



深圳碳减排路径研究

绿色低碳发展基金会
北京大学深圳研究生院
2016 年 9 月

摘要

中国政府已提出在 2030 年左右达到碳排放峰值，并确定了具体的行动路径，实现城市的低碳发展是其重要内容之一。作为改革开放的前沿城市，深圳提出在 2022 年实现碳排放峰值。在此背景下开展深圳碳减排路径的研究具有重要实践意义和示范意义，既可为自身确定碳减排目标、制定行动方案提供决策依据，也可为国内城市探索适合国情的减排路径提供经验。本研究基于重点企业调研数据，分析了深圳市碳排放现状，在此基础上采用 LEAP 框架分析了深圳市未来的碳排放峰值路径。

行业结构优化、能源结构优化已成为深圳市减缓碳排放的主要因素。2011 年至 2013 年，以制造业占 GDP 比重下降、服务业比重上升为特点的行业结构优化，以及以煤炭消费比重下降、天然气消费比重上升为特点的能源结构优化是深圳市碳排放减缓的首要因素。以用能效率提高、提升产品增加值率为特点的技术因素是深圳市碳排放减缓的另一个重要因素。交通运输业、居民生活消费及服务业是碳排放增长的主要部门，制造业、农业及建筑业是碳排放减少的主要部门。

情景分析结果表明，深圳市在实施低碳发展优超路由后，将有可能于 2022 年达到碳排放峰值。届时，制造业占深圳市碳排放总量的比重最大（38.4%），其次为交通部门（28.4%）和建筑部门（26.1%）。2016 年至 2022 年制造业碳排放所占比重持续下降，制造业碳排放的尽早达峰是深圳市早日实现碳排放峰值的重要条件。此外，峰值目标情景下深圳市 2020 年、2030 年单位 GDP 碳排放分别比 2005 年下降 60.3%及 78.9%，高于我国政府提出的 2020 年、2030 年分别比 2005 年下降 40%~45%、60%~65% 的全局平均目标。

目 录

1	研究概述	1
2	深圳市低碳发展状况	3
2.1	社会经济概况	3
2.2	能源消费现状分析	3
2.3	碳排放现状分析	5
2.4	节能减排目标及政策	7
3	深圳市碳减排路径概念与理论框架	10
3.1	城市低碳发展路径研究与实践综述	10
3.1.1	碳排放峰值预测及目标设定	10
3.1.2	低碳城市发展路径设计	14
3.1.3	低碳城市发展路径选择	24
3.1.4	低碳城市发展路径评估	27
3.1.5	小结	28
3.2	深圳市碳减排优超路径	29
3.2.1	深圳市走碳减排优超路径的必要性	29
3.2.2	深圳市碳减排优超路径的主要特征	31
3.2.3	深圳市碳减排优超路径的核心要素	36
4	深圳市碳排放变化驱动因素分析	68
4.1	基于调整的 LMDI 碳排放驱动因素分解方法	68
4.2	结果分析	69
4.2.1	各因素总体影响	69
4.2.2	制造业碳排放驱动因素分析	70
4.2.3	交通运输业碳排放驱动因素分析	73
4.2.4	服务业碳排放驱动因素分析	73
5	深圳市碳排放路径情景分析	75
5.1	情景分析方法	75
5.1.1	LEAP-Shenzhen 碳排放路径情景分析框架	75
5.1.2	能源需求部门划分	76
5.2	情景定义	78

5.3 情景参数	79
5.3.1 社会经济参数	79
5.3.2 电力业参数	80
5.3.3 制造业参数	85
5.3.4 交通部门参数	91
5.3.5 建筑部门参数	100
5.3.6 其它部门参数	103
5.4 情景分析结果	104
5.4.1 深圳市碳排放峰值路径	104
5.4.2 各部门碳排放路径	107
6 实现碳排放峰值的对策措施	116
6.1 电力业减排措施	116
6.2 制造业减排措施	119
6.3 交通部门减排措施	123
6.4 建筑部门减排措施	125
7 各部门减排障碍及政策建议	128
7.1 推进产业结构“退二进三”，优化制造业内部结构	128
7.2 电力业关键减排措施的推行障碍及政策建议	128
7.3 制造业关键减排措施的推行障碍及政策建议	129
7.4 交通部门关键减排措施的推行障碍及政策建议	131
7.5 建筑部门关键减排措施的推行障碍及政策建议	133
参考文献	136
附录 1 部门划分说明	142
附录 2 情景分析碳减排技术措施清单	143
附录 3 不同情景下各部门电力需求量	146
附录 4 深圳市碳排放路径情景分析结果汇总	150

深圳市碳减排路径研究

1 研究概述

作为国家低碳试点城市之一，深圳市高度重视节能减碳工作。先后出台了一系列政策措施加强工业、建筑、交通、商业和民用等领域的节能减排管理，促进各领域积极采用先进适用的节能技术，提高能效水平。此外，为了鼓励循环经济和节能减排项目的大力开展，深圳市于 2013 年颁布了《深圳市循环经济节能减排专项资金管理暂行办法》，为该类项目提供节能减排资金资助。同年 6 月 18 日，深圳碳交易平台正式上线交易，开创了我国碳市场的新局面。首批纳入碳交易的 635 家工业 2010 年碳排放总量合计约 3173 万吨，这些企业 2015 年的平均碳排放强度比 2010 年下降了 32%。2015 年 9 月，深圳市政府在《中美气候领导宣言》中宣布将于 2022 年达到碳排放峰值。

虽然深圳市的节能减碳工作取得了一定成绩，单位 GDP 能耗已处于全国、全省较低水平，但是深圳市能耗强度持续下降的空间较小，碳减排边际成本正在不断提高。在国家加强碳排放控制的新形势下，研究深圳市的碳减排路径，一方面可为深圳市制定碳减排政策、早日达到碳排放峰值提供科学参考，另一方面也可以为中国其他城市的低碳发展发挥示范性作用。

本文从构建理论框架、识别影响因素、分析峰值目标情景及提出政策建议四方面研究深圳市的碳减排路径，见图 1-1。首先，针对城市低碳发展路径研究进行文献综述，总结世界上主要城市的碳减排经验，在此基础上提出深圳市低碳发展优超路径的理论框架，包括结构调整、需求管理和提高能效、能源供给低碳以及技术创新等。其次，利用 LMDI 法分析深圳市碳排放的主要影响因素，包括结构因素（产业、行业结构和能源结构）以及技术因素。再次，基于企业调研、专家咨询及文献调研数据，从结构调整及减排技术应用两方面设定情景参数，利用 LEAP 框架分析深圳市尽早实现碳排放峰值的可能路径。最后，基于研究结果提出深圳市碳减排政策建议。

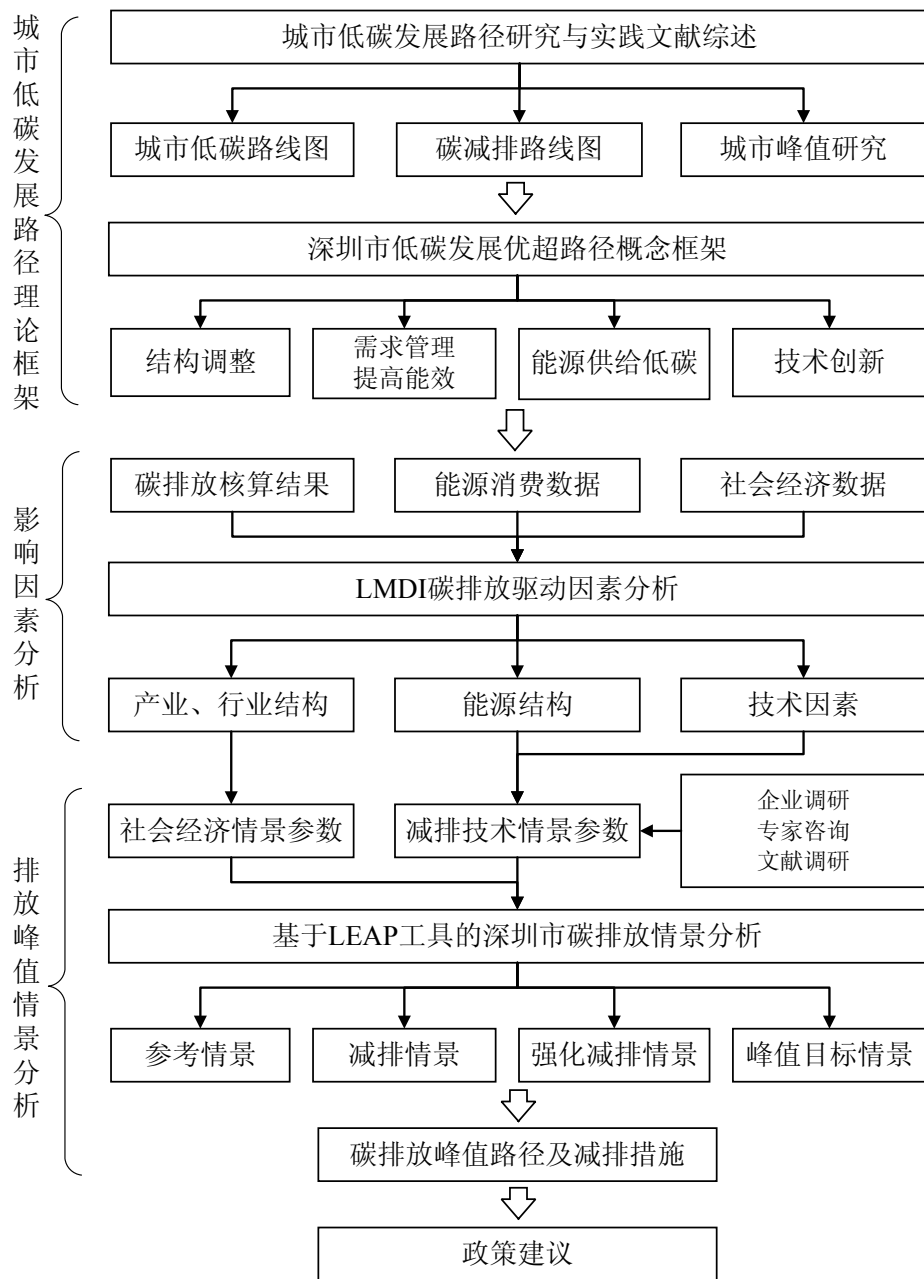


图 1-1 深圳市碳减排路径分析框架

2 深圳市低碳发展状况

2.1 社会经济概况

深圳市是中国南部滨海城市，位于广东省东南部珠江口的东岸，北连惠州市、东莞市、南隔深圳河与香港九龙新界相邻，东依大鹏湾、大亚湾，西濒伶仃洋与珠海市相望。全市土地总面积为 1996.78 km²，海岸线长 229.96 km。深圳市下辖福田、罗湖、南山、盐田、宝安、龙岗 6 个行政区，和光明、坪山、龙华、大鹏 4 个新区。

深圳经济在经历了三十年的高速增长后，正逐步转入中高速增长的新常态。1979 年至 2014 年，深圳 GDP 年均增速达到 23.5%，其中 2005 年至 2010 年年均增速降为 13.2%，2010 年至 2014 年进一步降至 9.8%。2014 年，深圳 GDP 达到 16001.98 亿元。其中，金融业、物流业、文化产业、高新技术产业是深圳市的四大支柱产业，增加值分别为 2237.54 亿元、1614.18 亿元、1213.78 亿元及 5173.49 亿元。

2005 年以来，深圳产业结构呈现“退二进三”的显著特征。第三产业增加值占 GDP 比重由 2005 年的 46.4%增至 2014 年的 57.3%，第二产业比重由 53.4%降至 42.7%，其中工业比重由 50.4%降至 39.7%。

近年来，深圳市人口增速趋向缓和。1979 年至 2014 年，常住人口从 31.41 万人增至 1077.89 万人，年均增长率为 10.6%，其中 2006 年至 2010 年常住人口年均增长率降为 4.6%，2011 年至 2014 年进一步降至 0.97%。

2.2 能源消费现状分析

2013 年深圳市能源消费总量为 3274.9 万吨标准煤¹，全社会用电量 728.2 亿 kWh，单位 GDP 能耗 0.256 吨标准煤/万元（按 2010 年不变价计算）。从终端用能部门看（见表 2-1），制造业占深圳市能源消费总量的比重最大，达到 40%以上。其中，计算机、通信和其他电子设备制造业、电气机械及器材制造业以及橡胶和塑料制品业分别占制造业能耗的 42%、11%及 10%左右，是制造业主要的耗能行

¹根据本研究调研数据估算。

业。虽然制造业能源消费量仍在增长，但占全市总量的比重呈下降趋势。建筑部门能源消费量占比仅次于制造业，占全市的 27%以上，比重相对稳定。交通部门能源消费量占比与建筑部门接近，为 24%左右，比重呈增长趋势。其他部门能源消费量占比较小，约为 7%，且比重保持稳定。

从能源品种看（表 2-2），净调入电力占深圳市能源消费总量的比重最大，达到 47%以上。这是由于深圳本地电厂发电量仅能满足全市约三分之一的用电量，大部分电力需从南方电网调入。油品约占能源消费总量的四分之一，这主要与深圳市道路运输和航空运输消耗大量石油制品有关。天然气占比保持在 15%以上，主要用于燃气电厂及建筑部门，未来有增长潜力。与国内其他城市相比，深圳市煤炭消费比重较低，仅为 11%左右，且比重持续下降，主要原因是深圳大部分电力从外部调入，且本地仅有一座燃煤电厂。垃圾发电占比约为 1%，近几年比重略有增长。

表 2-1 深圳市各终端用能部门能源消费量及占比

单位：万吨标准煤

部门	2011 年		2012 年		2013 年	
	消费量	比重	消费量	比重	消费量	比重
制造业	1264.9	41.2%	1270.4	40.4%	1324.5	40.4%
建筑部门	853.4	27.8%	872.7	27.7%	906.1	27.7%
交通部门	726.1	23.6%	776.0	24.7%	809.8	24.7%
其他部门	226.7	7.4%	227.7	7.2%	234.4	7.2%
合计	3071.0	100.0%	3146.9	100.0%	3274.9	100.0%

注：根据本研究调研数据及《深圳市统计年鉴》“主要能源按工业行业分组消费量”数据整理。“建筑部门”包括全市公共建筑和居住建筑，“交通部门”包括全市道路、轨道、铁路、水路及航空等交通类型，“其他部门”包括农业、采矿业、建筑业、水和气的生产和供应业以及电力业自用电。本研究对深圳市电力业、制造业、交通部门和建筑部门的用能情况进行了调研。调研了深圳市全部燃煤、燃气电厂，500 多家制造业企业，机动车（营运性的公交车、出租车、货车以及非营运性的汽车）及轨道交通运行情况，以及主要公共建筑和部分居住建筑的用能情况。对于调研未涵盖的部门及用能活动，本研究参考深圳市相关部门的统计资料进行估算。

表 2-2 深圳市能源消费结构

单位：万吨标准煤

能源品种	2011 年		2012 年		2013 年	
	消费量	比重	消费量	比重	消费量	比重
煤炭	352.8	11.5%	351.1	11.2%	352.1	10.8%
油品	776.0	25.3%	801.1	25.4%	832.8	25.4%
天然气	477.6	15.5%	488.7	15.5%	495.2	15.1%
垃圾发电	20.2	0.7%	28.3	0.9%	36.5	1.1%
净调入电力	1444.5	47.0%	1477.6	47.0%	1558.2	47.6%
合计	3071.0	100.0%	3146.9	100.0%	3274.9	100.0%

注：根据本研究调研数据及《深圳市统计年鉴》“主要能源按工业行业分组消费量”数据整理。净调入电力指从南方电网净调入的电力。

2.3 碳排放现状分析

（1）碳排放核算方法

本研究采用 LEAP 框架（Long-range Energy Alternatives Planning System）计算深圳市各部门的碳排放，包括化石能源消费直接产生的碳排放，以及因净调入电力而引起的间接碳排放。LEAP 框架下计算碳排放的基本方法见式 1：

$$C = \sum_j \sum_i \sum_m A_{j,i} E_{j,i,m} F_m \quad 1$$

其中， C 为深圳市能源相关碳排放量， $A_{j,i}$ 为部门 j 中第 i 类用能活动的活动水平（如汽车全年的车公里数）， $E_{j,i,m}$ 为部门 j 中第 i 类用能活动对能源 m 的消耗强度（如汽车单位车公里消耗的汽油量）， F_m 为能源 m 的碳排放因子（如汽油的碳排放因子）。

各部门化石燃料及电力消费量取自本研究的调研数据。化石燃料碳排放因子采用伯克利中国能源研究室 GREAT 工具²中的缺省因子。外来电力的碳排放因子（南方电网平均碳排放因子）取自国家发改委气候司 2013 年份发布的《2010 年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子》，假定该因子保持不变。

² GREAT 的全称为 Green Resources & Energy Analysis Tool，是伯克利中国能源研究室基于 LEAP 软件开发的一款用于分析中国城市（省市区）能源供需和碳排放的工具。关于该框架的详细说明见 <https://china.lbl.gov/tools/green-resources-energy-analysis-tool>

（2）碳排放现状分析

深圳市 2013 年能源相关碳排放总量为 6478.4 万吨 CO₂，比上一年增长 3.8%，增速高于 2012 年的 2.2%（见表 2-3）。随着居民生活水平的提高，深圳市人均碳排放量由 2011 年的 5.83 吨 CO₂/人增至 2013 年的 6.09 吨 CO₂/人，累计增长 4.5%。与其他一线城市相比，深圳该指标高于北京（5.29 吨 CO₂/人），低于上海（7.45 吨 CO₂/人）和广州（6.72 吨 CO₂/人）³。2011 年至 2013 年，深圳市单位 GDP 碳排放量累计下降 13.0%，达到 0.506 吨 CO₂/万元（按 2010 年不变价计算），在全国处于先进水平。

从各终端用能部门看，制造业是深圳市最主要的碳排放部门，排放量约为 2500 万吨 CO₂，占全市总量的 40%左右，且电力消费间接排放占制造业总排放的 95%左右（见表 2-4）。制造业排放主要来自计算机、通信和其他电子设备制造业、电气机械及器材制造业以及橡胶和塑料制品业，分别占部门排放的 42%、11%及 10%。建筑部门排放占全市总量的 27%左右，且电力消费间接排放占 90%以上。其中，公共建筑和居住建筑的排放量接近，分别占部门排放的 52%及 48%。交通部门排放占全市总量的 26%左右，且 2011 年至 2013 年累计增长率达到 11.6%，高于全市平均增速。其中，道路交通占部门排放的 60%左右，以非营运小汽车及营运货车排放为主。航空运输及水路运输分别占部门排放的 23%及 10%左右。

从碳排放的能源结构看，净调入电力占全市碳排放总量的比重最大，达到 44%以上。除此之外，油品排放占 27%左右，主要由交通部门的道路运输及航空运输产生。煤炭排放占全市总量的 15%左右，主要来自本地燃煤电厂。天然气排放占 12.5%以上，主要来自本地燃气电厂及建筑部门。垃圾发电产生的碳排放占全市的比重较小，在 0.2%以下。

³北京、上海及广州的人均碳排放量为 2011 年数据，取自伯克利中国能源研究室 BEST Cities 工具。

表 2-3 2011 年至 2013 年深圳市主要碳排放指标

指标	单位	2011 年	2012 年	2013 年
碳排放总量	万吨 CO ₂	6106.2	6240.4	6478.4
人均碳排放量	吨 CO ₂ /人	5.83	5.92	6.09
单位 GDP 碳排放量	吨 CO ₂ /万元	0.579	0.538	0.506

注：碳排放总量包括化石能源消费直接碳排放及净调入电力间接碳排放，人均碳排放量按常住人口计算，单位 GDP 碳排放量按 2010 年不变价计算。

表 2-4 深圳市各终端用能部门碳排放量及占比

单位：万吨 CO₂

部门	2011 年		2012 年		2013 年	
	碳排放量	比重	碳排放量	比重	碳排放量	比重
制造业	2489.5 (125.8)	40.8%	2487.0 (128.4)	39.8%	2581.6 (137.8)	39.8%
建筑部门	1651.8 (173.8)	27.0%	1684.1 (144.5)	27.0%	1742.0 (133.6)	26.9%
交通部门	1518.3 (1424.4)	24.9%	1622.8 (1513.9)	26.0%	1695.0 (1582.1)	26.2%
其他部门	446.6 (119.3)	7.3%	446.5 (123.8)	7.2%	459.8 (139.5)	7.1%
合计	6106.2	100.0%	6240.4	100.0%	6478.4	100.0%

注：各终端用能部门碳排放量包括化石能源消费直接碳排放及电力消费间接碳排放。括号中数字为各部门的化石能源消费直接碳排放量。

表 2-5 深圳市各类能源消费碳排放量及结构

单位：万吨 CO₂

能源品种	2011 年		2012 年		2013 年	
	碳排放量	比重	碳排放量	比重	碳排放量	比重
煤炭	962.6	15.8%	958.0	15.4%	960.8	14.8%
油品	1633.0	26.7%	1686.6	27.0%	1755.6	27.1%
天然气	781.8	12.8%	800.1	12.8%	810.7	12.5%
垃圾发电	4.9	0.1%	9.8	0.2%	14.8	0.2%
净调入电力	2723.8	44.6%	2785.8	44.6%	2936.6	45.4%
合计	6106.2	100.0%	6240.4	100.0%	6478.4	100.0%

2.4 节能减排目标及政策

2.4.1 总体规划

深圳市制定了低碳发展和节能总体规划。《深圳市低碳发展中长期规划

《2011-2020》》提出，到 2015 年万元 GDP 二氧化碳排放比 2010 年下降 21%，达到 0.90 吨，非化石能源占一次能源消费比重达到 15%；到 2020 年，万元 GDP 二氧化碳排放比 2005 年下降 45%以上，比 2015 年下降 10%，达到 0.81 吨，非化石能源占一次能源消费比重达到 15%以上。《深圳市节能“十二五”规划》提出，到 2015 年全市单位 GDP 能耗比“十一五”末期下降 19.5%，即由 2010 年的 0.494 吨标准煤/万元降至 0.398 吨标准煤/万元（按 2010 年价格计算）。

2.4.2 工业领域节能减排相关政策

《深圳新能源产业振兴发展政策》（深府〔2009〕240 号）提出，自 2009 年起，连续 7 年，每年集中安排 5 亿元，设立新能源产业发展专项资金（以下简称专项资金），用于支持新能源产业发展。支持对象包括包括太阳能、核能、生物质能、风能、储能电站、新能源汽车等领域的科技研发、装备制造、能源开发、推广应用以及产业服务等方面。《深圳节能环保产业振兴发展规划（2014—2020 年）》提出，围绕工业、建筑、交通等领域节能需求和大气、水、固体废弃物等领域环保需求，大力提高技术装备、产品、服务水平，加快推动节能环保产业集聚发展，到 2020 年，总产值超过 3000 亿元，成为我国重要的节能环保产业基地和创新中心。

2.4.3 交通领域节能减排相关政策

大力发展公共交通。2012 年实施的《深圳市综合交通“十二五”规划》明确提出，全日机动化出行中公共交通分担比例提高到 56%以上，新增城市轨道交通运营里程 156 公里，全市公交专用道里程达到 700 公里以上，公交站点 500 米覆盖率达到 93%以上。

推进新能源汽车应用。2015 年深圳市出台了一系列推广新能源汽车的政策，包括《深圳市新能源汽车发展工作方案》（深府办函〔2015〕6 号）、《深圳市新能源汽车推广应用若干政策措施》（深府〔2015〕2 号）以及《深圳市新能源汽车推广应用扶持资金管理暂行办法》（市发改委、市财政委 2015 年 9 月发布）。推广目标是，到 2015 年底新能源汽车推广应用总量超过 2.5 万辆（新增 20000 辆），其中新能源公交车保有量达到 4500 辆以上（新增 1500 辆以上）；纯电动出租车保有量

达到 4500 辆以上（新增 4000 辆以上）；新增纯电动物流、环卫车 3500 辆以上；新增纯电动通勤旅游客车 2000 辆以上；个人、社会团体与企业新增购买新能源汽车 9000 辆以上。

2.4.4 建筑领域节能减排相关政策

深圳市于 2006 年颁布了《深圳经济特区建筑节能条例》，对民用建筑在建设、改造、使用过程中的能源利用提出了相关要求。2011 年实施的《深圳市建筑节能与绿色建筑“十二五”规划》提出，“十二五”期间，预计实现建筑领域节能总量约 270 万吨标准煤，减排二氧化碳约 649 万吨的目标，建筑节能总量占全社会总节能量比例约为 20%。2013 年深圳市政府公布了《深圳市绿色建筑促进办法》，推进建筑全寿命周期内的节能、节地、节水、节材、减排工作。

3 深圳市碳减排路径概念与理论框架

3.1 城市低碳发展路径研究与实践综述

城市低碳发展路线图，是指城市为实现低碳发展而制订的战略、规划和详细的计划、方案，以及对城市制订低碳城市战略、编制温室气体排放清单、制定和实施规划以及监测评估等一系列行动的过程和制度设计。低碳发展路线图是一种能够有效识别市场需求、预测技术发展前景和技术发展适宜性的有效工具，它能够帮助企业、行业和国家制定出急需的低碳技术发展战略规划。

在总结国内外文献的基础上，本研究提出城市低碳发展路线图可主要从以下三个方面进行构建：一是路径设计，二是路径选择，三是执行评估、反馈和调整。在路径设计方面，国内外有关低碳城市发展路线图的文献基本是在能源需求、能源供给、能源政策等能源模型的基础上建立碳排放情景分析，对未来各种减排政策下的碳排放量进行情景预测。在路径选择方面，必须综合考虑路径的经济成本、减排措施完成时间等因素，选择出真正符合本城市特点、能够持续发展的优越路径。在执行评估、反馈和调整方面，必须定期对所选择的减排路径进行评估和反馈，定量分析该路径的执行效果，对异常发生、脱离正常路径的情况采取相应措施进行调整。本文将按照上述三个步骤对国内外低碳城市发展路线图进行综述。

3.1.1 碳排放峰值预测及目标设定

二氧化碳排放量预测一直是发达国家和发展中国家非常关心的问题，所以各国学者对衡量碳排放量与人类经济发展、人口数量、能源利用等因素的模型都进行了大量的研究。由 OECD 出版的联合国环境规划署报告（2012）高度强调了建立新的预测模型的需要，以衡量未来人类社会发展、自然环境及经济成本收益。另外，各联合国成员国 2000 年在《千年发展目标》（MDGS）上承诺“将环境可持续应用于政府政策和规划”将于 2015 年到达截至时间，新的发展框架已在可持续发展大会（2012）上确定。另外在 2009 年哥本哈根大会上，发达国家各自公布了截至 2020 年的量化减排目标，能否达到减排目标或者以何种方式达到目标成为各国决策者最关心的问题。在这个大环境下，各国政府都在寻求能为政府决策进行理论支撑的低碳发展路径和碳排放预测方法，而学术界也对此开展了大量的研究。

作为发展中国家的中国，2013 年的碳排放总量约占世界总排放量的 29%⁴，所以中国的减排政策会很大程度关系到世界减排目标，因此中国的国家和地区的碳排放趋势预测，尤其是中国的峰值问题一直以来都是国内外学者关注的重点，国内外学者对此进行了大量相关研究。

3.1.1.1 EKC 曲线法

对于环境污染与经济增长之间的关系，Simon Kuznets 1955 年提出了 EKC(Environmental Kuznets Curve) 假设。该理论认为，环境质量在经济发展初期阶段，随着人均 GDP 提高而退化；经济发展到一定阶段，环境随着人均 GDP 提高而改善。即环境质量与经济水平呈倒“U”曲线型关系。后来有大量学者针对 EKC 假设进行了研究。早在 20 世纪初，英国经济学家庇古就已经对外部性问题进行了研究。该研究通过分析边际私人产品与边际社会产品之间的差异，得出了外部性是由于边际收益并不能完全反映边际成本而造成的市场失灵现象这一结论。同时他提议通过征税使得成本内部化来消除环境的外部性。1994 年，Shafik 在研究颗粒悬浮物与经济增长之间的关系时，也发现它们两者之间呈现倒“U”型曲线关系。1998 年，Schmalensee 采用国家间 1950 年—1990 年的面板数据进行研究，发现人均收入与人均碳排放量之间存在的是倒“U”型曲线的关系。1999 年，Galeotti 和 Lanze 通过对 110 个发展中国家面板数据的研究分析，进而得出了收入与二氧化碳排放量之间呈现的也是倒“U”型曲线的关系。此后也有许多学者对此提出质疑。1991 年，Grossman 和 Krueger 通过对烟尘与经济发现两者之间呈现的是“N”型曲线的关系。2003 年，Friddl 和 Getzner 对 1960 年—1999 年奥地利人均实际 GDP 和二氧化碳排放量之间关系进行了研究，发现两者之间存在的也是“N”型曲线关系。总结来看，EKC 假设应用在碳排放领域的方法主要是回归分析，即利用 EKC 曲线的多项式形式，根据历史数据做回归分析，确定各项系数后再预测未来碳排放。

最近几年，国内外学者也运用 EKC 曲线法对碳排放进行了各类研究。Zhao and Du(2015)针对 OECD90 国家和中国 2050 年前的碳排放进行了预测，利用历史数据

⁴数据来源：全球碳计划组织，2014

将 CO₂ 排放的 EKC 曲线做多元回归分析,并在不同情景下预测了上述国家的碳排放趋势。Pérez-Suárez and López-Menéndez(2015)总结了关于 CO₂ 预测的各类量化研究方法,并利用 EKC 和 ELC 曲线法针对 175 个国家的 CO₂ 排放数据进行了回归分析,预测了 2020 年以前的各国 CO₂ 排放趋势,发现 EKC 曲线和 ELC 曲线回归对不同国家有特定的适用情况。(Yu, 2014)基于 EKC 曲线对 36 个高收入国家的 CO₂ 排放量和 GDP 进行了回归分析,发现多数国家短期内 EKC 假设符合的很好,但长期多数国家不符合 EKC 假设。

3.1.1.2 灰度算法

灰色系统理论 (Grey Theory) 目的是针对解决既无经验,数据又少的不确定性问题,利用灰关联分析找到各个因素之间的关联程度,寻求系统中各要素之间的主要关系,找出影响系统发展态势的主要因素,从而掌握事物的主要特征。灰关联分析实际上是一种相对性的排序分析,它根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,它着眼的是数值大小所表示的序关系,其模型不是一个函数模型,而是寻找序列各数值之间的序关系模型。然后在灰关联分析以及灰色建模的基础上,用灰生成方法对原始数据进行处理,建立动态微分方程,对系统行为进行外推预测。

灰度理论运用在碳排放领域主要是灰色 GM(1, 1)预测模型,它有很多优势:能在原始数据较少的情况下得到满意的预测结果,既可以用于短期预测,也可以用于中长期预测,且预测精度比其他一般预测模型要高。Pao and Tsai(2011)利用灰度算法预测了巴西短期内能源消费、GDP 和 CO₂ 排放的关系,并根据模拟结果给出了一些关于能源消费的建议。Wu and Liu et al.(2015)利用灰度模型检验了巴西、俄罗斯、印度、中国、南非的 CO₂ 排放量与能源消费、城市人口、经济增长之间的关系,并通过灰度预测模型预测了上述国家的 CO₂ 排放量增长率。Liu and Zong et al.(2014)通过灰度模型和指数回归法,预测了 2020 年前中国火力发电和碳排放趋势,并根据中国许诺的减排目标提供一些策略建议。

3.1.1.3 KAYA 模型

日本 Yoichi Kaya 教授于 1989 年在 IPCC 的一次研讨会上提出的。他提出通过一种简单的数学公式描述经济、政策和人口等因子与人类活动产生的 CO₂ 之

间的关系，从中可以发现以上几种不同的影响因素对碳排放的影响力，这就是 Kaya 恒等式。文字表述为： $\text{CO}_2 \text{ 排放量} = \text{人口} \times (\text{GDP} / \text{人口}) \times (\text{能源消费量} / \text{GDP}) \times (\text{CO}_2 \text{ 排放量} / \text{能源消费量})$ 。对 KAYA 恒等式两边同时取自然对数后可以把碳排放分解成人口、人均 GDP、能源消费强度、碳排放强度四个因素的贡献加和，从而可以控制变量研究单一因素对碳排放的影响。He(2014)利用 KAYA 恒等式的一阶近似，推导出实现碳排放峰值的必要条件，并以发达国家的数据检验了推导结果。然后以此为基础，对中国进行了情景分析和不确定性分析，并在各情境下预测了峰值。最后对政府提出了促进 CO_2 排放达峰值的一些对策。Yuan and Xu et al.(2014)基于 KAYA 恒等式，利用情景分析方法构建出考虑人口、GDP、城市化率等多因素的中国经济发展状况，从而模拟出 2050 年前的能源消费趋势和碳排放趋势。

3.1.1.4 MERGE 模型

Blanford and Richels et al.(2008)利用校准的 MERGE 模型预测了不同情境下 2100 年前的中国、印度、美国等国家的能源消费情况和碳排放情况，并分析了由此增加的环境成本。Kypreos(2007)将内在技术学习(ETL)引入到 MERGE 模型中，运用 MERGE 模型对电力市场和非电力市场中 ETL 对碳减排的影响进行了分析，得到的结论是，承诺发展新技术以提高学习曲线，能够大幅度地降低减排成本，能有效促进空气中碳浓度的降低。

3.1.1.5 其他碳排放预测模型

柴麒敏与徐华清（2015）运用 IMAC 模型，围绕中国的许诺的 2030 年排放峰值能否尽早出现和以何种水平出现等问题展开讨论，从发达国家的发展轨迹和中国现状来分析中国实现排放总量控制和峰值的可行区间和战略定位，然后基于 IAMC 模型对中国进行情景分析，提出了现阶段的目标建议。

Martin and Bishop et al.(2015)运用 Bayesian 方法预测了英国交通领域的能源消费和碳排放，预测结果超出了英国 2020 年的 CO_2 减排目标，最后作者呼吁汽车生产商要加强技术研发。Pongthanaisawan and Sorapipatana(2013)基于一系列计量经济学模型，运用情景分析方法，对泰国 2030 年以前的交通行业的能源消费和碳排放趋势进行了预测，并提出了一些政策建议。Ren and Wang et al.(2015)基于各类能源消费量和

城市化率的历史数据，利用碳排放因子方法，预测了山东 2020 年的煤炭和石油的碳排放量。

3.1.2 低碳城市发展路径设计

在众多碳排放情景分析中，按照所运用的模型分类可大致分为以下四种：自上而下模型、自下而上模型、混合模型和其他模型（具体详见表 3-1）。自下而上模型是通过对具体的技术、工业经济参数等进行建模，对能源供给、能源使用、能源转换技术进行了详细的描述。自下而上模型又可细分为两类：以能源供应与转换为切入点的模型，如 MARKAL、LEAP 等；以能源需求与能源消费为切入点的模型，如 LEAP、MEDEE 等。自上而下模型主要是从宏观经济角度，研究宏观经济变动带来的能源供需的变动，如 GDP、人口、价格弹性等因素的变化带来能源供需的变化。而在自上而下模型中，技术因素只能在生产函数中抽象地反映，典型模型如 CGE、GEM 模型等。混合模型是既考虑技术选择的成本，又考虑价格弹性的作用，是自上而下模型和自下而上模型的综合，如 NEMS、IPAC 等。其他类型则是基于不同的理论基础，对能源和碳排放进行了综合考量。

表 3-1 低碳城市发展路线图模型分类

模型分类	典型模型
自上而下模型	CGE、GEM、GEM-PACK、3Es、DRC、MACRO 等
自下而上模型	MARKAL、TIMES、LEAP、AIM、EFOM、MEDEE、MESSAGE、WASP 等
混合模型	MARCAL-MACRO 、IPAC、NEMS、POLES、BCM、MIDAS、GCAM、IMAGE、Witch、ReMIND 等

3.1.2.1 自上而下模型

（1）CGE 模型

基于一般均衡理论的能源—经济—环境 CGE 模型能够较为有效地分析和模拟公共经济政策、能源政策及环境政策的实施结果。80 年代末期，CGE 主要是模拟能源、环境与经济之间的互动影响。目前，世界上许多国家都建立了自己的 CGE 模型，这些模型在能源贸易、能源环境及税收政策分析方面表现出了明显的优越性。Thepkhun and Limmeechokchai et al.(2013)运用 CGE 模型——AIM/CGE 模型，分别研究了泰国碳交易和运用 CCS 技术下的温室气体排放。Hübler and

Löscher(2013)运用 CGE 的扩展模型 PACE 模型,在宏观经济和部门水平的基础上,分析了欧盟到 2050 年的低碳发展路线图。得出的结论是,要想实现欧盟减排路径,必须综合考虑技术、方针设计和部门因素。

(2) GEM-E3 模型

GEM—E3 模型是欧盟几个主要研究机构于 20 世纪 90 年代合作开发的一般均衡模型,是动态、递归、模块化的能源经济模型,其核心是 CGE 模型。该模型的目的是研究世界区域或欧盟国家的经济、能源和环境三者之间的内在关联,包括气候变化对能源、经济、环境的影响等多个政策分析工具。Proost 等(1992)应用该模型研究认为碳税政策是比利时实现温室气体减排目标的最有效手段。Bahn(2001)则研究了排放权交易的国家化对瑞士宏观经济及其碳税政策的影响。Ciscar and Saveyn et al.(2013)运用动态的 GEM-E3 模型对中国、印度和日本 2010-2050 年的碳排放政策进行了分析。文章发现,延迟一些重要的减排,长期来说并不能增加经济利益,相反,过分依赖于 0 碳排技术可能会增加风险致使 2℃ 的目标无法达成。

(3) LMDI 因素分解

研究经济发展,产业结构,能源结构等因素对碳排放的贡献一直都是低碳领域的研究热点,常用的方法有指数分解方法 IDA(Index Decomposition Analysis)以及结构分解方法 SDA (Structural Decomposition Analysis)两大类,其中, LMDI 属于 Divisia IDA 的一个分支,由于具有全分解、无残差、易使用,以及乘法分解与加法分解的一致性、结果的唯一性、易理解等优点而在众多分解技术中受到重视,目前在许多领域得到广泛应用。Tan and Dong et al.(2015)运用 LMDI 方法,分析了重庆 2000-2012 年的碳排放增长因素,然后基于 SPIRPAT 模型,从人口、GDP、能源结构、产业结构、技术进步的方面进行情景分析,预测了重庆 2020 年的碳排放量。Jiao and Qi et al.(2013)基于 LMDI 方法,从产业结构、能源结构等方面构造情景,预测了中国 2020 年前的碳排放量。并针对中国的 2020 年减排目标进行了策略分析。

(4) 其他自上而下模型

Dong and Fujita et al.(2013)运用 HPIMO 模型(改造版投入产出模型)模拟了“工业共生”情境下的中国济南和柳州的能源消费和碳排放情况,并计算出各种减排措施贡献。Wang and Zhang et al.(2014)采用从上向下法,在给定峰值年份的情况下,

从能源系统优化,发电结构优化和能源需求等方面模拟了不同情景下的碳排放趋势,并给出了一些工业调整的建议。

3.1.2.2 自下而上模型

(1) MARKAL/TIMES 模型

MARKAL (Market Allocation ,MARKAL) 模型是一个基于单目标线性规划方法的能源系统分析工具,是在满足给定的能源需求量和污染物排放量限制条件下,确定出使能源系统成本最小化的一次能源供应结构和用能技术结构。目前世界上有近 70 个国家运用 MARKAL 模型进行能源供给的分析,如 Chen(2005)、Rafaj and Kypreos(2007)、Jiang and Wenying et al.(2008)、Blesl and Kober et al.(2010)、Wright and Belt et al.(2010)、Chiodi and Gargiulo et al.(2013)、Zhou and Fridley et al.(2013)等进行的相关研究。Tsai and Chang(2015)运用 MARKAL 模型从技术和碳税两方面结合,对 2050 年台湾低碳城市发展进行了路径设计。得出的结论是,为保证目标的达成,台湾需要从技术和征收碳税两方面同时进行设计和规划。

由 MARKAL 模型发展而来的 TIMES 能源系统模型,也成为低碳城市路径设定中一种广泛采纳的方法。Tigas and Giannakidis et al.(2015)运用 TIMES 模型,分析了希腊的电力和交通部门到 2050 年的低碳发展路径。Chiodi and Gargiulo et al.(2013)运用爱尔兰 TIMES 能源系统模型,分析了爱尔兰到 2050 年碳减排 80%的低碳发展路径。Simoes and Fortes et al.(2015)基于 TIMES 模型,从能源利用效率、经济增长率、政策和投资渗透率、可用于水力发电的水量、一次能源进口价格的角度构建了 6 个情境,预测了各情境下葡萄牙的碳排放量。Vaillancourt and Alcocer et al.(2014)对加拿大建立了“多区域能源系统模型”,并通过情景分析预测了 2050 年前加拿大的能源消费趋势。

(2) LEAP 模型

LEAP 模型即长期能源可替代规划系统模型(Long-range Energy Alternatives Planning System)。它是由瑞典斯德哥尔摩环境研究所及美国波士顿 Telles 研究所共同研究开发的一个计量经济模型。LEAP 模型是以能源需求、消费和环境影响为研究对象,通过数学模型来预测各部门的能源需求、消费及环境影响。该模型实现了对能源消费系统的仿真。

Zhang and Feng et al.(2011)运用 LEAP 模型模拟了中国北京的三种城市发展路径与能源消费和碳排放的关系，并从交通、工业、居住等行业角度分析了三种情景的碳排放峰值年限。Liang and Wang et al.(2014)基于 LEAP 模型，从产业结构、能源结构、GDP 等方面构建三种情境，预测了重庆 2030 年前的碳排放趋势，并预测重庆碳排放在常规情景下 2025 年将达峰值。Ahanchian and Biona(2014)基于 LEAP 模型，对大马尼拉市交通行业的能源需求设计不同情景，计算出了 2040 年对应的碳排放量。Phdungsilp(2010)基于 LEAP 模型，对泰国曼谷居住、发电、交通等行业设计不同能源需求情境，并计算出 2025 年的碳排放量。结果显示，最有效的减排措施是实现交通领域的模式转化，由私家车主导转为公共交通。Feng and Zhang(2012)以北京为案例，用 LEAP 模型分析了未来能源需求的趋势，并从 GDP、城市化率、产业结构等方面构造情景分析，预测了 2030 年前的北京碳排放趋势。常征（2012）基于 LEAP 模型、情景分析、趋势外推等数学建模思想和工具，对上海市碳排放摄者了三大综合情景和九个子情景，深入分析了 2000-2050 年之间各个年份上海能源利用与碳排放情景，为上海市技术选型、政策制定提供了数据支撑和决策依据。量。Huang 等(2010)应用 LEAP 模型对台湾中长期能源需求与供应进行了预测。Zhao 等(2011)则侧重对中国实施低碳经济发展的未来前景进行展望。

（3）AIM 模型

Akashi and Hijioka et al.(2012)运用 AIM/Enduse[Global] 与 AIM/ Impact[Policy] 模型分析了到 2050 年亚洲和世界各类碳价情景。Ashina and Fujino et al.(2012)运用 backcasting/AIM 模型，在日本已确定的 80%减排目标背景下，从 GDP、人口、居住方式、产品结构四个方面构造出两个情境分析了日本达到减排目标的发展路径，并给出了相应的投资建议。Su and Zhou et al.(2014)在 2011 年福岛核泄漏事件过后，运用 AIM 模型对 2030 年的福岛二氧化碳减排进行了情景分析。得出的结论是，福岛低碳城市的建设需要从三个方面着手：提高能源的利用效率、增加可再生能源、引入 CCS 技术以减少对核能的依赖。

（4）其他自下而上模型

Shigeto and Yamagata et al.(2012)为使日本到 2050 年减排 80%，研究了一种简单易行的适用于普通城市的以检测技术为基础的情景分析减排方案。文章最后将

这种方案运用到了京都的实践中，结果发现到 2050 年居民生活的 80%碳减排是可能的。缺陷在于，文章假设了减排主要来自于技术，但是未来家庭构成的变化，高碳排放城市到低碳排放城市人口流动等社会经济条件的变化该文章并没有考虑在内。

3.1.2.3 混合模型

(1) IPAC 模型

IPAC 模型是由中国国家发改委能源研究所在长期的能源系统分析研究过程中，通过多种国际国内合作，完成的中国能源环境综合政策评价模型。IPAC 模型是一个包括多种方法论的多模型框架，其中有自顶向下型的一般均衡模型(CGE 模型)，也有详细描述分部门技术的自底向上型模型，同时还有介于两者之间的部分均衡模型和动态经济学模型。姜克隽与胡秀莲等（2009）在文章中阐释，IPAC—AIM/技术模型是专门针对中国地区的区域模型，它包括 3 个子模型，即能源服务需求预测模型、能源效率估算模型和技术选择模型，是一个典型的自底向上型模型。IPAC—Emission 模型的目标是对中国和其他地区在全球环境下，未来各种长期温室气体排放趋势下可能采取的政策措施进行评价。IPAC—CGE 模型则是 IPAC 模型组中的经济模型，是一个一般均衡模型(CGE 模型)，考虑各经济活动之间的影响与关联，在 IPAC 模型中主要进行各种能源环境政策对经济影响的分析，同时可以进行中长期能源与环境情景分析。

姜克隽与胡秀莲等（2009）利用 IPAC 模型，设置了 3 个碳排放情景，分析了中国减排所需的技术，对我国未来中长期的能源与温室气体排放进行了分析，探讨了中国实现低碳情景所需要的发展路径。得到的结论是，中国要实现低碳发展路径，必须着重发展具有国际领先地位的重大清洁能源开发、转换和利用技术，大力发展可再生能源和核电技术，提高公众意识，使低碳生活方式成为普遍行为，逐步实施能源税和碳税。李彬（2014）利用 C++BULIDER 语言、GAMS 语言和 IPAC 模型框架开发了 IPAC-Beijing 模型，提出了理性预期的情景分析法，并以 2005 年为基年利用模型计算出了三种情景下的北京市优化能源结构改善大气环境质量的发展路径，给出了 2030 年的低碳能源发展目标和政策建议，同时为国内其他省市在制定相关政策时提供了定量理论分析支撑。庄幸与姜克隽（2007）利用 IPAC 模

型研究我国未来公路交通能源需求以及生物燃料替代的发展情景。研究表明：未来我国公路交通倍增的油品需求对我国石油供应造成巨大压力，推广新型汽车技术和发展替代燃料是降低公路交通油品消耗的战略措施，混合动力汽车技术与生物燃料结合是我国未来公路交通最佳的技术选择，能有效降低我国的交通碳排放。

(2) MARKAL-MACRO 模型

MACRO 模型是 Manne 等研究开发的一个宏观经济模型，通过生产函数来描述能源消费、资金、劳动力和经济产出 GDP 的关系，其目标函数是寻求总的能源折现效用最大，模型最大的效用函数决定了一系列最优储备、投资、消费的结果。MARKAL-MACRO 模型则是将自下而上的 MARKAL 模型与自上而下的 MACRO 模型相结合，既考虑技术因素，又考虑宏观经济因素，对能源系统进行综合考量。

周伟与米红(2010)使用 MARKAL-MACRO 模型，测算未来中国能源消费需求，然后设定了能源消费的 3 种情景，并分别测算了各行业的排放量，最后把研究结果同发达国家减排路径做对比，分析中国的碳排放峰值时间。Chen(2005)应用 MARKAL—MACRO 模型分析了中国 2050 年前 CO₂ 的边际减排成本、GDP 损失率以及碳排放减少率。

