

3.3.4 水路运输碳排放

水路货运周转量在珠三角交通运输总量中的占比超过 85%，由于珠三角运输体量巨大，水路运输自然也成为大湾区交通运输中非常重要的组成部分。在基准情景下，大湾区水路运输碳排放量一直保持缓慢上升趋势，2050 年水路碳排放量约为 925 万吨，占交通碳排放的比重为 10%。在净零碳排放情景下，由于对单位周转量能耗设定了更严格的目标，且认为船用燃料将由目前较为单一的燃料油向电力、LNG、甲醇、氢能等清洁能源多向发展，水路运输碳排放量较基准情景有比较明显的下降，整体碳排放有望在“十五五”期间达峰。

需要注意的是，电力在内河等短程水路运输中可能有较为广泛的应用，在中长距离水路运输中，LNG、甲醇、氨等被认为是更有应用前景的燃料，这类燃料的直接碳排放较传统燃料油虽然略有下降，但无法实现净零碳排放。即便在净零碳排放情景下，2050 年水路运输的直接碳排放量依然可观。从全行业实现碳中和的角度来看，未来对水路运输的碳排放评估也将基于燃料生命周期进行。这就要求船用燃料的供应方应不断改进技术工艺，以降低燃料的生命周期碳排放强度，助力水路运输减排。

2050 净零碳排放情景下，大湾区水运的燃料周期碳排放至 2050 年可降至 375 万吨水平，较其峰值（1355 万吨）下降 72%。



注：阴影部分表示交通燃料上游排放

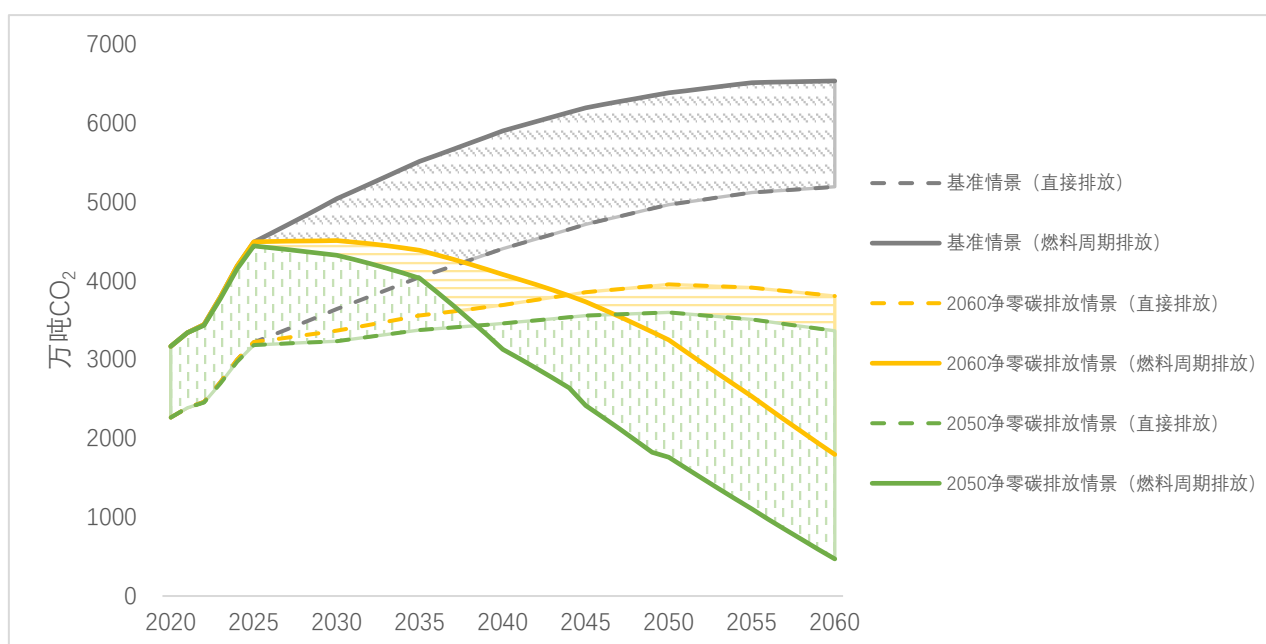
图 35 粤港澳大湾区水路运输碳排放趋势

3.3.5 民航运输排放

大湾区聚集了南航、深航、国泰等大型航空公司，以航司为基准核算民航运输碳排放，大湾区民航运输

贡献了约四分之一的交通碳排放量，远高于全国平均水平（2019 年约 8%⁶⁹）。在基准情景下，大湾区民航运输碳排放将会显著增长，至 2050 年将超过 5000 万吨，较 2020 年至少翻一倍。在净零碳排放情景下，一方面单位周转量能耗下降幅度高于基准情景，另一方面设定部分民航客流量转向高铁运输，因而整体碳排放量增长放缓，但仍需要到世纪中叶前后才能实现直接碳排放的达峰。

这也与目前航空运输行业所规划的减排路径有关。SAF 被认为是民航运输减排的主要工具，然而与水陆运输类似，SAF 的燃料特性决定了它在终端难以直接降低碳排放量，而必须基于燃料生命周期的角度进行评估。目前 SAF 在生命周期内的碳排放强度较传统航空燃料可降低 80%，按照技术发展，假设至 2050 年 SAF 生命周期排放可降为零，那么在净零碳排放情景下，大湾区民航燃料周期碳排放较基准情景则会出现显著下降。



注：阴影部分表示交通燃料上游排放

图 36 粤港澳大湾区民航运输碳排放趋势

SAF 是民航运输实现净零碳排放的关键因素之一。在基准情景下，由于没有政策目标约束，SAF 应用比例增长得十分缓慢，即使到 2050 年 SAF 每年的消耗量也仅为 120 万吨^⑫左右。在 2050 净零碳排放情景下，大湾区 SAF 每年的消耗量在经过短暂的调整期后快速增加，至 2060 年将超过 960 万吨。若从航空公司的角度出发，将国际航班的燃料消耗也包含进来，对 SAF 的需求量还将增加两倍以上。

目前，我国的 SAF 产业仍在起步阶段，生产、销售乃至认证的一套体系尚未健全，未来要负担如此巨量的 SAF 需求，必须建立起完备的中国 SAF 产业链和交易市场。要推动这项工作，需要包括国家能源局、民航

^⑫此处与碳排放计算时所统计的边界一致，仅包括划分到国内飞行的部分。

局在内的上级机构明确中国 SAF 发展目标，引导和督促航空公司完成 SAF 应用规划的制定。

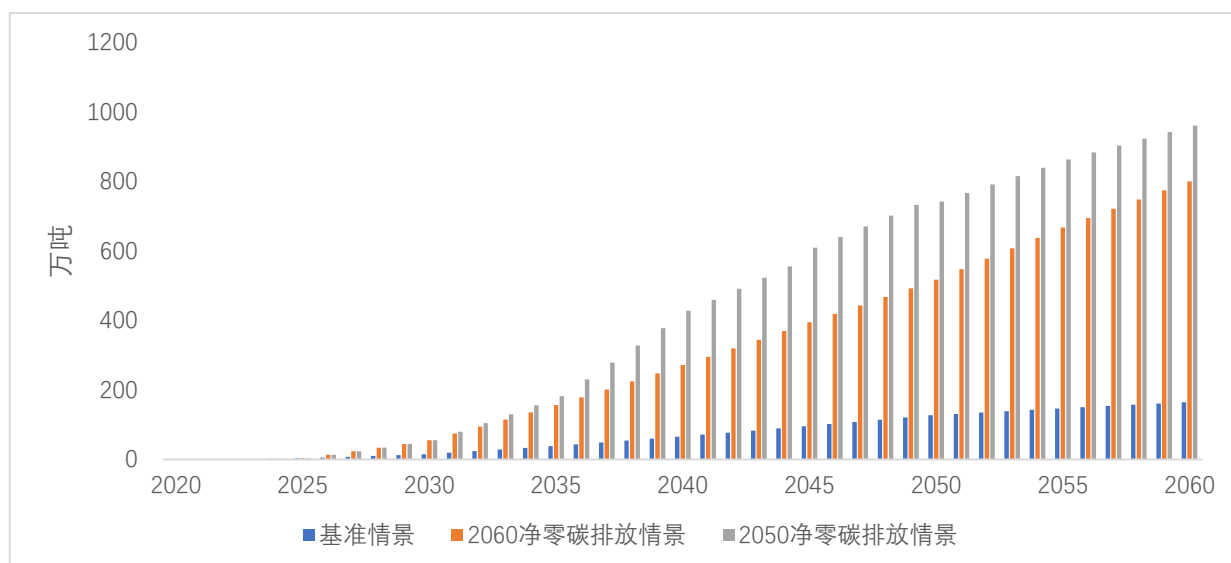


图 37 粤港澳大湾区可持续航空燃料消耗量趋势

3.3.6 不同措施减排潜力

研究选取以下若干措施作为大湾区交通减排情景设置的关键，通过与基准情景相比，评估各类减排措施在大湾区交通净零碳排放过程中具备的减排潜力。

- (1) 运输结构调整：在研究中主要指降低公路和民航客运比例，提高铁路运输在客运中的比例，同时降低公路货运比例，提高铁路和水路货运比例。运输结构调整参数仅对珠三角地区适用，在香港和澳门地区客运和货运方式较为固定且调整空间小，暂不予以考虑。
- (2) 能效提升：对珠三角的非营运道路车辆而言，所有情景下能效提升水平一致；对香港和澳门地区而言，所有车辆的能效提升在所有情景下一致；其他交通工具的能效提升在不同情景下有所差异，基准情景下提升最慢，2050 净零碳排放情景下提升最快。
- (3) 能源结构优化（非道路）：在研究中主要指铁路牵引机车由内燃机车向电力机车转变，船用燃料由燃料油向电力、氢能、甲醇、LNG 等清洁燃料转变，航空燃料由传统航煤向 SAF 转变。道路交通的电动化也属于能源结构优化，但这部分产生的减排体量巨大，故而作为单独措施进行分析。
- (4) 车辆电动化：包含营运车辆和非营运车辆电动化。非营运车辆主要包括私家车、出租、公交以及环卫、城市物流配送等专用车辆，这些车型电动化更多受到政策影响，私家车电动化则与电动乘用车市场规模和技术成熟度密切相关。营运车辆对经济成本高度敏感，对补能时间和轮转效率更加重视，电动化转型难度更大。

(5) 控制私家车保有量：主要是指通过提高绿色出行方式，减缓私家车的增长速度，并最终将私家车保有量控制在低于基准情景中的水平，适用于珠三角地区。

在上述减排措施中，车辆电动化对交通减排的贡献最高。将基准情景作为基准，2020~2060 年非营运车辆电动化可累计减排 5.8 亿吨 CO₂，占总减排量的 36%，公路营运车辆电动化贡献了 16%的减排量。能效提升和运输结构调整分别贡献了 20%和 19%的减排量，能源结构优化（非道路）和控制私家车保有量对大湾区交通减排量的贡献分别占 5%和 4%。

从分时段减排潜力来看，与道路交通相关的减排措施在前期产生的减排量更高，这是因为多种车型在现有政策框架下已经有明确的零排放转型目标。控制私家车保有量这一措施的其减排潜力在 2026-2030 年间便已经达到最高值，非营运车辆电动化的减排潜力在 2041-2045 年间发挥到最大，营运车辆电动化的最大减排量出现在 2046-2050 年间，这是因为营运车辆的电动化转型时间相对更加滞后。其他减排措施的每五年累计减排量则依据时间序列呈现递增状态。

需要明确的是，表 6 所列减排措施中，仅“非营运车辆电动化”和“控制私家车保有量”两种措施所产生的减排潜力完全发生在大湾区地理边界内，其他几种措施所产生的减排量具有辐射效应，仅有部分减排发生在大湾区地理边界之内。

