

2024年8月

加速广东省道路交通电动化， 助力交通脱碳和空气质量改善

作者：牛天林、何岳璋



鸣谢

作者在此向国际清洁交通委员会 (ICCT) 的同事杨柳含子、孟至航和Felipe Rodríguez致谢, 感谢他们对本报告进行审阅并提供建设性意见。另外感谢内部同事Josh Miller、Gabriel Alvarez、Arijit Sen以及独立顾问Jacob Teter为本报告提供技术支持。

另外, 作者希望向广东省环境科学研究院的专家刘剑筠、王龙、朱倩如和罗银萍致以诚挚感谢, 但上述专家的审阅并不代表完全认同本文内容, 如有任何错误疏漏, 皆有作者承担。

本报告为“国家自主贡献亚洲交通倡议项目 (NDC-TIA)”下开展的相关研究, NDC-TIA项目隶属于“国际气候倡议”(IKI), IKI在德国联邦经济事务和气候行动部的领导下开展相关工作, 并与本倡议行动的发起部门德国联邦环境部和外交部紧密合作。更多信息, 欢迎访问项目官网: <https://www.ndctransportinitiativeforasia.org/>。

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag



欢迎扫码参与调查,
分享您对NDC-TIA项目成果的宝贵意见:
<https://tinyurl.com/ndctia-survey>

International Council on Clean Transportation
1500 K Street NW, Suite 650
Washington, DC 20005

communications@theicct.org | www.theicct.org | [@TheICCT](https://twitter.com/TheICCT)

© 2024 International Council on Clean Transportation (ID 235)

介绍

广东省是中国新能源汽车，特别是零排放汽车市场发展最快的地区之一¹。在充分理解道路车辆电动化对实现脱碳和空气质量改善目标的重要性后，广东省在其“十四五”节能减排实施方案中提出了到2025年全省新能源汽车新车销量达到汽车销售总量20%的目标（广东省人民政府，2022年a）。广东省内的部分城市在此基础上又进一步设定了更加积极严格的目标：深圳提出在“十四五”期间，全市新增注册汽车中新能源汽车比重达到60%左右；广州提出了到2025年新能源汽车渗透率超过50%的目标，并要求公交、环卫领域燃料电池汽车占比不低于30%；佛山设定了到2030年，氢燃料电池汽车保有量达到18000辆的目标，应用范围将涵盖乘用车、公交客车、物流配送汽车及自卸车（金伶俐、褚一丹、汪锡媛，2023年；金伶俐、褚一丹，2023年；牛天林、马云霄、张翌晨，2023年）。

推动车辆向电动化过渡转型是支持广东省实现其环境目标的重要举措。世界资源研究所（WRI）的相关研究表明，需要进一步提升电动化转型目标，才能助力广东省实现2030年碳达峰以及2060年碳中和的目标（苗领等人，2023年；广东省人民政府，2022年b）。在《广东省环境空气质量持续改善行动计划》中也将电动化列为应对空气污染（特别是臭氧污染）的关键措施之一。2022年，臭氧是广东省的首要空气污染物，全年臭氧（O₃）首要污染天数占比近84%，年均臭氧浓度为157μg/m³，较2021年浓度高出9%。剩余天数的主要污染物为二氧化氮（NO₂）、细颗粒物（PM_{2.5}）和颗粒物（PM₁₀），这三项污染物的年均环境浓度分别为19μg/m³、20μg/m³和34μg/m³。加速向新能源汽车过渡转型将有助于广东省减少温室气体（GHG）和空气污染物排放，并改善空气质量。

国际清洁交通委员会此前与海南省开展的多项合作研究表明，新能源汽车的成功推广和应用对海南省实现环境目标至关重要。这些研究量化了《海南省新能源汽车推广中长期行动方案（2023—2030年）》中设定的100%新能源汽车销售目标所能带来的减排和空气质量改善收益，同时评估了针对重型车（客车和货车）设定积极的电动化转型目标所能实现的潜在收益（崔洪阳、何卉，2019年；崔洪阳、牛天林、解奕豪，2022年；邵臻颖，2023年；牛天林、解奕豪，2024年）。研究结果表明，在加速推进重型车电动化的情景下，海南省道路交通领域的二氧化碳（CO₂）排放到2035年将减少53%，并可在2030年之前实现CO₂排放达峰。加速应用电动公交客车和货车还能带来显著的空气质量改善，到2035年实现道路交通相关NO₂排放减少67%，PM_{2.5}排放减少42%，臭氧排放减少44%。

在此背景下，本报告以2021年到2035年为时间框架，针对加速广东省道路车辆电动化发展拟定了一套路线方案，并进行了详细的温室气体排放、污染物排放以及空气质量建模，以评估气候和空气质量方面的收益。我们还考虑了在不同城市或区域针对不同车辆类别制定可行性电动化推广政策的差异化情景。最后，基于建模分析结果，我们为广东省新能源汽车过渡转型提出了一些可供参考的政策建议。

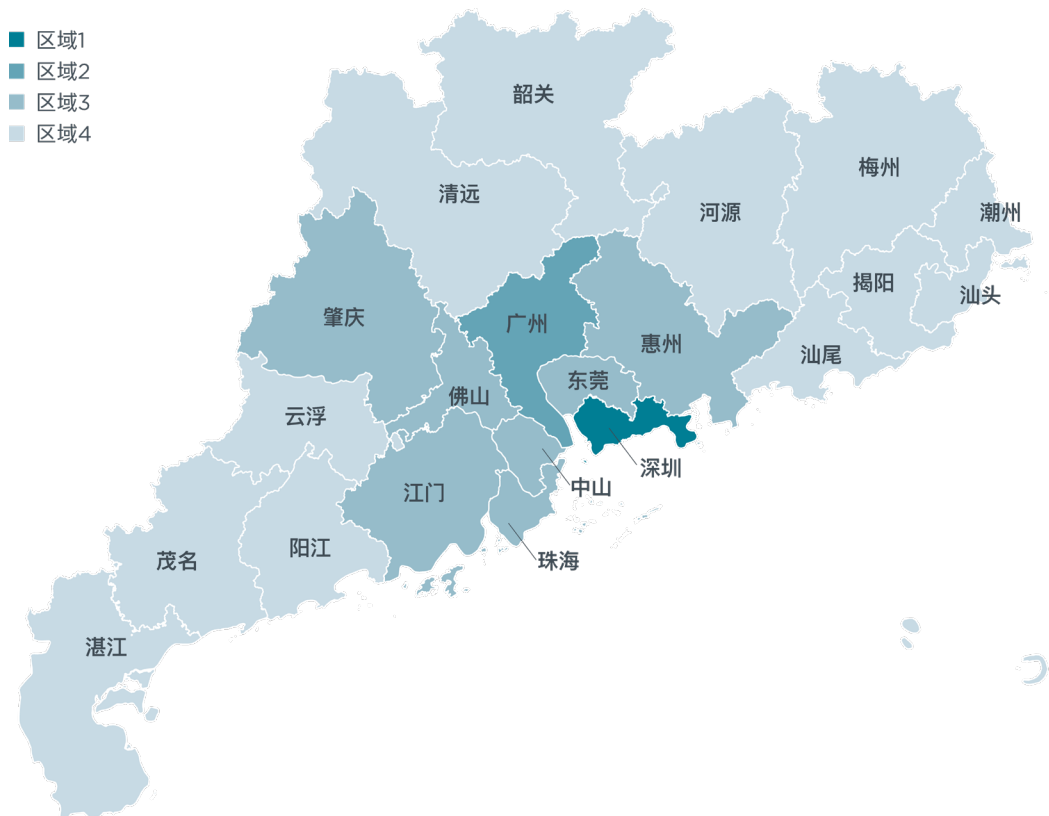
¹ 新能源汽车包括纯电动汽车、插电式混合动力汽车和燃料电池汽车，但其中只有纯电动汽车和燃料电池汽车属于零排放汽车。

研究方法

研究范围

考虑到区域经济发展的差异性，本次研究将下沉到城市层面进行分析，并将不同城市的分析结果汇总划归至不同区域，图1展示了城市分区情况。其中，区域1为经济和零排放汽车市场发展相对最为先进的深圳市；区域2中仅包含零排放汽车销量相对较高的广州市；区域3包含除深圳和广州外其他地处珠三角经济区的城市；区域4则包含广东省的其他城市。