(3) PURGE 模型

Mohareb and Kennedy(2012)运用 PURGE 模型从发电，私人交通，建筑，废弃物处理四个方面计算了加拿大大多伦多地区能源消费和碳排放情况，并利用情景分析预测了多伦多地区 2040 年前的碳排放趋势。Mohareb and Kennedy(2014)运用 PURGE 模型从技术角度检验了大多伦多地区如果实现 2050 年以前减少 80% 的二氧化碳排放的目标的可能性，构造并计算出相应情景的二氧化碳趋势曲线。

(4) 系统动力学模型

系统动力学方法 (system dynamics method) 最早是 1956 年由美国麻省理工学院的 J W. Forrester 提出的，它以微观系统结构为出发点，利用反馈机制，定量描述个要素之间的关系，用计算机软件进行仿真分析。Liu and Yang et al.(2012), Tigas and Giannakidis et al.(2015)运用系统动力学模型，构建了中国重庆市能源系统模型，并进行情景分析，预测了 2020 年前的碳排放趋势。从模拟结果看，低碳和节能政策可以极大地减少重庆的碳排放。Robalino-López and Mena-Nieto et al.(2014)以厄瓜多尔共和

国为案例，基于系统动力学模型，从 GDP、产业结构、能源结构的角度构建情景分析，预测了 2020 年前的碳排放趋势。

此外，其他典型的混合模型，如美国能源部(EIA/DOE)开发的 NEMS 模型、奥地利国际应用系统分析研究所(the International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)与世界能源委员会(the World Energy Council, WEC)合作开发的 IIASA-WEC E3 模型等世界范围内也有着较为广泛的应用。其中最具代表性的是由美国能源部(DOE)于 1993 年开发的能源经济区域模型 NEMS。美国能源部利用 NEMS 发布年度能源展望(Annual Energy Outlook)，它综合考虑了宏观经济、财政因素、世界能源市场、资源可获得性和成本、行为和技术选择标准、能源技术的成本和运行特性以及人口统计资料，反应了能源的生产、进口、转化、消费以及价格的情况。

3.1.2.4 其他情景分析方法

在各类情景分析中，除了运用模型进行情景设置外，还有不涉及模型的情景分析研究。不设计模型的研究内容都较为具体，如从技术减排角度设置情景分析的：Farrahi Moghaddam and Farrahi Moghaddam et al.(2013)分析了减少未来碳排放的障碍、促进策略和技术部署（包括 CCS）。Kawase and Matsuoka(2013)研究了全世界 230 个国家和地区 2050 年较 1990 年减排 50%的碳减排目标。Yanine and Caballero et al.(2014)提出了综合微生产电力系统，以此作为缓解电力供给和能源需求回馈管理(EDRM)的手段。Pukšec and Mathiesen et al.(2014)运用国家能源需求模型，分析了克罗地亚长期能源政策即针对能源效率和可再生能源的能源节约政策。Selvakkumaran and Limmeechokchai et al.(2014)在 LCS 情景分析下，模拟了泰国工业能源部门，评估了在碳税和低碳社会情景（LCS）的排放限制下的减排潜力。Stamford and Azapagic(2014)研究英国发电工业的碳排放减排，从各类能源发电技术的角度构建情景分析，研究不同力度的减排手段对 2070 年前碳排放的影响。Shigeto and Yamagata et al.(2012)构建了基于能源终端消费的 CO₂ 排放模型，从交通电气化，促进木质房屋建设等减排技术设计了日本京都的减排情境，论述了实现 2050 年碳排放降低 80% 的目标的可能性。Roy and Tokuyasu et al.(2012)对生物乙醇发酵的工厂规模等因素进行情景分析，预测了日本能源消费和碳排放量及各自的成本。

从减排政策角度设置情景分析的：Tirumalachetty and Kockelman et al.(2013)针对美国德克萨斯州奥斯丁市的居住和交通领域能耗进行研究，从不同的居住能耗和土地利用以及不同的交通政策的角度设置情景分析，预测了奥斯丁市 2030 年的碳排放量。Irani and Chalak(2015)以黎巴嫩首都布鲁特为案例，以针对混合动力汽车的不同税收政策设置情境，计算了不同情境下节约的燃油成本和降低的碳排放，为政府税收决策提供了建议。Vera and Sauma(2015)应用 OES2000 模型预测的智利能源需求，对不同力度的碳税和不同的能源需求构建情景分析，预测了智利的 CO₂ 排放趋势。Ko and Myung et al.(2014)以韩国为案例，对不同减排政策力度建立情景分析，预测了交通行业 2030 年前的碳排放量。Tao(2011)以中国青岛为案例，通过借鉴英国和日本发展低碳城市所采取的措施，从能源供给、工业结构、废弃物处理等方面提出了低碳发展路径。Yao and Luo et al.(2013)以中国深圳为案例，通过总结外国低碳城市的特点和路径，提出一系列量化指标来衡量低碳城市发展程度。然后通过主成份分析法和层次分析法，分析了深圳的发展状况，并结合计算结果为深圳低碳发展提出了一些建议。Cao and Li(2011)分析了中国建设可持续发展城市的现状和面对的困难，并提出建设低碳-生态城市可采取的发展策略，然后分析了中国天津作为低碳城市的典范是如何贯彻低碳发展策略的。Lehmann(2013)以德国柏林和中国上海为案例，对比了两个多中心城市的现状和历史，并提出了上海以柏林为参照发展低碳城市的发展路径。Chitnis and Druckman et al.(2012)基于 ELESa 模型分析了英国居民消费结构与温室气体排放的关系，并对不同消费指标增长率设置情境，计算出英国 2030 年的温室气体排放量。根据结果建议政府应该通过税收等政策改善消费结构从而降低碳排放量。Banister and Hickman(2013)以德里为案例，对不同的交通结构建立情景分析，预测了相应情景下的 2030 年碳排放量。

此外，还有一些对低碳城市的研究中，作者用论证的方式分析了特定城市的现状，然后总结出优势和不足，为决策者提出一些战略建议。Whiteman and de Vos et al.(2011)分析了荷兰鹿特丹市的低碳减排路径，以高污染 TransLogis 公司为案例，阐述了如何通过商业策略和公司转型实现低碳目标的。Yu(2014)分析了中国 8 个“绿色低碳示范城”的现状和存在的问题，并提出了可能的解决方案，最后通过对之前案例的分析，论述了中国在城市化和工业化过程中坚持低碳发展的必要性。Feliciano

and Proserpi(2011)讨论了应对气候变化不同级别的政府应采取什么级别的政策才是比较合理的。然后以美国南加州的布劳沃德县为例，分析了当地政府政策是如何应对能源衰减和气候变化的，并分析了政策的合理和不足之处。

3.1.2.5 路径设计总结

（1）自上而下模型总结

自上而下模型是以经济学模型为出发点，以能源价格、经济弹性为主要的经济指数，集中地表现它们与能源消费和能源生产之间的关系，主要适用于宏观经济分析和能源政策规划方面的研究。这类模型比较适合于对市场体系比较完善的宏观经济进行模拟。中国目前正处于转轨经济的特定时期，这种情况下利用自顶向下模型得到的模拟结果可能和实际情况相差较大。在利用此类模型时，注意其前提条件以及一些相关假设是否对中国适用。

自上而下模型优点在于，它采用经济学方法，利用大量数据进行预测，通过经济指标决定能源需求，反映了被市场接受的可行技术，便于进行经济分析。从另一角度来看，自上而下模型强调了能源供给的变化。自上而下模型的缺点在于，它不能详细地描述技术的变化，低估了技术进步的潜能，不能控制技术进步对经济的影响。

（2）自下而上模型总结

自底向上模型多采用线性规划理论、非线性规划理论、多目标规划理论、系统动力学方法以及投入—产出方法建模。这类模型对技术有详细的描述，利用分散的数据详细描述能源供给技术，可直接评价技术选择的成本，能够充分反映技术对能源系统影响的潜力，同时更侧重能源需求对系统的影响。

这类模型的优点是利用分散的数据详细地描述供给技术，反映了技术的潜力，可直接评价技术选择的成本。自下而上模型的缺点是利用工程学方法，更强调能源消费的变化，忽略了能源部门和其它部门的关系。由于需求是外生给定的，缺乏需求与价格间的相互作用，从而忽略了能源服务投入与其他投入要素之间的替代效应以及价格导致的节能效应。从另一角度看，它也高估了技术进步的潜能。此外，由于很难收集到所有能源技术的数据，只能用关键技术来代替其它技术的作用，所以估计技术进步方面的潜力也会失真。

（3）混合模型总结

混合模型是对能源系统（从能源的开采、转化、运输、市场到最终能源需求）的模拟，通过系统仿真来预各部门能源的供应能力、能源价格、需求量以及宏观经济参数，从而为国家制定能源战略和决策提供信息支持，因此既包括自顶向下的宏观经济模型，又包括自底向上的能源供应、需求模型。这类模型比较适合于中-短期研究，丰富的技术信息有助于解释大部分的能源需求。

混合模型的缺点是数据获取比较困难，优点是综合了上述两种模型的优点，既充分考虑技术选择的成本，又考虑了价格弹性的作用，是对整个能源系统的模拟和分析，便于进行更详尽的能源经济分析。混合模型的研究范围多是全球的、区域的或国家的，功能比较齐全，结构比较复杂，是对现实能源系统进行模拟和仿真的复杂巨系统。

典型城市的低碳发展路线图比较见表 3-2。

表 3-2 典型城市的低碳发展路线图

城市	目标设定	情景设置	时间期限
大伦敦市	全市总量目标	1. 现实情景 2. 不考虑国际和国家减排政策的减排情景 3. 考虑国际和国家减排政策的进一步减排情景 4. 按照部门的情景分析	2025 年中远期计划
斯德哥尔摩	人均减排目标	1. 现实情景 2. 减排情景。按照正在进行的、计划中的、以及酝酿中的项目，量化了每年的减排量和共同收益。	1998~2025 年短期、中期和长期目标
西雅图	全市总量目标	1. 现实情景 2. 基于设定年份（2012 年）的零方案的参照情景 3. 基于不同行业的预期目标以及实现目标的各行业的行动，按照不同的行动计划估算了到 2012 年每年的碳减排量。	2006~2025 长期目标中包括了短期、中期和长期框架计划
纽约	全市总量目标	1. 现实情景 2. 规划情景：分行业目标以及实现目标的重要行动。 3. 减排情景：分为四种情况给出了要求的温室气体减排量，每种情况都有相应的目标和所采取的行动。	2007~2030 长期目标中包括了短期、中期和长期框架计划

城市	目标设定	情景设置	时间期限
旧金山	全市总量目标	1. 基于设定年份（2012 年）的零方案的参照情景 2. 基于不同行业的预期目标以及实现目标的各行业的行动，按照不同的行动计划估算了到 2012 年每年的碳减排量。	2002~2012 长期目标中包括了当前的和规划的行动
墨尔本	全市总量目标	1. 现实情景和采取行动的减排情景 2. 基于上述信息形成战略情景，该情景基于实现上述目标的行业目标、子行业行动计划。该规划中将行业的目标按照减排数量（kt CO_{2e}）和其对于城市总体目标减排比例的贡献进行了划分。在某些例子中，减排要求满足行业目标（同样以 kt CO_{2e} 为单位）。	2002~2020 长期目标中包括了短期、中期和长期框架计划
芝加哥	全市总量目标	1. 基于设定年份（2012 年）的零方案的参照情景，用于采取行动情况和不采取行动情况的对比。 2. 基于上述信息形成战略情景，该情景基于实现上述目标的行业目标、子行业行动计划。	2008~2050 长期目标中包括了短期、中期和长期框架计划

数据来源：《国际视角的城市低碳发展》。

3.1.3 低碳城市发展路径选择

通过各类减排措施低碳情景分析之后，在最终城市低碳路径的选择方面，应该综合考虑路径的成本、完成时间、资源限制等多重因素，从各路径中选择最适合本城市低碳发展的优超路径。

在国内外低碳城市研究中，各个路线图情景分析有着不同的减排率、减排开始时间、碳税水平、技术水平等。由于这些不同，不同的政策情景是不能直接比较的，可以比较的是，在不同减排率下的边际减排成本（MAC）和 GDP 损失。在边际减排成本方面，CGE 模型与自下而上模型相比，边际减排成本 MAC 偏低。导致这一现象的原因主要是在 CGE 模型抽象的生产函数中，忽视了一些最新的、昂贵的、能够深度减排的技术。相同模型之间的差异，原因可以归结为基准年的选择、生产函数的形式、弹性的估计等。在 GDP 损失方面，与自下而上模型相比，CGE 模型得出的结论是，当减排比例较低时，GDP 损耗较大，当减排比例较高时，GDP 损耗会降低。(Selvakkumaran and Limmeechokchai et al., 2014)等在对泰国的低碳社会分析中，编制了各类减排技术的边际成本减排曲线（MAC），分析了在不同

情景下的减排成本，由此便于政策制定者优先采取减排成本相对较低且减排效果显著的措施。

成本效益分析方法（Cost Benefit Analysis -CBA）在基础设施和环境规划等领域已有不少应用经验，一直是环境规划和评估环境建设项目可行性中的重要决策工具。成本效益分析的概念是：由环境破坏和污染引起的影响可以以市场价格直接计算，或以不同的经济计量方法来测度。另外，为了避免环境破坏和损失，社会决策者采取的手段对应的成本也可用市场价格衡量，包括时间、人手、交易、资金和资产投入的各类成本，都可以统一以经济价格为度量单位。

Colenbrander and Gouldson et al.(2015)运用成本效益分析方法，分析了印尼巴邻旁市的技术减排成本，并制定了情景分析预测未来碳排放趋势。Anandarajah and Gambhir(2014)于成本优化模型（TIAM-UCL），从有无碳采集储藏技术（CCS）的角度进行情景分析，预测了印度在两种情景下的行业大类碳排放和各类能源消费的碳排放，并预测了碳排放峰值。Gambhir and Napp et al.(2014)基于成本优化模型（TIAM-UCL），从有无碳排放权交易的角度进行情景分析，预测了印度两种情景下的各行业大类碳排放量。并发现有碳排放权交易的情况下，印度的减排成本要低于国际碳价，印度可以通过销售其碳信用额度提前实现其 2050 年的减排目标。Häyhä and Franzese et al.(2011)等从芬兰的发电结构构建情景分析，预测了 2025 年和 2050 年的芬兰碳排放和相应的碳排放，并运用成本评估方法衡量各情境的利弊。

在运用各类低碳城市路径选择方法后，结合本城市的实际特点和约束条件，才能够选择出最适合本城市的低碳发展路径。下面为世界典型城市的发展愿景、目标和低碳路线图，如表 3-3 所示。

表 3-3 典型城市愿景、目标和低碳路线图

城市	路线图	愿景	目标
芝加哥	1. 市长能源计划，2001 2. 气候变化行动计划，2008 年 9 月 3. 芝加哥全民绿色就业计划，2009	世界最绿色和最宜居的城市	基于 1990 年水平 2020 年降低 25% 2050 年降低 80%
伦敦	1. 市长住宅战略，2008 2. 适应战略气候变化草案，2008 3. 经济发展战略，2009 4. 交通战略，2009 5. 伦敦计划——塑造伦敦，2009 年更新版 6. 减缓气候变化及能源战略 2010 年咨询草案 7. 适应气候变化战略 2010 年咨询草案 8. 市长市政废弃物管理战略 2010 年咨询草案	通过应对气候变化、改善公共服务质量、减少污染、发展低碳经济、减少能源消耗和提高能源利用率，伦敦被认为是改善区域和全球环境的全球的领跑者	2025 年比 1990 年水平降低 60%
墨尔本	1. 温室气体行动计划，2001~2006 2. 温室气体行动计划，2006~2010 3. 2020 零净排放计划，2003 4. 总体水战略，2004 5. 墨尔本未来战略 2030，2008 6. 2020 零净排放计划—2008 年更新版 7. 适应气候变化计划草案，2008	到 2020 年，成为一个碳中和的城市	2010 年在 2001 年水平上住宅和商业能源领域碳排放减少 20%，2020 年实现零净排放
首尔	1. 首尔绿色战略，2005 2. 首尔环境友好能源宣言，2007 3. 低碳和绿色增长的总体规划，2009	到 2030 年，成为世界级的清洁、有吸引力的、气候友好的城市	到 2030 年，在 1990 年水平上减少 30%
斯德哥尔摩	1. 减少温室气体排放的行动计划，2003~今 2. 第 5 期斯德哥尔摩环境规划，2008~2011 3. 减少温室气体排放的行动计划，1998~2002 4. 能源效率和健康住宅计划 5. 能源效率和环境友好建筑计划 6. 斯德哥尔摩地方政府绿色指令 7. 斯德哥尔摩水规划	至 2050 年，成为零化石燃料使用城市	在 1990 年水平减少 60~80%；到 2025 年，成为零化石燃料使用城市

城市	路线图	愿景	目标
柏林	1. 能源概念框架 2020 2. 柏林地区能源计划, 2006~2010 3. 能源和节能条例 4. 能源行动计划“Berlin Spart Energie”, 1994	“更富有”、“更明智”和“更具信念和动力”的城市	2020 年在 1990 年水平上减少 40%
西雅图	1. 西雅图气候行动计划(CAOP), 2006 2. 西雅图保护气候行动, 2006 3. 西雅图社区气候立即行动, 2006	改进公众健康、提高生活质量、增强经济活力	基于 1990 年水平 2024 年减少 30% 2050 减少 80%
纽约	纽约城市计划 (PlaNYC), 2006	更“绿”、更伟大的纽约	2030 年在 2005 年水平上减少 30%
旧金山	1. 气候行动计划, 2002 2. 电力资源规划, 2002 3. 旧金山前进计划, 2008		2012 年在 1990 年水平上减少 20%

数据来源：《国际视角的城市低碳发展》。

3.1.4 低碳城市发展路径评估

Hermeling and Löschel et al.(2013)在正交多项式的基础上利用高斯积分为 CGE 模型构建了一个新的、简化的随机敏感性分析，以此来对大规模的气候政策的稳健性进行评估。该文以欧盟 2020 气候政策的影响评价为例进行分析，主要关注于部门的弹性。优点是，运用高斯积分将“蒙特卡洛”敏感性分析进行了改进。在处理多维的随机敏感性分析上，高斯积分比蒙特卡洛模型更加的简便，非常适用，尤其是建立在 CGE 模型上的能源和气候政策的分析。局限性在于，在多维敏感性分析中，潜在参数的分布概率必须是随机独立的，非独立的概率分布不适用于此方法，必须做更进一步的研究。

Gomi and Ochi et al.(2011)运用 BCM 模型，将日本京都低碳城市发展路径分为两个阶段：第一个阶段是设立减排目标，第二个阶段是寻找达到这个目标的路径，以量化的方法对为碳减排路径进行评估。该文认为为完成直接性的减排措施，首先要建立一些非直接的减排措施，如政府补助等；将这些间接措施建立一个决策树，区分各个间接措施之间的关系，如必备条件、平行措施等；通过确立预计的措施执行期间、执行开始的年份、每年推进的速率等量化的方式将措施进行量化。

再做出减排策略的日程表，如果遇到困难，再反复上述操作，直至障碍消失。该方法的创新之处在于，目前大多数国内外低碳城市文献的研究重点在于预测目标年份的碳排放，定义措施以达到减排目标。而很少有文献，以量化的方法对为碳减排路径进行评估。

在评价指标方面，中国社会科学院设立了 12 个指标，归为四大类低碳发展评价指标：低碳生产、低碳消费、低碳资源和低碳政策。世界银行给将中国的低碳城市指标清单分为五大类：碳排放、能源、绿色建筑、可持续交通以及智慧城市形态。Ho and Matsuoka et al.(2013)认为，宏观评价指标如单位增加值碳排放、能源消耗量等是很难确定一个城市是否为低碳城市。而建立在能源终端消费部门，如工业、交通、建筑等部门上的评价指标，才是更切合实际的指标体系。Lin and Jacoby et al.(2014)建立了一套综合的评价低碳城市发展的指标体系。这套指标体系将各个单个的评价指标相互联系起来，形成综合的评价体系。该文以厦门为案例，按照所设计的指标体系，设立了两种情景分析，得出的结论是能源技术和能源结构的改变是降低厦门碳排放强度最主要的驱动因素。

3.1.5 小结

（1）模型的运营要结合实际

由于各能源模型都是基于特定国家或区域的具体背景开发的，每个模型都是在一些特定假设的前提下运行的。因此，在模型的具体应用过程中，一定要注意模型参数的设定和基线情景的各种假设是否符合本国或本地区能源系统的实际。中国与西方发达国家相比，具有很多特殊性，如技术的变化率更高、非商业能源的使用更普遍、能源的价格管制更普遍等。而在中国各个城市之间，除了具有这些特殊共性外，还应考虑各城市之间的独有特点，如东西部之间、大城市和小城市之间的差距等。

（2）模型的发展趋势是“综合”

能源系统是涉及政治、经济、社会、环境、气候等多领域的复杂系统。白玫博士等认为，因为复杂系统的整体具有子系统不具备的性质，将系统进行分解后，系统整体的性质往往在子系统层次上得不到体现，所以即使将子系统分析得再清

楚也无法解释整个系统的总体行为。因此，仅考虑能源经济、环境、技术等单一问题的模型存在着很大的局限性，综合考虑能源利用对经济、社会、环境、气候的影响，即综合集成模型，将是未来能源政策模型的发展趋势。

（3）减排路径除考虑技术因素外还应重点考虑结构因素

在国内外有关低碳城市发展路径的文献中，大部分假设了减排主要来自于技术，但是未来产业结构、能源结构、出行结构、家庭构成等结构因素的变化则很少涉及。原因可能为发达国家发展到今天其经济结构已经相对健康和稳定，结构调整对碳排放的贡献度占比很小。但是对于发展中国家来说，产业结构、能源结构等与发达国家相比还有很大差距，结构的调整对碳减排贡献率相当可观。因此，在借鉴发达国家典型城市低碳发展路线时，我们不能一味盲目模仿，还应结合本国国情和城市结构进行深入分析，为达到减排目标应同时从调整产业结构和提升技术水平两个方面进行努力。

3.2 深圳市碳减排优超路径

3.2.1 深圳市走碳减排优超路径的必要性

深圳市发展的动力与需求强劲，但当前的经济数据表现与发达城市相比还比较低，具体数据见表 3-4。从表中各城市的综合竞争力及 GDP 规模、人均 GDP、地均 GDP、GDP 增长、专利申请、跨国公司指数等其他各项排名可见，深圳市的经济水平与以上城市及地区仍有一定差距，尤其与美国都市圈有着较大差距。其中，深圳市的综合竞争力位列《全球城市竞争力报告（2009~2010）》所选取的 500 个城市及地区的 71 位，但在以上发达城市中则归属最后一位；其 GDP 规模、人均 GDP、地均 GDP、跨国公司指数等指标排名同样居于后位。但深圳市的 GDP 增长、专利申请两项指标的排名表现则较为出众，其中 GDP 增长指标居以上城市及地区之首，专利申请指标仅位于伦敦、东京、旧金山、台北之后。以上表现充分证明深圳市当前的经济水平虽稍有欠缺，但其发展能力出众，增长动力十分强劲，在未来仍将有很大的增长空间。

表 3-42009-2010 年全球城市主要发达城市综合竞争力排名

城市	综合竞争力	GDP 规模	人均GDP	地均GDP	GDP 增长	专利申请	跨国公司指数
深圳	71	25	252	223	21	85	112
纽约	1	3	10	2	411	88	1
伦敦	2	4	13	20	358	46	4
东京	3	1	69	19	472	41	2
巴黎	4	2	35	29	362	193	7
芝加哥	5	12	30	3	378	86	42
旧金山	6	51	2	6	366	24	47
洛杉矶	7	5	7	26	347	107	33
新加坡	8	14	157	31	172	183	3
首尔	9	6	193	8	363	150	10
香港	10	7	181	47	239	177	5
上海	37	11	251	258	70	122	8
台北	38	42	190	60	443	75	12
北京	59	16	287	375	71	130	6

注：表格数据来源于 2010 年 7 月中国社会科学院城市与竞争力研究中心发布的《全球城市竞争力报告（2009~2010）》。

常规节能减排技术的成本较高。例如，根据国家发改委发布的《国家重点节能低碳技术推广目录》（2014 年本），适用于电力行业的“超临界及超超临界发电机组引风机小汽轮机驱动技术”单位减排投入为 1429 元/吨 CO₂，适用于制造业的“聚能燃烧技术”单位减排投入为 1325 元/吨 CO₂，适用于交通行业的“高速公路电子不停车收费技术”单位减排投入为 1390 元/吨 CO₂，适用于建筑部门的“温湿度独立调节系统”单位减排投入为 866 元/吨 CO₂。

世界银行于 2013 年发布的《上海长宁区减排成本曲线》报告中，提到节能减排技术在推广的过程中，将面临着各种各样的推行障碍。由于部分节能减排项目初期投入较大，回收期偏长，导致企业缺乏相应的动力对其进行应用。例如低排放建筑的推广应用有着很高的成本，接近零排放（NZE）建筑需要很高的增加投资，使得其投资回收期超过 20 年。同时 NZE 建筑也面临着一种困境，即投资者和开发商承担高额的成本，租用者享受能源节约的效益。长宁区的节能减排投资需要约 8-10 年的回收期，而商业投资者通常只倾向于投资回收期为 3-5 年的项目。

同时，对节能项目现有的财政补贴总量不够大、覆盖范围不够广等原因，也导致财政政策也不足以激励大量企业更新技术。目前，国家和地方政府提供给建筑改造的补贴为 60 元/平方米（9.5 美元/平方米），为能源服务公司提供的建筑改造补贴为 500 元/吨标煤（80 美元/吨标煤），仅相当于通常建筑改造项目投资资金的 3%。

此外，部分节能减排项目需要投入很大资金量，一些企业较难负担设备所需投资，由于市场的总体资金需求量也十分庞大，融资渠道不够充足，也导致融资成本较高。金融机构通常不愿意为建筑节能项目提供资金，原因主要有以下几点：项目规模较小（典型的建筑改造规模为 50-100 万美元），且交易成本较高；能源服务公司具有较高的信用风险，它们通常实施建筑改造项目，但缺乏足够的资产作为抵押；改造项目具有较高的技术风险，同时能源节约项目收益转化不便。

可见，仅从适用节能减排技术的应用这一微观角度出发，虽能达到一定的减排效果，但需要付出的减排成本是非常高昂的。因此，有必要思考从结构性减排这一个较为宏观的角度，大规模、高效率地降低碳排放总量及碳排放强度。

作为全国首批低碳城市试点，深圳市要在全中国起到先行示范作用，并且已经承诺在 2022 年左右达到碳排放峰值。深圳市要在经济高速发展、人们生活水平不断提高的情景下达到碳排放峰值，面临巨大的压力与挑战，必须走碳减排的优越路径，跨越式实现城市的低碳发展。

3.2.2 深圳市碳减排优越路径的主要特征

作为我国首批国家低碳发展试点城市和先锋城市，在低碳城市建设的过程中，深圳市始终走在全国前列。目前，深圳市已经制定了低碳发展和节能总体规划，并初步建立了围绕工业、建筑、交通等领域的低碳政策体系，以及在通过碳排放权交易体系利用市场机制控制城市碳排放这一方面进行了尝试与探索。在已有的城市低碳发展规划的基础上，深圳市要在经济高速发展、人民生活水平需要不断提高的同时实现全市在 2022 年左右达到碳排放峰值的进一步碳减排的目标，就必须走跨越式低碳发展的路线，实现深圳市低碳城市建设的优越路径。从整体来看，深圳市低碳发展的优越路径主要具有以下特征：

（1）城市的低碳发展、能源可持续发展与经济发

展的目标融合同步

2014 年 11 月 12 日，中美两国达成温室气体减排协议。中国计划 2030 年左右二氧化碳排放达到峰值且将努力早日达峰，并计划到 2030 年非化石能源占一次能源消费比重提高到 20%左右。鉴于此，深圳市应积极响应中央政府的号召，采取措施尽早使深圳市二氧化碳排放达到峰值，为中国的温室气体减排做出贡献。

然而深圳市要尽早实现碳排放峰值同样面临巨大的挑战，包括经济、能源和技术上的协同和权衡。在未来的很长一段时间中，经济发展仍是深圳市发展的重要主题，如何平稳地实现低碳转型、避免对社会和经济发展额外造成过度不利的影响，是深圳在实现碳排放峰值目标的过程中所不能回避的重要问题。与此同时，深圳市也希望能通过低碳发展创造新的经济增长点，探索出一条低碳发展、能源可持续发展与经济发

展的目标融合同步的低碳发展优超路径。

对于深圳市而言，能源消费总量和能源结构是实现排放峰值的主要因素，其他工业的碳排放增长从长期来看增长的余地相对有限，农业牧渔业的排放则可控制在一定范围。所以，要解决深圳市的碳排放峰值问题，首先就要解决深圳市未来能源的消费增长和能源结构调整的时期和幅度问题。

从煤炭消费量来看，未来的总体趋势是深圳市煤炭消费逐步下降，2008 年，深圳市的煤炭消费量为 7.28 万吨标准煤，占全市能源消费总量的 0.2%，至 2013 年，深圳市的煤炭消费量下降为 3.71 万吨标准煤，占全市能源消费总量的 0.1%。从石油消费量来看，深圳的石油消费量变化较小，并且石油消费占全市能源消费总量的比例在逐年下降，2008 年，深圳市的石油消费量为 1640.19 万吨标准煤，占全市能源消费总量的 46.0%，至 2013 年，深圳市石油的消费量增长为 1629.19 万吨标准煤，占全市能源消费总量的 40.6%。从天然气消费量来看，深圳天然气的消费量变化较小，且天然气消费占全市能源消费总量的比例基本没有较大的变化，2008 年，深圳市的天然气消费量为 61.29 万吨标准煤，占全市能源消费总量的 1.7%，至 2013 年，深圳市天然气的消费量增长为 60.10 万吨标准煤，占全市能源消费总量的 1.5%。从电力部门来看，未来的总体趋势是终端消费的电气化程度将更高，深圳市的电力消费量将有可能面临大幅增长，2008 年，深圳市的电力消费量为 1858.57 万吨标准煤，占全市能源消费总量的 52.1%，至 2013 年，深圳市电力的消

费量增长为 2324.07 万吨标准煤，占全市能源消费总量的 57.9%。

总体来看，2008 年至 2013 年，深圳市能源消费的结构逐步优化，化石能源消费的比重逐步降低，石油和煤炭的消费量占比共减少 5.6 个百分点，天然气消费的占比减少 0.2 个百分点，而电力消费的占比增加 5.8 个百分点。在能源领域，深圳市的能源消费将呈现出煤炭石油等化石燃料消费长期减量化、终端消费电气化程度提高的局面。

在深圳市碳排放峰值目标实现的过程中，能源总量和结构优化、低碳技术的规模应用无疑将起到决定性的作用。未来发展方式将主要是结构优化的问题，而不是大规模增量的问题，主要的高耗能高排放产品的增长将渐趋放缓并达到峰值，能源消费结构将逐渐从生产性消费为主逐渐过渡到生活型消费为主的阶段，未来能源消费增长的空间主要在交通、建筑等居民消费，届时深圳市的 GDP 增速放缓（2015 年为 8.5%，2016 年至 2020 年为 6.7%，2021 年至 2030 约为 6%），可再生能源的规模有一定的基础，而且呈现快速发展的趋势，同时制造业能耗总量基本稳定，而上升主要是交通和建筑等需求调节性较强的领域，这样就会使得新增加的能源需求增长缓慢，主要依靠可再生能源来满足，能源结构将更加绿色。能源需求和供给的优化将为深圳市碳排放峰值的实现创造有利的条件。

此外，深圳市应该在低碳技术的研发和推广、产业转型和扶植上加大资金投入和政策倾斜。在经济领域，深圳市应该做好经济发展速度放缓的准备，利用降低的发展速度来理顺结构性和系统性问题，提高经济发展的质量，并应该在产业政策、人力资源和资本投入上更多地激励低碳工业和服务业的快速发展，大幅度提高要素生产力，使低碳发展、能源可持续发展与经济发展三个目标相互融合，探索出深圳市的优越发展路线。

（2）随着时间的推进逐步深化总体的减排力度，跨越式实现城市的低碳发展

一个城市的 GDP 何时能够达到峰值，取决于诸多因素，例如社会的经济发展水平、人口数量、能源结构状况等。根据 KAYA 公式，如果深圳市的碳排放要达到峰值，那么深圳市的 GDP 增长率、单位 GDP 能耗下降率和单位能耗碳排放强度下降率之间要达到均衡。

“十一五”以来，工业节能技术改造和淘汰落后产能在深圳市的低碳发展中发挥了主要作用。随着时间的推移，技术节能的潜力减小、难度加大，产业结构调整 and 升级导致的结构性节能将发挥更大的作用，但总体而言，单位 GDP 能耗的下降速度将越来越小。预计至 2022 年左右，深圳市单位 GDP 能耗可维持年均 3.0-3.5% 的下降幅度。从后工业化国家的发展历程来看，单位 GDP 能耗的年均下降率一般不超过 2%，从 1990-2010 年，美国为 1.75%，欧盟为 1.55%，但其 GDP 增速一般也不高于 3%，同期美国为 2.49%，欧盟为 1.81%。由于发达国家的 GDP 增速较低，只要再配合一些能源结构的调整，就能维持碳排放的降低。⁵对深圳市而言，如果至 2022 年前后，仍要维持 6.7% 左右的 GDP 增速，那么，3.0% 至 3.5% 的 GDP 能源强度的下降率就无法弥补 GDP 高速增长带来的碳排放增加。此时，单位能耗碳排放年均下降率需达到 3.2% 至 3.7% 才能确保深圳市达到碳排放峰值，但目前深圳市该指标的年均下降率不到 1%。这就要求深圳市不仅要优化能源结构，而且这种结构优化的推进速度必须是跨越式的，而不是缓慢的。

因此，如果深圳市计划在 2022 年前达到碳排放的峰值，除了通过节能减排技术的推广、产业结构调整 and 降低单位 GDP 能耗外，还需大力发展太阳能发电、核能发电等新能源和可再生能源，调整全市的能源结构，使深圳市单位能耗的碳排放持续下降，进而促进全市的碳排放达到峰值。从城市的整体发展来看，只有做到产业结构、能源结构、交通运输结构和制造业结构的结构调整先行，强化能源需求管理，降低能源供给的碳排放强度，引入和发展更多的节能减排技术，走跨越式的低碳发展路径，才能保证深圳市在 2022 年前达到碳排放峰值。

（3）优越路径的减排成本是最优或者是次优的，在深圳市可接受范围内

在建设低碳城市、实现碳排放峰值目标的过程中，不仅要考虑二氧化碳的减排效果与减排速度，还要考虑二氧化碳的减排成本大小和一个城市对减排成本的可承受范围。本文基于高鹏飞、陈文颖和何建坤（2004）⁶以及魏楚（2014）⁷的研

⁵何建坤. CO₂ 排放峰值分析：中国的减排目标与对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(12): 6-6

⁶高鹏飞、陈文颖、何建坤. 中国的二氧化碳边际减排成本[N]. 清华大学学报（自然科学版）, 2004(44-9).

⁷魏楚. 中国城市 CO₂ 边际减排成本及其影响因素[J]. 世界经济, 2014, (7): 115-141

究成果，对中国以及中国主要城市的碳减排成本进行了初步的统计。总的来看，中国未来的二氧化碳的减排成本较高，当减排率在 0%-45% 时，二氧化碳的边际减排成本在 0-250 美元/吨之间，并且在等量的减排量下，越早开始实施碳减排的约束，二氧化碳的边际减排成本将越高。从不同的城市来看，中西部城市的碳减排成本相对较低，而东部城市的碳减排成本则相对较高。2008 年，中西部城市的平均碳减排成本为 492 元/吨，且中部城市略高于西部城市，东部城市的平均碳减排成本为 616 元/吨。此外，不同城市之间的碳减排成本的差距也较大。同为东部城市，上海、北京的碳减排成本分别为 15717 元/吨、11261 元/吨，天津的碳减排成本为 2294 元/吨，深圳与天津的减排成本相近，在 2500 元/吨左右。

根据深圳市财政委员会公布的《2015 年预算公共政策读本》，深圳市财政将在 2015 年度将专项安排 8.1 亿元空气治理资金，直接用于黄标车提前淘汰和工业废气治理项目。另外，深圳市还将每年安排 7 亿元，专项用于支持节能减排、循环经济、低碳发展等领域的项目，除安排常规项目支出外，还安排了绿色低碳发展领域专项经费 0.5 亿元、船舶岸电和低硫油专项资助 1.6 亿元、LNG 汽车推广专项补贴 1.2 亿元。自 2014 年起，连续 7 年，深圳市财政每年集中 5 亿元，设立节能环保产业发展专项资金，重点支持节能环保产业创新能力提升、产业发展促进、服务体系完善、开放合作深化的基础研究、技术研究、产品开发、技术改善和提升、应用示范、产业化、服务体系建设等领域。

与目前深圳市的节能减排投资规模相比，传统节能减排发展路线的减排成本无疑显得过高，超出了深圳市的可承受范围。因此，在本研究设计的深圳市碳减排优先超路径中，深圳市将走结构减排先行路线，从深圳市的产业结构、能源结构、交通运输业结构和制造业结构的结构调整和优化入手，辅以需求管理的强化、能源供给的低碳以及技术创新等手段，大大降低深圳市的碳减排成本，在尽早实现全市碳排放达峰目标的同时，兼顾了深圳市碳减排成本的承受能力和整个低碳发展路线的经济效益性。

3.2.3 深圳市碳减排优超路径的核心要素

3.2.3.1 结构调整先行

优化的结构性因素对减缓碳排放增长速度，降低碳排放总量具有积极的作用。这些结构性因素包括产业结构、能源结构、交通运输结构和制造业结构。产业结构性因素可以在初步层级上可表现为三次产业占整体经济的结构比例，在进一步的层级上可表现为各部门内部的结构，如电力行业的发电及供电结构；制造业内部高、中、低能耗子行业占制造业整体的结构比例；以及交通行业不同运载方式的结构比例。能源结构性因素表现为经济体中各类能源的消费结构，由于不同能源的排放强度具有差异，因此不同的结构比例会产生不一样的排放情况。

(1) 产业结构与碳排放关系

在产业结构上降低高耗能高排放的工业行业占整体经济的比例，对应提高能耗较低的清洁电力行业、先进制造业、公共交通和服务业等行业的占比。总体上学习西方发达国家的模式，发展更高比例的第三产业，相对低比例的第二产业，同时保持较为合理的第一产业占比⁸。即通过降低能源密集型行业的比例，或提高能源节约型行业的占比来降低能源强度，通过升级产业结构来减少直接的能源需求，从而降低碳排放量⁹。

A. 产业结构调整对碳排放影响的相关研究

产业结构方面，Wood(2009) 使用 SDA 方法和比较静态的投入-产出分析，研究了澳大利亚越 30 年的温室气体排放数据，发现关键部门和结构性影响具有控制排放的最显著潜力，也可能具有最大的净影响。经过分解分析，电力供应、建筑、交通和服务业对降低排放水平的作用也得到证实。Cellura and Longo et al.(2012) 使用 SDA 方法和拓展的能源环境投入产出性研究了意大利 1999-2006 年间生产部门为满足最终需求所使用的能源和排放的增加。分析结果显示，主要的驱动因素是产品和服务的最终需求，第三产业、电力、汽油、蒸汽是意大利能源消费最高的部门，农业、狩猎、林业和道路交通是影响排放的基础部门。Weber 使用 DA 方法

⁸ He T, Li Z, He L. On the relationship between energy intensity and industrial structure in China[J]. Energy Procedia, 2011, 5(22):2499-2503.

⁹Guan Y, Li M. Analysis on the degree of the industrial structure's impact on the energy consumption--Based on empirical study of Guangdong Province[J]. Energy Procedia, 2011, 5:1488-1496.

研究了 1997-2002 年间美国能源消费量的驱动因素。结果表明,美国经济从制造业逐步转型为服务业和建筑业,从高能源强度制造业转型为低能源强度制造业,这种经济结构变化抵消了增长的人口和消费带来的能源需求增长。Butnar and Llop(2011) 使用投入-产出子系统表示法,分析 2000-2005 年西班牙服务业部门的经济和环境数据。结果表明,西班牙服务部门的各部分碳排放经历了普遍的增长,但对服务业排放变动影响最显著的是外部组成部分,表明非服务部门给服务部门碳排放的增长带来了强烈的推动力。Suh(2006)分析了美国服务业碳排放,结果表明更偏向服务业导向的经济体能够降低单位产出碳排放强度,但在绝对量上将增加整体的碳排放量。

Tian and Chang et al.(2013) 使用 SDA 方法分析 1995-2007 年技术和社会经济结构对北京市碳排放的影响。结果表明,北京市向重工业和服务业发展的产业结构对其碳排放起到了显著作用。Chunmei and Maosheng et al.(2011) 构建回归模型,以碳排放强度为因变量,一二三产占 GDP 比重分别为自变量,以 1970~2006 年为时间跨度,通过研究美国、英国、德国、日本、韩国、中国等国家的数据,并通过格兰杰因果检验,证明了一二产比重与碳排放呈现明显正相关关系,三产比重与碳排放呈现显著负相关关系。Yang and Mingguang(2011) 等使用 LMDI 分解法和 Laspeyres 拉氏方法分析了产业结构对能源消费的影响。研究指出,第二产业在降低能源强度方面作用显著,但是第三产业在降低能源强度角度则没有体现优势。朱永彬与刘昌新等(2013)比较了我国与美国、欧盟、日本在部门能源强度和产业结构上的差距,进而利用 Markov 模型对未来我国产业结构进行预测,在此基础上分析了我国未来能源强度的走势以及产业结构演变对降低能源强度的贡献。研究发现我国农业和采掘业比重高于发达国家,制造业更是占到 56.5%,明显高于其它发达国家 25%—35%的占比,而批零贸易和其它服务业仅占其它发达国家的 1/2 和 1/3。通过产业结构调整,若实现这些国家的结构比重,可分别减排 40%、32% 和 28%。刘红光与刘卫东等(2010)在区域间投入产出表的基础上,利用中国各省市自治区分行业的碳排放系数,建立了中国区域产业结构调整的 CO₂减排模型,对各区域各行业的减排效果进行了分析。结果表明电力、热力、化工、采掘、金属冶炼以及非金属制品等重工业行业是节能减排工作的重点行业。电力热力行业

是减排效果最为明显的行业，提高水能、风能、核能等非常规能源发电比例，改变电力行业的能源消费结构可以有效减少中国 CO₂ 排放量。采掘、化工、金属冶炼和非金属制造等重工业行业是节能减排的重点行业，应尽量提高其能源利用率，减少 CO₂ 排放。

B. 西方发达国家产业结构调整与碳排放关系

美国产业结构调整与碳排放总量、单位 GDP 碳排放的关系见图 3-1。1965-2007 年间美国的二氧化碳排放量经历整体上升，并在 1979 年达到一次持续时间较长的碳排放量极值，最终在 2007 年达到截至目前的碳排放峰值。期间，美国工业增加值占 GDP 比重持续下降。碳排放总量的增长趋势主要归因于美国整体经济的增长，而工业比重的下降则使得碳排放量增速逐渐放缓。此外，美国单位 GDP 碳排放的变化方向与美国工业增加值占 GDP 比重的变化方向一致。说明美国工业比重的下降，能够有效导致碳排放强度的降低。

英国产业结构调整与碳排放总量、单位 GDP 碳排放的关系见图 3-1。1970-2012 年间，英国工业增加值占总增加值的百分比呈平稳下降态势，从 1970 年的 55.65% 降至 2012 年的 30.33%。与此同时，英国二氧化碳排放量、二氧化碳排放强度则不断降低。由此可见，英国二氧化碳排放的变化情况与产业结构变化一致。

法国产业结构调整与碳排放总量、单位 GDP 碳排放的关系见图 3-2。1960-1975 年间法国的工业增加值占 GDP 比重呈上升态势，与此同时法国的碳排放量不断上升。1979 年法国碳排放出现峰值后，伴随着工业增加值占 GDP 比重的持续降低，法国碳排放量也呈持续减少变化趋势。

德国产业结构调整与碳排放总量、单位 GDP 碳排放的关系见图 3-2。德国碳排放在 1979 年达到峰值之后，碳排放总量与单位 GDP 碳排放变化趋势与工业增加值占总增加值百分比的变化趋势一致。

通过以上对美国、英国、法国、德国这四个发达国家的碳排放总量和单位 GDP 碳排放变化趋势的分析，可以发现它们与工业增加值占总增加值比重呈现正向相关关系。即在工业增加值占总增加值比重下降的同时，碳排放量和单位 GDP 碳排放也会受到影响相应的下降。

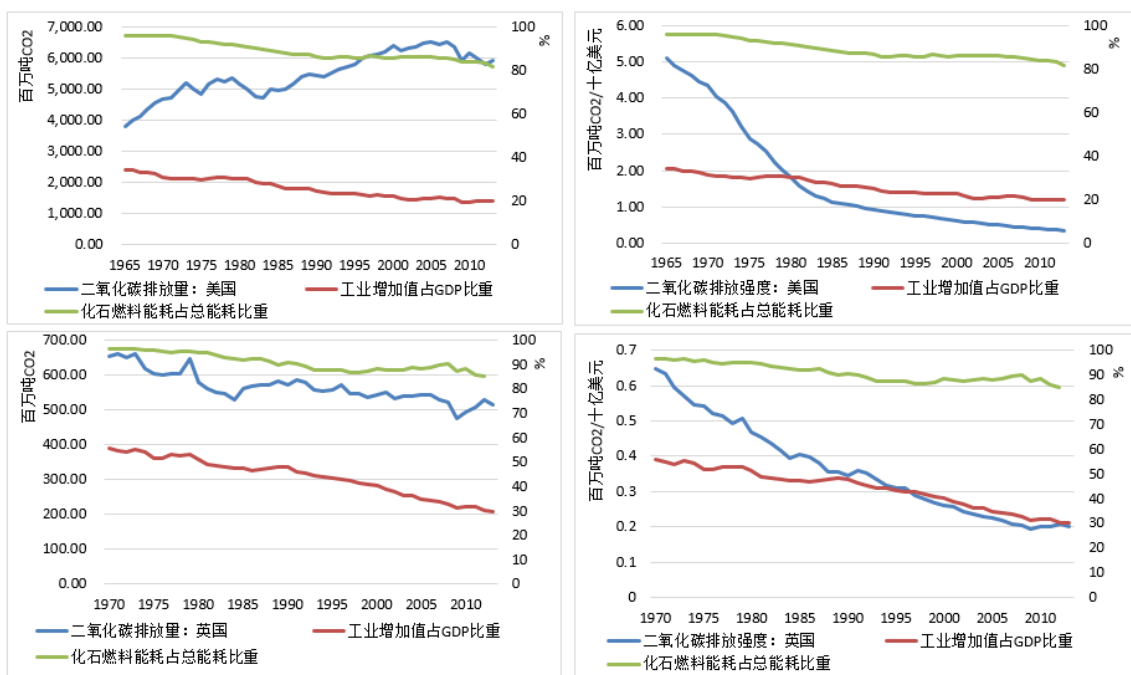


图 3-1 美国和英国的产业结构、能源结构调整与碳排放关系

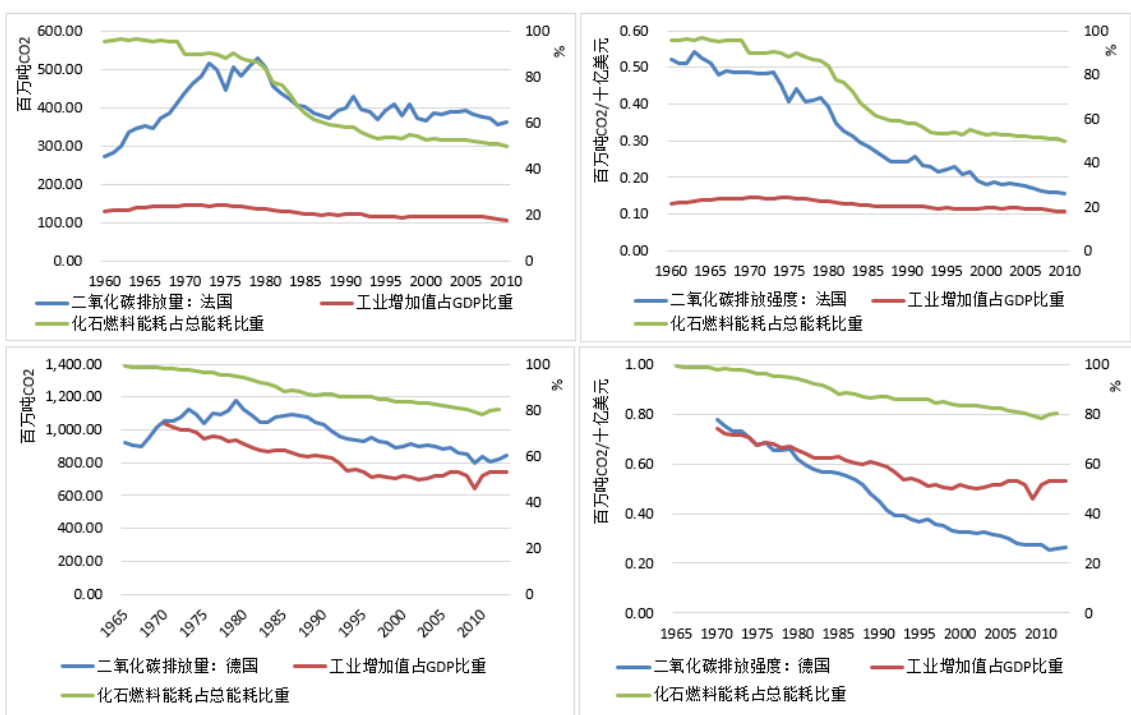


图 3-2 法国和德国的产业结构、能源结构调整与碳排放关系

C. 中国产业结构调整与碳排放关系

中国产业结构调整与单位 GDP 碳排放关系见图 3-3。1996-2012 年间，中国的第一产业 GDP 占比从 1996 年的 19.7%持续降低至 2012 年的 10.1%；而第二产业

