

广东中长期低碳转型路径研究 ——基于 EPS 模型



2025 年 9 月

关于绿色创新发展研究院（iGDP）

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress, iGDP), 2014 年成立于北京, 是专注绿色低碳发展的公益性国际化智库。iGDP 自成立以来, 根植我国绿色低碳实践, 面向全球应对气候变化进程, 服务决策者、实践者、投资者, 通过跨学科、系统性、实证性的研究, 推动能源和气候变化解决方案的科学化和精细化, 与多方合作推动绿色低碳议题的多元化和国际化的沟通, 提供有国际视野和前瞻思考的解决方案及公共知识产品, 为全球可持续发展做出贡献。

报告编写团队

绿色创新发展研究院 (iGDP): 李鑫迪、杨鹂、袁雅婷、宋曼娇、朱彤昕、奚溪、陈美安、胡敏
中国科学院广州能源研究所: 刘桢、廖翠萍、黄莹、谢鹏程

联系方式

绿色创新发展研究院 (iGDP): igdpooffice@igdp.cn

致 谢

报告编写团队真诚感谢能源创新政策和技术有限责任公司 (EI) 团队对本研究的长期技术与研究支持。
感谢广东工业大学生态环境与资源学院教授曾雪兰对报告的宝贵建议。
感谢绿色创新发展研究院同事吕雅宁对报告传播的支持。
感谢绿色创新发展研究院同事包林洁对报告的排版。

免责声明

本报告编写所采用的数据均来自公开的信息和渠道, 我们力求准确和完整, 但难免偶有疏漏。报告基于初步成果撰写, 用于讨论和交流, 内容会随下一阶段研究成果进行修正、更新或增减。本报告仅属于作者的研究成果, 不代表所在机构、咨询专家的立场和观点。

引用建议

李鑫迪, 刘桢, 廖翠萍, 黄莹, 谢鹏程, 杨鹂, 袁雅婷, 宋曼娇, 朱彤昕, 奚溪, 陈美安, 胡敏. (2025). 广东中长期低碳转型路径研究——基于 EPS 模型. 北京: 绿色创新发展研究院

目 录

执行摘要	1
第一章 广东低碳发展现状	2
1.1 社会发展	2
1.2 能源与排放情况	3
1.3 低碳转型政策体系与整体目标	6
1.4 低碳转型成效及趋势	8
第二章 研究方法和情景设置	12
2.1 模型介绍	12
2.2 数据来源	13
2.3 情景设置	13
第三章 广东能源和碳排放展望	15
3.1 温室气体排放	15
3.2 能源消费	17
3.3 分部门低碳转型	18
第四章 广东省碳中和实现路径及社会经济影响	29
4.1 双碳情景下主要低碳发展目标	29
4.2 经济社会影响	29
4.3 政策路径及减排贡献	30
第五章 总结及建议	35
附录 1：广东省 1+N 及“十四五”低碳发展政策一览	36
附录 2：情景设置	38

图目录

图 1 广东省产业布局	2
图 2 2022 年广东一次能源消费结构	3
图 3 2022 年广东能源相关 CO ₂ 排放结构	4
图 4 2020 年广东省发电量结构	4
图 5 广东省 2019 年制造业分行业能源消费占比（左：广东，右：全国）	5
图 6 2020 年建筑运行阶段用能结构（全国与广东）	5
图 7 2020 年广东省非二氧化碳温室气体排放结构	6
图 8 广东省双碳“1+N”政策体系示意图	7
图 9 广东省经济发展与能源消费、排放脱钩趋势	8
图 10 广东省工业生产总产值和能耗水平	9
图 11 EPS 模型计算流向图	12
图 12 各情景二氧化碳排放趋势	15
图 13 各情景温室气体排放趋势（不考虑碳汇）	16
图 14 双碳情景下非二气体排放变化	17
图 15 各情景一次能源消费结构变化	17
图 16 双碳情景分部门 GHG 排放（不考虑间接排放）	18
图 17 双碳情景分部门 GHG 排放（考虑间接排放）	19
图 18 各情景电力部门二氧化碳排放趋势	19
图 19 各情景主要部门用电需求变化趋势	20
图 20 各情景关键年份发电量结构	21
图 21 各情景工业部门二氧化碳气体排放趋势	22
图 22 各情景工业部门温室气体排放趋势	22
图 23 各情景工业部门非二温室气体排放趋势（万吨 CO ₂ e）	23
图 24 各情景工业部门能源消费量（万吨标煤，仅包含能源利用）	23
图 25 工业分行业二氧化碳直接排放（政策情景与双碳情景）	24
图 26 工业分行业二氧化碳直接与电力间接排放（政策情景与双碳情景）	24
图 27 各情景建筑部门 GHG 排放变化趋势	25
图 28 2020 年广东建筑部门用能源消费结构	26
图 29 各情景建筑部门用能变化趋势	26
图 30 各情景周转量变化趋势	27
图 31 各情景交通部门能源消费结构	28
图 32 双碳情景下各行业增加值变化	28
图 33 2030 年前达峰重点政策（CO ₂ ，双碳情景 2020-2030 累计减排潜力）	31
图 34 碳中和重点政策（GHG，双碳情景 2020-2060 累计减排潜力）	31
图 35 碳中和重点政策（GHG，双碳情景 2030-2060 累计减排潜力）	32

表目录

表 1 广东省碳达峰碳中和重要时间点和目标	7
表 2 “十四五”期间广东省能源系统低碳转型相关指标与国家对比	8
表 3 电力部门“十四五”目标	9
表 4 情景说明	14
表 5 双碳情景各部门电气化率变化趋势	18
表 6 双碳情景主要政策指标表现	29
表 7 双碳情景下工业各行业相对冻结情景节能量	33

执行摘要

广东省作为我国经济和人口大省，能源消费和碳排放量均居全国前列，但其单位 GDP 能耗和碳强度处于全国领先水平。近年来，广东省通过产业结构优化、能源结构调整和政策创新，在低碳发展方面取得了显著成效。作为能源消费大省，加之本地可再生能源资源有限，广东也面临诸多低碳转型挑战。

为通过量化模型支持广东中长期低碳转型研究，本报告基于能源政策模拟模型（EPS）对广东省实现“双碳”目标的具体路径进行研究。通过 EPS 模型模拟了三种情景下广东省 2020 年至 2060 年的能源消费和碳排放路径。

研究结果显示，在现有政策情景下，广东省二氧化碳排放可在 2030 年前达峰，峰值约为 6.7 亿吨，但若延续现有政策强度，在 2060 年仍将剩余 4 亿吨排放。此外，广东需要重点关注提高非化石能源发电量的比重，确保到 2030 年达到 40% 左右，以保证 2030 年前碳排放达峰。

在双碳路径下，2030 年后需进一步加强政策力度，在节能、电气化、以及非二氧化碳温室气体减排等方面重点施力，并开始全面在电力和钢铁、水泥、化工行业部署 CCUS，以实现 2060 年碳中和目标。

报告探讨了广东省整体的能源消费及排放变化趋势，并聚焦工业、建筑、交通和电力等关键部门的低碳转型路径，针对关键政策路径提出建议。经过不同时间段的政策减排潜力分析，识别出包括提高可再生能源占比、严格控制煤电发展、提升工业电气化水平、推广新能源交通工具、加强建筑节能与电气化、完善电力市场机制、加强含氟气体减排控制等重点政策，希望能对广东省“双碳”战略的决策与实施提供科学支撑。



第一章

广东低碳发展现状

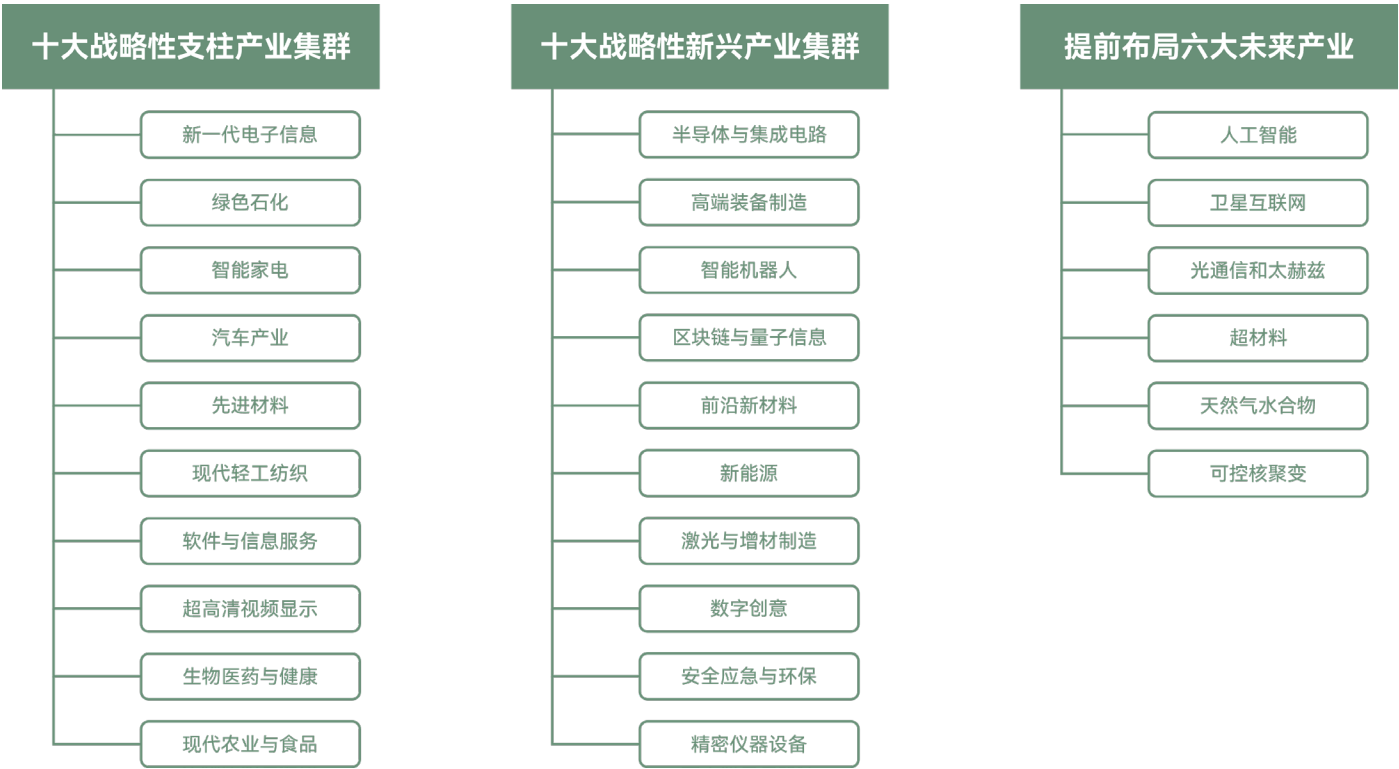
1.1 社会发展

广东省是经济和人口大省，地区生产总值连续 35 年保持在全国第一，经济总量居全国首位，财政自给能力较强，2023 年人均 GDP 达到 10.7 万元。广东省也是能源消费大省，电力消费居于全国前列，但能效水平相对较高。2023 年，广东省以约占全国 7% 的能源消费和 5% 的碳排放，支撑了约占全国 9% 的常住人口和 10.8% 的经济总量，单位 GDP 能耗仅为全国平均水平的 67%^[1]。

“十三五”期间，广东省深入推进供给侧结构性改革，三次产业结构由 2015 年的 4.6:42.8:52.6 调整为 2020 年的 4.3:39.2:56.5，第二产业结构显著降低，第三产业占比明显提升，初步形成以先进制造业为支撑、现代服务业为主导的现代产业体系，培育电子信息、绿色石化、智能家电等 7 个万亿级产业集群，5G 产业、数字经济等战略性新兴产业迅速发展、规模全国领先。

到“十四五”“十五五”时期，广东省将持续加快产业结构优化升级，培育发展十大战略性支柱产业集群、十大战略性新兴产业集群，提前布局六大未来产业（图 1）；大力发展绿色低碳产业，着眼先进核能、海上风电装备等优势产业打造沿海新能源产业带和新能源产业集聚区，积极谋划氢能、储能、智慧能源、二氧化碳捕集利用与封存等产业发展；遏制高耗能高排放行业低水平项目盲目发展，压减饱和产能，提高准入门槛，淘汰落后产能，提升行业整体能效水平。绿色低碳产业将成为广东省经济增长新动能和可持续增长极。

图 1 广东省产业布局



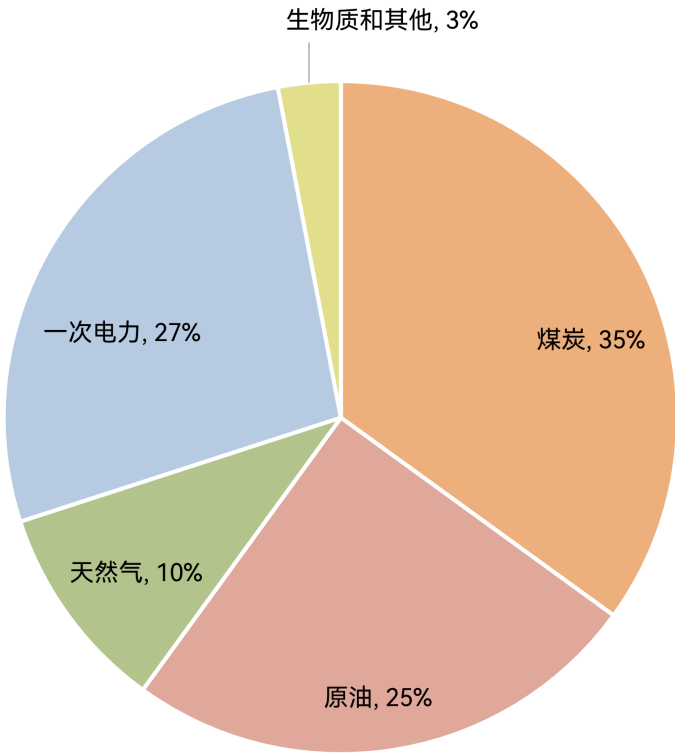
1.2 能源与排放情况

广东省对我国二氧化碳排放总量贡献相对较大，但碳排放强度处于全国领先水平。2022 年，广东省能源相关二氧化碳排放为 5.6 亿吨，约占全国总排放的 5% 左右，碳强度在全国范围内处于较低水平，仅高于北京和上海。同时，广东省拥有完善的政策体系、强大的经济基础、完备的产业体系以及丰富的碳汇资源，与低碳减排相关各领域市场化均走在全国前列。

可见，广东省有条件率先实现“双碳”目标，也将对支撑我国“双碳”目标实现发挥至关重要的作用。一方面，广东省率先探索出可行的路径和有效的模式，为我国其他地区提供参考和激励作用；另一方面，尽早实现目标也将为其他高碳地区绿色低碳转型腾挪出宝贵的空间。

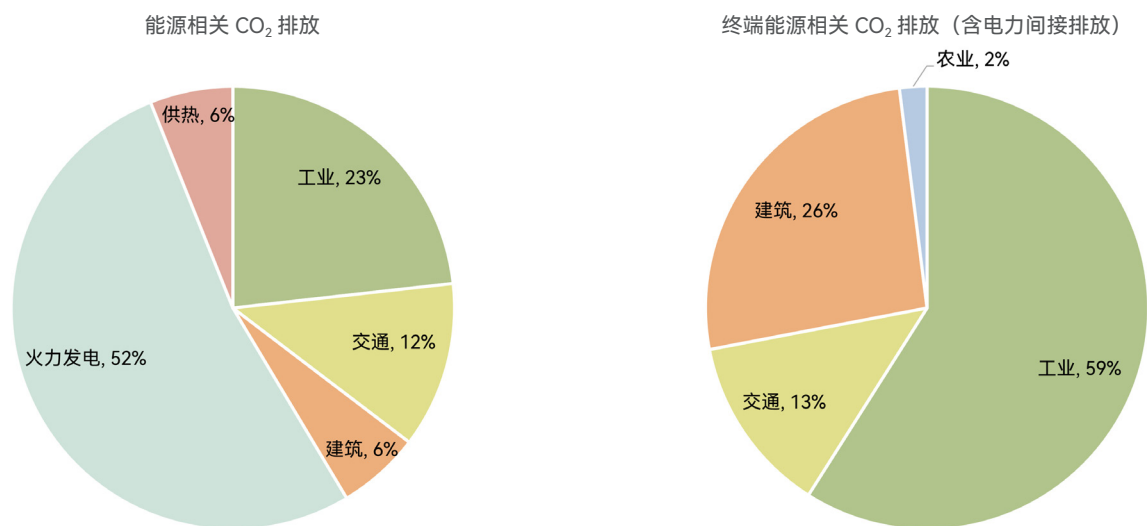
2022 年，广东省煤炭消费占全省一次能源消费的 35%。能源相关二氧化碳排放主要来自火力发电，占比高达 52%，其次为工业部门、交通部门、和建筑运行产生的排放，这几个部门也将是广东省实现低碳发展目标的着力点。从终端能源消费来看，工业部门能源相关的二氧化碳排放占比高达 59%，建筑部门占比 26%，交通部门占 13%。

图 2 2022 年广东一次能源消费结构



数据来源： 基于《中国能源统计年鉴》中平衡表计算

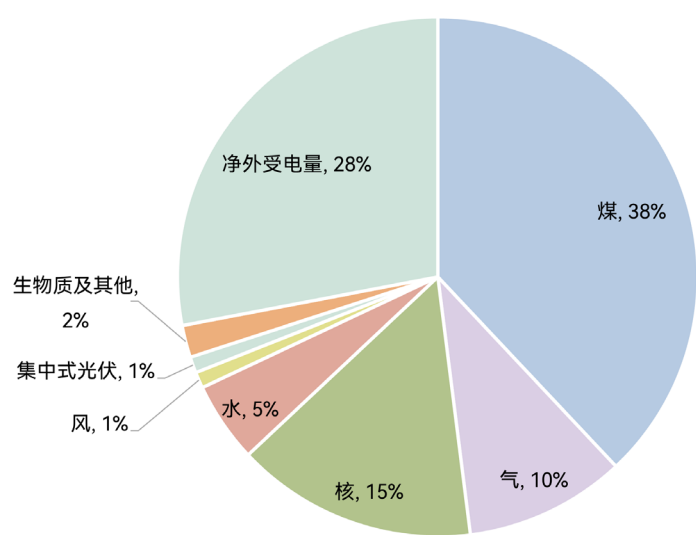
图 3 2022 年广东能源相关 CO₂ 排放结构



数据来源：基于《中国能源统计年鉴》计算，左图能源相关 CO₂ 排放中不包含电力间接排放。

电力系统率先脱碳将成为广东省碳中和的关键。广东省核电与气电发电量占比高于全国平均水平，全社会用电总量的三分之一左右来自于省外调入的电力。未来进一步增加省外清洁水电的调入、本地以海上风电为主、陆上风电以及光伏的进一步发展、火力发电的整体效率提升等将推动电力部门排放的逐步降低。建筑部门、工业部门节能与能效提升等措施将带来能源消费需求的整体减少。但由于终端用能电气化水平的提高，电力部门的排放可能会存在一定平台期。