图1 广东省研究区域划分概况



国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

本次分析应用的车辆类别及其年行驶里程假设值来源于ICCT此前的相关研究，具体信息详见表1（金伶芝、邵臻颖等人，2021年；牛天林、杨柳含子等人，2023年）。轻型车方面，本次分析仅涵盖了乘用车（含出租车、网约车）和轻型商用车。对于重型车，我们沿用了ICCT此前在广东省重型车市场及车辆总成本研究中采用的分类方法（牛天林、马云霄、张翌晨，2023年），并根据车辆总质量（GVW）进一步细分出中型和重型货车。此外，基于水泥行业超低排放标准中提出的新能源汽车应用要求，我们还针对混凝土搅拌车单独进行了分析，电动混凝土搅拌车此前在海南省已经有成功应用的经验（牛天林、崔洪阳、解奕豪，2024年）。

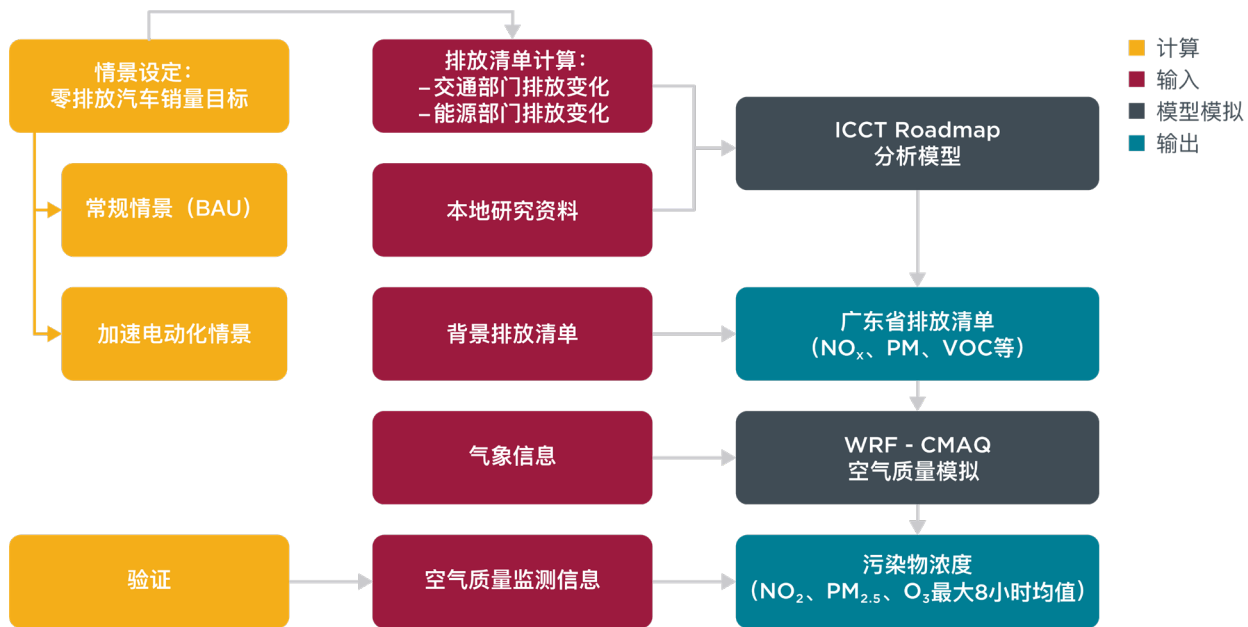
表1 车辆类型、车型说明及年行驶里程估值

车辆类型	子分类	车型说明	年行驶里程
乘用车		私人轿车、出租车、网约车等。	12,000
轻型商用车		车辆总质量小于3.5吨的厢式货车、皮卡等。	21,000
客车	城市公交车	城市内运行的公交客车。	45,000
	长途客车	城际客车。	85,000
中型货车 (车辆总质量 3.5-12吨)	物流配送汽车	车辆总质量在3.5-4.5吨, 主要用于城市物流配送的车辆。	80,000
	自卸车		50,000
	整体式货车	上述车辆之外的其他中型货车。	90,000
重型货车 (车辆总质量 大于12吨)	自卸车		60,000
	半挂牵引车	主要用于长途运输。	120,000
	专用作业车	除混凝土搅拌车外的其他专用作业车。	20,000
	混凝土搅拌车	混凝土搅拌车。	50,000
	整体式货车	上述车辆之外的其他重型货车。	100,000

总体方法论

图2展示了本次分析研究的总体方法论, ICCT在此前开展的海南省空气质量相关研究中也采用了这套方法论(牛天林、解奕豪, 2024年)。需要特别说明的是, 由于缺乏可用数据, 排放清单中未包含跨省运输排放。

图2 总体方法论



排放清单

本次研究采用了ICCT构建的“路线图模型”，对广东省道路交通领域的温室气体和空气污染物排放情况进行了模拟预测（国际清洁交通委员会，2023年）。此次分析的时间范围为2021至2035年，以2021年作为基准年，分析内容涵盖了从油井到油箱阶段（WTT阶段）和从油箱到车轮阶段（TTW阶段）的温室气体排放，具体排放物包括二氧化碳（CO₂）、氧化亚氮（N₂O）和甲烷（CH₄），同时还分析预测了氮氧化物（NO_x）、颗粒物（PM）、挥发性有机物（VOCs）、硫氧化物（SO_x）和氨（NH₃）的排放量。其中，WTT阶段排放指的是在车用燃料生产、储存和运输过程中产生的排放，而TTW阶段排放指的是车辆的直接尾气排放。

我们在2021至2035年时间框架下，分两种模拟情景对广东省道路交通领域的温室气体和空气污染物排放进行了预测：即“常规情景”和“加速电动化情景”。我们综合ICCT此前的多项研究结果，在两种情景中都纳入了2021年的零排放汽车实际销售占比（申畅、毛世越，2023年；褚一丹等人，2024年；褚一丹，2021年；褚一丹、崔洪阳，2023年）。

- » “常规情景”中包括了目前已发布或已提出议案的政策规划，按规划内容设定了零排放汽车增长趋势，其中包括中国政府宣布的到2027年底新能源汽车在所有新售车辆中占比45%的发展目标。
- » “加速电动化情景”中反映了所有车辆群体加速向零排放过渡转型的情景，主要参考了ICCT在《“十四五”及中长期中国交通部门低碳化的机遇与路径》和《中国清洁柴油机行动方案：国际最佳实践对标与政策建议》两份研究报告中提出的零排放汽车发展目标建议（金伶芝等人，2021年；牛天林、杨柳含子等人，2023年）。这些发展目标的设定主要以国家层面和地方层面的新能源汽车发展目标为基础，同时参考了加州和欧盟出台的一些更加积极严格的推广目标。考虑到各地经济发展的差异，该情景中假设区域2（广州市）将如期实现ICCT研究中提出的积极转型目标，区域1（深圳市）将可提前2-3年实现该目标，区域3将较区域2推迟2-3年实现目标，区域4则需要推迟5年。

图3展示了零排放汽车基准销量占比和在两种情景下设定的零排放汽车销售目标。总体而言，在“基准情景”下，零排放汽车销量占比到2027年将达到45%；在“加速电动化情景”下，零排放汽车销量占比到2027年将达到55%，到2035年将达到90%。

本次研究采用的广东省2021年车辆保有量数据来源于《中国统计年鉴》和世界资源研究所的相关研究报告（刘永红等人，2023年；国家统计局，2023年），未来车辆保有量采用的是ICCT“路线图模型”模拟预测的结果，在预测过程中考虑了各类车辆的生存曲线以及影响车辆销量增长的关键社会经济指标，如人口、人均车辆保有量和国内生产总值增长率。关于各类车辆的能源效率和排放强度（TTW阶段排放因子）的假设是通过结合现有的最佳可应用数据、车辆燃料能效模拟结果以及ICCT关于车辆实际能效和排放的多项研究综合得出的（毛世越、Rodríguez，2022年；张耘天等人，2023年；毛世越、张翌晨等人，2023年；牛天林、Rodríguez，2022年；牛天林、杨柳含子等人，2023年）。