中的工业占 GDP 比重变化则相对平稳，从 1996 年的 41.4%波动变化到 2012 年的 38.4%；第二产业中的建筑业占比则从 6.2%变化至 6.8%，期间还经历了小幅的降低；第三产业占 GDP 比重则从 1996 年的 32.8%上升到 2012 年的 44.6%，提高了 11.8 个百分点；对应的单位 GDP 碳排放持续降低，从 1996 年的 3.7 吨/万元下降至 2012 年的 2.2 吨/万元。从以上分析可以看出，在研究期间内工业占比、建筑业占比基本未出现较大变化，只有第一产业占比大幅下降，第三产业占比大幅提高，因此提高第三产业占比可以较为有效的降低碳排放强度。

基于 LMDI 的中国碳排放驱动因素分析结果见图 3-4。从行业结构角度看，1996-2012 年间第一产业增加值占比不断下降，第二产业中的工业增加值占比不断上升，第二产业中的建筑业增加值占比则先小幅下降然后升高，第三产业增加值占比呈上升趋势。LMDI 分析结果表明，第一产业占比的降低均导致了碳排放的减少；工业占比的升高均导致碳排放大幅增加；建筑业占比与碳排放的变化趋势一致，保持同升同降；第三产业占比上升也会导致碳排放的上升。

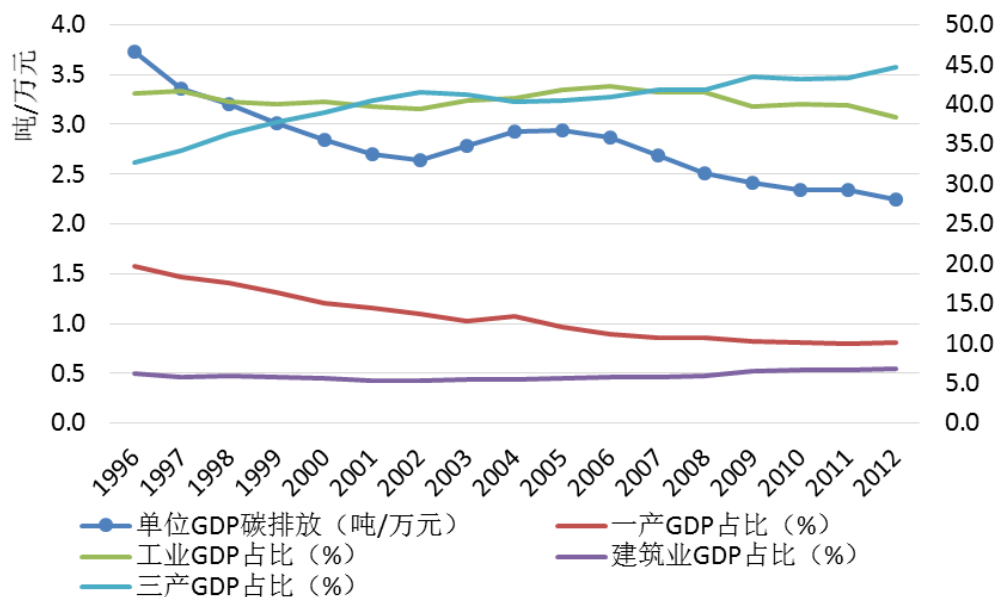


图 3-3 中国产业结构与单位 GDP 碳排放关系

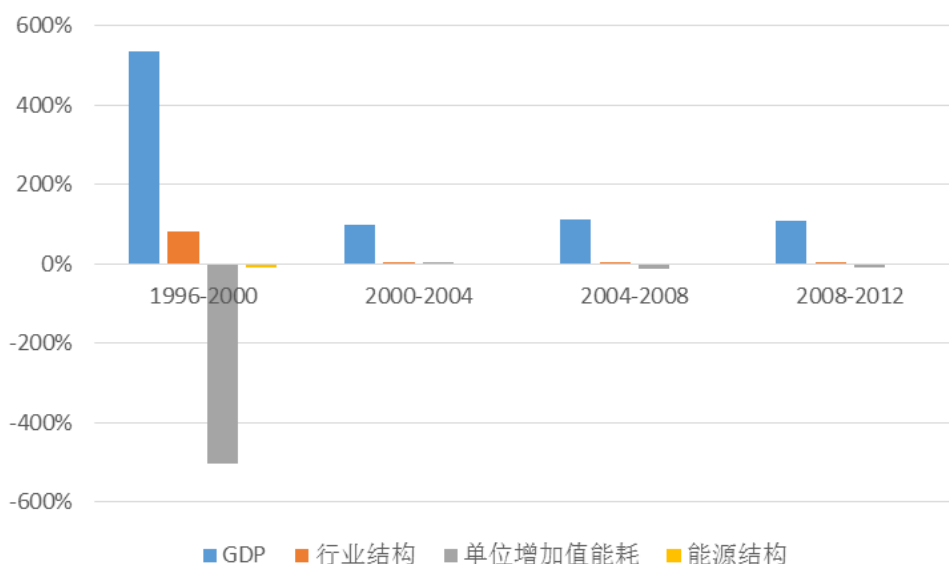


图 3-4 基于 LMDI 的中国碳排放驱动因素分析

D. 深圳产业结构调整与碳排放关系

深圳市产业结构与单位 GDP 碳排放的关系见图 3-5。可以看到，2008-2013 年期间深圳市的第三产业增加值占比不断上升，从 2008 年的 50.3% 升至 2013 年的 56.6%；工业增加值占比不断下降，从 2008 年的 47.1% 降至 2013 年的 40.6%；而建筑业和第一产业增加值占比则基本保持不变。与此同时，深圳市单位 GDP 碳排放不断降低，从 2008 年的 0.928 吨/万元降至 2013 年的 0.639 吨/万元，即与第三

产业占比同向变化，与工业占比反向变化。从中可以看出，产业结构的优化有利于深圳市碳排放的降低。

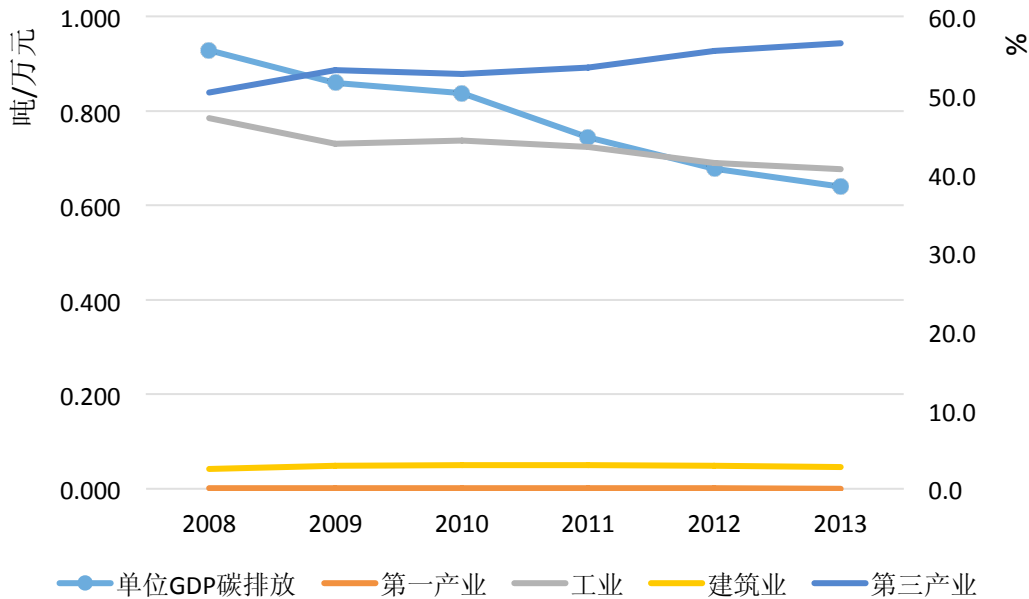


图 3-5 深圳市产业结构与单位 GDP 碳排放的关系

（2）能源结构与碳排放关系

能源结构性因素表现为经济体中各类能源的消费结构，由于不同能源的排放强度具有差异，因此不同的结构比例会产生不一样的排放情况。通过改善能源消费结构，使能源消费逐渐从煤、石油等单位排放量较高的化石能源，转向液化石油气和电力等单位排放量较低的清洁能源，降低能源消费的整体排放系数，将会有效降碳排放量¹⁰。

A.能源结构调整对碳排放影响的相关研究

能源结构方面，Lim and Yoo et al.(2009) 等通过投入产出的结构分解分析，研究了 1990-2003 年韩国的碳排放数据。发现韩国碳排放的降低主要归因于能源强度和最终需求的减少。自从 1990 年起，韩国的能源消费逐渐从化石能源转向了较为的清洁能源，例如液化石油气和电力，这也使得韩国的碳排放强度得以降低。Hammond and Norman(2012) 运用 DA 分解分析法，研究了英国 1990-2007 年的制造业数据。结果表明，碳排放降低的主要原因是能源强度的降低，而电力排放系

¹⁰Lim H J, Yoo S H, Kwak S J. Industrial CO₂ emissions from energy use in Korea: A structural decomposition analysis[J]. Energy Policy, 2009, 37(2):686-698.

数的降低对能源强度的降低有显著的影响。制造业能源密集子行业在理论上对降低能源相关碳排放和能源强度有更大的驱动力，但研究表明其实际效果显著低于非能源密集子行业；能源类型的转变也影响了能源强度的改善，电力、天然气等相比其他替代能源通常能被更高效的利用。

陈诗一与吴若沉（2011）在研究中认为能源结构和产业结构演化和能源强度降低有利于减排二氧化碳，对上海而言更要特别注重第三产业中的交通运输业减排、大力发展九大高科技产业。能源结构调整效应，在全国层面和上海市都是促进碳减排的。上海市的煤炭和石油消费比例平均为 30%和 68%，要优于全国的能源消费结构（对应比例为 64%和 32%），但与世界发达国家相比，上海市天然气消费比例明显偏低，只有 2%（上海市发展和改革委员会，2006）。潘仁飞与陈柳钦（2011）指出为确保 2020 年煤炭在一次能源消费中所占比例显著下降，必须在“十二五”和今后的更长时间内对煤炭生产和消费总量实施控制，减少高污染、高耗能行业对煤炭的不合理需求。加大对风能、太阳能、生物质能等新兴能源和替代能源的发展力度和支持力度。向其凤与王文举（2014）通过建立内部替代约束和供给约束下的能源结构优化模型，给出碳排放量最优化的部门能源结构。结构表明以 2010 年的能源结构为基础进行优化，在 2020 年可节能 16.16 亿-18.50 亿吨标煤，减排 50.31 亿-51.99 亿吨 CO₂，使碳强度比年下降 31.73%-37.88%，比 2005 年下降 46.21%-51.05%，完全可以实现预定的碳强度下降 40%-45%的目标，并可在经济中低速增长的情形下实现能源总量控制目标。贺红兵（2012）在研究中指出大力发展核电、水电、风电、太阳能及潮汐能等清洁能源以及鼓励新能源和可再生能源的开发利用，努力保持清洁能源和非化石能源比重的持续增长态势，我国以煤炭为主的能源结构将会逐渐向清洁能源结构方向发展。

B. 西方发达国家能源结构调整与碳排放关系

美国、英国、法国及德国能源结构调整与碳排放关系见图 3-1 和图 3-2。美国的化石燃料的能耗占能耗总量比重持续下降，使得其碳排放量增速逐渐放缓，并最终在 2007 年达到碳排放峰值；同时美国二氧化碳排放强度的变化方向与化石燃料的能耗占能耗总量比重的变化方向一致。英国化石燃料的能耗占能耗总量比重不断下降，与此同时英国二氧化碳排放量、二氧化碳排放强度也不断降低。

1960-1975 年间法国的化石燃料能耗占总能耗百分比下降较为缓慢，与此同时法国的 CO₂ 排放量在工业增加值占 GDP 比重上升的影响下有所增加上升；而 1979 年法国碳排放出现峰值后，伴随着化石燃料能耗占总能耗百分比的迅速下降，法国 CO₂ 排放量持续减少；法国的 CO₂ 排放强度变化趋势与化石燃料能耗占总能耗百分比的变化长期保持一致，且在一些年份的波动上也基本保持同步。德国碳排放 在 1979 年达到峰值之后，变化趋势与化石燃料燃烧占总能耗比重的变化趋势一致；碳排放强度的变化趋势与化石燃料燃烧占总能耗比重的变化趋势长期保持一致。

结果表明，上述四个国家的碳排放总量、单位 GDP 碳排放与化石燃料占总能耗比重呈现正向相关关系。即在化石燃料占总能耗比重下降的同时，碳排放量和单位 GDP 碳排放也会受到影响相应的下降。

C. 中国能源结构调整与碳排放关系

中国能源结构调整与单位 GDP 碳排放关系见图 3-6。1996-2012 年间，中国各类能源消费中煤炭占比从 73.5%降至 66.6%；石油占比则较为平稳，从 1996 年的 18.7%经过小幅上升在 2002 年达到最大值 22.3%后，又回落到 2012 年的 18.8%；天然气占比从 1.8%升至 5.2%；水电、风电、核电等清洁电力的占比从 6.0%提高到 9.4%。总体上煤炭等会带来高碳排放的能源占比下降了 6.8 个百分点，而天然气、清洁电力等低碳排放能源占比则相应上升了 6.8 个百分点。单位 GDP 碳排放持续降低，从 1996 年的 3.7 吨/万元下降至 2012 年的 2.2 吨/万元。

基于 LMDI 的中国碳排放驱动因素分析结果见图 3-6。从在能源结构角度看，各行业的能源结构不断得到优化，单位能耗二氧化碳排放量均在小幅波动中降低。与此同时，中国的碳排放量相应的得到降低。

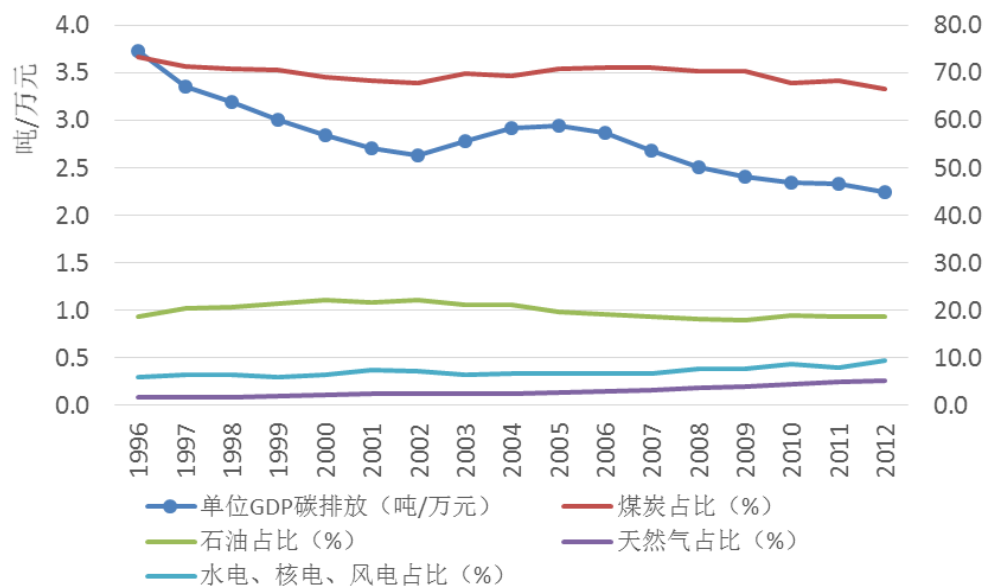


图 3-6 中国能源结构与单位 GDP 碳排放关系

D. 深圳能源结构调整与碳排放关系

深圳市能源结构与单位 GDP 关系如图 3-7，在此将各细分能源归类为煤炭、油类、石油气及天然气、电力四大类。2008-2013 年间，电力占总能耗比例从 52.1% 上升至 56.9%，油类能耗占比从 39.5% 降至 32.7%，石油气及天然气能耗占比从 8.2% 升至 10.3%，煤炭能耗占比基本保持不变。2008-2013 年间深圳市单位 GDP 碳排放不断降低，从 0.928 吨/万元降至 0.639 吨/万元。因此，提高相对清洁的电力消费占比能使得碳排放降低，而油类等排放相对较高的能源消费会增加碳排放，通过优化能源结构能够有效控制碳排放。

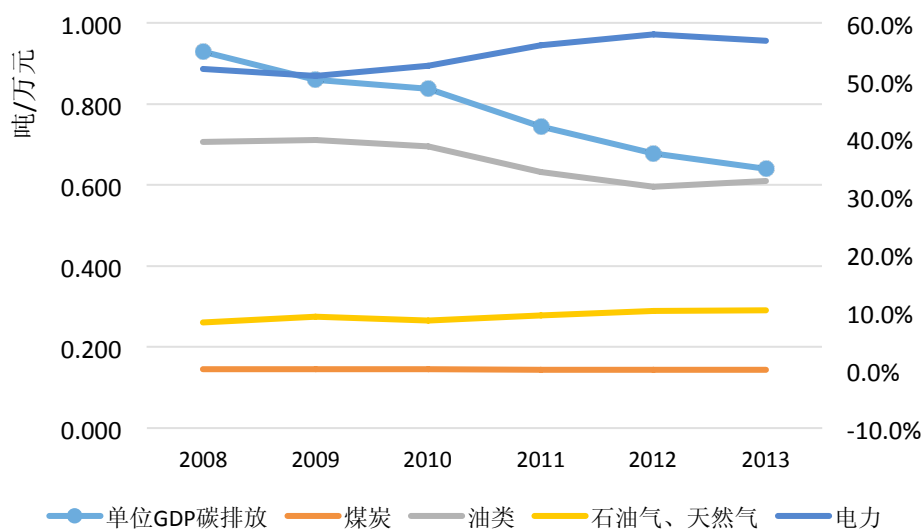


图 3-7 深圳市能源结构与单位 GDP 关系

（3）交通运输结构与碳排放关系

交通运输结构表现为交通行业不同运载方式的结构比例。交通行业可大力推广公交车、地铁等高效节能的公众出行方式，同时积极改善交通结构，规划设计便捷节能的道路轨道，提高使用清洁能源作为动力的交通工具占比，以降低相关碳排放。

A. 交通运输结构与碳排放关系相关研究

交通结构方面，Papagiannaki 和 Diakoulaki 使用 IDA 方法研究 1990-2005 年丹麦和希腊的乘用车对碳排放变化趋势的影响，结果表明单位资本汽车数量是最主要的影响因素。苏城元（2012）研究了当今世界三种典型的城市交通结构发展模式的特征，如北美交通发展模式（小汽车主导的交通发展模式）、欧洲交通发展模式（小汽车与公共交通并重的交通发展模式）、亚洲交通发展模式（公共交通主导的交通发展模式）。在此基础上，结合对我国城市交通结构发展现状的分析，提出了适应我国国情的低碳交通发展模式，即构建以公共交通为主导、慢行交通为补充、适度发展小汽车的低碳交通发展模式。

柯水发与王亚等（2015）阐述了 2001-2011 年北京交通运输业发展状况，从各类消费能源的碳排放量的动态变化得出：煤油的碳排放量是北京市交通运输碳排放量的最主要来源。研究结果表明：通过改变交通运输的能源使用结构可以有效

调减北京市交通运输业的碳排放量。降低煤油、柴油在能源消费总量中所占比例，提高天然气、电力在能源消费总量中所占的比例，将有助于减少碳排放的总量；小汽车对于整个城市交通系统能源消耗量的边际效应远远大于其他的交通方式；公共交通具有节地、节能以及环保的优势，应该大力倡导公共交通，加大城市公共交通的投入力度，使得人们更多地选择公共交通出行，从而达到节能减排的目的。任纪佼与高丽洁等（2015）对 2006-2012 年天津市交通碳排放量以及不同出行方式的碳排放量所占比例进行了核算，分析了该市的交通碳排放结构变化特征，并将其与北京市和上海市的交通碳排放结构进行比较。发现天津市近年来交通碳排放量迅猛增长的主要原因是私家车出行比例的快速增加以及公共交通发展的欠缺。私家车出行比例的迅猛增长和慢行交通（自行车、步行）的萎缩，会导致城市交通的碳排放量增加。轨道交通被认为是目前最为低碳的交通出行方式，其每公里的平均碳排放量很低。公共交通尤其是轨道交通对于交通的低碳化发挥着重要作用。应合理设计公共汽车和轨道交通线路及站点，实现无缝换乘，增加公共交通出行的便利性；增加公共自行车作为交通工具，倡导慢行交通。程玲（2012）以居民出行方式为研究对象，构建低碳经济下城市客运交通结构优化模型。提出应提高公共交通竞争力，增加它在城市交通系统中的比例，如采取“公交优先”、“优化公交线网”、“提高公交服务能力”、“加强轨道交通建设”等措施，以减少交通碳排放。

B. 中国交通运输结构与碳排放关系

中国交通运输结构与单位 GDP 碳排放的关系见图 3-8 及图 3-9。客运方面，2004-2012 年间，中国铁路旅客周转量占比从 35.0%降至 29.4%；公路旅客周转量占比从 53.6%升至 55.3%；水运旅客周转量占比从 0.4%降至 0.2%；民用航空旅客周转量占比从 10.9%升至 15.1%；与此同时中国交通运输、仓储、邮政业单位增加值碳排放则有较大波动。货运方面，2004-2012 年间，中国铁路货物周转量占比从 27.8%降至 16.8%；公路货物周转量占比从 11.3%升至 34.3%；水运货物周转量占比从 53.3%降至 47.0%；民用航空货物周转量占比保持 0.1%；管道货物周转量占比从 1.2%升至 1.9%。中国交通运输部门单位增加值碳排放变化趋势整体上与水运货物周转量占比和铁路货物周转量占比类似，而与公路货物周转量占比反向变化。

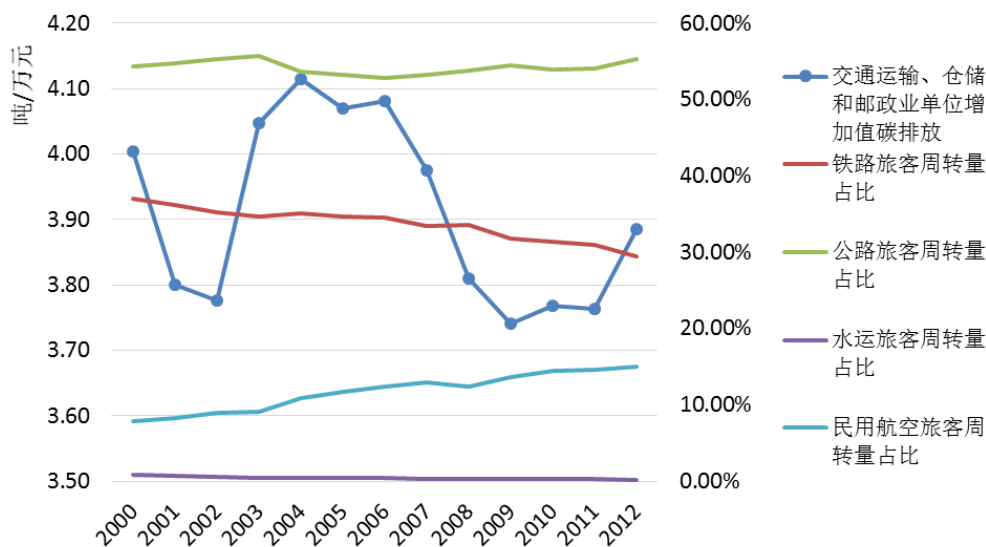


图 3-8 中国客运交通结构与单位 GDP 碳排放关系

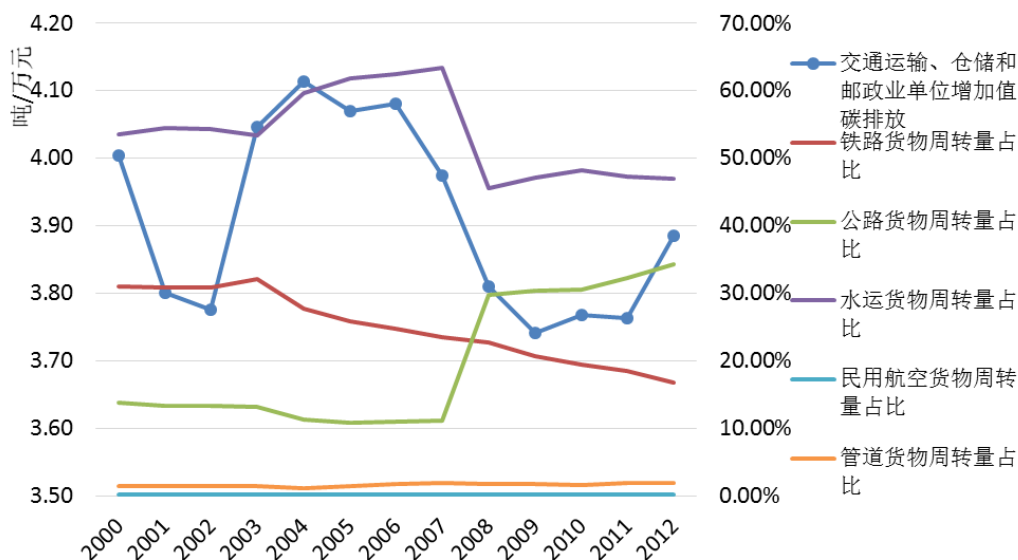


图 3-9 中国货运交通结构与单位 GDP 碳排放关系

C. 深圳交通运输结构与碳排放关系

深圳市交通运输结构与单位增加值碳排放的关系见图 3-10 和图 3-11。客运方面，2008-2013 年间深圳市铁路旅客周转量占比从 12.0% 降至 3.6%，降幅达 8.4%；公路旅客周转量占比从 42.8% 降至 36.1%，降幅为 6.7%；水运旅客周转量占比保持 0.2%，民用航空旅客周转量占比从 45.0% 升至 60.1%，升幅为 14.9%。单位增加值碳排放整体较为平稳，其在 2009-2012 年与铁路客运周转量占比同向变化，与民用航空客运周转量占比则反向变化；而在 2008-2012 年与公路旅客周转量占比呈反向变化关系。货运方面，2008-2013 年间深圳市水运和公路货物周转量占比变化不

大，铁路及民用航空货物周转量占比可以忽略，相应的单位增加值碳排放整体也较为平稳。

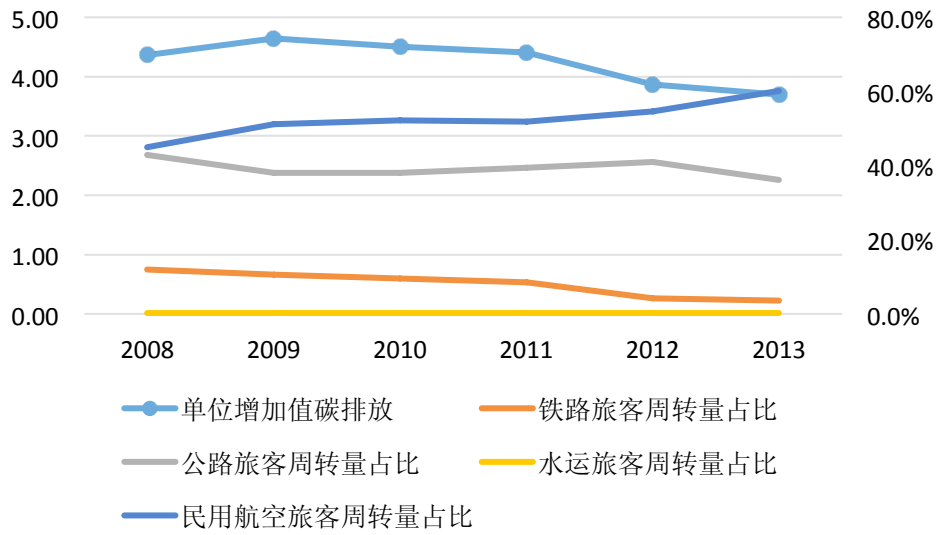


图 3-10 深圳市客运交通与单位增加值碳排放关系

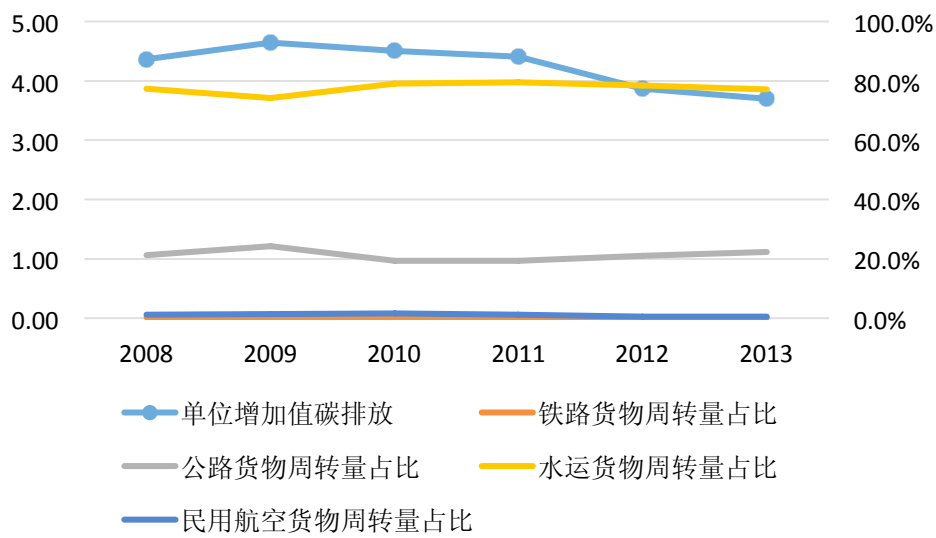


图 3-11 深圳市货运交通与单位增加值碳排放关系

（4）制造业结构与碳排放关系

制造业结构表现为制造业内部高、中、低能耗子行业占制造业整体的结构比例。可以通过适当降低黑色金属冶炼及压延加工业、非金属矿物制品业、塑料制品业等单位增加值能耗较高的行业比例，提高诸如通信设备、计算机及其他电子设备制造业、医药制造业、纺织服装、鞋、帽制造业等子行业的业内比重，以降

低制造业相关碳排放。

A. 制造业结构与碳排放相关研究

制造业结构方面，Lim and Yoo et al.(2009) 等通过对 1990-2003 年韩国的碳排放数据的研究，指出制造业中“非金属矿物制品业”、“金属制品业”、“石油及煤炭产品业”的二氧化碳排放强度最高，而“电气机械及器材制造业”、“精密仪器业”则很低。因此应重视制造业的结构调整，发展后几类排放强度低的产业。林玲与张艾莉等（2013）在研究中表明制造业内部（传统制造业和现代制造业）结构调整对其能耗强度和排放强度的贡献率。传统制造业占比的下降、现代制造业占比的上升有力地促进了制造业的降耗与减排。无论是制造业在第三产业、第二产业、工业中的占比变化，还是制造业内部的结构变动，均明显促进了相应能耗及排放强度的降低。徐盈之与徐康宁等（2011）指出我国制造业碳排放的驱动因素呈现出一定的阶段性特点，其主要驱动因素为产出效应、经济结构效应和能源强度效应。高碳能源比例增多，低碳或无碳的新能源开发没有跟上经济发展的需求，导致碳排放增多。制造业内部产业结构调整不仅包括轻、重工业的比例，还包括资本密集与劳动密集部门的比例，国有与非国有部门的比例，以及高煤炭消耗与低煤炭消耗部门的比例。王迪与聂锐（2012）指出我国制造业碳排在考察期内呈"U"型变动趋势，且存在较大的行业差异，能源密集型行业碳排放总量较大，能源效率、能耗总量与结构上的行业差异是造成这一状况的根源。产业结构调整、能源技术进步与能源结构优化是减缓碳排放的主要因素，制造业减排的关键在于重点耗能部门的结构调整和技术进步，与煤炭等高碳能源的高效、清洁利用。

B. 中国制造业结构与碳排放关系

中国制造业结构与制造业碳排放关系见图 3-12。2004-2012 年间中国制造业单位增加值碳排放从 5.24 吨/万元降至 3.98 吨/万元，与此同时低、中、高单位增加值能耗行业排放占比基本保持不变¹¹。说明 2004-2012 年间中国制造业单位增加值

¹¹根据《2010 年国民经济和社会发展统计报告》，制造业中的石油加工炼焦及核燃料加工业、化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼及压延加工业、有色金属冶炼及压延加工业这五个行业属于高耗能行业；而制造业低、中能耗行业划分情况借鉴本研究中“制造业碳排放驱动因素分析”部分对深圳市制造业划分标准，将烟草制品业、皮革、毛皮、羽毛（绒）及其制品业、文教体育用品制造业、医药制造业、

碳排放降低的驱动力可能源于其能源消费结构的变化及技术进步。但值得注意的是 2004-2006 年间，制造业单位增加值碳排放先在 2004-2005 年高能耗行业比重上升和中能耗行业比重下降的同时升高，之后在 2005-2006 年随着高能耗行业比重下降以及中能耗行业比重上升而降低。

基于 LMDI 的中国制造业碳排放驱动因素分析结果见图 3-13。在 1996-2000 年、2000-2004 年、2004-2008 年这三个时间段中，制造业的 GDP 增长和占中国总 GDP 比重的上升始终对制造业碳排放增长有正向的驱动作用。制造业内部各类型行业比重方面，1996-2008 年间制造业低单位增加值能耗行业增加值占比从 18.41% 上升至 30.58%，而中、高单位增加值能耗行业增加值占比则均呈下降态势，分别从 57.60%、23.99% 降至 51.40%、18.02%。这种变化使得制造业碳排放产生了相应的降低。高中低能耗行业单位增加值能耗方面，1996-2008 年间制造业高、中、低能耗行业的单位增加值能耗均持续下降。从 LMDI 分析结果来看，这种变化使得制造业碳排放有大幅的下降。高中低能耗行业单位能耗碳排放方面，各类型行业的单位能耗碳排放量均在小幅波动中降低，这说明在能源结构角度，各行业的能源结构不断得到优化。与此同时，制造业碳排放也相应减少，体现出了能源结构优化对碳减排的积极效果。

通信设备、计算机及其他电子设备制造业、仪器仪表及文化、办公用机械制造业归类为低能耗行业，其余行业为中能耗行业。

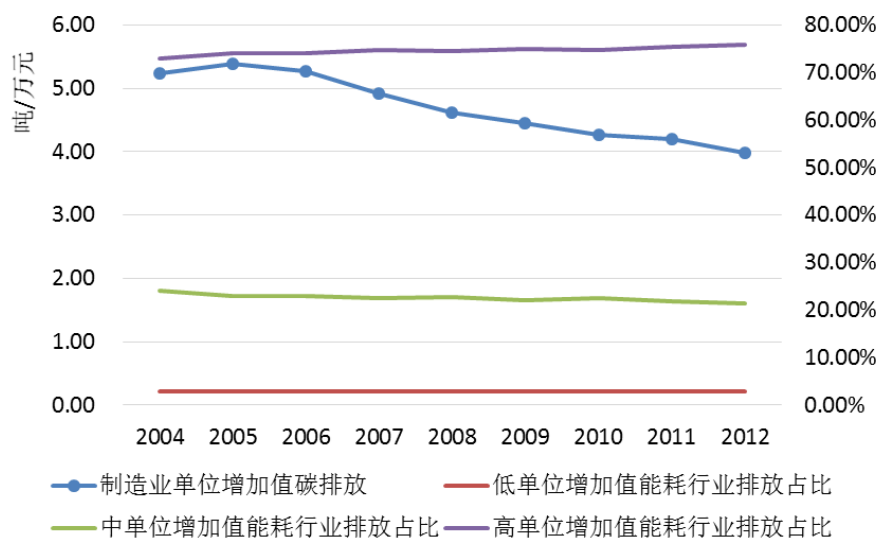


图 3-12 中国制造业结构与制造业碳排放关系

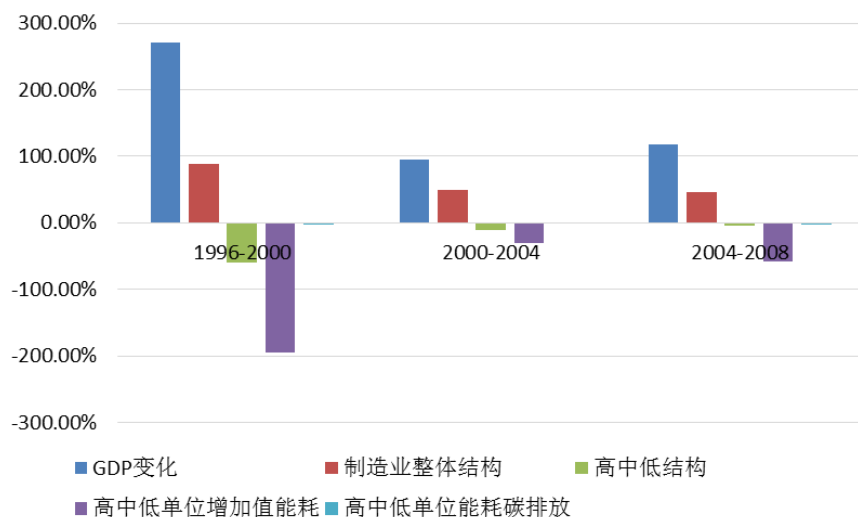


图 3-13 基于 LMDI 的中国制造业碳排放驱动因素分析

注：制造业 1996-2008 年增加值数据取自陈诗一（2011）的《中国工业分行业统计数据估算：1980-2008》，为 1990 年不变价。高、中、低能耗行业分类与前文“制造业单位 GDP 碳排放与子行业结构的关系”部分的分类情况相同。

C. 深圳制造业结构与碳排放关系

深圳市制造业结构与单位产值碳排放关系见图 3-14。2008-2011 年间，深圳市低单位增加值能耗行业产值占比下降 4%，中单位增加值能耗行业产值占比上升 1.7%，高单位增加值能耗行业产值占比则上升 2.2%，与此同时制造业单位产值碳排放在 2008-2010 年下降较快。而 2011-2013 年间，低单位增加值能耗行业产值占比回升 2.3%，中单位增加值能耗行业产值占比上升 1.7%，高单位增加值能耗行业

产值占比下降 4%，该时期的制造业单位产值碳排放保持下降趋势。以上制造业单位产值碳排放的表现可能源于制造业低、中、高能耗行业结构变化和各类行业内部结构优化及技术进步的综合影响。

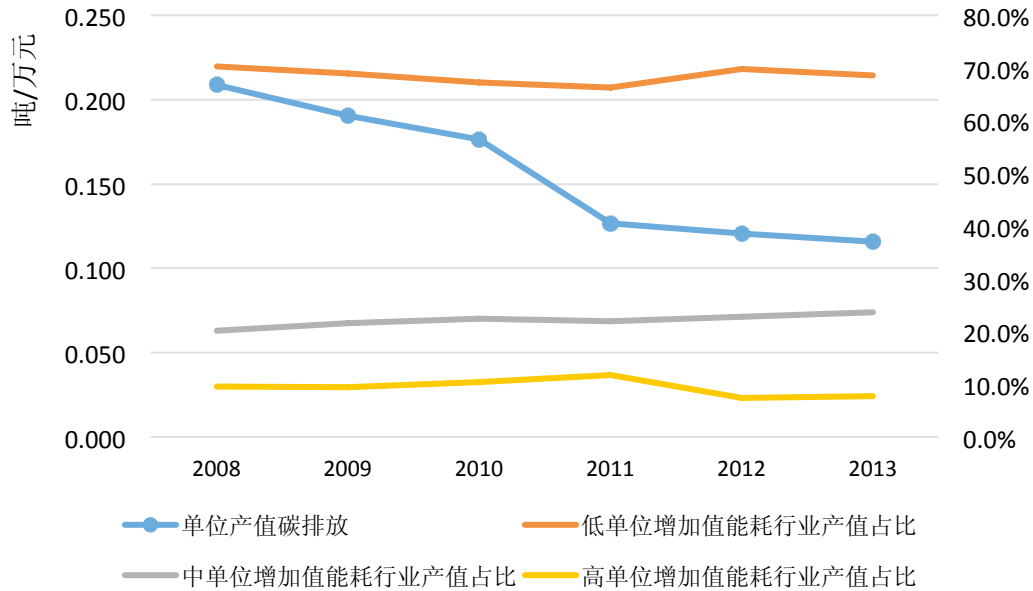


图 3-14 深圳市制造业结构与单位产值碳排放关系

3.2.3.2 强化能源需求管理和提高能效

能源需求是由于人们对社会产品、服务的需求而派生的需求，可以被看作为一种特殊的生产要素。科学使用能源、合理控制能源消费量已成为经济社会发展的内在要求，加强能源需求管理有利于在更大程度上挖掘终端节能潜力。能源效率指能源经济效率，是单位增加值或产值的能源消耗量，提高能效是强化能源需求管理的重要手段。

（1）能源需求管理相关研究

目前，国内外已有不少关于能源需求的研究，从研究方法¹²来看，可分为：弹性系数法、时间序列法、指数分解法和结构分解法四个大类。

A.弹性系数法

弹性系数法是根据能源消费与其影响因素的历史统计数，利用回归分析估算弹性系数。例如：Leiming Hang 等（2006）运用 1985-2003 年的时间序列，检验能

¹²这几种方法可能会交叉使用。

源价格变化与能源强度的关系，并估计了能源价格弹性系数，结果表明：能源相对价格上升能降低能源强度，部门调整同样可以降低总的能源强度¹³。Fatih Birol 和 Jan Horst Keppler（2000）认为能源效率是降低能源消费政策的重要参数，影响能源效率的两个重要因素是相对价格变化（如通过税收提高能源价格）和引入新技术提高每单位能量的生产力。不管是价格变化还是技术变化都会对整个经济产生影响，这两种政策路径并不是对立的，而是同一事物的两个方面，需要同时提高，一致应用¹⁴。刘东霖等（2010）认为影响能源需求的主要因素包括经济的增长、能源价格、总人口、产业结构变化和能源消费结构，并利用 MCMC 方法和 HP 滤波方法，得到能源消费需求对各相关因素弹性系数的趋势及波动情况，结果表明：电力价格变动对降低能源消费作用最明显，但边际效用递减¹⁵。史丹等（2003）利用弹性系数法得到结构变动是能源消费的重要影响因素，由于各产业的特点不同，对能源品种的需求、结构变动的影响程度与作用是不同的¹⁶。

B.时间序列法

运用弹性系数法研究能源需求，适用于对精度要求不高的研究，若追求精度的最大化，尤其是在预测方面，时间序列法是优先选择。例如，Ugur Soytas 等（2003）使用时间序列法检验能源消费与 GDP 的因果关系，结果表明仅有阿根廷存在双向因果关系，意大利和韩国是从 GDP 到能源消费的因果关系，土耳其、法国、德国和日本是从能源消费到 GDP 的因果关系¹⁷。Bwo-Nung Huang 等（2008）用 1972 年-2002 年的 82 个国家能源消费和 GDP 的面板数据检验二者的关系，结果表明：在低收入国家，能源消费与经济发展之间不存在因果关系；在中等收入国家，经济发展显著带动能源消费；在高收入国家，经济发展对能源消费的促进作用不明显¹⁸。A.S. Dagoumas 和 T.S. Barker（2010）利用宏观经济综合模型 E3MG，对英

¹³Hang L, Tu M. The impacts of energy prices on energy intensity: Evidence from China[J]. Energy Policy, 2007, 35(5):2978-2988.

¹⁴Birol F, Keppler J H. Prices, technology development and the rebound effect. Energy Policy[J]. Energy Policy, 2000, 28(6-7):457-469.

¹⁵刘东霖, 张俊瑞. 我国能源消费需求的时变弹性分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(2):92-97.

¹⁶史丹, 张金隆. 产业结构变动对能源消费的影响[J]. 经济理论与经济管理, 2003, 8:30-32.

¹⁷Soytas U, Sari R. Energy consumption and GDP causality relationship in G-7 countries and emerging markets[J]. Energy Economics, 2014, 25(1):33-37.

¹⁸Huang B N, Hwang M J, Yang C W. Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach[J]. Ecological Economics, 2008, 67(1):41-54.

国能源需求总量和能源需求结构进行情景分析，四种情景下，除了 REF 情景无减排目标，CFH、CLC 和 CAM 分别比 1990 年碳排放低 40%、60%和 80%，结果显示电力和交通部门减排目标完成度最高，电力部门减排源于新能源和碳捕捉和储存技术等，交通部门减排则依赖于技术协议和行为转变来刺激电动汽车的需求¹⁹。钟晓青等（2007）基于 1980-2003 年广州市宏观统计资料，运用格兰杰因果检验和协整理论进行研究，结果表明：广州市 GDP 和能源结构是能源消费的 Granger 原因，GDP 与能源消费及能源结构之间存在长期均衡关系，能源结构对能源消费的影响大于经济增长的影响²⁰。林伯强（2003）认为电力需求取决于电价、GDP 和人口，并利用单位根检验和协整模型的方法展开研究，结果表明，影响电力需求最重要的因素是 GDP，但中国结构变化及效率改进抑制电力需求²¹。王风云（2008）运用 Granger 非因果关系检验、协整检验和误差修正模型进行实证研究，得出：能源消费总量对 GDP 存在显著的单向 Granger 因果关系，GDP 对能源生产总量存在显著的单向 Granger 因果关系，能源消费总量、能源生产总量与 GDP 之间存在长期协整关系，并认为由于生产技术和资源禀赋的特点，短期大幅增加能源供给不现实，因此减少能源供需压力关键在于减少能源需求²²。

C.指数分解法

相比时间序列法和弹性系数法，指数分解法和结构分解法的优点在于可以比较各因素的贡献大小。指数分解法来源于拉氏和帕氏指数，Laspeyres 指数分解法在 80 年代得到广泛应用，目前较为常见的 LMDI（Divisia）指数分解法。相关学者的研究如 B.W. Ang (2005)比较了不同的指数分解方法，认为 LMDI 指数分解法是最有效的方法，并对 LMDI 在能源领域的应用进行了分析指导²³。Fisher - Vanden 等人（2004）基于 Divisa 指数分解法，对中国 1997—1999 年大中型企业的面板数据进行了分析，认为影响能源消费的因素包括能源价格、科研投入、所有权形态

¹⁹A.S. Dagoumas, Barker T S. Pathways to a low-carbon economy for the UK with the macro-econometric E3MG model[J]. Energy Policy, 2010, 38(6):3067-3077.