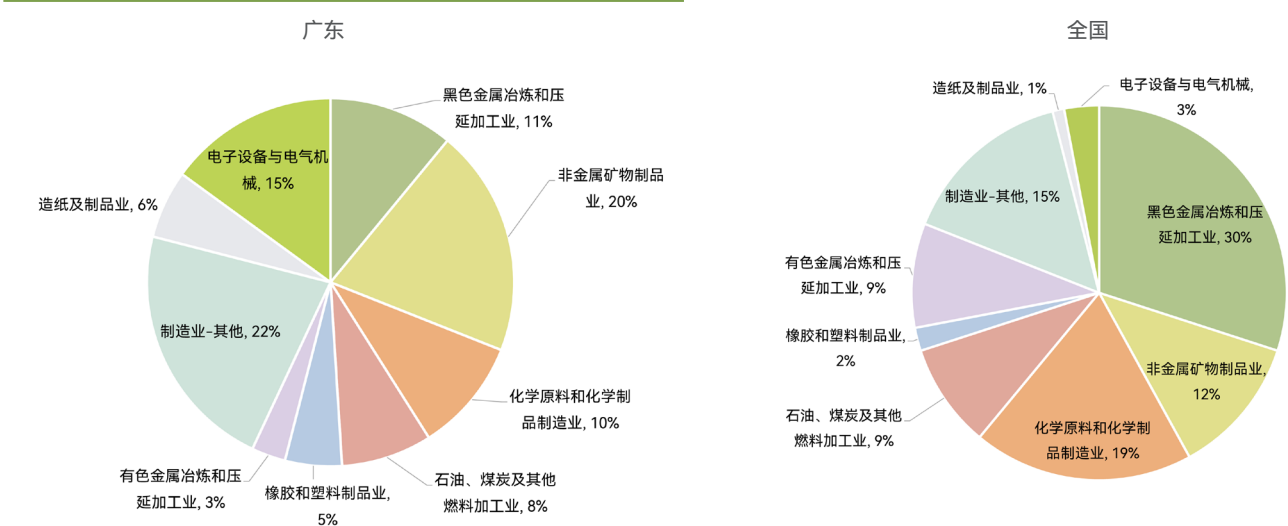
图 4 2020 年广东省发电量结构



数据来源：《电力工业统计资料汇编》

广东省的工业规模处于全国领先地位，2023 年规模以上工业增加值 4.13 万亿元，先进制造业和高技术制造业发展迅猛，占规上工业增加值比重分别约 55% 和 30%¹。广东省工业能源消费结构相对清洁低碳，能效水平在国内处于领先水平。传统高耗能行业中，广东省钢铁、化工、有色金属行业的占比低于全国平均水平，但非金属矿物制品业（水泥、玻璃等）高于全国平均水平，广东水泥行业碳排放在全国占比约为 6%，仅次于安徽和山东，是工业部门减排的重点行业之一。值得注意的是，广东省电子设备与电气机械行业能源消费占比远高于全国平均水平。

图 5 2019 年制造业分行业能源消费占比（全国与广东）

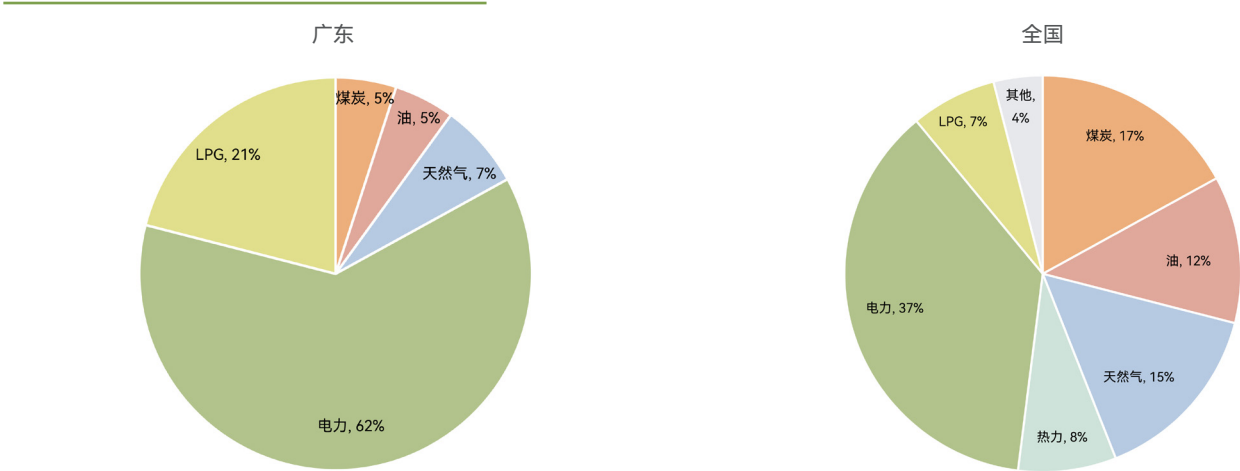


来源：基于《中国能源统计年鉴》和《广东省统计年鉴》计算

交通运输行业是广东省化石燃料相关碳排放的重要来源。分析显示，广东省交通运输行业能源消耗和二氧化碳排放占比均显著高于全国平均水平。广东省交通网络发达，高速公路通车里程连续多年全国第一，铁路网络布局不断完善，航空运输网络以广州白云国际机场、深圳宝安国际机场等大型国际机场为枢纽，旅客吞吐量和货邮吞吐量位居全国前列。拥有广州港、深圳港、珠海港、东莞港等多个亿吨大港，货物吞吐量居全球前列。伴随着经济的发展，交通运输需求还将持续增长，广东省交通部门的减排面临着一定的挑战。

在建筑部门，广东省属于夏热冬暖地区，冬季没有采暖需求，煤炭消费量远低于全国平均水平，但夏季制冷需求大耗电量高。建筑部门（运行阶段）的电气化水平远高于全国平均水平。随着城市化进程和生活水平提升，广东省建筑总量和单位面积能耗将持续增加。坚持进一步提高能效水平，利用地区优势发展岭南特色超低能耗建筑，提高电气化水平，是实现净零排放的关键。

图 6 2020 年建筑运行阶段用能结构（全国与广东）

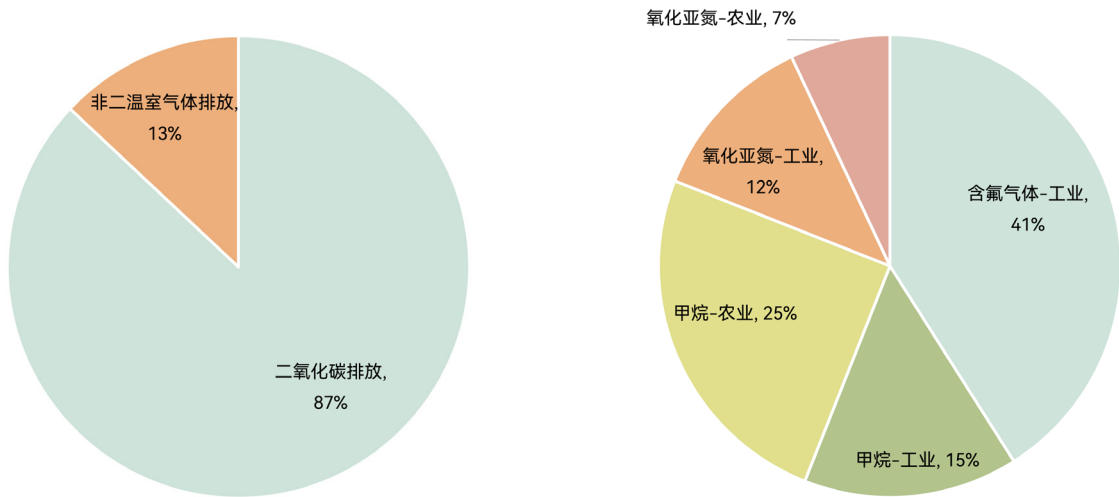


数据来源：基于《中国能源统计年鉴》全国和广东省能源平衡表计算的能源消费

¹ 李明煜等，重点工业行业碳排放现状与减排定位分析，2021

作为工业大省和农业大省，广东省非二氧化碳温室气体排放规模显著。分析显示，2020 年广东省非二氧化碳温室气体排放（甲烷、氧化亚氮和含氟气体）占温室气体总排放的 13%（以二氧化碳当量计，下同）。从排放源来看，非二气体排放主要来自工业（包含废弃物处理）和农业领域，分别占比 68% 和 32%。从气体类型来看，含氟气体排放量最大，占比 42%，主要来自工业部门；其次是甲烷，总占比 40%，农业甲烷占比为 25%，工业甲烷占比为 15%；氧化亚氮总占比 19%，工业氧化亚氮占比 12%，农业氧化亚氮占比 7%。以电气设备制造业和制冷为主的含氟气体排放和农业水稻种植甲烷排放构成广东省非二温室气体减排的关键挑战。

图 7 2020 年广东省非二氧化碳温室气体排放结构



数据来源：基于模型团队计算结果

1.3 低碳转型政策体系与整体目标

2021 年 10 月发布的《广东省生态文明建设“十四五”规划》中提出到 2025 年“单位地区生产总值能源消耗降低 14.5%”的约束性目标。针对能源结构优化，2022 年 7 月出台的《广东省应对气候变化“十四五”专项规划》提出“全省非化石能源占一次能源消费比重达到 32% 左右”的预期性目标，领先于国家 2025 年非化石能源消费比重达到 20% 左右的目标，也刷新了《广东省生态文明建设“十四五”规划》中提出的 29% 的目标；通过压减非发电用煤、科学推进“煤改电”和合理发展天然气发电等，到 2025 年，达到“天然气占一次能源消费比重达到 14% 左右，全省煤炭消费总量约 1.63 亿吨以内”的目标。《广东省生态环境保护“十四五”规划》中提出“全省煤炭消费占一次能源消费比重控制在 31% 以下，珠三角实现煤炭消费总量负增长”。

根据 2022 年 7 月发布的《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》（以下简称《广东“双碳”实施意见》），“十五五”时期广东省能源结构低碳化将迎来几个重要拐点：广东在 2030 年非化石能源消费比重将达到 35% 左右，超过国家 2030 年非化石能源消费比重达到 25% 左右的目标；广东省煤炭消费在“十五五”期间逐步减少，油品消费在“十五五”时期达峰并稳中有降。

请见附录 1 中广东省“1+N”及“十四五”低碳发展政策一览。

图 8 广东省双碳“1+N”政策体系示意图



整体目标

《广东省国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中提出，广东省“单位地区生产总值能源消耗、单位地区生产总值二氧化碳排放的控制水平继续走在全国前列，有条件的地区率先实现碳达峰。”

《广东“双碳”实施意见》进一步明确广东省低碳转型时间线：2030年前实现碳达峰，达峰后碳排放稳中有降，到2060年，非化石能源消费比重达到80%以上，碳中和目标顺利实现。具体目标如下表所示：

表 1 广东省碳达峰碳中和重要时间点和目标

年份	指标	目标
2025	非化石能源消费比重	29%
2030	重点耗能行业能源利用效率	国际先进水平
	单位地区生产总值能耗	全国前列
	二氧化碳排放的控制水平	全国前列
	非化石能源消费比重	35%
2050	新能源为主的新型电力系统	全面建立
	能源利用效率	国际先进水平
2060	非化石能源消费比重	80% 以上

来源：《广东省生态文明建设“十四五”规划》，《广东“双碳”实施意见》

表 2 “十四五”期间广东省能源系统低碳转型相关指标与国家对比

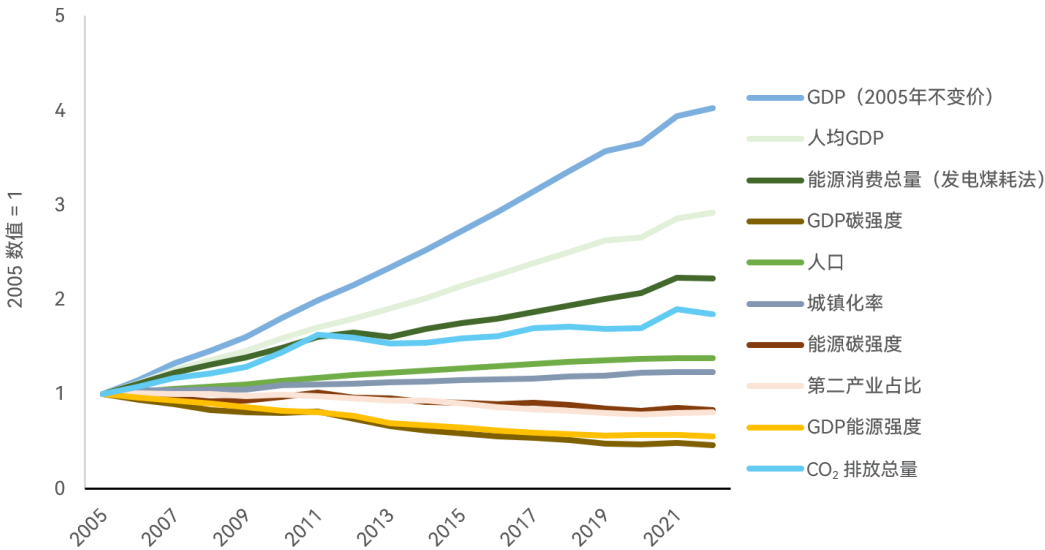
部门	指标	广东省目标	国家目标	对比
综合	单位地区生产总值能源消耗降低	14.50%	13.50%	领先 ↑
	非化石能源占一次能源消费比重	32% 左右	20% 左右	领先 ↑
	煤炭消费总量	< 1.63 亿吨	严格合理控制	
	煤炭消费占一次能源消费比重控制	31.00%	-	
电力	非化石能源电力装机比重	49.00%	-	-
工业	高技术制造业增加值占规模以上工业增加值比重	33.00%	-	-
	一般工业固体废物综合利用率	80.00%	57.00%	领先 ↑
交通	新能源汽车销量占新车销售量比例	20% 以上	20% 以上	一致 →
建筑	城镇建筑可再生能源替代率	8.00%	8.00%	一致 →
	新建公共机构建筑、新建厂房屋顶光伏覆盖率	50.00%	50.00%	一致 →
	城镇新建居住建筑能效水平提升（%）	30.00%	30.00%	一致 →
	城镇新建公共建筑能效水平提升（%）	20.00%	20.00%	一致 →
	电气化水平	80.00%	55.00%	领先 ↑
	星级绿色建筑占比	>30%，新建大型公共建筑 100%	支持星级绿色建筑发展	领先 ↑
	绿色建筑占城镇新建建筑比例	100.00%	100.00%	一致 →
碳汇	森林覆盖率	58.90%	24.10%	领先 ↑

来源：《广东省生态文明建设“十四五”规划》，《广东“双碳”实施意见》，《广东省 2024—2025 年节能降碳行动方案》。国家目标来自《中华人民共和国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》，《“十四五”现代能源体系规划》。

1.4 低碳转型成效及趋势

近 20 年来，广东省人口、城镇化率保持较低速率增长，第二产业占比在 2011 年左右达峰后，处于缓慢下降趋势。分析显示，广东省减排工作已有较为显著成效，碳排放与经济发展已呈脱钩趋势。广东省人均 GDP 快速增长，能源和碳排放指标变化中，能源消费总量保持较快速度增长，但远低于人均 GDP 增速，GDP 能源强度和能源碳强度逐年下降。

图 9 广东省经济发展与能源消费、排放脱钩趋势



数据来源：广东省统计年鉴，中国能源统计年鉴

1.4.1 电力部门

在推广新能源与保障电网灵活性方面，《广东省能源发展“十四五”规划》中提出到 2025 年，“广东省内电源总装机规模从目前的 1.42 亿千瓦提高到 2.38 亿千瓦，其中非化石能源电力装机比重提高至 49% 左右；大力发展海上风电，预期达到 1700 万千瓦；新型储能装机规模达到 200 万千瓦；‘十四五’期间新增抽水蓄能电站 240 万千瓦”等目标与相应措施。《广东“双碳”实施意见》中明确 2030 年“非化石能源装机比重达到 54% 左右”的目标。

截止到 2024 年底，广东省风电、光伏装机分别达到 1801.4 万千瓦和 4111.7 万千瓦，新能源总装机占比超过 26%，非化石能源装机比重超过 45%，其中海上风电装机突破 1200 万千瓦，居全国第一，分布式光伏爆发式增长，装机达到 2742 万千瓦。抽水蓄能及储能装机容量达到 1014 万千瓦，其中新型储能规模装机达到 350 万千瓦^[4,5]。

表 3 电力部门“十四五”目标

指标	广东“十四五”目标	2024 年底情况
非化石能源电力装机比重	49%	45%
海上风电总装机量	1700 万千瓦	1200 万千瓦
新型储能总装机量	300 万千瓦	350 万千瓦
抽水蓄能电站新增装机量	240 万千瓦	664 万千瓦

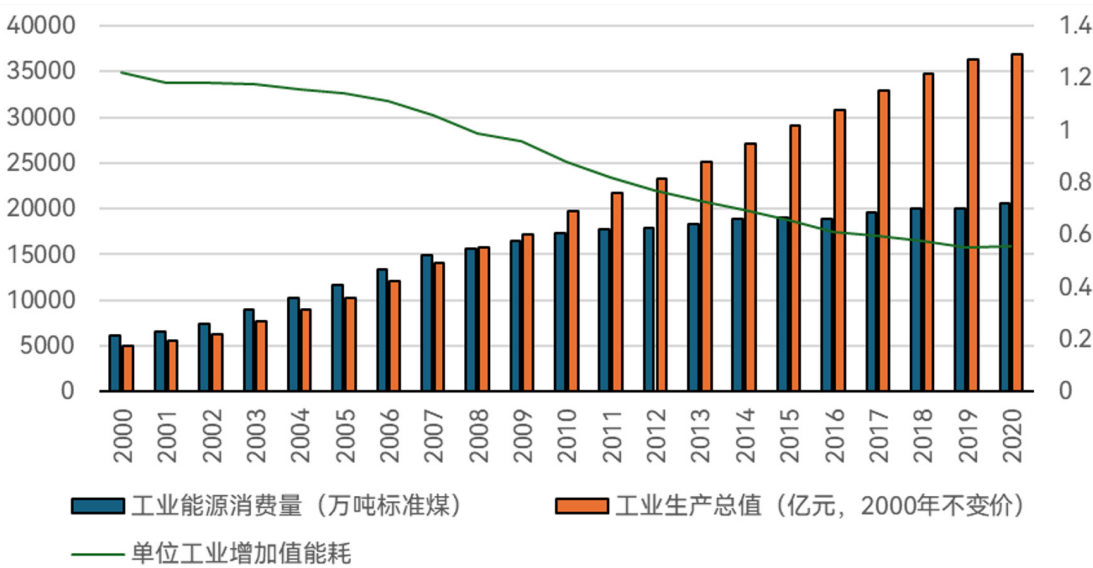
政策目标数据来源 《广东省能源发展“十四五”规划》、《广东省 2024—2025 年节能降碳行动方案》

广东省作为改革开放的排头兵、先行地，电力改革走在全国前列，但适应能源高质量发展的体制机制尚不完善，市场决定能源价格机制尚未完全形成，需要进一步利用市场化机制推动电网稳定、安全、低碳转型²。2024 年广东省电力市场建设运营持续发展，现货市场第一年正式运行，中长期交易实现自然日连续开市，不断创新分布式光伏、绿电、储能等市场交易机制^[4]，推动新型电力系统建设。

1.4.2 工业部门

“十三五”时期，广东省工业单位增加值能耗下降 16%，质量效益显著增高。相较于 2015 年，原油加工行业通过采用先进的节能环保技术和装备、余热余压再利用等技术实现能源利用高效化，单位产品综合能耗降低 4%。乙烯、钢铁、水泥、平板玻璃和造纸等重点行业，也通过生产工艺升级改造、余热余压利用和工业生产流程的绿色化和智能化等手段，将单位产品综合能耗降低了 3%-8% 不等。

图 10 广东省工业生产总产值和能耗水平



² 《广东省能源发展“十四五”规划》

优化产业结构、提高能效标准和推动能源结构转型是广东省工业部门低碳转型的重要途径。为进一步调整产业结构，《广东“双碳”实施意见》指出要坚决遏制高耗能高排放项目盲目发展，新建、扩建钢铁、水泥、平板玻璃、电解铝等“两高”项目严格落实产能等量或减量替代，新上“两高”项目能效水平要达到国内先进水平。在提升能效方面，《广东省制造业高质量发展“十四五”规划》提出全省规模以上工业企业增加值能耗逐年下降，继续保持全国前列；《广东省 2024-2025 年节能降碳行动方案》对钢铁、石化、有色金属、建材行业能效标杆水平以上的产能占比提出具体量化目标，能效基准水平以下产能完成技术改造或淘汰退出。在推动能源结构转型方面，支持发展电炉短流程炼钢、加强氢冶金等低碳冶炼技术示范应用，促进企业提高可再生能源使用比例，“十四五”后两年新上高耗能项目的非化石能源消费比例不得低于 50%。

1.4.3 交通部门

“十三五”期间，得益于推广新能源汽车、优化能源结构、大力发展城市公共交通等方面的努力，广东省营运车辆运输周转量能耗和二氧化碳排放下降率分别达到了 4.0% 和 3.5%，绿色低碳转型效果显著。广东省“十三五”期间出台了一系列推动新能源汽车和充电基础设施发展的政策文件，从发展目标和政策导向、各级财政资金支持、用地保障和地方标准等方面完善和推动各项工作。