图3 2021年零排放汽车销量占比(基准年)及“常规情景”和“加速电动化情景”下的零排放汽车销量占比预测

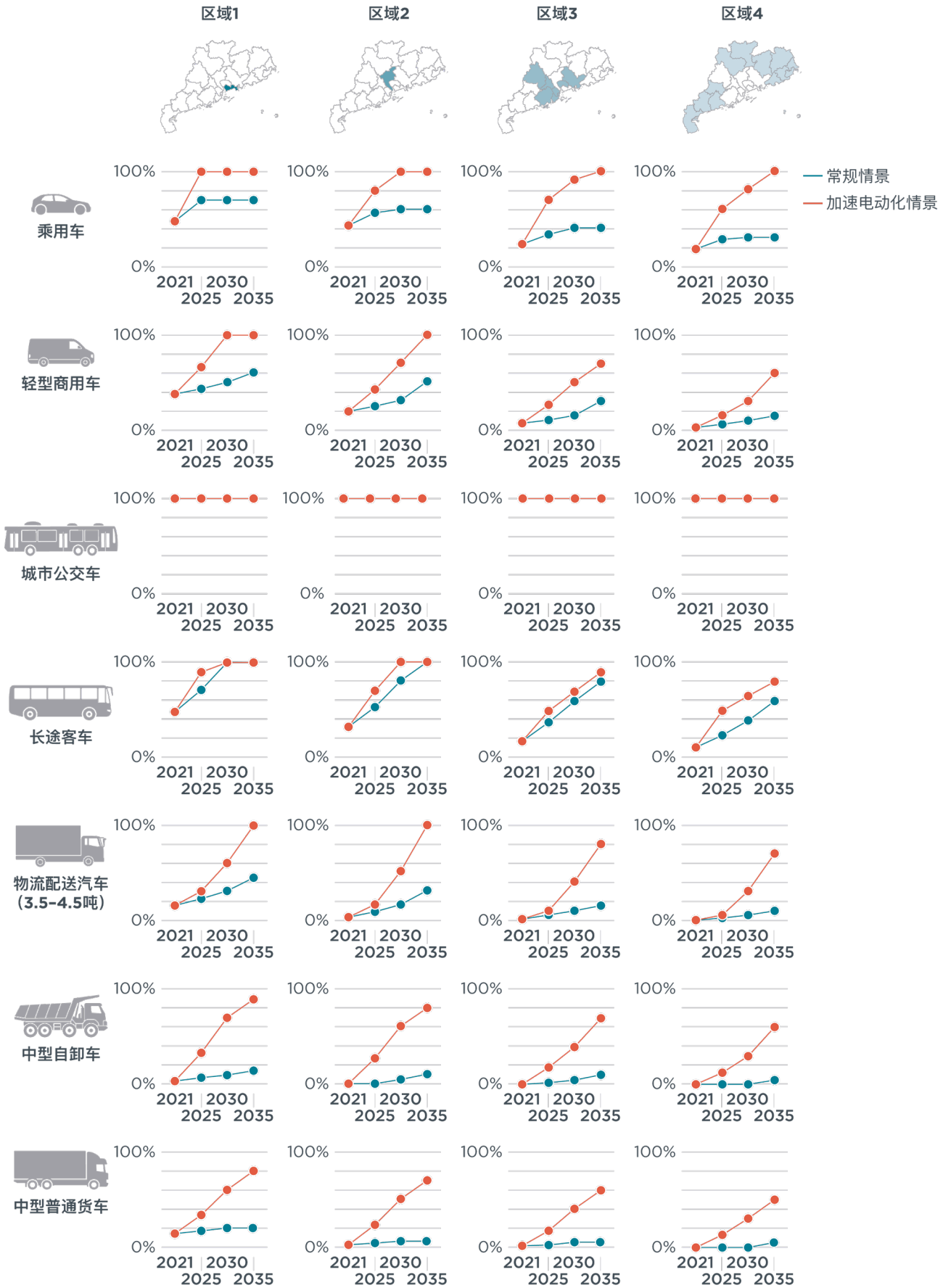
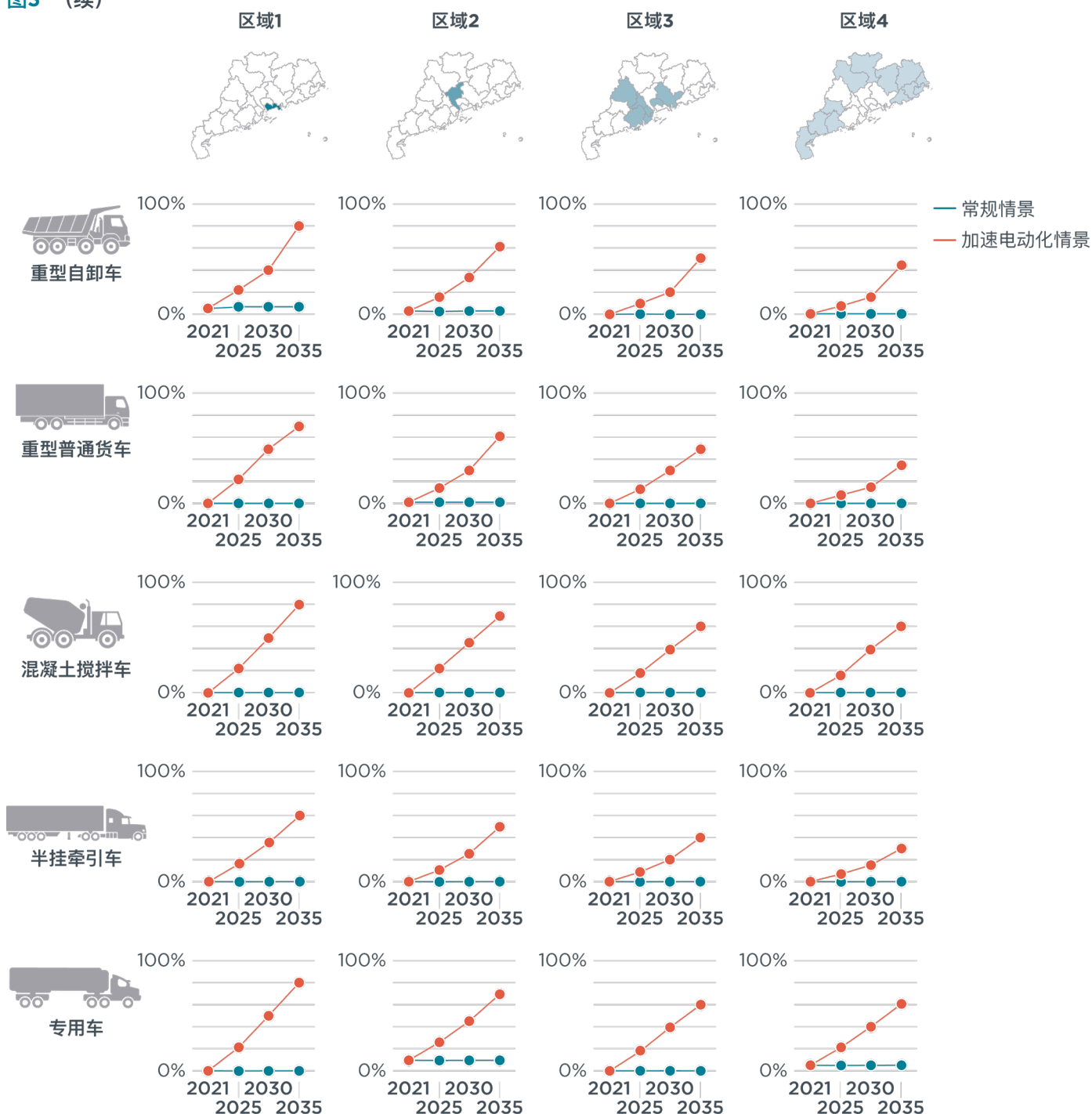


图3 (续)



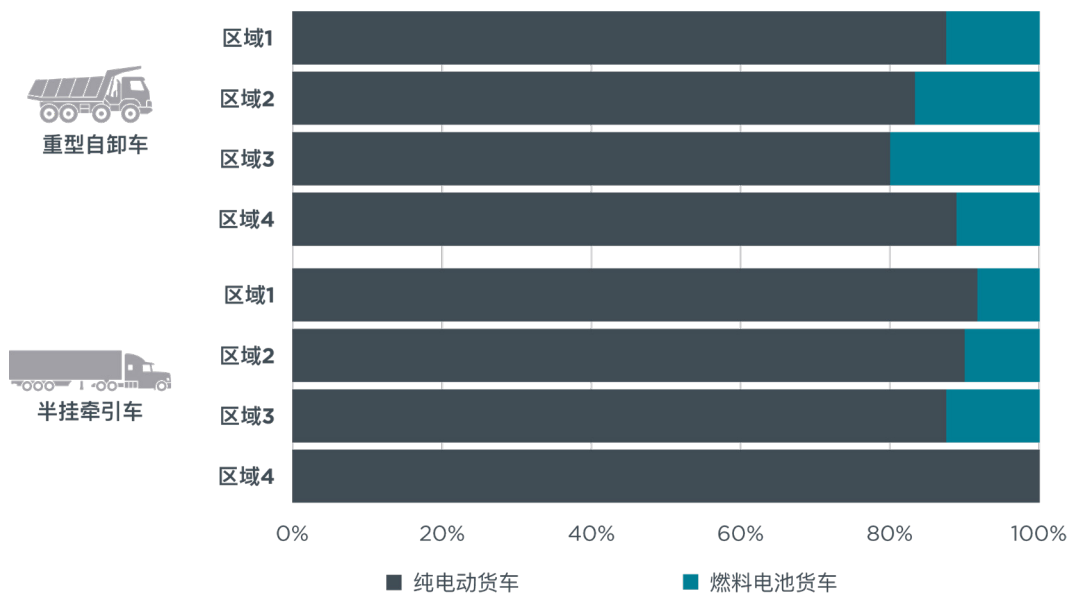
国际清洁交通委员会 THEICCT.ORG

另外，广东省在推动交通领域应用氢能方面也是全国的先锋，所以本次研究还考虑了燃料电池货车未来的发展应用。我们对燃料电池汽车的发展预测主要是基于地方城市设定的政策目标、发展规划以及广东当地合作方的意见（广东省人民政府，2022年；广东省发展和改革委员会，2022年；广州市发展和改革委员会，2020年；佛山市人民政府，2018年）。在本次研究中，我们以2035年为时间节点，设定在广州和佛山的零排放公交车、物流配送汽车和环卫车（专用作业车）中，燃料电池汽车的占比将达到10%至30%。ICCT此前的相关研究表明，燃料电池重型自卸车和半挂牵引车均可在2035年之前与柴油车实现车辆拥有总成本（TCO）平价。因此，如