²⁰钟晓青, 吴浩梅, 纪秀江,等. 广州市能源消费与 GDP 及能源结构关系的实证研究[J]. 中国人口资源与环境, 2007, 1(1):135-138.

²¹林伯强. 结构变化、效率改进与能源需求预测——以中国电力行业为例[J]. 经济研究, 2003, 5:57-65.

²²王风云. 我国能源供给与需求和经济增长之间关系实证研究[J]. 工业技术经济, 2008, 10:77-80.

²³Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. Energy Policy, 2005, 33(7):867-871.

（国有、集体所有、私有等）和产业结构²⁴。基于拓展的 Kaya 恒等式及 LMDI 方法所建立的能源消费碳排放因素分解模型，朱勤等（2009）考量了经济产出规模、人口规模、产业结构、能源结构及能源效率等多个因素，认为经济产出的持续增长是我国能源需求增长的主导因素，产业结构变化对能源需求表现出正效应²⁵。叶祖达在 Kaya 模型的基础上提出，要控制碳排放，需要处理能源结构、各类能源排放强度、能源效率、经济发展和碳排放的关系，他认为能源需求可以分解为三个部门：建筑部分、交通部门和工业部门，其中建筑部门包括住宅和公建，工业部门包括工业生产和工业建筑²⁶。聂洪光（2013）对中国民用能源消费采用指数分解法，将其分解为能源结构效用、人口增长效用、住房面积效用和家用电器能源需求效用，结果显示：家用电器能源需求和人均住房面积的增长是民用能源消费增长的主要驱动因素²⁷。

D.结构分析法

随着结构经济学理论的发展和投入产出方法的引入，结构分析法渐渐得到广泛应用。例如 Richard F. Garbaccio 和 Mun S. Ho 等（1999）基于投入产出表，将能源消费分解为技术进步和多种类型的结构调整（如进出口的总量和构成），结果显示各个部门的技术进步是能源产出比率下降的主要原因，结构调整实际上增加了能源的消费，进口资源密集型产品会降低能源强度²⁸。Ulrike Wachsmann 和 Richard Wood（2009）利用结构分解法将巴西 1970 年-1996 年的能源消费分解为八个因素：能源强度效应、投入结构（里昂惕夫效应）、产品结构、最终需求、收入水平、工业能源使用人口、居住人均耗能和居住能源使用人口，结果表明收入水平变化、投入结构、产品结构和能源使用人口促进了巴西能源消耗的增长，能源强度效应、最终需求、居住人均耗能则起到了抑制作用²⁹。聂洪光（2013）对中

²⁴ Fisher - Vanden, K.,Jefferson,G.H.,Liu,H.,TaoQ.. What is driving China's decline in energy intensity[J]. Resource and Energy economics , 2004, (26).

²⁵朱勤, 彭希哲, 陆志明,等. 中国能源消费碳排放变化的因素分解及实证分析[J]. 资源科学, 2009, 12(12):2072-2079.

²⁶叶祖达. 碳排放量评估方法在低碳城市规划之应用[J]. 现代城市研究, 2009, 11:20-26.

²⁷聂洪光. 中国能源消费增长的问题及对策研究[D]. 吉林大学,2013.

²⁸Garbaccio R F, Jorgenson D W. Why Has the Energy-Output Ratio Fallen in China?[J]. General Information, 1999, 20(3):63-91.

²⁹Wachsmann U, Wood R, Lenzen M, et al. Structural decomposition of energy use in Brazil from 1970 to 1996[J]. Applied Energy, 2009, 86(4):578-587.

国商用能源消费采用结构分解分析法,将商用能源消费增长分解为能源强度效用、里昂惕夫效用、产业结构效用、增长结构效用和经济增长效用,研究表明:经济增长是商用能源消费增长的主要原因,能源强度效用对商用能源消费起抑制作用²⁷。

通过梳理国内外相关文献发现,影响能源需求的主要因素包括能源价格、产业结构、人口、经济发展状况等,能源需求的主要部门包括建筑、交通、制造业、电力生产部门等。能源消费的革命就是要控制能源消费过快增长,将交通、制造业、建筑节能放在重中之重,进一步鼓励生活节能。要实现能源需求端低碳化,必须转变能源消费理念,改变粗放的发展方式,提高能源利用效率。

(2) 中国及深圳市能源需求、能源利用效率现状

提高能源利用效率是从需求端抑制 CO₂ 排放的重要手段。能源利用效率(能源强度)即单位增加值、单位产值或单位产品的能源消耗量,体现了能源利用的经济效益。中国能耗强度与世界领先水平的差距逐渐缩小,具体可体现在几种重要的高耗能工业产品上,见图 3-15。2005 年-2012 年,中国的钢可比能耗由 732 kgce/tn 下降到 674 kgce/tn,下降了 7.92%,与国际先进水平相比,差距由 122kgce/tn 缩小到 64kgce/tn,同时期,中国乙烯综合能耗由 1073kgce/tn 下降到 893kgce/tn,下降了 16.78%,与国际先进水平的差距由 444kgce/tn 缩小到 264kgce/tn; 2008 年-2012 年,中国电解铝交流电能耗由 14323kWh/t 下降到 13844kWh/t,下降了 3.34%,低于国际先进水平的下降速度(6.52%),同时期,中国合成氨综合能耗由 1661 kgce/tn 下降至 1552 kgce/tn,2008 年与国际先进水平相差 671 kgce/tn,到 2012 年差距下降到 562 kgce/tn。

与全国平均水平相比,深圳市单位 GDP 能耗处于领先水平。从 2005 年-2013 年深圳市单位 GDP 能耗不断下降,万元 GDP 能耗由 2005 年 0.593 吨标准煤(2005 年不变价)下降到 2013 年 0.428 吨标准煤(2005 年不变价),约为全国平均能耗 41%,见图 3-16。利用 LMDI 模型³⁰对深圳市碳排放进行分解,结果显示从 2008 年-2013 年深圳市能耗强度对 CO₂ 减排的贡献率为-150.25%,即能耗强度降低促进

³⁰深圳市总碳排放为基于能源平衡表的碳排放,GDP 为深圳市 2005 年可比价 GDP,深圳市能耗总量为按年均计算的能耗总量。

CO₂ 的减排。能源利用效率的提高是深圳市实现需求端低碳化的必要手段。

油品和外来电力是深圳市主要的能源消费品种。2013 年，仅油品消费和外来电力就占了深圳市能源消费总量的 86.4%。从能效提高的角度来说，电力消费应着手降低电力碳排放因子，而油品消费则以提高油品质量和清洁化为目标。就能源消耗的部门而言，交通部门、制造业和建筑部门是深圳市能源消费的三大主要终端部门，除交通部门能耗仍处于高速增长状态之外，其余或低速增长或呈现下降趋势。

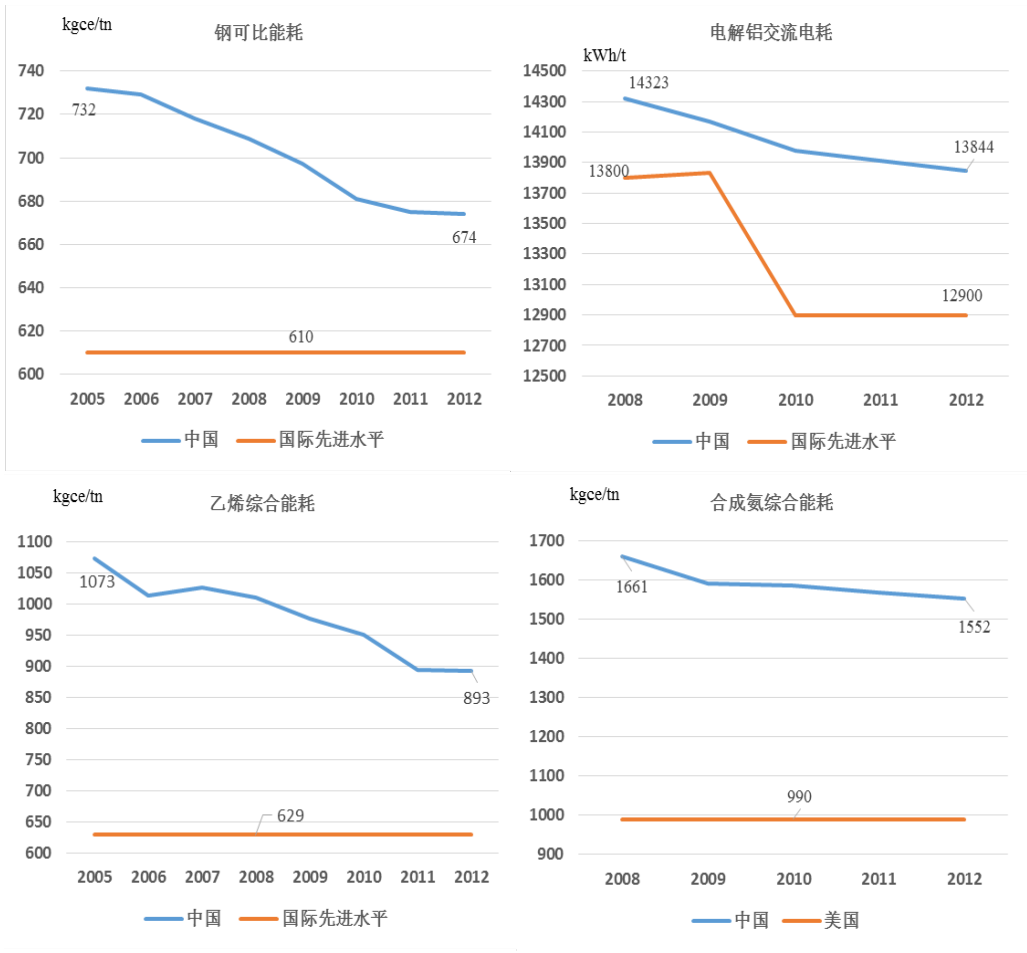


图 3-15 中国几种高耗能工业产品的能耗水平与国际对比

注：来源：中国能源统计年鉴 2013，其中钢可比能耗国际水平来自"王庆一, 2006. 我国能源密集产品单位能耗的国际比较及启示. 国际石油经济, 2:24-30."

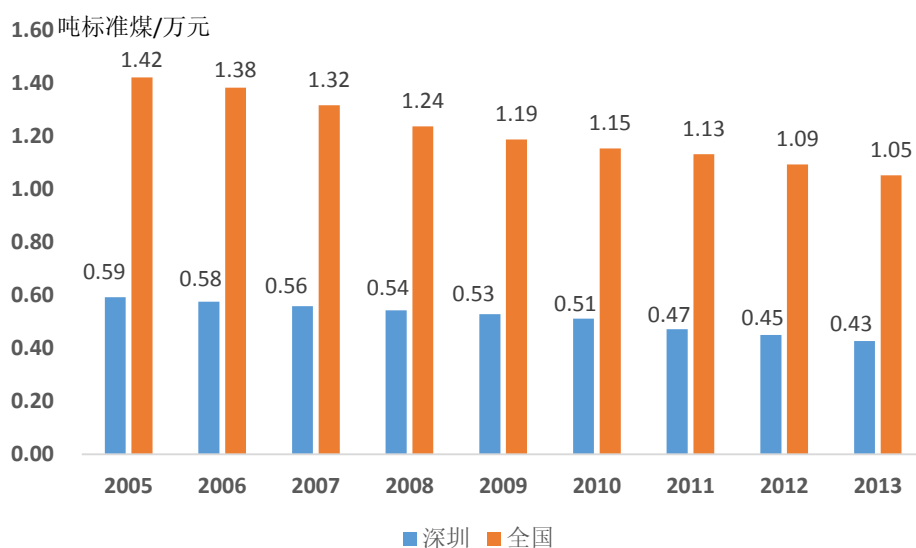


图 3-16 2005 年至 2013 年深圳市和全国单位 GDP 能耗比较

注：基于《中国统计年鉴 2014》及《深圳统计年鉴 2014》整理。GDP 为 2005 年可比价。

3.2.3.3 能源供给低碳化

温室气体的减排和控制不仅要求从能源需求端来提高能源利用效率，压缩化石能源需求，还要求从能源供应的源头去碳、减碳。能源供给低碳化就是降低化石能源的依赖，提高化石能源清洁度，扩大能源供给结构中低碳能源的比重，促进能源供给结构的多元化。

(1) 能源供给低碳化相关研究

当前，国内外对能源供应的相关研究主要包括：Hoesung Lee 等（1996）认为调整能源供给结构降低碳排放的重点，主要缓解方案有提高能源利用效益和用低碳能源替代高碳能源。林伯强能源强度的降低并不必然意味着碳排放的降低，降低碳排放的关键是改变以煤为主的能源结构³¹。Bing Jiang 等（2010）认为中国能源发展战略的核心是发展低碳能源和更清洁高效的地利用化石能源，减排还应采用节能优先的发展战略³²。Zhao Tao（2011）认为人均 GDP、能源消费、能源结构和 CO₂ 排放量是衡量低碳经济的四项重要指标，通过 LEAP 模型模拟中国 2050 年的低碳经济发展状况，结果显示三个情景下 2015 年中国终端能源消耗量分别为

³¹林伯强, 姚昕, 刘希颖. 节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整[J]. 中国社会科学, 2010, 1:58-71.

³²Jiang B, Sun Z, Liu M. China's energy development strategy under the low-carbon economy.[J]. Energy, 2010, 35(11):4257-4264.

60.95、52.36、62.39 亿吨标准煤，能源效率的提高是 CO₂ 排放量下降的主因，要想从资源依赖型经济转向低碳经济，中国必须优化能源结构，包括利用和发展水利发电，发展核能和风能等³³。Narumitr Sawangphol 等（2011）分析了低碳电力在泰国的发展，包括可再生能源发电的现状和发展障碍，泰国具有发展风电、水电、垃圾发电、太阳能发电、生物质能发电等可再生能源发电的潜力，当前生物质能受限制较多，风电和太阳能发电的推广速度较慢，应加强推进³⁴。Lucas Bretschger（2005）研究了技术进步与能源供应的关系，认为技术进步能补偿能源供应的不足³⁵。Jarunee Wonglimpiyarat（2010）利用 Kuhn-Schumpeter 模型讨论了技术进步对能源供应的影响，并认为能源利用方式需要从以原油为基础转向以生物能源为基础，以实现可持续发展³⁶。

刘鹏，孟凡生（2014）认为，应从市场、组织、合作、扶持 4 个方面构建区域能源供给低碳化结构。市场机制即按照市场规律引导各种能源产品在利用效率的指引下流动；组织机制要求有负责区域能源供给低碳化的专门机构；合作机制意味着有关各方需在开展能源开发、利用、消费等领域相互合作；扶持机制即政府、国内外组织对新能源开发利用水平低的区域进行技术、管理等方面的扶持³⁷。成金华，陈军等（2006）建立了中国非可再生能源有效供给水平评价指标体系，认为影响非可再生能源有效供给水平的因素包括效率因素、增长因素、技术因素和价格因素，非可再生能源的可持续发展依赖于技术进步，提升能源供给效率，降低生产能耗，强调能源的经营能力³⁸。孟凡生，李美莹（2014）认为能源资源禀赋、经济增长水平、产业结构和技术进步是影响中国能源供给的主要因素，通过突变级数法和最小二乘法对中国 1991 年-2011 年相关数据进行综合分析发现，这四个因素对能源供给均有显著促进作用，能源资源禀赋的影响程度最大³⁹。

³³Zhao T, Liu Z, Zhao C. Research on the prospects of low-carbon economic development in China based on LEAP model[J]. Energy Procedia, 2011, 5(1):695-699.

³⁴Sawangphol N, Pharino C. Status and outlook for Thailand's low carbon electricity development[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1):564-573.

³⁵Bretschger L. Economics of technological change and the natural environment: how effective are innovations as a remedy for resource scarcity?[J]. CER-ETH Economics working paper series, 2004, 54(2):148-163.

³⁶Wonglimpiyarat J. Technological change of the energy innovation system: From oil-based to bio-based energy[J]. Applied Energy, 2010, 87(3):749-755.

³⁷刘鹏，孟凡生. 区域能源供给结构低碳化模型、配置系统及实现机制研究[J]. 工业技术经济, 2014, 6:42-47.

³⁸成金华，陈军，段平忠. 中国近十五年来非可再生能源有效供给水平评价[J]. 中国软科学, 2006, 11:7-14.

³⁹孟凡生，李美莹. 我国能源供给影响因素的综合评价研究[J]. 科研管理, 2014, 35(9).

总体而言，能源供给低碳化是兼顾能源产品供给、要素供给以及供给效率的可持续供给方式⁴⁰。调整能源供给的思路主要包括三个方面：一是推进清洁能源对化石能源的替代，如重点发展新一代非粮燃料乙醇和生物柴油；二是提高能源供给的效率，如提高原油开采率；三是促进化石能源的清洁利用，如对煤炭分级分质梯级利用，加大煤炭洗选比重，鼓励煤矸石等低热值煤和劣质煤就地清洁转化利用。

（2）中国及深圳市能源供应效率现状

由于中国的禀赋特征，能源供给短时间内还难以改变依赖煤炭的格局，因此化石能源的清洁利用和能源供给效率的提升是实现供给源头低碳化不可或缺的环节。就能源供给的效率而言，中国与世界领先水平的差距逐渐缩小，具体可体现于火电厂发电煤耗的趋同。2005 年-2012 年，中国的火电厂发电煤耗由 343 gce/kWh 下降到 305 gce/kWh，下降了 11.08%，下降速度高于日本，与日本火电厂发电煤耗的差距由 42gce/kWh 缩小到 10gce/kWh，见图 3-17。预计到 2020 年，中国火电厂发电煤耗有望降至 295gce/kWh，供电煤耗降至 310gce/kWh，达到于世界先进水平⁴¹。

与全国能源供给效率水平相比，深圳市处于领先水平。深圳市能源对外依赖程度高，是能源净进口城市，主要能源供应是电力供应。当前，深圳市共有 8 家火电厂，其中妈湾电厂是唯一一家燃煤电厂，广前、南天等其他 7 家是燃气电厂。2010 年，深圳市火电厂中发电煤耗最高的是妈湾电厂，达 310gce/kWh，与全国平均水平相当，而其他燃气电厂发电煤耗均低于全国水平，其中广前电力的发电煤耗水平最低，低至 227.9gce/kWh，见图 3-18。

⁴⁰陈端计. 我国市场经济中的供给问题研究[D]. 厦门大学, 2003.

⁴¹杨勇平, 杨志平, 徐钢,等. 中国火力发电能耗状况及展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 23(23):2-11.

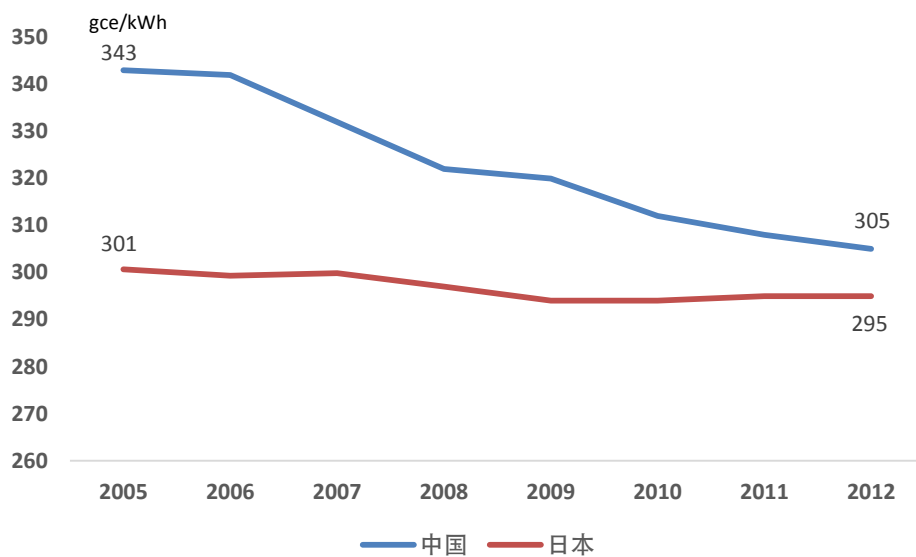


图 3-17 2005 年-2012 年中国和日本火电厂发电煤耗对比

来源：中国能源统计年鉴 2013。

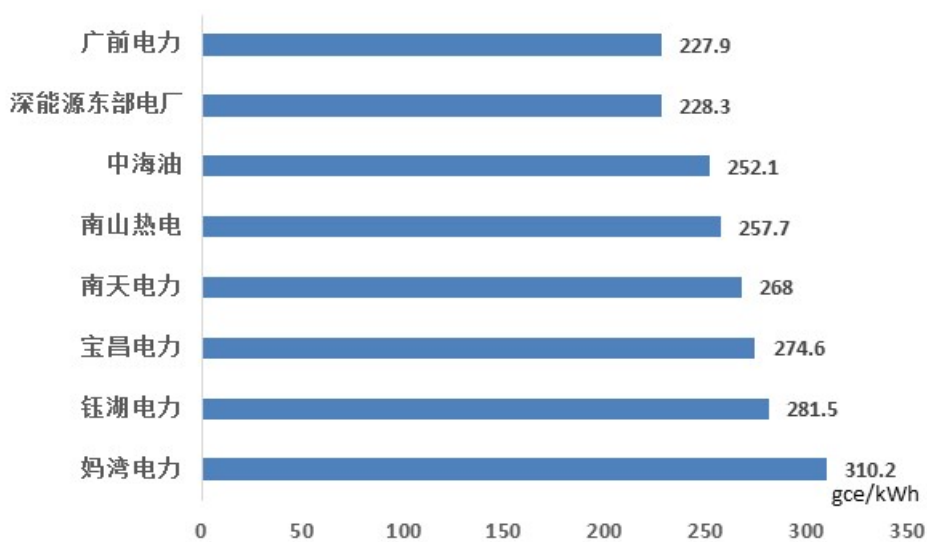


图 3-18 2010 年深圳市八家火电厂发电煤耗对比

来源：本研究调研数据。

（3）中国及深圳市清洁能源利用现状

推进清洁能源对化石能源的替代是从供应端抑制 CO₂ 排放的重要手段。清洁能源包括水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能、海洋能等。根据《BP2035 世界能源展望》，与世界领先水平相比，我国可再生能源在电力行业的占比水平还比较低，但全球范围内可再生能源有望进一步得到重视，由于可再生能源成本降

低和性能的持续改进，将减少对政策的依赖，包括中国在内的各个国家都朝着更高水平发展。得益于强有力的推动政策，欧盟将继续保持全球最高的可再生能源普及率。预计到 2035 年，欧盟发电燃料中的可再生能源比重将从 2012 年的 13% 增至 32%。同时，中国也将大力推动可再生能源发电，拟于 2020 年实现非化石能源占一次能源消费的 15%，就可再生能源发电的增量来说，有望超越欧盟和美国。

深圳市清洁能源的在电力行业的利用推广处于全国领先地位。从用电结构来看，深圳市电力来源主要是煤电、气电和外来电力。在天然气利用方面，实施以天然气替代石油战略，大力推进西气东输二线深港支干线、西气东输二线深圳 LNG 应急调峰站、迭福 LNG 接收站项目等气源项目的规划建设，形成多气源供应格局。在生物质能领域，深圳市投入运营的垃圾焚烧发电厂有 7 座，发电装机容量 145MW，发电量约 11.6 亿度/年，规模居全国首位，预计在 2020 年将实现垃圾全量焚烧。得益于自然条件和技术优势，深圳已成为世界太阳能光电产品的主要产业聚集地，在凡具备太阳能集热条件的民用建筑强制配置太阳能热水系统，在具备条件的城市道路和公共场所推广安装使用太阳能—LED、风光互补照明等新能源产品，深圳机场已发展成为全球太阳能应用规模最大机场。风能发电目前仍处于可行性研究阶段。清洁能源的推广与利用是深圳市能源变革的重要路径，深圳市能源供应正努力朝着清洁化发展。

3.2.3.4 技术创新

技术是促进能源供需低碳化的关键因素。低碳技术是指以能源及资源的清洁高效利用为基础，以减少或消除二氧化碳排放为基本特征的技术。能源利用方式的转变、能源供给效率的提升和清洁能源的开发利用都依赖于低碳技术创新，低碳技术创新是实现城市可持续发展的战略选择。

（1）低碳技术创新相关研究

技术创新与能源系统或者 CO₂ 排放的关系可以总结为两大类。第一类研究认为通过技术进步可以提升能源使用效率，从而降低碳排放强度。如 Koji Shimada 等（2007）构建了在地区范围内计算 CO₂ 排放水平的公式，得出：假定志贺每年的经济增长率为 1.6%，仍可能在 2030 年减排 CO₂30%-50%（相比 1990 年）；为达到这样的减排水平，技术措施的减排贡献率达 54%，调整经济结构（包括控制土

地利用、改善交通系统、能源系统和生活方式等)的贡献率为 46%⁴²。Ian Sue Wing (2004)认为产业结构变化和技术进步是导致美国 20 世纪后 40 年能源强度不断下降的主要原因。其中,早期阶段产业间结构调整的贡献较大,但从 80 年代后期产业内效率(即技术性因素)提高对降低能源强度产生的影响更加显著⁴³。Michael Grubb 等(1995)认为对于引致型技术进步,为了减排所付出的代价会刺激技术进步和其他方面的发展,如规模经济和经验效应,从长远来说,减排成本会反而降低;对于自发的技术进步,减排成本通常与政策、历史减排路径、低碳技术的市场规模无关。能源部门技术创新和系统性变化通常是引致需求驱动的。更有利于实现减排目标的方式是远期自主性减排,而非近期强制性减排⁴⁴。Reyer Gerlagh (2007)为了探讨引致型技术进步是否在实质上降低减排成本,建立了两个模型,一个基于能源节约,另一个基于能源转换,结果显示:相比无引致型技术进步的情况下,学习收益和降低的碳税负担是实质性的,引致型技术进步不仅可以降低强制性减排的成本,还可以产生减排学习收益⁴⁵。Qixin Chen 等(2011)筛选中国电力部门的低碳技术需要考虑规模和潜力,煤电、风电、水电、核电的高效发电技术是最基本的,毫无疑问将作为未来的关键低碳技术,而碳捕捉与碳储存技术同样重要,它对碳排放的轨迹有重要影响,减排潜力达 70%,相较于没有应用碳捕捉与碳储存技术的情况,应用该技术使得碳排放峰值提前到达⁴⁶。Sam Nader (2009)介绍了马斯达尔作为世界零排放城市的在可持续发展技术方面的应用,包括新能源和碳储存等,以形成自身发展低碳在技术、体系和智力资本方面的优势⁴⁷。

国内学者研究方面,姚西龙等(2011)用 DEA 的方法从全要素生产率中分解出规模效率、技术进步和纯技术效率,基于 1998-2008 年省际面板数据,得出:总

⁴²Shimada K, Tanaka Y, Gomi K, et al. Developing a long-term local society design methodology towards a low-carbon economy: An application to Shiga Prefecture in Japan[J]. Energy Policy, 2007, 35(9):4688-4703.

⁴³Ian Sue Wing, Richard Seckaus. Explaining Long - Run changes in the energy intensity of the U. S. economy[R]. Working Paper, 2004.

⁴⁴Grubb M. The economics of changing course: implications of adaptability and inertia for optimal climate policy[J]. Post-Print, 1995, 23(4-5):417-431.

⁴⁵Gerlagh R. Measuring the Value of Induced Technological Change[J]. Energy Policy, 2007, 35(11):5287-5297.

⁴⁶Chen Q, Kang C, Xia Q, et al. Preliminary exploration on low-carbon technology roadmap of China's power sector[J]. Energy, 2011, 36(3):1500-1512.

⁴⁷Nader S. Paths to a low-carbon economy—The Masdar example[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1):3951-3958.

体上,技术进步与单位 GDP 的 CO₂ 排放负相关,规模效率与 CO₂ 排放正相关。但各个地区的情况不同:东中部技术进步与单位 GDP 的 CO₂ 排放负相关,东北和西部的技术进步则促进单位 GDP 的 CO₂ 排放升高,东中部的规模效率对单位 GDP CO₂ 排放的影响程度要远小于东部和西部。原因可能在于,东部的技术进步属于节能型,西部则属于耗能型,东北和西部规模效率的提升更多依靠能源消耗,中东部则有所改善。只有节能型技术进步才能降低碳排放强度⁴⁸。梁进社等用投入产出法将 1990 年代以来中国能源消费增长分解为中间需求效应、技术效应和最终需求效应,认为技术效应是降低中国能源消费的关键所在⁴⁹。齐志新和陈文颖(2006)利用拉氏因素分解法,分析中国宏观能源强度与工业部门能源强度下降的原因,结果显示:中国宏观和工业部门能源强度下降的关键因素均为技术进步,结构调整对能源强度影响较小。

第二类研究认为技术进步不一定抑制能源消费总量或 CO₂ 的排放,原因在于回报效应和技术锁定效应。Lorna A. Greening(2000)解释了“回弹效应”:技术进步提高了能源使用效率,同时也促进了经济增长,又扩大了能源需求,从抵消通过技术进步减排的 CO₂ 量。通过总结文献研究,得到:美国能源部门的回弹效应较低,不至于完全抵消由于能效提高而减排的 CO₂,因此通过提高能效的方式减排 CO₂ 仍是行之有效的⁵⁰。Stephen Redding(2002)指出技术进步的历史路径会对技术变化未来的发展产生决定性作用,技术锁定效应是路径依赖的典型例子⁵¹。Zhang Shasha(2011)在演化经济学中,低碳技术与经济系统是受正反馈机制影响的非线性随机动态系统,一旦受到偶发事件的影响,就会沿着固定的路径发展,即使有更优的方案,也无法改变。通过突破式创新和渐进式创新可以打破技术锁定效应的。突破式创新包括前瞻性技术和创新性技术,而渐进式创新则包括成熟

⁴⁸姚西龙,于渤. 规模效率和技术进步对 CO₂ 排放影响的实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 12:22-26.

⁴⁹梁进社,郑蔚,蔡建明. 中国能源消费增长的分解——基于投入产出方法[J]. 自然资源学报, 2007, 22(6):853-864.

⁵⁰Greening L A, Greene D L, Difiglio C. Energy Efficiency and Consumption: The Rebound Effect – A Survey[J]. Energy Policy, 2000, 28(6):389-401.

⁵¹Redding, Stephen. Path dependence, endogenous innovation, and growth[J]. Lse Research Online Documents on Economics, 2002, 43(4):1215-1248.

技术和商业化技术⁵²。

周勇等（2007）以中国宏观经济能源消费数据为样本，对“回报效应”进行检验，结果表明回报效应在 30-80%波动，他认为技术进步不一定能减少能源消耗，价格、税收等调控手段是提高能效的必要补充，回报效应更多地体现为“硬”技术进步方面和生活部门，并呈现越来越低的趋势⁵³。

总体而言，技术创新对碳排放强度有降低作用是当前主流观点。本研究以电力、交通、建筑、制造业的减排技术为切入口，探讨深圳市的减排潜力与路径。

（2）中国及深圳技术创新与低碳技术应用现状

当前，我国加快了低碳技术应用的步伐。2014 年 8 月国家发展改革委公布了《国家重点推广的低碳技术目录》，目录涉及煤炭、电力、钢铁、有色、石油石化、化工、建筑、轻工、纺织、机械、农业、林业等 12 个行业，共 33 项国家重点推广的低碳技术，其中非化石能源类技术 12 项，燃料及原材料替代类技术 11 项，工艺过程等非二氧化碳减排类技术 5 项，碳捕集、利用与封存类技术 2 项，碳汇类技术 3 项。预计未来 5 年这 33 项低碳技术总投入将达 3500 亿元。

为鼓励低碳技术创新，深圳市在政策支持、研发投入、人才引进等方面营造良好创新环境。在政策层面上，深圳市低碳发展法规体系初步成形，目前已制定出台《深圳经济特区循环经济促进条例》、《深圳市建筑废弃物减排与利用条例》、《深圳市公共机构节能管理办法》、《深圳经济特区碳排放管理若干规定》、《深圳经济特区建筑节能条例》；编制发布《深圳市节能中长期规划》、《深圳生态市建设规划》、《深圳市低碳发展中长期规划（2011—2020 年）》、《深圳新能源产业振兴发展规划（2009—2015 年）》、《深圳节能环保产业振兴发展规划（2014—2020 年）》；印发实施《深圳市节能减排综合性实施方案》、《深圳市单位 GDP 能耗考核体系实施方案》等有关低碳发展的法规、规章和规范性文件。在研发投入方面，2014 年深圳市研究与发展经费支出超过 640 亿元，占 GDP 的比重超过 4%。2009 年-2013 年深圳市 R&D 经费支出与地区 GDP 比例高于上海，但相比北京仍有一定的差距，

⁵²Zhang S S, Zhang J H. The Breakthrough of Low Carbon Economy Technology Locked-In Research[C]// Management and Service Science (MASS), 2011 International Conference on. IEEE, 2011:1 - 4.

⁵³周勇，林源源. 技术进步对能源消费回报效应的估算[J]. 经济学家, 2007, 02 期:45-52.

另外深圳市还设立节能环保产业专项扶持资金，计划每年为低碳环保产业安排 5 亿元额度的资金。在发展基础方面，2013 年，深圳市从事节能环保产业相关企业超过 2000 家，总产值约 850 亿元，相关领域上市公司超过 20 家，拥有低碳环保领域各级重点实验室、工程实验室、工程（技术）研究中心和企业技术研究中心超过 50 家。

在低碳技术应用方面，深圳市在高效节能、先进环保、资源循环利用等技术的应用方面都处于全国领先地位，如垃圾焚烧发电、节能交通工具、绿色建筑材料、节能智能控制、废旧集装箱回收再利用等。截至 2014 年底，深圳市已经应用的低碳技术包括所有发电机组实现低氮燃烧；累计推广应用新能源汽车超过 1 万辆；国 V 车用汽油全面推广使用，淘汰黄标车及老旧汽车约 13.2 万辆，超过过去三年淘汰总量；新增 94 个绿色建筑标识项目，建筑面积 988 万平方米；BIM 技术已在福田科技广场、华润大冲商务中心等多个项目中成功应用等等。当前，深圳市以企业为主体的节能减排和低碳发展技术创新基础初步形成。

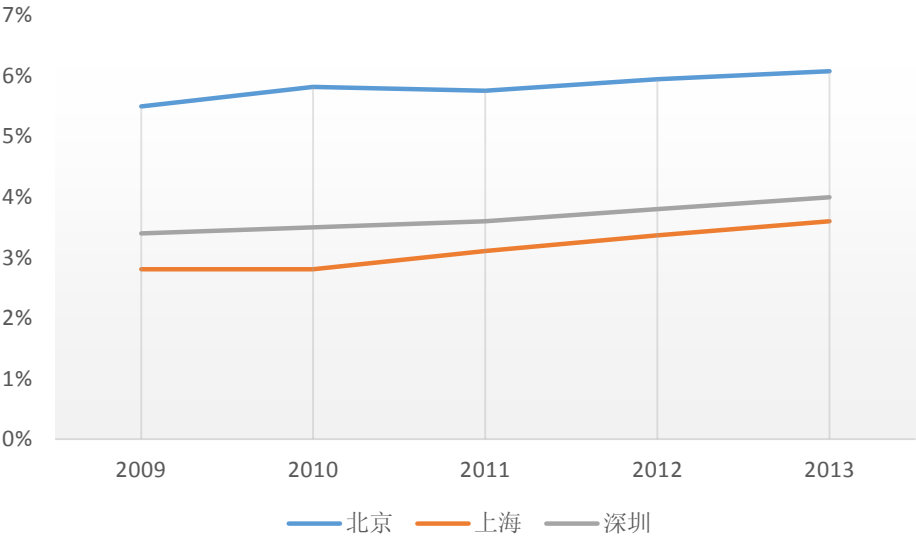


图 3-19 北京、上海、深圳研发经费支出与地区 GDP 比例

注：根据《北京统计年鉴 2014》、《上海统计年鉴 2014》及《深圳统计年鉴 2014》整理。

4 深圳市碳排放变化驱动因素分析

4.1 基于调整的 LMDI 碳排放驱动因素分解方法

LMDI 是因素分解的主要方法之一。参考 Ang et al.(1998)⁵⁴的方法,利用 LMDI 分析深圳市 2008 年至 2013 年碳排放变化的结构因素(能源消费结构、行业结构因素)及技术因素(单位增加值能耗)。

(1) 分行业碳排放计算公式

假定深圳市经济部门的碳排放由若干个行业的碳排放组成,各行业的碳排放可通过增加值、单位增加值能耗及单位能耗碳排放计算,如公式 2 所示:

$$C_{\text{pro}} = \sum_i C_i = \sum_i Q V_i I_i F_i \quad 2$$

其中, C_{pro} 为经济部门的碳排放总量, C_i 为行业 i 终端能源消费的碳排放量(包括化石能源消费和电力消费引起的碳排放), Q 为该地区的 GDP, V_i 为行业 i 增加值占 GDP 的比重,有 $\sum_i V_i = 1$, I_i 为行业 i 单位增加值能耗(主要是技术进步因素), F_i 为行业 i 单位能耗碳排放(反映该行业的能源消费结构)。可通过 V_i 、 F_i 考察深圳市碳排放增长的结构因素,通过 I_i 考察深圳市碳排放增长的技术因素。

(2) GDP 增长对碳排放的影响

为更好地分析结构因素、技术因素对碳排放的影响,排除 GDP 增长对分析结果的影响,本文引入“虚拟基准碳排放量” $C_{\text{pro}}^{\text{frz}}$ 。 $C_{\text{pro}}^{\text{frz}}$ 是指假定某一时间段内其他因素保持初始年不变,仅 GDP 变化至期末年,在此情况下期末年的碳排放量。该值反映了单纯 GDP 增长对碳排放的影响,通过公式 3 计算:

$$C_{\text{pro}}^{\text{frz}} = \sum_i C_i^{\text{frz}} = \sum_i Q^T V_i^0 I_i^0 F_i^0 \quad 3$$

其中, C_i^{frz} 为行业 i 终端能源消费的冻结碳排放量, T 为某一时间段的期末年, 0 为初始年,其他变量的含义参考公式 2。

(3) 结构因素、技术因素对碳排放变化影响的计算公式

基于 $C_{\text{pro}}^{\text{frz}}$ 的碳排放量变化可用公式 4 表示:

⁵⁴B. W. ANG, F. Q. ZHANG and KI-HONG CHOI, 1998. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition[J]. Energy, 23(6): 489-495.

$$\Delta C_{\text{pro}}^{\text{frz}} = C_{\text{pro}}^T - C_{\text{pro}}^{\text{frz}} = \Delta C_V^{\text{frz}} + \Delta C_I^{\text{frz}} + \Delta C_F^{\text{frz}} \quad 4$$

其中， $\Delta C_{\text{pro}}^{\text{frz}}$ 为排除 GDP 增长影响后的经济部门碳排放量变化， C_{pro}^T 为期末年经济部门的实际碳排放总量， ΔC_V^{frz} 为行业增加值结构变化引起的碳排放变化， ΔC_I^{frz} 为各行业单位增加值能耗变化引起的碳排放变化， ΔC_F^{frz} 为各行业能源消费结构变化引起的碳排放变化。

公式 4 中各因素对碳排放的影响分别通过公式 5~公式 7 计算(Ang et al., 1998)。其中， ΔC_V^{frz} 和 ΔC_F^{frz} 为结构因素的影响， ΔC_I^{frz} 为技术因素的影响。采用类似方法可进一步分解制造业内部各因素变化对制造业碳排放的影响。

$$\Delta C_V^{\text{frz}} = \sum_i \frac{C_i^T - C_i^{\text{frz}}}{\ln C_i^T - \ln C_i^{\text{frz}}} \ln \left(\frac{V_i^T}{V_i^0} \right) \quad 5$$

$$\Delta C_I^{\text{frz}} = \sum_i \frac{C_i^T - C_i^{\text{frz}}}{\ln C_i^T - \ln C_i^{\text{frz}}} \ln \left(\frac{I_i^T}{I_i^0} \right) \quad 6$$

$$\Delta C_F^{\text{frz}} = \sum_i \frac{C_i^T - C_i^{\text{frz}}}{\ln C_i^T - \ln C_i^{\text{frz}}} \ln \left(\frac{F_i^T}{F_i^0} \right) \quad 7$$

其中，各变量的含义参考公式 2、公式 3 及公式 4。

4.2 结果分析

4.2.1 各因素总体影响

2008-2013 年，结构因素正成为减缓深圳市碳排放的重要因素。图 4-1 表明，虽然技术、管理等其他因素仍然是深圳减缓碳排放的主要因素，但是 2011 年以来，行业结构（农业、采矿业、制造业、建筑业、交通运输业及服务业）、单位能耗碳排放（反映能源结构）及制造业内部结构（高、中、低耗能制造业结构）等结构因素正逐步成为重要的减缓因素。其中，2011-2013 年结构因素占深圳市经济部门碳排放年均减缓量的 51%（见图 4-2），年均减缓量 249 万吨 CO₂；技术进步因素（单位增加值能耗下降）占年均减缓量的 49%，年均减缓量 237 万吨 CO₂。

由于深圳市终端能源消费引起的碳排放主要来源于制造业、交通运输业及服务业等部门，因此本文将分别对这三个部门的碳排放驱动因素进行定量分析。同时，因深圳市制造业包含了近 30 个细分行业，对国民经济的影响较为广泛，故本

文对制造业进行了深入分析，以期从制造业入手，为深圳市碳减排路径的设计提供更为充分的依据。

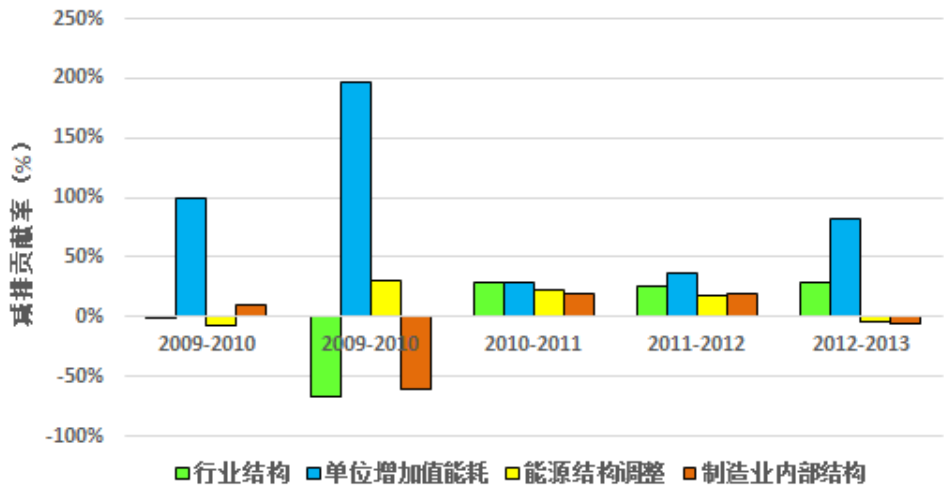


图 4-12008 年至 2013 年深圳市碳排放变化驱动因素

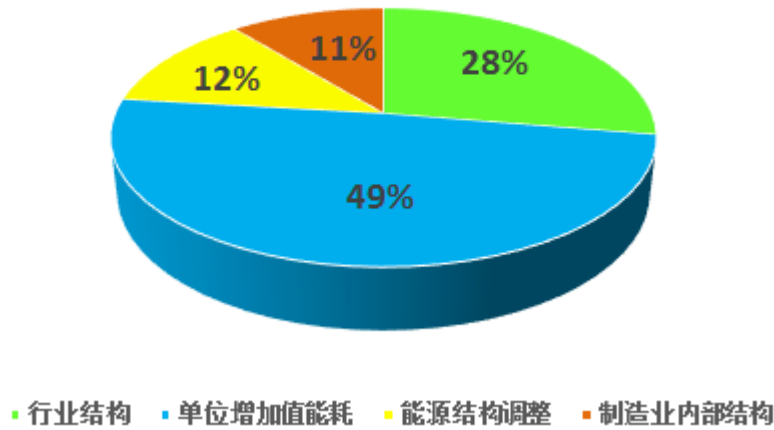


图 4-2 2011 年至 2013 年结构、技术因素对减缓深圳市碳排放的年平均贡献率

4.2.2 制造业碳排放驱动因素分析

4.2.2.1 低、中、高能耗制造业碳排放减缓量比较

2008 年至 2013 年，深圳市低、中、高能耗制造业⁵⁵单位增加值碳排放（碳强

⁵⁵深圳市低、中、高能耗制造业分类依据为 2013 年深圳市制造业单位增加值能耗（吨标准煤/万元）。低能耗制造业单位增加值范围为（0,0.25），中能耗制造业单位增加值范围为（0.25,0.7），高能耗制造业单位增加值范围为（0.7，2）。其中深圳市低能耗制造业包括：烟草制品业、文教体育用品制造业、医药制造业、皮革毛皮羽毛（绒）及其制品业、仪器仪表及文化办公用机械制造业、通信设备计算机及其他电子设备制造业、废弃资源和废旧材料回收工业；中能耗制造业包括：石油加工炼焦及核燃料加工业、纺织服装鞋帽制造业、通用设备制造业、有色金属冶炼及压延加工业、电气机械及器材制造业、农副食品加工业、专用设备制造业、饮料制造业、家具制造业、交通运输设备制造业、食品制造业、金属制品业、印刷业和记录媒介的复制、造纸及纸制品业；高能耗制造业包括：化学原料及化学制品制造业、木材加工及木竹藤棕草制品业、纺织业、

度)均呈下降趋势,分别累计下降 41%、60%及 9%,见图 4-3。由于中、低能耗制造业碳强度下降幅度较大,且合计增加值占制造业的 94%,因此两者对制造业碳强度下降的影响最为显著。

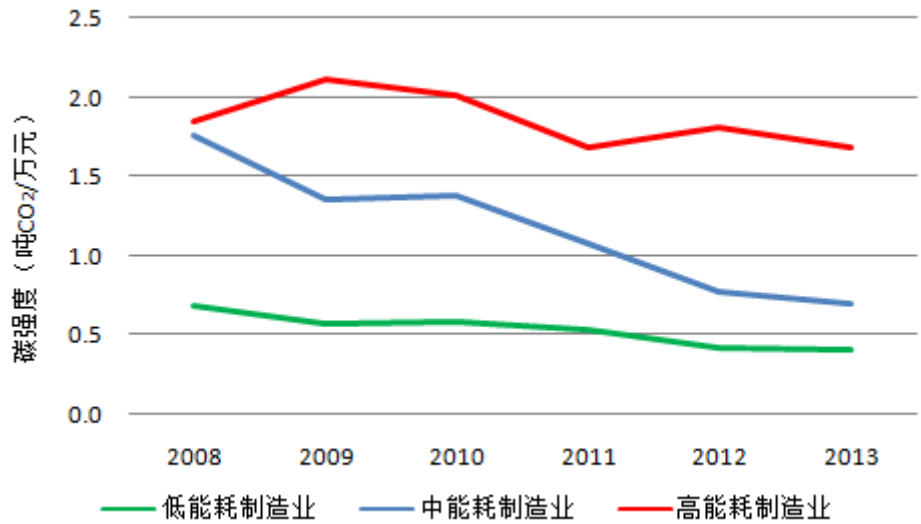


图 4-32008 年至 2013 年深圳市低、中、高能耗制造业碳排放强度

注：增加值按 2005 年可比价计算。

4.2.2.2 制造业内部各驱动因素对全市碳排放变化的影响

2008-2013 年,制造业结构因素⁵⁶对深圳市经济部门碳排放减缓量的累计贡献率为 25%,低、中、高能耗制造业单位增加值能耗(反映技术、管理等其他因素)的累计贡献率为 81%。