广东省交通部门需要优化交通运输结构，并大力促进电气化以及发展氢能交通，在水运领域应用 LNG 并加快配套基础设施建设，以实现低碳转型。在优化交通运输结构方面，《广东省生态环境保护“十四五”规划》中提出“积极引导大宗货物运输‘公转铁’，‘公转水’，推动交通运输结构性节能减排”，“到 2025 年，全省城区常住人口 300 万以上城市绿色出行比例达到 80%。”

广东省交通运输领域推动新能源汽车推广应用成效显著。2021 年，全省交通运输行业累计推广应用新能源营运车辆 13.2 万辆^[6]，全省城市公交电动化率达到 98%。2023 年，广东省新能源汽车零售量达到 75.6 万辆，占汽车零售量的 24.9%，其中在深圳、广州两个限牌城市的渗透率分别达到了 53.3% 和 43.8%^[7]。2023 年底，广东省公共充电桩总量约 56.7 万台（占全国约 18%），居全国首位，其中快充桩占比超 30%。

在推进氢燃料电池商用车和专用车的规模化应用方面，广东省位居全国第一。根据课题组收集的部分数据，广东省 2020 年氢燃料汽车销售渗透率约在 0.2% 左右，远高于国家 0.0047% 的水平。截至 2022 年底，广东省累计推广燃料电池汽车超 3300 辆，建成加氢站 53 座，车辆推广和加氢站建设数量均居全国第一^[10]。

1.4.4 建筑部门

广东省绿色建筑和节能建筑规模化发展居于全国领先水平。“十三五”期间，广东新增绿色建筑面积超过 5 亿平方米，节能建筑新增与既有建筑节能改造同时稳步推进，全省城镇绿色建筑面积逐年递增，在 2020 年达到 63%，超过“十三五”规划目标。全省新增建筑光伏装机容量 1537 兆瓦，新增建筑光热集热面积 479 万平方米。“十三五”期间，广东全省城镇新建民用建筑全面执行节能强制性标准，较“十二五”建筑能效比提高 20%，新建建筑节能面积 7.34 亿平方米。既有建筑改造方面，广东推行合同能源管理方式进行既有公共建筑节能改造，并对老旧小区进行节能和绿色化微改造，稳步提高居住建筑节能水平。

2021 年 1 月《广东省绿色建筑条例》开始正式实施，为广东省在建筑节能和绿色建筑方面发展提供了法律保障。为贯彻《广东省绿色建筑条例》要求，2022 年颁布的《广东省建筑业“十四五”发展规划》中提出 2025 年，“全省一星级及以上绿色建筑面积占当年新增绿色建筑面积的比例超过 30%，珠三角地区城市超过 45%”的预期性目标。2022 年 3 月出台的《广东省建筑节能与绿色建筑发展“十四五”规划》中提出，“到 2025 年，绿色建筑占新建建筑比重达到 100%；完成既有建筑节能绿色化改造面积 3000 万平方米以上；建筑用能结构逐步优化，建筑能耗中电力消费比例超过 80%。；全省城镇新增绿色建筑中星级绿色建筑占比超过 30%。”此外，新编制的《广东省公共建筑节能设计标准》中提供了超低能耗建筑的设计依据，广州市编制的《岭南特色超低能耗建筑技术指南》等的发布与实施进一步完善了广东省绿色建筑技术标准体系。

1.4.5 非二温室气体排放领域

广东省已经逐步认识到非二温室气体减排的重要性。顶层设计方面，《广东省碳达峰实施方案》提出，加强温室气体和大气污染物协同控制，在农业领域控制甲烷、氧化亚氮等温室气体排放，推动开展非二氧化碳温室气体减排的科学基础研究，深化温室气体排放核算方法学研究。《广东省减污降碳协同增效实施方案》从体制机制建设方面，提出推动将协同控制温室气体排放纳入生态环境相关的地方性法规规章，制定完善温室气体排放标准，编制完善温室气体排放清单，建立温室气体和大气污染物排放数据库。含氟气体方面，广东省 2025 年 3 月对含氟气体的使用、销售、维修、回收、再生利用和销毁企业开展备案和数据上报管理工作。对于甲烷，2024 年 8 月《广东省甲烷排放控制工作方案》发布，提出 12 项重点任务，旨在加快形成甲烷排放监管体系，推进减污降碳协同增效，有力有序有效控制甲烷排放。对于农业源的氧化亚氮排放，广东省通过科学施肥、减量增效行动，发布《广东省 2024 年科学施肥增效工作方案》等，“十三五”以来，氮肥使用量从 2015 年 90.8 万吨减少至 2022 年 78.3 万吨。



第二章

研究方法和情景设置

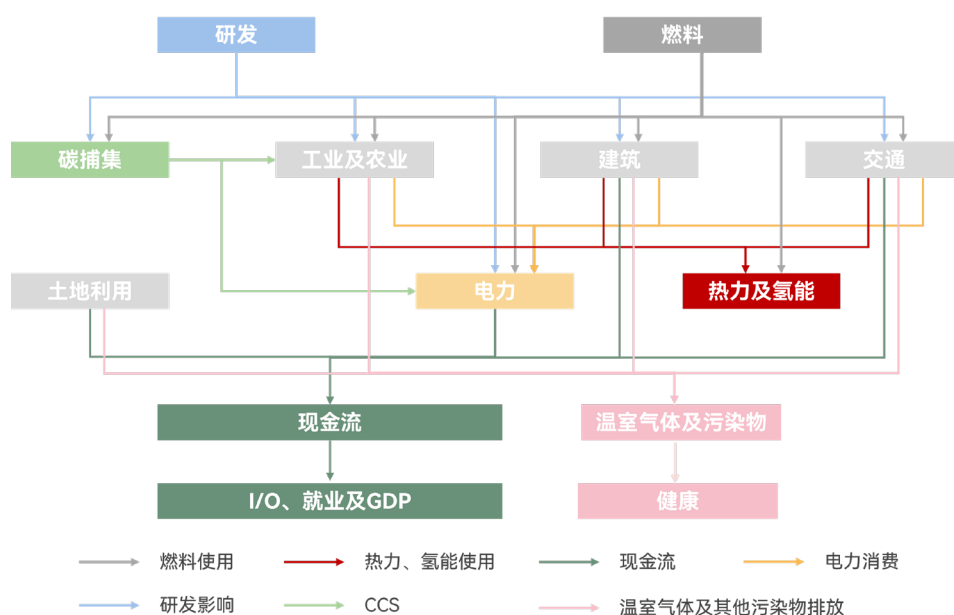
为了量化分析广东省实现低碳转型的可行性和路径，我们采用能源政策模拟模型（Energy Policy Simulator, EPS）作为分析工具。EPS 是一个基于系统动力学的免费和开源分析工具，用于模拟和评估能源与气候政策调整对能源消费、温室气体排放、污染物排放、投资需求及相关宏观社会经济指标的影响。

与 EPS 模型边界一致，本研究主要对能源系统中农业、工业、建筑、交通、电力、热力与氢能部门的能源消费、二氧化碳和非二氧化碳温室气体排放进行建模和分析，并评估转型带来的经济社会影响。非二氧化碳温室气体指除二氧化碳外的温室气体，本研究中包括甲烷、氧化亚氮和含氟气体。在 EPS 模型中，废弃物处理领域、工业能源活动领域和工业生产过程均划分到工业部门。

2.1 模型介绍

EPS 模型主体由 5 大部门 / 行业模块构成，分别是交通、电力供应、建筑运行、工业（包括建筑业、农业）、土地利用和林业。每个模块是由相互关联影响的变量和政策参数按照特定函数关系构成。此外，EPS 模型也设置了其它与碳排放源或汇相关的模块，如区域供热和制氢、碳捕集与封存及利用（CCS/CCUS）、研发（R&D）、燃料、地球工程³、投入产出（I/O）模块等。例如，燃料模块控制所有燃料的基本属性和相关价格，影响到交通、建筑、工业、电力、区域供热和制氢、CCS 等部门和领域的燃料需求变化。投入产出模块用来估算现金流对 GDP、就业和薪酬变化，以及这些宏观经济变量的变化对工业、建筑、交通能源消费和排放变化的影响。R&D 模块控制技术进步对各部门技术的能源效率和固定投资成本的影响。在 EPS 模型中，这些子模块以及内部要素与其他子模块及其要素相互作用，可用来评估能源系统在政策影响下的变化（见图 11）^[11]。

图 11 EPS 模型计算流向图



图片来源：<https://docs.energypolicy.solutions/>

³ 地球工程模块主要包含直接空气碳捕集等技术的应用

2017 年，能源创新政策与技术公司（Energy Innovation, EI）与国家应对气候变化战略研究和国际合作中心（NCSC）、国家发展改革委能源研究所（ERI）的专家组成联合项目组，开发了针对我国国情的中国 EPS-2017 工具，适用于国家和地区层面能源和气候政策相关的情景设置和影响评估。

自 2021 年开始，绿色创新发展研究院（iGDP）支持 EI 持续更新中国 EPS 工具，目前最新版本为 EPS China-iGDP 2024。同时，iGDP 致力于推动 EPS 工具在省份层面的应用工作，为区域层面的碳达峰碳中和路径编制、政策和技术方案选择、投资需求分析等方面提供量化支持^{[12] [13]}。

基于 EPS China-iGDP 2024 版本，iGDP 和中国科学院广州能源研究所联合开发了广东能源政策模拟模型（简称：广东 EPS）。广东 EPS 可以帮助决策者、研究者及相关从业人员采用情景分析方法，评估不同能源和低碳相关政策组合的影响以及展望广东实现“双碳”目标的可能路径。

2.2 数据来源

EPS 模型的建模过程需要大量数据支持，共涉及到 241 个变量指标。鉴于国家和省级模型之间某些指标存在通用性，在广东 EPS 建模过程中我们主要关注具有区域性特点且公开可获得的变量指标。

在广东 EPS 模型中，我们对 55 个变量指标进行了更新。这些更新指标根据模型设定范围内三个优先级：非常高（5 个）、高（29 个），中（8 个）。此外，还包括了一些具有本地化特征的变量指标。通过数据更新，确保模型能够准确反映广东省社会经济和能源发展情况。

概括而言，支持省份 EPS 工具开发所需数据包括能源系统和社会经济相关的两大类。其中，能源系统数据包括电力和热力供应部门的装机容量和效率、可再生能源利用潜力，工业和建筑部门的基年能源消费和未来需求变化，不同交通类型交通工具拥有量、周转量未来变化等相关数据。社会经济数据包括 GDP 和人口现状及未来增速预测、反映区域各部门的投入和产出关系的投入产出表等。本研究所用数据主要来源于中国统计年鉴、中国能源统计年鉴、省统计年鉴等官方统计资料、政策文件以及研究文献等公开数据。

2.3 情景设置

本研究基年为 2020 年，预测年份为 2021-2060 年，设置三个情景模拟广东在不同政策参数设置下的能源消费和碳排放路径。

2020 政策冻结情景（2020 Policy Frozen Pathway），反映 2020 年以前我国和广东政策措施和力度的自然延续，未考虑 2020 年后出台的最新政策。这个情景为不可能发生情景，作为比较其他情景的基线。

政策情景（Policy Scenario），反映“双碳”目标提出后，我国和广东已经陆续出台影响 2030 年前碳排放的相关目标和政策措施，并且 2030 年后这些政策措施和力度自然延续，未考虑 2060 年碳中和目标的实现。本情景可用于评估广东近中期政策的减排效果。

双碳情景（3060 Net Zero Pathway），在政策情景基础上，2030 年后的政策措施和力度参考全国和全球最佳实践，确保广东在 2060 年前实现碳中和目标。本情景用于识别实现 2060 年碳中和目标的现有政策差距和政策重点。

三个情景的具体情景参数设置见附录。

表 4 情景说明

情景	开始年份	结束年份	定义	功能
2020 政策冻结情景	2020	2060	2020 年以前我国和广东政策措施和力度的自然延续，未考虑 2020 年后出台的最新政策。	基准情景（用于基准比较）
政策情景			反映“双碳”目标提出后，我国和广东已经出台影响 2030 年前碳排放的相关目标和政策措施，并且 2030 年后这些政策措施和力度自然延续，未考虑 2060 年碳中和目标的实现。	评估现有政策减排效果
双碳情景			在政策情景基础上，2030 年后的政策措施和力度参考全国和全球最佳实践，确保广东在 2060 年前实现碳中和。	识别实现碳中和的政策差距



第三章

广东能源和碳排放展望

广东 EPS 模型结果显示，按照现已出台政策措施力度，广东省二氧化碳排放可在 2030 年前达峰。但需要重点关注提高非化石能源发电量的比重，确保到 2030 年达到 40% 左右，以保证 2030 年前碳排放达峰。

在政策和双碳情景下，仅考虑直接排放情况下，各终端用能部门均进入达峰前平台期。排放增长主要来自于电力部门。居民生活水平改善及建筑部门电气化水平提高，主要推动了整体电力需求上升，在没有加速提高可再生能源发电量占比的情况下，间接推高了电力部门排放。

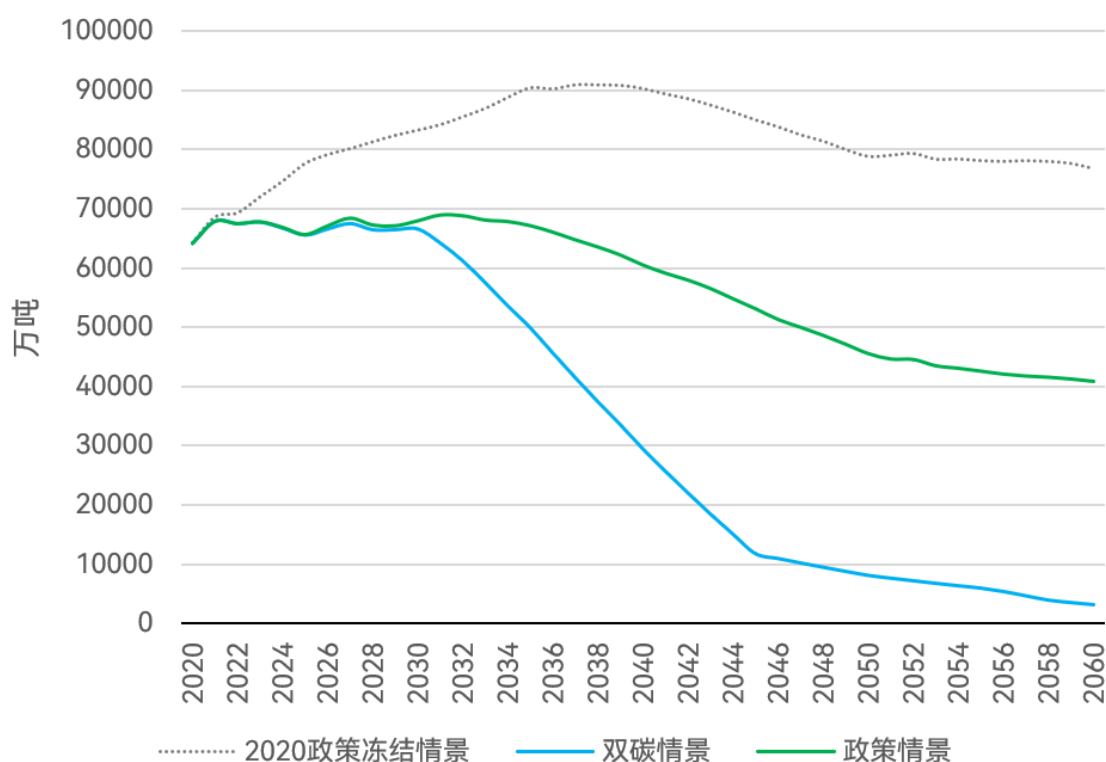
为如期实现 2060 年碳中和目标，2030 年后二氧化碳年均降幅需达 13.4% 左右，2060 年排放较二氧化碳排放峰值下降 95%；非化石能源占比需从 2020 年的 28% 左右提升至 2060 年的 74%。各部门电气化率需显著跃升，电力部门则通过加速煤电退出、持续扩大可再生能源及核电占比，成为减排主力贡献部门。

3.1 温室气体排放

EPS 模型结果显示，冻结情景下广东省的二氧化碳排放将在 2035 年后达峰，达峰后排放下降缓慢。

在政策情景下，按照现已出台政策措施力度，广东省二氧化碳排放可在 2030 年前达峰并进入平台期。双碳情景下，二氧化碳排放将在 2030 年达峰后需要快速下降，2035 年相对于 2030 年累计下降率为 25% 左右，2040 年相对 2035 年累计下降率约为 41% 左右。在政策情景下，2060 年二氧化碳仍有约 4 亿吨排放。

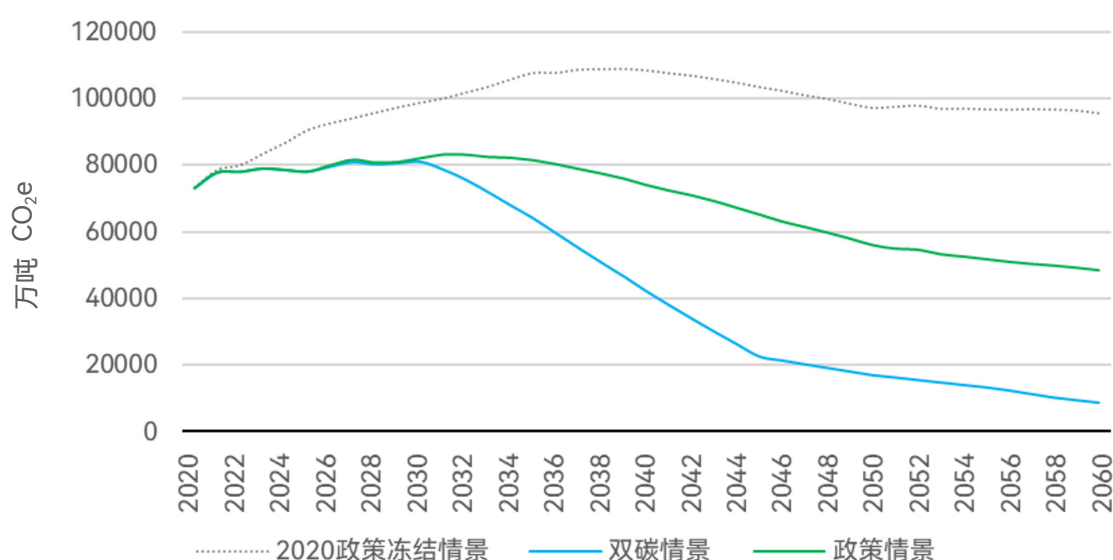
图 12 各情景二氧化碳排放趋势



在双碳情景下，2030年至2045年，假设电力行业、钢铁、水泥、化工行业从2030年开始逐渐配备CCUS，广东省温室气体排放保持每年平均4000万吨二氧化碳当量（CO₂e）左右的下降量，到2060年，温室气体排放量约8000万吨CO₂e（不包括碳汇，但包括CCUS情况下），相对于峰值降低近90%。需要指出的是，在当前双碳情景设置的节能和燃料替代政策下，为达到近零排放水平，仍需要大规模配备CCUS⁴，形成较大成本和技术挑战。

非二氧化碳温室气体⁵也是温室气体排放进一步降低的主要挑战，双碳情景下到2060年，广东省含氟气体排放约为1.26亿吨CO₂e，甲烷0.23亿吨CO₂e，氧化亚氮0.1亿吨CO₂e。

