

深圳市碳排放达峰、空气质量达标、 经济高质量增长协同“三达”研究报告

**Achieving Triple Goals of Carbon Emission Peaking,
Air Quality Standard Attainment, and Economic Prosperity
at the City Level: The Shenzhen Case**

2019年8月

August, 2019



编写单位:

哈尔滨工业大学（深圳）
Harbin Institute of Technology (Shenzhen)

深圳市城市发展研究中心
Urban Development Research Center Shenzhen

深圳市环境科学研究院
Shenzhen Academy of Environmental Sciences

北京大学深圳研究生院
Peking University Shenzhen Graduate School

深圳市建筑科学研究院股份有限公司
Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd.

深圳市都市交通规划设计研究院有限公司
Shenzhen Urban Transport Planning & Design Institute

劳伦斯伯克利国家实验室中国能源组
Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL

资助单位:



能源基金会
Energy Foundation China

项目牵头人:



唐杰

深圳市原副市长，哈尔滨工业大学（深圳）教授，博士生导师

摘要

现阶段中国不仅处于打好污染防治战的攻坚期，还处于经济社会发展的关键转型期。严格控制碳排放强度，大幅削减主要大气污染物排放，推动经济社会和生态环境协同共进已经成为我国可持续发展亟需解决的问题。为此，近年来我国提出加强多污染物的协同控制，提升生态环境治理能力；在高质量发展中实现高水平保护、在高水平保护中促进高质量发展，从而实现人与自然和谐共生的现代化。在此背景下，本研究以城市为切入点，以深圳为案例，探究深圳通过转型升级、结构优化以及治理体系协同创新实现碳排放达峰、空气质量达标、经济高质量增长的三重目标，希望能够为我国其他城市、尤其是超大型城市推动可持续发展提供经验借鉴。

过去十年，深圳在经济高质量增长的同时实现了生态环境质量的明显改善，初步探索出了一条经济社会和生态环境协同共进的发展道路。EKC 实证检验和 LMDI 分解分析显示深圳的绿色能源发展战略和产业转型升级显著促进了碳排放和大气污染物排放减排，同时碳排放交易体系运行效果评价显示城市积极应对气候变化和日益增强的环境管制已经形成了“倒逼”机制，反作用于城市能源结构优化和产业转型升级。此外，城市碳排放和主要大气污染物排放表现出显著的同根同源性，交通、电力、制造业部门是两类排放共同的主要来源，分别贡献了城市碳排放和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染（本地源）的 65.1%、19.1%、3.4%和 52.0%、8.0%、15.0%，是未来实施协同治理的关键领域。

通过推进转型升级、结构优化以及创新协同治理，深圳能够实现碳排放达峰、空气质量达标、经济高质量增长的协同三达。基于 LEAP 和 CMAQ 为核心的数值模拟分析，协同治理情景下深圳将于 2020 年实现碳排放达峰，能源相关的主要大气污染物排放量也将显著下降。同时深圳市控制情景和深圳市与珠三角、珠三角外区域联合控制情景下，不同气象条件深圳均可实现 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度低于 25 微克/立方米的目标。2030 年，城市产业升级、能源和交通结构优化、气候变化和大气污染协同治理将取得更加显著的效果。大量以碳排放控制为目标的措施或技术能够同时大幅削减 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 、VOCs 等大气污染物排放，具有显著的协同减排效应（减排弹性系数多数位于 0.6-1.0 之间），对提升城市空气质量做出了明显贡献。与之相比较，大气污染治理措施和技术对碳排放减排也具有一定的协同效应，但不够显著。

气候变化与大气污染的协同治理能够降低总体减排成本，需求管理和结构调整相关的减排措施或技术协同减排效应最显著，应当优先实施。为低成本实现应对气候变化和空气质量改善目标，深圳迫切 need 要加强电力、交通、制造业和建筑部门碳排放和大气污染物排放的协同治理；“自下而上”的技术经济分析显示，需求管理、制造业升级、能源和交通结构调整措施的减排潜力最大，在考虑节能收益的情景下这类措施全生命周期的减排成本也较低，从而为实现“协同三达”提供了可选路径。虽然中长期来看转型升级和协同治理能够带来显著的环境效益并促进城市可持续发展，但该路径实施面临着高昂的初始投资成本（预计 2030 年约 7600 亿元），尤其是交通和建筑部门。为保障协同减排效应较强的措施或技术能够及时得到资金支持和推广应用，应在融资渠道和财政资金补贴上给予政策支持，进一步促进城市发展的清洁化、低碳化。

第一章： 低碳、蓝天与可持续发展

改革开放以来，中国经济社会发展取得了巨大成就，但快速工业化和城市化进程也导致了一系列生态环境问题，其中气候变化和大气污染尤为突出。一方面，我国是当前全球最大的温室气体排放国家，同时也是受气候变化不利影响最严重的国家之一。未来仅仅海平面上升就可能导致我国在每年损失 102 平方公里土地，一百多万人口将因此迁移。另一方面，我国还面临着十分严峻的大气污染问题。2016 年末京津冀、山东等地区发生了持续时长超过 200 小时的“跨年霾”事件，2017 年因长期暴露于大气环境污染而死亡的人数超过 120 万人¹，大气污染已成为影响居民身心健康和社会发展的严重问题。面临气候变化与大气污染的双重压力，同时考虑碳排放和大气污染物排放具有同源性、同步性和同介质等特征，我国《“十三五”控制温室气体排放工作方案》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》均提出探索多污染物协同控制。碳排放与大气污染物排放的协同治理为我国实现低碳与蓝天的双重目标提供了新途径，有助于提升我国生态环境治理能力。

还需要注意的是，现阶段我国不仅处于打好污染防治战的攻坚期，还处于经济社会发展的关键转型期。传统粗放型增长方式导致经济发展与资源、环境、生态系统不协调，出现了资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化等一系列严峻问题；2006-2015 年期间由此造成的生态环境成本在国家经济总产出中的占比一直处于 3%-5% 之间，而且随着时间推移这一现象尚未得到显著改变²。为实现经济发展与生态环境保护的双赢，我国明确提出将生态文明建设放在突出位置，推动实现人与自然和谐共生的现代化。一方面，建立生态环境保护的“倒逼”机制，以节能环保、污染治理等为抓手驱使经济增长动力转换、产业结构转型升级和供给侧结构性改革；另一方面，加快形成绿色低碳的生产生活方式，从源头上扭转生态环境恶化趋势。因此，我国迫切需要探索出一条推动经济社会和生态环境协同共进的可持续发展道路，从而在高质量发展中实现高水平保护，在高水平保护中促进高质量发展。

在上述背景下，探究“碳排放与大气污染物排放协同治理、经济发展与生态环境保护协同促进”具有的重要理论和现实意义，有助于通过资源信息共享、

¹ Health Effects Institute (HEI). State of Global Air 2019. Special Report on Global Exposure to Air Pollution and Its Disease Burden. Boston, MA: Health Effects Institute, 2019.

² 李春忠和李小斌.我国绿色 GDP 发展的实证分析.统计与决策, 2017, 22: 143-146.

统筹协调优化、体制机制创新提升我国生态环境治理能力，助力我国实现高质量增长和可持续发展。深圳是我国四大一线城市和粤港澳大湾区四大中心城市之一，过去十年大力推动生态环境与经济社会的协调发展，在探索绿色低碳发展道路中已经取得初步成就；城市 GDP 总量在全国大中城市中排名第三，万元 GDP 能耗仅为全国平均水平的 58%，细颗粒物（PM_{2.5}）年均浓度 27 微克/立方米，空气质量居全国大中城市前列。但对于高速增长的特大型城市，深圳仍旧面临着资源环境承载压力大、发展不均衡不协调等问题，迫切需提高城市治理能力、促进经济社会与生态环境的协同发展。作为中国特色社会主义先行示范区，未来深圳在践行新发展理念、构建高质量发展体制机制、完善生态文明制度等方面肩负着试验和示范的重要使命。因此，本项目以深圳为案例，探究城市如何通过推进转型升级、结构优化以及创新协同治理体系实现碳排放达峰、空气质量达标、经济高质量增长的协同“三达”，希望能为我国其他城市、尤其是特大型城市推动可持续发展提供经验借鉴。

项目将从协同视角出发，在城市前期节能减排、空气质量提升、产业转型升级等相关研究基础上最大限度整合数据、资源和方法，综合评估各类型需求管理、结构调整、技术改造措施的协同效应，为深圳实现协同“三达”探索成本有效的技术路径，为我国推动经济社会与生态环境的可持续发展提供政策建议和城市范例。主要研究目标包括：

（1）开发适用于城市尺度的碳排放和大气污染物排放统一核算体系与协同减排评估方法；

（2）基于协同效应对各类型可选减排措施或技术进行比较评价、分类排序和选择，给出深圳实现碳排放达峰、空气质量达标、经济高质量增长协同“三达”的技术路径与成本效益分析；

（3）揭示能源和产业结构与生态环境质量的相互作用关系。为更好发挥生态环境保护的“倒逼”作用和经济转型升级的促进作用提供指导；

（4）深圳气候变化与大气污染协同治理、经济发展与环境保护相互促进的政策建议，为深圳完善生态文明制度、率先打造人与自然和谐共生的美丽中国典范提供政策建议；

（5）基于深圳实践和经验，探索可操作、可复制、可推广的协同治理模式，为其他城市提供示范。

第二章：深圳的经验与现状

过去十年，深圳坚持转型升级、绿色低碳的发展战略，在经济高质量快速增长的同时实现了碳排放强度和大气污染物排放总量的稳步下降，空气质量位居全国城市前列，生态环境质量明显改善。

一方面，城市的绿色能源战略和产业转型升级促进了碳排放和大气污染物排放减排；另一方面城市积极应对气候变化和日益增强的环境管制形成了“倒逼”机制，反作用于城市能源结构优化和产业转型升级。深圳在碳排放强度大幅下降和空气质量显著改善的同时，实现了更有质量、更具竞争力的经济增长，初步探索出了一条经济社会和生态环境协同共进的可持续发展道路。