表 6 不同措施的减排潜力细化分析

单位：万吨	2021-2025	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2045	2046-2050	2051-2055	2056-2060	减排潜力趋势图	累计	累计减排量占比
运输结构调整	25	1131	2681	4062	4949	5499	5854	6062		30262	19%
能效提升	359	1294	2330	3346	4428	5559	6745	7889		31950	20%
能源结构优化（非道路）	20	144	400	747	1124	1621	1889	1884		7831	5%
营运车辆电动化	159	1102	2549	3780	4650	4985	4798	4509		26533	16%
非营运车辆电动化	395	2928	6996	9977	10905	10258	8957	7557		57973	36%
控制私家车保有量	1042	2400	2199	1136	338	49	2	0		7166	4%
总计	2001	8999	17155	23048	26394	27971	28246	27902		161715	100%

注：减排潜力指基准情景与 2050 净零碳排放情景的差值，减排潜力趋势图中红色部分代表该措施在对应时间段内的减排量最高。

第四章 总结与政策建议

4.1 研究总结

在基准情景下，大湾区交通碳排放将于 2027 年达到峰值，提前于国家提出的 2030 年整体碳达峰目标，但达峰后排放下降缓慢。主要原因在于现有政策的时间跨度较短，珠三角地区尤其明显，以五年政策框架居多，难以激励交通部门进行长远减排规划。若能针对各细分交通部门分别制定具体减排目标和相关政策，如表 7 所示，包括不断提升能源效率、运输结构持续优化、明确电动汽车在商用车领域的应用目标等，大湾区交通排放有望于“十四五”末达峰，且达峰后排放总量能快速下降。

表 7 2050 净零碳排放情景下大湾区主要交通发展指标

		2025	2030	2035	2040	2045	2050
新能源私家车保有量占比 (%)	珠三角	14	43	74	92	99	100
	香港	16	28	30	40	80	100
	澳门	13	30	48	65	83	100
公路营运新能源车辆保有量占比 (%)	珠三角-客运	19	36	66	87	98	100
	珠三角-货运	9	33	60	82	96	100
公路货运周转量比重 (%)	珠三角	13.0	12.0	10.5	9.0	8.5	8.0
铁路客运周转量比重 (%)	珠三角	14.0	18.0	19.5	21.0	22.0	23.0
铁路电气化比例 (%)	客运	65	70	74	78	83	88
	货运	75	80	82	84	87	90
船用清洁燃料占比 (%)	珠三角	1.3	8.8	23.6	40.4	62.2	93
	香港		0		10	60	100
SAF 使用量 (万吨)	大湾区	3	55	182	428	609	742

注：船用清洁燃料是指除传统燃料油外的其他清洁燃料，研究中包括电力、LNG、甲醇和氢能；SAF 使用量计算时仅考虑大湾区主要航空公司在国内航班的部分，不含澳门航空。

本研究主要结论如下：

- (1) 粤港澳大湾区交通排放将不晚于 2027 年达峰，但达峰后排放总量的下降仍需多种减排措施助力。若不施加更加严格的政策手段和目标，大湾区全口径交通排放将在 2027 年左右达到峰值，峰值排放量接近 1.1 亿吨，至 2060 年碳排放量较峰值水平仅下降 20%。换言之，现有政策难以推动达峰后交通碳排放量的持续快速下降。在 2050 净零碳排放情景下，通过车辆电动化、提升交通工具能效、交通能源转型等手段，大湾区全口径交通排放约在 2025 年实现达峰，其中，道路交通排放已经进入下降通道，至 2050 年基本实现净零碳排放，非道路交通直接碳排放需要到 2040 年之后才能进入平台期，至 2050 年非道路交通直接碳排放仅比峰值下降 2%，但考虑燃料上游排放，由于 SAF、可再生甲醇等低碳燃料在生产过程中可以固碳，至 2050 年非道路交通燃

料周期碳排放较峰值可下降 62%。

- (2) 道路交通为唯一可在现有政策框架内实现快速减排的领域。作为最主要的交通排放源，大湾区道路交通碳排放量占全口径交通总排放量的比例接近 70%（2020 年数据）。现有政策可促使大湾区道路交通碳排放在达峰后呈现比较明显的下降趋势，至 2060 年道路交通碳排放量下降至 2590 万吨。若在近期加快零排放汽车的推广，同时对传统车辆进行节能减排管理，大湾区道路交通碳排放量几乎不再上升，即已经进入平台期（2050 净零碳排放情景），后期则快速下降直至达到零碳排放。
- (3) 推动道路交通减排，港珠澳应因地施策。对珠三角区域，基准情景下私家车排放也能快速达峰并持续下降，城市客车、出租车等公共领域车辆已经进入燃油汽车的存量替代阶段，城市物流车也能在 2040 年左右实现全面电动化，然而现有政策对专用车（环卫等公共领域除外）、公路货运车辆（中重型货车为主）等还未出台更具体的约束性减排目标和政策。对香港而言，现有政策可以驱动私家车、出租车和巴士车辆通过使用零排放车辆进行减排，但没有对货车的零排放转型提出针对性的约束目标，在基准情景下货车的碳排放量仍将缓慢增加。对澳门而言，在基准情景下，公共汽车能通过电动化替代在五年内实现净零碳排放，出租车在 2050 年可完成零排放转型，其他车辆碳排放量仍将持续缓慢增长。
- (4) 水路和民航将成为交通减排后期的重点关注领域。基于现有技术路径，电气化转型可使道路车辆和铁路在对应时间节点接近零碳排放，但水路和民航运输的自身属性决定了其使用燃料的多元性，难以通过使用终端零排放的电力等清洁能源实现净零碳排放。在净零碳排放情景下，民航和水运是后期最主要的碳排放源，需要从燃料生命周期的角度考虑减排，即使用生命周期碳排放强度更低的绿色燃料来实现民航和水运碳排放量的下降。这一方面要求燃料生产和供应方不断改进工艺技术以降低燃料碳排放强度，另一方面也需要建立稳定的市场供需关系并完善燃料储运和加注设施。
- (5) 不同减排措施可依时序发挥减排潜力。相较于基准情景，2050 净零碳排放情景可累计减排超过 16 亿吨 CO₂。其中，车辆电动化对交通减排的贡献最高，非营运车辆电动化对总减排量的贡献为 36%，公路营运车辆电动化贡献为 16%。能效提升和运输结构调整分别贡献了 20%和 19%的减排量，能源结构优化（非道路）和控制私家车保有量对大湾区交通减排量的贡献分别占 5%和 4%。从分时段减排潜力（每五年累计量）来看，与道路交通相关的减排措施在前期产生的减排量更高，控制私家车保有量这一措施的减排潜力在 2026-2030 年间便已经达到最高值，非营运车辆电动化的减排潜力在 2041-2045 年间发挥到最大，营运车辆电动化的最大减排量出现在 2046-2050 年间，其他减排措施的每五年累计减排量则依据时间序列呈现递增状态。

- (6) 大湾区全口径交通碳排放实现净零仍需负碳技术助力。在多种减排措施的加持下，大湾区全口径交通直接碳排放在 2050 年仍难以实现净零。即便采用了生命周期碳强度更低的清洁燃料，至 2050 年燃料周期碳排放量还处在 2600 万吨/年的水平，这表明交通行业要在世纪中叶实现净零碳排放，仍需要借助林业、土壤等等生态碳汇的力量。

4.2 政策建议

大湾区整体发展领先于全国，但城市间差异依然存在。香港在发展金融业的同时，也致力于重振其在国际航运和航空产业中的地位；澳门倚重第三产业，在交通减排方面的目标相对保守；广、深两市依托内地放眼全球，在减排目标及政策制定上更有雄心；其他珠三角城市面临平衡经济发展和节能减排的挑战，在制定减排计划时更加务实。因此，在制定相关政策过程中，既要考虑城市定位及其特殊性，也要在特定领域进行协调统一，促进大湾区不断交流融合，推动绿色发展。基于各交通方式排放占比及趋势，识别各阶段减排任务和重点，并依此制定相关政策，将能实现资源最大化利用。

本研究对大湾区交通减排的政策建议框架如图 38 所示，主要包括四大方向：推进道路车辆零排放转型、发展船用清洁燃料、大力发展可持续航空燃料和推进运输结构调整。

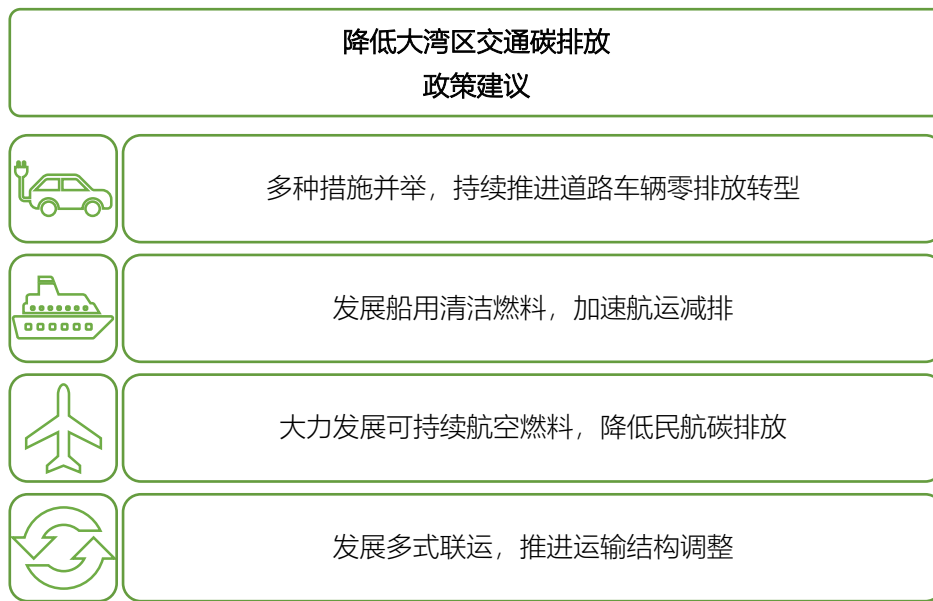


图 38 降低大湾区交通碳排放政策建议框架

4.2.1 多种措施并举，持续推进道路车辆零排放转型

道路交通碳排放占大湾区交通碳排放总量的比例接近 70%，在基准情景下，大湾区道路交通碳排放将于 2025 年前后达到峰值，峰值年排放量约为 6800 万吨。若能持续推进零排放车辆应用，尤其是在商用车领域的应用，道路交通碳排放有望于世纪中叶达到净零。

从减排措施来看，电动化转型对道路交通减排的贡献最大。随着电动汽车技术的发展，电动小汽车市场规模不断扩大，在珠三角和香港地区，私家车正在加速电动化，新车渗透率屡创新高。与之相对的是，电动商用车则面临市场规模小、经营成本压力大、补贴机制退出等问题，需要从新的角度研判和制定相关政策，以激励商用车电动化发展。与此同时，建立健全大湾区补能基础设施网络也是持续推进车辆零排放转型的必然需求。

本研究针对道路车辆零排放转型所提出的政策建议框架如图 39 所示。

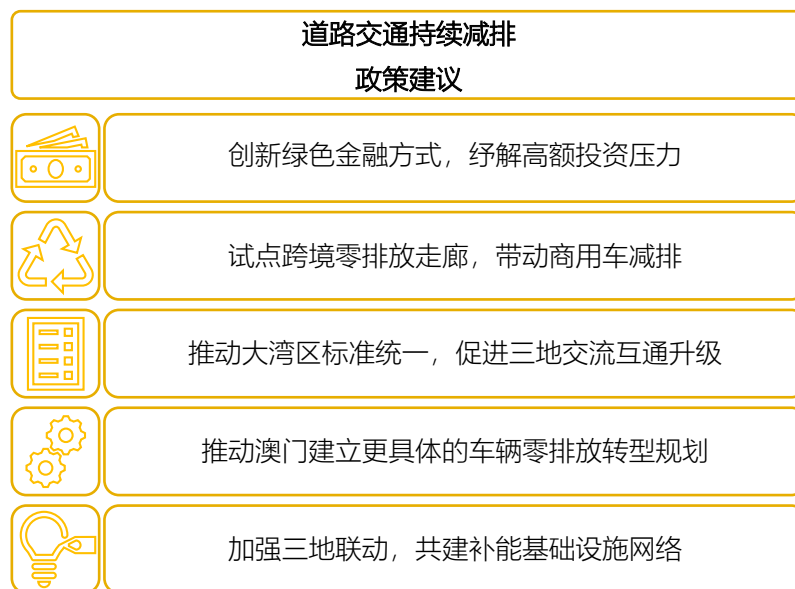


图 39 道路交通持续减排政策建议

4.2.1.1 创新绿色金融方式，纾解高额投资压力

现阶段以纯电动和氢燃料电池为主的零排放商用车购置成本仍远高于同级别燃油汽车，推广初期部分企业还需自行配备充电和加氢设施，进一步加大了投资压力。中国内地实施的补贴机制在推动零排放车辆在私家车、公交、环卫以及城配物流等领域的前期应用上发挥了决定性作用，但由于政府财政不断承压，补贴机制已经退出，购置税减免政策对价格高昂的中重型商用车缺乏吸引力。香港和澳门作为高度开放和自由的市场，使用政府财政为企业零排放转型买单的意愿及可行性低，亟需从新的角度研判和制定相关政策。