图 13 各情景温室气体排放趋势（不考虑碳汇）

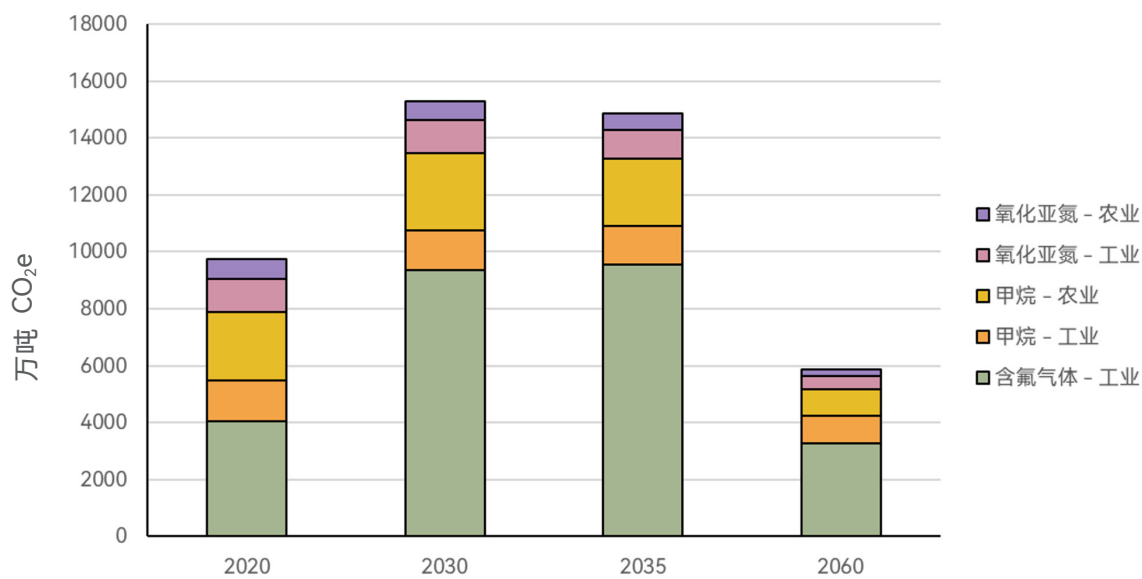


在双碳情景下，温室气体排放结构呈现显著变化趋势。含氟气体增长最为明显，2030年达到9354万吨CO₂e左右，为2020年的两倍多，在2060年重新降低到2020年水平以下，达到3282万吨CO₂e左右。农业部门甲烷排放呈现“先升后降”趋势，而工业部门甲烷排放逐步稳定降低。在2020年，农业部门甲烷排放约为2421万吨CO₂e，工业为1429万吨CO₂e，农业是工业排放的两倍左右，到2060年，两部门甲烷排放均下降到900万吨CO₂e水平。工业和农业部门的氧化亚氮排放均呈现出稳定的下降趋势，工业部门从2020年的1161万吨逐步减少至2060年的481万吨CO₂e，农业部门则从2020年的688万吨CO₂e逐渐下降至2060年的221万吨CO₂e。

⁴ 火电100%配备CCUS，化工排放量中95%被捕集利用，水泥排放量中90%被捕集利用，钢铁排放量中60%被捕集利用。

⁵ 本报告中温室气体，以及非二氧化碳温室气体单位均为万吨二氧化碳当量（CO₂e）。

图 14 双碳情景下非二氧化碳排放变化

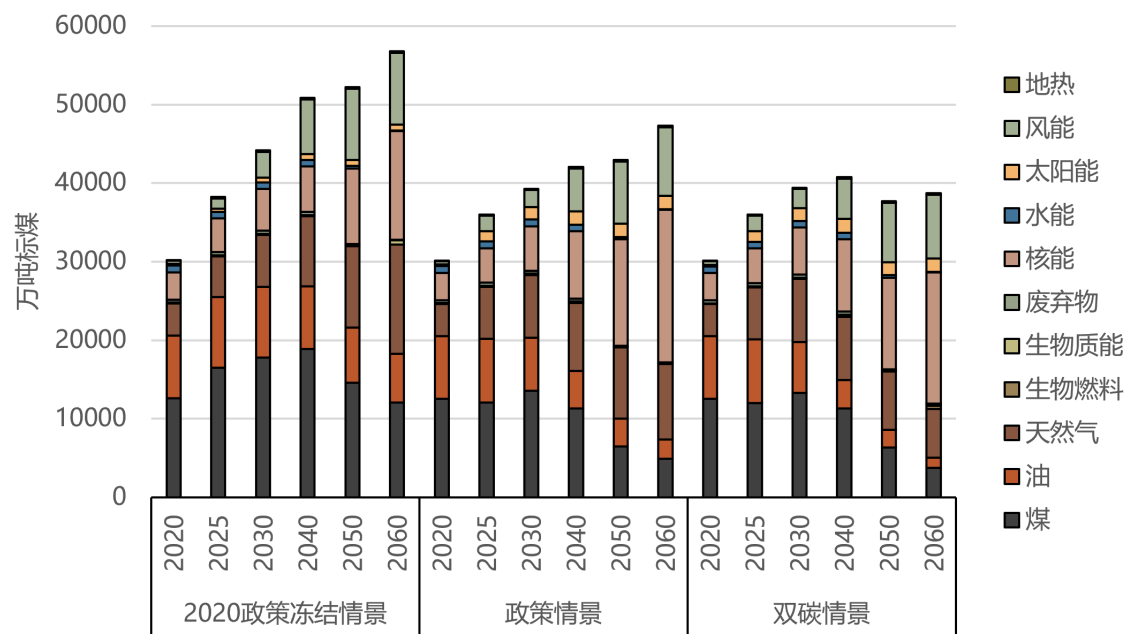


3.2 能源消费

3.2.1 一次能源消费

政策情景下，一次能源消费量始终保持上升。而双碳情景下，一次能源消费量在 2040 年左右达峰后下降。从一次能源消费结构来看，在考虑跨省调入调出电力及结构后，双碳情景下，2020 年广东省非化石能源在一次能源消费占比约为 28% 左右，到 2030 年，该比例上升到 36% 左右，2060 年进一步上升到 74% 以上。

图 15 各情景一次能源消费结构变化



3.2.2 终端能源消费结构

从终端能源消费结构来看，在双碳情景下，广东省各部门的电气化率呈现出显著的上升趋势。工业部门电气化率（不包括原料）预计将从 2020 年的 39% 增长到 2060 年的 88%。建筑部门基年电气化率相对较高，2020 年已达 64%，模型预测到 2060 年将增长到 97%。交通电气化率的增长最为显著，2020 年电气化率仅 1%，在新能源车推广、充电桩等设施建设等推动下，到 2060 年增至 74%。

表 5 双碳情景各部门电气化率变化趋势

部门	2020	2025	2030	2040	2050	2060
工业电气化率（不包括原料）	39%	46%	54%	67%	79%	88%
工业电气化率（包括原料）	35%	41%	48%	59%	68%	79%
建筑电气化率	64%	68%	78%	92%	96%	97%
交通电气化率	1%	6%	20%	56%	71%	74%

3.3 分部门低碳转型

分部门分析表明，2020 到 2060 年间，双碳情景下总温室气体减排主要得益于电力部门二氧化碳排放的减少，具体原因包括更高的可再生电力消费占比、更早停止新建煤电厂政策措施等，促进了电力部门快速脱碳。工业部门需聚焦高耗能行业，通过电气化、氢能替代高温热源及 CCS 技术实现深度脱碳，但含氟气体等非二气体仍构成一定挑战。建筑部门依托能效提升和电气化转型，有望在 2054 年实现净零排放。交通部门则需通过“公转水铁”结构优化和新能源车渗透率提升，将燃料相关排放压降至 700 万吨水平。研究特别强调，需密切关注短中期电力需求增长带来的电力间接排放增长，降低电力部门减排压力，在长期来看，需重点针对含氟气体减排进行技术创新与政策引导。

图 16 双碳情景分部门 GHG 排放（不考虑间接排放）

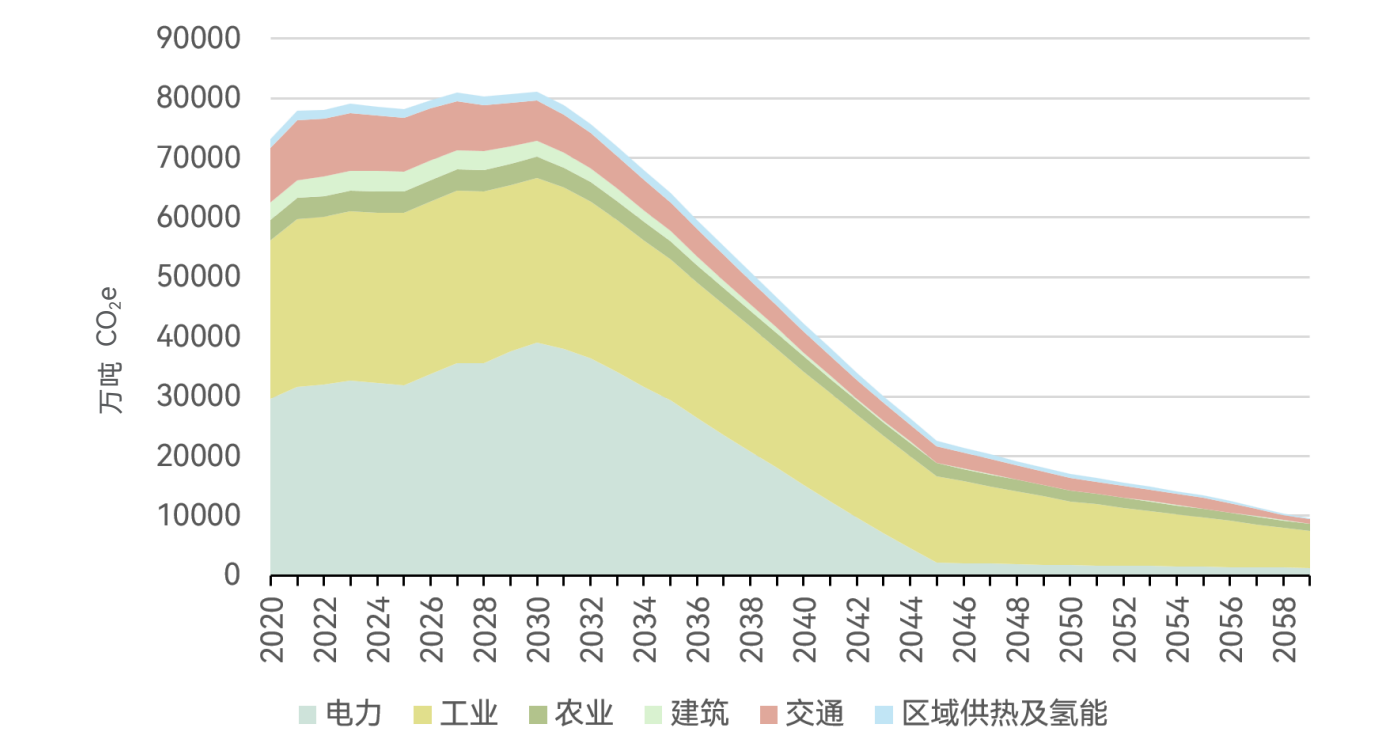
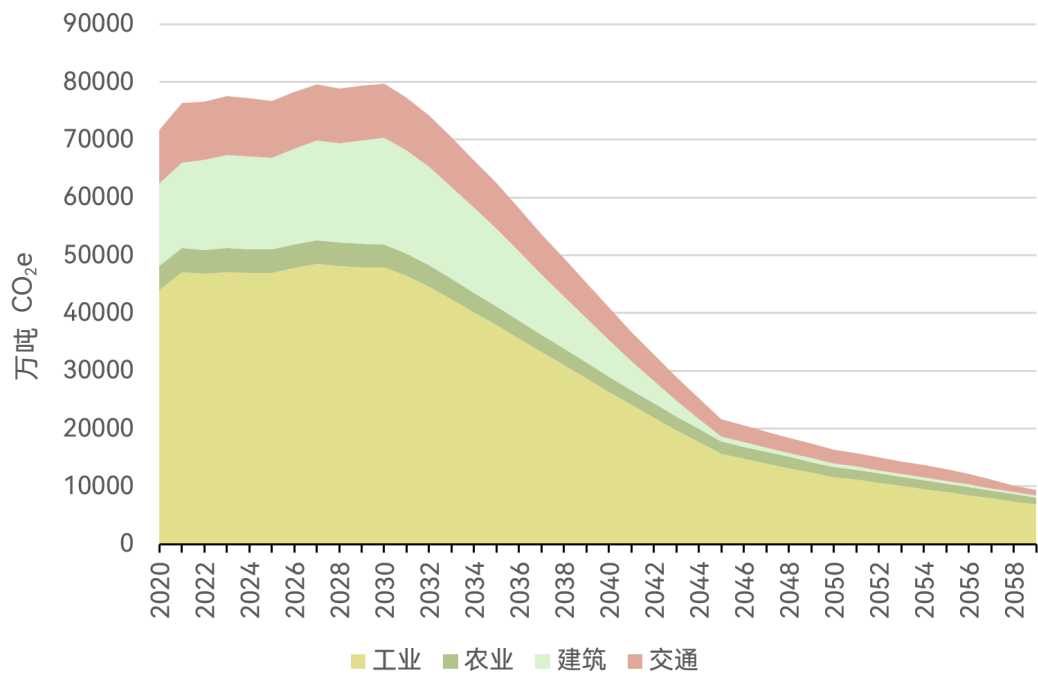


图 17 双碳情景分部门 GHG 排放（考虑间接排放）



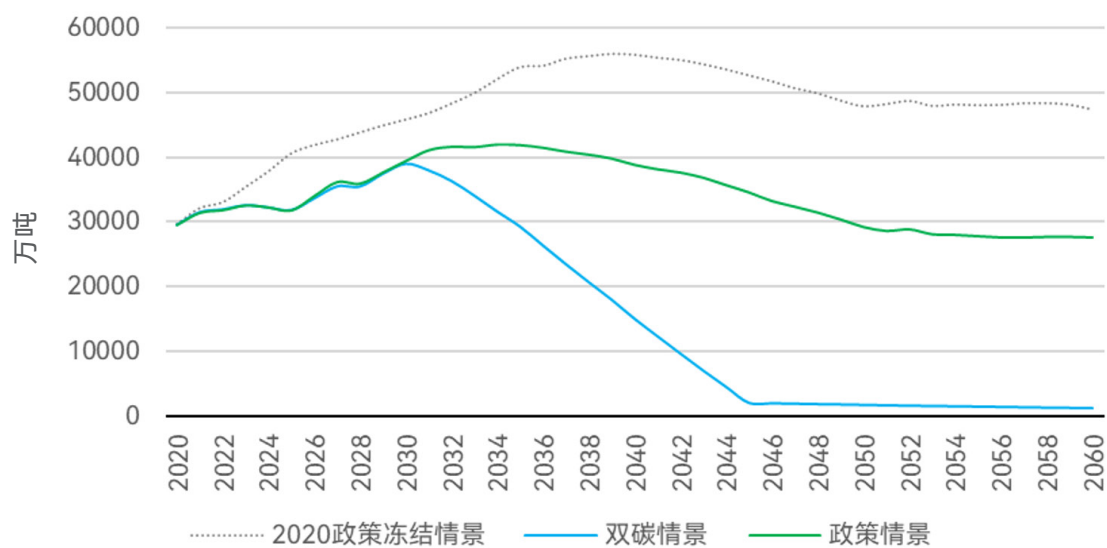
3.3.1 电力部门

广东省作为改革开放的排头兵、先行地，电力改革走在全国前列。“十三五”以来，广东电力改革取得显著成效。在终端部门电气化率持续提高的背景下，电力部门将承担重大减排任务，需要发展本地可再生电力、增加省外调入清洁电力并利用市场化机制推动电网稳定、安全、低碳转型。

· 温室气体排放

2020 到 2060 年间，双碳情景下全省温室气体排放总量快速降低，主要得益于电力部门二氧化碳排放的减少，具体原因包括更高的可再生电力消费占比、更早停止新建煤电厂政策措施等，促进了电力部门快速脱碳。

图 18 各情景电力部门二氧化碳排放趋势



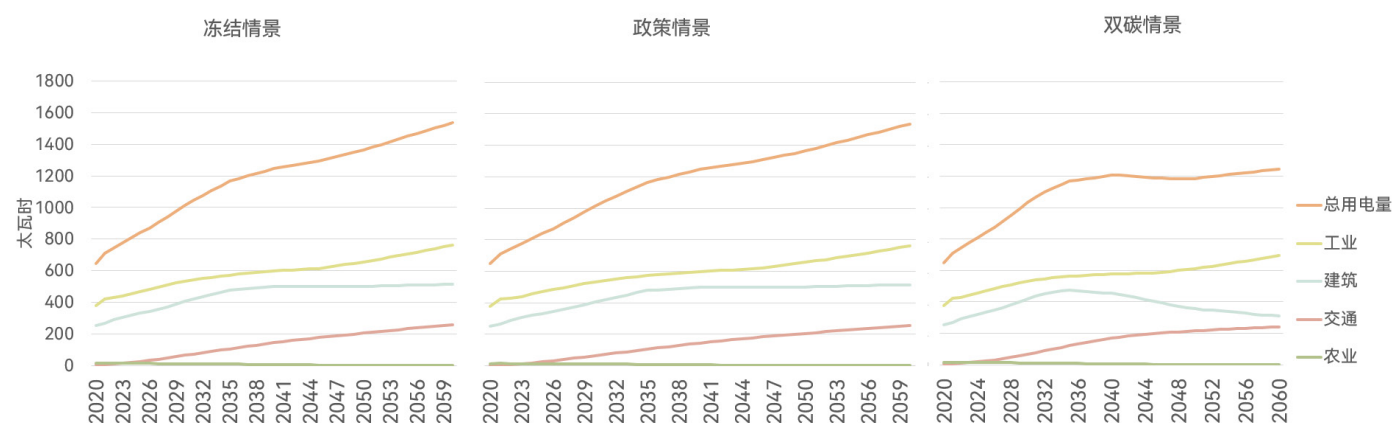
· 电力需求

如下图所示，政策情景下用电量整体保持增长态势，增速在 2035 左右放缓，在 2050 年左右再次加快。工业部门中，电子与电气设备制造业将主要推动电力需求增长，但在高耗能产业产能控制、工业各行业整体能效水平提升等因素作用下，整体用电需求上升幅度小于冻结情景。

建筑部门中，新建绿色建筑和既有建筑节能改造等措施，推动建筑部门用电量自 2035 年左右开始缓慢下降；交通部门则由于电气化率及本身周转量需求增加用电量进一步提高。

双碳情景中，广东省用电量在 2040 年左右达到最大值后进入平台期，在 2050 年后略有反弹。相对于政策情景，2035 年后，建筑部门用电量后降低更明显；交通部门用电量更快速增长；工业部门用电量整体缓慢增长。

图 19 各情景主要部门用电需求变化趋势



注：图中建筑部门电力需求为已减去分布式发电量的净电力需求。

· 电源结构

2022 年，广东发电结构仍以煤电为主，在电力供应中占比约 41%；跨省调入电力在广东省电力供应中占比较高，占比约 23%；紧随其后的是核电，占比约 13%，天然气发电占比约 11%，本地可再生发电量仍处于较低水平。为实现碳达峰和碳中和目标，同时满足持续增长的用电需求，广东省需积极开发本地可再生电源，并增加调入清洁电力。

政策情景和双碳情景中，广东省调入电力量和其中清洁电力占比将继续提高。《广东省能源发展“十四五”规划》中提出进一步提高西电东送送电能力，并积极推动藏东南至粤港澳大湾区 ±800 千伏特高压直流输电工程及广东段 500 千伏配套工程建设⁶，从水力资源丰富的西藏引进清洁电力，同时提升区外电力供应稳定性和可持续性⁷。

在调入更多清洁电力的基础上，也要继续增加本地发电结构中清洁电力占比，同时发展调峰电厂及储能等灵活性电源，确保电网安全稳定转型。广东省水电开发程度已经较高，光伏和陆上风电主要受到可用土地面积限制较明显，海上风电拥有较大发展潜力。

在双碳情景中，包括分布式电源在内，可再生发电量占比将从 2020 年的 10% 左右增长到 2060 年的 30% 左右，非化石电源发电量占比提升到 75% 左右。风光发电量保持稳定增长，到 2030 年达到 146 太瓦时左右，约为 2020 年的 6 倍左右；2060 年约为 345 太瓦时，为 2020 年的 15 倍左右。随着非化石电源占比的提高和现有煤电机组达寿退役，模型预测煤电发电量约在 2030 年左右达到峰值并开始稳定下降。非化石发电量也在 2030 年前后超过煤电。