此外，城市碳排放和 PM_{2.5} 相关大气污染物排放具有显著的同根同源性，道路交通、非道路交通、电力热力和非能源工业是两类排放共同的主要来源，合计贡献了市内碳排放总量的 87.6%、PM_{2.5} 污染的 75.0%。结合当前深圳电力热力生产和产业发展实际，可进一步将电力、制造业、交通、建筑物四个部门确定为深圳碳排放和大气污染物排放减排的重点领域，其中电力、制造业、交通部门的两类排放的同根同源性较强，是协同减排的关键领域。

2.1 碳排放和环境空气质量概况

深圳是国家低碳城市试点、碳排放交易试点，也是全国首个 C40 城市气候领导联盟成员城市。深圳长期坚持推动绿色发展、循环发展、低碳发展，在全国率先颁布了《深圳经济特区循环经济促进条例》；城市能源和电力结构持续优化，核电、气电、可再生能源等清洁能源装机在全市总装机中的占比达到 85.4%；率先全面实施绿色建筑标准，绿色建筑面积 5320 万平方米，公共机构合同能源管理节能改造面积 1136 万平方米，规模均居全国首位；累计推广新能源汽车 7.2 万辆，是全球新能源汽车推广规模最大的城市之一；已建成垃圾焚烧发电厂 6 座，垃圾处理能力和垃圾焚烧发电量居全国大中城市前列；建立了全国首个碳排放交易市场，配额累计成交量 1807 万吨、累计成交额 5.96 亿元，管控企业的碳排放强度明显下降，成为全国交易最活跃的碳排放交易市场之一。总体上，深圳能源强度、碳排放强度持续下降，2015 年能源强度仅为全国平均水平的一半，碳排放强度位居全国大中城市领先水平。

深圳也是我国环境空气质量最优的千万级人口城市。城市大气污染防治工作起步于 20 世纪 90 年代，其治理的深度和广度随着时间推移不断拓展。1995-2018 年主要大气污染物浓度的逐年变化趋势如图 2-2 所示，可以看出：二氧化

硫年均浓度自 2006 年起逐年下降，2010~2018 年年均浓度一直维持在较低水平，远低于国家一级标准。二氧化氮年均浓度 1995~2004 年处于较高水平，2005~2018 年污染情况显著好转，总体呈下降趋势。可吸入颗粒物（PM₁₀）年均浓度在 2004 年达到高峰值，之后总体呈缓慢下降趋势，但个别年份出现反弹。PM_{2.5} 自 2011 年 8 月在全市开展监测，2012-2013 年年均浓度在 40μg/m³ 上下浮动，超出国家二级标准；但 2014 年起年均浓度总体呈现下降趋势，2016 年年均浓度下降至 27μg/m³，而且首要污染物格局明显改变，二氧化氮作为首要污染物的频率大幅度下降，细颗粒物和臭氧成为影响城市环境空气质量的重点污染物。总的来说，近年来大气污染治理已取得了一定成效，二氧化硫、二氧化氮、可吸入颗粒物、细颗粒物等污染物浓度逐年下降，空气质量居全国大中城市前列。

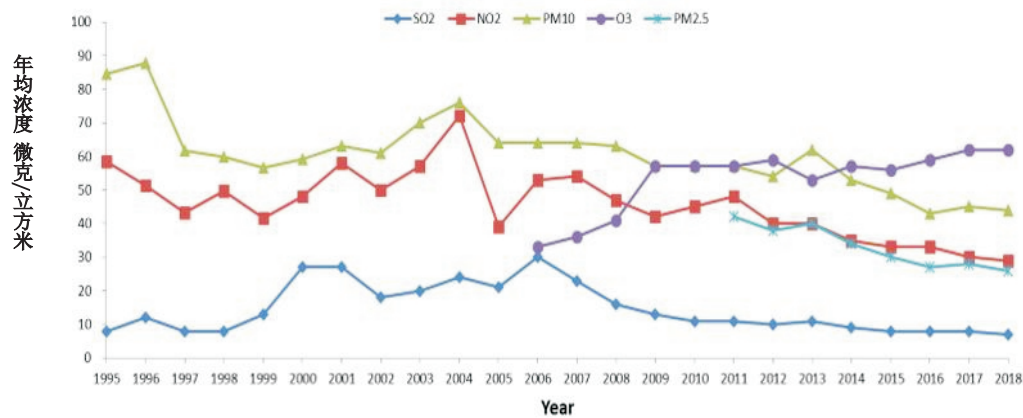


图 2-2：1995-2018 年深圳市大气污染物年均浓度变化

2.2 转型升级与生态环境质量的关系

深圳是国家可持续发展议程创新示范区，在推动城市低碳转型和绿色可持续发展方面肩负着试验和示范的重要使命。过去十年，深圳坚持转型升级、质量引领、创新驱动、绿色低碳的发展战略，在较大 GDP 总量基础上仍然保持经济高质量增长；而且城市万元 GDP 产出的能源资源消耗和污染物排放不断下降，空气质量位于全国城市前列，生态环境质量明显改善，“绿色产业”迅猛发展并已成为城市营造良好的生态环境提供有力支撑。

如图 2-3 所示，2010~2017 年期间，深圳 GDP 保持在 8%~10%左右的年增长速度，战略性新兴产业则呈现更加快速增长，增速基本为全市 GDP 增速的 2 倍以上，构成了深圳经济增长的核心驱动力。在此过程中，深圳持续促进制造业的转型升级，一方面推动存量优化，“十二五”期间淘汰、转型低端企业超过 1.7 万家；另一方面推动增量优质，先进制造占全市规模以上工业增加值比重分别提升至 72.1%和 67.3%，成为深圳制造的标签和主导力量。与此同时，深圳

万元 GDP 的能源消耗以及碳排放逐年稳定下降，万元 GDP 能耗强度、碳排放强度均大幅低于全国平均水平，不仅超额完成国家和广东省下达的节能减排任务，而且能效和碳效均领先全国其他大中城市。

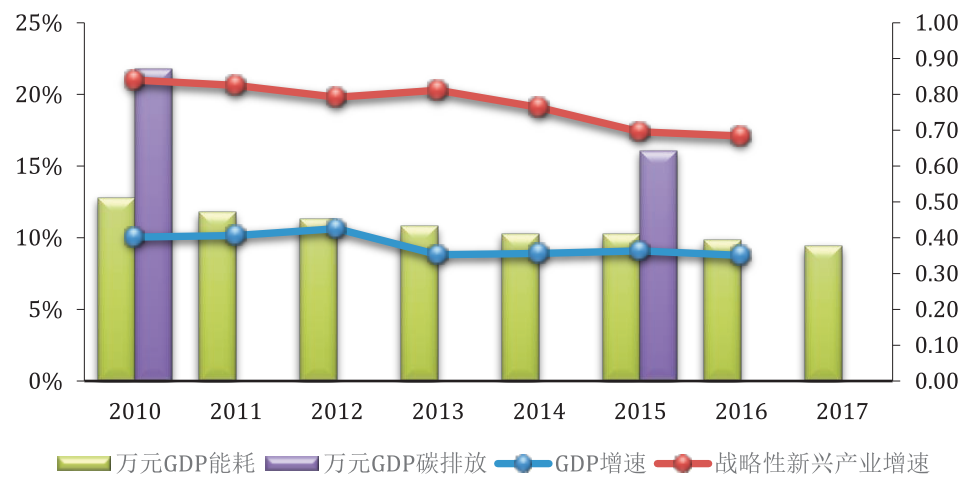


图 2-3：深圳经济发展、能耗强度、碳排放强度变化趋势（万元 GDP 能耗以吨标准煤/万元衡量，万元 GDP 碳排放以吨 CO₂-e/万元衡量）

基于 Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) 的分解分析进一步显示，深圳能源结构优化和产业转型升级显著抑制城市碳排放增长。从表 2-1 可以看出：2010-2016 年期间，人均 GDP 和常住人口数量增长对深圳碳排放增长发挥驱动效应，其中人均 GDP 增长的驱动力最强，意味着经济规模扩展和经济产出增长是城市碳排放的主导驱动力。能源强度下降和产业结构调整则发挥抑制效应，其中清洁能源占比升高所导致的能源结构优化对城市碳排放增长抑制效应最强，产业结构转型升级也显著抑制碳排放。表 2-2 进一步指出产业结构效应中贡献最大的是工业转型升级，电力热力、燃气、水的生产和供应业、制造业、采掘业分别贡献了-68.58%、-15.20%、-8.17%。表 2-3 则更进一步分析了各个细分子行业对产业结构减排效应的影响，可以看出通信电子行业和电气机械业贡献最大，这两个行业也是深圳先进制造业和高技术制造业的主要构成部分，意味着制造业的转型升级和高端化对城市碳排放增长具有显著的抑制效应。

表 2-1：2010 年-2016 年期间深圳碳排放变化的驱动因素分解

城市碳排放驱动因素分解	人口变动效应	人均 GDP 效应	产业结构效应	能源强度效应
	83.89%	261.62%	-73.28%	-172.22%

表 2-2：2010 年-2016 年期间深圳产业结构效应中各行业的贡献

产业结构效应中各行业的贡献	第一产业	采掘业	制造业	电力热力、燃气、水	建筑业	第三产业
	-0.40%	-8.17%	-15.20%	-68.58%	-1.30%	-6.36%

表 2-3：2010 年-2016 年期间深圳产业结构效应中各细分子行业的贡献

产业结构效应中各细分子行业的贡献	第一产业	采掘业	通信电子行业	电气机械业	橡胶和塑料制品业	其他制造业	电力热力、燃气、水	建筑业	第三产业
	-0.40%	-8.17%	-15.87%	7.32%	-2.57%	-4.07%	-68.58%	-1.30%	-6.36%

与此同时，应对气候变化和更严格环境政策的实施对淘汰落后产能、推动产业转型升级发挥积极促进作用。深圳是我国第一个正式启动碳排放交易的试点城市，也是目前覆盖企业数量最多、交易最活跃、减排效果最显著的试点之一。实证分析显示，碳排放管控和交易制度的实施对深圳能源结构优化产生了显著的“倒逼”作用，促进了电力供应的清洁化和低碳化（见表 2-4）。其一，2013 年-2017 年电源结构持续优化，煤电发电量在全市发电总量中的占比由 46.5% 下降至 39.1%，而气电则由 53.7% 上升至 60.9%，成为本地电力供应的主导力量。其二，电力部门以及煤电、气电的单位发电量碳排放均呈现显著下降，煤电碳排放强度在国内同类型机组领先水平的基础上进一步下降了 2.5%，气电则大幅下降了 8.9%，在不同类型发电方式碳排放绩效提高和低碳电源占比提升的双重作用下，碳排放交易实施期间深圳电力部门的整体碳排放强度下降了接近 10%。其三，严格的碳排放约束倒逼燃煤电厂进行技术升级和生产调整，2013-2017 年煤电不仅碳排放强度显著下降，年度碳排放总量也下降了 50 万吨左右，最高一年下降了超过 170 万吨。