图4所示，我们在重型自卸车和半挂牵引车中也考虑纳入了一定比例的燃料电池汽车销量份额（牛天林、马云霄、张翌晨，2023年；毛世越、Basma等人，2021年）。

佛山市在本次研究分类中属于区域3，但该市具有大规模的氢能产业，且设定了积极的燃料电池汽车发展规划。因此，佛山市的燃料电池汽车销量占比在所有广东城市中高居榜首。

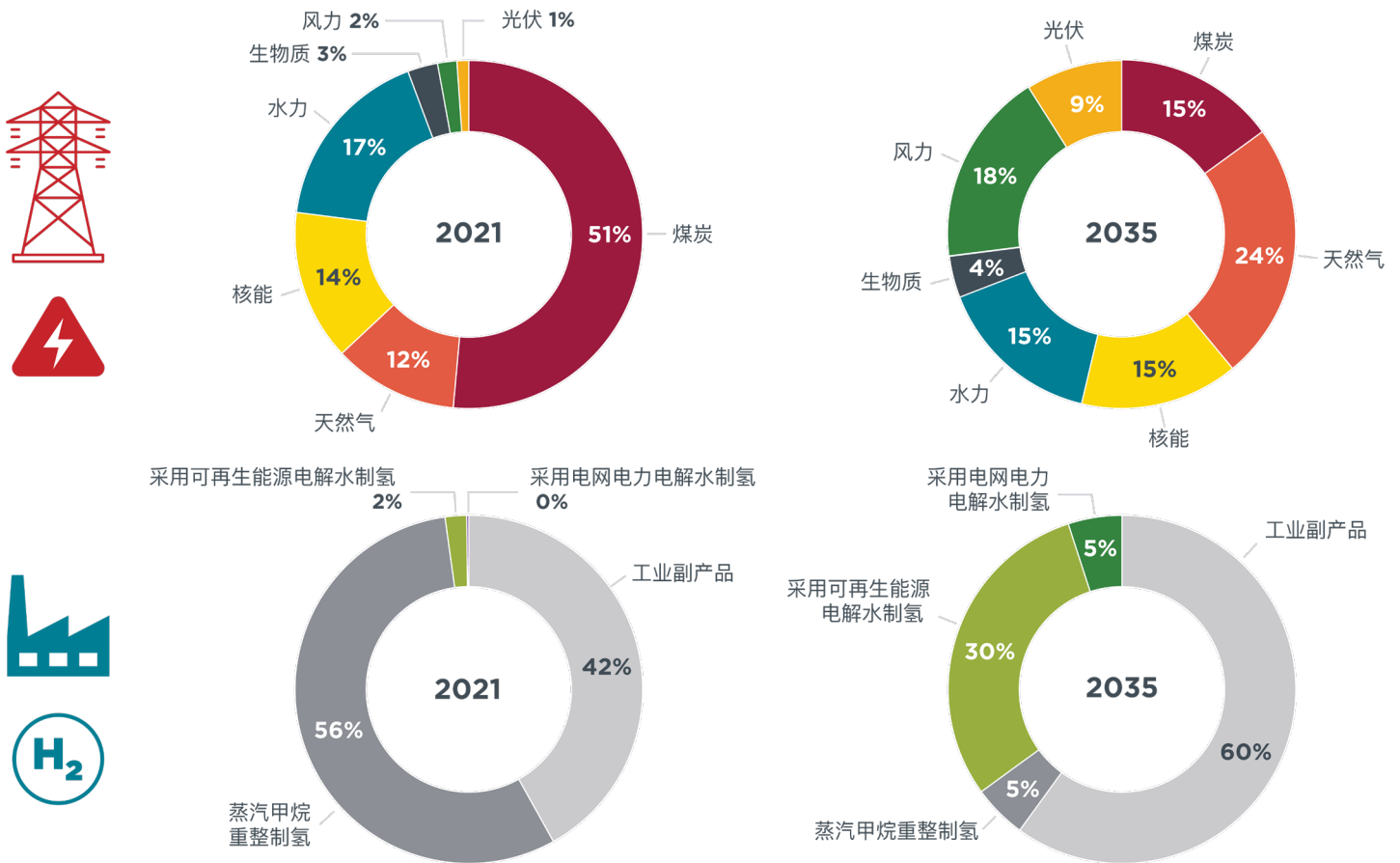
图4 2035年不同技术类型零排放汽车在“加速电动化情景”下的新车销量占比



国际清洁交通委员会 THEICTT.ORG

如图5所示，为了计算WTT阶段的排放，我们将ICCT相关研究《零排放货车实际应用：广东省市场概览及政策建议》中的电网构成和氢能生产方式分析结果应用到了“常规情景”和“加速电动化情景”中（牛天林、马云霄、张翌晨，2023年）。排放因子来源于美国阿岗实验室的“GREET分析模型”以及其他一些相关研究（Wang等人，2022年；蔡博峰等人，2023年；O’Connell等人，2023年；周圆融等人，2022年；Zhang、Xiong等人，2023年）。

图5 广东省电网构成及氢能生产方式现状及预期



国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

来源: 2021年能源结构: 广东省人民政府 (2022年a), 《广东省能源发展“十四五”规划》, 详见: https://www.gd.gov.cn/zwgk/wjk/qbwj/yfb/content/post_3909371.html; 广东省氢能结构: 广东环科院研究建议和周圆融、张真、黎妍 (2022年), 《从燃料氢全生命周期温室气体排放视角看中国燃料电池汽车示范城市群建设》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/china-fuels-lca-ghgs-hydrogen-cn-oct22/>.

空气质量模型

本次分析结合了三种不同的背景排放清单来模拟广东省内部和外部所有排放源的基准浓度 (包括NO₂、PM_{2.5}和臭氧浓度)。使用的背景排放清单包括: 1) 气候与空气污染研究多尺度排放清单模型 (MEIC), 其经纬度分辨率为0.25°×0.25° (清华大学地球系统科学系, 2024年; Li、Liu等人, 2017年; Zheng等人, 2018年); 2) MIXv2亚洲排放清单, 其经纬度分辨率为0.1°×0.1° (Li、Kurokawa等人, 2024年); 3) 广东省环境科学研究院内部排放清单研究, 其分辨率为3km×3km。

由于本研究旨在识别道路交通电动化所能带来的空气质量收益, 我们假设在“常规情景”下, 所有非交通源排放到2035年均保持不变。“加速电动化情景”下到2035年的TTW阶段排放变化 (即与“常规情景”相比的尾气排放增减) 将根据道路网络、人口和土地利用情况, 按3×3km的网格划归至广东省交通领域; WTT阶段排放变化 (即与“常规情景”相比的能源生产环节排放增减) 将根据不同动力系统的能

耗进行评估,并根据能源生产工厂的位置和MEIC历史排放清单,按照3×3km的网格将这些排放变化划归至广东省能源领域²。

此次研究采用“天气研究与预报(WRF)模型”和“社区多尺度空气质量(CMAQ)模型”来模拟了污染物排放的化学反应和扩散情况,并对污染物浓度进行了预测。这两套模型在空气质量研究中应用非常广泛,并有大量相关研究文献(Skamarock等人,2019年;美国环保局,2018年)。本研究使用的气象数据来自美国气象局的地理信息系统,这是一个开放数据库。