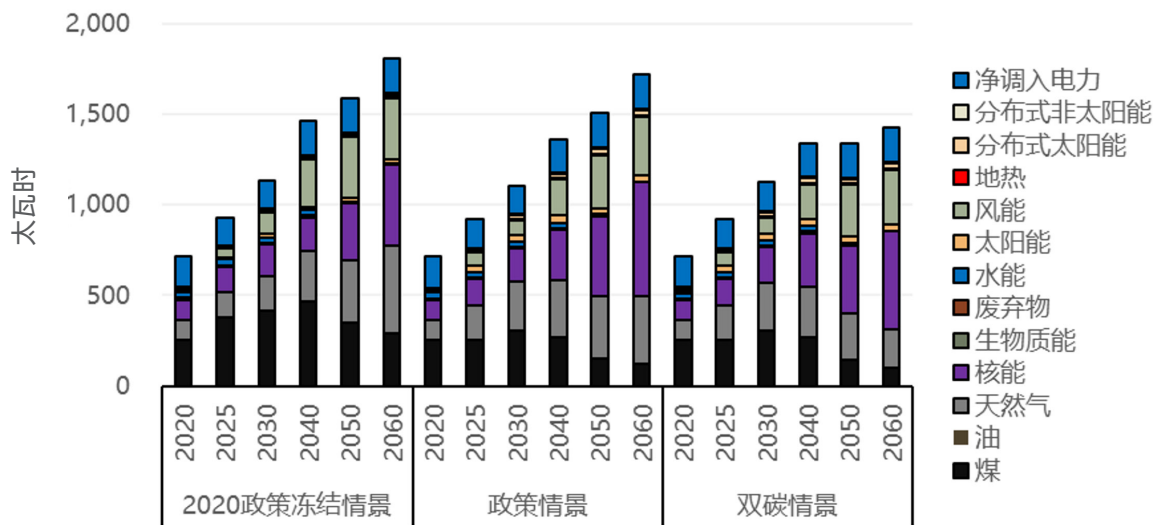
⁶ 在“十四五”政策情景，我们假设新线路在“十四五”结束时完成，并在三年后满负荷投入使用。

⁷ 我们假设以上跨省电力调入在“十四五”之后逐步投入使用。

核电将逐步取代煤电成为广东的“基荷电源”。政策情景下，核电发电量保持稳定增加，到 2060 年达到 642 太瓦时左右，在本地发电量中占比由 2020 年的 20% 左右提高到 37%。在双碳情景下，主要由于工业、建筑、交通的能效提升，2060 年全社会用电量相对于政策情景降低 18% 左右，也导致核电发电量增幅低于政策情景，但占比在 2060 年仍高达 38%，发电量约 542 太瓦时。

因可再生电源出力具有间歇性，电网需要相匹配的灵活电源和储能设备来保证电网运行的安全和稳定⁸。在政策情景下，燃气机组发电量保持波动增长，到 2060 年约为 377 太瓦时。在双碳情景下，到 2035 年前可能仍需小幅增长，随后进入波动下降，到 2060 年基本稳定在 200 太瓦时水平。到 2060 年，剩余煤电和天然气调峰电厂将被保留来满足电网的调峰调频等需求，并将全面配备 CCUS 以捕集和利用火力发电产生的二氧化碳。

图 20 各情景关键年份发电量结构



3.3.2 工业部门

广东省的产业发展水平居于全国前列，产业结构相对低碳，工业能效水平在中国较为先进，以接近 40% 的第二产业占比，在全国保持单位 GDP 能耗第二低的水平，仅次于北京^[14]。

随着 2030 年碳达峰目标的逼近，广东省作为工业能效的领先者，预计将承担更重要的减排任务和带动作用，应着重提高工业能效标准，并推动电气化及氢能利用。此外，非二氧化碳温室气体排放对广东省中和影响较大，广东也应重视加强对非二氧化碳温室气体的减排措施。

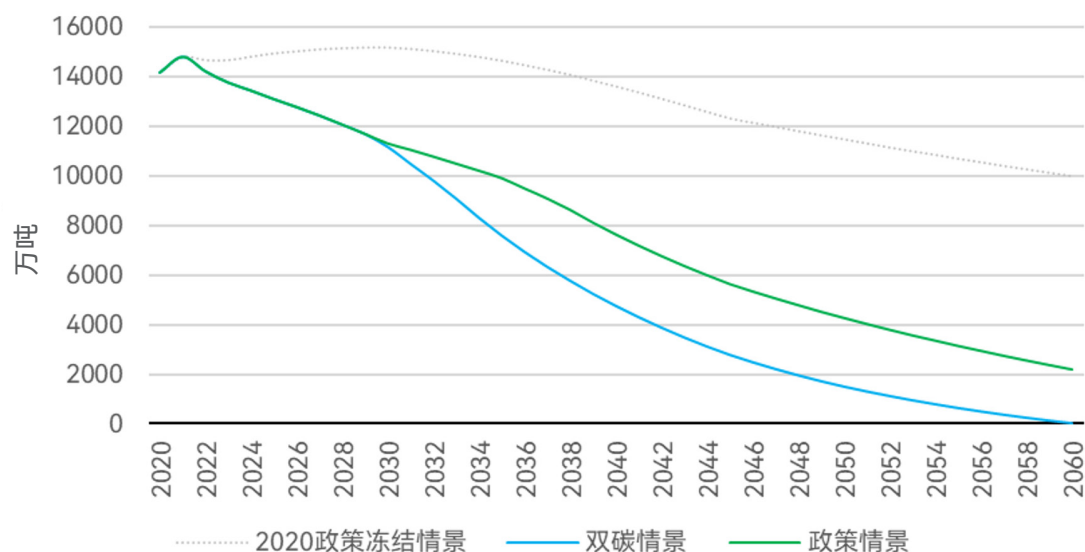
· 温室气体排放⁹

工业部门能源相关二氧化碳在 2020 年约为 1.4 亿吨。冻结情景下，工业部门能源相关二氧化碳在 2030 年左右达到峰值并开始下降，下降不明显。在政策情景下，能源相关二氧化碳基本保持匀速下降，年均下降率约为 2%。双碳情景下，2030 年后，能源相关二氧化碳排放年均下降速度达到 8.5% 左右，到 2060 年基本达到近零排放。

⁸ 由于在 EPS 中，储能设施的容量是输入变量而非模型新建电厂，在双碳情景中，我们假设电网有较为充裕的储能设施来满足高峰用电需求。

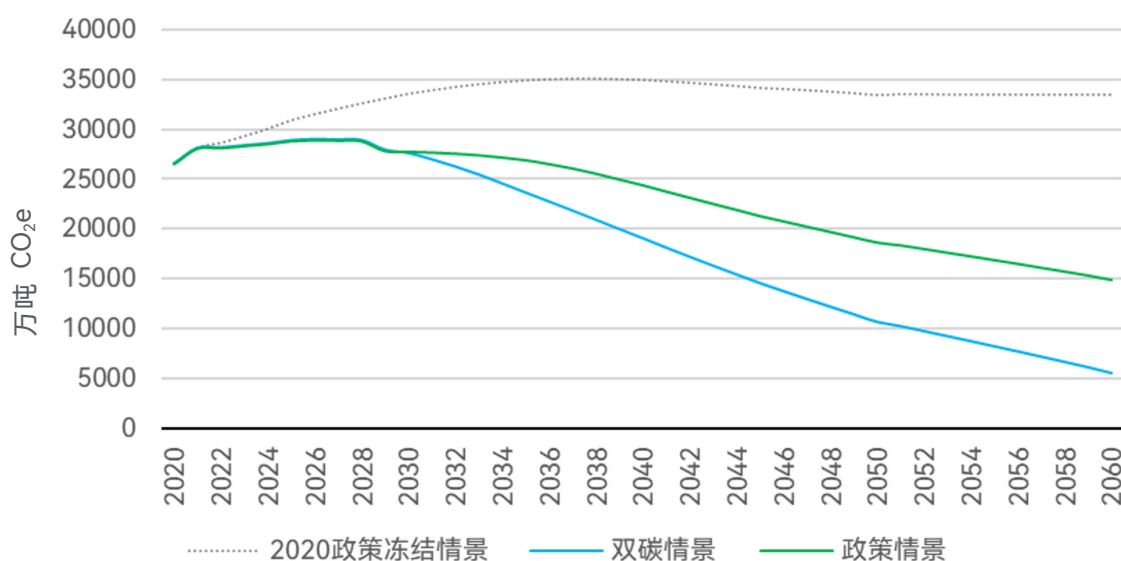
⁹ 本研究分别分析工业部门能源相关 CO₂ 排放、过程 CO₂ 排放、以及非二氧化碳温室气体排放，以及对应的减排措施。

图 21 各情景工业部门二氧化碳气体排放趋势



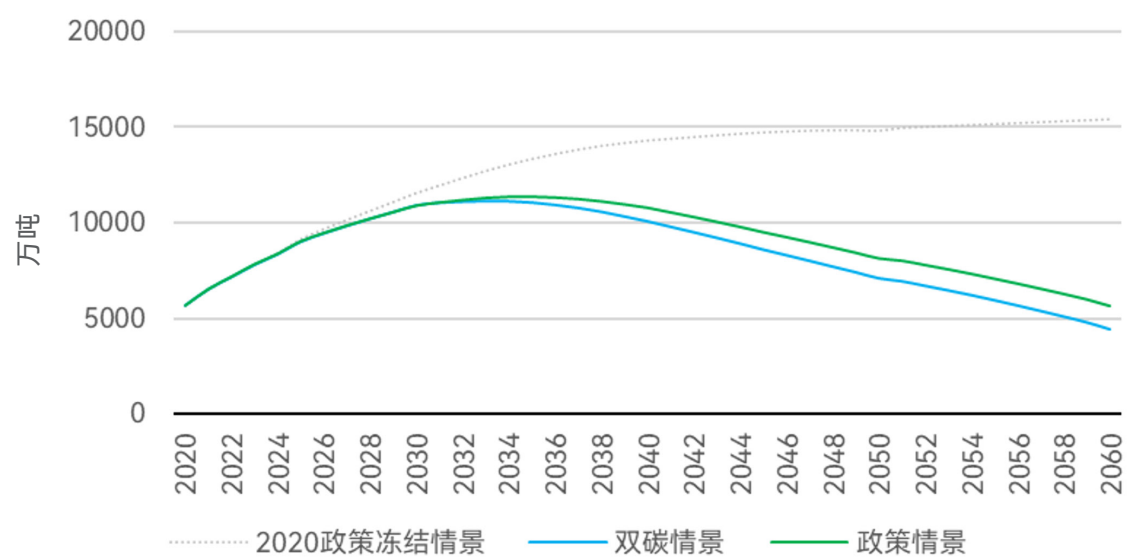
然而，广东省工业部门温室气体减排仍存在一定挑战。双碳情景下，2060 年广东省温室气体排放仍有 5500 万吨左右，主要为非二气体。

图 22 各情景工业部门温室气体排放趋势



在冻结情景下，非二气体排放到 2045 年后达到最大值并进入平台期。政策情景和双碳情景下，非二气体排放在 2034 年左右达到峰值，峰值约为 11300 万吨 CO₂e，是 2020 年的 2 倍左右。在两个情景下，非二气体排放在达峰后进入稳定下降阶段，到 2060 年，政策情景非二排放约为 5659 万吨 CO₂e 左右，双碳情景约为 4426 万吨 CO₂e，在采用经济和技术可行性的最大措施后，以含氟气体为主的非二气体仍无法实现零排放。

图 23 各情景工业部门非二氧化碳温室气体排放趋势 (万吨 CO₂e)

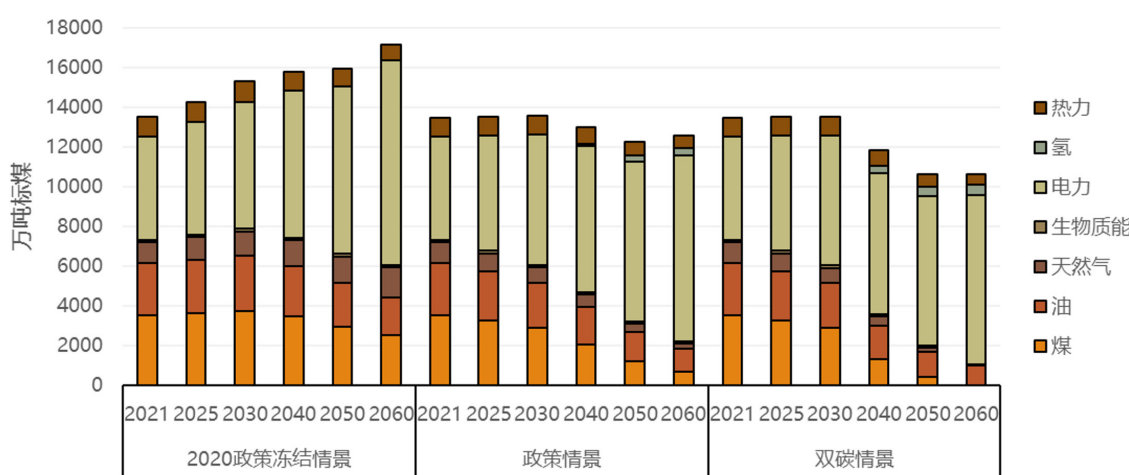


· 能源消费总量和结构

在三种情景下，工业部门整体能源消费均有下降，能源消费结构持续优化。政策情景下，随着能效标准的不断提升，工业部门能耗总量加速下降，年均下降速度约为 1%，到 2060 年，工业部门终端能源消费总量降至 1.25 亿吨标煤左右。同时，电气化水平稳定上升，电力占比在 2060 年约为 75%。

双碳情景下，工业部门用能结构清洁化程度更高，工业部门能源消费总量和煤炭占比下降更快。2060 年工业部门总能耗约为 1.06 亿吨标煤，其中煤炭占比下降到近零水平，电力占比提升到 80%，中低温热源全部电气化，高耗能行业利用氢能替代无法被电力替代的高温热源。

图 24 各情景工业部门能源消费量(万吨标煤, 仅包含能源利用)



· 行业排放趋势

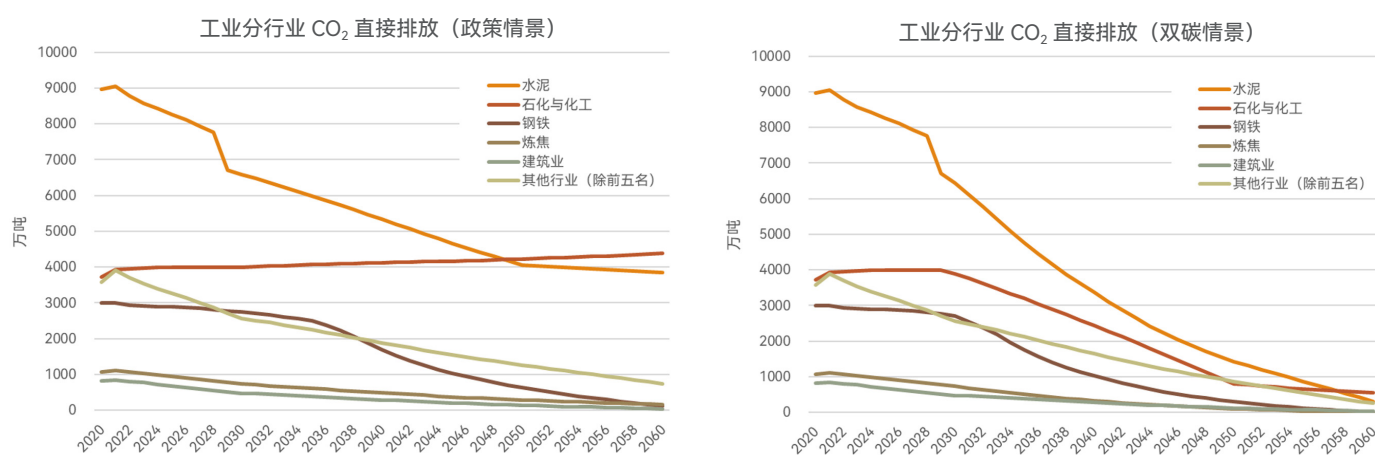
在 2020 年，广东省工业部门中，二氧化碳直接排放前三高的行业分别为水泥、钢铁、石化与化工，分别贡献了全省工业部门当年排放的 44%，18%，14%。

在政策情景下，水泥行业排放将保持稳定下降，钢铁在 2035 年前缓慢降低，在 2035 年后开始明显下降，石化化工行业排放将维持在相对稳定水平。

双碳情景下，2030 年后各行业排放较政策情景需更快速下降，特别是钢铁和化工行业，需要更高比例电气化，大范围推广氢能替代高温热源，并配备 CCUS 等，推动工业部门达到净零排放。

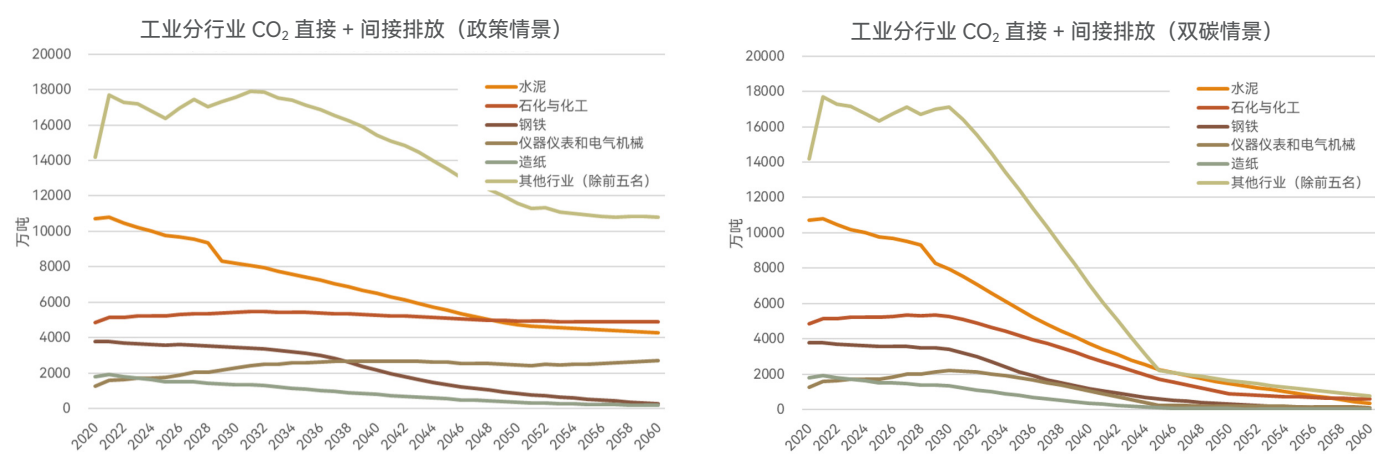
双碳情景下，广东省水泥行业 2035 年直接二氧化碳排放需相对 2020 年下降 48% 左右，钢铁下降 44% 左右，石化与化工行业下降 23% 左右。到 2035 年，绝大多数行业排放开始下降，仪器仪表与电气机械行业、计算机通信及其他电子设备行业排放仍将上升，但在总排放中占比很小，到 2060 年工业部门可基本实现零二氧化碳排放。

图 25 工业分行业二氧化碳直接排放（政策情景与双碳情景）



在考虑间接排放的情况下，2020 年排放最高的行业分别是水泥、钢铁、石化与化工、计算机通信及其他电子设备、造纸行业，分别占工业部门排放的 29%、12%、11%、8%、5%。由于受到电力部门脱碳程度影响，工业各行业减排速度将整体慢于直接排放降低速度。

图 26 工业分行业二氧化碳直接与电力间接排放（政策情景与双碳情景）



3.3.3 建筑部门

广东省绿色建筑和节能建筑规模化发展居于全国领先水平。2020 年，广东省居民建筑和公共建筑能源消费主要为电力、液化石油气、天然气，分别占总建筑部门能源消费的 66%、17% 和 9%。建筑部门直接二氧化碳排放约占广东省总能源相关二氧化碳排放的 6%，主要来自液化石油气和天然气燃烧。考虑电力间接排放，建筑部门排放占比约为 26%。