香港作为国际金融中心，在引领市场资金支持公私营机构投资到绿色交通方面可发挥积极作用。香港特区政府推出了政府绿色债券计划（简称“绿债计划”），并于 2018 年由立法会授权将绿债计划下所募集的资金投入工程储备基金，为包括绿色交通在内的多项具备环境效益的政府公务项目提供资金。为降低碳排放，香港也在可持续发展挂钩贷款方面有所尝试，即将贷款条款（通常为贷款利率等财务条款）与借款人可持续性绩效目标挂钩，推动借款方可持续发展经营。

基于自身特点，澳门可打造中国-葡语国家绿色金融交流示范平台，在推动本地零排放转型的同时，辐射更广的地区，带动澳门乃至大湾区在国际绿色金融产业方面的发展。珠三角地区绿色产业发达，对流动资金的需求量更大，建议充分评估在当地开展绿色金融业务的可行性。在大湾区层面，绿色金融合作机制存在诸多障碍，首先需要建立和完善大湾区绿色金融发展的区域统筹协调机制，其次要建立大湾区绿色金融数据信息共享机制，加强互联互通，同时因地制宜制定绿色金融发展的配套政策支持，将大湾区打造成立足中国，走向世界的绿色金融区域中心。

4.2.1.2 试点跨境零排放走廊，带动商用车持续减排

大湾区跨境包括粤港、粤澳、港澳三大通道，每条通道包含若干个口岸，并以陆路口岸为主。以粤港陆路跨境为例，车辆主要是来往于深圳和香港地区的车辆，总数超过一万辆，每月跨境频次在 130 万次以上（新冠疫情暴发前数据）并以港牌车辆为主。目前，这些车辆主要是传统燃油汽车。

机动车零排放区是推动零排放汽车应用的一种手段，在此类区域内，只有驾驶零排放汽车或使用其他慢行交通方式才能进入。建议充分借鉴国外成功的零排放区建设经验，结合减排潜力和潜在示范效应，在大湾区打造一到两条跨境零排放走廊试点，以推动跨境车辆的全面零排放转型。零排放车辆补能基础设施可率先在深圳、珠海等内地城市境内建设，减轻港、澳地区土地使用压力。三地联合成立监管团队，收集零排放跨境车辆运行数据，形成问题反馈闭环机制，不断优化零排放跨境车辆运行环境。成功的试点可作为零排放区建设示范，并推广至其他地区。

4.2.1.3 推动大湾区标准统一，促进三地交流互通升级

2023 年 4 月由广东省市场监督管理局发布《促进粤港澳大湾区标准发展指南（试行）》，提出粤港澳大湾区共通执行标准（简称“湾区标准”），并发布“湾区标准”清单。“湾区标准”研究、清单公布及维护等相关支撑工作由广东省人民政府和国家标准化委员会共建的粤港澳大湾区标准化研究中心具体维护。

就电动汽车充电技术而言，目前国际上有五大充电标准，即中国国标 GB/T、美标 CCS1、欧标 CCS2、日标 CHAdeMO 以及特斯拉所使用的北美充电标准 NACS。大湾区十一座城市中，珠三角九市主要采用中国国标，香港主要采用欧标和特斯拉标准，澳门电动汽车进口来自于欧洲、日本等多个国家和地区，当地充电桩接口覆盖多个标准体系。从国际形势来看，中国国标的应用依托于中国庞大的新能源汽车市场，特斯拉通过开放其充电网络使 NACS 标准阵营不断扩大，日标则受日系汽车电动化进程影响而未能得到广泛应用，但整体上看全球尚未形成统一标准。

“港车北上”“澳车北上”等政策的实施进一步促进了大湾区三地之间的交通联系，未来随着电动汽车规模的增加，统一充电标准是大湾区城市高度协调发展的必然要求。建议粤港澳大湾区标准研究中心持续跟踪国际充电标准发展趋势，联合充电企业、汽车企业等相关利益相关方，研究和制定更适用于大湾区城市的共通充

电标准。同时，结合目前国际充电标准研究的主要趋势，研究推动充电接口兼容标准。

4.2.1.4 推动澳门建立更具体的车辆零排放转型规划

澳门在推动电动汽车应用方面进展较慢，目前仅有对公交车提出的电动化目标。2021 年澳门轻型汽车新车销售中，电动汽车渗透率仅为 1.6%，远远落后于珠三角和香港地区。澳门所销售的车辆主要经香港进口，香港提出的“2035 年或之前停止新登记燃油私家车”的目标还有可能进一步提前，如果香港执行严格的燃油汽车禁止进口的政策，澳门也无法通过香港进口燃油汽车。因此，澳门需要加强与香港特区政府之间的信息交流，尽快制定出对策，包括制定澳门当地的电动汽车发展规划，借鉴大湾区其他城市经验推动充电基础设施的规划和建设。对于澳门的摩托车，建议政府继续通过老旧车辆淘汰补贴、豁免电动摩托车试验号牌及注册费用等经济手段进行激励。同时，内地电动摩托车厂商众多，建议澳门特区政府通过考察调研，选择部分厂商进行合作，综合考虑澳门当地骑行人群需求和道路路况，为澳门定制电动摩托车车型。

4.2.1.5 加强三地联动，共建补能基础设施网络

大湾区一体化的加速将对交通补能设施的布局提出更高要求。由于土地面积、基础设施改造成本等因素的差异，粤港澳三地在基础设施网络建设方面能够担任的角色也不同。澳门地形狭小，电动汽车基本能够满足零排放转型需求，香港主要依赖电动汽车和氢燃料汽车。港澳地区在本地的充电和加氢站点规划建设过程中，需要基于道路汽车流量、停车热点等分析，划定公共补能站点的位置，最大限度发挥公共补能站点的作用，提高利用率。在基础设施供应商方面，建议与内地服务商接洽，允许有意愿的充电和氢能补给服务商进驻，发挥市场化机制效用。

在跨境车辆方面，加强深港、珠澳等政府间协作，允许将更多的服务跨境车辆的补能基础设施建设在靠近珠三角城市一侧，减轻港澳地区的土地使用压力，具体规划位置需要基于路段长度、跨境车辆行驶规律等因素综合确定。

4.2.2 发展船用清洁燃料，加速航运减排

船用清洁燃料是航运业减排的主要手段之一，尤其将在沿海、远洋等长途航行中发挥核心作用。大湾区有中国重要的港口集群，航运业发达，发展船用清洁燃料既能帮助本土船舶实现减排，还可以进一步打造全球船用清洁燃料中心，为过境船舶提供燃料供应。

本研究针对大湾区航运减排所提出的政策建议如图 40 所示。

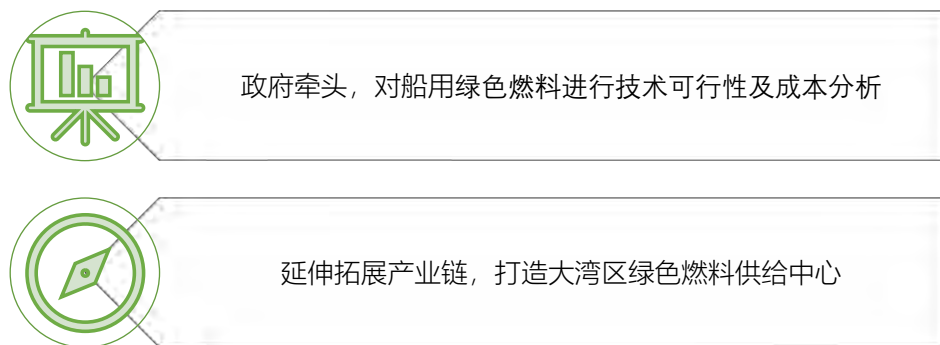


图 40 推动大湾区水运减排政策建议

4.2.2.1 政府牵头，对船用绿色燃料进行技术可行性及成本分析

对航运企业而言，选择使用何种燃料取决于供方市场。供方市场发展有两种形式，一是有明确的政策主导方向，政策支持燃料则会得到更多的投资和发展机遇，二是通过长时间的价格和技术竞争，最终由市场选择出更具备优势的燃料种类。

船用清洁燃料发展的一个难点在于其选择较多，目前尚未有一种燃料凸显成为主流。在这一阶段，政府相关部门可组织研究团队，对不同燃料路线进行技术和成本分析，研究包括产业发展所需投资、市场供需规模、燃料加注设施建设、船体改造成本、相关标准制定等问题，生成技术成本清单。不同地区可结合当地情况识别出更具备发展潜力的燃料类型，进一步对话燃料生产及航运企业，并展开更加细致化的研究。如香港环境保护署有意将甲醇作为未来船用燃料发展重点，后续则需要建立积极稳妥的价格供应体系，规划建设加注站，制定绿色甲醇标准评估体系等方面进行深入研究。

4.2.2.2 延伸拓展产业链，打造大湾区绿色燃料供给中心

船舶燃料选择及加注产业已经成为衡量港口国际化和海事服务水平的重要指标。大湾区航运产业高度发达，香港是重要的国际航运中心，珠三角也已经崛起建成世界级港口集群，巨大的物流周转需求将吸引更多船舶进港或停靠，为这些船舶提供多元化的燃料供应将是大湾区航运产业面临的新机遇。

建议大湾区统筹整合资源，错位发展，共同建设打造大湾区绿色燃料供给中心。目前深圳正着力打造国际航行船舶 LNG 加注中心，能源巨头公司、先进的加注船、便利的加注母港及集装箱大港等要素就位，LNG 产业链基本形成。广州市已获批保税船油许可权试点，未来在能源供应、供油效率、配套服务等方面综合发展，加快建设大湾区国际航行船舶保税油供应基地。香港土地资源有限，仓储面积狭小，在打造大湾区绿色燃料供给中心的过程中，更适合扮演大湾区港口群“群主”的角色。一方面，香港发达的绿色金融业务可以满足大湾区航运企业转型升级的巨量融资需求，为建设绿色燃料产业链提供金融支持，另一方面，香港凭借丰富的海事服务经验，能够主导大湾区绿色燃料标准体系的构建，并努力与国际接轨，使“湾区标准”走向世界。

4.2.3 大力发展可持续航空燃料，降低民航碳排放

可持续航空燃料是国际公认的航空减排的重要手段，截至目前可持续航空燃料市场仍为供方市场，建立稳定的供需关系是近期可持续航空燃料发展的重点。大湾区拥有国泰航空、南方航空、深圳航空等多家大型航空公司，对可持续航空燃料的需求旺盛，香港、广州和深圳机场是国内外重要的航空转运中心，未来也将扮演可持续航空燃料供应者的重要角色。因此，大湾区是孵化和发展可持续航空燃料的最佳区域之一。