综上所述,深圳市中、低能耗制造业对减缓全市碳排放的贡献较大,可对其加大减排力度。由于技术、管理等是主要的碳排放减缓因素,结构因素次之,因此,应加大制造业技术、管理等方面的创新投入,并不断优化制造业内部结构。

黑色金属冶炼及压延加工业、塑料制品业、橡胶制品业、非金属矿物制品业、工艺品及其他制造业、化学纤维制造业。

⁵⁶制造业结构因素包括制造业增加值占 GDP 比重、低中高能耗制造业增加值占制造业比重、低中高能耗制造业能源结构。

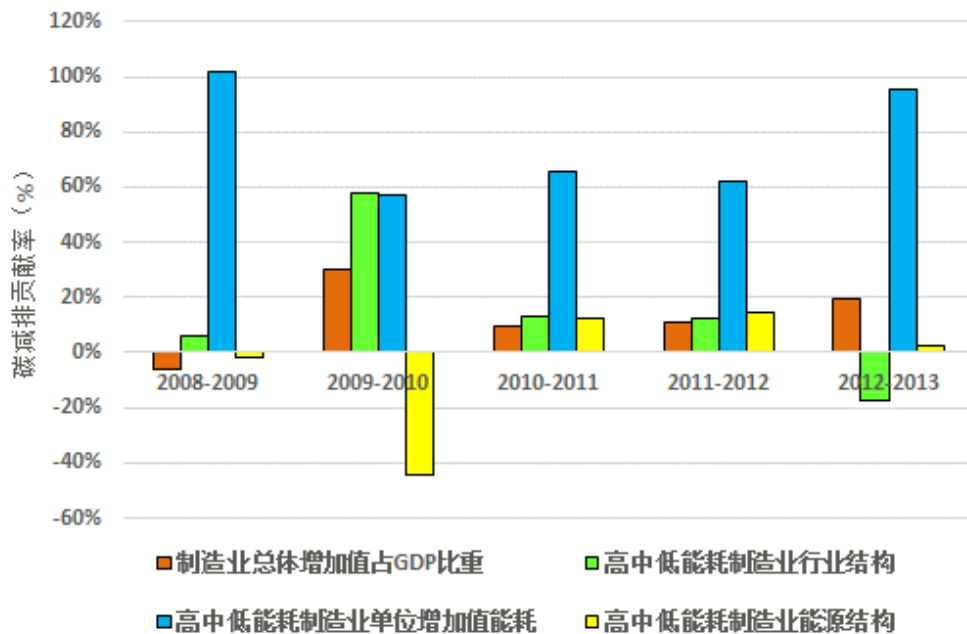


图 4-4 2008 年至 2013 年深圳市制造业碳排放驱动因素分析结

4.2.2.3 制造业典型企业分析：以技术创新促碳强度下降

华为、中兴碳强度大幅下降的主要原因是大量的研发投入与技术创新、专利申请使增加值迅速增长（见表 4-1）。2013 年中兴国际专利申请量 2309 件，在同领域中位居全球第二位。2014 年中兴手机总出货量超过 1 亿部，海外市场占比超过了 70%。2014 年华为交换机市场年增长率 137%，成为 2014 年度全球数据中心交换机市场增长最快的厂商。

比亚迪、伯恩光学、深圳南玻浮法玻璃碳强度降低的主要原因是进行产品升级及生产技术改进。比亚迪研发并改进了 ET-Power 铁电池技术、整车电机变频智能化、DM、TID 等技术，同时依靠自主研发的储能系统利用和储存太阳能，节约了用能成本。伯恩光学主要依托研发成功的防静电、防辐射、防反光膜、防污等高端技术，进行转型升级。深圳南玻浮法玻璃借助“高增透超白太阳能镀膜玻璃”项目、“超白太阳能玻璃压延守砖技革新”项目，研发出红外线屏蔽玻璃、可钢化夹层三银 LOW-E 玻璃、电加热融雪玻璃等多款环保节能产品。

表 4-1 制造业典型企业碳强度下降率及增加值增长率

企业名称	增加值增长率	碳强度增长率
华为技术有限公司	44%	-30%
中兴通讯股份有限公司	58%	-40%
深圳市比亚迪汽车有限公司	3%	-14%
伯恩光学（深圳）有限公司	47%	-30%
深圳南玻浮法玻璃有限公司	1837%	-96%

注：增加值比重为 2013 年数据，增加值增长率和碳强度增长率为 2013 年比 2011 年数据。2013 年，华为增加值占制造业整体的 17%，中兴增加值占制造业整体的 14%。

4.2.3 交通运输业碳排放驱动因素分析

2008-2013 年，交通运输业结构因素（包括行业增加值占 GDP 比重、行业能源结构）对深圳市经济部门碳排放减缓量的累计贡献率为 12%，行业单位增加值能耗（反映技术、管理等其他因素）的累计贡献率为-34%，见图 4-5。可见，深圳市交通运输业由结构调整带来的碳排放减缓效应较为明显，技术等其他因素的调整使碳排放量不降反增。因此，深圳市交通运输、仓储和邮政业碳减排的方向为结构调整。

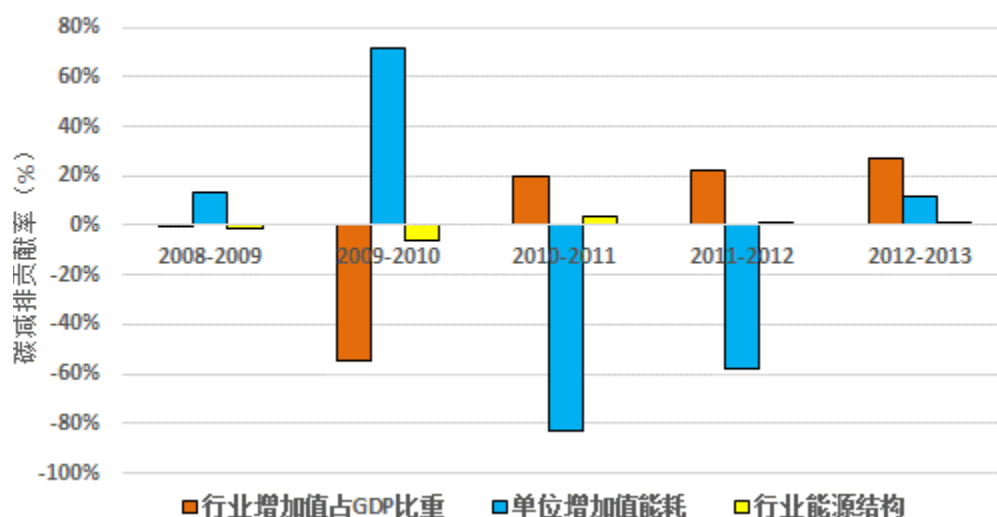


图 4-5 2008 年至 2013 年深圳市交通运输业碳排放驱动因素分析结果

4.2.4 服务业碳排放驱动因素分析

2008-2013 年，服务业结构因素对深圳市经济部门碳排放减缓量的累计贡献率为-16%，技术、管理等其他因素的累计贡献率为 12%，见图 4-6。结果表明，随着服务业增加值占 GDP 比重的上升，服务业碳排放总量也随之增加。同时，服务业

用电比重在上升，而深圳电力碳排放因子相对较大⁵⁷，因此用电比重的上升也在一定程度上增加了服务业的碳排放。未来，深圳服务业增加值占 GDP 的比重将进一步上升。在此背景下，通过技术、管理手段降低单位增加值能耗、优化供电结构（降低煤电比重）将是服务业减排的主要领域。

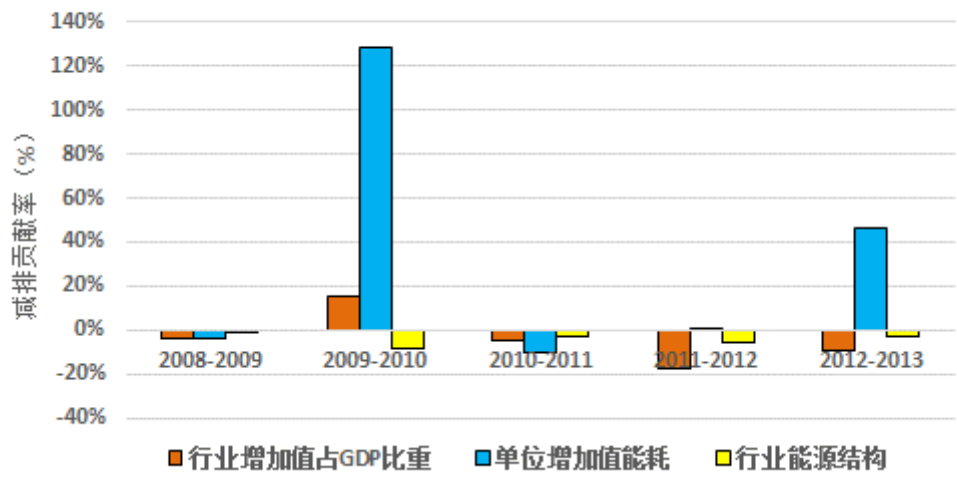


图 4-6 2008 年至 2013 年深圳市服务业碳排放驱动因素分析结果

⁵⁷ 2013 年深圳市电力碳排放因子为 0.616 千克 CO₂/kWh，折合 1.951 吨 CO₂/吨标准煤，与汽油的排放因子 1.990 吨 CO₂/吨标准煤接近。

5 深圳市碳排放路径情景分析

5.1 情景分析方法

5.1.1 LEAP-Shenzhen 碳排放路径情景分析框架

本研究基于伯克利中国能源研究室 GREAT 框架，结合深圳实际调研数据构建了 LEAP-Shenzhen 碳排放路径情景分析框架，见图 5-1。该框架包括关键假设、需求、转换及资源四个模块，其中需求和转换是关键模块。通过设定不同情景下的各模块参数，即可分析深圳市在不同减排政策措施下的碳排放路径。

（1）需求模块

根据深圳市终端用能需求特点，在需求模块下设立制造业、交通部门、建筑部门及其他部门四个分支。每个分支下根据用能活动类型及减排技术分类设立新的分支，划分结果见“5.1.2 能源需求部门划分”。设立分支的依据是本研究通过实地调研、企业问卷调查、专家咨询及文献调研等方式获得的各类用能活动数据及适用于深圳的碳减排技术措施清单（见附录 2）。

（2）转换模块

除了电力生产和供应业，深圳市没有其他的能源生产和转换行业，因此转换模块下仅设立发电分支。目前，深圳市的发电方式有燃煤发电、燃气发电以及垃圾发电。经调研，本研究认为未来可能规模化；发展的发电方式为分布式光伏发电及冷热电三联产。因此，在发电过程分支下设立了以上五种发电方式。各种发电方式的参数根据深圳市相关部门规划及能源领域专家意见设定。

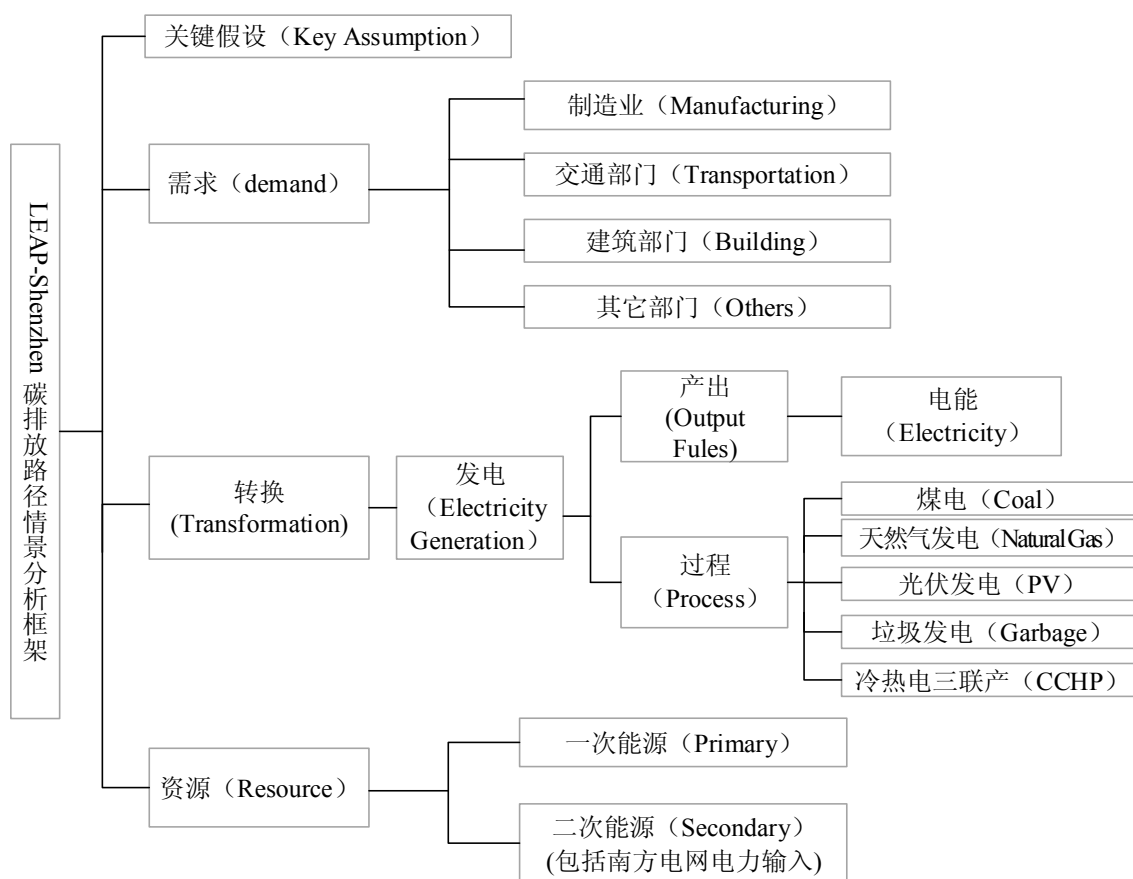


图 5-1LEAP-Shenzhen 碳排放路径情景分析框架

5.1.2 能源需求部门划分

(1) 制造业

为了在情景分析中体现各类减排技术的减排贡献，本研究按照减排技术类型将制造业细分为十种用能类型，包括温控技术、照明技术及通用机械技术等，见图 5-2。这些技术来源于《国家重点节能低碳推广目录》、《电子信息行业节能减排先进适用技术目录》、《工业领域节能减排电子信息应用技术导向目录》、企业调研及专家反馈等。

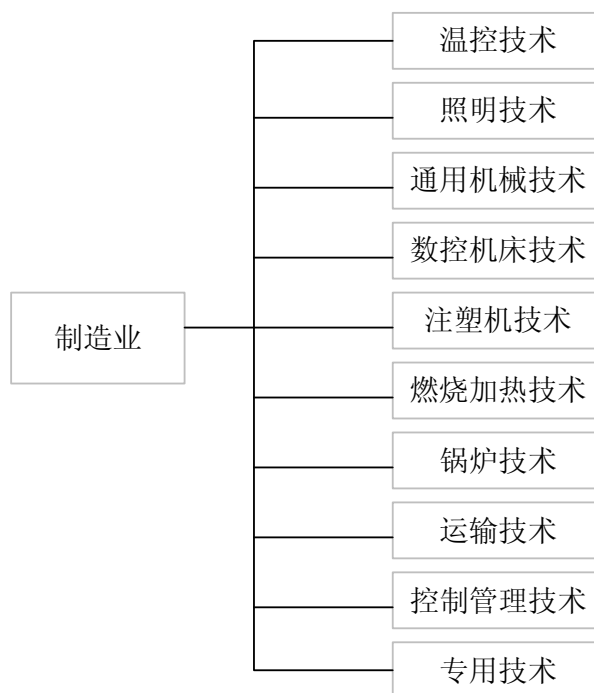


图 5-2 制造业划分

（2）交通部门

采用大交通的概念，即包括交通运输行业的营运交通工具，也包括企事业单位和居民所拥有的非运营交通工具。由于道路运输约占交通碳排放的 60%，因此将其进一步细分为小汽车、出租车、公共汽车及货车等四类。此外，还包括轨道运输（地铁）、水路运输、航空运输及其他，见图 5-3。其他交通主要包括机场、火车站和港口用电引起的碳排放。

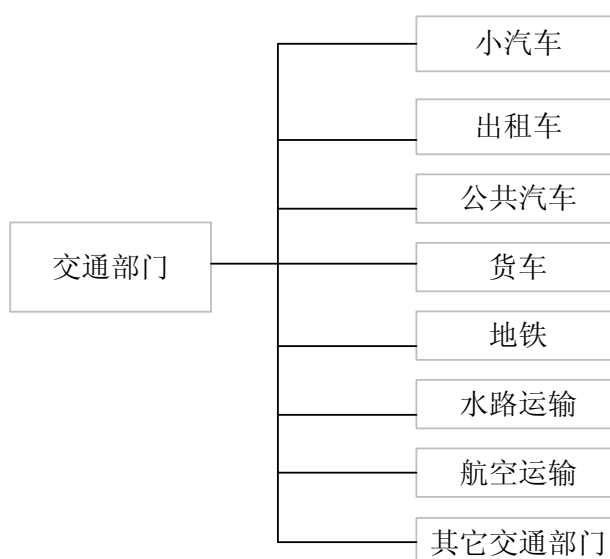


图 5-3 交通部门划分

（3）建筑部门

采用国际上通行的建筑能耗概念，即仅包括建筑运行能耗，不包括建筑建造过程的能耗。将建筑部门分为居住建筑和公共建筑两大类。由于既有建筑和新建建筑的能耗标准和节能减排措施存在较大差异，因此本文将居住建筑、公共建筑进一步细分为既有建筑和新建建筑，见图 5-4。

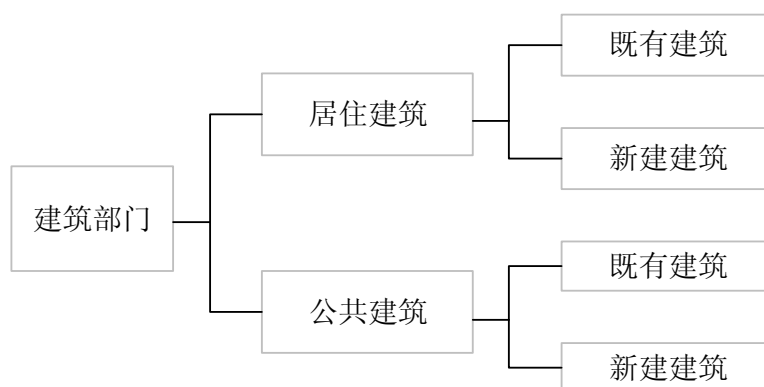


图 5-4 建筑部门划分

（4）其它部门

其它部门指交通部门、建筑部门和制造业以外的终端用能部门，包括采掘业、建筑业、水和燃气供应业、农林牧渔业及电厂自用电等，见图 5-5。

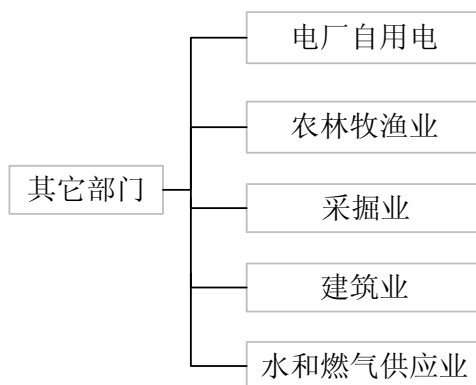


图 5-5 其它部门划分

5.2 情景定义

定义参考情景、减排情景、强化减排情景及峰值目标情景等四个情景。**参考情景**假设未来不额外引入新的减排技术，并且现有各项技术推广率保持不变。**减排情景**假设各项减排技术按深圳市既有规划推进。对于有整体节能减碳规划的行业（如制造业），根据规划制定减排策略；对于没有整体节能减碳规划的行业和部

门（包括电力业、交通部门和建筑部门），根据主管部门或主要企业对具体减排技术的推进计划确定技术推广率。**强化减排情景**是在减排情景基础上，对于实施难度相对较小的技术措施，进一步扩大其技术推广率。**峰值目标情景**以深圳市在 2022 年实现碳排放峰值为目标，反推确定各部门各项技术的推广率。上述情景在经济增长、产业结构变化及人口增长等方面的增长趋势一致，差异主要体现在减排技术应用方面。基准年为 2012 年，情景年为 2020 年和 2030 年。

5.3 情景参数

5.3.1 社会经济参数

（1）GDP

根据深圳市历史 GDP 增速变化趋势估计，2016 年至 2020 年 GDP 年均增速为 6.7%，2021 年至 2030 约为 6%。据此计算，2020 年深圳市 GDP 总量为 20144 亿元（按 2005 年不变价计算，下同），2030 年达到 36075 亿元。

（2）产业结构

2015 年第二产业增加值占 GDP 比重为 41.2%。根据历史变化趋势推算，2020 年第二产业占 GDP 比重将降至为 38.7%，2030 年为 33%左右。本文预计 2020 年工业增加值占 GDP 比重降至约 35.7%⁵⁸（制造业占工业增加值的 95%以上⁵⁹，约占 GDP 的 33.9%），2030 年降至约 30%（其中制造业约为 28.5%）。当人均 GDP 为 3.5 万美元左右时（按 2005 年不变价计算，下同），部分发达国家（德国、英国、法国、日本及新加坡等）制造业增加值占 GDP 的比重在 13%~27%之间。2030 年深圳人均 GDP 达到 3.5 万美元，届时制造业增加值占 GDP 比重达到 28.5%符合深圳所处发展阶段的产业结构特征。

（3）人口数量

据深圳市相关部门预计，到 2020 年深圳市常住人口总数约为 1200 万人（2011 年至 2020 年常住人口年均增长率为 1.47%，纳入流动人口后的总人口约为 1800

⁵⁸第二产业包括工业和建筑业两部分。2005 年以来，建筑业增加值占 GDP 比重稳定在 3%左右。本文假定建筑业占比在未来保持 3%不变。据此推算，2020 年工业增加值占 GDP 比重为 38.7%-3%=35.7%。

⁵⁹ 2009 年以来，制造业增加值约占工业增加值的 95%，假定未来这一比例保持不变。

万人)。考虑到深圳市常住人口增速在减缓，预计 2021 年至 2030 年人口年均增长率为 0.8%，即 2030 年常住人口总数约为 1300 万人（纳入流动人口后的总人口约为 2000 万人）。

5.3.2 电力业参数

（1）LEAP 框架中电力业碳排放计算方法

电力业各种发电方式的碳排放计算方法见公式 8。

$$C_{\text{Power}} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times T_i \times H}{\varepsilon_i} \times f_i \quad 8$$

其中， C_i 为第 i 种发电方式装机容量， T_i 为年平均发电小时数， H 为电力的当量热值， ε_i 为第 i 种发电方式的能源转换效率， f_i 为第 i 种发电方式所耗燃料的碳排放因子。各种发电方式的装机容量见表 5-1，年平均发电小时数见表 5-2。各种发电方式的能源转换效率在参考情景下保持不变，而在减排情景和峰值目标情景下，由于燃气和燃煤电厂实施了技术改进，因此转换效率有所提升，见表 5-3。

表 5-1 减排情景下各类发电方式装机容量

单位：万 kW

情景	年份	燃煤发电	现有燃气发电	分布式光伏发电	新建燃气发电	冷热电三联产	垃圾发电	其它发电
参考情景	2020~2030	184.0	448.0	0	0	0	0	4.3
减排情景	2020	184.0	448.0	30.0	480.0	0.3	28.6	4.3
	2025	184.0	448.0	90.0	480.0	0.6	30.7	4.3
	2030	184.0	448.0	150.0	480.0	0.9	32.7	4.3
强化减排情景	2020	184.0	448.0	30.0	480.0	0.3	28.6	4.3
	2025	184.0	448.0	90.0	480.0	0.6	30.7	4.3
	2030	0.0	448.0	150.0	480.0	0.9	32.7	4.3
峰值情景	2020	184.0	448.0	60.0	480.0	0.6	28.6	4.3
	2025	61.3	448.0	180.0	480.0	1.2	30.7	4.3
	2030	0.0	448.0	300.0	480.0	1.8	32.7	4.3

表 5-2 各类发电方式年发电时间

单位：小时

情景	年份	燃煤发电	现有燃气发电	分布式光伏发电	新建燃气发电	冷热电三联产	垃圾发电	其它发电
参考情景	2020~2030	5810	2752	0	0	0	0	8760
其他各情景	2020~2030	5810	3500	1000	3500	8760	8760	8760

表 5-3 各类发电方式发电转换效率

情景	年份	燃煤发电	现有燃气发电	分布式光伏发电	新建燃气发电	冷热电三联产	垃圾发电	其它发电
参考情景	2020~2030	37.7%	42.5%	--	42.5%	32.1%	24.8%	38.6%
减排情景	2020~2024	38.6%	44.5%	--	42.5%	32.1%	24.8%	38.6%
	2025~2030	39.2%	44.6%	--	42.5%	32.1%	24.8%	38.6%
强化减排情景	2020~2024	38.6%	44.5%	--	42.5%	32.1%	24.8%	38.6%
	2025~2030	39.2%	44.6%	--	42.5%	32.1%	24.8%	38.6%
峰值情景	2020~2030	39.2%	44.6%	--	42.5%	32.1%	24.8%	38.6%

（2）减排技术推广率

参考情景下，假定未来燃煤发电、燃气发电及其他发电规模保持现有规模不变，分别为 106.9 亿 kWh、123.3 亿 kWh 及 3.8 亿 kWh。剩余电力需求由外来电力（从南方电网调入）满足。

减排情景下，根据规划确定燃煤电厂各项技术、燃气电厂各项技术以及除“冷热电三联产技术”之外的电力结构替代技术均根据相关规划确定推广时间及推广率。由于深圳市仅有 1 家燃煤电厂和 7 家燃气电厂，隶属于深圳能源集团及少数几家公司，因此减排技术能够一次性 100%实施。对于“冷热电三联产技术”，由于没有明确的政府规划，因此本文借鉴美国推广该技术的经验确定推广时间及推广率。

强化减排情景下，由于妈湾电厂部分机组到达经济寿命，因此在减排情景基础上增加了“2026 年妈湾电厂 2/3 的机组退役，2030 年剩余的 1/3 机组退役”的减排措施。

峰值目标情景下，提前实施燃煤电厂和燃气电厂减排技术。对于“分布式光

伏发电”和“冷热电三联产”技术，峰值目标情景下 2020 年和 2030 年的推广率是减排情景下的推广率的两倍。对于“妈湾电厂退役”本文采取按照燃煤机组经济寿命到期不再新建，直接退役的方式进行处理。不同情景下各项技术措施的推广率见表 5-4。

表 5-4 深圳市电力业碳减排技术推广率

分类	技术措施名称	减排情景 技术推广率		强化减排情景 技术推广率		峰值目标情景 技术推广率	
		2020 年	2030 年	2020 年	2030 年	2020 年	2030 年
燃煤 电厂 技术	锅炉智能吹灰优化 与在线结焦预警系 统技术*	0%	100%	0%	100%	100%	100%
	火电厂凝汽器真空 保持节能系统技术*	0%	100%	0%	100%	100%	100%
	其他燃煤电厂技术	100%	100%	100%	100%	100%	100%
燃气 电厂 技术	燃机进气冷却*	0%	100%	0%	100%	100%	100%
	其他燃气电厂技术	100%	100%	100%	100%	100%	100%
电力 结构 替代	垃圾发电	86.7%	100%	86.7%	100%	86.7%	100%
	冷热电三联产	10%	30%	10%	30%	20%	60%
	分布式光伏发电	3.3%	16.4%	3.3%	16.4%	6.6%	32.9%
	新建燃气发电厂	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	提高燃机利用	100%	100^	100%	100^	100%	100%
	妈湾电厂退役	0%	0%	0%	100%	0%	100%

*注：减排情景和强化减排情景下 2025 年技术推广率为 100%。

（3）关键技术减排潜力分析

电力业减排技术包括燃煤电厂技术改进、燃气电厂技术改进和电力结构替代三类，减排潜力占比分别为 94.5%、2.8%和 2.7%，见表 5-5。由于深圳市燃煤电厂和燃气电厂电力碳排放因子在全国处于领先水平，进一步下降的空间有限，因此深圳市电力业碳减排的关键是电力结构替代技术。其中，分布式光伏发电、妈湾电厂退役和新建燃气发电减排潜力较大，分别占总减排潜力的 41.5%、25.1%和 16.2%。

表 5-5 深圳市电力业各类技术减排潜力汇总表

技术		减排潜力 (万吨 CO ₂)	减排潜力 占比	减排潜力累计额 (万吨 CO ₂)	减排潜力累 计额占比
电力 结构 替代	分布式光伏发电	543.6	41.5%	543.6	41.5%
	妈湾电厂退役	328.9	25.1%	872.4	66.6%
	新建燃气发电	211.6	16.2%	1084.1	82.8%
	垃圾发电	55.7	4.3%	1139.7	87.0%
	冷热电三联产	53.7	4.1%	1193.4	91.1%
	提高燃机利用	43.5	3.3%	1236.9	94.5%
燃煤电厂技术改进		36.9	2.8%	1273.8	97.3%
燃气电厂技术改进		35.6	2.7%	1309.4	100.0%

A. 垃圾发电

城市垃圾处理分为两种方法，一种方法是填埋处理，另外一种方法是燃烧发电处理。垃圾填埋处理产生的温室气体量为 0.513 吨 CO₂ 当量/吨垃圾，垃圾焚烧产生的碳排放为 0.616 吨 CO₂/吨垃圾，每吨垃圾发电约为 405kWh。由此可知，垃圾发电的电力碳排放因子约为 300gCO₂/kWh，而同期南方电网的电力碳排放因子为 596gCO₂/kWh，因此通过垃圾发电替代外来电力能够减少深圳的碳排放总量。

深圳市政府规划到 2020 年垃圾焚烧处理率达到 100%。预计 2030 年深圳市垃圾年产量为 715 万吨，焚烧发电量为 24.7 亿 kWh，比基准年新增 18.8 亿 kWh。这部分新增发电量可替代南方电网电力调入，对应减排量约 56.7 万吨 CO₂。

B. 冷热电三联产技术

冷热电三联产技术是用燃气发电机发电的同时将发电余热加以利用（提供热水、暖气或冷气）的技术。冷热电三联产技术主要适用于医院和宾馆等全天需要冷热电的建筑。根据调查，深圳市适用的独栋宾馆和医院面积为 1274.4 万 m²，可以装机约 30MW。如果深圳市所有适宜建筑物 100%推广冷热电三联产技术，那么冷热电三联产技术每年可减排 53.7 万吨 CO₂。

C. 分布式光伏发电

分布式光伏发电不直接产生碳排放，而同期南方电网的电力碳排放因子为 596gCO₂/kWh，所以推进分布式光伏发电对深圳市电力业减排有重要意义。通过查阅相关分布式发电的典型模式，可以得到 1kW 分布式太阳能发电的安装占地面积为 10m²。深圳市 2010 年共有建筑面积（基底面积）1.94 亿 m²。其中大约有 50%

的建筑由于建筑时间比较久，屋顶脆弱，无法安装分布式太阳能发电装置；而建筑部门安装太阳能热水器又占用了总的基底面积的 3%，所以可供安装分布式太阳能的基底面积仅仅为总的基底面积的 47%，对应可用于安装分布式光伏发电的基底面积为 9118 万平方米，可安装分布式光伏发电功率为 912 万 kW，按深圳市一年光照强度和时间，每年发电小约为 1000h，深圳市光伏发电的年发电潜力为 91.2 亿 kWh，对应得出光伏发电的减排潜力为 543.6 万吨 CO₂。

D. 新建燃气发电

深圳市现有燃气发电技术的电力碳排放因子约为 470gCO₂/kWh，远小于同期调入南方电网的电力碳排放因子 596gCO₂/kWh，所以新建燃气发电机组对电力行业减排能够做出很大贡献。经调研，由于土地面积的限制和建设燃气电厂对地理区位的要求，现在深圳市现有能够建设燃气电厂的区域已经用于建设燃气电厂，未来能够增加装机容量只能在现有燃气电厂内部进行扩建。调研结果显示，深圳市最大可以扩建的规模约为 480 万 kW，对应年发电规模为 168 亿 kWh⁶⁰，对应减排潜力为 211.6 万吨 CO₂。

E. 提高现有燃机利用

同新建燃气发电部分提及内容，燃气发电的电力碳排放因子远小于南方电网的电力碳排放因子。深圳市现有燃气装机总量为 448 万 kW，平均使用小时数为 2752h，距离燃气发电的饱和度（国家设定燃气年发电量为 3500h）还有一定距离，对于现有的燃气电厂，可以通过增加燃气发电机组的利用小时数，达到减排效果。经计算，提高现有燃机利用时间，可以新增燃气发电量约 34.6 亿 kWh，对应的年减排量为 43.5 万吨 CO₂。

F. 妈湾电厂退役

2010 年深圳市妈湾电厂的电力碳排放因子约 969gCO₂/kWh，远大于同期南方电网电力的电力碳排放因子 596gCO₂/kWh，所以妈湾电厂退役对深圳市电力行业减排会有很大贡献。深圳市妈湾电厂当年发电小时约 106.9 亿 kWh，妈湾电厂退役的减排潜力约为 328.9 万吨 CO₂。

⁶⁰根据国家规划，燃气发电厂年发电小时为 3500 小时。

G. 燃煤电厂技术改进

虽然深圳市妈湾电厂当前的电力碳排放因子处于国内领先水平，但与国际先进水平还有一定差距。经调研，深圳市妈湾电厂当下可以实施改进的技术共计有 9 项，对应的减排潜力为 36.9 万吨 CO₂。

H. 燃气电厂技术改进

深圳市燃气电厂技术减排同燃煤电厂技术减排类似，可以通过相应的技术改进使得电力碳排放因子适当降低。经调研，深圳市燃气电厂可以实施改进的技术共计有 4 项，对应的减排潜力为 35.6 万吨 CO₂。

5.3.3 制造业参数

(1) LEAP 框架中制造业碳排放计算方法

制造业碳排放计算方法见公式 9。

$$C_{\text{Manu}} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n G \times (e_i - \Delta e_{i,j}) f_i \quad 9$$

其中， G 为制造业增加值， e_i 为参考情景下制造业对第 i 种能源的单位增加值消费量， $\Delta e_{i,j}$ 为减排情景、强化减排情景或峰值目标情景下第 j 种节能技术对第 i 种能源的单位增加值节能量， f_i 为第 i 种能源的碳排放因子。制造业增加值见表 5-6，参考情景下各类能源的单位增加值消费量见表 5-7，各节能技术单位增加值能源节约量见表 5-8。

表 5-6 制造业 2016-2030 年增加值

单位：亿元（2005 年不变价）

年份	增加值	年份	增加值
2016	5528.54	2024	8044.45
2017	5828.82	2025	8380.07
2018	6145.41	2026	8729.69
2019	6479.20	2027	9093.89
2020	6831.11	2028	9473.29
2021	7116.11	2029	9868.52
2022	7413.00	2030	10280.24
2023	7722.27		

表 5-7 参考情景下各类能源的单位增加值消费量

年份	原煤 (kg/万元)	汽油 (kg/万元)	煤油 (kg/万元)	柴油 (kg/万元)	燃料油 (kg/万元)	液化石油气 (kg/万元)	天然气 (m ³ /万元)	电力 (kWh/万元)
2020	0.88	1.61	0.03	2.79	0.09	0.40	4.88	804.86
2025	0.80	1.47	0.03	2.55	0.08	0.36	4.46	736.40
2030	0.73	1.35	0.03	2.33	0.08	0.33	4.08	673.77

表 5-8 各节能技术单位增加值能源节约量

单位：kWh/万元（2005 年不变价）

技术名称	减排情景			强化减排情景			峰值目标情景		
	2020	2025	2030	2020	2025	2030	2020	2025	2030
制冷剂替换	8.24	10.08	10.96	11.11	14.47	18.33	12.27	16.69	20.37
合理设置空调温度	3.34	4.09	4.44	4.50	5.87	7.43	4.98	6.77	8.26
中央空调余热回收	0.62	0.76	0.83	0.92	1.19	1.55	0.98	1.34	1.64
大温差技术	0.81	1.00	1.08	1.20	1.55	2.01	1.28	1.75	2.13
中央空调主机变频技术	0.80	0.98	1.06	1.18	1.52	1.97	1.25	1.71	2.09
电子膨胀阀变频节能技术	0.24	0.29	0.32	0.31	0.35	0.39	0.36	0.53	0.69
中央空调风机、水泵、风柜加变频器	1.54	1.88	2.05	2.28	2.94	3.81	2.42	3.31	4.04
磁悬浮变频离心式中央空调冷水机组技术	0.26	0.32	0.35	0.34	0.39	0.43	0.40	0.59	0.76
中央空调智能控制技术	4.31	5.27	5.72	5.80	7.56	9.57	6.41	8.72	10.64
双级高效永磁同步变频离心式冷水机技术	0.29	0.35	0.38	0.37	0.43	0.47	0.43	0.64	0.83
中央空调全自动清洗节能系统技术	1.28	1.57	1.70	1.73	2.25	2.85	1.91	2.60	3.17
基于低压高频电解原理的循环水系统防垢提效节能技术	0.89	1.09	1.19	1.20	1.56	1.98	1.33	1.81	2.20
锅炉水处理防腐阻垢节能技术	0.71	0.87	0.95	0.96	1.25	1.59	1.06	1.45	1.76
电热水器改为太阳能热水系统	0.10	0.12	0.14	0.15	0.19	0.25	0.16	0.22	0.27
将燃油锅炉供热水改为太阳能热水系统（柴油） (kg/万元)	0.39	0.47	0.51	0.57	0.74	0.96	0.61	0.83	1.01

将燃油锅炉供热水改为太阳能热水系统（电力）	-1.41	-1.73	-1.88	-2.09	-2.70	-3.50	-2.22	-3.04	-3.71
热泵技术	3.40	4.16	4.52	5.03	6.50	8.43	5.34	7.31	8.92
热泵的双级增焓提效技术	0.10	0.12	0.13	0.14	0.18	0.24	0.15	0.20	0.25
高强度气体放电灯用大功率电子镇流器新技术	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
基于感应耦合的无极荧光照明技术	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04
普通日光灯改为 LED 节能灯	2.11	2.59	2.81	2.85	3.71	4.70	3.15	4.28	5.22
T5 灯改为 LED 灯	0.95	1.16	1.26	1.40	1.81	2.34	1.49	2.03	2.48
加装红外线感应开关	0.30	0.37	0.40	0.41	0.53	0.67	0.45	0.61	0.75
照明用高效智能节电控制器	1.38	1.69	1.84	1.86	2.42	3.07	2.06	2.80	3.41
使用纳米聚光板或纳米聚光板替换普通聚光板	2.55	3.11	3.39	3.43	4.47	5.66	3.79	5.16	6.29
户外 LED 照明灯	0.25	0.30	0.33	0.36	0.47	0.61	0.39	0.53	0.65
变频调速节能技术	6.52	7.97	8.67	9.63	12.45	16.14	10.23	14.00	17.08
永磁涡流柔性传动节能技术	0.22	0.27	0.29	0.30	0.39	0.49	0.33	0.45	0.55
水泵风机目标电耗节能控制技术	0.39	0.47	0.52	0.52	0.68	0.86	0.58	0.79	0.96
高效节能电动机用铸铜转子技术	1.92	2.35	2.55	2.48	2.85	3.13	2.89	4.27	5.54
稀土永磁盘式无铁芯电机技术	1.11	1.36	1.48	1.50	1.95	2.47	1.65	2.25	2.75
同步电机微机全控励磁技术（柴油）（kg/万元）	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
空压机余热回收	8.65	10.58	11.50	11.66	15.18	19.23	12.88	17.52	21.37
活塞空压机改为螺杆空压机	0.56	0.69	0.75	0.83	1.07	1.39	0.88	1.20	1.47
两级喷油高效螺杆空气压缩机节能技术	1.10	1.34	1.46	1.62	2.10	2.72	1.72	2.36	2.88
数控机床的有源功率补偿技术	0.37	0.45	0.49	0.49	0.64	0.82	0.55	0.74	0.91
塑料注射成型伺服驱动与控制技术	4.02	4.92	5.35	5.20	5.98	6.56	6.07	8.96	11.62
注塑机智能变频节能控制技术	6.68	8.17	8.88	9.00	11.72	14.85	9.94	13.52	16.50

注塑机定量泵系统改为变量泵系统	3.61	4.42	4.80	5.34	6.90	8.94	5.67	7.76	9.47
注塑机安装炮筒热套	7.48	9.14	9.94	10.08	13.12	16.62	11.13	15.14	18.47
注塑机余热回收改造	7.57	9.26	10.06	10.20	13.28	16.83	11.27	15.33	18.70
高效电磁感应加热技术	15.46	18.91	20.55	20.84	27.14	34.38	23.02	31.31	38.20
聚能燃烧技术（液化石油气）（kg/万元）	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
高红外发射率多孔陶瓷节能燃烧器技术（液化石油气）（kg/万元）	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
锅炉"油改气"（柴油）（kg/万元）	0.08	0.10	0.10	0.10	0.14	0.17	0.12	0.16	0.19
锅炉"油改气"（天然气）（m ³ /万元）	-0.08	-0.10	-0.11	-0.11	-0.14	-0.18	-0.12	-0.16	-0.20
锅炉余热回收	4.26	5.21	5.66	5.74	7.47	9.46	6.34	8.62	10.52
发动机冷却系统优化节能技术（柴油）（kg/万元）	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08	0.10	0.07	0.09	0.11
变频优化控制系统节能技术	4.47	5.46	5.94	6.60	8.53	11.06	7.01	9.60	11.71
全功率匹配节能数控柔性联动技术	8.27	10.11	10.99	11.14	14.51	18.38	12.31	16.74	20.43
过程能耗管控系统技术	23.64	28.90	31.42	31.85	41.48	52.55	35.19	47.87	58.39
高耗能设备（空调、空压机等）定时开、关等相关措施	3.67	4.49	4.88	4.95	6.45	8.17	5.47	7.44	9.08
动态谐波抑制及无功补偿综合节能技术	12.23	14.95	16.25	18.06	23.35	30.26	19.19	26.26	32.04
低耗能洁净厂房技术	0.40	0.49	0.54	0.52	0.60	0.66	0.61	0.90	1.16
塑料动态成型加工节能技术	7.79	9.52	10.35	10.49	13.66	17.31	11.59	15.77	19.23
高效节能型锥形同向双螺杆挤出技术	0.39	0.48	0.52	0.53	0.69	0.87	0.58	0.79	0.97
铅蓄电池高效低能耗极板制造技术	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.08	0.10
高效放电回馈式电池化成技术	0.30	0.36	0.39	0.44	0.56	0.73	0.46	0.63	0.77

（2）参考情景下的能源消费弹性系数

参考情景下，假定未来制造业能源利用结构保持 2013 年水平保持不变。近几

年，深圳制造业中高耗能行业增加值占比呈缓慢下降趋势。2003 年至 2011 年，橡胶制品业、塑料制品业、非金属矿物制品业等高耗能行业占制造业的增加值比重由 10.5%下降至 7.9%，占制造业能耗比重由 55.78%下降至 25.33%。据此变化趋势，假定未来制造业高耗能行业占制造业的增加值比重和能耗比重仍呈缓慢下降趋势。基于这一判断，假设未来制造业能源消费弹性系数基本不变、略有下降。经计算，2005 年至 2010 年制造业能源消费弹性系数为 0.59，假定参考情景下 2016 年至 2020 年制造业能源消费弹性系数为 0.59，2021 年至 2030 年为 0.56。

（3）减排技术推广率

参考情景下，由于假定制造业能源消费弹性系数小于 1，因此制造业单位增加值能耗及碳排放逐步下降。其中，单位增加值能耗 2020 年较 2015 年下降 10.12%，2030 年较 2015 年下降 27.66%，单位增加值碳排放量 2020 年较 2015 年下降 10.73%，2030 年较 2015 年下降 25.88%。

减排情景下，《深圳市节能“十二五”规划》要求“十二五”时期全市单位工业增加值能耗下降 20%左右。假设减排情景下 2015 年至 2020 年制造业单位增加值能耗下降率保持“十二五”时期下降速度，达到 20%。假设 2015~2030 年间各类技术的推广率呈线性增长，据此确定各类技术的推广率，见表 5-9。

强化减排情景下，较减排情景提高各类技术的推广率。假设假设 2015-2020 年、2020-2025 年和 2025-2030 年三个阶段的推广率均分别呈线性增长，见表 5-9。

峰值目标情景下，进一步扩大各类技术的推广率。假设 2015-2020 年、2020-2025 年和 2025-2030 年三个阶段的推广率分别呈线性增长，其中 2020-2030 年推广率增速较 2015-2020 年大，见表 5-9。

表 5-9 深圳市制造业碳减排技术推广率情景

技术措施分类	减排情景		强化减排情景		峰值目标情景	
	2020 年	2030 年	2020 年	2030 年	2020 年	2030 年
优先实施	33.0%	66.0%	34.1%	90.0%	37.7%	100.0%
基本实施	28.0%	56.0%	31.8%	85.0%	33.7%	90.0%
选择实施	24.0%	48.0%	23.8%	48.0%	27.8%	85.0%
少量实施	15.0%	30.0%	15.9%	30.0%	23.8%	80.0%

注：此处推广率为占 2030 年节能潜力比例。将各类备选节能减排技术根据其单位减排成本和推行难易程度对技术进行了优先级分类。将技术分为有较低单位减排成本且比较容易推行的“优先实施”类；有中等成本、

易或较易推广的“基本实施”类；有中等成本、较高推广难易程度的“选择实施”类；需要很高的投资成本或者技术难度相当大的“少量实施”类。各类包含的具体技术见附录 2 说明。

（4）关键技术减排潜力分析

为展现深圳市制造业各节能减排技术的减排潜力情况，表 5-10 汇总了 2030 年最大减排潜力之和占深圳市制造业总减排量约 85%的主要技术。2030 年深圳市制造业各项减排技术的最大减排潜力为 2303.54 万吨 CO₂，其中前 20 项技术的减排潜力之和占制造业的 87%，见表 5-10。其中，控制管理技术、注塑机技术、温控技术、通用机械技术为主要减排技术类型。

表 5-10 制造业主要节能减排技术 2030 年最大减排潜力

技术类型	技术名称	减排潜力 (万吨)	减排潜 力占比	累计减排潜 力(万吨)	累计减排 潜力占比
控制管理技术	过程能耗管控系统技术	309.20	13.4%	309.20	13.4%
燃烧加热技术	高效电磁感应加热技术	202.26	8.8%	511.46	22.2%
控制管理技术	动态谐波抑制及无功补偿 综合节能技术	188.51	8.2%	699.97	30.4%
通用机械技术	空压机余热回收	113.15	4.9%	813.12	35.3%
控制管理技术	全功率匹配节能数控柔性 联动技术	108.16	4.7%	921.28	40.0%
温控技术	制冷剂替换	107.84	4.7%	1029.12	44.7%
专用技术	塑料动态成型加工节能技 术	101.84	4.4%	1130.96	49.1%
通用机械技术	变频调速节能技术	100.52	4.4%	1231.47	53.5%
注塑机	注塑机余热回收改造	99.01	4.3%	1330.48	57.8%
注塑机	注塑机安装炮筒热套	97.81	4.2%	1428.29	62.0%
注塑机	注塑机智能变频节能控制 技术	87.36	3.8%	1515.65	65.8%
注塑机	塑料注射成型伺服驱动与 控制技术	72.38	3.1%	1588.03	68.9%
控制管理技术	变频优化控制系统节能技 术	68.90	3.0%	1656.93	71.9%
温控技术	中央空调智能控制技术	56.32	2.4%	1713.25	74.4%
注塑机	注塑机定量泵系统改为变 量泵系统	55.72	2.4%	1768.97	76.8%
锅炉	锅炉余热回收	55.69	2.4%	1824.65	79.2%
温控技术	热泵技术	52.49	2.3%	1877.14	81.5%
控制管理技术	高耗能设备（空调、空压机	48.06	2.1%	1925.20	83.6%