表 2-4：碳排放交易实施后深圳单位电力生产碳排放强度变化

碳强度 吨/万千瓦时	2013 年	2017 年	下降率
煤电	8.98	8.75	2.5%
气电	4.74	4.32	8.9%
电力部门	6.70	6.06	9.6%

碳排放总量控制和配额交易制度的实施还推动了制造业的转型升级和绿色发展，在碳排放强度大幅下降的同时实现了增加值的快速增长。从表 2-5 可以看出：其一，2013-2017 年期间深圳碳排放交易体系管控制造业企业平均碳强度由 0.43 下降至 0.29 吨 CO₂-e/万元，下降幅度达 34.8%，远超前全市制造业平均的碳强度下降速度，2014、2015、2017 年碳强度下降率甚至超过 10%，表明碳排放总量控制和配额交易制度的实施激励并加快了管控制造业企业的碳绩效提

升。其二，碳排放强度下降并未对制造业产出增长造成负面影响，管控制造业企业增加值增幅超过 48%，2015 年之后年均增速维持在 10%以上，显著高于全市制造业平均的增加值增长速度，表明积极应对气候变化同时推动了深圳制造业更高质量的增长。

表 2-5：碳排放交易实施后管控制造业企业碳排放强度和增加值变化

	实际碳强度（吨 CO ₂ -e/万元）	碳强度变化率	增加值变化率
2013	0.43		
2014	0.38	-10.7%	6.8%
2015	0.34	-11.8%	11.0%
2016	0.31	-6.3%	11.3%
2017	0.29	-11.5%	12.3%
2013-2017	0.34	-34.8%	48.1%

更进一步进行分析，更加严格的碳排放管控还促进行业内部的转型升级和高端化发展。以计算机、通信、网络信息及电子设备相关行业为例，从表 2-6 可以看出：2013-2017 年期间，附加值最高、技术最先进的行业内龙头企业增加值占比由 68.5%增长至 80.5%，增长幅度和速度均远远超于相关行业平均水平；由于其巨大的规模和领先的技术，这些龙头企业在产业链的发展中发挥核心引领作用，带领整个产业链不断向高端发展。总的来说，深圳通过创新驱动、绿色导向的发展模式转变和产业转型升级，以更少的资源消耗和温室气体排放实现了更有质量、更具竞争力的经济增长。

表 2-6：计算机、通信、网络信息及电子设备相关行业结构变化

（碳排放强度单位 吨 CO₂-e/万元）

计算机、通信、网络信息及电子设备相关行业	2013			2015			2017		
	碳排放占比	增加值占比	碳排放强度	碳排放占比	增加值占比	碳排放强度	碳排放占比	增加值占比	碳排放强度
线路板	17.3%	1.8%	2.69	16.9%	1.6%	2.29	16.1%	1.3%	2.23
计算机、通信及电子设备	55.3%	26.8%	0.58	54.5%	21.2%	0.57	46.8%	14.4%	0.57
平板、集成电路及半导体	20.1%	2.8%	2.03	19.3%	2.4%	1.80	28.8%	3.8%	1.41
龙头企业	7.3%	68.5%	0.03	9.3%	74.9%	0.03	8.3%	80.5%	0.02

合计			0.28			0.22			0.18
----	--	--	------	--	--	------	--	--	------

深圳是我国 GDP 排名前 20 城市中空气质量排名第一的城市，在保持经济快速发展的同时空气质量稳步提升。从图 2-4 可以看出，1990-2004 年深圳大气污染严重且呈现恶化趋势，2004 年年灰霾天数甚至达到 187 天。但之后，随着能源结构优化、产业转型升级和日益增强的大气环境治理，深圳空气质量逐年改善，2017 年全年灰霾天数已降低至 22 天，打造出了靓丽的城市蓝天名片。一方面，深圳经济结构战略性调整和转型升级所取得的重大突破促进了城市空气质量改善。

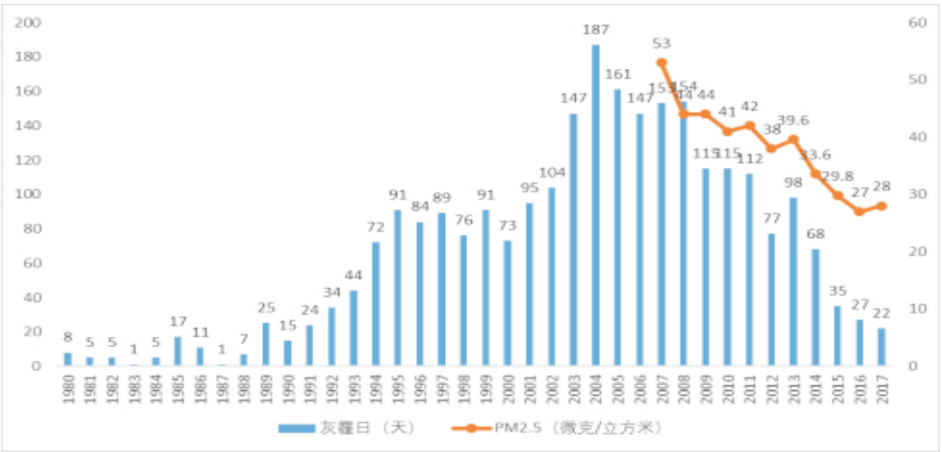


图 2-4：深圳年灰霾天数和 PM_{2.5} 年均浓度变化

图 2-5 可以看出，随着人均 GDP 的增加，深圳灰霾污染情况呈现先上升、后下降的倒 U 型变化趋势；这意味着随着经济发展水平提高，产业结构的全面优化升级有助于从源头上减少大气污染物排放、改善空气质量。以“十二五”为例，深圳淘汰、转型低端企业 1.7 万余家，产业迈向中高端；战略性新兴产业贡献了全市 50% 左右的 GDP 增长；先进制造业在规模以上工业增加值中的占比由 70.8% 提高至 76.1%，绿色制造产业发展迅猛。上述产业结构调整对空气质量改善做出巨大贡献，在工业领域的大气污染物削减中作用尤其显著。另一方面，深圳实施的大气环境治理政策和措施对产业转型升级具有“倒逼”和促进作用。《深圳市大气环境质量提升计划（2017-2020 年）》等一系列政策文件提出了城市空气质量改善的明确目标和具体措施，对污染排放行业和企业生产投资行为产生了显著影响。以“十二五”为例，这些治理措施的实施促进了电厂升级改造、黄标车淘汰、工业高污染锅炉清洁改造等，不仅大幅度消减了大气污染物排放量，还“倒逼”企业技术设备改造和产业转型升级。

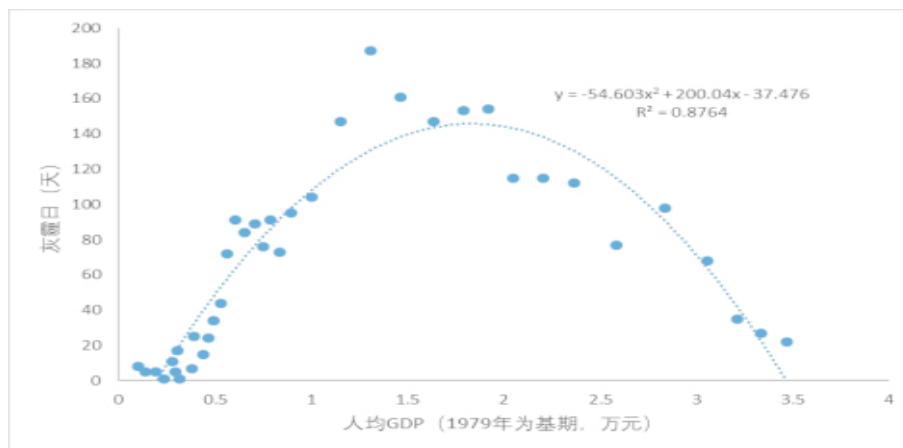


图 2-5：深圳人均 GDP 与年灰霾天数之间关系

2.3 碳排放与主要大气污染物排放同根同源分析

碳排放和大气污染物排在很大程度上来自于共同的排放源，即二者具有同根同源性。前期研究发现，以削减碳排放为目标的措施常常也能够降低大气污染物的排放，以削减大气污染物排放为目标的措施也同时促进碳减排，二者的排放控制具有协同效应，而且利用这种效应有助于以更低的成本实现双重减排目标。城市作为我国生态环境治理的前沿阵地，应当在探索碳排放与大气污染物排放协同治理的路径中先试先行。但是，当前城市碳排放和大气污染物排在清单编制、排放源识别、部门划分、核算方法等方面存在显著差异，导致很难对碳排放和大气污染物排的同根同源性进行定量分析，也难以进一步对各项减排措施的协同效应进行量化评估。

针对这一问题，本研究以深圳为案例，对 2015 年城市碳排放与主要大气污染物排的同根同源性进行定量分析，一方面识别出两类排放共同的主要来源，从而确定协同减排的关键领域；另一方面，为后续评估不同类型减排措施的协同效应提供支撑。

基于 2015 年数据，对深圳市碳排放与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关污染物排的部门分布和同根同源性进行定量分析，识别出二者协同减排的关键领域。表 2-7 给出了量化分析结果：对于碳排放，其主要排放部门为道路交通、电力热力、非道路交通、废弃物处置、非能源工业和建筑物；对于大气环境中的 $\text{PM}_{2.5}$ ，其主要本地排放源为道路交通、非能源工业、扬尘、非道路交通、电力热力部门。综合来看，道路交通、非道路交通、电力热力和非能源工业部门是深圳市市内碳排放和 $\text{PM}_{2.5}$ 相关污染物排共同的主要来源。这四个部门合计贡献了市内碳排放总量的 87.6%、 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的 75.0%，是碳排放和大气污染物协同减排的关键领域。