本研究针对民航减排所提出的政策建议如图 41 所示。

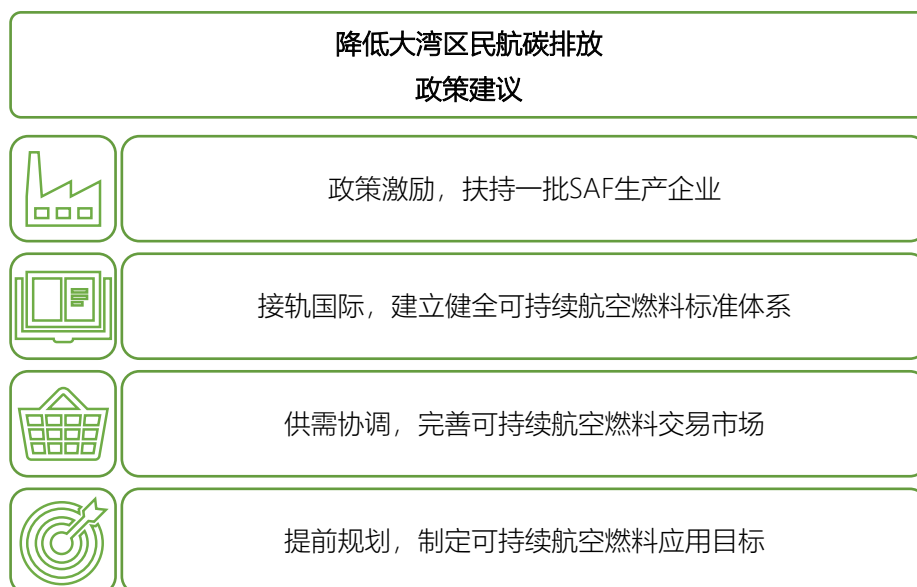


图 41 降低大湾区民航碳排放政策建议

4.2.3.1 政策激励，扶持一批 SAF 生产企业

目前国内仅有中石化镇海炼化和易高两家企业具备可持续航空燃料生产能力，整体规划产能约为 15 万吨/年，霍尼韦尔联合东华能源在广东茂名正在建设年产量达百万吨级的可持续航空燃料生产基地，建成后我国可持续航空燃料整体产能将大幅提升，但要满足未来逐步提高的可持续航空燃料添加需求，缺口仍然很大。

在大湾区本土扶持一批可持续航空燃料生产企业，一方面将能提升当地航司及分销商的议价能力，另一方面也将创造更多的财政收入和工作机会。建议对在大湾区新建或新落户的可持续航空燃料生产企业提供相应激励政策，可提供土地使用优惠，加快土地使用审批进度，如需利用既有闲置厂房，可提供租金优惠政策。在企业投产前期，可通过减税、水电费用补贴等形式提供财政优惠。

4.2.3.2 接轨国际，建立健全可持续航空燃料标准体系

可持续航空燃料需要满足两方面标准：一是在安全和质量方面的“工艺和性能”标准，二是作为减排燃料

需要满足的“可持续性”标准。考虑到同一家飞机可能在不同地区加油，航空燃料的“工艺和性能”标准必须采用国际标准，目前最常用的是美国材料检测协会 ASTM D7566 标准和 DEF STAN 91-91，中国民航航油航化适航审定中心负责生物燃料的适航审定，审定技术标准 CTSO-2C701a 与 ASTM D7566 保持了较好的一致性。现阶段通过标准认定生产可掺混的可持续航空燃料的技术路径有七种，主要原料为废弃地沟油、棕榈油等，随着国际可持续航空燃料市场的发展，将有更多工艺技术路线被研发和使用，如中国科学院广州能源所正在研究从农林废弃物中制取可持续航空燃料的工艺路线，香港方面提出由垃圾高温分解产物合成可持续航空燃料的想法，在研究上述技术路线时需科学合理地建立方法学及标准，并与国际标准接轨。

可持续航空燃料需通过可持续生物材料圆桌会议（Roundtable on Sustainable Biomaterials, RSB）、ISCC 等国际认可的标准和认证体系对其可持续方面的认证后方能被市场准入，可持续认证包括对生产可持续航空燃料的原料、储运、加工、生产等供应链要素进行综合评估，以确保可持续航空燃料相对于传统航油有至少 50%的减排潜力。目前，中国并没有针对可持续航空燃料方面的认证标准和体系。RSB 是全球公认的第三方认证机构，于 2020 年与 CORSIA 共同建立标准对可持续航空燃料进行认证。2022 年镇海炼化获得 RSB 认证，为亚洲首家获得 RSB 可持续生物航空燃料认证的企业。ISCC 标准涵盖 ISCC EU、ISCC CORSIA 和 ISCC PLUS 三套体系，适用于不同地区和组织对可持续燃料的认证需求。未来中国将成为可持续航空燃料的重要供应者，建立一套更符合本地特征的可持续认证体系尤为重要。一是可以与 ISCC 合作，建立中国本地化的 ISCC 标准认证体系。二是从源头出发，由主要航空公司、生物燃料生产企业以及标准制定机构等利益相关方组成工作小组，在源头数据、标准适应性等方面紧密协调合作，推动中国建立一套国际化的可持续认证机制。

4.2.3.3 供需协调，完善可持续航空燃料交易市场

大湾区是重要的国际航空枢纽，未来也肩负着为进出港的境外航班提供可持续航空燃料的任务，与国际接轨的可持续航空燃料交易机制是未来发展中极为重要的环节。现有定价机制中，国际航油价格除受国际原油价格影响外，也受到季节影响，例如，夏季航班需求普遍较高，航油价格也随之升高。在中国，航空煤油价格由供需双方协商确定，考虑包括市场供求、运费、交易数量、国际油价走势等因素。可持续航空燃料现有价格比传统航油高，价格也是制约许多航司扩大应用可持续航空燃料的主要因素之一。建议大湾区组织建立可持续航空燃料交易平台，在市场发展初期，跟踪国际不同地区不同工艺可持续航空燃料价格变化，一方面为航空公司采购可持续航空燃料提供参考，另一方面也为境内生产企业定价和议价提供数据支撑。在发展中期，纳入市场上主要的供需主体，为双方议价提供平台支持，同时建立与国际市场的联动机制，保障供需双方的权益最大化。

4.2.3.4 提前规划，制定可持续航空燃料应用目标

目前以欧盟为首的部分地区和多家航空公司均提出了可持续航空燃料应用的长期规划，美国拜登政府从

生产侧对可持续航空燃料提出了发展目标。中国民航局尚未公布可持续航空燃料应用目标，国内绝大多数航空公司对此也没有提出明确的规划。然而，CORSIA 的强制阶段将从 2027 年强制执行，若不提前规划，届时势必会面临巨大的国际压力。对大湾区而言，国泰航空是可持续航空燃料应用的排头兵，在可持续航空燃料应用过程中遇到的问题有望为其他航司提供借鉴和参考，建议当地政府及民航局作为协调单位，推动国泰航空与其他航司之间在可持续航空燃料方面的讨论和交流。对南航、深航等航司而言，应在可持续航空燃料负责部门和专员的深度研究基础之上，尽快制定可持续航空燃料应用的长期规划，并在企业内部进行成本效益及排放等的综合评估，为资金、人员分配提供参考。

4.2.4 发展多式联运，推进运输结构调整

对大湾区而言，运输结构调整对降低交通排放的贡献仅次于车辆电动化和交通工具能效提升。大湾区各种交通运输形式相对发达，是发展多式联运的重点区域。

本研究针对运输结构调整所提出的政策建议如图 42 所示。

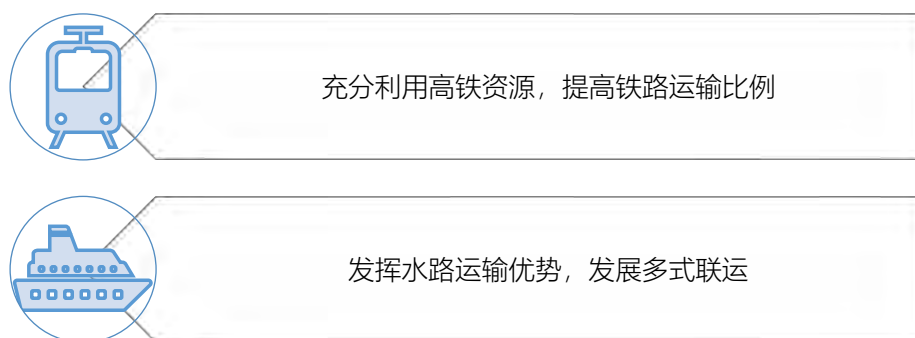


图 42 大湾区交通运输结构调整政策建议

4.2.4.1 充分利用高铁资源，提高铁路运输比例

大湾区高速铁路网络正在加速扩充，有望成为未来大湾区城市之间以及连通相邻省市的主要交通渠道。对内，大湾区城际高速铁路使用便捷，可替代部分公路运输；对外，香港可通过高铁直接连通内地多个城市，来往澳门也可经由大湾区城际铁路周转，为“航空转高铁”提供了可能。建议从经济和交通规划等要素入手制定相应政策，以充分调用高铁资源。在城际铁路方面，进一步完善公交、地铁等公共交通线路与高铁站点的接驳，鼓励更多乘客使用高铁出行。“航空转高铁”方面，建议由铁路管理局牵头，研究制定分时分段弹性定价机制，将部分民航乘客分流至高铁。三地交通及环保部门也可组织本地“航空转高铁”意愿调研，收集意愿人群的意见和建议，作为后续政策制定的参考。

4.2.4.2 发挥水路运输优势，发展多式联运

大湾区水路运输发达，作为国内运输结构调整重点区域，大湾区可以发挥其水路运输优势，积极发展多式联运。持续优化“组合港”模式，借鉴以深圳为枢纽港的组合港试点经验，发展以香港和澳门为枢纽港，珠三角部分港口为喂给港的粤港澳大湾区组合港体系，推动水水中转集疏运模式。鼓励港口企业与铁路、航运等企业合作，在铁路货场、综合货运枢纽等地拓展海运箱提箱还箱等功能，提升货箱周转效率，加快发展铁水联运和江海直达运输。推动香港、澳门国际机场与大湾区港口之间“海空货物联运”，收集香港国际机场与东莞“海空货物联运”试点运行数据，完善操作流程，扩大海空联运规模。

附录 1 “十四五”时期国家和大湾区出台的交通减排政策及目标（部分）

区域层面	交通领域	政策文件	具体政策和目标
国家	交通/整体	《绿色交通“十四五”发展规划》	<ul style="list-style-type: none"> 到 2025 年，交通运输领域绿色低碳生产方式初步形成，基本实现基础设施环境友好、运输装备清洁低碳、运输组织集约高效、重点区域取得突破性进展，绿色发展水平总体适应交通强国建设阶段性要求
	交通/整体	《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》	<ul style="list-style-type: none"> 打造绿色综合客运枢纽：改善综合客运枢纽公共交通及慢行交通候乘、停靠及中转设施，提升绿色出行比例；优化枢纽周边交通组织，缓解拥堵；鼓励使用可再生能源；提高新能源和清洁能源车辆使用便利性 推动综合货运枢纽绿色发展：发展多式联运，大宗货物长距离运输“公转铁”“公转水”；推进绿色货运配送示范工程创建工作；加快新能源和清洁能源工具使用等
	交通/整体	《综合运输服务“十四五”发展规划》	<ul style="list-style-type: none"> 提升公共交通出行分担率和绿色出行比例 公共领域新能源汽车占比进一步提升 提高铁路货运周转量占比、多式联运占比，运输结构进一步合理化，降低物流成本
	交通/公路	《公路“十四五”发展规划》	<ul style="list-style-type: none"> 强化碳排放控制：大力推进新能源和清洁能源车辆应用，支持重点场所充电设施建设 推进结构性减排：优化货运结构调整，降低大宗货物和集装箱中长距离运输的公路分担比例 推进营运车辆污染治理：淘汰更新老旧车辆，全面实施汽车排放检验与维护制度
	交通/铁路	《“十四五”铁路科技创新规划》	<ul style="list-style-type: none"> 深化铁路污染和降碳协同治理，强化能耗与排放的监督管理，完善铁路碳排放核查核算报告标准 着力发展移动装备的轻量化、绿色化、重载化和环境友好技术，加快淘汰高耗低效技术装备 深化全封闭、集装箱、驼背运输等绿色低碳相关技术研发运用，提升多式联运占铁路总运量比例
	交通/水路	《水路“十四五”发展规划》	<ul style="list-style-type: none"> 构建清洁低碳的港口船舶能源体系：促进岸电设施常态化使用，鼓励 LNG、电动和氢能等新能源和清洁能源船舶研发应用