技术类型	技术名称	减排潜力 (万吨)	减排潜 力占比	累计减排潜 力(万吨)	累计减排 潜力占比
	等) 定时开、关等相关措施				
温控技术	合理设置空调温度	43.72	1.9%	1968.93	85.5%
通用机械技术	高效节能电动机用铸铜转子技术	34.51	1.5%	2003.44	87.0%

5.3.4 交通部门参数

(1) LEAP 框架中交通部门碳排放计算方法

机动车辆（包括小汽车、出租车、公交车以及货车）、地铁、水路运输及航空运输碳排放的计算公式分别见公式 10 至公式 13。

$$C_{\text{Tran},i} = VM_i \times E_{\text{Tran},i} \times f_i \quad 10$$

$$VM_i = Q_i \times D_i \quad 11$$

其中, $C_{\text{Tran},i}$ 为第 i 种机动车的碳排放量, 机动车类型包括小汽车、出租车、公交车以及货车, VM_i 为第 i 种机动车的年行驶总里程, Q_i 为机动车保有量, D_i 为单辆机动车的年平均行驶里程, $E_{\text{Tran},i}$ 为车辆的单位车公里的能耗量, f_i 为第 i 种机动车所用能源的碳排放因子。各类机动车保有量见表 5-11 至表 5-13, 单车年平均行驶里程见表 5-14。

$$C_{\text{Tran},s} = OD_s \times E_s \times f_e \quad 12$$

其中, $C_{\text{Tran},s}$ 为地铁的碳排放量, OD_s 为地铁的营运里程, E_s 为单位营运里程电耗, f_e 为电力碳排放因子。地铁营运里程参考深圳市轨道交通建设规划确定, 见表 5-15, 单位营运里程电耗根据调研数据确定。

$$C_{\text{Tran},r} = \sum_{j=1}^n T_r \times E_{r,j} \times f_j \quad 13$$

其中, $C_{\text{Tran},r}$ 为水路或航空运输的碳排放量, T_r 表示水路或航空运输的货运周转量, $E_{r,j}$ 为单位货运周转量对第 j 种能源的消耗量, f_j 为第 j 种能源的碳排放因子。水路运输、航空运输的货运周转量见表 5-17。

其它交通碳排放主要包括机场、火车站和港口用电引起的碳排放。机场用电量影响因素主要是客运吞吐量、火车站用电量影响因素主要是客运人次、港口码

头用电量主要影响因素是集装箱吞吐量⁶¹。2013 年深圳市机场客运吞吐量为 3600 万人次，规划新建 T4 航站楼，预计到 2030 年约为 8300 万人次。2013 年深圳市铁路到发客运量 6980 万人次，预计到 2030 年到发客运量为 8550 万人次。深圳市港口运输量 2008 年到 2013 年年增长率为 1.74%，按此增长率达到 2030 年港口吞吐量约为 3120 万标准箱。由于深圳 2030 年其它交通规模和上海 2013 年规模接近⁶²，因此本研究采用上海同期其他交通电力需求作为深圳市 2030 年其它交通电力需求，即深圳其他交通电力需求从 2013 年的 12 亿 kWh 线性增长至 2030 年的 23.8 亿 kWh。

表 5-11 参考情景下 2010-2030 年深圳市各类机动车保有数量变化

单位：万辆

时间			2015	2020	2030
私家车	汽油		197.87	250.00	350.00
	电动		0.00	0.00	0.00
	合计		197.87	250.00	350.00
出租车	汽油		1.17	1.43	2.01
	电动		0.00	0.00	0.00
	合计		1.68	2.06	2.88
公交车	柴油		1.40	1.53	1.70
	天然气		0.06	0.06	0.06
	合计		1.46	1.59	1.75
货车	N1	柴油	6.60	9.39	13.99
	N2	柴油	0.90	1.29	1.92
	N3	柴油	6.12	8.70	12.97
	合计		13.62	19.38	28.88

注：小汽车、出租车和公交车保有量由深圳市城市交通规划设计研究中心提供。假定深圳市未来继续实施汽车限购政策，即每年限购小汽车 10 万辆，其中燃油汽车 8 万辆、新能源汽车 2 万辆。货车保有量根据货车货运周转量确定，假定两者的增速相同。参考情景下货车货运周转量根据历史趋势外推得到。

表 5-12 减排情景下 2010-2030 年深圳市各类机动车保有数量变化

单位：万辆

时间			2015	2020	2030
私家车	汽油		196.87	246.50	341.50
	电动		1.00	3.50	8.50
	合计		197.87	250.00	350.00

⁶¹由于深圳市火车站货运量、机场货运量和港口客运量极少，因此为简化计算，没有考虑这些因素。

⁶²上海 2013 年机场客运量为 8200 万人、铁路到发客运量为 9658 万人、港口货运吞吐量为 3361.7 万标准箱，耗电量为 23.8 亿 kWh

出租车		汽油	1.58	1.71	2.03
		电动	0.10	0.35	0.85
		合计	1.68	2.06	2.88
公交车		柴油	1.40	1.53	1.70
		天然气	0.06	0.06	0.06
		混合动力	0.20	0.70	1.70
		合计	1.46	1.59	1.75
货车	N1	柴油	6.60	5.21	5.21
		高效燃油	0.00	1.56	1.56
		油改气	0.00	2.11	2.11
		混合动力	0.00	0.50	0.50
		合计	6.60	9.39	9.39
	N2	柴油	0.90	0.69	0.69
		高效燃油	0.00	0.31	0.31
		油改气	0.00	0.29	0.29
		合计	0.90	1.29	1.29
	N3	柴油	6.12	4.68	4.68
		高效燃油	0.00	2.07	2.07
		油改气	0.00	1.96	1.96
		合计	6.12	8.70	8.70

注：小汽车、出租车和公交车保有量由深圳市城市交通规划设计研究中心提供。假定深圳市未来继续实施汽车限购政策，即每年限购小汽车 10 万辆，其中燃油汽车 8 万辆、新能源汽车 2 万辆。货车保有量根据货车货运周转量确定，假定两者的增速相同。

表 5-13 强化减排情景下 2010-2030 年深圳市各类机动车保有数量变化

单位：万辆

时间		2015	2020	2025	2030	
私家车	汽油	1958663	2430000	2880000	3330000	
	电动	20000	70000	120000	170000	
	合计	1978663	2500000	3000000	3500000	
出租车	汽油	15806	17054	18698	20342	
	电动	1000	3500	6000	8500	
	合计	16806	20554	24698	28842	
公交车	柴油	12011	8333	4146	0	
	天然气	580	580	580	540	
	电动	2000	7000	12000	17000	
	合计	14591	15913	16726	17540	
货车	N1	柴油	66012	45872	31041	16209
		高效燃油	0	17563	32062	46561
		油改气	0	23764	41588	59411

		混合动力	0	6691	12214	17738
		合计	66012	93890	116905	139919
	N2	柴油	9037	6165	4040	1915
		高效燃油	0	3435	6270	9106
		油改气	0	3253	5693	8133
		合计	9037	12854	16004	19155
	N3	柴油	61200	41753	27362	12972
		高效燃油	0	23262	42465	61668
		油改气	0	22032	38556	55080
		合计	61200	87046	108383	129720

注：小汽车、出租车和公交车保有量由深圳市城市交通规划设计研究中心提供。假定深圳市未来继续实施汽车限购政策，即每年限购小汽车 10 万辆，其中燃油汽车 8 万辆、新能源汽车 2 万辆。货车保有量根据货车货运周转量确定，假定两者的增速相同。

表 5-14 峰值目标情景下 2010-2030 年深圳市各类机动车保有数量变化

单位：万辆

时间		2015	2020	2030
私家车	汽油	193.87	236.00	316.00
	电动	4.00	14.00	34.00
	合计	197.87	250.00	350.00
出租车	汽油	1.58	1.71	2.03
	电动	0.10	0.35	0.85
	合计	1.68	2.06	2.88
公交车	柴油	1.20	0.83	0.00
	天然气	0.06	0.06	0.05
	电动	0.20	0.70	1.70
	合计	1.46	1.59	1.75

货车	N1	柴油	6.60	3.96	0.00
		高效燃油	0.00	1.95	5.17
		油改气	0.00	2.64	6.60
		混合动力	0.00	0.84	2.22
		合计	6.60	9.39	13.99
	N2	柴油	0.90	0.54	0.00
		高效燃油	0.00	0.38	1.01
		油改气	0.00	0.36	0.90
		合计	0.90	1.29	1.92
	N3	柴油	6.12	3.67	0.00
		高效燃油	0.00	2.58	6.85
		油改气	0.00	2.45	6.12
		合计	6.12	8.70	12.97

注：小汽车、出租车和公交车保有量由深圳市城市交通规划设计研究中心提供。假定深圳市未来继续实施汽车限购政策，即每年限购小汽车 10 万辆，其中燃油汽车 8 万辆、新能源汽车 2 万辆。货车保有量根据货车货运周转量确定，假定两者的增速相同。

表 5-15 各情景下机动车辆单车年平均行驶里程变化情况

单位：万公里

时间		2015	2020	2030
小汽车	参考情景	1.15	1.14	1.19
	减排情景	1.15	0.80	0.67
	强化减排情景	1.15	0.63	0.48
	峰值目标情景	1.15	0.63	0.48
公交车	参考情景	7.18	7.18	7.18
	减排情景	7.18	7.18	7.18
	强化减排情景	7.18	7.32	7.47
	峰值目标情景	7.18	7.32	7.47
出租车	参考情景	22.11	22.11	22.11
	减排情景	22.11	22.11	22.11
	强化减排情景	22.11	21.93	21.93
	峰值目标情景	22.11	21.93	21.93
货车	N1、N2 类	参考情景	6.00	6.00
		减排情景	6.00	6.00
		强化减排情景	6.00	6.00
		峰值目标情景	6.00	6.00
	N3 类	参考情景	8.10	8.10
		减排情景	8.10	8.10
		强化减排情景	8.10	8.10
		峰值目标情景	8.10	8.10

注：小汽车、出租车和公交车的单车年平均行驶里程由深圳市城市交通规划设计研究中心提供。货车单车年平均行驶里程由深圳大学物流研究所根据调研数据确定，假定货车单车年平均行驶里程不变。

表 5-16 各情景下地铁运营里程变化情况

单位：公里

情景	2015	2020	2030
参考情景	178.3	285.3	285.3
减排情景	178.3	347.9	596.0
强化减排情景	178.3	450.0	720.0
峰值目标情景	178.3	450.0	720.0

注：地铁营运里程参考深圳市轨道交通建设规划确定

表 5-17 航空、水路运输货运周转量情景

运输方式	2015	2020	2030
航空运输货运周转量（亿吨公里）	36.6	51.0	77.2
水路运输货运周转量（亿吨公里）	1956.9	2724.2	4121.1

注：航空运输、水路运输货运周转量根据历史趋势外推计算。

（2）减排技术推广率

参考情景下，交通部门除现有的交通政策及在建设施外，不再新增减排技术措施、项目或政策。

减排情景下，根据城市规划、交通规划调整轨道运营里程，见表 5-19，机动车保有量与参考情景相同。对于新能源汽车，电动出租车按每年 500 辆的增速增长，电动小汽车按每年 5000 辆的增速增长，混合动力公交车按每年 1000 辆的增速增长。对于货车，高级燃油货车以最大减排潜力的 80%进行推广，混合动力货车以最大减排潜力的 60%进行推广，货车油改气技术以最大减排潜力的 80%进行推广。对于地铁，2020 年“空调通风变频、水系统变频节能改造”按最大潜力的 80%推广率，其他措施均 100%推广；2030 年所有技术措施均 100%推广。对于政策性碳减排措施，推行一部分相对容易实施的政策，如绿色出行和自愿停驶、汽车尾号限行以及建设慢行网络等政策⁶³。

⁶³深圳市已建道路中 90%以上的道路设有 sidewalk，步行交通网络建设已经较为完善。截至 2013 年，深圳市已建成自行车专用道约 300 公里。根据《深圳市步行和自行车交通系统规划》，全市计划至 2020 年建成自行车道 2863 公里，其中主廊道 500 公里，连通道 1542 公里，休闲道 821 公里。自行车交通方式占全方式的比例由 6%提升至 15%左右，自行车与轨道交通接驳的比例达到 5%以上。因此，在计算自行车道长度与碳减排潜力的关系时，假设参考情景下，在 0-5 公里的居民短距离出行中，私人小汽车出行的比例占 0-5 公里短距离

强化减排情景下，地铁轨道运营里程见表 5-18，机动车保有量与参考情景相同。对于新能源汽车，电动出租车每年新增 500 辆，电动私家车每年新增 10000 辆，电动公交车每年新增 1000 辆。对于货车，混合动力货车按其最大潜力的 80% 推广，高级燃油货车以及货车油改气技术均按其最大潜力的 90% 推广。对于地铁，所有的节能减排措施在 2020 年、2030 年均将达到的推广。对于政策性碳减排措施，在减排情景的基础上实施更多的交通碳减排政策，如实施提高停车收费政策、汽车尾号限行政策、中心城区对外干道实施 HOT/HOV 收费政策、鼓励“绿色出行”和自愿停驶政策以及建设慢行网络政策等。对于道路货物运输，除推广货车减排技术以外，将货物运输方式由道路运输向水路运输调整，也将有效降低货物运输产生的碳排放。假设至 2020 年，道路运输 30% 的货运周转量将向水路运输调整，至 2030 年，道路运输 10% 的货运周转量将向水路运输调整。对于航空和水路运输，假设航空的单位周转量能耗从 2013 年的 567.58 吨标煤/10⁶ 吨公里逐渐下降到 2030 年的 400.00 吨标煤/10⁶ 吨公里，水路的单位周转量能耗从 2013 年的 4.71 吨标煤/10⁶ 吨公里逐渐下降到 2030 年的 4.00 吨标煤/10⁶ 吨公里。

峰值目标情景下，地铁轨道运营里程见表 5-18，机动车保有量与参考情景相同。对于新能源汽车，电动出租车每年新增 500 辆，电动私家车每年新增 20000 辆，电动公交车每年新增 1000 辆。对于货车，高级燃油货车、混合动力货车以及货车油改气技术均按最大潜力推广。对于地铁，所有的节能减排措施在 2020 年、2030 年均将达到 100% 的推广。对于政策性碳减排措施，在减排情景的基础上实施更多的交通碳减排政策，如实施提高停车收费政策、汽车尾号限行政策、中心城区对外干道实施 HOT/HOV 收费政策、鼓励“绿色出行”和自愿停驶政策以及建设慢行网络政策等。对于道路货物运输，除推广货车减排技术以外，将货物运输方式由道路运输向水路运输调整，也将有效降低货物运输产生的碳排放。假设至 2020 年，道路运输 30% 的货运周转量将向水路运输调整，至 2030 年，道路运输 40% 的货运周转量将向水路运输调整。对于航空和水路运输，假设航空的单位周转

机动化出行的 41.6%；在峰值目标情景下，假设城市慢行网络改善后，至 2020 年，这一比例将下降为 34.5%，至 2030 年，这一比例将下降为 32.2%。

量能耗从 2013 年的 567.58 吨标煤/10⁶ 吨公里逐渐下降到 2030 年的 400.00 吨标煤/10⁶ 吨公里，水路的单位周转量能耗从 2013 年的 4.71 吨标煤/10⁶ 吨公里逐渐下降到 2030 年的 4.00 吨标煤/10⁶ 吨公里。

表 5-18 深圳市轨道运营里程情景

单位：公里

项目	2010 年	2013 年	2015 年	2020 年	2030 年
参考情景	66.1	178.3	178.3	285.3	285.3
减排情景	66.1	178.3	178.3	347.9	596
强化减排情景	66.1	178.3	178.3	450.0	720.0
峰值目标情景	66.1	178.3	178.3	450.0	720.0

（3）关键技术措施减排潜力分析

深圳市交通部门减排潜力最大的九项技术措施共占该部门减排潜力的 83.3%，见表 5-19。因此，深圳市交通部门减排的重点应该放在公共交通的建设、货运结构的调整以及单位货运周转量能耗的降低和城市道路交通政策的实施方面。

表 5-19 交通部门主要减排措施最大减排潜力

单位：万吨 CO₂

排序	减排措施	减排潜力	减排潜力占比
1	公共交通建设	366.05	23.6%
2	货运结构调整	286.30	18.5%
3	航空运输单位货运周转量能耗降低	276.01	17.8%
4	货车油改气	137.05	8.8%
5	提高停车收费与汽车尾号限行	135.39	8.7%
6	高效燃油货车	90.90	5.9%
合计		1291.69	83.3%

A. 公共交通建设

城市轨道交通是通常以电能为动力，采取轮轨运输方式的快速大运量公共交通。在参考情景下，除了已有的轨道运营里程 66.1 公里外，还需考虑在建的轨道 11、9 和 7 号线。在减排情景下，2020 年轨道交通根据发改委批复的轨道交通三期工程建设 11、9、7、6、8 号五条线共 169.6 公里，与现有规模合计 347.9 公里；2030 年轨道交通网络根据既有《深圳市轨道交通规划》，共由 16 条线组成，总长约 596 公里。在峰值目标情景下，计划至 2020 年左右，全市形成 11 条完整地铁线路、450 公里的地铁网络。根据轨道交通网络规划修编初步研究方案，2030 年

的轨道线路由 16 条增加至 20 条，长度增加至 720 公里。

快速公交系统（Bus Rapid Transit, BRT）是一种新型的公共客运系统，可以解决走廊内公交车的拥挤和延误等问题，改善混合交通的情况。在参考情景以及减排情景下，基本不考虑快速公交的发展。在峰值目标情景下，根据快速公交相关规划，共规划建设 12 条干线以及 7 条快线，全长 677 公里，其中干线 459 公里，快线 218 公里。根据规划建设现代有轨电车线路 9 条，总长 150.5 公里。2020 年前预计试验线开通运行

在参考情景以及减排情景下，常规公交基本保持现状，没有较大的发展。在峰值目标情景下，计划常规公交线路数量在 2020 年增加到 900 条，线路总长度增建至 19350 公里，其中公交专用道 1000 公里；在 2030 年常规公交线路数量增加到 920 条，线路总长度增建至 19800 公里，其中公交专用道 1200 车道公里。

在峰值目标情景下，轨道交通、快速公交以及普通公交的建设速度已达其最大潜力。在此建设速度下，至 2030 年，深圳市交通部门将在参考情景的基础上减排 366.05 万吨 CO₂。

B. 货物运输的结构调整

已知交通货物运输部门中道路运输、水路运输和航空运输结构占比的变化会同时影响交通部门碳排放的变化，从目前的研究来看，当道路运输的货运周转量向水路运输转移时，交通部门的碳排放量将会降低。因此，现假设交通部门在峰值目标情景中，保持航空部门的货运周转量不变，将道路运输的货运周转量向低排放的水路运输调整。至 2030 年，货物运输结构调整的减排潜力将达到 286.30 万吨 CO₂。

C. 航空运输单位货运周转量能耗的降低

随着人民生活水平的不断提高，深圳市航空业在“十二五”期间发展态势迅猛，航空部门的货运周转量年年攀升，航空运输部门在深圳交通部门的节能减排中所占的位置也越来越不可忽视。根据假设进行估算，深圳市航空部门的单位周转量能耗将从 2013 年的 567.58 吨标煤/10⁶ 吨公里逐渐下降到 2030 年的 400.00 吨标煤/10⁶ 吨公里。因此，2030 年深圳市航空部门将在参考情景的基础上减排 276.01 万吨 CO₂。

D.货车油改气

货车油改气就是将原来使用汽油、柴油为燃料的汽车改装成使用天然气为燃料的汽车。目前，以天然气为燃料的汽车绝大部分是由汽油车和柴油车改装而来，考虑到汽车改装后使用的便利性，一般会在改装时保留汽车原来的燃油供给系统。改装后的汽车既可使用汽油或柴油，也可使用天然气。两种燃料不同时使用的汽车称为“两用燃料”汽车；两种燃料可以同时使用的汽车称为“双燃料”汽车。至 2030 年，货车油改气的最大减排潜力为 137.05 万吨 CO₂。

E.提高停车收费+汽车尾号限行

汽车尾号限行是指在深圳市对车辆进行限行管理，机动车限行的区域是深圳市中心城区，限行方式假设为工作日每个车号每周限行一次，节假日不限行。在计算该措施的减排潜力时，为了简化模型，将限行部分的小汽车客运周转量转移至公交出行进行计算。

提高停车收费措施通过运用经济杠杆调控交通需求，在这一措施下，停车费的制定参照《深圳市机动车停车服务收费管理办法》中的政府指导价，且不同区域不同类型的停车费之间有所区别。已知目前全市的停车费平均为 8 元/次，假设 2020 年全市停车费平均提高为 12 元/次，2030 年提高为 16 元/次。

由于汽车尾号限行与提高停车收费这两项减排政策在实际实施时将会互相产生影响，因此在考虑这两项措施的最大减排潜力时，应将这两项措施综合起来考虑。至 2030 年，汽车尾号限行和提高停车收费措施的最大减排潜力为 135.39 万吨 CO₂。

F.高效燃油货车

高效燃油货车是指通过改进发动机、重货轻量化、子午线轮胎、改善路况等多种手段提高货车的燃油利用率，可降低货车的燃油消耗约 16%。至 2030 年，高效燃油货车这一减排措施的最大减排潜力为 90.90 万吨 CO₂。

5.3.5 建筑部门参数

(1) LEAP 框架中建筑部门碳排放计算方法

建筑部门碳排放计算方法见公式 14：

$$C_{\text{Build}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_i \times E_{\text{Build},i,j} \times f_j \quad 14$$

其中， C_{Build} 为建筑部门碳排放量， A_i 为第 i 类建筑的面积， $E_{\text{Build},i,j}$ 为第 i 类建筑对第 j 种能源的单位面积能耗， f_j 为第 j 种能源的碳排放因子。建筑类型分为居住建筑和公共建筑两大类，每类建筑进一步细分为既有建筑和新建建筑两个子类。

与建筑碳排放相关性较大的参数包括总建筑面积（含建筑存量与增量）、运行模式（对于住宅建筑即为居民生活模式）、建筑能耗强度（综合考虑设备能效、照明、室内环境参数、换气次数、围护结构等微观因素）等。每种建筑类型的面积按人均建筑面积与总人数确定。参考情景的单位面积能耗强度根据历史数据及与发达国家对标综合确定；减排情景的单位面积能耗强度主要根据减排措施与减排成本综合得到，优先实施、基本实施、选择实施和少量实施类减排技术措施的推广率分别为 75%、75%、50%及 25%；峰值目标情景下优先实施、基本实施、选择实施和少量实施类减排技术措施的推广率分别为 100%、100%、75%及 40%。

（2）总建筑面积

总建筑面积即为存量面积与增量面积之和。2012 年，深圳市民用建筑面积约为 5.67 亿平方米，其中居住建筑面积约为 4.45 亿平方米，公共建筑面积约为 1.22 亿平方米。据此计算，2012 年深圳人均居住建筑面积约为 28.71 m²/人，人均公共建筑面积约为 7.87 m²/人。2012 年至 2030 年深圳市建筑面积发展情景见表 5-20。

表 5-202012~2030 年深圳市建筑面积发展情景

单位：亿平方米

分类	2012 年	2015 年	2020 年	2030 年
既有居住建筑（拆除后）	4.45	4.33	4.14	3.76
既有公共建筑（拆除后）	1.22	1.19	1.14	1.03
新建居住建筑面积	0.00	0.44	1.17	2.34
新建公共建筑面积	0.00	0.13	0.39	0.87
拆除居住建筑面积	0.00	0.04	0.04	0.04
拆除公共建筑面积	0.00	0.01	0.01	0.01
总建筑面积	5.67	6.09	6.84	8.00

（3）减排技术推广率

参考情景下，建筑部门除现有的建筑政策及在建设施外，不再新增减排技术

措施、项目或政策。减排情景下，以新建建筑为例，按照 2015 年实施《绿色建筑评价标准》（修订版）、《夏热冬暖公共建筑节能设计标准》（修订版），及技术难以程度，确定推广率，技术推广比例为当年节能量占 2030 年节能潜力比例。既有建筑改造措施，当累计技术推广率达到 100%后，由于没有增量，一直保持 100%。目前全市有 700 余栋公共建筑开展能耗监测，随着既有建筑与新建建筑新增能耗监测系统，认为到 2030 年可实现全覆盖。低能耗或近零能耗建筑的建设，随着技术的发展，可操作性增强，因此后续技术推广率增加较快。由于低碳示范项目也是新建建筑，因此与更高标准的建筑节能设计一致，峰值目标情景下，进一步扩大各类技术的推广率。

（4）关键技术措施减排潜力分析

深圳市建筑部门减排潜力最大的七项技术措施共占该部门减排潜力的 83.5%，见表 5-21。可以看出减排量较大的主要减排手段为更高标准的建筑节能设计（公共建筑）、更高标准的建筑节能设计（居住建筑）、既有居住建筑太阳能热水系统（电）、既有居住建筑太阳能热水系统（气）、既有公共建筑外遮阳改造、高效照明系统、高效空调系统等。因此，深圳市建筑部门减排的重点应该放在这几项措施的推广上。

表 5-21 建筑部门主要减排措施最大减排潜力

排序	技术	减排潜力 (万吨)	减排潜力 占比	减排潜力累计额 (万吨)	减排潜力累计 额占比
1	更高标准的建筑节能设计（公共建筑）	298.00	38.0%	298.00	38.0%
2	更高标准的建筑节能设计（居住建筑）	143.75	18.3%	441.75	56.3%
3	既有居住建筑太阳能热水系统（电）	75.36	9.6%	517.12	65.9%
4	既有居住建筑太阳能热水系统（气）	60.09	7.7%	577.21	73.6%
5	既有公共建筑外遮阳改造	27.79	3.5%	605.00	77.1%
6	高效照明系统	26.71	3.4%	631.71	80.5%
7	高效空调系统	23.23	3.0%	654.94	83.5%

5.3.6 其它部门参数

（1）其它部门碳排放量计算方法

由于其他部门占全市碳排放总量的比重较小，因此采用简化方法计算其他部门的碳排放量，见公式 15。

$$C_{\text{Others}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{i,j} \times f_j \quad 15$$

其中， R_{ij} 为第 i 个部门第 j 种能源的实物消费量， f_j 为第 j 种能源的碳排放因子。

（2）其它部门各类能源需求量

A. 农林牧渔业能源需求

近几年深圳市农林牧渔业占 GDP 比重已降至 0.1% 以下，年用电量保持在 2.2 亿 kWh 左右，电力需求主要源自渔业活动。假设未来农林牧渔业电力需求保持 2.2 亿 kWh 不变。

B. 采掘业能源需求

深圳市采掘业能源需求主要源自海上石油和天然气开采，能源类型包括电力、原油、汽油、柴油和天然气。由于海上石油和天然气开采规模稳定，因此可以假设采掘业各类能源需求保持 2013 年水平不变。

C.建筑业能源需求

深圳市建筑业能源需求主要源自建筑施工，能源类型主要为电力，也包括少量烟煤、柴油、液化石油气和煤油。近几年电力消费量稳定在 7.2 亿 kWh 左右。考虑到未来深圳市建筑业新建建筑规模较为稳定，因此假设未来建筑业能源需求保持 2013 年水平不变。

D.燃气和水的供应业能源需求

深圳市燃气和水的供应业消耗的能源主要为电力和天然气，也包括少量的汽油、柴油和液化天然气。由于该行业主要是满足居民生活、第三产业中涉及生活服务（如餐饮和住宿等）的需求，主要影响因素是常驻人口数量，因此可以假定燃气和水的供应业能源需求与人口成正比，见公式 16。

$$R_{w,j,t} = \frac{P_t}{P_0} \times R_{w,j,0} \quad 16$$

其中， $R_{w,j,t}$ 为第 t 年燃气和水的供应业对第 j 种能源的需求量， P_t 为第 t 年的常住人口， P_0 为基准年的常住人口， $R_{w,j,0}$ 为基准年该行业对第 j 种能源的需求量。

E.电厂自用电及线损

2013 年深圳市电厂自用电及线损率为 32.26 亿 kWh。虽然未来电力需求有所增长，但是同时随着电厂发电设施及线路升级，损耗率也将有所下降，因此假设未来深圳市电厂自用电及线损保持 2013 年水平不变。

5.4 情景分析结果

5.4.1 深圳市碳排放峰值路径

深圳市在强化减排情景和峰值目标情景下均出现了碳排放峰值。强化减排情景下，碳峰值出现在 2025 年，峰值水平为 7478 万吨 CO₂。峰值目标情景下，2022 年出现碳排放峰值，为 6924 万吨 CO₂，见图 5-6。强化减排情景和峰值目标情景 2020 年单位 GDP 碳排放（碳强度）分别比 2005 年下降 58.5%、60.3%，2030 年下降 76.8%、78.9%（见图 5-7），高于我国政府提出的 2020 年、2030 年分别比 2005 年下降 40%~45%、60%~65% 的全国平均目标。

强化减排情景下，深圳市 2016 年碳排放总量为 6981 万吨，制造业、交通部

门和建筑部门占比分别为 39.1%、28.0%和 26.4%。2025 年，深圳市碳排放总量为 7478 万吨，增长了 7.1%，制造业占碳排放总量的比重最大（34.2%），其次为交通部门（32.5%）和建筑部门（27.6%）。2030 年，深圳市碳排放总量降至 7221 万吨，制造业碳排放比重仍最大（30.8%），其次是交通部门（33.9%）和建筑部门（29.7%）。制造业碳排放占比持续下降，是深圳市实现碳排放峰值的关键条件，2016 年以后制造业的碳排放基本处于负增长状态。2025 年以前，交通部门碳排放增量水平较高，年均增量约为 55 万吨 CO₂，2025 年以后交通部门碳排放增量持续下降，主要原因在于减排措施力度的加大和技术手段在长期发挥减排效应；2016-2017 年和 2025-2026 年建筑部门的碳排放量有所下降，其余年份建筑部门的碳排放增量维持稳定水平。

峰值目标情景下，2016 年深圳市碳排放总量为 6861 万吨，制造业、交通部门和建筑部门占比分别为 39.1%、28.1%和 26.2%。峰值年份，深圳市碳排放总量为 6924 万吨，增长了 1%，制造业占碳排放总量的比重最大（38.4%），其次为交通部门（28.4%）和建筑部门（26.1%）。2030 年，深圳市碳排放总量降至 6571 万吨，制造业碳排放比重仍最大（40.0%），其次是交通部门（30.6%）和建筑部门（27.7%）。制造业碳排放的尽早达峰是深圳市早日实现碳排放峰值的重要条件，与强化减排情景相同，2016 年以后制造业的碳排放基本处于负增长状态。2016-2022 年交通部门碳排放增量水平较高，年均增量约为 35.2 万吨 CO₂，2023-2030 年交通部门碳排放增量持续下降，甚至降到负数发挥减排效应；2015-2016 年、2022-2023 年和 2027-2028 年建筑部门的碳排放量有所下降，其余年份建筑部门的碳排放增量均比较稳定。

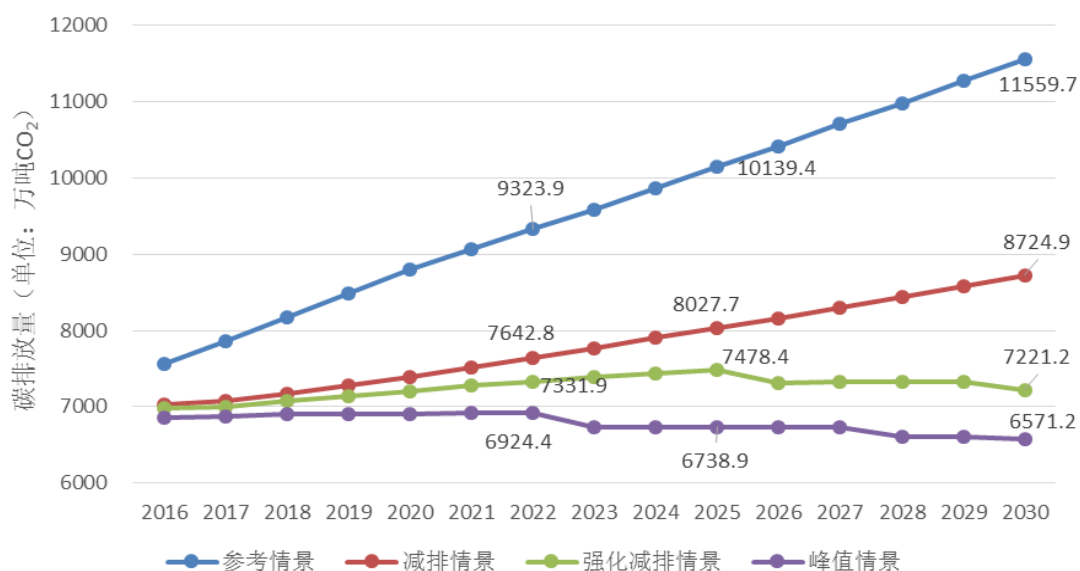


图 5-6 深圳市碳排放情景分析结果

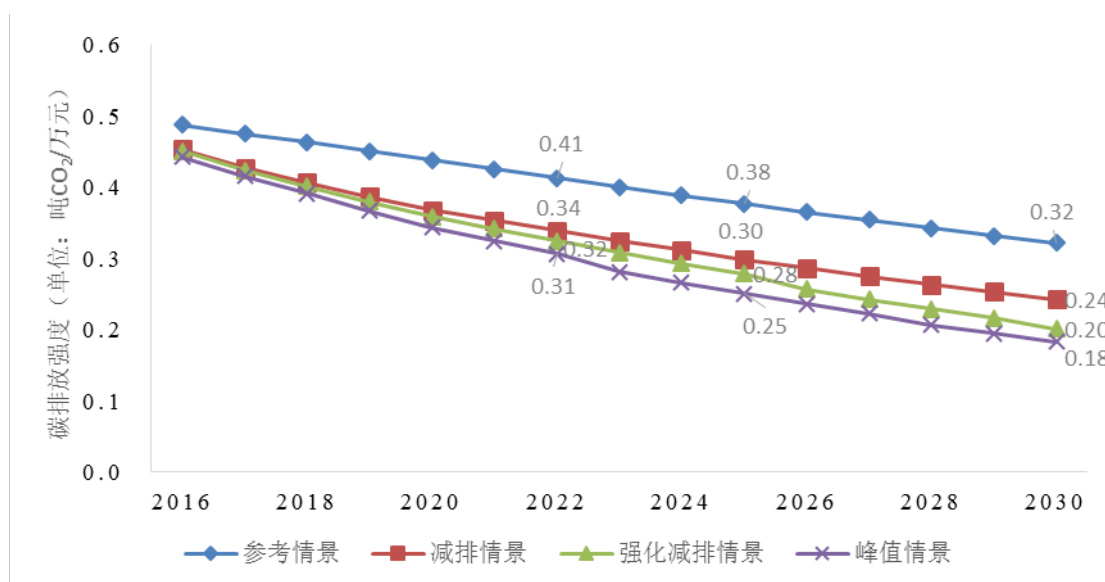


图 5-7 深圳市单位 GDP 碳排放情景分析结果

注：历年单位 GDP 碳排放量由碳排放总量除以 GDP（2005 年可比价）得到。

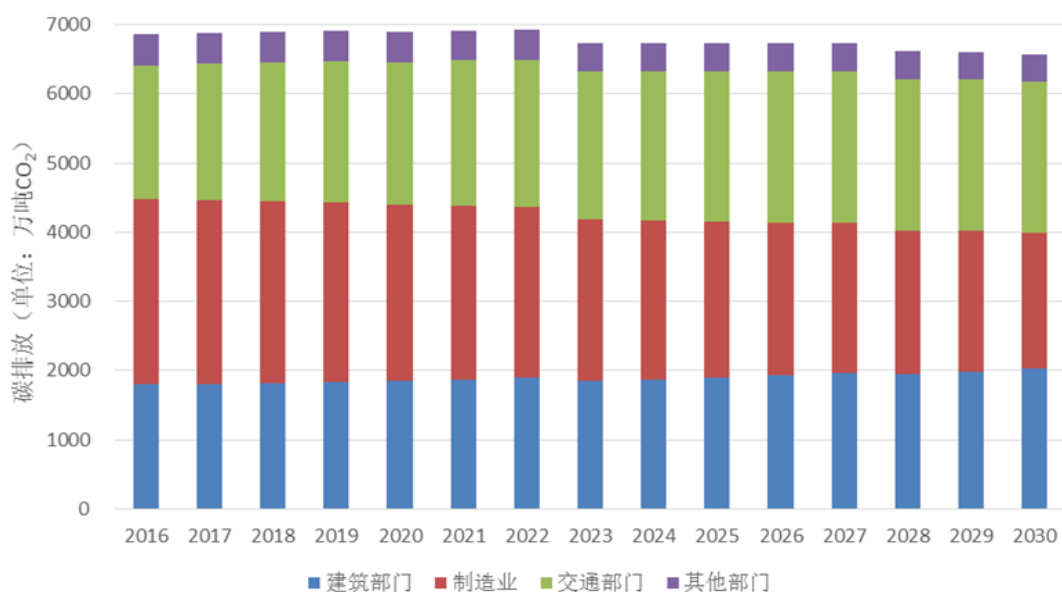


图 5-8 峰值目标情景下深圳市碳排放部门结构

5.4.2 各部门碳排放路径

5.4.2.1 电力业碳排放路径

电力行业在参考情景下和减排情景下没有出现碳排放量的峰值，但是在强化减排情景和峰值目标情景下出现了碳排放峰值。其中，强化减排情景碳排放峰值出现在 2025 年，峰值目标情景下碳排放峰值出现在 2022 年，见图 5-9。参考情景下 2020 年和 2030 年深圳市电力业碳排放量为 6014.6 万吨和 7568.7 万吨。减排情景下，2020 年、2030 年碳排放量分别为 4806.0 万吨和 5401.5 万吨。减排情景较参考情景分别下降 20.4%和 29.7%，其中 2020 年和 2030 年电力行业减排量分别为 385.0 万吨 CO₂ 和 488.8 万吨 CO₂，电力行业减排贡献分别为 6.4%和 6.5%；其余 13.7%和 22.2%减排的贡献主要是由于电力需求减少所致。

强化减排情景下，电力业碳排放在 2025 年出现峰值，电力行业峰值碳排放量为 4861.5 万吨。在 2025 年出现峰值主要原因有两个，其一是电力需求量增长缓慢，强化减排情景下电力需求从 2025 年的 849.4 亿 kWh 到 2030 年的 857.3 亿 kWh，电力需求仅仅增长 7.9 亿 kWh，而 2015 年到 2020 年、2021 年到 2025 年电力需求分别增长 54.1 亿 kWh 和 24.6 亿 kWh；其二是在 2026 年和 2030 年分别关闭妈湾电厂 2/3 机组和 1/3 的机组，到 2030 年强化减排情景减排量达到 817.7 万吨。

峰值目标情景下，电力业碳排放量将在 2022 年出现峰值，电力行业峰值碳排放量为 4604.4 万吨。在 2022 年出现峰值主要原因有两个，其一是电力需求量增长缓慢，峰值目标情景下电力需求从 2020 年的 806.6 亿 kW.h 到 2030 年的 809.1 亿 kWh，电力需求基本无增长，而 2015 年到 2020 年电力需求增长 37.7 亿 kWh；其二是在 2026 年和 2030 年分别关闭妈湾电厂 2/3 机组和 1/3 的机组，提供了 328.9 万吨的减排量，同期分布式光伏发电和冷热电三联产也大力推广，提供了很大的减排量，到 2030 年峰值目标情景减排量达到 923.2 万吨。

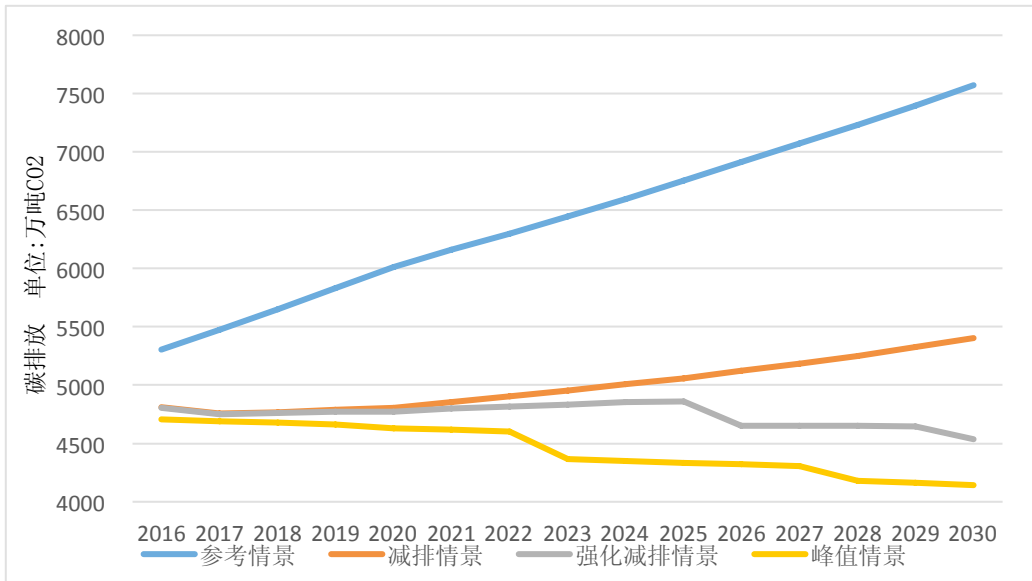


图 5-9 深圳市电力业碳排放情景分析结果

5.4.2.2 制造业碳排放路径

制造业碳排放峰值出现在强化减排情景和峰值目标情景下的 2015 年（见图 5-10），峰值水平为 2741 万吨 CO₂，能源消耗量为 1423 万吨标煤。

强化减排情景下，2020 年、2030 年碳排放较参考情景分别下降 25.8% 及 50.0%，减排量分别为 918 万吨 CO₂ 及 2227 万吨 CO₂；节能量分别为 382 万吨标煤及 1001 万吨标煤。峰值目标情景下，2020 年、2030 年碳排放较参考情景分别下降 28.2% 及 55.6%，减排量分别为 1003 万吨 CO₂ 及 2477 万吨 CO₂；节能量分别为 419 万吨标煤及 1120 万吨标煤。

强化减排情景下，2015 年单位增加值碳排放为 0.523tCO₂/万元，2020 年、2030 年单位增加值碳排放分别降为 0.386tCO₂/万元及 0.216tCO₂/万元，2020 年较 2015

年下降 26.1%，2030 年较 2015 年下降 58.6%。峰值目标情景下，2015 年单位增加值碳排放为 0.523tCO₂/万元，2020 年、2030 年单位增加值碳排放分别降为 0.374tCO₂/万元及 0.192tCO₂/万元，2020 年较 2015 年下降 28.5，2030 年较 2015 年下降 63.3%（见图 5-11）。

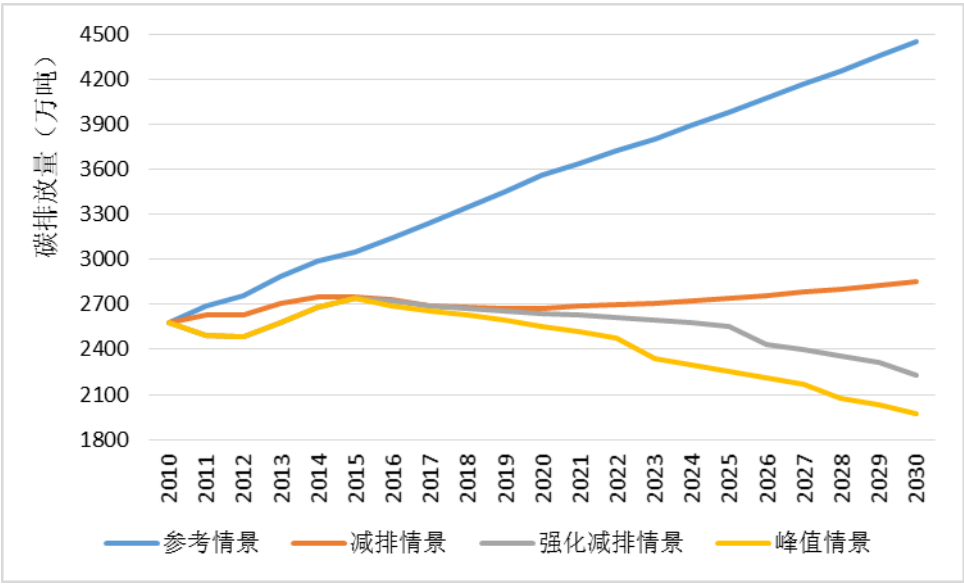


图 5-10 深圳市制造业碳排放情景分析结果

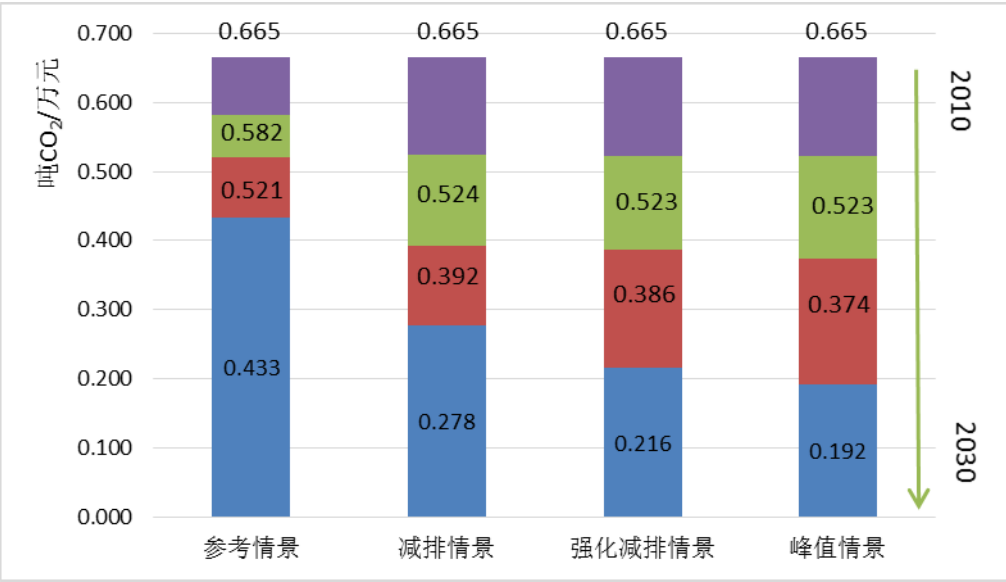


图 5-11 深圳市制造业单位增加值碳排放情景分析结果

5.4.2.3 交通部门碳排放路径

在参考情景和减排情景中，交通部门的碳排放均呈现上升趋势；在峰值目标

情景中，交通部门的碳排放在 2027 年出现峰值，峰值排放量为 2188.22 万吨 CO₂，见图 5-12。参考情景下，2030 年交通部门碳排放为 3680.42 万吨 CO₂，2020 至 2030 年碳排放的年均增速为 3.8%；在减排情景下，碳排放较参考情景下降了 614.94 万吨 CO₂，2020 年至 2030 年碳排放的年均增速为 2.8%；在强化减排情景下，碳排放较减排情景下降了 614.99 万吨 CO₂，2020 年至 2030 年碳排放的年均增速为 1.0%；在峰值目标情景下，碳排放较强化减排情景进一步下降 217.43 万吨 CO₂，2020 年至 2030 年碳排放的年均增速为 0.6%。