表 2-7：深圳市市内碳排放和 PM_{2.5} 相关污染物排放的主要来源

排放部门	碳排放占比	PM _{2.5} 贡献
道路交通	51.8%	41.0%
非道路交通	13.2%	11.0%
电力热力	19.1%	8.0%
非能源工业	3.4%	15.0%
合计	87.6%	75.0%

第三章： 基于协同治理和转型升级的未来探索

本研究从城市气候变化与大气污染的协同治理角度出发，综合应用 LEAP 模型和 WRF/SMOKE/CMAQ 空气质量模拟平台，评估协同减排效果。模拟分析结果显示：协同减排情景下深圳将于 2020 年实现碳排放达峰，与此同时能源生产、消费领域的主要大气污染物排放量也显著下降，可实现 PM_{2.5} 年均浓度低于 25 微克/立方米的目标。这意味着，通过实施气候变化与大气污染的协同治理，深圳能够率先于 2020 年实现碳排放达峰和空气质量达标的双重目标。2030 年气候变化和大气污染的协同治理取得了更加显著的环境改善效果。以碳排放减排为目的的措施或技术通过抑制能源需求、优化能源结构、降低化石能源消耗等途径和方式也将大幅削减主要大气污染物排放，对提升城市空气质量做出显著贡献；大气污染治理措施和技术的实施也具有一定的碳排放减排协同效应，但效应不如前者显著；需求管理类和结构调整类减排措施或技术的协同减排效应显著，在城市气候变化与大气污染的协同治理中应当优先实施。另外，无论是碳排放减排还是空气质量改善都不仅取决于深圳自身行动，还依赖于周边城市的共同努力，需要积极促进区域协同协作的低碳发展和大气污染治理。

3.1 经济社会发展基本假设

根据《深圳市国民经济和社会发展的第十三个五年规划纲要》、《深圳市可持续发展规划（2017—2030 年）》、《深圳市综合交通“十三五”规划》、《粤港澳大湾区发展规划纲要》等规划文件，结合主管部门访谈、专家访谈和历史演变规律分析，以 2015 年为基准年，给出 2016-2030 年深圳经济社会发展的基本假设，包括常住人口和流动人口、GDP 增长速度、产业结构、交通需求和交通结构、居住需求和建筑面积等。

3.2 减排情景设定

根据深圳经济社会发展和排放现状以及城市应对气候变化和改善空气质量的目标，本研究设计了两种减排情景：一是基准情景，假设从基准年（2015 年）起至 2030 年，现存减排措施和技术的推广率保持不变，并且不引入新的措施或技术，也就是说假设技术冻结。二是协同情景，从城市碳排放和大气污染物排放协同治理出发，基于各个部门最新发展趋势和减排措施的协同效应，重新收集、分析和建立减排措施和技术目录，并假设减排措施和技术的推广率不断提

高，从而分析协同减排对能耗、碳排放、空气污染物排放的影响的情景。下面重点介绍“协同情景”的基本设定。

在广泛开展文献综述、资料搜集、政策归纳、企业调研和专家访谈等工作的基础上，获取“协同情景”下未来二十年深圳各个部门可能采取的碳排放减排措施或技术。其中：电力、制造业、交通、建筑物部门碳排放减排共有 30 大类、144 项具体措施和技术，如表 3-1 所示。这些措施和技术既涵盖侧重于源头控制的需求管理和结构调整，也包括侧重于用能终端的能效提高和节能技术推广与应用。

表 3-1：深圳碳排放减排措施和技术

部门	大类数量	具体措施/技术数量
电力	6	19
制造业	7	56
交通	8	34
建筑物	9	35
合计	30	144

针对电力、交通和制造业三个协同减排的关键部门，大气污染治理主要包括 5 大类、31 项具体措施和技术。需要注意的是，这些大气污染治理措施或技术虽然也关注源头控制和结构调整，但是大多数仍旧偏重于末端治理，如低氮燃烧器升级改造、烟气脱硝改造、重型柴油车加装 DPF 等。通过与碳排放减排措施和技术的对比和比较分析，发现大气污染治理中的结构类减排措施很多与碳排放减排所推荐的相重合：（1）道路交通领域，对国Ⅲ柴油货车实施限行、禁止非纯电动车注册为网约出租车、发布通告对国 I 汽油车实施限行、禁止国 I 及以下的非道路柴油移动机械在全市范围内使用、禁止国 II 及以下排放标准的非道路柴油移动机械（叉车除外）在一类低排区内使用、低排区政策强化等 6 项以调整机动车、非道路移动机械燃料和车辆结构为着力点的大气污染治理措施完全或部分与交通碳减排措施重合。制造业领域，高污染锅炉清洁能源改造措施与制造业能源技术大类的碳减排措施重合。综上，上述 7 项大气治理措施与碳排放减排措施相重合，可以进行归并处理。（2）除上述 7 项措施外，剩余的 24 项大气污染治理措施绝大多数为末端治理措施。

3.3 2020 年情景分析

以 2015 年为基准年，结合上述关于碳排放和空气污染物排放减排措施和技术的搜集、归类和初步分析，应用 LEAP 模型，模拟分析 2016-2020 年基准情景

和双达情景下深圳市的碳排放和 PM_{2.5} 相关大气污染的排放趋势，回答通过协同治理深圳能否于 2020 年率先实现城市碳排放达峰和空气质量达到世界卫生组织第二阶段标准（以下简称空气质量达标）的双重目标。

城市碳排放峰值：如图 3-1 所示：基准情景下，深圳城市碳排在 2020 年并未出现峰值，而是呈现持续增长趋势。但在协同情景下，2020 年全市碳排放出现峰值，能源相关碳排放总量约为 8619 万吨二氧化碳当量，比 2015 年增长约 400 万吨二氧化碳当量；全市人均碳排放（以常住人口统计）为 5.83 吨二氧化碳当量/人，较 2015 年下降了 26.6%，显著低于全国大中城市平均数值。从供给端结构来看，外调电力所导致的间接碳排放占比最大，达 38.7%；其次是交通部门和电力部门（本地电力生产），二者碳排放占比分别为 32.6%和 22.7%；上述三个部门合计贡献了深圳全市碳排放总量的 94.0%。从需求端结构来看，综合考虑化石能源消耗和电力消耗后，交通部门仍是最大的终端能源消费者以及碳排放源，在全市碳排放总量中占比 38.0%；但制造业和建筑物碳排放所占比重显著上升，分别为 31.3%和 25.2%。这意味着，制造业和建筑物的电力消费是拉动城市外调电力和电力生产相关碳排放的原因，这两个部门的节能、节电在城市整体碳排放减排中具有重要作用。

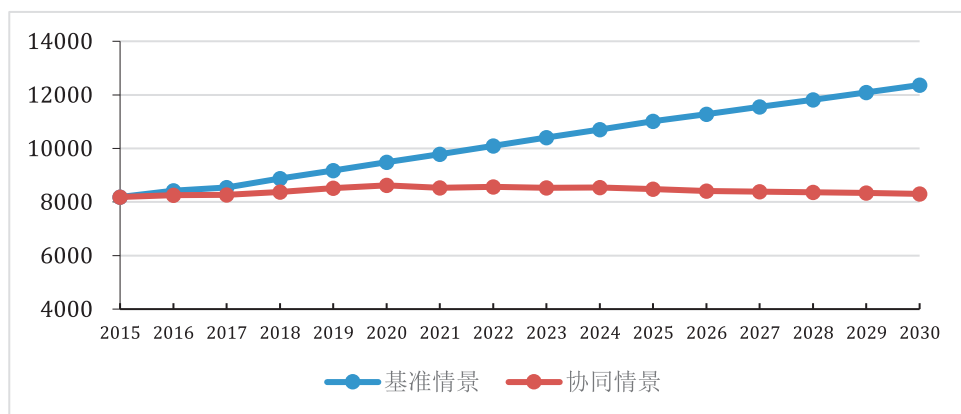


图 3-1：不同情景下深圳城市碳排放变化（单位：万吨二氧化碳当量）

主要大气污染物一次排放量：上面分析显示协同情景下深圳可以实现 2020 年城市碳排放达峰，进一步计算给出该情景下城市能源相关的 PM_{2.5} 及其主要前体污染物的一次排放量。图 3-2 给出了深圳市主要大气污染物 2015 年基准清单与 2020 年减排清单的对比情况。与 2015 年相比，2020 年各类主要污染物排放量均有一定程度下降。其中降幅最大的为 CO，下降 47.4%，其次为 SO₂、NO_x、VOCs、PM₁₀ 和 PM_{2.5}，分别下降 37.3%、23.5%、32.0%、26.9%和 35.0%。

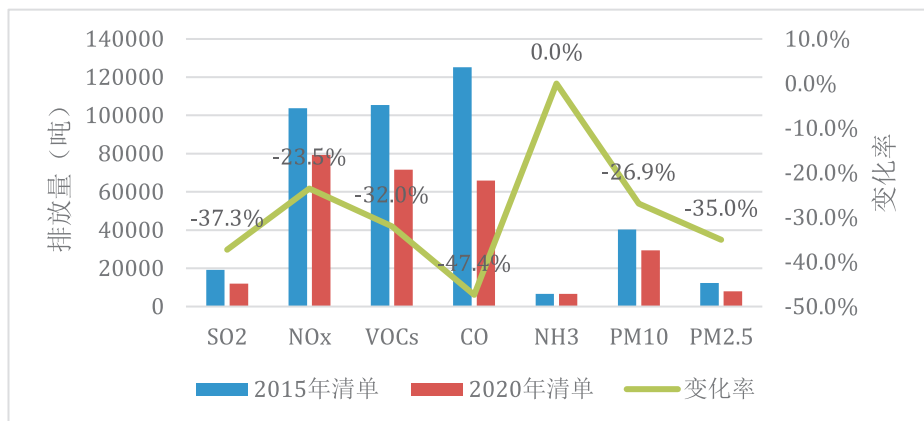


图 3-2：主要大气污染物 2015 年基准清单与 2020 年控制清单对比

城市空气质量目标可达性：在控制清单基础上，搭建区域空气质量模拟平台 WRF/SMOKE/CMAQ，以支撑构建目标模拟区域的响应表面模型（RSM），从而开展基准年、目标年深圳市大气污染物排放对大气环境质量影响的模拟研究，评估 2020 年深圳 PM_{2.5} 年均浓度达到世界卫生组织第二阶段标准（25 微克/立方米）的可能性。空气质量模拟的情景设置思路如图 3-3 所示：基于空气质量模型定性识别不同年份气象场对空气质量的影响，组合深圳市减排、珠三角及周边区域减排等不同状况设置“高、低”两种污染排放情景，通过空气质量模拟识别不同排放条件、不同气象条件下“十三五”空气质量目标是否可达。