气候和空气质量收益

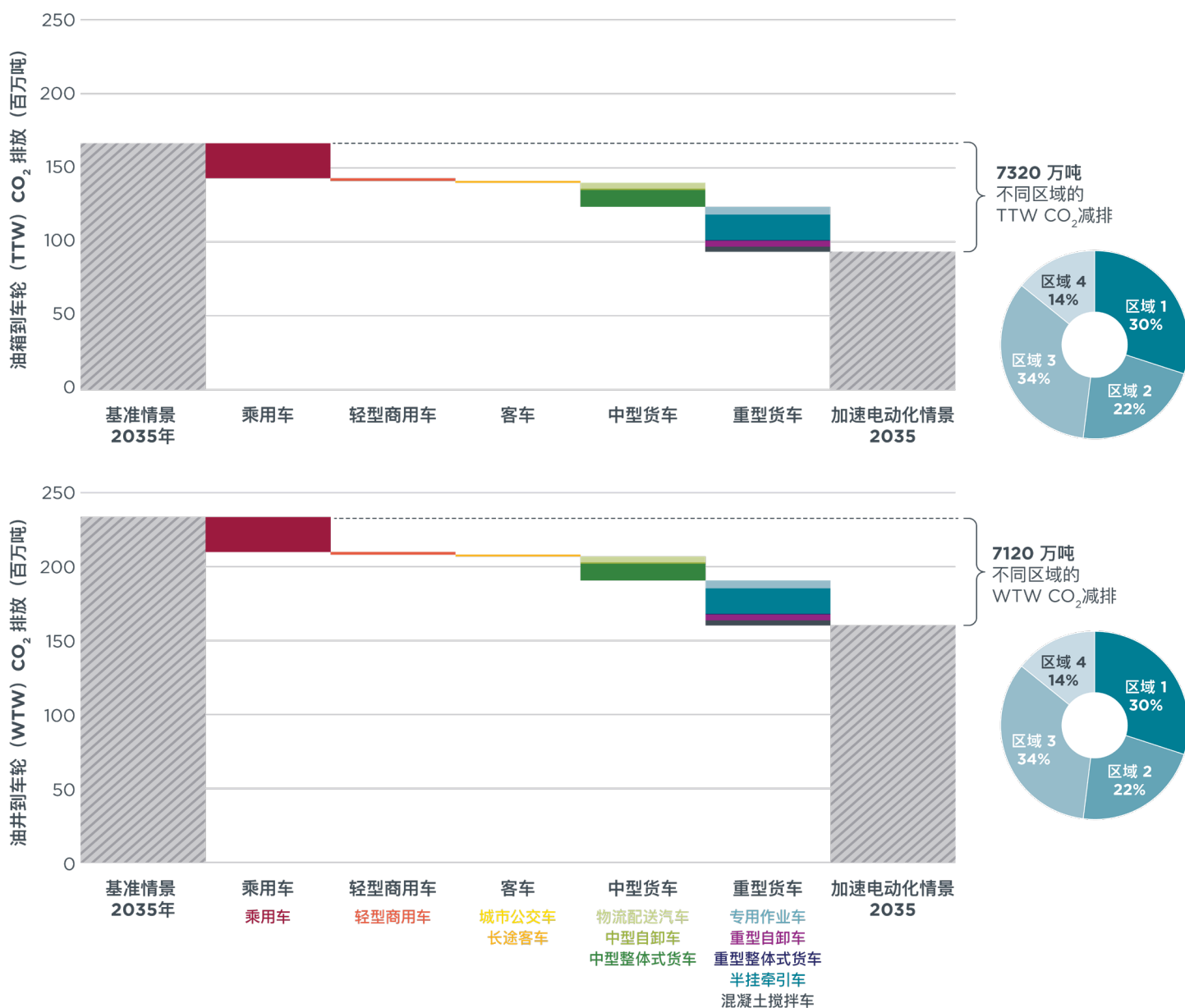
温室气体减排收益

图6展示了不同车型和不同区域的从油箱到车轮阶段(TTW阶段)和生命周期(WTW)温室气体减排收益。在“加速电动化情景”下,TTW阶段的温室气体排放将减少45%,而从油井到油箱阶段(WTT阶段)的温室气体排放将增加约3%,生命周期(WTW)温室气体综合排放将比“常规情景”减少31%。加速推动中重型车队向零排放过渡转型是广东省实现道路交通领域脱碳的关键之举,这部分车辆完成电动化转型,将能贡献生命周期温室气体减排总量的60%以上,乘用车则可贡献32%的减碳总收益。

在深圳市(区域1)和广州市(区域2)更快推进电动化转型进程的前提下,两地可分别贡献全省减排总量的30%和22%,充分体现了这两大城市在该省交通领域脱碳过程中所能发挥的重要作用。珠三角地区的其他城市(区域3)将带来34%的碳减排收益,区域4城市的减排贡献率为14%。

² 排放划归工作是由广东省本地的合作方支持完成的。例如,发电排放会根据发电厂的信息和MEIC中的电力领域排放分布来进行划归。

图6 广东省不同车型和区域在“加速电动化情景”下到2035年的温室气体排放情况



国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

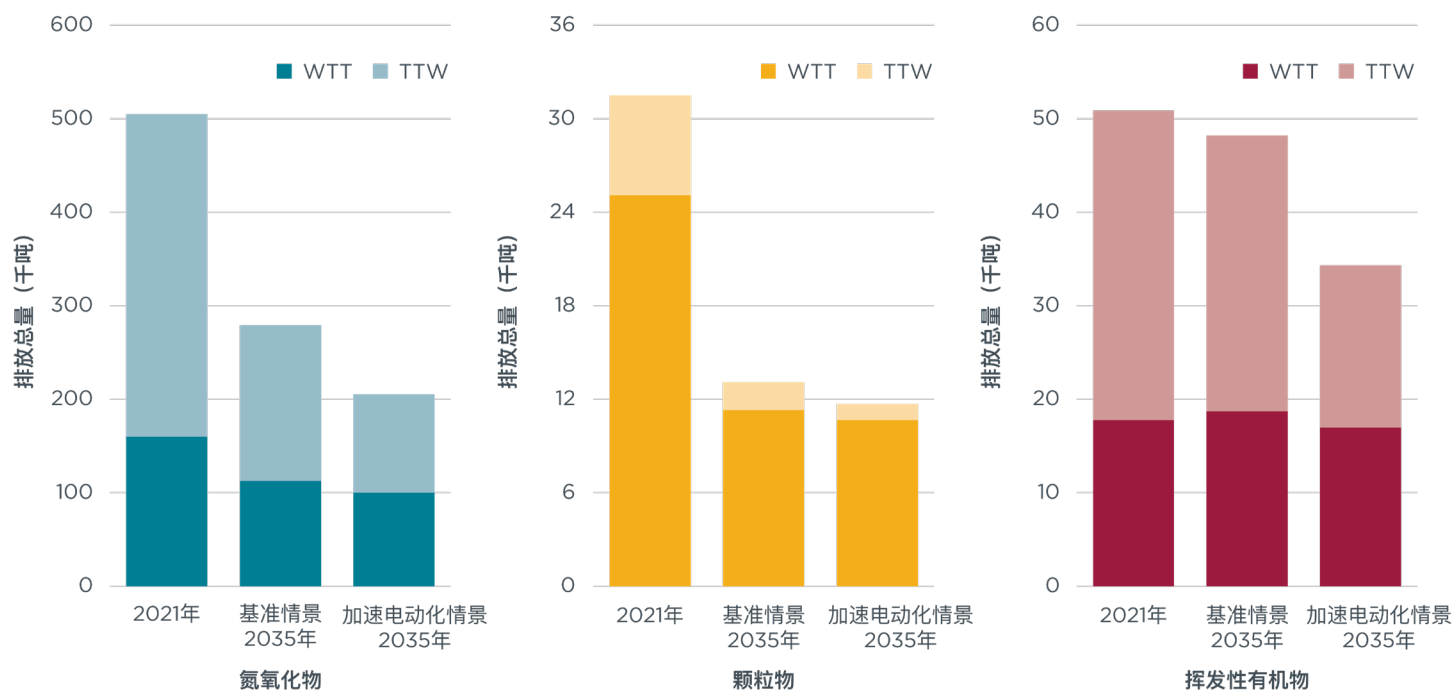
空气污染物减排收益

图7展示了在两种情景下, 2021年和2035年的氮氧化物 (NO_x)、颗粒物 (PM) 和挥发性有机物 (VOC) 排放情况。就从油箱到车轮阶段 (TTW阶段) 排放而言, 2035年“加速电动化情景”下的NO_x排放预计将比2021年排放水平减少69%, “常规情景”下将减少52%; PM排在“加速电动化情景”下将减少84%, 在“常规情景”下将减少73%; VOC排在“加速电动化情景”下将减少48%, 在“常规情景”下将减少11%。

从油井到油箱阶段 (WTT阶段) 的排放包含了能源生产环节的排放。到2035年, “加速电动化情景”下的NO_x排放预计将比2021年排放水平减少38%, “常规情