将深圳市交通部门 2010-2030 年四种情景下的碳排放变化按小汽车、出租车、公交车、货车、地铁、水路运输和航空运输七个部分进行分解，得到图 5-13 至图 5-16。

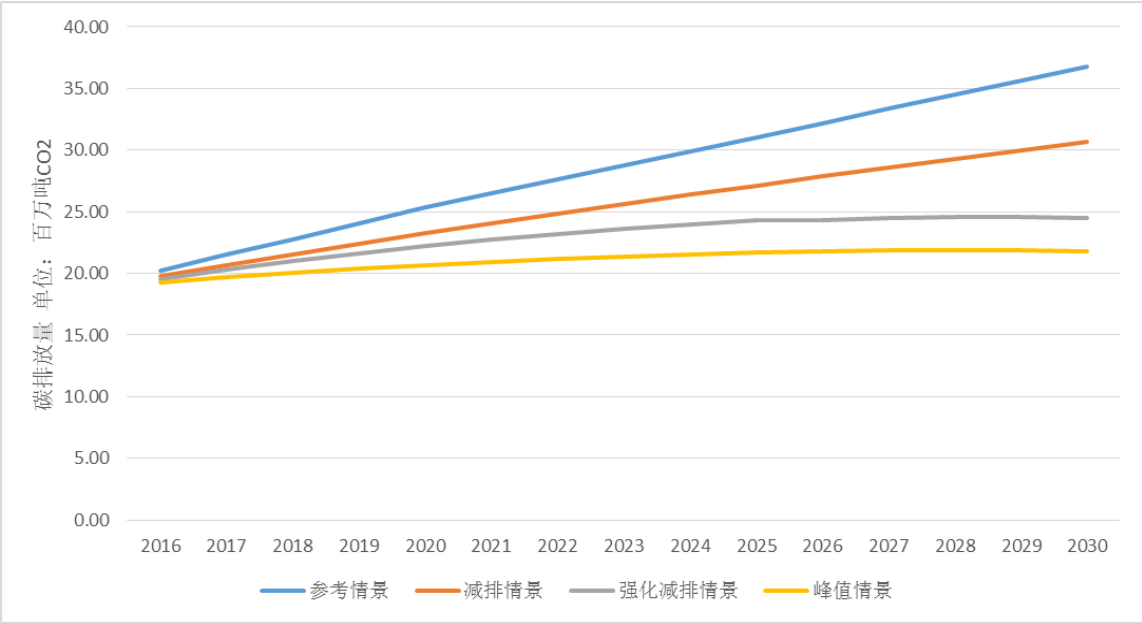


图 5-12 深圳市交通部门碳排放情景分析结果

（1）参考情景

在参考情景下，小汽车、货车和航空运输这三个部门的碳排放占比较大，至 2030 年，这四个部门的碳排放占深圳市交通总碳排放的 78.7%。此外，这四个部门的碳排放增长速度也较为迅速。2020-2030 年这十年间，小汽车、货车和航空运输这三个部门的碳排放增长速度分别为 3.9%、4.1%和 4.2%。由此可见，这三个部门具有非常大的减排潜力，深圳市交通减排的关键就在这三个部门。

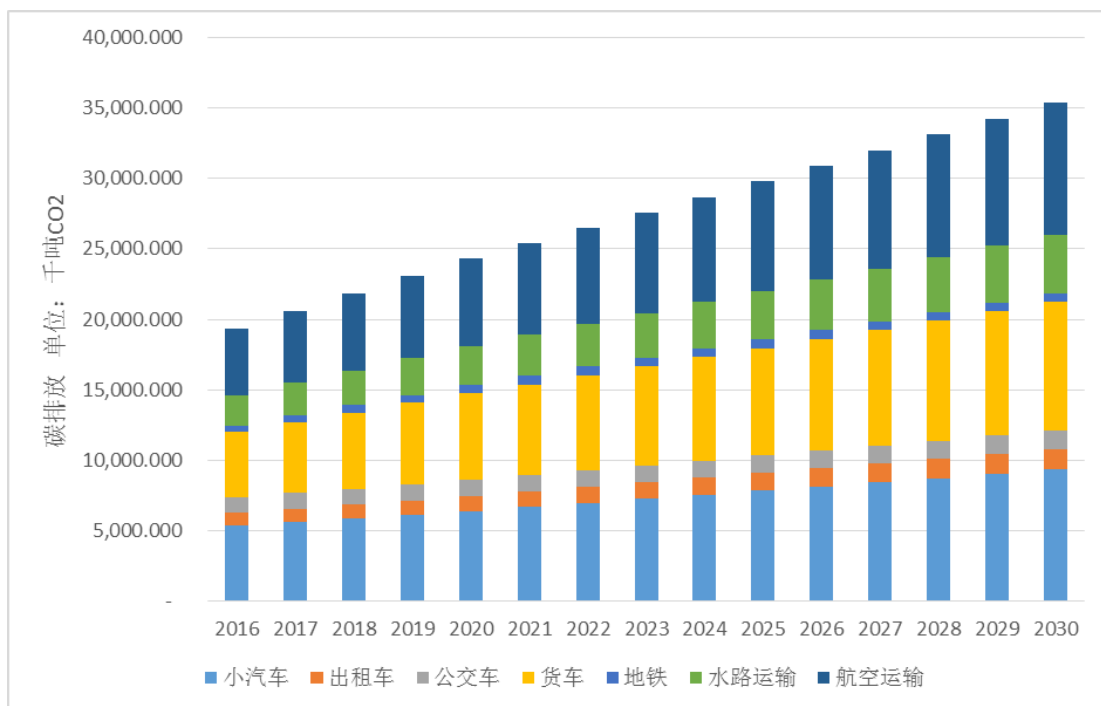


图 5-13 参考情景下深圳市交通各部门碳排放

(2) 减排情景

在减排情景下，小汽车、货车和航空运输这三个部门的碳排放占比较大，至 2030 年，这三个部门的碳排放占深圳市交通总碳排放的 74.4%。其中，在参考情景中占有较大比例碳排放的小汽车部门，在减排情景中由于城市道路减排措施的采用，减排效果显著，碳排放占比由 2030 年参考情景中的 26.4% 下降至减排情景中的 17.8%。此外，与参考情景相比，小汽车、货车和航空运输这三个部门在 2020-2030 年间的增长速度也有所降低，分别为 -0.3%、3.0% 和 4.2%。在减排情景中，小汽车、货车这两个部门碳排放速度的减缓是深圳市交通部门总碳排放增速减缓的主要原因。

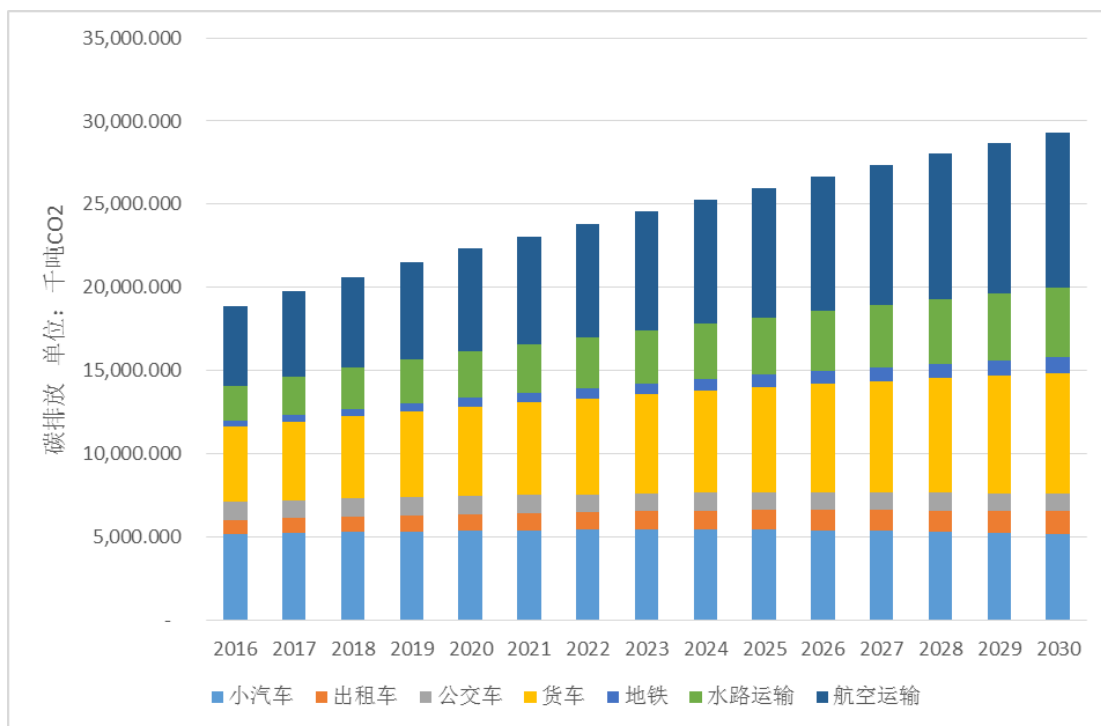


图 5-14 减排情景下深圳市交通各部门碳排放

(3) 强化减排情景

在强化减排情景下，小汽车、货车、水路运输和航空运输这四个部门的碳排放占比较大，至 2030 年，这四个部门的碳排放占深圳市交通总碳排放的 87.0%。在强化减排情景中，这四个部门在 2020 年-2030 年间的碳排放增速分别为-2.7%、1.6%、3.1%和 1.5%。与减排情景相比，强化减排情景中小汽车、货车和航空运输部门的碳排放进一步降低，而水路运输部门的碳排放则有所上升，这主要是由货车部门的货运周转量向水路运输部门转移导致的。在强化减排情景中，小汽车、货车和航空运输这三个部门的技术性减排和政策性减排措施的实施，以及货车部门的货运周转量向水路运输部门转移的结构性调整是深圳市交通部门总碳排放增速进一步减缓的主要原因。

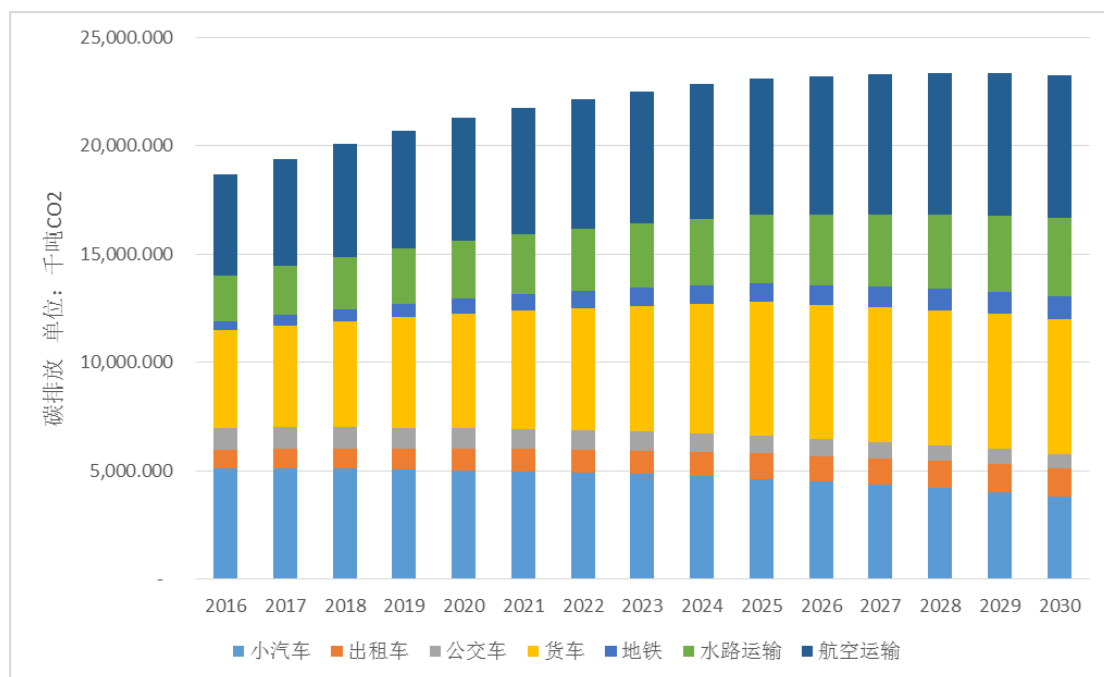


图 5-15 强化减排情景下交通各部门碳排放

(4) 峰值目标情景

在峰值目标情景下，小汽车、货车、水路运输和航空运输这四个部门的碳排放占比较大，至 2030 年，这四个部门的碳排放占深圳市交通总碳排放的 85.6%。在峰值目标情景中，这四个部门在 2020 年-2030 年间的碳排放增速分别为-3.1%、-0.04%、3.1%和 1.4%。与强化减排情景相比，峰值目标情景中小汽车、货车和航空运输部门的碳排放进一步降低，而水路运输部门的碳排放则有所上升，这主要是由货车部门的货运周转量向水路运输部门转移导致的。在峰值目标情景中，货车部门的货运周转量向水路运输部门转移的结构性调整是深圳市交通部门总碳排放相对强化减排情景进一步减少的主要原因。

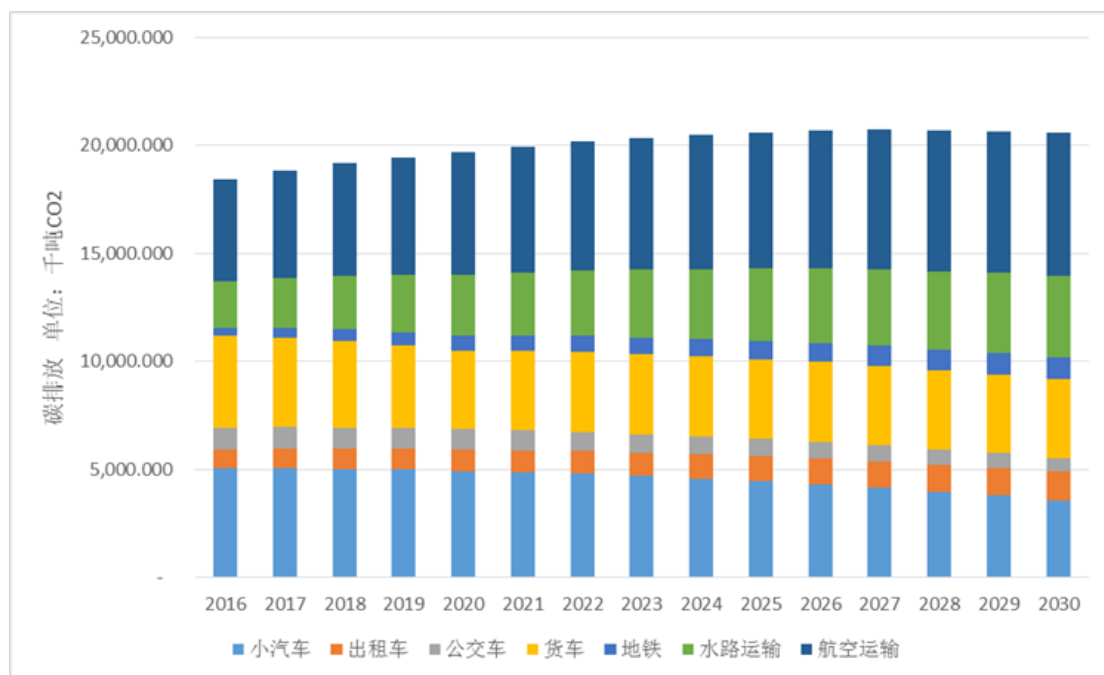


图 5-16 峰值目标情景下交通各部门碳排放

5.4.2.4 建筑部门碳排放路径

各情景下建筑部门均未出现碳排放峰值，见图 5-17。参考情景下，2020 年深圳市建筑部门碳排放量为 2240 万吨 CO₂，2030 年为 2952 万吨 CO₂，相较于 2010 年分别增长了 37.9%、81.8%。减排情景下，2020 年、2030 年碳排放量较参考情景分别下降 13.3%及 19.7%，减排量分别为 298 万吨 CO₂ 及 583 万吨 CO₂。强化减排情景下，2020 年、2030 年碳排放量较参考情景分别下降 14.92%及 27.49%，减排量分别为 335318 万吨 CO₂ 及 80946 万吨 CO₂。峰值目标情景下，2020 年、2030 年碳排放量较参考情景分别下降 17.6%及 31.50.%，减排量分别为 394 万吨 CO₂ 及 930 万吨 CO₂。

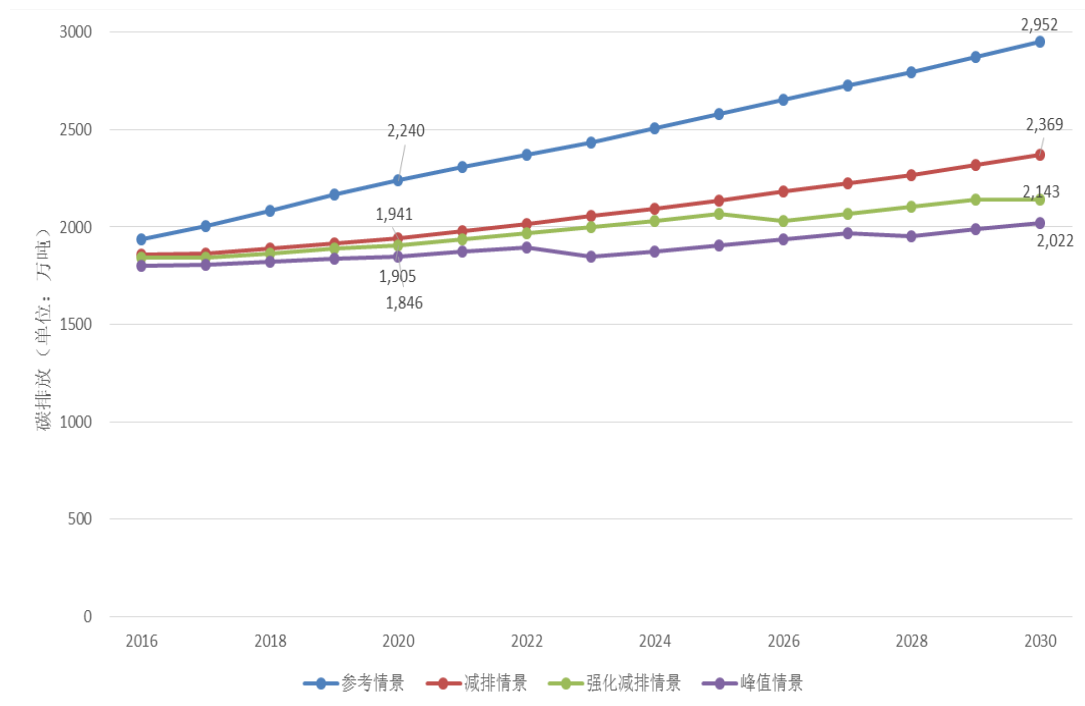


图 5-17 深圳市建筑部门碳排放情景分析结果

6 实现碳排放峰值的对策措施

6.1 电力业减排措施

因电力行业碳排放峰值出现在强化减排情景和峰值目标情景下，所以本研究对电力业减排措施的分析重点放在强化减排情景和峰值目标情景下。峰值目标情景下电力业各项技术的减排量见图 6-1。可见，电力业的减排重点在于电力结构替代，包括妈湾电厂退役、新建燃气电厂、分布式光伏发电、垃圾发电和提高现有燃机利用小时等五项技术措施。峰值目标情景下，这五项技术措施的减排量共占 2030 年电力业减排量的 88.7%，占比分别为 35.6%、22.9%、19.4%、6.0%和 4.7%。强化减排情景下电力业见图 6-2。与峰值目标情景下类似，电力业的减排重点在于电力结构替代，包括妈湾电厂退役、新建燃气电厂、分布式光伏发电、垃圾发电和提高现有燃机利用小时等五项技术措施。强化减排情景下，这五项技术措施的减排量共占 2030 年电力业减排量的 89.2%，占比分别为 40.2%、25.9%、10.9%、6.8%和 5.3%。

减排情景下电力业各项技术的减排量见图 6-3，减排情景下电力业的减排重点在于新建燃气电厂、分布式光伏发电、垃圾发电和提高现有燃机利用小时等四项技术措施。减排情景下，这四项技术措施的减排量共占 2030 年电力业减排量的 81.9%，占比分别为 43.3%、18.3%、11.4%、和 8.9%。

推进妈湾电厂退役。峰值目标情景下，本研究按照燃煤电厂机组的经济使用寿命年限来退役，其中 1#、2#、3#、4#号机组到 2023 年达到经济使用年限退役，妈湾电厂年发电量从原有的 106.9 亿 kWh 降到 35.6 亿 kWh；5#、6#号机组到 2028 年达到经济使用寿命年限退役，至此妈湾电厂全部退役。强化减排情景下，推迟妈湾电厂退役；其中，1#、2#、3#、4#号机组在 2026 年退役，5#、6#号机组到 2030 年退役。减排情景下，考虑到深圳市内部电力供应率仅仅为 30%，所以在减排情景下妈湾电厂不予退役。

新建燃机电厂。按照项目规划，2016 年到 2020 年有序推进电厂建设（即每年增加装机 96 万 kW，年增加燃气发电量 33.6 亿 kWh），到 2020 年新建燃机发电厂 480 万 kW（年燃气发电量为 168.0 亿 kWh）。由于深圳市地域限制，没有合适的建

造地址，所以 2021 年到 2030 年保持发电量不变。由于减排情景已经使得新建燃气电厂推广率达到 100%，所以减排情景、强化减排情景和峰值目标情景该技术推广率相同。

提高现有燃机利用小时。现有燃机装机共计 448 万 kW，年均利用小时为 2752 小时，与国家规定的利用小时 3500 小时尚有一定提升空间。由于深圳市新建燃机发电厂的主要原因是燃机发电机组不能满足对增长的燃机发电量的需求，所以在峰值目标情景和深度减排情景中 2016 年到 2020 年匀速提高燃机利用小时数（对应每年增加约 6.9 亿 kWh 燃气发电），到 2020 年达到 3500 小时（相比 2015 年燃气发电量增加 34.6 亿 kWh）。同新建燃气发电，减排情景、强化减排情景和峰值情景相同。

推进垃圾发电。2020 年前，逐步提高用于发电的垃圾比重，到 2020 年全部垃圾用于焚烧发电。每年增加垃圾发电量约 1.6 亿 kWh，到 2020 年全部垃圾实现垃圾发电量，增加发电量 16.3 亿 kWh。同新建燃气发电，减排情景、强化减排情景和峰值情景相同。

大力推广分布式光伏发电。峰值目标情景下 2020 年分布式光伏发电装机 600MW（推广率 6.6%，年发电量 6 亿 kWh），2030 年装机达到 3000MW（推广率 32.9%，年发电量 30 亿 kWh）。2016 年到 2020 年、2021 年到 2030 年均匀推进分布式光伏发电。考虑到分布式光伏发电存在屋顶产权纠纷等推广问题，将峰值目标情景下的推广率设置为强化减排情景和减排情景下推广率的 2 倍。强化减排情景和减排情景下 2020 年分布式光伏发电装机 300MW（推广率 3.3%，年发电量 3 亿 kWh），2030 年装机达到 1500MW（推广率 16.4%，年发电量 15 亿 kWh）

鼓励采用冷热电三联产。峰值目标情景下 2020 年冷热电三联产提供电力 2.3 亿 kWh（推广率达到 20%），2030 年提供电力 7.0 亿 kWh（推广率达到 60%）。冷热电三联产技术在峰值目标情景下的推广率设置为强化减排情景和减排情景下推广率的 2 倍。强化减排情景和减排情景下，2020 年冷热电三联产提供电力 1.2 亿 kWh（推广率达到 10%），2030 年提供电力 3.5 亿 kWh（推广率达到 30%）。

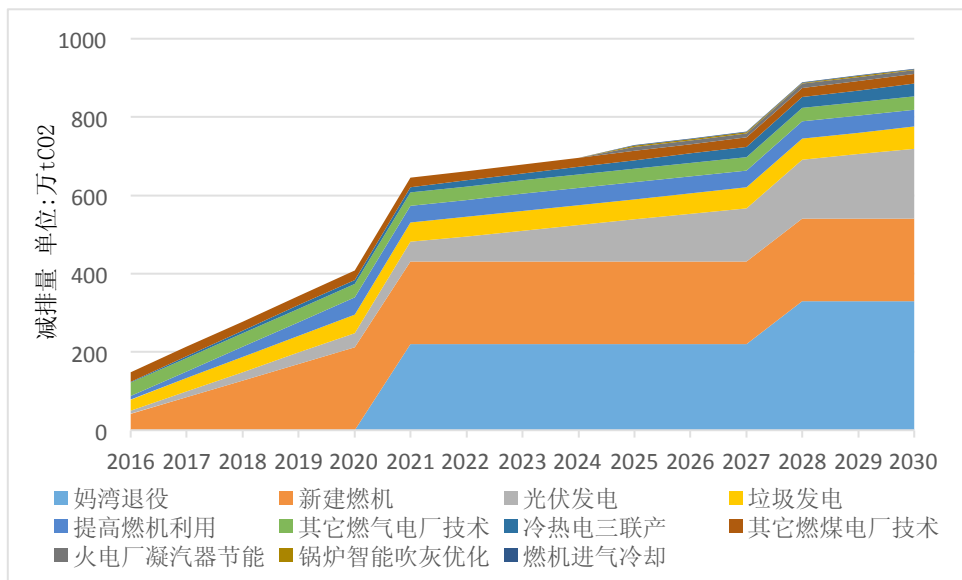


图 6-1 峰值目标情景下电力部门各类技术措施碳减排量比较

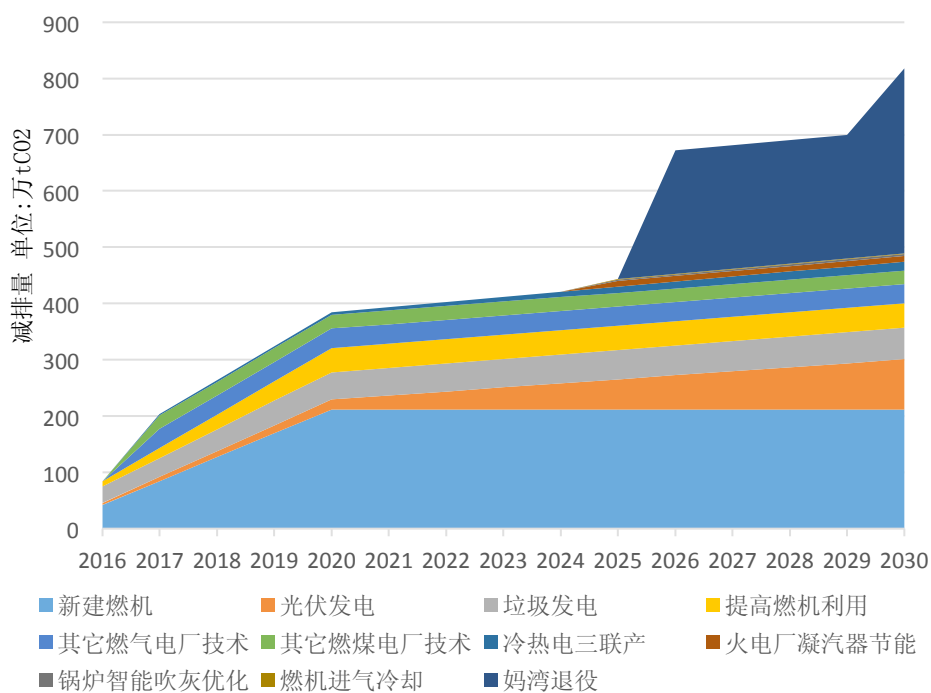


图 6-2 强化减排情景下电力部门各类技术措施碳排放量比较

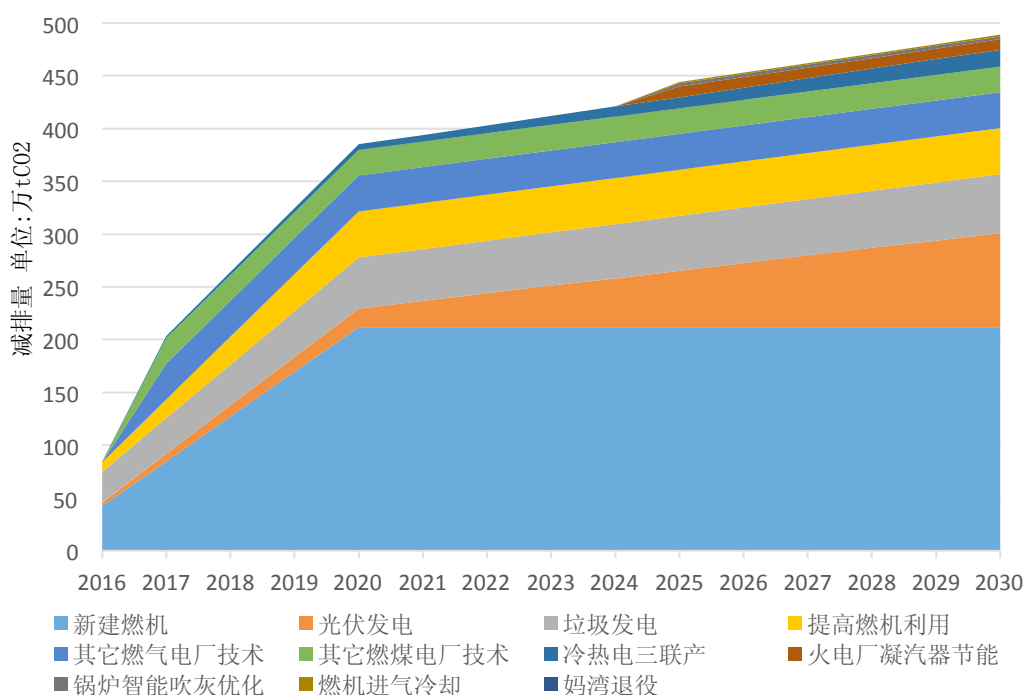


图 6-3 减排情景下电力部门各类技术措施碳减排量比较

6.2 制造业减排措施

峰值目标情景下深圳市制造业各类减排技术的减排量见图 6-4。2020 年制造业减排量为 747 万吨 CO₂，控制管理技术、温控设施技术、注塑机技术、通用机械技术这四类技术的减排量之和为 583 万吨 CO₂，占制造业总减排量的 78.0%。燃烧加热技术、专用技术、照明技术、锅炉技术的减排量之和为 161 万吨 CO₂，占制造业总减排量比例为 21.6%

表 6-1 所示的 20 项技术涵盖了制造业约 87%的减排潜力，是重点推广技术，表中提供了峰值目标情景下这些技术在 2016-2022 年间的推广率变动情况。其中，在 2020 年优先实施类技术的推广率为 37.7%，基本实施类技术的推广率为 33.7%，选择实施类技术的推广率为 27.8%，少量实施类技术的推广率为 23.8%。制造业重点推广的 20 项技术涵盖了七种技术类型，一是控制管理技术，减排量为 235 万吨 CO₂，占制造业总减排量的 31.4%。二是注塑机技术，减排量为 131 万吨 CO₂，占制造业总减排量的 17.5%。三是温控设施技术，减排量为 124 万吨 CO₂，占制造业总减排量的 16.6%。四是通用机械技术，减排量为 93 万吨 CO₂，占制造业总减排量的 12.4%。

（1）控制管理技术

控制管理技术是工业生产过程中常用的节能减排手段，一般以企业的过程能源管理、变频优化、提高功率因数降低线损、控制开机时间等手段为主。

控制管理技术中，“过程能耗管控系统技术”的减排量最大，强化减排情景和峰值目标情景下其 2020 年减排量分别为 95 和 104 万吨 CO₂，占有控制管理技减排量的 45.1%，占制造业总减排量的 14.2%。它是对企业电、水、气等能源过程参数实时测量，对能源、用能设备与用能过程进行实时监测、分析和管控，发现并消除无效能耗，鉴别并管控低能效行为，以实现用能效率的持续改善，节能率约为 10%~15%。

“动态谐波抑制及无功补偿综合节能技术”是提高功率因数降低线损的一项重要技术，强化减排情景和峰值目标情景下其 2020 年减排量分别为 54 和 57 万吨 CO₂，占有控制管理技减排量的 23.4%，占制造业总减排量的 7.3%。

“全功率匹配节能数控柔性联动技术”在强化减排情景和峰值目标情景下 2020 年的减排量分别为 33 和 37 万吨 CO₂，占有控制管理技减排量的 16.0%，占制造业总减排量的 5.0%。

（2）注塑机技术

注塑机，又名注射成型机或注射机。它是将热塑性塑料或热固性塑料利用塑料成型模具制成各种形状的塑料制品的主要成型设备。注塑机具有能一次成型外型复杂、尺寸精确或带有金属嵌件的质地密致的塑料制品的能力，被广泛应用于机电、汽车、建材、包装等众多制造业行业中。在样本企业中注塑机的耗电量占比较大，其减排潜力也相对较大。

“注塑机余热回收改造”是注塑机技术中减排潜力最大的一项技术，此技术将废热回收用于企业其他生产过程，如烘干原料等，能够节省 35%以上的电热部分。强化减排情景和峰值目标情景下此项技术在 2020 年的减排量分别为 31 和 33 万吨 CO₂，占注塑机技术类减排潜力的 25.9%，占制造业总减排量的 4.3%。

“注塑机安装炮筒热套”是一项改造成本低、改造操作简便的技术，通过减少热量损失来减少注塑机电耗，节电率约为 15%~35%。在深圳市制造业中，强化减排情景和峰值目标情景下减排量分别为 30 和 33 万吨 CO₂，占注塑机技术类减

排潜力的 25.6%，占制造业总减排量的 4.3%。

（3）温控技术

温控设施是在非生产环节，为建筑物通风换气、控制温度、提供热能、热水的全部设施，包括中央空调、通风扇、炉具、热水器等，这其中各类空调占有温控设施的绝大部分，为重点控制对象。它是深圳市制造业各个子行业及各个企业的主要耗能设施之一。

“制冷剂替换”是将原氟利昂制冷剂 R22 等用 HCR-22、R410a 等新型碳氢制冷剂替代，节电量约 15%~30%。目前市场上只有小部分空调机组更换了制冷剂，将此技术在未来全部推广的减排量较大，强化减排情景和峰值目标情景下分别为 33 和 36 万吨 CO₂，占温控技术类减排潜力的 27.4%，占制造业总减排量的 5.0%。

“中央空调智能控制技术”采用人工智能模糊控制方式代替传统的静态控制方式，实现动态控制，达到节能目的，节能量约 10%~30%。对深圳市制造业中央空调进行改造时，强化减排情景和峰值目标情景下减排量分别为 17 和 19 万吨 CO₂，占温控技术类减排潜力的 14.3%，占制造业总减排量的 2.6%。

“合理设置空调温度”是一项不需要技术改造、不需要进行投资就能实现节能的技术手段，空调在制冷时，设定温度高 2℃，就可节电 6-12%。强化减排情景和峰值目标情景下此项技术的减排量分别为 13 和 15 万吨 CO₂，占温控技术类减排潜力的 11.1%，占制造业总减排量的 2.0%。

（4）通用机械技术

通用机械技术是对泵、风机、空压机、电动机等通用机械产品进行节能减排技术改造。

“空压机余热回收”是指在没有能源消耗的前提下，利用一款新型高效的余热利用设备回收空压机废余热来把冷水加热的一种节能环保技术，主要用于解决员工的生活用热水、生活取暖、锅炉补水、清洗池加热、余热制冷和烘干产品等问题，为企业节省能源的消耗。强化减排情景和峰值目标情景下此项技术在 2020 年的减排量分别为 35 和 38 万吨 CO₂，占通用机械技术类减排潜力的 42.2%，占制造业总减排量的 5.2%。

“变频调速节能技术”对于风机、水泵、空压机、电动机等皆适用，节能率

30%左右，此项技术改造的减排量也较大，强化减排情景和峰值目标情景下分别为29和30万吨CO₂，占通用机械技术类减排潜力的31.8%，占制造业总减排量的3.9%。

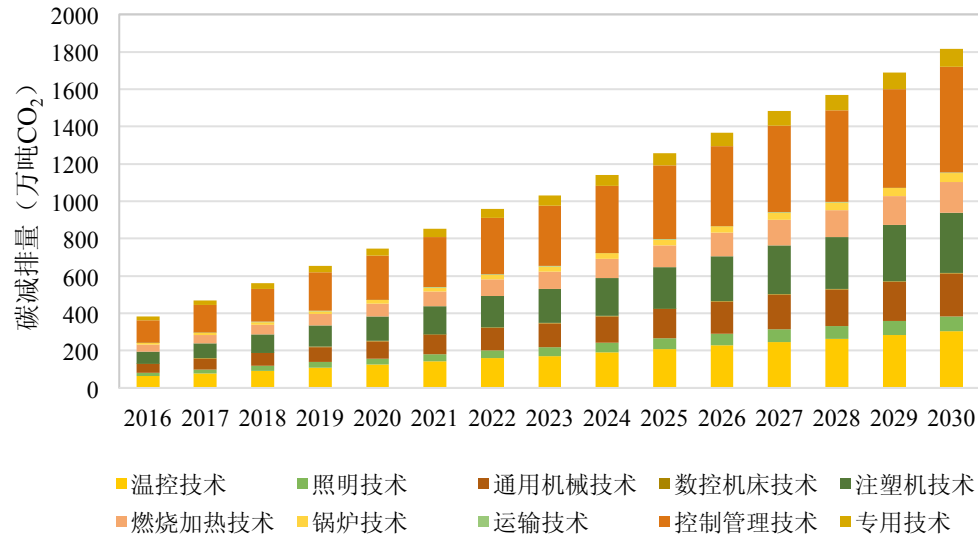


图 6-42016-2030 年制造业峰值目标情景较参考情景碳减排量

表 6-12016-2022 年深圳市制造业峰值目标情景主要节能减排技术推广率

技术类别	技术名称	2016	2020	2021	2022
控制管理技术	过程能耗管控系统技术	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
燃烧加热技术	高效电磁感应加热技术	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
控制管理技术	动态谐波抑制及无功补偿综合节能技术	16.3%	33.7%	38.6%	43.6%
通用机械技术	空压机余热回收	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
控制管理技术	全功率匹配节能数控柔性联动技术	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
温控技术	制冷剂替换	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
专用技术	塑料动态成型加工节能技术	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
通用机械技术	变频调速节能技术	16.3%	33.7%	38.6%	43.6%
注塑机	注塑机余热回收改造	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
注塑机	注塑机安装炮筒热套	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
注塑机	注塑机智能变频节能控制技术	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
注塑机	塑料注射成型伺服驱动与控制技术	12.2%	27.8%	32.5%	37.4%
控制管理技术	变频优化控制系统节能技术	16.3%	33.7%	38.6%	43.6%
温控技术	中央空调智能控制技术	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
注塑机	注塑机定量泵系统改为变量泵系统	16.3%	33.7%	38.6%	43.6%
锅炉	锅炉余热回收	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
温控技术	热泵技术	16.3%	33.7%	38.6%	43.6%

技术类别	技术名称	2016	2020	2021	2022
控制管理技术	高耗能设备（空调、空压机等）定时开、关等相关措施	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
温控技术	合理设置空调温度	18.4%	37.7%	43.1%	48.6%
通用机械技术	高效节能电动机用铸铜转子技术	12.2%	27.8%	32.5%	37.4%

6.3 交通部门减排措施

在峰值目标情景中，各类减排措施进一步的减排量如图 6-5 所示。货运结构调整与单位货运周转量能耗降低类措施的减排量在交通部门所有减排措施的碳减排量之和中所占的比例最大，至 2030 年，该类措施的减排量占交通部门总减排量的 40.3%。此外，政策类减排措施与替代燃料和新能源类减排措施均能产生较大的减排量。这两类措施的减排量占交通部门总减排量的 27.9%。

（1）货运结构调整与单位货运周转量能耗降低类减排措施

在道路货物运输方面，除推广货车减排技术以外，将货物运输方式由道路运输向水路运输调整，也将有效降低货物运输产生的碳排放。假设在峰值目标情景中，至 2020 年道路运输 30%的货运周转量将向水路运输调整，至 2030 年，道路运输 40%的货运周转量将向水路运输调整。在航空、水路方面，假设航空的单位周转量能耗从 2013 年的 $567.58 \text{ 吨标煤}/10^6 \cdot \text{吨公里}$ 逐渐下降到 2030 年的 $400.00 \text{ 吨标煤}/10^6 \cdot \text{吨公里}$ ，水路的单位周转量能耗从 2013 年的 $4.71 \text{ 吨标煤}/10^6 \cdot \text{吨公里}$ 逐渐下降到 2030 年的 $4.00 \text{ 吨标煤}/10^6 \cdot \text{吨公里}$ 。峰值目标情景下，2020 年货运结构调整与单位货运周转量能耗降低类减排措施的减排量为 200.80 万吨 CO_2 。

（2）基础设施建设类减排措施

峰值目标情景下，在 2020 年左右全市将形成 11 条完整地铁线路、450 公里的地铁网络；常规公交线路数量将增加到 900 条，线路总长度为 19350 公里，其中公交专用道 1000 公里；深圳市将建成 12 条 BRT 干线以及 7 条 BRT 快线，全长 677 公里，其中干线 459 公里，快线 218 公里；建成现代有轨电车线路 9 条，总长 150.5 公里。至 2030 年，深圳市轨道交通网络将由 20 条线组成，总长约 720 公里；常规公交线路数量将增至 920 条，线路总长度为 19800 公里，其中公交专用道 1200 车道公里。除了以上基础设施建设类减排措施之外，在峰值目标情景中，还将加入电动车分时租赁措施，并假设至 2020 年，全市将投入租赁用电动小汽车

1000-2000 辆，至 2030 年，全市将投入租赁用电动小汽车 2000-3000 辆。峰值目标情景下，2020 年基础设施建设类减排措施的减排量为 88.23 万吨 CO₂。

（3）替代燃料和新能源汽车类减排措施

在峰值目标情景中，电动出租车按每年 500 辆的增速增长，电动私家车按每年 20000 辆的增速增长，电动公交车按每年 1000 辆的增速增长，混合动力货车以及货车油改气技术均将按其最大推广潜力进行推广。峰值目标情景下，2020 年替代燃料和新能源汽车类减排措施的减排量为 101.63 万吨 CO₂。

（4）政策类减排措施

除了汽车尾号限行、鼓励“绿色出行”和自愿停驶、建设慢行网络这几项措施外，深圳市还将推行提高停车收费政策，进一步推广中心城区对外干道实施 HOT/HOV 收费措施。峰值目标情景下，2020 年政策类减排措施的减排量为 44.48 万吨 CO₂。

（5）汽车燃油经济性类减排措施

汽车燃油经济性类减排措施中只包含高效燃油货车一项技术。高效燃油货车是指通过改进发动机、重货轻量化、子午线轮胎、改善路况等多种手段提高货车的燃油利用率，可降低货车的燃油消耗约 16%。在峰值目标情景中，高效燃油货车将以其最大推广潜力进行推广。峰值目标情景下，2020 年汽车燃油经济性类减排措施的减排量为 34.32 万吨 CO₂。

（6）地铁减排措施

由于地铁减排措施的减排效益为正，且推广实施难度较低，因此在峰值目标情景中，地铁的所有减排技术从 2015 年起均能以其最大减排潜力进行推广，并且随着轨道交通的建设，这些措施将在新建的轨道交通中继续按 100%的比例推广。峰值目标情景下，2020 年地铁减排措施的减排量为 20.55 万吨 CO₂。

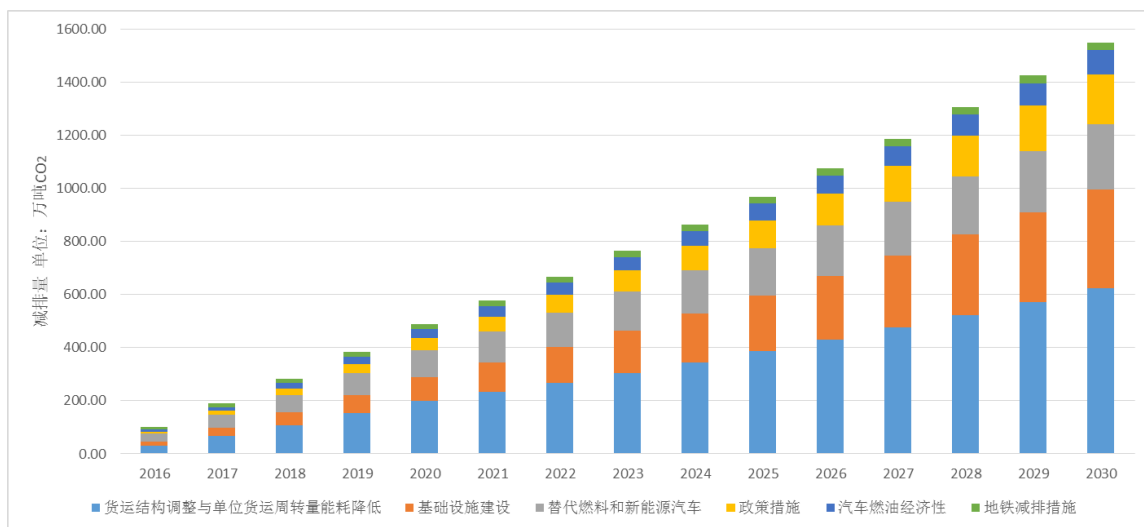


图 6-5 峰值目标情景下深圳市交通部门各措施碳减排量比较

6.4 建筑部门减排措施

建筑部门的技术措施主要包括四大类：既有公共建筑改造（23 项）、既有居住建筑改造（5 项）、新建低排放建筑（2 项）和大力推动执行能耗限额标准（4 项）四大类。峰值情景下，2020 年和 2030 年减排量分别为 237.5 万吨 CO₂、503.1 万吨 CO₂，四类技术措施的减排量见图 6-6。2020 年，各项技术减排量从大到小分别是新建低排放建筑(61.5%)、既有公共建筑改造(25.6%)、既有居住建筑改造(12.3%)和大力推动执行能耗限额标准（0.5%），减排量分别为 146.0 万吨 CO₂、60.9 万吨 CO₂、29.4 万吨 CO₂ 和 1.2 万吨 CO₂。2030 年，新建低排放建筑贡献减排量仍最多，约 318.9 万吨 CO₂，其次是既有公共建筑改造，减排量 99.9 万吨 CO₂，既有居住建筑改造和大力推动执行能耗限额标准减排量较少，分别为 82.6 万吨 CO₂、1.7 万吨 CO₂。

（1）新建低排放建筑

新建低排放建筑是减排量最大的减排手段，具体包括更高标准的建筑节能设计（公共建筑）和更高标准的建筑节能设计（居住建筑）两项措施。2022 年峰值情景下新建低排放建筑碳减排潜力约为 184.6 万吨 CO₂，占总减排潜力的 61.4%。其中，更高标准的建筑节能设计（公共建筑）的减排潜力最大，约 124.5 万吨 CO₂，更高标准的建筑节能设计（居住建筑）的减排潜力不足其一半，但就全部技术而