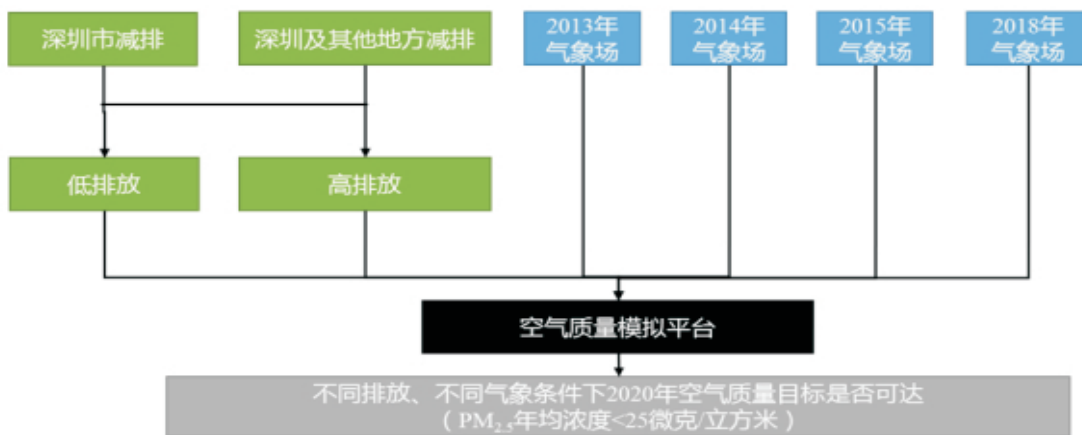


图 3-3：2020 年空气质量模拟的情景设置思路

图 3-4 展示了不同气象条件下深圳市常规控制情景对深圳各监测子站 PM_{2.5} 浓度的削减情况。从整体上看，在常规控制情景下深圳市可于目标年完成《深圳市大气环境质量提升计划（2017-2020 年）》的 PM_{2.5} 年均浓度目标（25 微克/立方米），但在 2018 年气象条件下深圳市空气质量能否达标处于临界状态，为保证 2020 年深圳市稳定达标，应在 2020 年常规情景下进一步加严。图 3-5 进一步展示了深圳市与珠三角、珠三角外区域联合控制情景对深圳各监测子站

PM_{2.5} 浓度的削减情况，该情景无论气象条件好坏深圳市均可于目标年完成 PM_{2.5} 年均浓度低于 25 微克/立方米的目標。

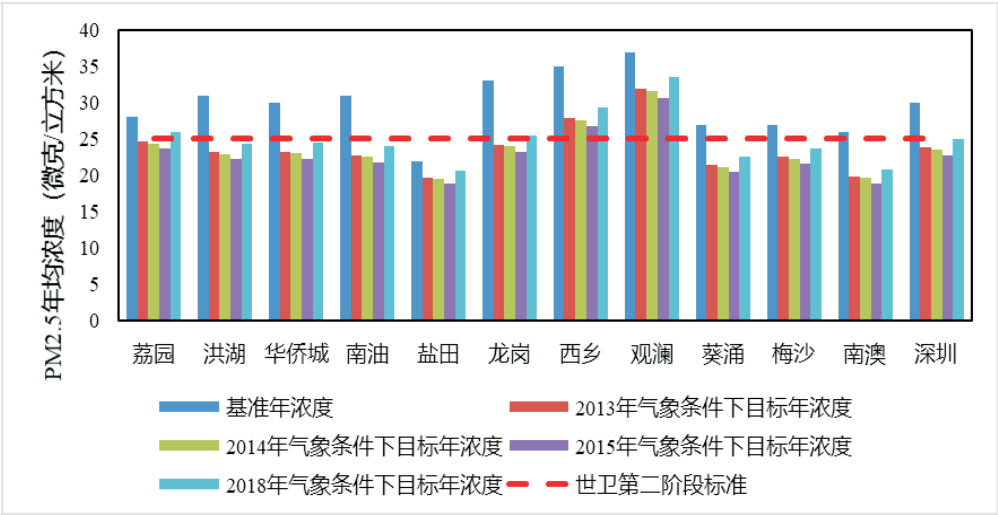


图 3-4：深圳市常规控制情景

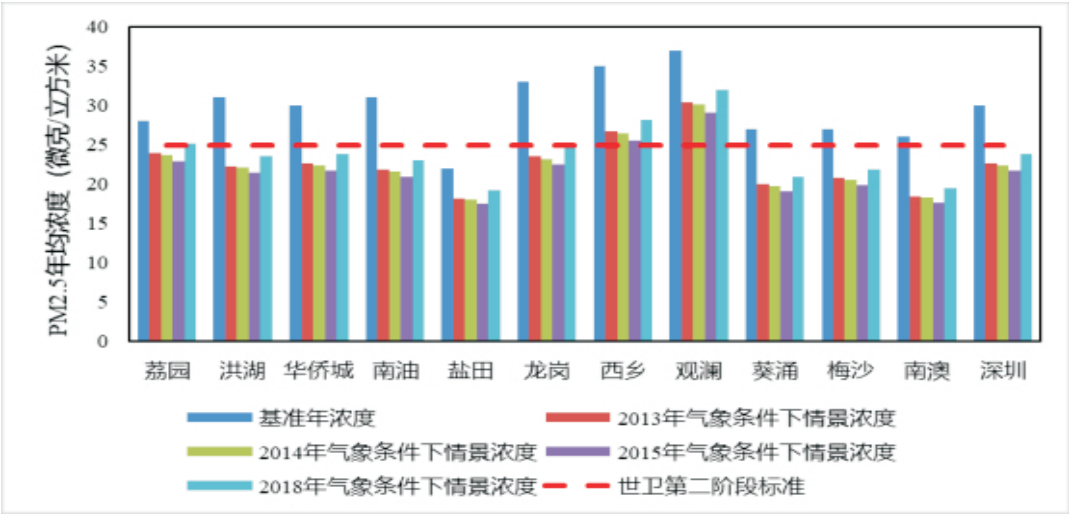


图 3-5：深圳市与区域联合控制情景

3.4 2030 年情景分析

与 2020 年相比，2030 年深圳气候变化和大气污染的协同治理取得了更加显著的效果。与基准情景相比较，协同情景下城市碳排放量以及 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs 等主要大气污染物排放量均呈现大幅下降。

2020-2030 年城市碳排放趋势：协同情景下，深圳碳排放于 2020 年达到峰值后呈现比较平稳的下降趋势。需要注意的是，城市碳排放达峰后并未立刻出现快速下降趋势，而是处于“平台”期，主要原因在于：随着居民收入水平和

生活质量提高，建筑物等刚需和由此导致的电力间接排放仍旧持续增长，如果外调电力间接排放无法得到有效控制，难以出现达峰后的快速下降。协同情景下，如图 3-6 所示，全市人均碳排放（以常住人口统计）持续下降，2030 年降低至 4.17 吨二氧化碳当量/人，达到全球大中城市的领先水平。

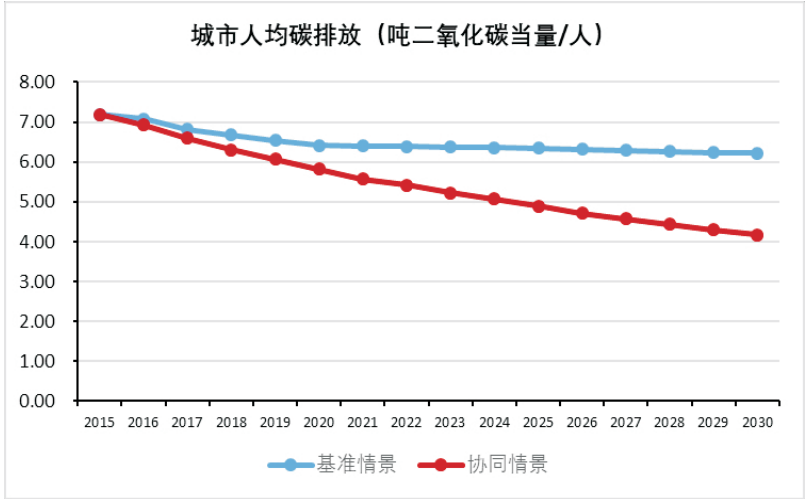


图 3-6：不同情景下深圳人均碳排放量

随着协同治理措施和技术的推进，城市碳排放减排效果不断提高。相对于基准情景，2020 年协同情景下的碳排放削减量为 865 万吨，削减比例为 9.1%；2025 年这一削减量上升为 2534 万吨，削减比例为 23.0%；到 2030 年减排量超过 4000 万吨，减排比例高达 32.8%。这意味着随着协同减排措施和技术的推广和广泛应用，减排效果将显著提高。