			<ul style="list-style-type: none"> • 发展铁水联运、优化完善水水中转
	交通/航空	《“十四五”民用航空发展规划》	<ul style="list-style-type: none"> • 提高航空航空公司能效水平 • 推进绿色机场建设 • 加快空管绿色发展 • 完善航空碳减排管理制度
广东省	交通/整体	《广东省综合交通运输体系“十四五”发展规划》	<ul style="list-style-type: none"> • 加快运输结构调整，推动交通运输结构性节能减排 • 不断提升城区绿色出行比例 • 制定交通运输领域碳达峰实施方案，加强节能减排和污染防治
	交通/整体	《广东省“十四五”节能减排实施方案》	<ul style="list-style-type: none"> • 加强船舶清洁能源动力推广应用，2025 年底前形成较完善的珠三角内河 LNG 动力船舶运输网络 • 提高铁路电气化水平 • 大力推广新能源汽车，2025 年全省新能源汽车新车销量占比 20%，新增、更新公交全部采用电动汽车或氢燃料电池汽车，城市物流配送、轻型邮政快递及环卫车新能源汽车比例达到 80%以上 • 大力发展多式联运，铁路、水路大宗货物运输量较 2020 年大幅增长
香港	交通/道路	《香港电动化普及路线图》	<ul style="list-style-type: none"> • 2035 年或以前停止新登记燃油私家车（含混合动力车） • 积极推动电动公共交通工具及商用车，力争约在 2025 年制定更具体的推行方向和时间表
	交通/整体	《香港清新空气蓝图 2035》	<ul style="list-style-type: none"> • 推展《香港电动化普及路线图》，淘汰老旧柴油车，试验专营巴士减排装置 • 推动使用新能源渡轮，收紧本地船舶燃料含硫量上限，推动远洋船使用液化天然气 • 强化大湾区三地协同
澳门	交通/整体	《澳门环境保护规划（2021-2025）》	<ul style="list-style-type: none"> • 2025 年，公共巴士使用新能源车辆比例超过 90%，新登记轻型汽车电动比例达 15~20% • 控制机动车增速，深化机动车污染减排工作 • 开展船舶大气污染排放管控研究 • 加强粤港澳区域性交流合作，深化国际交流

资料来源：CET 根据公开资料整理，减排相关具体指标目标参数详见各文件。

附录 2 主要参数设置

附录-表 1 至表 12 列出了粤港澳大湾区交通碳排放情景中涉及到的主要参数设置及其说明。

深圳、广州和其他珠三角地区的经济及人口参数主要服务于研究中乘用车保有量的预测，对香港和澳门不适用。

附录-表 1 经济、人口参数设置

指标		2025	2030	2035	2040	2050	2060
GDP 增速	深圳	6.0%	5.5%	5.0%	4.5%	3.8%	2.9%
	广州	6.0%	5.2%	4.7%	4.3%	3.6%	2.8%
	其他珠三角	5.0%	5.0%	4.7%	4.3%	3.6%	2.8%
人口, 万人	深圳	1,825	1,871	1,900	1,900	1,880	1,862
	广州	1,936	1,975	2,001	2,001	1,981	1,961
	其他珠三角	4,339	4,462	4,542	4,542	4,497	4,457
	香港	756	777	798	813	811	789
	澳门	70.8	74.1	76.6	78.3	81.5	82.3

GDP 增速历史数据整理自各地统计年鉴，面向“十四五”，广东对全省 GDP 增速的预期在 5%左右⁷⁰，深圳和广州市也均提出了地区生产总值年均 6.0%的预期增长目标^{71, 72}。2025 年之后，政府的宏观规划文件中尚没有给出具体的预期增长目标。深圳市委六届十七次全会提出的最新目标是“到 2035 年，深圳的经济总量、人均地区生产总值要在 2020 年基础上翻一番”，据推算，要达到这一目标，未来 15 年我国经济总量或人均收入需翻一番，意味着年均 GDP 增速要达到 4.7%左右⁷³。2035 年之后，主要参考国内相关研究资料⁷⁴以及发达国家经济发展历史规律⁷⁵来设定 GDP 增速。

人口历史数据也来自各地统计年鉴，未来人口发展的不确定性较大，《广东省人口发展规划（2017-2030）》、《广东省国土空间规划（2020-2035）》等政策文件所能提供的参考价值有限。需要指出的是，目前全国人口生育率处在低位，不少研究对人口的预测较为悲观，考虑到广州、深圳两市常住人口的增长较大程度上得益于经济发展导致的人口正向流动，比如周边城市人口的迁移，但城市面积及容纳量有限，未来人口增长的空间不会太大。随着粤港澳大湾区的进一步交流互通，产业建设和经济水平也将进一步发展，其他珠三角城市将有可能取代广、深成为人口转移的主要承接地。非珠三角地区的经济发展相对落后，人才吸引力偏弱，未来三胎生育政策的效果仍有待观望，研究中认为非珠三角地区的人口增长驱动力较弱。整体来看，广东省作为我国第一经济大省，其人才吸引力依然处在全国先进水平，本研究认为在这种优势的加持下，广东省各地区的人口在达到峰值后可能处在一个非常缓慢的下降状态。

香港人口预测参考政府统计处发布的《香港人口推算 2022-2046》和《香港人口推算 2017-2066》，预计

香港人口将在本世纪中期达到顶峰，此后略有回落。澳门地区人口预测参考《澳门人口预测 2022-2041》，2041~2050 年均增长率为 0.4%，2051~2060 年均增长率为 0.1%。

附录-表 2 电力排放因子设置

指标		2020	2030	2040	2050	2060
火力发电单位供电煤耗, g 标煤/kWh	珠三角	294.8	280	269	258	248
电力排放因子, g CO ₂ e/kWh	珠三角	429	345	207	69	0
	香港	467	250	87	0	0
	澳门	536	366	210	55	0

电力系统净零排放也存在多条路径和情景，为简化计算，本研究认为电力作为未来主要终端能源之一，电力净零排放要先于其他用能部门，因此在所有情景中电力结构及排放因子的设置保持一致。

根据广东电网公司数据⁷⁶，2022 年全省外受电量 1772 亿千瓦时，占当年全省发售总电量的 23.3%，在研究中珠三角九市电力排放因子使用南方电网平均数值。2021 年南方电网单位电量排放因子为 469 g CO₂e/kWh⁷⁷，南方电网尚未公布长期减排规划，研究设定南方电网在 2055 年前后实现碳中和，中间年份排放强度采用线性插值得到。香港电力排放因子为中华电力和港灯两家公司的加权平均，中华电力提出于 2050 年底前，在整个价值链中实现净零温室气体排放，港灯也承诺“在 2035 年或之前将生产每度电的范畴 1 温室气体排放量较 2019 年水平下降 68.4%”并计划“在 2050 年前令业务运营全面达至碳中和”。澳门电力排放因子来自于澳门电力公司于 2022 年底公开演讲所提到的数据⁷⁷。

附录-表 3 交通需求参数设置

		2019	2020	2030	2040	2050	2060
客运周转量, 亿人公里	珠三角	3135	2047	4068	5512	6822	6758
	香港 (渡轮和航空)	82	8	108	144	191	191
货运周转量, 亿吨公里	珠三角 (不含远洋)	14200	13651	20511	24536	28267	29433
	香港 (仅航空)	113	83	143	190	253	253

运输周转量统计制度主要在中国内地使用, 体现在国家和地区统计年鉴之中。为方便计算, 在香港地区, 根据特区和运输公司公布的相关数据进行运输周转量折算。其中, 客运周转量仅包含内河渡轮和国泰航空客运的国内部分, 货运周转量为国泰航空货运国内和国际部分 (原始数据无法拆分), 假设民航客、货运周转量年均增长 2.9%。澳门地区重点只讨论道路交通, 不使用运输周转量方法。

珠三角客运周转量基于人均水平预测, 从 2016 年以来珠三角人均客运周转量^⑬便在 4000 公里上下波动, 2019 年珠三角人均客运周转量为 4080 公里 (由于新冠疫情影响, 2020 和 2021 年数据不作为趋势判断依据)。国际经验表明, 人均客运周转量和人均 GDP 之间存在强相关性, 根据本研究预测 2050 年珠三角人均 GDP 较 2019 年还将增长 250%左右, 研究认为届时人均客运周转量较 2019 年翻一番。

货运周转量基于人均货运量和平均运距预测, 2019 年珠三角平均货运运距为 487 公里 (不含远洋运输)^⑭, 2020-2021 年平均运距较 2019 年有所增加。未来粤港澳大湾区之间货运交流将进一步加强, 研究中假设珠三角平均货运运距年均增长 0.5%。假设人均货运量稳步增长, 在世纪中叶能达到发达国家 50 吨/人左右的水平。

^⑬ 将国际航空客运周转量剔除后结果

^⑭ 根据广东省以往历史统计数据及全国情况, 将水运货运量的 20%认为是珠三角远洋水运货运量, 将水运周转量的 50%认为是珠三角远洋货运周转量, 以此作推算。

附录-表 4 汽车保有量参数设置

			2020	2030	2040	2050	2060
乘用车千人保有量, 辆/千人	基准情景	深圳	170	200	230	230	230
		广州	132	196	260	260	260
		其他珠三角	248	369	398	400	400
		香港	77	90	94	105	118
		澳门	148	155	160	160	160
	净零碳排放情景	深圳	170	180	190	190	190
		广州	132	169	205	205	205
		其他珠三角	248	328	340	340	340
		香港	77	90	94	105	118
		澳门	148	155	160	160	160
出租保有量, 万辆	所有情景一致	珠三角(含网约)	35	64	73	81	88
		香港	1.81	1.78	1.83	1.78	1.79
		澳门	0.18	0.18	0.19	0.20	0.20
公共汽(电)车保有量, 万辆	所有情景一致	珠三角	5.7	6.0	6.1	6.0	6.0
		香港(含小巴)	2.13	2.06	2.24	2.05	2.26
		澳门	0.13	0.14	0.15	0.15	0.16

不同区域的乘用车保有量差别较大，在珠三角城市中，广州和深圳由于实施了限购政策，近年来保有量增长缓慢。同时，汽车也是拉动内需，扩大消费的重点领域之一，近几年各大限购城市先后出台松绑政策，预测未来乘用车市场还有一定增长空间。广州和深圳乘用车千人保有量饱和值根据本地实际发展趋势进行设置，其他珠三角城市则与其他研究中全国平均水平相当。出租车和公共汽电车参考万人保有量进行设置，网约车保有量则基于历史趋势预测年均复合增长率进行设置，年均复合增长率在 2025 年前和 2030 年前分别为 7%和 4%，其后保持年均 1~2%的增长。

香港汽车保有量基于香港环境保护署 EMFAC 模型进行分类预测。澳门目前私家车千人保有量已达到 148 辆，设定千人保有量饱和值在 2035 年前后达到 160 辆，出租车和公共汽电车参考万人保有量进行设置。

附录-表 5 新能源汽车相关参数设置

			2020	2030	2040	2050	2060
新能源私人乘用车保有量占比	基准情景	珠三角	2%	26%	52%	71%	88%
		香港	3%	28%	60%	100%	100%
		澳门	1%	4%	6%	10%	17%
	2060 净零碳排放情景	珠三角	2%	29%	70%	96%	100%
		2050 净零碳排放情景	珠三角	2%	43%	92%	100%
		香港	3%	28%	60%	100%	100%
		澳门	1%	30%	65%	100%	100%
新能源出租车保有量占比	基准情景	珠三角	94%	100%	100%	100%	100%
		香港	0	28%	64%	100%	100%
		澳门	1%	16%	42%	100%	100%
	净零碳排放情景	珠三角	94%	100%	100%	100%	100%
		香港	0	28%	64%	100%	100%
		澳门	1%	37%	100%	100%	100%
新能源公共汽车保有量占比	基准情景	珠三角	75%	100%	100%	100%	100%
		香港	0	12%	44%	55%	59%
		澳门	1%	100%	100%	100%	100%
	净零碳排放情景	珠三角	75%	100%	100%	100%	100%
		香港	0	22%	69%	100%	100%
		澳门	1%	100%	100%	100%	100%
新能源轻型货车保有量占比	基准情景	珠三角	7%	31%	81%	82%	82%
		香港	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%
		澳门	0.9%	3%	4%	6%	8%
	2060 净零碳排放情景	珠三角	7%	42%	90%	98%	100%
		2050 净零碳排放情景	珠三角	7%	44%	96%	100%
	香港		0.9%	25%	62%	100%	100%
	澳门		0.9%	7%	27%	100%	100%
新能源中重型货车保有量占比	基准情景	珠三角	3%	16%	26%	27%	27%
		香港	0	0	0	0	0
		澳门	2%	14%	19%	26%	35%
	2060 净零碳排放情景	珠三角	3%	25%	62%	91%	98%
		2050 净零	珠三角	3%	30%	77%	97%