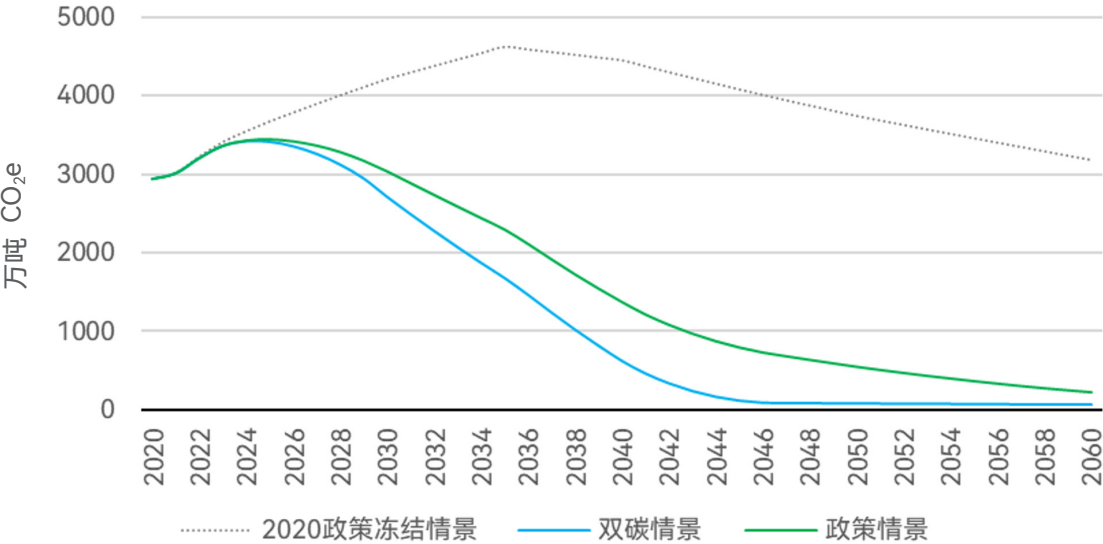
建筑部门的间接排放量相对较大，进一步节能以减少包括电力在内的能源消费，以及推进用能结构向更高比例电力和可再生能源转型，是主要减排途径。

· 温室气体排放

随着城市化进程和生活水平提升，广东省建筑总量和单位面积能耗将持续增加。然而通过提升建筑节能水平及电气化水平，三个情景下温室气体排放均以不同速度下降。政策情景中，建筑部门温室气体排放从 2024 年左右开始减少。

双碳情景下，建筑部门排放从 2024 年大幅降低，在 2040 年左右达到 500 万吨以下，在 2054 年基本实现净零排放。

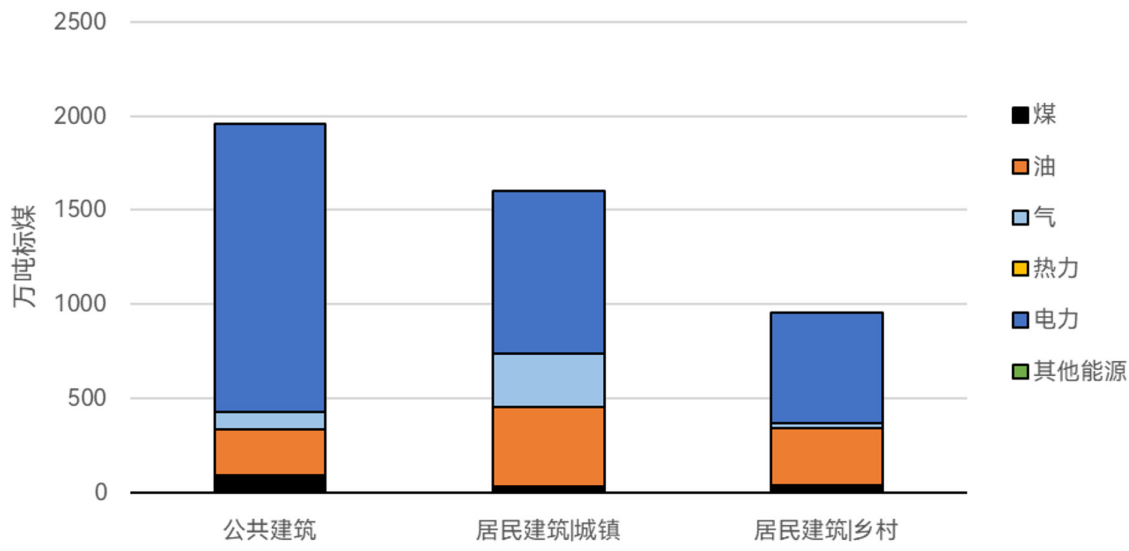
图 27 各情景建筑部门 GHG 排放变化趋势



· 能源消费

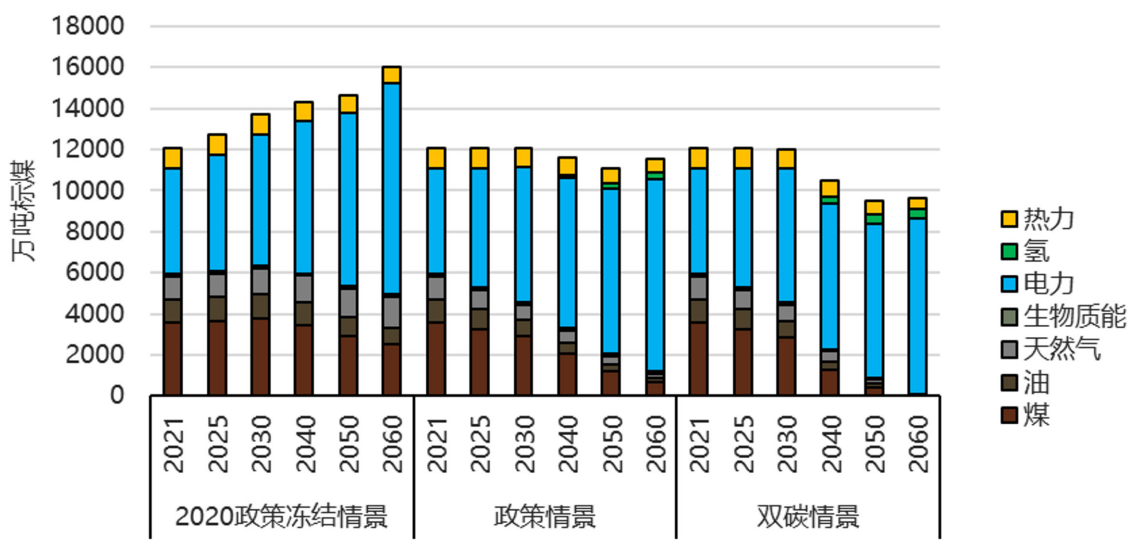
从不同建筑类型来看，2020 年，公共建筑的能源消费占比最大，约为建筑部门的 44%，城镇住宅约为 37%，乡村住宅约为 19%。由于公共建筑用能结构中电气化水平较高，二氧化碳排放占比仅为 31%，低于城镇住宅的 45%，乡村住宅二氧化碳排放约占 24%。

图 28 2020 年广东建筑部门用能源消费结构



双碳情景下，由于电器能效提升、超低能耗建筑和近零能耗建筑标准的推行、大规模的既有建筑节能翻新改造等原因，建筑部门能源消费 2035 年左右达到峰值后明显下降。

图 29 各情景建筑部门用能变化趋势



从用能结构来看，双碳情景下，电力在用能结构中占比相较于政策情景明显提升。在政策情景下，建筑部门电气化率在 2030 年达到 76% 左右。在双碳情景下，电气化率在 2030 年达到 78% 左右，并开始快速上升，在 2040 年以后达到 90% 以上，2060 年基本全面电气化，随着电力部门排放同时下降，建筑部门直接与间接排放均逐渐降低到近零水平。

3.3.4 交通部门

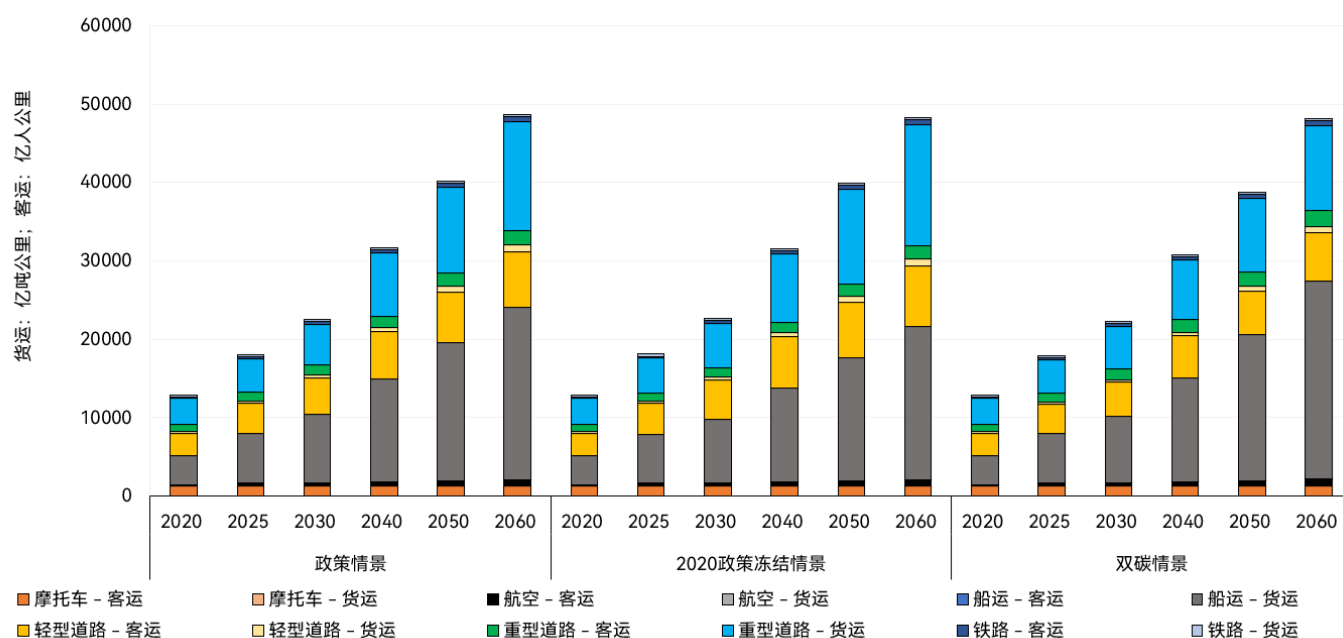
广东交通部门低碳转型对广东双碳目标实现将发挥重要作用。目前广东省交通部门绿色低碳发展处于全国前列，但未来交通运输需求仍会继续增加，减排压力不容忽视。广东省作为交通强国先行示范省，应锚定率先实现碳达峰和碳中和的目标，加快推进交通电动化、交通结构优化、提高燃油经济性、氢能交通等相关政策部署和实施力度。

· 发展趋势预测

广东省公路客运周转量在 2017 年达到峰值后开始下降，铁路周转量明显提高，航空提升更快。在广东货运周转量规模以水运为主，过去 20 年民航货运周转量平均增速较快，其次为水路、公路和管道，铁路保持波动并未出现明显变化趋势。

根据模型预测，在双碳情景下，在客运中，轻型道路交通周转量将保持快速上升至 2060 年，重型道路交通增速相对较慢但保持增长态势，摩托车周转量呈下降态势，航运和船运基数较低，保持增长趋势。货运中，由于需求增长，以及“公转水、公转铁”政策影响，船运呈现大幅增长趋势，重型道路周转量稳定增长，铁路和航空基本保持稳定。

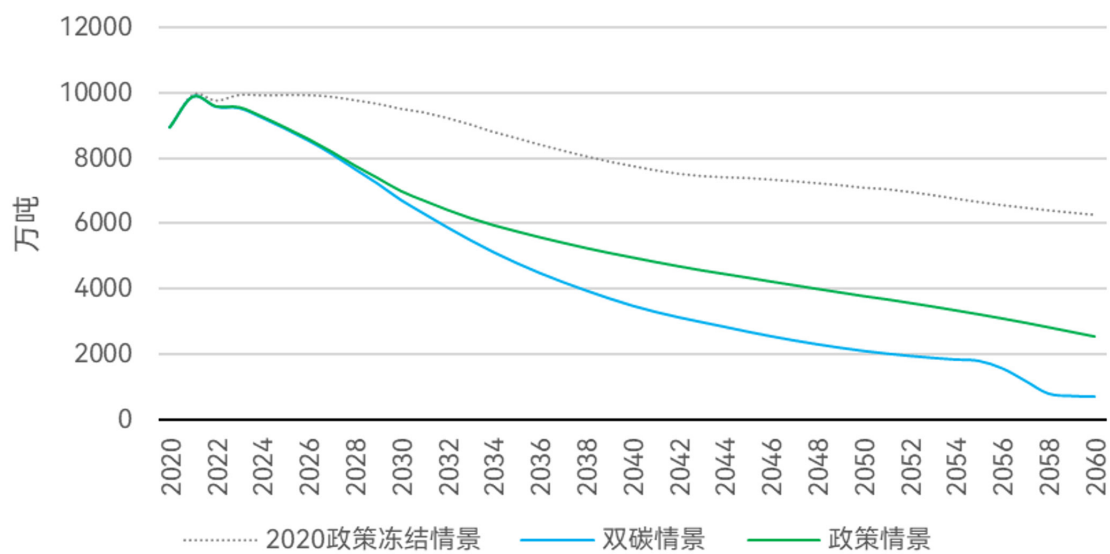
图 30 各情景周转量变化趋势



· 排放趋势

如图所示，在两个政策情景中，在新能源车等零排放交通工具渗透率快速提升、燃油经济性提升等政策作用下，广东省交通部门能源相关二氧化碳排放已进入达峰波动期，并从 2025 年左右开始稳定下降。政策情景下，2060 年交通部门二氧化碳排放下降到 2500 万吨左右。在双碳情景下，更高的零排放交通工具渗透率将推动排放以更快速度下降，2055 年后加强低碳燃料替代，进一步推动排放降低，2060 年交通部门二氧化碳排放下降到 700 万吨左右。

图 31 各情景下交通部门燃料相关二氧化碳排放

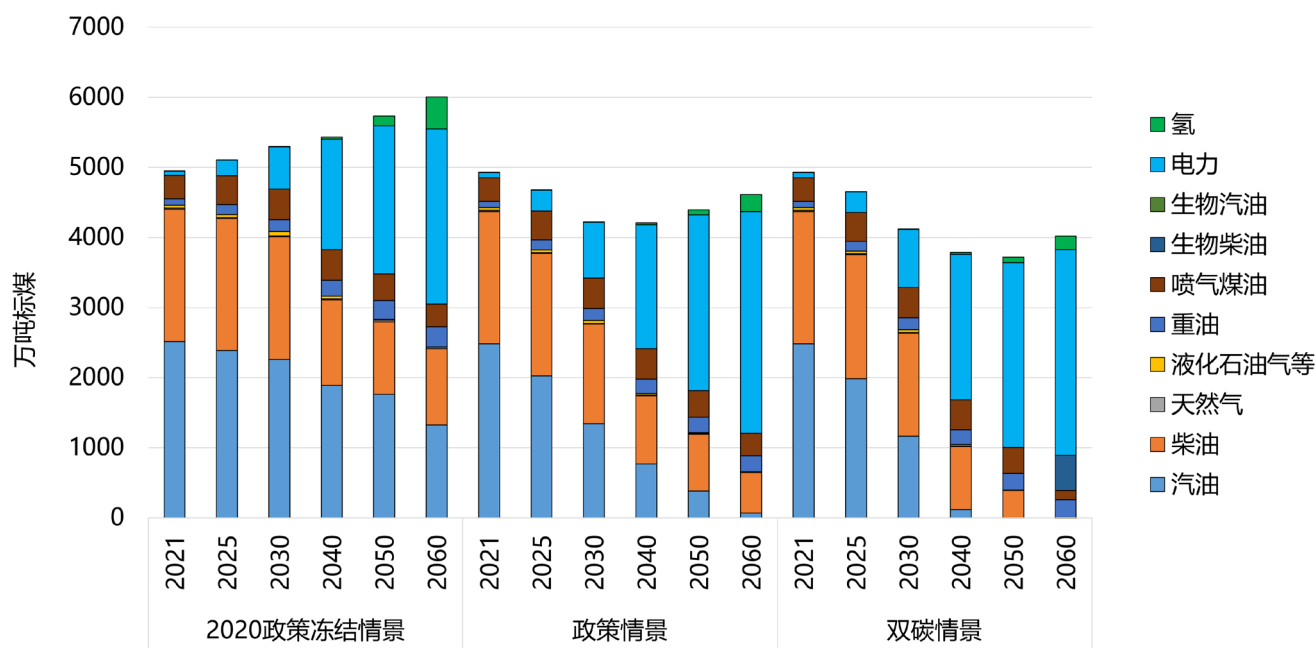


· 能源消费

在政策和双碳情景下，广东省交通部门能源消费均存在下降后反弹的情况，基本保持在 4000 至 5000 万吨标煤消费水平。

从结构来看，在政策情景下，从 2020 年到 2060 年，汽油柴油占比大幅下降，分别达到 2% 和 12% 左右，电力占比提升为 69%，氢占比达到 5%。在双碳情景下，不考虑航空领域能源消费，2060 年燃料消费结构以电力为主，占 74%，汽油柴油占比降低到 0%，氢能占比达到 5%，剩余燃料主要为生物柴油或其他零碳燃料。

图 32 各情景交通部门能源消费结构



第四章

广东省碳中和实现路径及 社会经济影响

4.1 双碳情景下主要低碳发展目标

为实现碳中和的长期目标，广东省需要保证关键指标在关键时间点的完成进度，采取相应措施以保证低碳转型按计划推进。双碳情景结果显示，广东省单位 GDP 碳强度到 2030 年相对于 2020 年下降率约为 35%，2035 年相对于 2020 年下降率约为 62%。

随着我国基于碳排放总量和碳排放强度的“碳双控”体系建立，从 2030 年开始对碳排放进行检测与评估。双碳情景下，2020 年广东省二氧化碳排放量为 6.4 亿吨左右（考虑跨省调入调出电的间接排放）；2030 年前按时达峰后，为达到净零排放，2035 年排放需降至 5 亿吨水平，到 2060 年二氧化碳排放量剩余 3150 万吨左右。2020 年广东省温室气体排放量约为 7.3 亿吨，2035 年需降至 6.5 亿吨左右，并逐渐加强控制含氟气体、甲烷、氧化亚氮等非二氧化碳温室气体排放，大规模 CCUS 部署，考虑碳汇后 2060 年基本达到净零水平。

2020 年广东省非化石能源消费占比为 28%，双碳情景下 2030 年提升至 36.8%，2035 年应达到 42%，到 2060 年要占到 74%。发电量结构中，非化石发电量占比 2030 年需升至 41%，2035 年达到 46%，到 2060 年达到 75%。

表 6 双碳情景主要政策指标表现

指标	2020	2030	2035	2060
单位 GDP 碳强度 (tCO ₂ / 万元 GDP, 2005 不变价)	0.8	0.54	0.3	0.08
二氧化碳碳排放量 (亿吨)	6.4	6.6	5.0	0.3
温室气体排放量 (亿吨 CO ₂ e)	7.3	8.1	6.4	0.9
非化石能源消费占比	28%	37%	42%	74%
非化石发电量占比	34%	41%	46%	75%