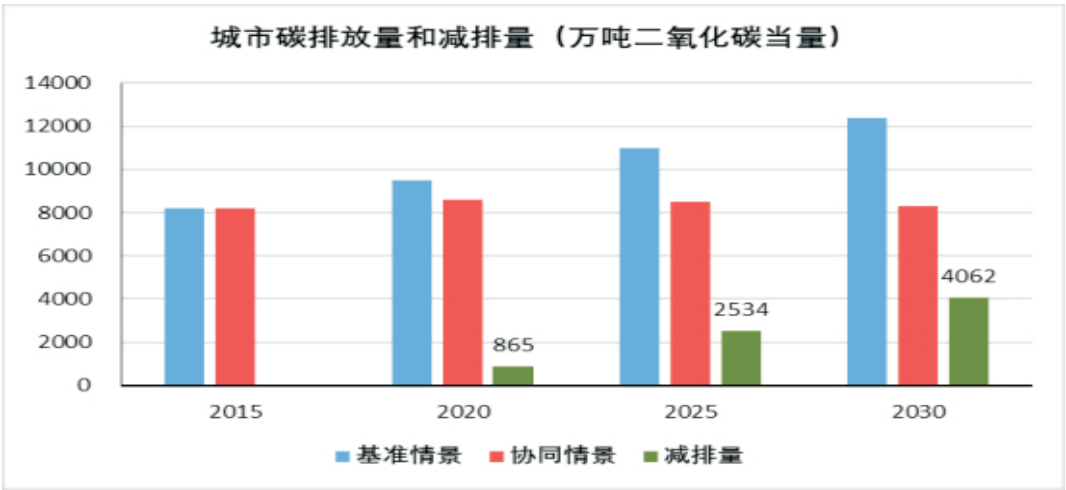


图 3-7：不同情景下城市碳排放量

从供给端来看，南方电网调入电力的减少对城市减排量贡献最大，在城市减排总量中占比 69.1%。需要注意的是，调入电力减少更深层次的原因为建筑物、制造业节能减排所导致的电力需求降低，以及深圳本地清洁能源发电量占

比的增长。交通部门对削减城市碳排放的贡献也很大，由于居民交通需求管理和公共交通体系的快速发展，交通部门贡献了城市减排总量的 45.9%。

表 3-2：2030 年双达情景下各部门对城市碳排放减排的贡献分解

部门	南方电网调电	交通部门	制造业	建筑物	其他	电力部门
贡献比例	69.1%	45.9%	0.5%	0.3%	0.0%	-15.7%

从需求端来看，综合考虑直接碳排放和电力消费所导致的间接碳排放，2030 年制造业对城市碳排放减排的贡献最大，贡献了城市减排总量的 40.4%；交通部门是减排的第二大来源，贡献了 36.7%的减排量，其中主要为化石燃料消费降低所导致的直接排放下降；建筑物也对城市减排做出显著贡献，贡献率为 21.5%，其中发挥主要作用的是建筑物电力消费减少所导致的间接排放下降。

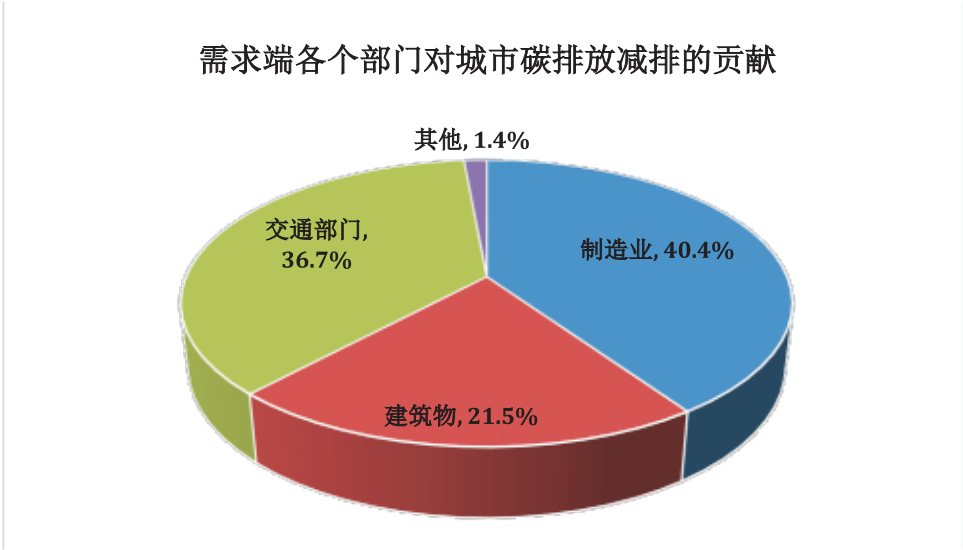


图 3-8：双达情景下需求端的各部门对城市碳排放减排贡献

深圳气候变化和大气污染的协同治理也产生了显著的大气污染物削减效果。一方面，电力、制造业、交通和建筑物领域 30 大类、144 项碳排放减排措施和技术产生了显著的大气污染物协同减排效果，如图 3-7 所示。这些以碳排放减排为目标的措施或技术通过抑制能源需求、优化能源结构、提高能源效率、降低化石能源消耗等途径和方式，在降低碳排放的同时也大幅削减了 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs 等主要大气污染物排放，对降低城市 PM_{2.5} 浓度、提升城市空气质量做出了显著贡献。

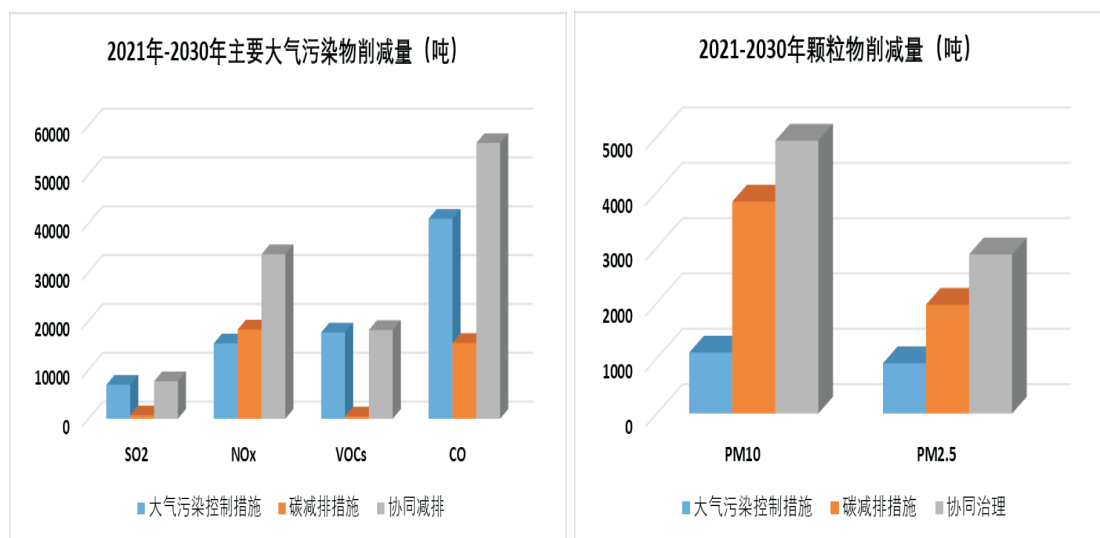


图 3-9：不同情景下 2021-2030 年深圳主要大气污染物排放的削减量

另一方面，电力、交通和制造业领域的 5 大类、31 项大气污染治理措施和技术的实施也具有一定的碳排放减排协同效应。其中，对国III柴油货车实施限行、禁止非纯电动车注册为网约出租车、高污染锅炉清洁能源改造措施等 7 项调整机动车结构和燃料结构的治理措施与碳排放减排措施部分或完全重合，能够产生明显的协同减排效果。剩余 24 项措施或技术侧重于大气污染物排放的末端治理，其中：绝大多数措施或技术基本不产生碳排放减排的协同效应，既不明显增加能源消费与碳排放，但也不能协同降低碳排放；而电力部门的治理措施，如电厂深度脱硫脱硝，则通过增加单位发电量的燃料消耗增加碳排放，协同减排效应为负。

2030 年城市空气质量。图 3-10 给出了深圳市大气污染控制情景对各监测子站 PM_{2.5} 浓度的削减情况，可以看出：不同气象条件下，2030 年城市 PM_{2.5} 年均浓度约为 18 微克/立方米左右。图 3-11 进一步展示了深圳市大气污染与碳排放协同控制对各监测子站 PM_{2.5} 浓度的削减情况，可以看出：不同气象条件下，2030 年城市 PM_{2.5} 年均浓度约为 17 微克/立方米左右。二者比较显示：碳排放与大气污染物排放的协同减排有助于加深主要大气污染物一次排放量的削减幅度，从而进一步提升城市空气质量。但是，2030 年两种情景均不能达到世界卫生组织第三阶段标准（PM_{2.5} 年均浓度低于 15 微克/立方米）。除了不断加强城市自身污染排放控制外，深圳还需要加强与粤港澳城市群及周边区域的协同治理。