景”下将减少30%；PM排在“加速电动化情景”下将减少57%，在“常规情景”下将减少55%；VOC排在“加速电动化情景”下将减少32%，但在“常规情景”下将增长6%。在“加速电动化情景”下，电网结构中可再生电力的占比将达到近60%，随着零排放汽车的快速增长，将为降低WTT阶段排放带来显著贡献。

图7 两种情景下2021基准年和2035年的WTT阶段和TTW阶段污染物排放情况



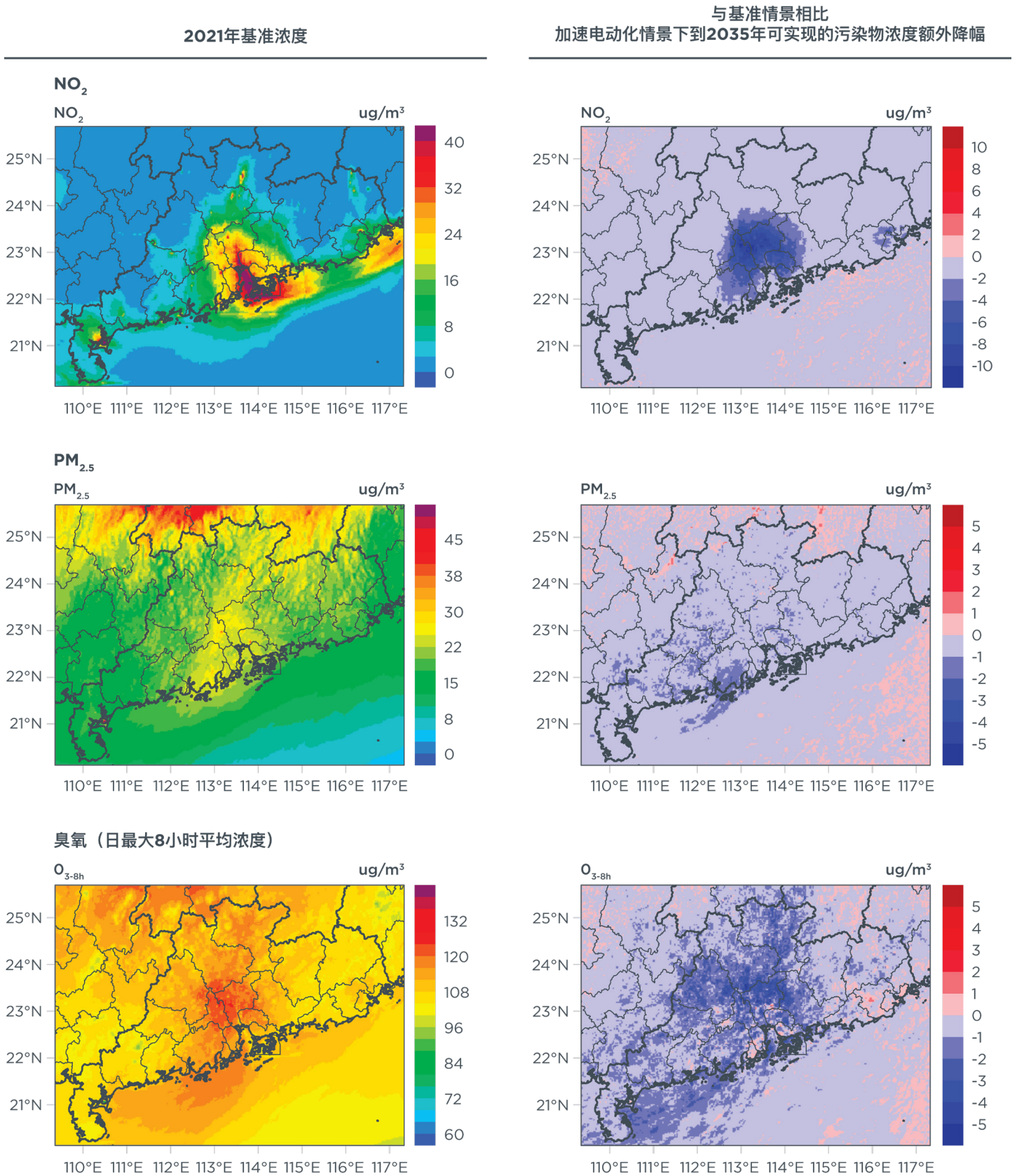
国际清洁交通委员会 THEICCT.ORG

空气质量改善

图8展示了基准年份2021年的污染物浓度地理分布，以及到2035年“加速电动化情景”与“常规情景”相比所能实现的污染物浓度降幅。模拟结果显示，广东省2021年的年均NO₂、PM_{2.5}和臭氧基准浓度分别为19μg/m³、20.4μg/m³和112.7μg/m³。我们采用2021年的每日空气质量监测数据对模型进行了验证，详见附件。

如图所示，到2035年，NO₂减排最为显著的地区主要集中在广州市和佛山市，最高降幅可达10μg/m³。臭氧方面，许多地区的臭氧浓度均有所下降，涉及的地区覆盖了整个珠三角，最大降幅可达5μg/m³，随着道路交通领域的电动化转型，广东全省的臭氧都将得到较好的控制和改善。最后，全省范围内的PM_{2.5}浓度也整体有所下降，降幅最高可达3μg/m³。

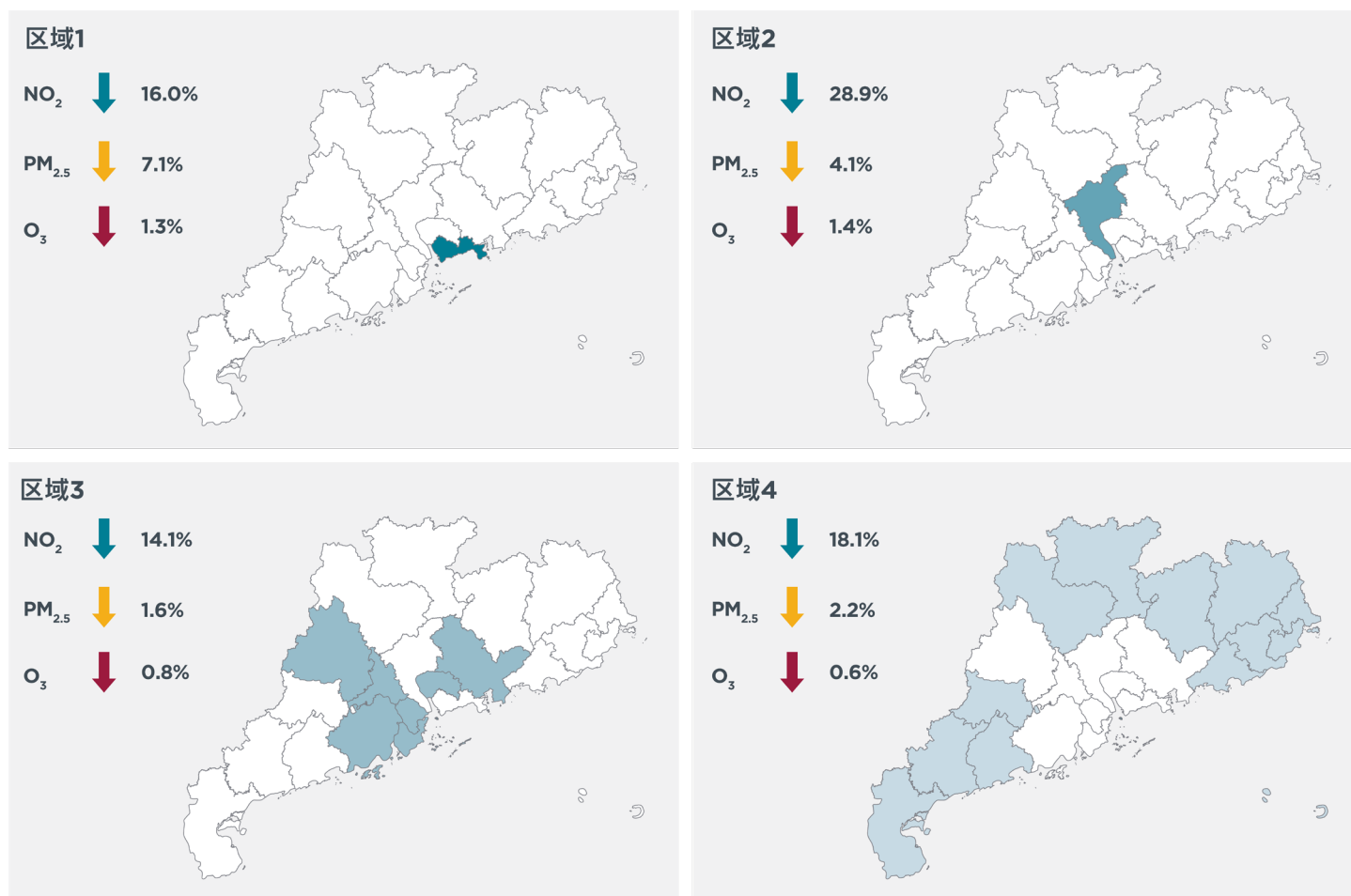
图8 2021年污染物基准浓度与2035年污染物减排情况的地理分布



国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

图9展示了不同区域的空气质量改善预期。整体而言，“加速电动化情景”到2035年可实现广东全省NO₂浓度较“常规情景”降低18%，PM_{2.5}浓度降低4%，臭氧浓度降低1%。从各项污染物的减排预期来看，广州将在加速推进道路车辆电动化的过程中获得最为显著的空气质量改善。虽然单从降幅来看，臭氧的减排百分比要低于NO₂，但这已经是在2021至2022年期间臭氧浓度增长9%的增势下成功实现趋势扭转。