碳排放情景	香港	0	23%	60%	100%	100%
	澳门	2%	18%	32%	56%	100%

注：上表中“净零碳排放情景”一词表示在 2050 净零碳排放情景和 2060 净零碳排放情景下参数设置一致，下同。

新能源乘用车方面，《深圳市新能源汽车推广应用工作方案（2021-2025 年）》提出“到 2025 年累计推广新能源私家车 78 万辆”，折合新增注册汽车中新能源汽车比重达到 60%左右。《广州市智能与新能源汽车创新发展“十四五”规划》中提出 2025 年新能源汽车新车渗透率达到 50%。作为国家级别的行业研究文件，《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》中设定了非约束性目标，即 2030/2035/2060 三个时间节点新能源乘用车新车市场占比分别达到 40%、50%和 100%。在净零碳排放情景中，基于预期减排结果对新能源汽车新车渗透率进行反向推演，进而根据存活率曲线进行车辆保有量的计算。对香港而言，已经提出“2035 年或之前停止燃油私家车登记”，在所有情景下均采用这一目标进行新能源私家车保有量占比的推算。澳门到目前为止没有出台更有利的新能源私家车激励政策，也没有设置相应目标，在基准情景下，根据历史数据假设新能源私家车保有量占比每年提高 5%，在净零碳排放情景下假设与香港基本同步，即 2050 年前后实现完全电动化。

出租、网约以及公交等公共服务车辆的电动化在珠三角已经基本完成，仅剩的部分存量燃油/气车也将在近期内完成替代。在香港，出租车目前完全由 LPG 车队组成，环境保护署官员表示未来五年内考虑置换 3000 辆零排放出租车，2027 年实现 700 台电动巴士推广目标，并将为这一转型提供财政支持。根据香港 2050 年的碳中和目标，上述公共领域内的车辆将在该时间点或之前实现完全零排放化。《澳门特别行政区经济和社会发展第二个五年规划（2021-2025 年）》提出到 2025 年公共巴士新能源车辆比例高于 90%，政府预计将于未来五年内将公共巴士全部置换为电动汽车。澳门电动的士（出租车）发展较慢，截至 2022 年 7 月底，本澳仅有 129 辆纯电动的士⁷⁸。在基准情景下，设定澳门出租车于 2050 年实现 100%零排放转型，在净零碳排放情景下，提前至 2035 年。

货车领域，包括城配物流在内的轻型货车电动化渗透率较高，《新能源汽车发展规划（2021-2035 年）》指出，力争到 2035 年实现公共领域全面电动化。现有新能源汽车推广情况距离政策提出的 2021 年至少 80%的目标甚远，不过有研究表明纯电动城市物流车有望在 2024-2025 年之间与传统燃油汽车实现 TCO 平价⁷⁹。

《节能与新能源汽车技术路线图（2.0）》研究中也从全国层面对货车的新能源推广提出了预期性目标：新能源货车占货车总销量的比例在 2025、2030 和 2035 年分别大于 12%、17%和 20%。香港和澳门均未对货车电动化提出清晰目标，在净零碳排放情景下，基于预期减排效果对车辆电动化水平进行反向推演。考虑到中重型货车运营环境的复杂性，作为应急备用，设定 2%左右的车辆仍将保留使用较为传统的燃料类型。

附录-表 6 汽车年均行驶里程参数设置

			2020	2030	2040	2050	2060
私人乘用车, 公里	基准情景	珠三角	12000				
		香港	10500				
		澳门	7600				
	2050 净零碳排放情景	珠三角	12000	11000	10200	9600	9000
		香港	10500				
		澳门	7600				
出租车, 公里	所有情景一致	珠三角	120000	122000	123000	122000	122000
		香港	156800				
		澳门	80000				
网约车, 公里	基准情景	珠三角	45000	49000	52000	53000	51000
	2050 净零碳排放情景	珠三角	45000	51000	61000	70000	76000
物流车 (轻型货车), 公里	所有情景一致	珠三角	28000				
		香港	28000				
		澳门	18000				
公共汽电车, 公里	所有情景一致	珠三角	62000				
		香港	54780	57616	59218	56953	58675
		澳门	35000				

对于珠三角地区, 在基准情景下, 私家车年均行驶里程保持相对稳定, 采用文献及调研的数值 12000 公里/年⁸⁰; 在 2050 净零碳排放情景下, 考虑到绿色出行比例的增加以及共享汽车等出行方式得到更充分利用, 私家车年出行距离将略有下降⁸¹。网约车年均行驶里程将呈现增加趋势, 在基准情景下增速逐渐减缓。在 2050 净零碳排放情景下, 由于认为网约车出行将替代一部分的私家车出行, 网约车年均行驶里程会在 2030 年后仍然呈现较快的增长趋势。由于出租车服务业态已经成型且单位距离价格较网约车略高, 假设出租车年均行驶距离先小幅增加后下降, 在所有情景下均采用一致的假设。由于个体差异性较大, 货车年均行驶里程的获取难度很大, 这方面也缺乏较为系统的研究, 本研究中货车年均行驶里程数据主要基于调研和统计数据。

香港车辆 VKT 基于香港环境保护署 EMFAC 模型参数进行设置。澳门地形狭小, 车辆平均行驶里程普遍偏低, 清华大学博士学位论文《中国典型城市机动车排放特征与控制策略研究》中, 作者根据澳门高峰小时路网交通流量分布, 推算出各类车辆的交通出行特征及行驶里程, 例如, 小客车和摩托车年均行驶里程分别为 7600 公里和 4300 公里。研究参考该论文的结果对澳门各类车型的年均出行里程进行设定。

附录-表 7 汽车能耗相关参数设置

			2020	2030	2040	2050	2060	
珠三角	乘用车	燃油	6.4	5.0	4.5	4.5	4.5	
		纯电动	12.5	11.6	11.0	10.8	10.5	
	公交 (大型)	燃油	27.5	23.8	22.1	21.6	21	
		纯电动	139.2	131.6	123.9	116.2	116.2	
		氢燃料电 池	6.9	6.3	5.6	5.0	5.0	
	轻型物流	燃油	8.8	7.8	7.5	7.3	7.2	
纯电动		29.8	28.2	26.6	24.9	24.9		
香港/澳 门	私家车	燃油	10.8	8.3	8.2	8.1	8.0	
		纯电动	18.7	20.0	19.0	18.0	17.0	
	出租车	LPG	16.0					
		纯电动	14.5	13.5	12.5	11.5	10.5	
	巴士	燃油	41.5	41.1	40.7	40.3	39.9	
		纯电动	174.0	173	172	171	170	
		氢燃料电 池	9.0	8.6	8.1	7.7	7.4	
	小巴	燃油	25.8	25.0	24.7	24.5	24.3	
		纯电动	149	148	147	146	145	
	轻型货车	燃油	12.4	12.3	12.1	12.0	11.9	
		纯电动	42	41	40	39	38	
	中型货车	燃油	27.3	27.1	26.8	26.6	26.3	
		纯电动	111	110	109	108	107	
	重型货车	燃油	37.1	36.8	36.5	36.1	35.7	
		纯电动	208	207	206	205	204	
	澳门	轻型电单车	燃油	2.5	2.5	2.4	2.3	2.3
纯电动			1.1	1.1	1.05	1.0	1.0	
重型电单车		燃油	3.8	3.7	3.6	3.5	3.5	
		纯电动	1.6	1.6	1.5	1.4	1.4	

注：表中能耗数据中，珠三角为各类车当年新车能耗数据，在研究中基于车辆存活曲线进行其他相关计算，港澳地区为车队当年平均能耗。燃油车能耗单位为 L/100km，LPG 车辆能耗单位为 L/100km，纯电动车辆能耗单位为 kWh/100km，氢燃料电池车辆能耗单位为 kg/100km。

研究对 2017-2021 年广东省各地市当年销售新车的油耗进行了整理和离散度分析，21 个地市传统燃油车新车能耗的标准差在 0.11-0.13 之间，油耗水平分布较为集中。汽车能耗主要由行业整体发展水平决定，受区域差异影响较小，省市一级的油耗基本上也都会采用全国平均油耗水平作为基础参数进行测算（港澳台地区除外）。珠三角地区乘用车油耗根据能源与交通创新中心系列《中国乘用车双积分研究报告》和工信部公开数

据进行整理，2035 年之前根据《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》中目标折算，假设在 2035 年之后传统燃油车油耗保持不变。电动乘用车电耗水平基于工信部《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理实施情况年度报告》确定，国务院办公厅印发的《新能源汽车产业发展规划（2021~2035 年）》指出到 2025 年，纯电动乘用车新车平均电耗降至 12.0 kWh/100km。《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》中提出，技术领先的典型 A 级 BEV 综合工况电耗到 2025 年小于 11 kWh/100km，2030 和 2035 年分别小于 10.5 kWh/100km 和 10 kWh/100km，B 级 BEV 的电耗比 A 级约高 20~30%左右。对于商用车，参照《节能与新能源汽车技术路线图（2.0）》中对客车和货车油耗下降目标的预期，并将货车的能耗降速适当调快，以期在货车电动化尚未形成规模效应前持续降低货车碳排放。到 2025 年，研究设定客车和货车油耗较 2019 年均降低 10%，2030 年较 2019 年分别降低 15%和 12%以上，2035 年较 2019 年分别降低 20%和 15%以上。对于天然气、纯电动以及燃料电池商用车辆，在对未来的预测中，参考清华大学《车用能源展望 2012》的相关研究成果，该报告中以 2014 年作为基准年，考虑到天然气、纯电动和燃料电池这三类商用车近十年来的发展情况，在引用时对能耗改善幅度进行略微调整。

受路况、使用习惯等差异影响，香港地区车辆的能耗水平与珠三角地区存在一定差异。香港机电工程署 (EMSD) 网站⁸²公布了香港主要类别车型的平均能耗水平，研究据此设置车辆能耗。关于未来预测，参考 OECD⁸³的相关研究成果，假设后续年份车辆单位能源消耗量每年下降 2.3%。有关电动汽车能耗预测的参考有限，斯普林格公开的一篇研究⁸⁴预测，未来电动车辆的单位能耗水平有望每年下降 0.1 kWh/100km。澳门地区车辆能耗水平设置和预测与香港一致。

需要注意的是，目前汽车的能耗水平一般是指在试验场内通过固定的测试循环测得的工况能耗，但在实际驾驶过程中，由于驾驶习惯、路况等因素影响，车辆的实际能耗和工况能耗之间存在一定的差异。一些针对乘用车实际油耗和工况油耗之间差异的研究显示，二者之间的差异可能达到 15%左右⁸⁵，中国汽车技术研究中心对这一差异的相关研究数值高达 29%⁸⁶。综合以上信息，在本研究中，将用于碳排放计算的乘用车能耗实际值设定为工况数据的 120%（珠三角适用）。