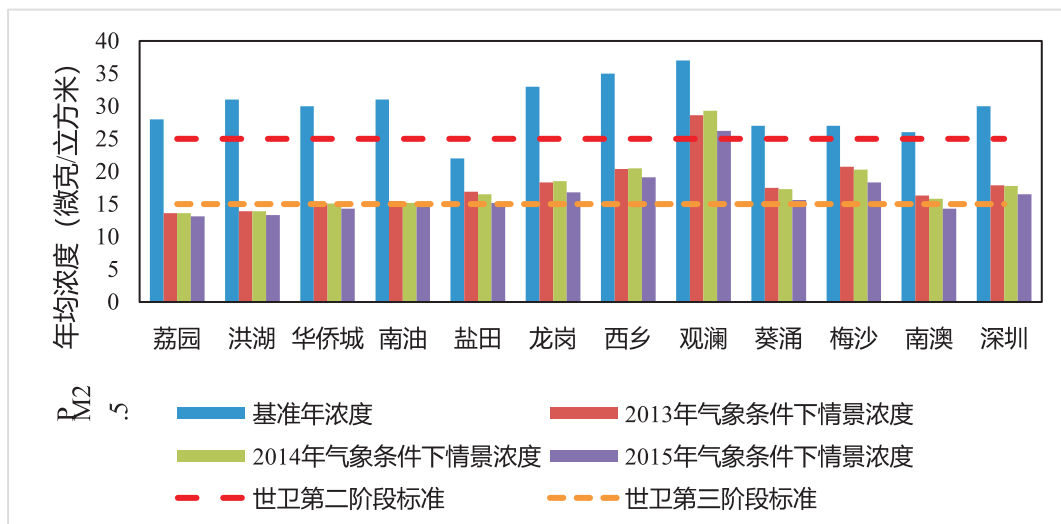


图 3-10 深圳市大气污染控制情景对各监测子站 PM2.5 浓度的削减情况

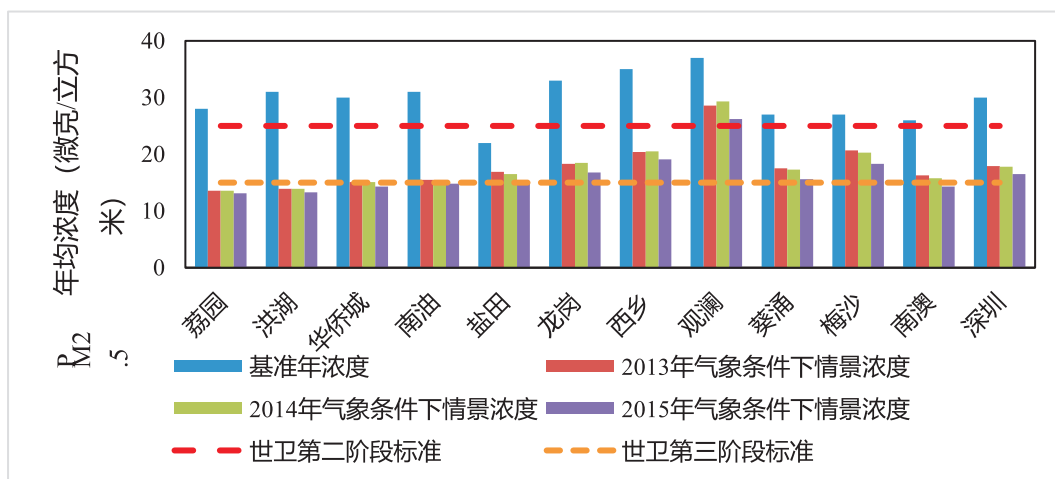


图 3-11 深圳市大气污染与碳排放协同控制对各监测子站 PM2.5 浓度的削减情况

第四章：协同治理的技术路径和政策建议

为实现城市碳排放达峰、空气质量达标和经济高质量增长协同“三达”目标，深圳需要对电力、制造业、交通和建筑等四大部门的转型升级和环境治理进行统筹优化，基于协同治理视角推荐的具体减排措施或技术如表 4-1 所示。

表4-1： 各重点部门主要的协同减排措施/技术

重点部门	重点技术/措施大类
电力部门	逐步降低煤电比重
	提高燃气发电比重
	发展可再生能源
	综合能源系统
制造业	控制管理技术
	生产技术
	温控技术
	能源技术
	运输技术
交通部门	控制需求总量增长
	调整需求结构
	道路货运
	道路营运客运
	私家车
	节能管理
	节能改造
建筑部门	控制建筑规模
	既有居住建筑改造
	新建低排放建筑
	建筑节能管理机制

（一）针对电力部门：电力部门主要包括 6 大类、19 项措施或技术。其中，为实现电力部门协同减排，重点需要在能源结构调整上发力。可采取的措施主要可分为以下几类：逐步淘汰煤电比例，增加气电装机和比重，充分利用太阳能、风能、潮汐能等可再生能源以及打造综合能源系统。这些措施到 2030 年可降低 2164 万吨的二氧化碳排放量。单从煤电退出来看，到 2030 年可以减少 1924 吨的 PM_{2.5}、807 吨的 PM₁₀、4816 吨的 NO_x、142 吨的 VOCs 和 214 吨的 SO₂。这些新增的发电方式在替代燃煤发电的过程中，能够在降低二氧化碳排放的同时，带来显著的空气污染减排协同效应。

为使深圳市电力部门尽早达到碳排放峰值和降低该部门的空气污染物排放，需在继续推行现有节能减排措施的基础上，进一步加大以下各类技术的推广应用，包括重点逐步降低淘汰煤电比重、大力提升燃气发电比重、积极推动可再生能源利用和开发。为更加有效控制发电行业的排放，还可以从控制消费端的电力需求着手；建设更加节能的建筑，采用更加低碳高效的交通方式，都有助于降低电力部门的排放量。从初始投资成本来看，预计 2020 年推广各类节能减排技术的累计投资成本在 150.8 亿元，2030 年累计投资额在 408 亿元以上。为保障推广上述技术和措施，需出台优惠的财政补助政策、融资优惠政策，通过多种渠道、多种形式筹措资金。

表4-2：深圳电力部门协同减排实施路径

政策	十三五规划期间（2016~2020）	中远期规划（2021~2030）
降低煤电比例	制定煤电逐步降低规划日程计划及方案，着力推进煤气化联合循环发电技术。	分阶段降低燃煤发电比重，直至完全退出；采用碳捕集与封存技术等新兴煤电技术的应用。
逐步提升燃气用电比重	逐步提升现有燃气发电时长至 3500 小时	继续研究提升现有燃气机组提升发电时长方案
	燃气电厂深度脱硝装置和余热利用。	考虑采用碳捕集与封存技术等新兴气电技术的应用进一步降低碳排放。
	推进填埋气提存制取民用天然气工程。	继续增加固体废物填埋气发电装机容量。
增加可再生能源比重	逐步加大太阳能光伏家庭推广应用，增加光伏面积和装机	基本实现深圳市屋顶太阳能光伏屋顶覆盖，探索海上光伏发。
	研究风电利用	风电利用装机达到一定比例
	研究潮汐能源利用	潮汐能利用达到沿海国际城市先进水平

(二) 针对制造业：制造业碳排放减排的主要措施包括温控技术、照明技术、生产技术、运输技术、控制管理技术等 7 大类、50 余项具体技术。这些技术多为《国家重点节能低碳推广目录》中的推荐技术，技术相对成熟、且成本较低，计算所得技术的全生命周期单位减排成本大多为负数。这些措施将实现制造业碳排放在 2020 年达峰，主要空气污染物如 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 SO₂ 也在 2020 年达峰。碳减排量逐年增加，到 2030 年可实现减排 1220 万吨二氧化碳排放，34.1 万吨的 PM_{2.5}，201.1 万吨的 SO₂。

从协同减排来看，产业结构调整是制造业减排的重要方面，还应当重点推广以下具体技术，包括过程能耗管控系统技术、高效电磁感应加热技术、动态谐波抑制及无功补偿综合节能技术、塑料动态成型加工节能技术、空压机余热回收、全功率匹配节能数控柔性联动技术、制冷剂替换、燃油锅炉供热水改为太阳能热水系统、锅炉"油改气"、高红外发射率多孔陶瓷节能燃烧器，它们产生的减排量和协同减排效果作为显著。从投资额的角度来看，制造业 2020 年推广各类节能减排技术的累计投资额在 482 亿元以上，2030 年累计投资金额在 607 亿元以上。

表4-3：制造业协同减排实施路径

政策	十三五规划期间 (2016-2020)	中远期规划 (2021-2030)
第二产业比重	2020 年为 39%	2030 年为 33%
控制管理技术	优先推广过程能耗管控系统技术	继续推广这一技术逐步达到 100%推广率
温控技术	优先推广合理设置空调温度、中央空调全自动清洗节能系统技术、中央空调水处理防腐阻垢节能技术等易推广的技术	继续推广上述技术至逐步达到 100%推广率；并且大力推广中央空调余热回收、大温差技术等，至 2030 年推广率达 50%
照明技术	优先推进 LED 灯改造，包括普通日光灯、T5 灯的改造	继续推广尚上述技术，同时稳定地推广其他如高强度气体放电灯用大功率电子镇流器新技术等技术
能源技术	逐步推广动态谐波抑制及无功补偿综合节能技术、同步电机微机全控励磁技术等	继续推广上述技术至 2030 年达到 50%推广率；并且大力推广中铅蓄电池高效低能耗极板制造技术等技术
运输技术	优先推广发动机冷却系统优化节能技术	继续推广这一技术逐步达到 100%推广率
生产技术	优先推广注塑机技术、电动机和空压机相关技术和锅炉油改气技术、高红外发射率多孔陶瓷节能燃烧器技术，逐步推广将燃油锅炉供热水改为太阳能热水系统	在优先推广易推广技术的基础上，大力推广其他生产技术

（三）针对交通部门：根据减排政策和技术措施的内容，交通部门可分为抑制需求总量增长、调整需求结构、道路货运结构调整、道路营运客运结构调整、私家车燃料结构调整、轨道交通管理节能、轨道交通节能改造、水运节能等 8 大类、34 项具体减排政策和技术措施。在这些交通措施的双达情景下，预计深圳市交通碳排放会在 2020 年左右达峰，主要空气污染物也达到峰值。在计入各措施的电力消耗带来的间接碳排放时，2030 年交通部门的最大减排潜力为 1749.06 万吨 CO₂-e，最大节能潜力为 860.03 万标准煤，总投资额为 5624.5 亿元。其中调整需求结构类政策协同减排比例最大，公共交通减建设除了减排 24.8% 的碳排放外，其他污染物的减排比例都超过了 18%。

从协同减排来看，最推荐的减排措施或技术包括货运周转量结构调整、公共交通建设、提高停车收费与汽车尾号限行、建设慢行网络、单位水路货运周转能耗降低、高效燃油货车、鼓励绿色出行和自愿停驶、HOT 收费、电动车租赁、货车油改气等。此外，鉴于许多绿色技术具带有高成本和外部性，政府的扶持政策是推动它们普及的关键。例如，推广新能源汽车的过程中，新能源汽车往往比传统燃油汽车的价格高 50% 甚至高几倍，这时政府的补贴就成为了推动新能源汽车市场份额快速提高的关键。

表4-4：双达情景下清洁交通的发展路径表

技术/措施分类	技术/措施具体名称	发展路径		
		2016-2020	2020-2025	2025-2030
抑制需求总量增长 (5 项)	汽车尾号限行	开始实施	大力实施	大力实施
	提高停车收费	开始实施	大力实施	大力实施
	道路拥堵收费			开始实施
	推广低排放区		开始实施	大力实施
	实施 HOT 收费		开始实施	大力实施
调整需求结构 (5 项)	轨道交通发展 (计入间接排放)	大力实施	大力实施	大力实施
	BRT			开始实施
	常规公交	大力实施	大力实施	大力实施
	建设慢行网络 (步行及自行车)	开始实施	大力实施	大力实施
	绿色出行和自愿停驶	开始实施	大力实施	大力实施
道路货运 (3 项)	货车油改气	开始实施	开始实施	开始实施
	混合动力货车		开始实施	大力实施
	高效燃油货车	开始实施	大力实施	大力实施
道路营运客运 (4 项)	纯电动公交车 (计入间接排放)	开始实施	大力实施	大力实施
	混合动力公交车	停止实施		
	纯电动出租车 (计入间接排放)	开始实施	大力实施	大力实施
	电动车分时租赁 (计入间接排放)		开始实施	大力实施
私家车 (1 项)	纯电动私家车 (计入间接排放)	开始实施	大力实施	大力实施
管理节能 (6 项)	地铁车站节能管理	大力实施	大力实施	大力实施
节能改造 (9 项)	地铁车站节能改造	大力实施	大力实施	大力实施