图9 广东省不同区域在“加速电动化情景”下到2035年的空气质量改善情况 (与“基准情景”相比)



国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

结论与建议

本次研究进行的排放和空气质量建模显示，在广东省加速推广零排放汽车将为气候和空气质量带来巨大的潜在收益。在“加速电动化情景”下，通过设定积极严格的零排放汽车销售目标，广东省道路交通领域的生命周期（WTW）温室气体排放到2035年将比“常规情景”减少31%，同时还实现NO₂排放减少18%，PM_{2.5}排放减少3%，臭氧浓度降低1%。加速零排放汽车推广能够为广东省实现气候和空气质量改善目标提供有力支持和保障，基于上述结论，我们汇总了下列政策建议谨供广东省参考：

考虑在“十五五”计划或其他省级政策规划中设定2035年零排放汽车销量占比达到90%的目标。广东省在“十四五”计划中设定了新能源汽车销量占比20%的目标，肯定了加速道路车辆电动化转型的必要性，但该目标仅适用于乘用车、公交车、出租车、物流配送汽车和环卫车，并没有将重型货车纳入管理目标的覆盖范围。广东省可考虑探索可行的电动化发展路径，针对特定车型和区域设定零排放汽车发展目标。海南省出台的《海南省清洁能源汽车发展规划》就是类似的政策措施，或可为广东省提供一些参考。

针对特定使用场景的重型货车设定积极严格的电动化目标。根据当前的政策和市场发展趋势，到2035年，深圳或广州的公交客车和物流配送汽车将可实现电动化率90%-100%的目标，其他城市也可以针对物流配送汽车设定相对较高的发展目标，以推动向零排放汽车过渡转型。此外，纯电动货车和燃料电池货车的成功应用案例也应为政府部门提供信心和佐证，推动政府部门针对自卸车设定零排放汽车销量占比50%以上，针对混凝土搅拌车设定零排放汽车销量占比60%以上的发展目标。

为新能源或零排放汽车销售提供支持，将其作为脱碳的首选技术路线，考虑对天然气车辆进行销售限制。鉴于天然气车辆在二氧化碳（CO₂）、氮氧化物（NO_x）和颗粒物（PM）减排方面的潜力有限，且存在甲烷泄漏的问题，继续支持天然气车辆发展可能会影响广东省实现碳减排目标的进程。

可考虑利用广东省内的多方政府机构资源，探索行之有效的交通脱碳政策一揽子方案。相关政府机构包括生态环境厅、交通运输厅、工业和信息化厅以及发展和改革委员会。以下是基于本次研究总结出的几项潜在的可行性政策措施：

- » 销售要求：强制汽车制造企业在广东省增加零排放汽车销量占比。
- » 设立零排放区或零排放走廊：仅允许零排放汽车不受限制地进入区域内，从而鼓励提前报废传统燃料汽车，促进零排放汽车发展应用。
- » 出台设计完善的购置和使用激励措施：缩小零排放汽车与传统燃料汽车之间的成本差异。
- » 购置要求：针对特定车队群体提出购置要求，强制规定零排放汽车的购置比例，例如港口泥头车和公交客车。
- » 充电或加氢基础设施建设规划：与相关部门合作，鼓励加速应用纯电动和燃料电池汽车。

参考文献

- 蔡博峰、赵良、张哲、芦新波、贾敏、张立、刘美、雷宇 (2023年), 《中国区域电网二氧化碳排放因子研究 (2023)》, 生态环境部环境规划院, 详见: <http://www.caep.org.cn/sy/tdftzhyjzx/zxdtd/202310/W020231027692141725225.pdf>。
- 陈婉莹、陈懿昂、褚旸晰、张金谱 (2022年), 《珠三角地区臭氧来源特征的数值模拟研究》, 《环境科学学报》003, 042, 详见: <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2021.0328>。
- 褚一丹 (2021年), *Race to electrify light-duty vehicles in China, the United States, and Europe: A comparison of key EV market development indicators*, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/race-to-electrify-light-duty-vehicles-in-china-the-united-states-and-europe-a-comparison-of-key-ev-market-development-indicators/>。
- 褚一丹、崔洪阳 (2023年), 《全球汽车电动化转型年度纵览: 2022》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/global-transition-electric-vehicles-update-jun23/>。
- 褚一丹、何卉、崔之昕 (2024年), *Leading new energy vehicle cities in China: The 2022 market*, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/ev-china-city-markets-2022-update-mar24/>。
- 崔洪阳、解奕豪、牛天林 (2022年), 《加速海南省新能源汽车 助力实现2030年前碳达峰目标》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/china-vehicles-accelerating-hainan-nev-transition-sep22/>。
- 清华大学地球系统科学系 (日期不详), 气候与空气污染研究多尺度排放清单模型 (MEIC), 2024年5月14日查阅, 详见: <http://meicmodel.org.cn>。
- 佛山市人民政府 (2018年), 《佛山市人民政府关于印发佛山市氢能产业发展规划 (2018—2030年)》, 详见: https://www.foshan.gov.cn/zwgk/rdzt/yhyshj/yszc/brphcx/content/post_5158848.html。
- 广东省人民政府 (2021年), 《广东省生态文明建设“十四五”规划》解读, 详见: http://www.gd.gov.cn/zwgk/zcjd/bmjcd/content/post_3595182.html。
- 广东省人民政府 (2022年a), 《广东省“十四五”节能减排实施方案》, 详见: https://www.gd.gov.cn/gdywdt/dczl/jcbs/content/post_4014209.html。
- 广东省人民政府 (2022年b), 《中共广东省委广东省人民政府关于完整准确全面贯彻新发展理念推进碳达峰碳中和工作的实施意见》, 详见: http://www.gd.gov.cn/zwgk/zcjd/snzcsd/content/post_3980099.html。
- 广东省生态环境厅 (2021年), 《广东省环境空气质量持续改善行动计划 (2021-2025)》, 详见: <http://gdee.gd.gov.cn/hdjlpt/yjzj/api/attachments/view/3a678053e4acfc685220f157a24809ce>。
- 广东省生态环境厅 (2023年), 《2022广东省生态环境状况公报》, 详见: https://gdee.gd.gov.cn/gkmlpt/content/4/4176/mpost_4176802.html#3185。
- 广东省发展和改革委员会 (2022年), 《广东省加快建设燃料电池汽车示范城市群行动计划 (2022-2025年)》, 详见: http://drc.gd.gov.cn/gkmlpt/content/3/3993/post_3993253.html#877。
- 广东省发展和改革委员会 (2020年), 《广州市发展改革委关于印发广州市氢能产业发展规划 (2019-2030年)》, 详见: https://fgw.gz.gov.cn/gkmlpt/content/6/6477/post_6477212.html#481。
- 国际清洁交通委员会 (2023年), *Roadmap v2.2 Documentation* [路线图模型V2.2版], 详见: <https://theicct.github.io/roadmap-doc/versions/v2.2/>。
- 金伶芝、褚一丹 (2023年), *Accelerating new energy vehicle uptake in Chinese cities: Assessment of new energy commercial vehicle policies*, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/commercial-nevs-cities-policies-jul23/>。
- 金伶芝、褚一丹、汪锡媛 (2023年), *Accelerating new energy vehicle uptake in Chinese cities: Assessment of policies for private passenger cars in leading city markets*, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/pv-chinese-cities-nev-policies-feb23/>。
- 金伶芝、邵臻颖、冒晓立、Miller J.、何卉、Isenstadt A. (2021年), 《“十四五”及中长期中国交通部门低碳化的机遇与路径》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/opportunities-and-pathways-to-decarbonize-chinas-transportation-sector-during-the-fourteenth-five-year-plan-period-and-beyond/>。
- Li M.、Kurokawa J.、Zhang Q.、Woo J.-H.、Morikawa T.、Chatani S.、Lu Z.、Song Y.、Geng G.、Hu H.、Kim J.、Cooper O. R.、McDonald B.C. (2024年), MIXv2: A long-term mosaic emission inventory for Asia (2010-2017). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(7), 3925-3952, 详见: <https://doi.org/10.5194/acp-24-3925-2024>。
- Li M.、Liu H.、Geng G.、Hong C.、Liu F.、Song Y.、Tong D.、Zheng B.、Cui H.、Man H.、Zhang Q.、He K. (2017年), Anthropogenic emission inventories in China: A review. *National Science Review*, 4(6), 834-866, 详见: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx150>。
- 刘永红、曾雪兰、任焕焕、黄卓晖、薛璐璐 (2023年), 《广东省道路交通领域中长期深度减排研究》, 世界资源研究所, 详见: <https://doi.org/10.46830/wrirpt.22.00102>。
- 毛世越、Basma H.、Ragon P.-L.、周圆融、Rodríguez F. (2021年), 《中国重型货运卡车的拥有总成本对比分析: 纯电动、燃料电池和柴油货运卡车》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/total-cost-of-ownership-for-heavy-trucks-in-china-battery-electric-fuel-cell-and-diesel-trucks/>。