附录-表 8 珠三角营运性公路运输相关参数设置

相关指标		2020	2030	2040	2050	2060	
公路客运	周转量, 亿人公里	基准情景	343.98	683.66	941.30	1175.84	1331.33
		2060 净零碳排放情景	343.98	583.12	664.45	760.84	783.13
		2050 净零碳排放情景	343.98	563.01	609.08	691.67	704.82
	单位能效, 千克标煤/千人公里	基准情景	20.0	19.21	18.45	17.72	17.02
		净零碳排放情景	20.0	18.43	16.99	15.66	14.43
	电力、氢能消费占比	基准情景	17%	26%	50%	52%	52%
		2060 净零碳排放情景	17%	28%	65%	92%	100%
		2050 净零碳排放情景	17%	36%	87%	100%	100%
	公路货运	周转量, 亿吨公里	基准情景	1646.27	2666.47	3189.74	3674.76
2060 净零碳排放情景			1646.27	2461.36	2453.65	2544.07	2648.97
2050 净零碳排放情景			1646.27	2461.36	2208.28	2261.39	2207.48
单位能效, 千克标煤/百吨公里		基准情景	3.0	2.71	2.44	2.21	1.99
		净零碳排放情景	3.0	2.43	1.97	1.59	1.29
电力、氢能消费占比		基准情景	1%	14%	20%	20%	20%
		2060 净零碳排放情景	1%	23%	61%	91%	100%
		2050 净零碳排放情景	1%	33%	82%	100%	100%

《交通运输行业发展统计公报 2019》中统计, 公路班线客运企业单耗为 13.1 千克标煤/千人公里, 公路专业货运企业单耗为 1.7 千克标煤/百吨公里。然而受新冠疫情影响, 2020-2023 年间公路客运企业单耗增至 20 千克标煤/千人公里的水平。货运单耗方面, 据相关专家介绍, 公路专业货运企业单耗实际上远远优于货运行业整体水平, 目前国内货运单耗约为 3.0 千克标煤/百吨公里。对于未来预测, 《广东省综合交通运输体系“十四五”发展规划》提出, 到 2025 年“营运车辆单位运输周转量能耗、二氧化碳下降率分别达到 4.0%和 3.5%”, 货运车辆单耗下降速率一般高于客运车辆⁸⁷, 而珠三角公路客运周转量整体较低, 结合以往目标设定 (《交通运输节能“十三五”发展规划》), 在基准情景下设定客运单位周转量能耗每五年下降 2%, 货运单位周转量能耗

每五年下降 5%，在净零碳排放情景下，设定客运和货运单位周转量能耗每五年分别下降 4%和 10%。道路零排放转型正在加速，根据能源与交通创新中心《广东省道路交通净零排放路线图》研究，未来电动汽车和氢燃料电池将成为公路客、货运车辆的主流，在基准情景下 2050 年客运、货运电力消费占比分别达到 45%和 16%，在净零碳排放情景下分别可达 81~88%和 72~78%，届时氢能也会有一定占比。

根据统计年鉴数据，公路客、货运周转量占珠三角运输总量的约 17% (2020 年) 和 12% (2020 年)，公路货运周转量占比远低于全国平均水平 30% (2020 年)。在净零碳排放情景下，公路客运进一步分流至高铁，公路客运周转量占比不断下降。公路货运量分流至铁路和水路，2050 净零碳排放情景下，2030、2040 和 2050 货运周转量占比分别为 12%、9%和 8%。

附录-表 9 珠三角铁路相关参数设置

	相关指标		2020	2030	2040	2050	2060
铁路客运	周转量，亿人公里	基准情景	223.60	522.80	719.82	899.17	1018.07
		2060 净零碳排放情景	223.60	643.44	1052.04	1452.51	1801.21
		2050 净零碳排放情景	223.60	723.88	1162.78	1590.84	1957.84
	单位能效，吨标煤/百万换算吨公里	基准情景	4.32	3.89	3.81	3.74	3.70
		2060 净零碳排放情景	4.32	3.89	3.57	3.33	3.10
		2050 净零碳排放情景	4.32	3.89	3.48	3.08	2.74
铁路货运	周转量，亿吨公里	基准情景	37.35	82.05	98.15	113.07	117.73
		2060 净零碳排放情景	37.35	205.11	736.09	1130.70	1177.32
		2050 净零碳排放情景	37.35	205.11	736.09	1130.70	1177.32
	单位能效，吨标煤/百万换算吨公里	基准情景	4.32	3.89	3.81	3.74	3.70
		2060 净零碳排放情景	4.32	3.89	3.57	3.33	3.10
		2050 净零碳排放情景	4.32	3.89	3.48	3.08	2.74

根据统计年鉴数据计算，珠三角铁路客、货运周转量占比分别为 10.9%（2020 年）和 0.3%（2020 年）。大湾区城际铁路修建完工后，铁路客运能力进一步提升，同时，“民航转高铁”也将使部分民航客流分流至铁路。在 2050 净零碳排放情景下，铁路客运周转量占比提升至 18%（2030）、21%（2040）和 23%（2050），铁路货运周转量占比提升至 1.0%（2030）、3.0%（2040）和 4.0%（2050）。

铁路能耗数据来源于《铁道统计公报》，国家铁路单位运输工作量能耗由 2010 年的 4.12 吨标煤/百万换算吨公里下降至 2019 年的 3.84 吨标煤/百万换算吨公里，2020 和 2021 年能耗略有反弹。《2030 年前碳达峰行动方案》提出，2030 年国家铁路单位换算周转量综合能耗比 2020 年下降 10%。在基准情景下，此后每年单位能耗下降 0.2%。在 2060 净零碳排放情景和 2050 净零碳排放情景下，2050 年单位换算周转量综合能耗分别较 2030 年下降 14%和 20%。研究中也考虑了未来铁路电气化水平的进一步提高。目前，铁路客运电力机车占比超过 60%，货运电力机车占比超过 70%。在 2050 净零碳排放情景下，至 2050 年客运机车和货运机车电动化率分别为 88%和 90%。

附录-表 10 水运相关参数设置

	相关指标		2020	2030	2040	2050	2060
珠三角 水路客运	周转量, 亿人公里	基准情景	2.24	4.02	5.54	6.92	7.83
		2060 净零碳排放情景	2.24	4.02	11.07	13.83	15.66
		2050 净零碳排放情景	2.24	4.02	11.07	13.83	15.66
	单位能效, 吨标煤/百万换算吨公里	基准情景	2.50	2.24	2.06	1.92	1.91
		2060 净零碳排放情景	2.50	2.15	1.89	1.70	1.65
		2050 净零碳排放情景	2.50	2.13	1.85	1.64	1.58
珠三角 水路货运	周转量, 亿吨公里	基准情景	11877	17619	21076	24282	25283
		2060 净零碳排放情景	11877	17722	21224	24451	25460
		2050 净零碳排放情景	11877	17722	21469	24734	25901
	单位能效, 吨标煤/百万换算吨公里	基准情景	2.50	2.24	2.06	1.92	1.91
		2060 净零碳排放情景	2.50	2.15	1.89	1.70	1.65
		2050 净零碳排放情景	2.50	2.13	1.85	1.64	1.58
香港-内河 水路客运	周转量, 亿人公里	所有情景一致	0.103				
	单位周转量 能耗, 千克标煤/ 人公里	所有情景一致	0.0191				
	电动船舶 占比	基准情景	0				
		净零碳排放情景	0		10%		100%

注：香港内河水路客运指香港渡轮客运，包含天星小轮和新渡轮数据。

我国并未持续公布水路运输单位周转量能耗数据，《交通运输行业发展统计公报》中对重点远洋和沿海货运企业每千吨海里单耗进行了监测并发布 2013-2019 年的相关数据。交通运输部水运科学研究院首席研究员彭传圣在《我国水运历史燃料消耗量分析》一文中指出，“2020 年内河和沿海货运船舶单位周转量能耗较 2019 年下降 3.6%”，2020 年水运单位周转量能耗约为 2.5 千克标煤/千吨公里。参考世界资源研究所在《武汉市交通碳排放达峰路径》研究中所提出的设定，在基准情景下，2025 年单位周转量能耗较 2020 年下降 5.5%，此后每五年下降 5%、4.5%、4%、3.5%和 3%，2060 年较 2050 年下降 1%，相当于 2060 年较 2020 年下降 24%。在 2050 净零碳排放情景下，2025 年及后续每五年单位周转量能耗分别下降 8%、7.5%、7%、6.5%、6%和 5.5%。

《水运十四五发展规划》“鼓励 LNG、氢能等新能源和清洁能源船舶研发使用”；未来船用清洁能源的发展也将促使水运排放不断降低，在研究中考虑了未来船用燃料结构的变化。

附录-表 11 民航相关参数设置

相关指标		2020	2030	2040	2050	2060	
民航客运	周转量，亿人公里	基准情景	1486	2919	4014	5026	5665
		2060 净零碳排放情景	1486	2899	3953	4881	5422
		2050 净零碳排放情景	1486	2838	3898	4811	5344
	单位能效，千克油/吨公里	基准情景	0.316	0.281	0.259	0.239	0.227
		2060 净零碳排放情景	0.316	0.275	0.241	0.211	0.185
		2050 净零碳排放情景	0.316	0.267	0.227	0.194	0.165
民航货运	周转量，亿吨公里	基准情景	96	154	185	216	224
		2060 净零碳排放情景	96	133	136	159	165
		2050 净零碳排放情景	96	133	136	159	165
	单位能效，千克油/吨公里	基准情景	0.316	0.281	0.259	0.239	0.227
		2060 净零碳排放情景	0.316	0.275	0.241	0.211	0.185
		2050 净零碳排放情景	0.316	0.267	0.227	0.194	0.165
可持续航空燃料应用比例	珠三角/澳门	基准情景	0	1.0%	4.5%	8.0%	10.0%
	香港		0	10%			
	大湾区	2060 净零碳排放情景	0	5.0%	22.5%	40.0%	65.0%
		2050 净零碳排放情景	0	5.2%	39.0%	65.0%	90.0%

注：民航客运和货运周转量仅包含珠三角和香港数据，香港数据只含国泰航空，来自于航空公司按月度公开的运量数据。民航运输周转量的原始数据均包含国内和国际部分，根据南航、国泰航空等公司的部分披露数据，将珠三角民航客运转量的约 70% 归为国内运输量，香港地区约 7% 的运输周转量归为香港与内地之间发生的数据。

民航单位能效数据来自于《民航行业发展统计公报》，《2022 中国民航绿色发展政策与行动》提出到 2025 年民航每吨公里油耗可降至 0.293 千克的目标。《民航节能减排“十三五”规划》中提出 2020 年单位运输周转量能耗五年下降 4%，在基准情景下，假设自 2025 年后的每五年单位运输周转量能耗均按照这一幅度下降。参考世界资源研究所在《武汉市交通碳排放达峰路径研究》中的设定，在 2060 和 2050 净零碳排放情景下，2025 年后单位运输周转量能耗每年下降 1.3% 和 1.6%。

可持续航空燃料应用方面，目前中国内地仅提出 2025 年 5 万吨的预期消费量规模，香港国泰航空公司预计 2023 年可持续航空燃料使用占比可达到 2%，并承诺到 2030 年使可持续航空燃料消费占比达到 10%。在 2060 净零碳排放情景下，参考世界资源研究所《武汉市交通碳排放达峰路径研究》中的设定。在 2050 净零碳排放情景下，基于国际航空运输协会（IATA）规划的可持续航空燃料占比进行设定。

附录-表 12 各类能源单位碳排放量

	单位	2020	2030	2040	2050	2060
汽油	吨 CO ₂ -eq/吨	3.04				
柴油	吨 CO ₂ -eq/吨	3.15				
天然气	吨 CO ₂ -eq/万立方米	21.6				
液化天然气	吨 CO ₂ -eq/吨	2.61				
航空煤油	吨 CO ₂ -eq/吨	3.15				
燃料油	吨 CO ₂ -eq/吨	3.05				
燃料甲醇	吨 CO ₂ -eq/吨	1.37				
可持续航空燃料	吨 CO ₂ -eq/吨 (直接排放)	3.15				
	吨 CO ₂ -eq/吨 (燃料周期排放)	0.88	0.84	0.42	0	0
南方电网	g CO ₂ /kWh	429	345	207	69	0
香港电网	g CO ₂ /kWh	467	250	87	0	0
澳门电网	g CO ₂ /kWh	536	366	210	55	0
氢能	吨 CO ₂ -eq/吨 (燃料周期排放)	21.8	14.4	8.0	2.4	2.0

注：化石燃料排放因子是指燃烧单位质量的燃料所产生的二氧化碳量，电力终端排放强度为 0,电网排放因子是指单位发电量所产生的二氧化碳量，对于可持续航空燃料，由于从生命周期角度才能减排，本研究根据现有技术对其生命周期的排放因子进行了预测。