4.2 经济社会影响

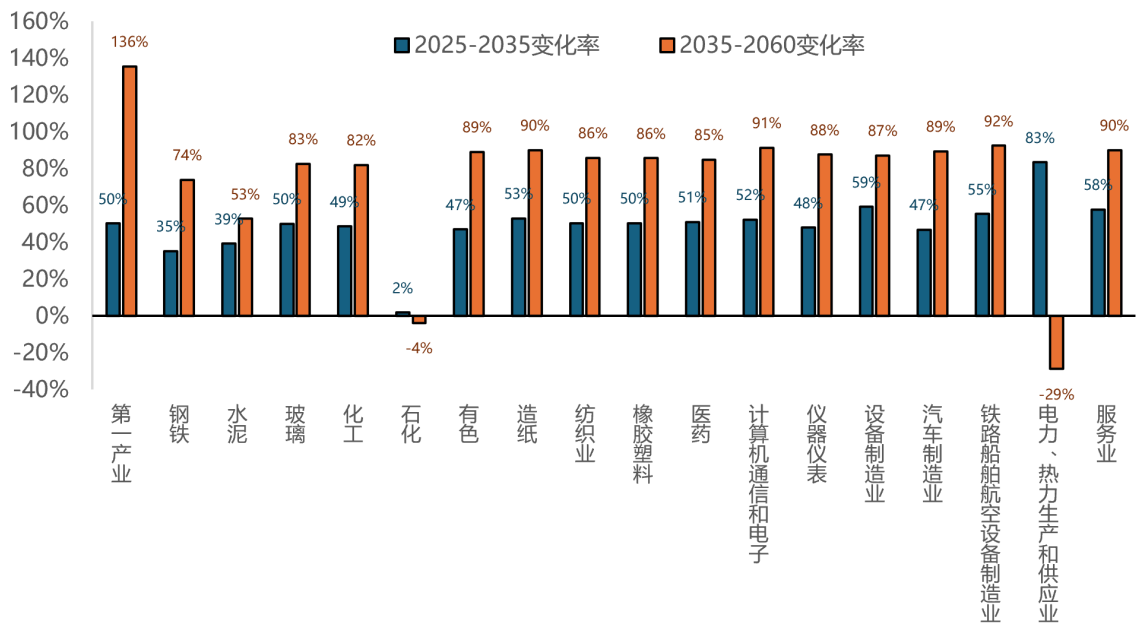
在广东省现有产业战略布局与“双碳”目标下，绿色低碳与技术驱动成为明显趋势，新兴产业呈现显著增长趋势，传统高耗能行业增速相对较慢，广东省由传统产业逐渐向低碳、技术创新型产业转型。

双碳情景下，传统高耗能行业中，钢铁、水泥在 2035 年增加值相对于 2025 年增幅分别约为 35% 和 39%，2060 年相对 2025 年增幅分别为 74% 和 53%，明显低于新兴产业增速。化工在中长期内仍将保持相对较高增速，2025-2035 年增加 49%，2035-2060 年增加 82%。

新兴产业均保持较快增速，到 2035 年增加幅度为 2025 年的 47%~59%，2035 年到 2060 年增幅在 85%~92%。其中船舶等交通运输设备制造、设备制造业、计算机通信和电子的从 2025 到 2060 年累积增幅最大，分别高达 199%，198%，192%。

从 2025 到 2035 年，服务业增加值增长 58%，到 2060 年达到 2025 年的约 3 倍。

图 33 双碳情景下各行业增加值变化



此外，作为工业大省，广东电力、钢铁、水泥、石化化工等行业碳排放较为密集。以碳中和为目标，未来CCUS将对难以电气化的领域提供近零排放方案，成为深度脱碳的“托底技术”。捕集的二氧化碳可在广东省工业各行业进行利用，例如利用二氧化碳提高石油采收率、制甲醇、制汽油、钢渣矿化等^[15]。随着碳价提升和CCUS技术成本的下降，未来CCUS的经济性将逐步体现。双碳情景下，2025年到2060年电力行业CCS投资需求达到3.39万亿元左右。

在优先电能替代后，广东省氢冶金、氢能交通工具推广也是实现碳中和的重要路径。《广东省加快氢能产业创新发展的意见》中提出到2025年，年供氢能力达到10万吨。在双碳情景下，广东省氢能需求约为540万吨标煤，交通氢能需求约为190万吨标煤，未来可再生制氢提升潜力较大。

4.3 政策路径及减排贡献

双碳情景结果显示，广东在碳达峰前后可关注的政策侧重点有所不同。发展本地非化石电力、工业电气化、建筑节能、工业能效标准提升、增加跨省调入清洁电力、提高零排放交通工具渗透率、碳市场扩容和碳价合理提升、提高交通燃油经济性将在达峰前有较为明显的减排作用。在达峰后，要更加关注工业的电气化进一步提升和氢能替代、尽早对含氟气体进行控制、进一步提高建筑和交通的电气化水平、并开始在电力和工业领域为无法脱碳的设备配备CCS。

图 34 2030 年前达峰重点政策 (CO₂, 双碳情景 2020-2030 累计减排潜力)

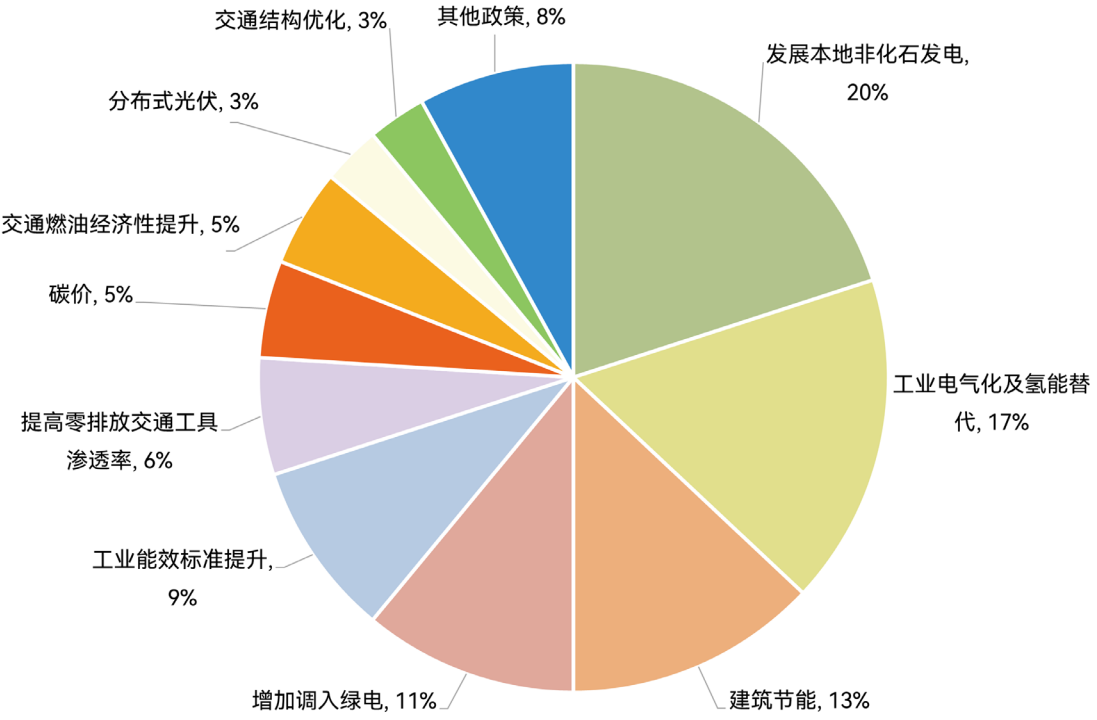


图 35 碳中和重点政策 (GHG, 双碳情景 2020-2060 累计减排潜力)

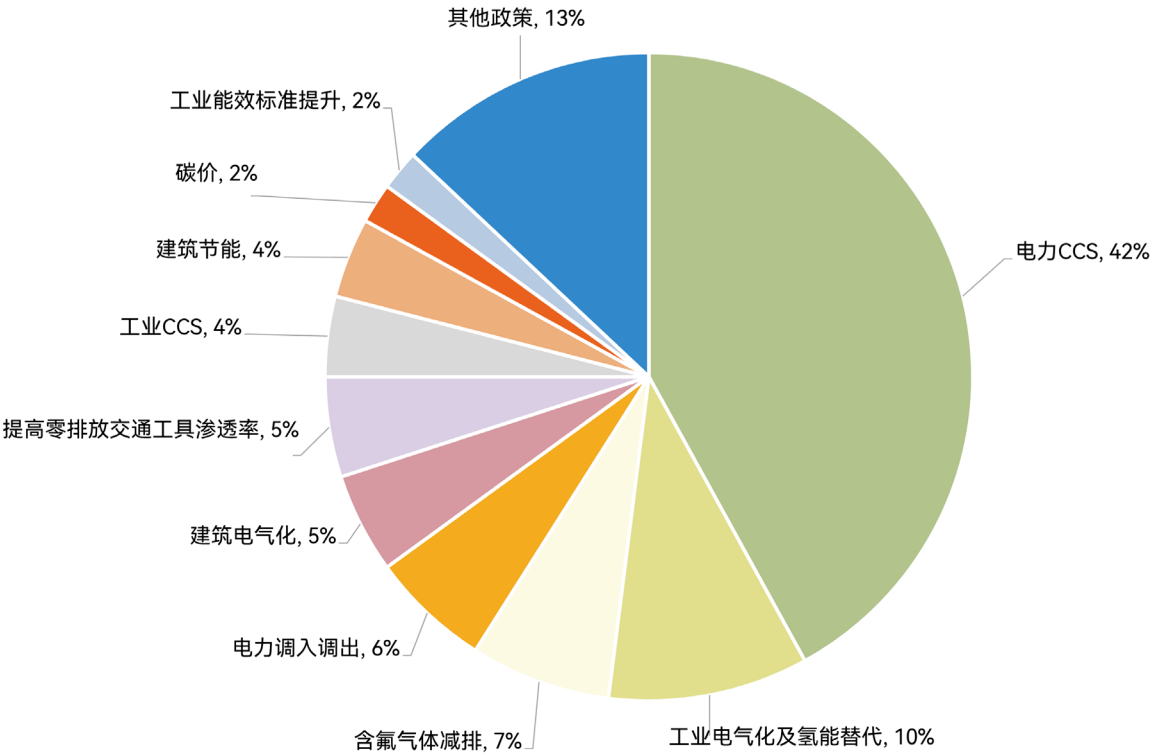
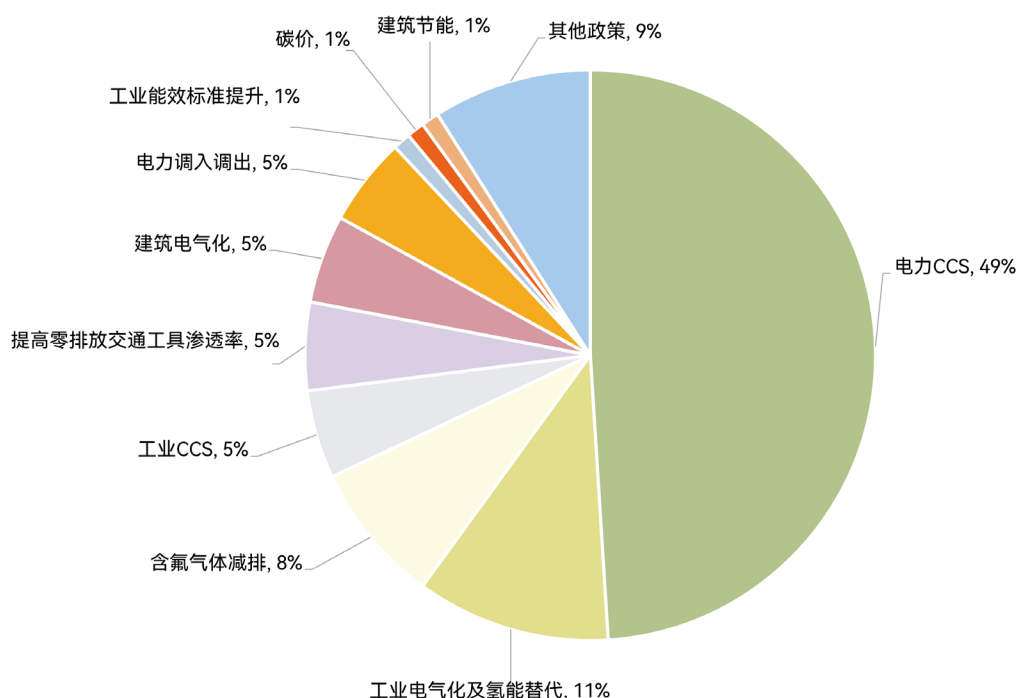


图 36 碳中和重点政策（GHG，双碳情景 2030-2060 累计减排潜力）



4.3.1 大幅提高可再生能源发电占比，提高绿电自给水平

在电力部门，为实现碳中和目标，化石能源发电需要稳步退出，同时新增电力需求缺口将由清洁电力填补。尽管广东省水力资源开发已接近饱和，海上风电和光伏等可再生能源的大规模利用还有较大的发展潜力。建设更多可再生电力也可提高广东省能源自给能力，降低依赖外部化石能源供应和调入电力带来的不确定性。

· 严格控制火电发展

“十三五”期间，广东省煤炭消费控制在 1.65 亿吨以内，淘汰落后火电机组约 400 万千瓦，并全面推进 10 万千瓦及以上燃煤机组的超低排放和节能改造，煤炭清洁高效利用水平进一步提升。

为了实现碳达峰，广东省需要严格控制煤电发展。短中期内，在非化石能源大规模提供电力之前，煤电机组仍会起到托底保障作用。对于存量煤电机组，需要推进节能降碳改造、灵活性改造、供热改造，提高煤电清洁高效灵活利用水平。同时，有序关停服役期满老旧煤电机组，长期内逐步降低煤电占比。为实现电力部门净零排放，需要加速淘汰现存煤电机组，更快增加清洁电力的比重。

一定规模的天然气发电增长将有助于广东可再生能源的消纳和电网韧性建设，但是需严格控制发展规模。双碳路径下，2060 年天然气发电装机量约为 72.6 吉瓦。此外，所有剩余火电在 2045 年后开始逐渐全面配备 CCUS，达到净零排放，从成本角度考虑，应该合理规划中长期需要的火电规模。

· 大力发展本地可再生能源电力

广东拥有 4114 公里海岸线和 41.93 万平方公里辽阔海域，海上风能资源丰富。综合考虑建设条件、产业基地配套和项目经济性等因素，全省规划海上风电总装机容量 6685 万千瓦。¹⁰

广东省太阳能资源较丰富，粤东西北地区土地资源相对丰富，可用于建设地面光伏电站。据调查估计，粤东西北地区可光伏发电装机潜力容量约 180 万千瓦。随着全省建筑面积的不断增长，每年新增建筑屋顶光伏发电装机容量可达 30 万千瓦¹¹。

¹⁰ 《广东省海上风电发展规划（2017-2030 年）（修编）》

¹¹ 《广东省太阳能光伏发电发展规划（2014-2020 年）》

根据本研究结果,在不大规模新建核电的情况下,广东省实现碳中和需要大规模风电和分布式光伏的开发利用:两者在 2050 年分别占包括分布式在内总发电量的 24%。双碳情景下,在调峰和储能设施充足的情况下,2050 年水电与可再生能源发电量合计可达到总发电量的 57%。

· 发展电网灵活性资源，提升电力供应安全性

由于新能源发电出力的不稳定性以及包含大量水力发电的“西电东送”电力较强的季节性波动,为实现双碳目标,广东省亟待通过更多调峰电源、储能设施、以及更高的需求侧响应能力等来解决更大比例的间歇性电源带来的调峰挑战,提高用电高峰时段及整体电力供应的安全和稳定性。

2021 年广东省有抽水蓄能电站约 798 万千瓦。广东省“十四五”时期计划新增抽水蓄能电站装机容量 240 万千瓦。截至 2024 年,全省新型储能装机规模达 350 万千瓦,同比增长 114%。

要实现碳达峰和碳中和,广东省需加快建设抽水蓄能电站,并建设更多电源侧、电网侧、用户侧等储能设施:建设海上风电和光伏配套储能促进可再生能源的消纳和利用;通过用户侧储能促进削峰填谷,电负荷低谷时段消纳富裕电力,用电高峰时发电,减少电网调峰压力;建设独立调频储能电站等项目提供调频调压、应急备用等辅助服务,进一步提高电网的供电可靠性和供电质量。

4.3.2 提高工业部门电气化水平，推广氢能替代

广东省工业能源消费结构相对清洁低碳,能效水平在国内处于领先水平。但以实现净零排放为目标,广东省应进一步加大力度改善工业部门的能源结构。将工业部门能源消费中的煤炭消费占比从 2020 年的 30% 左右降低至 2030 年的 23%,到 2060 年基本没有煤炭消费。同时,工业部门的电气化率水平从 2020 年 35% 逐步提升到 2060 年 79% 左右。

工业流程中的电气化率提升,不仅降低整体能耗,还能在产能、流程可控度、灵活性等方面产生额外收益。开发工业园区可再生能源潜力,推广工业建筑物屋顶光伏利用,建设光、储、充物流综合能源体系等。

同时,氢能对于中高温热源替代也至关重要。广东省氢能产业总产值已超百亿元,位居全国第一,而《广东省能源发展“十四五”规划》也提出要“打造氢能产业发展高地”。利用现有氢能产业链优势,在工业部门尤其是钢铁、水泥、化工等高耗能行业利用氢能代替难以电气化的产能,双碳路径下,到 2060 年达到工业能源消费中的 5% 左右,有效帮助广东省工业部门脱碳。

如图 34 所示,能效提升也在短 - 中期内具有较大的减排潜力。传统高耗能行业中,广东省非金属矿物制品业(水泥、玻璃等)在能源消费中的占比高于全国平均水平,此外,在新兴产业中,电子设备与电气机械行业占比远高于全国平均水平。随着广东省战略新型产业的不断发展,在能源结构低碳化同时,还应密切关注这些行业的能效提升。到 2060 年,工业部门各行业相对冻结情景能源消费减少 29%~55%,详细情况如下表所示。

表 7 双碳情景下工业各行业相对冻结情景节能量

行业	2030 年	2060 年
造纸	6%	36%
化工	5%	42%
水泥	5%	30%
钢铁	8%	55%
有色	8%	40%
其他行业	4%	29%

4.3.3 积极开展新能源交通工具研发、示范和推广应用

交通运输行业是广东省落实碳达峰碳中和目标的重要领域，绿色低碳发展潜能仍未充分释放。为实现广东省“双碳”目标，交通运输行业应积极落实绿色低碳发展理念，优化运输结构和运输工具，大幅降低运输能耗和二氧化碳排放。

在公路、水运、铁路和航空等领域推进新能源交通工具广泛应用，普及纯电动汽车、纯电动公交、LNG 动力船等，加大氢能公交、重型货运和氢能船舶的研发示范力度，发展天然气、生物柴油、生物汽油等清洁交通运输工具。到 2040 年，轻型汽车应实现 95% 的电动化，重型客运和货运中 56% 为电力驱动；到 2050 年，公路重型客运实现 100% 的电动和氢能，重型货运中 84% 为电力驱动、3% 为氢能驱动。铁路方面，继续鼓励发展和提高电动车应用，特别是进一步提高货运铁路电气化水平。在水运方面，LNG 动力船和氢能船舶的应用比例提高，到 2050 年达到 2.3%。在航空领域积极推广生物质替代燃料的研发和应用。

广东省应进一步加大新能源汽车补贴力度以及相关支撑措施，提高新燃料替代比例。到 2035 年和 2050 年，轻型客运纯电动汽车渗透率分别达到 34% 和 47.5%。加大公共充电基础设施建设，将桩车比从目前的 1: 4 提高到 1: 1.5，10 万人均充电桩占有量从目前的 116 个左右提高到 400 多个。

4.3.4 在提高建筑节能水平的基础上，大力推广建筑电气化

发展节能低碳建筑是广东省提高建筑品质的重要工作内容。为实现碳中和目标，广东省和各市需要逐步因地制宜地提高新建绿色建筑节能强制性标准水平，进一步提高建筑围护结构等部位的节能性能要求。鼓励和支持各地因地制宜，制定和执行更高要求的绿色建筑技术标准，推动粤港澳大湾区率先实施更高的建筑节能标准，大力推广岭南特色超低能耗建筑。同时加快推进对现有公共和居民建筑进行节能改造。

此外，多方面促进政策和绿色建筑节能标准的具体落实。可推动各地将绿色建筑等级要求纳入建设用地规划条件，政府投资项目积极采用超低能耗建筑标准建设。加强宣传教育与政策引导，鼓励居民采用高效家电等，通过编制农房建设绿色技术导则及图集引导农民自建住宅时采用更加绿色低碳的建设方案。

实现“双碳”目标，需要加强政策对建筑电气化发展的引导和激励，特别是推动商用民用热水、炊事用能转为使用电力；在大型公共设施应用空气源热泵、电蓄冷空调等，并制定更高的用能设备能效标准，促进高效电气化技术与设备研发。到 2030 年，建筑电气化率达到 79%，到 2060 年电气化率达到 97%¹²。