- 毛世越、Rodríguez F. (2022年), 《中国重型车节能减排进程: 2012-2021年间二氧化碳与污染物排放趋势》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/china-hvs-ndc-tia-evolution-hdv-emissions-oct22/>。
- 毛世越、张翌晨、Rodríguez F.、王硕、郝春晓 (2023年), 《中国纯电动重型车的实际行驶性能: 能耗、续航里程和充电模式》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/hdv-china-real-world-performance-apr23/>。
- 国家统计局 (2023年), 《中国统计年鉴2023》, 中国统计出版社, 详见: <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2023/indexch.htm>。
- 牛天林、崔洪阳、解奕豪 (2024年), 《零排放卡车的实际应用案例: 海南省港口牵引车和混凝土搅拌机》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/rw-zet-port-tractor-trailers-and-concrete-mixer-trucks-in-hainan-province-china-apr24/>。
- 牛天林、马云霄、张翌晨 (2023年), 《零排放货车实际应用: 广东省市场概览及政策建议》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/real-world-zet-guangdong-oct23/>。
- 牛天林、Rodríguez F. (2022年), 《中国下一阶段重型车排放标准建议——基于国VI车辆测试结果》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/china-hdv-emissions-testing-oct22/>。
- 牛天林、解奕豪 (2024年), *Air quality benefits of an accelerated transition to new energy vehicles in Hainan Province, China*, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/air-quality-benefits-of-an-accelerated-transition-to-nev-in-hainan-province-china-may24/>。
- 牛天林、杨柳含子、金伶俐、邵臻颖、冒晓立、孟至航 (2023年), *China's Clean Diesel Program: Benchmarking with international best practices and policy recommendations*, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/china-clean-diesel-iii-jan23/>。
- O'Connell A.、Pavlenko N.、Bieker G.、Searle S. (2023年), *A life-cycle comparison of the greenhouse gas emissions from combustion, electric, and hydrogen trucks and buses in Europe*, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/fs-life-cycle-analysis-emissions-trucks-buses-europe-feb23/>。
- 邵长春 (2023年8月9日), 《海南印发新能源汽车推广中长期行动方案》, 新华社, 详见: <http://hq.news.cn/20230809/6e473834f1054d53a3befd6830d76564/c.html>。
- 申畅、毛世越 (2023), *Zero-emission bus and truck market in China: A 2022 update*, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/zero-emission-bus-and-truck-market-in-china-2022-update-dec23/>。
- 沈劲、黄晓波、汪宇、叶斯琪、潘月云、陈多宏、陈焕盛 (2017年), 《广东省臭氧污染特征及其来源解析研究》, 《环境科学学报》, 37 (12), 9, 详见: <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2017.0255>。
- Skamarock W. C.、Klemp J. B.、Dudhia J.、Gill D. O.、Liu Z.、Berner J.、Wang W.、Powers J. G.、Duda M. G.、Barker D.、Huang X.-yu. (2021年), *A Description of the Advanced Research WRF Version 4.3* (No. NCAR/TN-556+STR). 详见: <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>。
- 美国环保局 (2018年), *CMAQ (Version 5.2.)* [软件], 详见: [doi:10.5281/zenodo.1212601](https://doi.org/10.5281/zenodo.1212601)。
- Wang M.、Elgowainy A.、Lee U.、Baek K. H.、Bafana A.、Benavides P. T.、Burnham A.、Cai H.、Cappello V.、Chen P.、Gan Y.、Gracida-Alvarez U. R.、Hawkins T. R.、Iyer R. K.、Kelly J. C.、Kim T.、Kumar S.、Kwon H.、Lee K.、... Zaimes G. (2022年), *Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model* (2022 Excel). [计算机软件], 美国阿岗实验室交通研究中心, 详见: <https://doi.org/10.11578/GREET-Excel-2022/dc.20220908.1>。
- 汪海恒、沈傲、许亦非、黎煜满、刘一鸣、卢骁、樊琦 (2022年), 《粤北地区一次臭氧污染过程分析及数值模拟》, 《环境科学学报》42 (10), 49-61, 详见: <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2022.0138>。
- 许亦非、崔寅平、朱溢啸、沈傲 (2023年), 《广东省区域臭氧污染过程三维输送特征分析与定量来源解析》, 《中国环境科学》43 (5), 2119-2127, 详见: <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230129.001>。
- Yang, W.、Chen, H.、Wang, W.、Wu, J.、Li, J.、Wang, Z.、Zheng, J. & Chen, D. (2019年), *Modeling study of ozone source apportionment over the Pearl River Delta in 2015*, *Environmental Pollution*, 253, 393-402, 详见: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.091>。
- Zhang S.、Xiong Y.、Liang X.、Wang F.、Liang S.、Wu Y. (2023年), *Spatial and cross-sectoral transfer of air pollutant emissions from the fleet electrification in China by 2030*, *Environmental Science & Technology*, 57 (50), 21249-21259, 详见: <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04496>。
- 张耘天、何卉、陈志男 (2023年), 《中国新增乘用车趋势报告: 大气污染物与二氧化碳排放及相关控制技术, 2012-2021》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/pv-china-trends-report-jan23/>。
- Zheng B.、Tong D.、Li M.、Liu F.、Hong C.、Geng G.、Li H.、Li X.、Peng L.、Qi J.、Yan L.、Zhang Y.、Zhao H.、Zheng Y.、He K.、Zhang Q. (2018年), *Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(19), 14095-14111, 详见: <https://doi.org/10.5194/acp-18-14095-2018>。
- 周圆融、张真、黎妍 (2022年), 《从燃料氢全生命周期温室气体排放视角看中国燃料电池汽车示范城市群建设》, 国际清洁交通委员会, 详见: <https://theicct.org/publication/china-fuels-lca-ghgs-hydrogen-oct22/>。

附件: 模型验证

表A1 验证计算标准

R (相关系数)	RSME (均方根误差)	NMAE (标准平均绝对误差)
$FMF = \frac{\sum(O_i - \bar{O})(M_i - \bar{M})}{\left(\sum(M_i - \bar{M})^2 \sum(O_i - \bar{O})^2\right)^{1/2}}$	$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum (M_i - O_i)^2\right)^{1/2}$	$NMAE = \frac{\sum M_i - O_i }{\sum O_i}$
其中:		
O_i 代表第i个观测值		
\bar{O} 代表平均观测值		
M_i 代表第i个模拟值		
\bar{M} 代表平均模拟值		
N 代表观测值和模拟值的总匹配对数		

表A2展示了验证结果。这些结果与其他几项广东本地空气质量模型研究中得出的结果具有相似性（陈婉莹等人，2022年；沈劲等人，2017年；汪海恒等人，2022年；许亦非等人，2023年；Yang等人，2019年）。

表A2 验证结果

区域	NO ₂			O ₃ -最大8小时均值			PM _{2.5}		
	R	RMSE (µg/m ³)	NMAE	R	RMSE (µg/m ³)	NMAE	R	RMSE (µg/m ³)	NMAE
区域1	0.26	7.35	0.27	0.52	31.56	0.28	0.56	6.72	0.35
区域2	0.26	12.74	0.34	0.18	42.75	0.33	0.45	8.98	0.36
区域3	0.51	10.75	0.36	0.35	40.59	0.31	0.52	8.05	0.36
区域4	0.40	8.58	0.47	0.34	33.42	0.28	0.46	9.27	0.41



www.theicct.org

communications@theicct.org

[@theicct.org](#)

icct
国际清洁交通委员会