（四）针对建筑部门：建筑部门总共包括既有公共建筑改造、既有居住建筑改造、新建低排放建筑、建筑节能管理机制等 9 大类、35 项具体减排措施或技术。虽然建筑物的排放在 2030 年没有达到峰值，但是这些措施到 2030 年可使温室气体排放量总共减排 877 万吨，各项措施分别减少 286 万吨、147 万吨、325 万吨和 5 万吨二氧化碳当量。建筑部门主要的碳排放来源为电力，电力的使用却并不直接产生空气污染物排放，假设相应使用的电力全部用深圳市电力或通过南方电网电力生产提供，则节约的电力所折算的空气污染物也同样大幅降低。

从协同减排来看，建筑领域应尽快开展下述工作：一是控制建筑规模，稳步开展建筑建设，合理保证建设时序；二是加大既有居民和公共建筑的节能和绿色化改造，大规模、高水平推动既有建筑绿色化改造与可再生能源建筑；三是新建低排放建筑。2030 年累计新建公共建筑 1.1 亿平方米、居住建筑 1.6 亿平方米、近零碳排放区示范工程 100 万平方米；四是以市场化手段提升建筑运营质量，加大公共建筑能耗限额制度、建筑碳交易、合同能源管理机制等实施力度；五是大力引入绿色金融，扶持建筑领域减排发展。建立绿色项目和绿色资金高效充分对接的综合服务平台，鼓励市场提供绿色金融风险分担、项目绿色认证、项目信息披露、融资方案设计等专业服务。

表4-5：双达情景下制造业的发展路径表

政策	十三五规划期间（2016-2020）	中远期规划（2021-2030）
控制建筑规模	人均居住建筑面积 21.95 平方米 人均公共建筑面积 8.5 平方米	人均居住建筑面积 22 平方米 人均公共建筑面积 10 平方米
既有公共建筑改造	2020 年高效照明系统个、冷却塔改造等易推广技术的使用面积达到 600 万平方米，其他技术稳步推进	2030 年 21 项既有公共建筑改造措施基本全部得到推广（2030 年推广面积约为 3000 万平方米）
既有居住建筑改造	2020 年高效空调系统推广面积约 4700 万平方米，机械通风（新风换气机）与高效照明系统推广面积约 7900 万平方米、既有建筑太阳能的改造约 70 万平方米，其他技术稳步推进	2030 年 8 项既有居住建筑措施基本全部得到推广
新建低排放建筑	60%新建建筑（共计 1.1 亿平方米）达到《深圳市公共建筑能耗限额标准》引导值 60%居住建筑（共计 1.6 亿平方米）实行更高标准 70%的建筑节能设计	
建筑节能管理机制	2020 年推广市民节能行为科普	2021-2030 年大力推动物业节能管理培训，执行能耗限额标准。
	近零碳排放示范基地建设 100000 平方米	

第五章：主要结论和未来展望

本研究以深圳为案例，从历史演变和未来趋势两个维度，剖析深圳如何通过持续推进产业转型升级、能源和交通结构优化以及治理体制机制创新实现碳排放达峰、空气质量达标、经济高质量增长的协同“三达”。主要研究结论和未来展望如下图 5-1 所示：

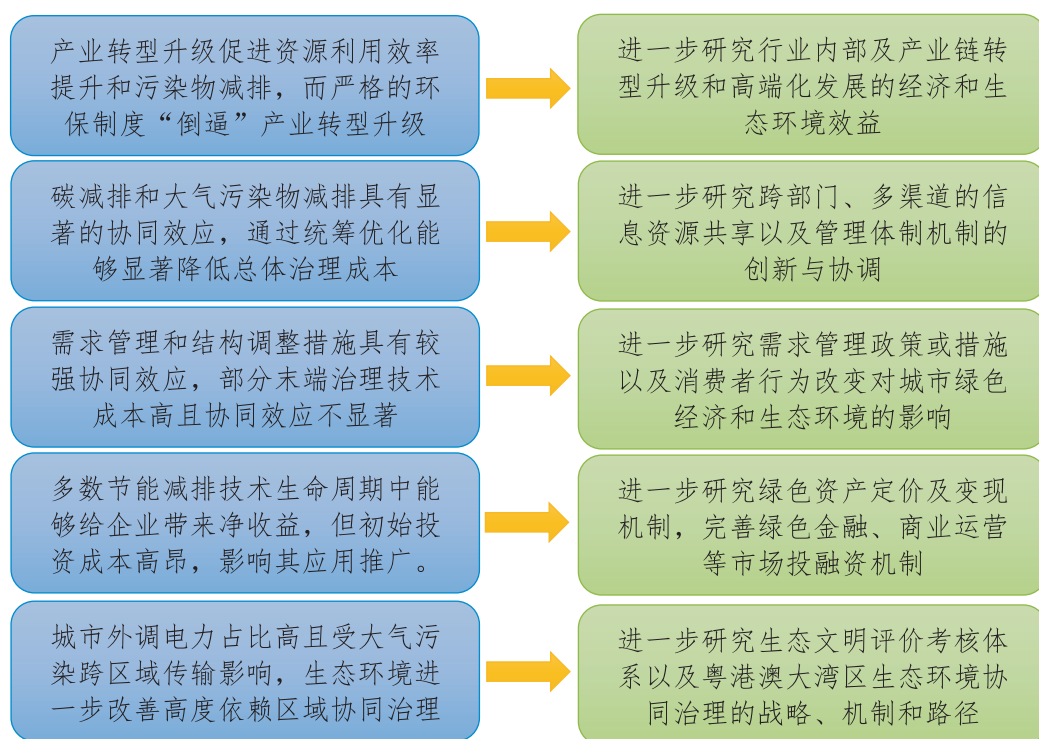


图 5-1：主要研究结论和未来展望

过去十年深圳以战略性新兴产业和先进制造业为主导的转型升级显著提升了资源利用效率和全要素生产力，使得城市能效和碳效水平均领先全国其他大中城市，空气质量排名第一。同时节能减排和大气环境治理政策和措施的积极实施对转型升级建立了“倒逼”机制，加快了企业技术设备改造和产业转型升级。未来，制造业转型升级、能源供应低碳化、交通结构优化等将在城市碳排放控制和空气质量改善中发挥更加显著的作用。总体上，深圳经验显示城市能够在高质量发展中实现高水平保护，同时在高水平保护中促进高质量发展；作为中国特色社会主义先行示范区，未来还迫切进一步需要研究和评估行业内部及产业链转型升级的经济和环境效益，构建以市场为导向的绿色技术创新平台和产业体系，促进经济绿色低碳和高质量发展。

深圳碳排放和大气污染物排放具有显著的同根同源性，道路交通、非道路交通、电力热力和非能源工业部门是两类排放共同的主要来源，也是协同减排

的关键领域。以碳排放控制为目标的措施或技术能够同时大幅削减 SO₂、NO_x、VOCs、PM_{2.5} 等大气污染物排放，对提升城市空气质量做出显著贡献；大气污染治理措施或技术对碳排放减排也具有一定的协同效应，但效果不够显著。通过实施碳排放和大气污染物排放协同控制，2020 年深圳将率先实现碳排放达峰并将 PM_{2.5} 年均浓度削减至 25 微克/立方米；2030 年深圳人均碳排放将达到全球大中城市的领先水平，PM_{2.5} 年均浓度进一步降低至 17 微克/立方米；同时协同减排和统筹优化还将显著降低城市总体减排成本。但当前生态环境协同治理受到信息孤立、管理分割、沟通协商机制欠缺等问题的严重制约，迫切需要进一步研究跨部门、多渠道的信息资源共享以及管理体制机制的创新与协调。

不同类型措施或技术的协同减排效应具有显著差异，需求管理和结构调整类型的措施或技术协同效应最显著，应当优先实施。多数碳排放减排措施或技术通过抑制能源需求、优化能源结构、降低化石能源消耗等途径或方式能够显著削减主要大气污染物排放，具有较强的正向协同效应；侧重于机动车结构和燃料结构调整的大气污染治理措施能够产生正的碳排放减排协同效应，但侧重于末端治理的措施或技术协同效应不显著、甚至为负。总体上，城市积极应对气候变化行动对改善区域空气质量具有显著促进作用，未来还应持续推进制造业升级和高端化发展，提高可再生能源利用和能效提高，优化客货运输结构并推进交通电气化，积极鼓励和引导低碳出行和消费。还需要进一步深入研究需求管理政策或措施以及消费者行为改变对城市绿色经济和生态环境的影响。

对于通过能效提高、能源需求管理、能源和交通结构优化实现碳排放和大气污染物排放减排的措施或技术，由于存在节能收益它们中的大多数在生命周期中能够给企业带来净收益；对于部分能源和交通结构调整措施以及绝大多数末端治理技术，其在生命周期中无法回收投入成本。从成本有效性角度，建议优先实施能效提高、能源需求管理、能源和交通结构优化相关减排措施或技术。尽管大多数协同减排措施或技术在生命周期能够带来净收益，但高昂的初始投资成本严重限制了其应用和推广。例如，交通和建筑物是未来深圳碳排放和大气污染物排放的主要来源，但这两个部门主要推荐协同减排措施或技术 2030 年的初始投资成本累计超过 7600 亿元。为促进先进绿色技术的应用和推广，迫切需要进一步研究绿色资产定价及变现机制，完善绿色金融、商业运营等市场投融资机制。

最后，无论是构建高质量发展的绿色经济体系还是城市碳排放减排和空气质量改善，都不仅取决于深圳自身行动，还高度依赖于周边区域的共同努力。未来还迫切需要研究以绿色发展为导向的区域生态文明评价考核体系和企业环境信用评价体系，以及粤港澳大湾区生态环境协同治理的战略、机制和路径。