4.3.5 加强对非二氧化碳温室气体控制

广东省非二氧化碳温室气体中的甲烷和含氟气体体量较大，对广东省实现碳中和具有重要影响。在 2021 年的联合国气候公约第 26 次缔约方大会上，中美两国发布《关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》，提出在控制甲烷排放推进清洁能源开展合作，同时在行业脱碳、减排标准以及 CCUS 方面开展技术合作。随着广东省应对气候变化工作的进一步深入以及中美在甲烷减排方面的进一步合作，广东应逐步强化对甲烷等非二氧化碳温室气体排放的管控，研究制定非二氧化碳类温室气体总量控制方案，分阶段明确非二氧化碳类温室气体减排目标和监管范围，并确保政策目标的落实。

同时，广东省应继续切实履约针对含氟气体减排的《基加利修正案》，继续淘汰不符合要求的臭氧层消耗物质，争取先于国家目标完成相关温室气体的削减。降低含氟气体的措施在促进节能减排、缓解气候变化的同时，间接上也能促进广东省工业结构的低碳化绿色化和国际化水平。

¹² 采用热电当量法计算

第五章

总结及建议

广东省作为我国经济强省和低碳转型的先行者，具备按时或率先实现“双碳”目标的经济、技术和政策基础。通过本研究的系统分析，结合 EPS 模型的模拟结果，广东省在低碳转型过程中需重点关注以下方面：

- 1. 加速能源结构调整：**提高可再生能源发电比例，特别是海上风电和分布式光伏的开发与利用。同时，严格控制煤电发展，逐步淘汰落后煤电机组，推动电力系统向低碳、灵活方向转型。
- 2. 推动工业深度脱碳：**进一步优化工业结构，提升能效标准，推动电气化和氢能替代。在高耗能行业（如钢铁、水泥、化工）中，加快低碳技术的应用和推广，确保工业部门在 2060 年实现净零排放。
- 3. 加强建筑节能与电气化：**提高新建建筑节能标准，推进既有建筑节能改造，推广超低能耗建筑和近零能耗建筑技术。同时，推动建筑用能向高比例电力和可再生能源转型，减少直接碳排放。
- 4. 加速交通领域电动化和氢能化：**加大新能源汽车推广力度，完善充电基础设施建设，提高公路、水运、铁路和航空领域的电气化水平。在重型道路运输、水运、航运领域，积极推进氢能等新能源交通工具的技术研发和应用。
- 5. 强化非二氧化碳温室气体减排：**加强对甲烷、含氟气体等非二氧化碳温室气体的管控，制定总量控制目标和分阶段减排方案，确保在 2060 年实现温室气体净零排放。
- 6. 完善政策与市场机制：**进一步健全碳交易市场、电力市场和绿色金融体系，通过市场化手段推动低碳技术创新和产业升级。同时，加强政策协同，确保各部门低碳转型目标的顺利实现。
- 7. 加强碳汇建设：**巩固和扩大湿地、森林等生态系统碳汇功能，提升自然碳汇能力，为实现碳中和目标提供重要支撑。



附录 1：广东省 1+N 及“十四五”低碳发展政策一览

文件名称	发布年份	一级目录
广东省城乡建设领域碳达峰实施方案	2024	1 加 N 体系, 建筑
广东省虚拟电厂参与电力市场交易实施方案	2024	电力
关于调整新能源发电项目配置储能有关事项的通知	2024	电力
广东省甲烷排放控制工作方案	2024	非二温室气体
广东省培育发展未来绿色低碳产业集群行动计划	2024	工业
广东省推动大规模设备更新和消费品以旧换新实施方案	2024	工业, 绿色消费
广东省推进建筑和市政基础设施设备更新工作方案	2024	建筑
广东省广湛氢能高速示范项目实施方案	2024	交通
广东省 2023 年度碳排放配额分配方案	2024	绿色经济
广东省推动能源领域大规模设备更新工作方案	2024	能源
广东省推进分布式光伏高质量发展行动方案	2024	能源
广东省碳达峰实施方案	2023	1 加 N 体系, 跨领域行动
广东省促进新型储能电站发展若干措施	2023	电力
关于加快推动绿色建筑产业与绿色金融协同发展的通知	2023	建筑
广东省绿色港口行动计划（2023—2025 年）	2023	交通
广东省减污降碳协同增效实施方案	2023	跨领域行动
广东省绿色高效制冷行动计划（2023-2025）	2023	跨领域行动
广东省碳交易支持碳达峰碳中和实施方案（2023-2030 年）	2023	绿色经济
广东省加快氢能产业创新发展的意见	2023	能源
关于加强新型储能电站规范管理的通知	2023	能源
广东省推进能源高质量发展实施方案	2023	能源
关于加快推动新型储能产品高质量发展的若干措施	2023	能源
广东省推动新型储能产业高质量发展的指导意见	2023	能源
广东省加快农村能源转型发展助力乡村振兴实施方案	2023	农林 / 土地利用, 能源
广东省城镇生活污水处理“十四五”规划	2022	废弃物
广东省建筑节能与绿色建筑发展“十四五”规划	2022	建筑
广东省推进冷链物流高质量发展“十四五”实施方案	2022	交通, 非二温室气体
广东省循环经济发展实施方案（2022-2025 年）	2022	跨领域行动
广东省循环经济发展实施方案（2022-2025 年）	2022	跨领域行动
广东省“十四五”节能减排实施方案	2022	跨领域行动
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）	2022	跨领域行动
广东省应对气候变化“十四五”专项规划	2022	跨领域行动
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	2022	跨领域行动, 1 加 N 体系
广东省发展绿色金融支持碳达峰行动的实施方案	2022	跨领域行动, 1 加 N 体系
广东省 2022 年度碳排放配额分配方案	2022	绿色经济
广东省生态环境厅关于印发《广东省碳普惠交易管理办法》的通知	2022	绿色经济
广东省做好 2022 年全国碳排放权交易市场企业温室气体排放报告相关工作的通知	2022	绿色经济
广东省矿产资源总体规划（2021 ~ 2025 年）	2022	能源
广东省“两高”项目管理目录（2022 年版）	2022	能源
广东省能源发展“十四五”规划	2022	能源

文件名称	发布年份	一级目录
广东省生态环境厅关于印发《广东省林业碳汇碳普惠方法学（2022 年修订版）》等 5 个方法学的通知	2022	农林 / 土地利用
广东省制造业高质量发展“十四五”规划	2021	产业结构调整，工业
广东省“十四五”时期深化价格机制改革实施方案	2021	电力
关于印发促进海上风电有序开发和相关产业可持续发展实施方案的通知	2021	电力
广东省生活垃圾处理“十四五”规划	2021	废弃物
广东省推进“无废城市”建设试点工作方案	2021	废弃物
广东省生活垃圾处理“十四五”规划	2021	废弃物
广东省生态环境保护“十四五”规划	2021	环境保护
广东省生态文明建设“十四五”规划	2021	环境保护
广东省绿色建筑创建行动实施方案（2021-2023）	2021	建筑
广东省建筑业“十四五”发展规划	2021	建筑
广东省电动汽车充电基础设施发展“十四五”规划	2021	交通
广东省综合运输服务“十四五”发展规划	2021	交通
广东省综合交通运输体系“十四五”发展规划	2021	交通
广东省水运“十四五”发展规划	2021	交通
关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施意见	2021	跨领域行动
广东省 2021 年能耗双控工作方案	2021	跨领域行动
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	跨领域行动
广东省人民政府关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施意见	2021	跨领域行动
广东省新型城镇化规划（2021—2035 年）	2021	跨领域行动
广东省海洋经济发展“十四五”规划	2021	跨领域行动
广东省 2021 年度碳排放配额分配方案	2021	绿色经济
广东省 2021 年绿色种养循环农业试点省级实施方案	2021	农林 / 土地利用
广东省林业保护发展“十四五”规划	2021	农林 / 土地利用

附录 2：情景设置

部门	政策	政策情景	双碳情景
交通 ^[16, 17]	电动车新车销售占比	LDVs: 客运 – 2025: 56%, 2030: 66%, 2060: 100% 货运 – 2030: 33%, 2060: 100% HDVs: 客运 – 2030: 100% 货运 – 2035: 50%, 2060: 100%	LDVs: 客运 – 2025: 56%, 2035: 100% 货运 – 2030: 33%, 2040: 100% HDVs: 客运 – 2030: 100% 货运 – 2045: 100%
	提高燃油经济性	LDVs: 相对于 BAU ¹⁶ 客运 – 2030 年相较 BAU 下降 69% 货运 – 2030 年相较 BAU 下降 42% HDVs: 相对于 BAU 货运 – 2030 年相较 BAU 下降 38%	LDVs: 相对于 BAU 客运 – 2030 年相较 BAU 下降 69% 货运 – 2030 年相较 BAU 下降 42% HDVs: 相对于 BAU 货运 – 2030 年相较 BAU 下降 38%
	优化交通结构	个人出行（小轿车）– 2030 年周转量相较参考情景减少 7.5% 道路货运 – 2030 年周转量相较参考情景减少 10%	个人出行（小轿车）– 2050 年周转量相较参考情景减少 20% 道路货运 – 2050 年周转量相较参考情景减少 30%，部分转为铁路或水运
建筑 ^[18–20]	建筑节能	2025 到 2045 年新建建筑节能标准每十年提升 20%~30%	在政策情景基础上，到 2035 年约 20% 新建建筑达到超低能耗及近零能耗建筑标准，到 2045 年这一比例达到 100%
	建筑电气化	建筑部门电气化率 2030 年达到 77%，2060 年基本完全电气化； 新建居民建筑供热及炊事 2030 年 100% 电气化， 新建商业建筑 2060 年达到 100% 电气化， 新建农村住宅 2060 年达到 100% 电气化	建筑部门电气化率 2030 年达到 77%，2060 年基本完全电气化； 2030 年 新建居民建筑供热及炊事 100% 电气化， 新建商业建筑 100% 电气化， 新建农村住宅 100% 电气化
	既有建筑改造	每年 1%	每年 2%
	分布式光伏用能占比	2030 年分布式光伏在全社会用电量占比达到 2.3%	2030 年分布式光伏在全社会用电量占比达到 2.3%
工业 ^[21–24]	工业能效提升	相较 BAU 2030 年能耗降低 造纸 6% 化工 5% 水泥 5% 钢铁 8% 有色 8% 其他行业 4%	相较 BAU 2030 年和 2060 年能耗降低 造纸 6%，36% 化工 5%，42% 水泥 5%，30% 钢铁 8%，55% 有色 8%，40% 其他行业 4%，29%
	工业电气化	2050 年达到 72% 2060 年达到 80%（不包含原料）	2050 年达到 78% 2060 年达到 87%（不包含原料）
	工业氢能应用	到 2060 年，钢铁行业 81% 的中高温热转为由氢能提供	以下行业中部分高温热转为由氢能提供 水泥：2030：0，2060：73%； 化工、石化、炼焦：2030：0，2060：19%； 钢铁：2030：0，2060：81%； 橡胶和塑料：2030：0，2060：53%
	减少产品需求（循环经济）	N/A	2050 年相较参考情景水泥、钢铁需求分别减少 37% 和 20%
	工业过程 CCS	N/A	从 2030 年起开始实施，化工、水泥及钢铁行业过程 CO2 在 2060 年通过 CCS 减排 50%
	水泥熟料替代	2050 年水泥熟料替代比例达到 30%	2050 年水泥熟料替代比例达到 60%

¹⁶ 在本研究中 BAU 即为 2020 政策冻结情景。

部门	政策	政策情景	双碳情景
非二氧化碳 ^[25-29]	含氟气体减排措施	2060 年通过替代减少含氟气体排放潜力达到 100% 2060 年通过销毁减少含氟气体排放潜力达到 56%	2060 年通过替代减少含氟气体排放潜力达到 100% 2060 年通过销毁减少含氟气体排放潜力达到 73%
	农业畜禽管理	2025 年畜禽粪污利用率大于 80%	2060 年畜禽粪污利用率达到 100%
	膳食结构调整	2050 年肉制品占比减少 42%	2050 年肉制品占比减少 69%
	农田管理措施（甲烷及氧化亚氮）	通过减少氮肥使用、改善耕种方式及使用畜禽饲料添加剂等方式减少甲烷和氧化亚氮排放	通过减少氮肥使用、改善耕种方式及使用畜禽饲料添加剂等方式减少甲烷和氧化亚氮排放
	氧化亚氮减排措施	工业 - 2060 年通过措施，氧化亚氮排放减少 50%	工业 - 通过安装氧化亚氮减排设施，减少 100% 氧化亚氮排放
电力 ^[22, 30-32]	控制煤电装机	“十五五”后煤电装机总量不再增加	不再增加煤电装机总量，每年额外减少 1500 兆瓦煤电
	可再生能源发电量占比本地发电量比重	2030 年达到 27% 左右	2030 年达到 27% 左右，2060 年 76% 左右
	发展储能	2030 年大于 4 吉瓦	2060 年大于 9 吉瓦
	需求响应	2030 年需求响应达到最大用电负荷 5%	2060 年 1.5 吉瓦
	电厂配备 CCS	N/A	2030 年起实施，到 2045 年所有化石燃料火电厂 100% 配置 CCS
其他 ^[33]	碳价	2025 年工业部门纳入碳市场，2050 年碳价约 300 元，并有 30% 免费配额	工业部门尽快纳入碳市场，2025 年其他部门纳入碳市场，2050 年碳价约 239 元，并有 30% 免费配额
	碳汇	2060 年每年碳汇固碳量达到 1.7 亿吨左右	2060 年每年碳汇固碳量达到 1.7 亿吨左右

参考文献

[1] 绿色转型成效明显，广东单位 GDP 能耗仅为全国平均水平的 67%[EB/OL]. [2025-06-27]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1798950477879740053>.

[2] 边境佳 . 广东两会 | 2023 制造业成绩单出炉：新质生产力“粤味”十足 [EB/OL]. [2025-03-26]. <https://local.cctv.com/2024/01/25/ARTImZwKsyNXzJVjLGH9SD9E240125.shtml>.

[3] 广东省人民政府关于印发《广东省 2024—2025 年节能降碳行动方案》的通知 广东省人民政府门户网站 [EB/OL]. [2025-06-27]. https://www.gd.gov.cn/zwgk/wjk/qbwj/yf/content/post_4637336.html.

[4] 广东电力交易中心 . 2024 年广东电力市场年度报告 [R]. 2025.

[5] 广东省发展改革委 . 广东省现代化产业体系发展报告（2023—2024）[R/OL]. (2025-02). <https://drc.gd.gov.cn/attachment/0/571/571950/4663113.pdf>.

[6] 2022 年广东省绿色低碳交通发展综述 - 中华航运网 [EB/OL]. [2025-03-26]. https://info.chineseshipping.com.cn/cninfo/News/202302/t20230216_1374223.shtml.

[7] 腾讯网 . 去年广东新能源车卖了 75.6 万辆，大增近 8 成！深广佛最多 _ 腾讯新闻 [EB/OL]. (2023-03-17) [2025-03-26]. <https://news.qq.com/rain/a/20230317A06WJ700>.

[8] 广东省能源局 . 关于省政协十二届四次会议第 20210873 号提案答复的函 [EB/OL]. (2021-05-28)[2022-05-06]. http://drc.gd.gov.cn/snyj/bmgl/content/post_3297033.html.

[9] 2024 年 7 月我国公共充电桩数量同比增长 45.2% 其中交流充电桩占比 55.4%_ 观研报告网 [EB/OL]. [2025-03-26]. <https://www.chinabaogao.com/data/202409/726935.html>.

[10] 我省加快氢能产业创新发展 到 2027 年氢能产业规模将达 3000 亿元 广东省人民政府门户网站 [EB/OL]. [2025-03-26]. https://www.gd.gov.cn/gdywdt/bmdt/content/post_4278630.html.

[11] ENERGY INNOVATION. Energy Policy Simulator Documentation.[EB/OL]. <https://docs.energypolicy.solutions/>.

[12] 奚溪，杨鹂 . 能源政策模型（EPS）应用于区域“双碳”战略规划研究：入门工作手册 [R]. 绿色创新发展研究院，2023.

[13] 胡敏、李鑫迪、奚溪、杨鹂 . 中国中长期温室气体排放情景分析报告 [R]. 北京：绿色创新发展研究院，2024.

[14] 曾雪兰，黎炜驰，郭星玥 . 广东碳市场进展、挑战及趋势 [R]. 哈佛气候协议项目，2021.

[15] 广东南方碳捕集与封存产业中心，广东工业大学碳中和与绿色发展协同创新研究院，中国能建广东省电力设计研究院 . 广东省二氧化碳捕集利用运输与封存 规划研究报告（决策者摘要）[R]. 2022.

[16] 中国汽车工程学会，中国汽车技术研究中心有限公司 . 汽车产业绿色低碳发展路线图 1.0[Z/OL]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbys/qcgy/art/2023/art_d81533fcc5aa4748a68c7e232bf12a5e.html.

[17] 国家发展和改革委员会能源研究所课题组 . “十三五”及 2030 年交通部门节能目标研究 [R/OL]. (2017). <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-20170301-1-zh>.

[18] 住建部科技与产业化发展中心 . 建筑领域碳达峰碳中和实施路径研究 [M]. 中国建筑工业出版社，2021.

[19] 住建部 . 城乡建设领域碳达峰实施方案 [Z/OL]. (2022)[2024-06-24]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/13/content_5700752.htm.

-
- [20] 住 建 部 . “ 十 四 五 ” 建 筑 节 能 与 绿 色 建 筑 发 展 规 划 [Z/OL]. (2022). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/12/content_5678698.htm.
- [21] 清华大学气候变化与可持续发展研究院等 . 中国长期低碳发展战略与转型路径研究 [M]. 北京 : 中国环境出版集团 , 2021.
- [22] 科技 部 等 . 科技支撑碳达峰碳中和实施方案 (2022—2030 年) [Z/OL]. (2022-06). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm.
- [23] 工 业 和 信 息 化 部 等 . 工 业 能 效 提 升 行 动 计 划 [Z/OL]. (2022). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/29/content_5698410.htm.
- [24] LYNN PRICE, NINA KHANNA, NAN ZHOU, 等 . Reinventing Fire: China – the Role of Energy Efficiency in China’s Roadmap to 2050[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [25] 国家发展和改革委员会 . 关于推进污水资源化利用的指导意见 [Z/OL]. (2021-01-11). https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202101/t20210111_1264795.html.
- [26] 中国营养学会 . 中国居民膳食指南 2022[M]. 人民卫生出版社 , 2022.
- [27] YAO BO, KATERINE ROSS, JINGJING ZHU, 等 . Opportunities to Enhance Non-CO2 GHG mitigation in China[R/OL]. World Resources Institute, 2022. <https://wri.org.cn/sites/default/files/2022-01/opportunities-enhance-non-co2-ghg-mitigation-china-EN.pdf>.
- [28] 中华人民共和国国务院新闻办公室 . 中国的粮食安全 [M]. 人民出版社 , 2019.
- [29] 煤 层 气 (煤 矿 瓦 斯) 开 发 利 用 “ 十 三 五 ” 规 划 [Z/OL]. (2016-12-04). https://www.gov.cn/xinwen/2016-12/04/content_5142853.htm.
- [30] 国家能源局 . 国家能源局关于征求 2021 年可再生能源电力消纳责任权重和 2022—2030 年预期目标建议的函 [Z]. 2021.
- [31] 国家发展与改革委员会 , 能源局 . 关于加快推动新型储能发展的指导意见 [Z/OL]. (2021). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/24/content_5627088.htm.
- [32] 国务院 . 2030 年前碳达峰行动方案 [Z]. 2021.
- [33] SLATER, H., 王庶 , 黎瑞鑫 . 2022 年中国碳价调查报告 [R/OL]. 北京 : ICF, 2023[2024-06-24]. <https://www.cet.net.cn/storage/files/2022%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E7%A2%B3%E4%BB%B7%E8%B0%83%E6%9F%A5.pdf>.

关于绿色创新发展研究院

绿色创新发展研究院（Institute for Global Decarbonization Progress），简称：研究院（iGDP），是专注绿色低碳发展的战略咨询平台，2014 年成立于北京，旨在成为具领先专业素养和独立影响力的国际化智库。研究院根植我国地方绿色低碳实践，面向全球应对气候变化进程，为决策者、投资者和社区提供具有国际视野和前瞻思考的解决方案及公益性知识产品。

联系方式：

电话：86-10-8532 3096

邮箱：igdpoffice@igdp.cn

网站：www.igdp.cn

地址：中国北京市朝阳区秀水街 1 号建外外交公寓 6-2-62