汽油、柴油、天然气、液化天然气、航空煤油、燃料油的碳排放因子取自《中国产品全生命周期温室气体排放系数集（2022）》，可持续航空燃料在直接燃烧阶段的碳排放强度与传统航煤并无太大区别，故采用同一数值。根据资料，目前可持续航空燃料生命周期碳排放强度较传统航煤可减排 80%以上⁸⁸，故生命周期排放因子为其直接碳排放强度的 1/5，随着工艺的进步，假设在 2060 年前可实现生命周期碳中和。燃料甲醇碳排放因子参考中国船级社《船用燃料全生命周期温室气体排放强度评估与认证指南 2022》。

根据澳门电力公司公开资料⁷⁷显示，南方电网 2020 年排放因子为 429 g CO₂-eq/kWh，设定南方电网可在 2055 年前后实现碳中和，中间年份数据根据线性插值得到。香港电网排放因子基于中华电力和香港电灯两家公司的规划进行预测。澳门电网排放因子来自于澳门电力公司公开演讲材料⁷⁷。氢能方面，目前主要种类仍是工业副产氢，绿氢占比极低，根据《中国产品全生命周期温室气体排放系数集（2022）》，2020 年煤制氢上游排放最优数据为 21.80 kg CO₂/kg，电解水制氢平均排放为 24 kg CO₂/kg。本研究参考 Peng⁸⁹等人的研究对氢能生命周期碳排放因子进行设置。

参考资料

- ¹ Brand Hong Kong, https://www.brandhk.gov.hk/docs/default-source/factsheets-library/hong-kong-themes/2021-12-16/logistics-hub-sc.pdf?sfvrsn=dca8e981_3
- ² 2022 Foundation, *Creating the Greater Bay Area of the Future – Opportunities for Hong Kong*, 2019.
- ³ 交通运输部, 《公路水路运输量统计试行方案 (2014)》.
- ⁴ 中央人民政府驻香港特别行政区联络办公室, http://www.locpg.gov.cn/jsdt/2022-04/20/c_1211638713.htm
- ⁵ 中华人民共和国发展和改革委员会, https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztlz/jjyxtfz/202211/t20221128_1342411.html
- ⁶ 中华人民共和国中央人民政府, http://www.gov.cn/xinwen/2023-02/07/content_5740506.htm
- ⁷ 新华网, https://web.archive.org/web/20210320011628/http://www.xinhuanet.com/2018-03/17/c_1122549368.htm
- ⁸ 中华人民共和国中央人民政府, http://www.gov.cn/xinwen/2020-08/05/content_5532441.htm
- ⁹ 澳门记忆, https://www.macaumemory.mo/specialtopic_c25060412736440ba32ff87ac2988cb7
- ¹⁰ 中央人民政府驻香港特别行政区联络办公室, http://www.locpg.gov.cn/jsdt/2022-08/02/c_1211672636.htm
- ¹¹ 国泰航空二零二二年中期报告, 2022.
- ¹² 澳门航空官方网站, <https://www.airmacau.com.mo/#/aboutMacau>
- ¹³ 深圳航空有限责任公司 2022 年度跟踪评级报告, 2022 年 7 月.
- ¹⁴ 顺丰航空官方网站, https://www.sf-airlines.com/sfa/zh/article_42.html
- ¹⁵ 香港航空维基百科, <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A6%99%E6%B8%AF%E8%88%AA%E7%A9%BA>
- ¹⁶ ICAO, *CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology*, 2019.
- ¹⁷ The Greenhouse Gas Protocol, <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>
- ¹⁸ 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告, 2018.
- ¹⁹ 北京交通大学中国综合交通研究中心, *不同交通方式能耗与排放因子及可比性研究*, 2009.
- ²⁰ 中国铁道科学研究院集团有限公司, <https://www.rails.cn/news.php?id=61666>
- ²¹ 新浪科技, 零排放! 我国首台氢燃料电池混合动力机车下线, <https://finance.sina.com.cn/tech/2021-01-27/doc-ikftpny2351130.shtml>
- ²² Bloomberg, *Germany has the world's first hydrogen-powered passenger train*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-09-26/germany-has-the-world-s-first-hydrogen-powered-train>
- ²³ Roland Berger, *Study on the use of fuel cells and hydrogen in the railway environment*, 2019.
- ²⁴ 《低碳交通》, 中国低碳发展丛书. 中国环境科学出版社, 2015.
- ²⁵ China Dialogue, <https://chinadialogue.net/zh/8/74874/>
- ²⁶ 交通运输部水运科学研究院, *中国内河航运中长期低碳发展路径研究*, 2022.
- ²⁷ International Maritime Organization, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx>
- ²⁸ 中国船级社, *航运低碳发展展望 2021*.

-
- ²⁹ European Commission, Reducing emissions from the shipping sector, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-shipping-sector_en#inclusion-of-maritime-emissions-in-eu-emissions-trading-system-ets
- ³⁰ 上海市生态环境局, <https://sthj.sh.gov.cn/hbzhywpt5333/20221012/8d68442dbb7e41229a7cfe7dcb821212.html>
- ³¹ 北京大学能源研究院, 中国可持续航空燃料发展研究报告-现状与展望, 2022.
- ³² World Economic Forum, <https://www.weforum.org/agenda/2022/12/aviation-net-zero-emissions/>
- ³³ ICAO, <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>
- ³⁴ IATA, Net-zero carbon emissions by 2050, <https://www.iata.org/en/pressroom/pressroom-archive/2021-releases/2021-10-04-03/>
- ³⁵ 红塔证券, 中国能耗问题系列研究之二: 交通运输部门能耗篇, 2014.
- ³⁶ 百度地图慧眼, 2021 年度中国城市活力研究报告, 2022.
- ³⁷ 新浪新闻, <https://news.sina.com.cn/c/143663.html>
- ³⁸ 人民网, <http://travel.people.com.cn/n1/2019/0221/c41570-30853059.html>
- ³⁹ 世邦魏理仕研究部, 破解粤港澳大湾区内地九市物流设施投资密码, 2022.
- ⁴⁰ HKTDC, 香港物流业概况, <https://research.hktdc.com/sc/article/MzExMjkxOTgy>
- ⁴¹ 横琴粤澳深度合作区, http://www.hengqin.gov.cn/macao_zh_hans/hzqgl/content/post_3489333.html
- ⁴² 中国汽车, <http://auto.china.com.cn/view/qcq/20190513/697097.shtml>
- ⁴³ 山西证券, 2022 年春节旅游市场点评, 2022.
- ⁴⁴ 中华人民共和国交通运输部, https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202008/t20200811_3449697.html
- ⁴⁵ 21 财经, <https://m.21jingji.com/article/20230331/herald/964024a297b7f71c8110d788bc9468c6.html>
- ⁴⁶ 深圳新闻网, https://www.sznews.com/news/content/2023-04/17/content_30175754.htm
- ⁴⁷ 中华人民共和国中央人民政府, https://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content_5230289.htm
- ⁴⁸ 交通运输部, 绿色交通“十四五”发展规划, 2021.
- ⁴⁹ 2030 年前碳达峰行动方案, https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm
- ⁵⁰ “十四五”民航绿色发展专项规划, <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/28/5670938/files/c22e012963ce458782eb9cb7fea7e3e3.pdf>
- ⁵¹ 中华人民共和国中央人民政府, https://www.gov.cn/zhengce/jiudu/tujie/202307/content_6890685.htm
- ⁵² 新华财经, https://www.cnfin.com/hg-lb/detail/20230224/3812642_1.html
- ⁵³ 中国能源新闻网, https://www.cpnnews.com.cn/news/zngc/202111/t20211125_1458727.html
- ⁵⁴ 中国能源研究会, 构建新型电力系统路径研究, 2023.
- ⁵⁵ 国家能源局, http://www.nea.gov.cn/2023-07/31/c_1310734804.htm
- ⁵⁶ 中国电力企业联合会, 中国电力行业年度发展报告 2023, 2023.
- ⁵⁷ 氢能产业中长期规划 (2021-2035), http://zfxgk.nea.gov.cn/1310525630_16479984022991n.pdf
- ⁵⁸ 中国内河航运中长期低碳发展路径研究, 交通运输部水运科学研究院, 2022.
- ⁵⁹ 国际船舶网, http://www.eworldship.com/html/2023/ship_market_observation_0417/191614.html
- ⁶⁰ 中华人民共和国中央人民政府, https://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2547150.htm
- ⁶¹ All at sea, Methanol and Shipping, Longspur Research, 2022.
- ⁶² 中华人民共和国香港特别行政区行政长官 2023 年施政报告, <https://www.policyaddress.gov.hk/2023/tc/policy.html>

-
- ⁶³ IIGF 观点, 国际航空业碳抵消与削减机制 (CORSIA) 运行模式概览,
<https://iigf.cufe.edu.cn/info/1012/6925.htm>
- ⁶⁴ IATA, <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/>
- ⁶⁵ 中国航空新闻网, <https://www.cannews.com.cn/2021/04/30/99325333.html>
- ⁶⁶ 中国民航网, http://caacnews.com.cn/1/6/202111/t20211109_1333848.html
- ⁶⁷ 深圳政府在线, http://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post_10692371.html
- ⁶⁸ 搜狐, https://www.sohu.com/a/684774951_253988
- ⁶⁹ 生态环境部环境规划院, 商谈目标下我国货运需求变化以及对二氧化碳与大气污染物排放影响的研究, 2022.
- ⁷⁰ 广东省人民政府, 广东省国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要, 2021.
- ⁷¹ 深圳政府在线, 深圳市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五远景目标纲要, 2021.
- ⁷² 广州市人民政府, 广州市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五远景目标纲要, 2021.
- ⁷³ 中华人民共和国中央人民政府, http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/17/content_5593378.htm
- ⁷⁴ 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J].中国人口·资源与环境, 2020,30 (11): 1-25.
- ⁷⁵ The World Bank, Data.
- ⁷⁶ 广东电力交易中心, 广东电力市场 2022 年度报告, 2023.
- ⁷⁷ 澳门电力系统低碳发展探讨, https://www.macaomicf.com/micf2022/files/presentation-speech-download/06_liuxiaoju.pdf
- ⁷⁸ 澳门日报, http://www.macaodaily.com/html/2022-08/15/content_1615205.htm
- ⁷⁹ 世界资源研究所: 迈向碳中和目标: 中国道路交通领域中长期减排战略, 2021.
- ⁸⁰ Ou, S., Yu, R., Lin, Z. et al. Intensity and daily pattern of passenger vehicle use by region and class in China: estimation and implications for energy use and electrification. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 25, 307–327 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09887-0>
- ⁸¹ WRI, 中国道路交通 2050 年“净零”排放路径研究, 2019.
- ⁸² 香港机电工程署,
<https://web.archive.org/web/20210804093635/https://ecib.emsd.gov.hk/index.php/en/energy-utilisation-index-en/transport-sector-en>
- ⁸³ Tikoudis, I., R. Mebiame and W. Oueslati (2022), "Projecting the fuel efficiency of conventional vehicles: The role of regulations, gasoline taxes and autonomous technical change", *OECD Environment Working Papers*, No. 198, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/13b94818-en>.
- ⁸⁴ Weiss, M., Cloos, K.C. & Helmers, E. Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles. *Environ Sci Eur* 32, 46 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00307-8>
- ⁸⁵ 能源与交通创新中心, 2018 中国乘用车实际道路行驶与油耗分析年度报告.
- ⁸⁶ CATARC 观点, <https://www.catarc.ac.cn/upload/www/201809/201536266f5u.pdf>
- ⁸⁷ 交通运输部关于印发公路水路交通运输节能减排“十二五”规划的通知,
http://www.gov.cn/gongbao/content/2012/content_2076113.htm
- ⁸⁸ Boeing, <https://boeing.mediaroom.com/2021-01-22-Boeing-Commits-to-Deliver-Commercial-Airplanes-Ready-to-Fly-on-100-Sustainable-Fuels>
- ⁸⁹ Peng, T.D., Ou, X.M., Yuan, Z.Y., et.al., Development and application of China provincial road transport energy demand and GHG emissions analysis model. *Applied Energy* 222 (2018) 313-328.