言，该项技术的减排作用十分重要。

（2）既有公共建筑改造

既有公共建筑改造是建筑部门重要的减排手段，具体包括空调风系统改造、空调水系统改造、空调系统智能控制改造、空调在线清洗、空调主机改造、冷却塔改造、燃气锅炉改造为空气源热泵、使用节能型电开水器、天然气炉灶等 23 项技术。2022 年峰值情景下既有公共建筑碳减排潜力约为 73.4 万吨 CO₂，占总减排潜力的 24.4%。在既有公共建筑改造中减排潜力最大的措施分别为照明系统改造和空调系统改造。高效照明系统 2022 年可减排 CO₂ 约 23.7 万吨。空调系统改造主要包括空调风系统改造、空调水系统改造、空调主机改造、空调系统智能系统改造、空调在线清洗、冷却塔改造等，到 2022 年可减排 CO₂ 约 20.4 万吨。

（3）既有居住建筑改造

既有居住建筑改造具有一定的减排效果，具体包括既有居住建筑太阳能热水系统（电）、既有居住建筑太阳能热水系统（气）、既有居住建筑外遮阳改造、高效空调系统和既有居住建筑外窗改造五项措施。2022 年峰值情景下既有居住建筑碳减排潜力约为 41.0 万吨 CO₂，占总减排潜力的 13.6%。在既有居住建筑改造中减排潜力最大的措施是既有居住建筑太阳能热水系统（电）和高效空调系统改造，减排潜力分别为 24.1 万吨 CO₂ 和 9.3 万吨 CO₂。

（4）大力推动执行能耗限额标准

大力推动执行能耗限额标准减排作用较小，具体包括节能行为科普、节能意识提升、能耗监测统计数据库和低碳示范项目建设这四项措施。2022 年峰值情景下大力推动执行能耗限额标准的减排潜力约为 1.4 万吨 CO₂，占总减排潜力的 0.5%。在大力推动执行能耗限额标准中减排潜力最大的措施是节能意识提升，到 2022 年可减排 CO₂ 约 0.9 万吨。

要使建筑部门为深圳市碳排放达到峰值作出更大的减排贡献，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。包括新建低排放建筑、既有公共建筑改造照明系统改造和空调系统改造、既有居住建筑改造既有居住建筑太阳能热水系统（电）和高效空调系统改造等。

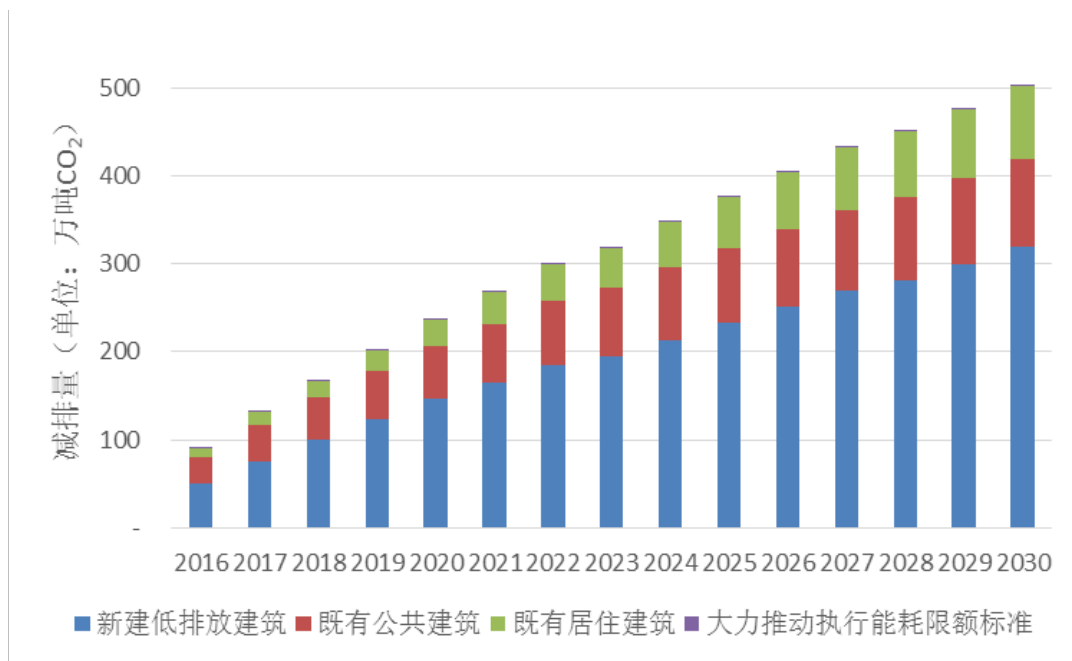


图 6-6 峰值目标情景下深圳市建筑部门各类技术措施碳减排量比较

7 各部门减排障碍及政策建议

深圳市政府已提出在 2022 年实现碳排放峰值。本研究显示，深圳市现有的节能减碳措施尚不足以实现上述目标。为早日达到碳排放峰值，深圳市政府需大力调整产业结构，推广具有重大减排潜力的节能技术。具体包括以下几点：

7.1 推进产业结构“退二进三”，优化制造业内部结构

产业结构、行业结构调整约占深圳市碳排放减缓量的 40%。建议到“十三五”期末将第三产业占 GDP 比重提升至 61%以上，到 2030 年提升到 67%以上，接近发达国家水平。同时，进一步淘汰制造业中高能耗、低增加值的行业，包括塑料制品业、橡胶制品业、纺织业、非金属矿物制品业、化学纤维制造业、化学原料及化学制品制造业等。

7.2 电力业关键减排措施的推行障碍及政策建议

7.2.1 电力业实现关键减排技术障碍

如之前分析，电力业实现关键减排技术主要是电力结构替代类措施。其中垃圾发电、新建燃气发电厂和提高现有燃机利用小时已经有政府的明确规划，所以不存在推广障碍。而妈湾电厂退役（燃煤电厂）、分布式光伏发电及冷热电三联产尚缺乏明确的政府规划。妈湾电厂退役的难度较大，障碍主要体现在两个方面，其一是深圳市 30%左右电力靠本地供给 70%左右电力靠外来电力调入，如果关闭妈湾电厂需要安排好外来电力的及时调入；其二妈湾电厂工作人员数量庞大（500 人以上），如果妈湾电厂退役，需要恰当解决好妈湾电厂工作人员的再就业问题。

分布式光伏发电推广中一方面面临发电成本过高，需要解决分布式光伏发电的融资问题；另外一方面由于分布式光伏发电安放在屋主楼顶，所以需要解决好房屋屋顶产权问题。冷热电三联产推广过程中面临障碍和分布式光伏发电类似，需要解决好融资问题和房屋产权问题。

7.2.2 电力业政策建议

电力结构替代类技术措施占深圳市电力业减排量的 80%以上，而燃煤电厂 9 项技术改进和燃气电厂 4 项技术改进措施占深圳市电力业减排量不到 20%，所以

电力替代类技术措施是电力业减排的关键。妈湾电厂退役是电力业在峰值目标情景下 2020 年实现碳排放峰值的重要部分，在实施过程中需要解决好之前提到的及时调入外来电力和妈湾电厂工作人员再就业问题。分布式光伏发电和冷热电三联产在峰值目标情景下 2020 年推广率仅仅达到了 6.6%和 20%，如果能够解决好融资问题和房屋产权问题，那么分布式光伏发电和冷热电三联产两项电力结构替代技术可能会有更大的减排空间。而垃圾发电、提高现有燃气利用小时和新建燃气发电已有政府规划，按规划稳步完成即可。而对于燃煤电厂技术改进和燃气电厂技术改进，主要是通过政府督促企业进行技术改进，从而完成减排。

7.3 制造业关键减排措施的推行障碍及政策建议

7.3.1 制造业部门推广关键减排技术的障碍

虽然各项节能减排技术在深圳制造业中有很大的应用空间，但在技术的推广过程中，仍可能面临各种各样的推行障碍。

（1）企业不积极更新技术

在节能减排技术的推广过程中，部分企业不积极更新技术。可能有三方面原因。一是企业所有者较多，不易就非主营业务问题达成一致；二是部分推广技术的回收期较长、年收益率偏低，不符合企业的短期盈利目标；三是企业管理者不愿意中止正常的生产经营活动，以进行相应节能减排设备的安装调试。

（2）缺乏强制性的推广政策

当前，政府虽已出台节能减排技术的推广目录，但这些目录多为推荐性质，缺乏强制性推广制度。即使有政策规定必须更新某些设备，也主要是淘汰产能落后、污染过大的老旧设备，而非推广新型节能减排设备，并且其覆盖面也不够广泛。

（3）缺乏充分的财政激励

由于部分节能减排项目初期投入较大，回收期偏长，导致企业缺乏相应的动力对其进行应用。同时，对于节能项目现有的财政补贴总量不够大、覆盖范围不够广，这不足以激励大量企业更新技术，大规模的市场也就难以形成。

（4）融资渠道不够充足

部分节能减排项目需要投入大量资金，深圳市的一些制造业企业较难独自负担设备所需投资。节能减排领域的总体资金需求量十分庞大，加之融资渠道不够充足，这导致企业融资成本较高。此外，这类项目可能对资金源的吸引力不够。在这样的情况下，即使企业想要应用新技术，也需面对来自外部的局限性，从而无法顺利地实施项目。

（5）新技术较为复杂，使用难度偏大

新设备可能存在一定的技术局限性，在进行技术改造后，原来的生产员工无法迅速掌握新设备的操作。对此，企业需要对员工进行一段时间的再培训，或者需要重新招募懂得新技术的员工，这样的行为将会在一定程度上影响企业正常的生产经营，从而也会影响到相应节能减排技术的推广。

7.3.2 制造业部门政策建议

为使深圳市制造业尽早达到碳排放峰值，需进一步加大以下各类技术的推广应用，包括控制管理类技术、注塑机类技术、温控类技术、燃烧加热类技术、通用机械类技术、专用类技术以及照明类技术等。尤其应重点推广以下 7 项具体技术，其产生的减排量约占制造业减排总量的一半，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、制冷剂替换等。由于制造业的行业和企业类型较多，因此在很大程度上需要政府出台相应的政策规范，引导和要求企业应用以上节能减排技术。

部分技术的初始投资额较高，对其进行改造将占用企业较多的流动资金，可能会在一定程度上影响其正常的生产经营。为保障推广上述技术，需出台优惠的财政补助政策、融资优惠政策，鼓励银行业等金融机构单列节能减排信贷方案，以此促进企业通过多种渠道、多种形式筹措资金。此外，为激励制造业企业更积极广泛地应用节能减排技术，政府可对实施相应技术改造的企业提供适当的政策优惠，如减免部分税收等。

同时，可考虑将更多的制造业企业纳入深圳市碳交易体系，完善对应的碳核

查和交易体系。一方面，如果企业不应用高效的节能减排技术，则可能需要从市场上购买相应的碳配额，其生产经营成本将会提高，降低成本将成为企业更新技术的动力；另一方面，企业能够交易节省出来的碳配额，提高通过应用以上节能减排技术带来的碳减排收益，这也是一种正向激励。

7.4 交通部门关键减排措施的推行障碍及政策建议

7.4.1 交通部门推行关键减排措施的障碍

本研究中所涉及的深圳市交通部门的关键减排措施，除轨道交通建设和汽车燃油经济性类措施已经按照计划逐步推进外，多数措施仍在推广和探索过程中，部分措施的推广率较低，在实际应用中还存在诸多障碍。

核心技术、高新技术和世界先进水平之间仍然存在一定的差距。在新能源汽车技术获得突破并成熟市场化之前，深圳市交通部门减排仍然需要依靠传统技术的改进。然而，深圳在汽车、航空和船舶等交通工具的发动机制造方面高新节能的技术创新不足，关键零部件生产仍需要依赖国外的生产制造企业。此外，深圳市新能源汽车的研究也进入了瓶颈，对有关技术的基础性研究不足，相对经验也较少。例如，电动汽车的电池从现有研发来看很难获得较大的突破，从而阻碍了电动汽车的推广。

新能源汽车，如电动汽车，生产技术和规模受限，导致生产成本较高。在目前的汽车市场中，燃油汽车的销售价格要明显低于同档位电动汽车的销售价格，这也成为了新能源汽车的推广的一大阻碍。虽然国家斥巨资补贴，并出台了相应的财政政策，但是电动汽车的高昂售价仍然令多数消费者难以承受。

基础配套设施亟待完善。例如，在推广新能源汽车时，相应的充电站、充电桩以及加气站的建设和服务未能配套跟上，严重影响了新能源汽车使用人群的出行半径，进而影响了新能源汽车整个产业的发展。

随着深圳市经济的发展和人口的增长，居民对交通的需求进一步增加，全市的旅客周转量和货运周转量呈逐年上升趋势。在此背景之下，既要保证深圳市居民的交通需求不受遏制，全市交通部门的整体发展不受影响，又要缓解深圳市交通部门的碳排放的增长趋势，降低整个部门的碳排放，这无疑是一个巨大的挑战。

7.4.2 交通部门政策建议

加强对核心技术、高新技术的研发支持。研究表明，水路运输、航空以及道路运输这三个部门的碳排放在深圳市交通部门总碳排放中占有较大的比重。因此，降低这三个部门的碳排放，是深圳市交通部门在未来进行碳减排的关键。为了降低这三个部门的碳排放，建议在货车、航空和船舶等交通工具的高新节能技术研发方面投入更多的资金，通过技术节能手段降低这三个部门的单耗。此外，还应该在深圳市大力发展和推广新能源交通工具，降低交通部门柴油、汽油的消耗比例，加大天然气和电力的能耗占比，优化整个部门的能源结构，从而达到碳减排的目的。

完善城市交通基础设施建设，推广电动车租赁政策。建议深圳市在公共交通网络中引入快速公交，以此鼓励居民选择公共交通方式出行。推广电动车分时租赁措施，通过投入一定数量的可租赁电动汽车，缓解居民的私家车购车需求。

实施相关政策措施引导居民出行方式改变。建议实施提高停车收费和汽车尾号限行，以此通过市场和行政手段调控交通需求。实施 HOV 或 HOT 车道，乘员数越多则收费费率越低甚至免费，可以更好地利用道路资源，缓解交通拥堵。鼓励“绿色出行”自愿停驶，如通过私家车自愿停驶可享商业车险期限顺延的优惠方案或自愿停驶天数折抵交通罚款等手段实施。建设慢行网络，推进城市步行和自行车交通系统建设，对于完善城市交通基础设施、优化交通出行结构、缓解交通拥挤有着重要意义。

大力推广新能源汽车，逐步替代、淘汰落后的高耗能车辆。采用给予新能源汽车生产、销售、购买的政策优惠和限制高排放车辆出行、对高排放车辆进行收费相结合的模式，引导和鼓励居民购买新能源汽车。此外，还应加大在新能源汽车相关制造技术和配套设施、服务方面的投资，改善新能源汽车的用户体验，降低新能源汽车的生产成本，从而推动整个新能源汽车行业的生产规模扩大，使全市新能源汽车的推广速度进一步提高。

加强子部门联合，实现结构性减排的集约效应。要做到这一点，就要打破公路、铁路、水路和航空这些子部门之间的信息障碍，着重实现不同子部门之间的运力协调。在货运方面，由高单耗的道路货运逐渐向低单耗的铁路运输和水路运

输转移；在客运方面，大力发展高速铁路和城际间快轨，转移航空客运需求量的急剧上涨，从而实现深圳市交通部门的整体优化和节能。

7.5 建筑部门关键减排措施的推行障碍及政策建议

7.5.1 建筑部门实现关键减排技术的障碍

本研究中部分建筑部门减排技术尚未得到广泛应用，例如，尽管当前各种空调节能技术日趋成熟，公共建筑普遍采用的仍是传统的中央空调。在实际应用中，建筑部门关键技术的推广还存在诸多障碍：

（1）技术投资成本高，缺乏有效激励

阻碍建筑节能减排技术应用的重要因素是成本。一些节能改造技术的应用，如围护结构改造，投资成本较高，涉及面广，工程方需要依据建筑物的具体情况，量身定做工程方案，这些都无形中加大了减排技术的投资成本，加大了推广的难度。目前，建筑节能技术的推行仍高度依赖财政政策的激励，由于缺乏有效的激励机制，开发商、消费者或住户仍处于被动状态，缺乏积极性，这也限制了深圳市绿色建筑的进一步发展。

（2）既有建筑设计存缺陷，改造难度大

过去的建筑设计对节能减排的重视程度不高。既有居住建筑大多在开发期没有考虑太阳能热水系统，作为后期添置设备零散安装，其外观、结构和管道上难以于旧建筑一体化（如可能会出现挤占卫生间通气管空间、楼顶排列混乱、坡屋顶安装困难等问题），因而在改造上存在技术上的难题，同时产权单位、物业管理单位、供热单位等机构的协调性问题也阻碍了既有居住建筑节能改造。

在建筑设计的过程中，出于安全性的考虑，设计人员往往采用较为保守的参数，这就导致一些设备处于部分负荷运行状态，满负荷运行的状态较为少见，实际的利用水平长时间低于设计的利用水平。建筑设计与实际需求的不匹配是建筑物资源浪费、能源的利用效率偏低的重要原因。既有公共建筑围护结构等改造又需要结合系统安全性、经济性和气候适用性。因而既有建筑改造比新建建筑复杂。

（3）忽视节能设备技术的日常运行和持续管理

建筑部门的多项减排关键技术，如既有公共建筑的空调系统改造、电梯系统

改造等，为了保障实际运行的效果，都需要配备专业人员进行精细化管理，而更有部分减排措施需要持续维护才能发挥更好的效果，如空调系统机组需要及时清理机组过滤器灰尘，以免加大阻力，增加能耗，太阳能光伏板需要定期清洗维护，防止光伏板老化和积尘，降低运行与减排效果。

（4）缺乏完善的节能评价体系

当前的节能评价体系仍存在缺陷。节能补贴政策普遍依据建筑设计建造初期采用的节能措施数量进行相应的评价，这种方式过于粗糙，不能真实地反映情况。科学的做法是衡量节能技术措施在建筑使用寿命中的实际能耗情况，以此来衡量节能措施的实际节能效果。

7.5.2 建筑部门政策建议

（1）完善建筑节能技术标准，合理引导标准的执行

与既有居住建筑和公共建筑相比，新建建筑的减排潜力更大，采用技术手段的减排效果更为明显。标准化是新建建筑节能减排的关键，更高的建筑节能设计标准为节能举措与建筑有机结合提供良好的技术基础和保障。对于更高标准的建筑节能设计的应用依赖于科学的引导和必要的监管。《公共建筑节能设计标准》GB50189-2015 已于 2015 年 2 月批准发布，自 2015 年 10 月 1 日起实施，《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》JGJ75-2012 已于 2013 年 4 月 1 日开始实施。结合前几部标准实施的经验，大城市执行标准快，中小城市慢，北方快，南方慢，然而施工过程中由于缺乏明确验收和节能监测标准而基本处于无人监管状态，在监管环节仍然存在违反强制性标准成本低、疏漏面大等问题。对于新建公共建筑而言，深圳市政府应进一步完善建筑节能技术标准，规定科学合理的节能审查、监督等工作程序，定期对新建建筑进行建筑节能达标审查。

（2）制定补助优惠政策，明确各方积极配合

当前既有建筑的改造较为零散，要想形成一致的自发节能改造，还需依靠政府出台相关政策。如比利时政府对太阳能相关工业实施财政援助，并减免税收。韩国给予批准的可再生能源企业提供专项拨款于低息贷款。北京市出台了《北京市太阳能热水系统城镇建筑应用管理办法》鼓励具备条件的既有建筑通过改造安

装使用太阳能热水系统，并鼓励使用合同能源管理形式，明确了既有建筑安装太阳能热水系统的费用由产权人负担，并给予资金补助政策。国家《夏热冬冷地区既有居住建筑节能改造补助资金管理暂行办法》对建筑外门窗节能改造支出、建筑外遮阳系统节能改造支出、建筑屋顶及外墙保温节能改造支出等给予补助资金，地区补助基准按东部、中部、西部地区划分：东部地区 15 元/m²，中部地区 20 元/m²，西部地区 25 元/m²。深圳市政府应鼓励既有居住建筑和既有公共建筑的节能改造，制定相关补助优惠政策，在相关建设法规中，明确要求建筑方、物业管理方、供热单位、办公单位等多个环节积极配合。

（3）加快既有建筑节能改造，科学制定配套政策

在推动新建绿色建筑的同时，不能忽视深圳市大规模的既有建筑。既有建筑节能改造是建筑部门节能减排的重点。由于原始设计的缺陷和技术困难，既有建筑的改造工作需要得到重视和推进。加快既有建筑节能改造，制定与之相配套的政策是决定性因素，这些政策需要回答是否进行节能改造、改造资金如何解决、何时开始实施改造、各利益团体的权利和义务等关键问题。以既有建筑节能改造为契机，推动建筑部门能源结构调整。

（4）加强建筑减排改造技术研究，完善持续评测机制

减排技术的进步，有利于在更大程度上改善建筑部门的能源结构。政府应对减排潜力较大的技术给予政策支持，鼓励绿色建筑关键技术的研究，结合技术的风险与潜力给与经济支持，对于已经开发出的减排的技术，应加快推广和应用进程。在重视前期研发和技术推广的同时，该技术的持续评测也不容忽视。现行的节能减排技术评价体系往往重视数量，忽视质量。科学合理的持续评测机制意味着以实际的节能效果为评价依据，从而实现技术措施减排效果评价的客观性和真实性。

参考文献

- Ahanchian, M. and J. B. M. Biona (2014). "Energy demand, emissions forecasts and mitigation strategies modeled over a medium-range horizon: The case of the land transportation sector in Metro Manila." *Energy Policy* **66**: 615-629.
- Akashi, O. and Y. Hijioka, et al. (2012). "GHG emission scenarios in Asia and the world: The key technologies for significant reduction." *Energy Economics* **34**: S346-S358.
- Anandarajah, G. and A. Gambhir (2014). "India's CO₂ emission pathways to 2050: What role can renewables play?" *Applied Energy* **131**: 79-86.
- Ashina, S. and J. Fujino, et al. (2012). "A roadmap towards a low-carbon society in Japan using backcasting methodology: Feasible pathways for achieving an 80% reduction in CO₂ emissions by 2050." *Energy Policy* **41**: 584-598.
- Banister, D. and R. Hickman (2013). "Transport futures: Thinking the unthinkable." *Transport Policy* **29**: 283-293.
- Blanford, G. J. and R. G. Richels, et al. (2008). Revised Emissions Growth Projections for China: Why PostKyoto Climate Policy Must Look East. Palo Alto, California, USA, Electric Power Research Institute.
- Blesl, M. and T. Kober, et al. (2010). "Effects of climate and energy policy related measures and targets on the future structure of the European energy system in 2020 and beyond." *Energy Policy* **38** (10): 6278-6292.
- Butnar, I. and M. Llop (2011). "Structural decomposition analysis and input – output subsystems: Changes in CO₂ emissions of Spanish service sectors (2000 – 2005)." *Ecological Economics* **70** (11): 2012-2019.
- Cao, S. and C. Li (2011). "The exploration of concepts and methods for Low-Carbon Eco-City Planning." *Procedia Environmental Sciences* **5**: 199-207.
- Cellura, M. and S. Longo, et al. (2012). "Application of the Structural Decomposition Analysis to assess the indirect energy consumption and air emission changes related to Italian households consumption." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16** (2): 1135-1145.
- Chen, W. (2005). "The costs of mitigating carbon emissions in China: findings from China MARKAL-MACRO modeling." *Energy Policy* **33** (7): 885-896.
- Chiodi, A. and M. Gargiulo, et al. (2013). "Modelling the impacts of challenging 2050 European climate mitigation targets on Ireland's energy system." *Energy Policy* **53**: 169-189.
- Chitnis, M. and A. Druckman, et al. (2012). "Forecasting scenarios for UK household expenditure and associated GHG emissions: Outlook to 2030." *Ecological Economics* **84**: 129-141.
- Chunmei, L. and D. Maosheng, et al. (2011). "Research on Causality Relationship of Low-Carbon Development and Industrial Structure." *Procedia Environmental Sciences* **11**: 953-959.
- Ciscar, J. and B. Saveyn, et al. (2013). "A comparability analysis of global burden sharing GHG reduction scenarios." *Energy Policy* **55**: 73-81.
- Colenbrander, S. and A. Gouldson, et al. (2015). "The economic case for low-carbon development in rapidly growing developing world cities: A case study of Palembang, Indonesia." *Energy Policy* **80**:

24-35.

- Dong, L. and T. Fujita, et al. (2013). "Promoting low-carbon city through industrial symbiosis: A case in China by applying HPIMO model." *Energy Policy* **61**: 864-873.
- Farrahi Moghaddam, R. and F. Farrahi Moghaddam, et al. (2013). "A modified GHG intensity indicator: Toward a sustainable global economy based on a carbon border tax and emissions trading." *Energy Policy* **57**: 363-380.
- Feliciano, M. and D. C. Prosperi (2011). "Planning for low carbon cities: Reflection on the case of Broward County, Florida, USA." *Cities* **28** (6): 505-516.
- Feng, Y. Y. and L. X. Zhang (2012). "Scenario analysis of urban energy saving and carbon abatement policies: A case study of Beijing city, China." *Procedia Environmental Sciences* **13**: 632-644.
- Gambhir, A. and T. A. Napp, et al. (2014). "India's CO₂ emissions pathways to 2050: Energy system, economic and fossil fuel impacts with and without carbon permit trading." *Energy* **77**: 791-801.
- Gomi, K. and Y. Ochi, et al. (2011). "A systematic quantitative backcasting on low-carbon society policy in case of Kyoto city." *Technological Forecasting and Social Change* **78** (5): 852-871.
- Hammond, G. P. and J. B. Norman (2012). "Decomposition analysis of energy-related carbon emissions from UK manufacturing." *Energy* **41** (1): 220-227.
- Häyhä, T. and P. P. Franzese, et al. (2011). "Economic and environmental performance of electricity production in Finland: A multicriteria assessment framework." *Ecological Modelling* **223** (1): 81-90.
- He, J. (2014). "An analysis of China's CO₂ emission peaking target and pathways." *Advances in Climate Change Research* **5** (4): 155-161.
- Hermeling, C. and A. Löschel, et al. (2013). "A new robustness analysis for climate policy evaluations: A CGE application for the EU 2020 targets." *Energy Policy* **55**: 27-35.
- Ho, C. S. and Y. Matsuoka, et al. (2013). "Low carbon urban development strategy in Malaysia – The case of Iskandar Malaysia development corridor." *Habitat International* **37**: 43-51.
- Hübler, M. and A. Löschel (2013). "The EU Decarbonisation Roadmap 2050—What way to walk?" *Energy Policy* **55**: 190-207.
- Irani, A. and A. Chalak (2015). "Harnessing motorists' potential demand for hybrid-electric vehicles in Lebanon: Policy options, CO₂ emissions reduction and welfare gains." *Transport Policy* **42**: 144-155.
- Jiang, B. and C. Wenying, et al. (2008). "The future of natural gas consumption in Beijing, Guangdong and Shanghai: An assessment utilizing MARKAL." *Energy Policy* **36** (9): 3286-3299.
- Jiao, J. and Y. Qi, et al. (2013). "China's targets for reducing the intensity of CO₂ emissions by 2020." *Energy Strategy Reviews* **2** (2): 176-181.
- Kawase, R. and Y. Matsuoka (2013). "Reduction targets under three burden-sharing schemes for 50% global GHG reduction toward 2050." *Energy Policy* **63**: 1126-1138.
- Ko, A. and C. Myung, et al. (2014). "Scenario-based CO₂ emissions reduction potential and energy use in Republic of Korea's passenger vehicle fleet." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **59**: 346-356.
- Kypreos, S. (2007). "A MERGE model with endogenous technological change and the cost of carbon stabilization." *Energy Policy* **35** (11): 5327-5336.
- Lehmann, S. (2013). "Low-to-no carbon city: Lessons from western urban projects for the rapid transformation of Shanghai." *Habitat International* **37**: 61-69.

- Liang, M. and Y. Wang, et al. (2014). "China's Low-carbon-city Development with ETS: Forecast on the Energy Consumption and Carbon Emission of Chongqing." *Energy Procedia* **61**: 2596-2599.
- Lim, H. and S. Yoo, et al. (2009). "Industrial CO₂ emissions from energy use in Korea: A structural decomposition analysis." *Energy Policy* **37** (2): 686-698.
- Lin, J. and J. Jacoby, et al. (2014). "A model for developing a target integrated low carbon city indicator system: The case of Xiamen, China." *Ecological Indicators* **40**: 51-57.
- Liu, G. and Z. Yang, et al. (2012). "A dynamic low-carbon scenario analysis in case of Chongqing city." *Procedia Environmental Sciences* **13**: 1189-1203.
- Liu, L. and H. Zong, et al. (2014). "Can China realize its carbon emission reduction goal in 2020: From the perspective of thermal power development." *Applied Energy* **124**: 199-212.
- Martin, N. P. D. and J. D. K. Bishop, et al. (2015). "Can UK passenger vehicles be designed to meet 2020 emissions targets? A novel methodology to forecast fuel consumption with uncertainty analysis." *Applied Energy* **157**: 929-939.
- Mohareb, E. A. and C. A. Kennedy (2014). "Scenarios of technology adoption towards low-carbon cities." *Energy Policy* **66**: 685-693.
- Mohareb, E. and C. Kennedy (2012). "Greenhouse Gas Emission Scenario Modeling for Cities Using the PURGE Model A Case Study of the Greater Toronto Area." *JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY* **16** (6SI): 875-888.
- Pao, H. and C. Tsai (2011). "Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil." *Energy* **36** (5): 2450-2458.
- Pérez-Suárez, R. and A. J. López-Menéndez (2015). "Growing green? Forecasting CO₂ emissions with Environmental Kuznets Curves and Logistic Growth Models." *Environmental Science & Policy* **54**: 428-437.
- Phdungsilp, A. (2010). "Integrated energy and carbon modeling with a decision support system: Policy scenarios for low-carbon city development in Bangkok." *Energy Policy* **38** (9): 4808-4817.
- Pongthanaissawan, J. and C. Sorapipatana (2013). "Greenhouse gas emissions from Thailand's transport sector: Trends and mitigation options." *Applied Energy* **101**: 288-298.
- Pukšec, T. and B. V. Mathiesen, et al. (2014). "Assessing the impact of energy saving measures on the future energy demand and related GHG (greenhouse gas) emission reduction of Croatia." *Energy* **76**: 198-209.
- Rafaj, P. and S. Kypreos (2007). "Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model." *Energy Policy* **35** (2): 828-843.
- Ren, L. and W. Wang, et al. (2015). "Analysis of energy consumption and carbon emission during the urbanization of Shandong Province, China." *Journal of Cleaner Production* **103**: 534-541.
- Robalino-López, A. and A. Mena-Nieto, et al. (2014). "System dynamics modeling for renewable energy and CO₂ emissions: A case study of Ecuador." *Energy for Sustainable Development* **20**: 11-20.
- Roy, P. and K. Tokuyasu, et al. (2012). "A techno-economic and environmental evaluation of the life cycle of bioethanol produced from rice straw by RT-CaCCO process." *Biomass and Bioenergy* **37**: 188-195.
- Selvakumaran, S. and B. Limmeechokchai, et al. (2014). "Low carbon society scenario 2050 in Thai industrial sector." *Energy Conversion and Management* **85**: 663-674.

- Selvakkumaran, S. and B. Limmeechokchai, et al. (2014). "Low carbon society scenario 2050 in Thai industrial sector." *Energy Conversion and Management* **85**: 663-674.
- Shigeto, S. and Y. Yamagata, et al. (2012). "An easily traceable scenario for 80% CO₂ emission reduction in Japan through the final consumption-based CO₂ emission approach: A case study of Kyoto-city." *Applied Energy* **90** (1): 201-205.
- Shigeto, S. and Y. Yamagata, et al. (2012). "An easily traceable scenario for 80% CO₂ emission reduction in Japan through the final consumption-based CO₂ emission approach: A case study of Kyoto-city." *Applied Energy* **90** (1): 201-205.
- Simoes, S. and P. Fortes, et al. (2015). "Assessing effects of exogenous assumptions in GHG emissions forecasts - a 2020 scenario study for Portugal using the Times energy technology model." *Technological Forecasting and Social Change* **94**: 221-235.
- Stamford, L. and A. Azapagic (2014). "Life cycle sustainability assessment of UK electricity scenarios to 2070." *Energy for Sustainable Development* **23**: 194-211.
- Su, X. and W. Zhou, et al. (2014). "Possible pathways for dealing with Japan's post-Fukushima challenge and achieving CO₂ emission reduction targets in 2030." *Energy* **66**: 90-97.
- Tan, X. and L. Dong, et al. (2015). "China's regional CO₂ emissions reduction potential: A study of Chongqing city." *Applied Energy*.
- Tao, Z. (2011). "Strategy of City Development in Low-Carbon Economic Mode-A Case Study on Qingdao." *Energy Procedia* **5**: 926-932.
- Thepkhun, P. and B. Limmeechokchai, et al. (2013). "Thailand's Low-Carbon Scenario 2050: The AIM/CGE analyses of CO₂ mitigation measures." *Energy Policy* **62**: 561-572.
- Tian, X. and M. Chang, et al. (2013). "Structural decomposition analysis of the carbonization process in Beijing: A regional explanation of rapid increasing carbon dioxide emission in China." *Energy Policy* **53**: 279-286.
- Tigas, K. and G. Giannakidis, et al. (2015). "Wide scale penetration of renewable electricity in the Greek energy system in view of the European decarbonization targets for 2050." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **42**: 158-169.
- Tirumalachetty, S. and K. M. Kockelman, et al. (2013). "Forecasting greenhouse gas emissions from urban regions: microsimulation of land use and transport patterns in Austin, Texas." *Journal of Transport Geography* **33**: 220-229.
- Tsai, M. and S. Chang (2015). "Taiwan's 2050 low carbon development roadmap: An evaluation with the MARKAL model." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **49**: 178-191.
- Vaillancourt, K. and Y. Alcocer, et al. (2014). "A Canadian 2050 energy outlook: Analysis with the multi-regional model TIMES-Canada." *Applied Energy* **132**: 56-65.
- Vera, S. and E. Sauma (2015). "Does a carbon tax make sense in countries with still a high potential for energy efficiency? Comparison between the reducing-emissions effects of carbon tax and energy efficiency measures in the Chilean case." *Energy* **88**: 478-488.
- Wang, Z. and J. Zhang, et al. (2014). "Estimate of China's energy carbon emissions peak and analysis on electric power carbon emissions." *Advances in Climate Change Research* **5** (4): 181-188.
- Whiteman, G. and D. R. de Vos, et al. (2011). "Business strategies and the transition to low-carbon cities." *Business Strategy and the Environment* **20** (4): 251-265.

- Wood, R. (2009). "Structural decomposition analysis of Australia's greenhouse gas emissions." *Energy Policy* **37** (11): 4943-4948.
- Wright, E. L. and J. A. B. Belt, et al. (2010). "A scenario analysis of investment options for the Cuban power sector using the MARKAL model." *Energy Policy* **38** (7): 3342-3355.
- Wu, L. and S. Liu, et al. (2015). "Modelling and forecasting CO₂ emissions in the BRICS (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) countries using a novel multi-variable grey model." *Energy* **79**: 489-495.
- Yang, G. and L. Mingguang (2011). "Analysis on the degree of the industrial structure's impact on the energy consumption--Based on empirical study of Guangdong Province." *Energy Procedia* **5**: 1488-1496.
- Yanine, F. F. and F. I. Caballero, et al. (2014). "Building sustainable energy systems: Homeostatic control of grid-connected microgrids, as a means to reconcile power supply and energy demand response management." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **40**: 1168-1191.
- Yao, D. and J. Luo, et al. (2013). "Research on Low-Carbon City Construction and Development Strategy —A Case Study of Shenzhen." *Low Carbon Economy* **04** (02): 63-70.
- Yu, L. (2014). "Low carbon eco-city: New approach for Chinese urbanisation." *Habitat International* **44**: 102-110.
- Yu, L. (2014). "Low carbon eco-city: New approach for Chinese urbanisation." *Habitat International* **44**: 102-110.
- Yuan, J. and Y. Xu, et al. (2014). "Peak energy consumption and CO₂ emissions in China." *Energy Policy* **68**: 508-523.
- Zhang, L. and Y. Feng, et al. (2011). "Alternative Scenarios for the Development of a Low-Carbon City: A Case Study of Beijing, China." *Energies* **4** (12): 2295-2310.
- Zhao, X. and D. Du (2015). "Forecasting carbon dioxide emissions." *Journal of Environmental Management* **160**: 39-44.
- Zhou, N. and D. Fridley, et al. (2013). "China's energy and emissions outlook to 2050: Perspectives from bottom-up energy end-use model." *Energy Policy* **53**: 51-62.
- 柴麒敏与徐华清 (2015). "基于IAMC模型的中国碳排放峰值目标实现路径研究." *中国人口·资源与环境* **25** (6): 37-46.
- 常征 (2012). 基于能源利用的碳脉分析, 复旦大学. 博士: 247.
- 陈诗一与吴若沉 (2011). "经济转型中的结构调整、能源强度降低与二氧化碳减排:全国及上海的比较分析." *上海经济研究*(04): 10-23.
- 程玲 (2012). 基于低碳目标的城市客运交通结构优化研究, 华中科技大学. 硕士: 78.
- 贺红兵 (2012). "我国碳排放影响因素分析_贺红兵."
- 姜克隽与胡秀莲等 (2009). "中国2050年低碳情景和低碳发展之路." *中外能源*(06): 1-7.
- 柯水发与王亚等 (2015). "北京市交通运输业碳排放及减排情景分析." *中国人口·资源与环境*(06): 81-88.
- 林玲与张艾莉等 (2013). "北京制造业结构节能减排潜力分析." *数据*(12): 92-95.
- 刘红光与刘卫东等 (2010). "中国区域产业结构调整的CO₂减排效果分析——基于区域间投入产出表的分析." *地域研究与开发*(03): 129-135.
- 潘仁飞与陈柳钦 (2011). "能源结构变化与中国碳减排目标实现." *发展研究*.

- 任纪佼与高丽洁等 (2015). "天津市交通碳排放结构分析与低碳交通发展探讨." 环境污染与防治 (08): 96-99.
- 苏城元 (2012). 基于低碳发展模式的城市交通结构优化研究, 上海交通大学. 硕士: 80.
- 王迪与聂锐 (2012). "中国制造业碳排放的演变特征与影响因素分析." 干旱区资源与环境(09): 132-136.
- 向其凤与王文举 (2014). "中国能源结构调整及其节能减排潜力评估." 经济与管理研究(07): 13-22.
- 徐盈之与徐康宁等 (2011). "中国制造业碳排放的驱动因素及脱钩效应." 统计研究28 (7): 55-61.
- 周伟与米红 (2010). "中国能源消费排放的CO₂测算." 中国环境科学(08): 1142-1148.
- 朱永彬与刘昌新等 (2013). "我国产业结构演变趋势及其减排潜力分析." 中国软科学(02): 35-42.

附录 1 部门划分说明

在我国现行的能源统计体系中，交通部门、建筑部门的划分方法与国际通行的划分方法不同，无法充分反映能源消费和碳排放特性，也不便于制定针对措施。因此，本研究基于深圳现有的分行业能源统计数据，结合分行业调研数据，采用王庆一（2006）⁶⁴、王克和邹骥（2014）⁶⁵以及秦贝贝（2014）⁶⁶的研究成果，对交通部门、建筑部门的分类做了调整。交通部门采用“大交通”的概念，包括所有的交通运输工具，即从事运营的交通工具、非营运的企事业单位和私人所拥有的交通工具。建筑部门采用国际上通行的建筑能耗和碳排放概念，即建筑运行能耗，不包括建筑建造过程的能耗和排放。建筑运行能耗及碳排放是指炊事、照明、空调、采暖、电器使用和其他各类建筑内用能设备在运行使用过程中发生的能耗和碳排放。国际上通常将建筑部门分为居住建筑及公共建筑两类，本研究采用这一分类方法。

⁶⁴王庆一, 2006. 按照国际准则计算的中国终端用能和能源效率[J]. 中国能源, 28(12): 5-9.

⁶⁵王克和邹骥, 2014. 中国城市温室气体清单编制指南[M]. 北京: 中国环境出版社.

⁶⁶秦贝贝, 2014. 中国建筑能耗计算方法研究[D]. 重庆: 重庆大学.

附录 2 情景分析碳减排技术措施清单

部门	技术措施分类	技术措施名称
电力业	燃煤电厂技术	锅炉智能吹灰优化与在线结焦预警系统技术，天然气点火替代燃油点火，锅炉空预器技术改造，汽轮机汽封改造，火电厂凝汽器真空保持节能系统技术，汽轮机通流部分现代化改造，机组增容改铭牌，高压变频调速技术，高效机能更换，共 9 项。
	燃气电厂技术	余热锅炉尾部增加受热面，纯凝汽轮机组改造实现热电联产技术，燃机转子冷却空气废热利用，燃机进气冷却，共 4 项。
	电力结构替代	新建燃气发电，分布式光伏发电，提高现有燃气发电利用小时数，垃圾发电，妈湾电厂退役，冷热电三联产技术，共 6 项。
制造业*	控制管理技术	变频优化控制系统节能技术，全功率匹配节能数控柔性联动技术，过程能耗管控系统技术，高耗能设备定时开、关等相关措施，动态谐波抑制及无功补偿综合节能技术，共 5 项。
	注塑机技术	塑料注射成型伺服驱动与控制技术，注塑机智能变频节能控制技术，注塑机定量泵系统改为变量泵系统，注塑机安装炮筒热套，注塑机余热回收改造，共 5 项。
	温控技术	制冷剂替换，合理设置空调温度，中央空调余热回收，大温差技术，中央空调主机变频技术，电子膨胀阀变频节能技术，中央空调风机、水泵、风柜加变频器，磁悬浮变频离心式中央空调机组技术，中央空调智能控制技术，双级高效永磁同步变频离心式冷水机技术，中央空调全自动清洗节能系统技术，基于低压高频电解原理的循环水系统防垢提效节能技术，中央空调水处理防腐阻垢节能技术，电热水器改为太阳能热水系统，将燃油锅炉供热水改为太阳能热水系统，热泵技术，热泵的双级增焓提效技术，共 17 项。
	通用机械技术	变频调速节能技术，永磁涡流柔性传动节能技术，水泵风机目标电耗节能控制技术，高效节能电动机用铸铜转子技术，稀土永磁盘式无铁芯电机节能技术，同步电机微机全控励磁技术，空压机余热回收，活塞空压机改为螺杆空压机，两级喷油高效螺杆空气压缩机节能技术，共 9 项。
	燃烧加热技术	高效电磁感应加热技术，聚能燃烧技术，高红外发射率多孔陶瓷节能燃烧器技术，共 3 项。
	专用技术	低耗能洁净厂房技术，塑料动态成型加工节能技术，高效节能型锥形同向双螺杆挤出技术，铅蓄电池高效低能耗极板制造技术，高效放电回馈式电池化成技术，共 5 项。

部门	技术措施分类	技术措施名称
	照明技术	高强度气体放电灯用大功率电子镇流器新技术，基于感应耦合的无极荧光照明技术，普通日光灯改为 LED 节能灯，T5 灯改为 LED 灯，加装红外线感应开关，照明用高效智能节电控制器，使用纳米聚光板或纳米聚光板替换普通聚光板，户外 LED 照明灯，共 8 项。
	锅炉技术	锅炉“油改气”，锅炉余热回收，共 2 项。
	数控机床技术	数控机床的有源功率补偿技术，共 1 项。
	运输技术	发动机冷却系统优化节能技术，共 1 项。
交通部门	基础设施建设	快速公交发展，常规公交发展，电动车分时租赁（计入间接排放），电动车分时租赁（不计入间接排放），共 4 项。
	替代燃料和新能源汽车	电动出租车替代燃油出租车（计入间接排放），电动出租车替代燃油出租车（不计入间接排放），电动公交车替代燃油公交车（计入间接排放），电动公交车替代燃油公交车（不计入间接排放），电动私家车替代燃油私家车（计入间接排放），电动私家车替代燃油私家车（不计入间接排放），混合动力公交车替代燃油公交车，混合动力货车替代燃油货车，货车油改气，共 9 项。
	汽车燃油经济性	高效燃油货车，共 1 项。
	地铁技术措施	轨道交通发展（计入间接排放），轨道交通发展（不计入间接排放），共 2 项。
	交通政策措施	提高停车收费，道路拥堵收费，汽车尾号限行，中心城区对外干道实施 HOT 收费，鼓励“绿色出行”和自愿停驶，中心城区内推广“机动车低排放区”，建设慢行网络，引导出行方式转变，共 7 项。
建筑部门	既有公共建筑改造	空调风系统改造，空调水系统改造，空调系统控制，空调在线清洗，空调主机改造，冷却塔改造，燃气锅炉改造为空气源热泵，使用节能型电开水器，天然气炉灶，太阳能热水系统(电热水器)，太阳能热水系统(燃气热水器)，螺杆机热回收，高效照明系统，电梯能源回收，电梯群控措施，自动感应扶梯，遮阳改造-玻璃贴膜，外遮阳改造，外窗改造，屋顶绿化，垂直绿化，使用节能型变压器，共 22 项。
	既有居住建筑改造	太阳能热水系统(电热水器)，太阳能热水系统(燃气热水器)，外遮阳改造，高效空调系统，外窗改造，共 5 项。
	新建低排放建筑	更高标准的建筑节能设计（公共建筑），更高标准的建筑节能设计（居住建筑），共 2 项。
	大力推动执行能耗限额标准	节能行为科普，特定目的的节能培训，能耗监测统计数据库，示范基地建设，共 4 项。

*制造业“优先实施”、“基本实施”、“选择实施”及“少量实施”分类包括的技术分别为：

1、优先实施类技术措施包括：同步电机微机全控励磁技术，合理设置空调温度，高耗能设备定时开、关等相关措施，水泵风机目标电耗节能控制技术，锅炉水处理防腐阻垢节能技术，使用纳米聚光板或纳米聚光板替

换普通聚光板，加装红外线感应开关，中央空调全自动清洗节能系统技术，新型高效变频电磁感应加热技术，注塑机安装炮筒热套，注塑机余热回收改造，空压机余热回收，锅炉余热回收，普通日光灯改为 LED 节能灯，照明用高效智能节电控制器，稀土永磁盘式无铁芯电机技术，中央空调智能控制技术，注塑机智能变频节能控制技术，制冷剂替换，永磁涡流柔性传动节能技术，数控机床的有源功率补偿技术，发动机冷却系统优化节能技术，高红外发射率多孔陶瓷节能燃烧器技术，锅炉"油改气"，塑料动态成型加工节能技术，过程能耗管控系统技术，高效节能型锥形同向双螺杆挤出技术，全功率匹配节能数控柔性联动技术，基于低压高频电解除原理的循环水系统防垢提效节能技术，共 29 项。

2、基本实施类技术措施包括：两级喷油高效螺杆空气压缩机节能技术，T5 灯改为 LED 灯，户外 LED 照明灯，活塞空压机改为螺杆空压机，变频调速节能技术，中央空调风机、水泵、风柜加变频器，普通日光灯改 T5 日光灯，电热水器改为太阳能热水系统，注塑机定量泵系统改为变量泵系统，将燃油锅炉供热水改为太阳能热水系统，中央空调余热回收，大温差技术，动态谐波抑制及无功补偿综合节能技术，热泵的双级增焓提效技术，高效放电回馈式电池化成技术，变频优化控制系统节能技术，中央空调主机变频技术，热泵技术，共 18 项。

3、选择实施类技术措施包括：塑料注射成型伺服驱动与控制技术，高效节能电动机用铸铜转子技术，铅蓄电池高效低能耗极板制造技术，磁悬浮变频离心式中央空调冷水机组技术，双级高效永磁同步变频离心式冷水机技术，低耗能洁净厂房技术，基于感应耦合的无极荧光照明技术，电子膨胀阀变频节能技术，共 8 项。

4、少量实施类技术措施包括：高强度气体放电灯用大功率电子镇流器新技术，聚能燃烧技术，共 2 项。

附录 3 不同情景下各部门电力需求量

附表 1 制造业电力需求（单位：亿 kWh）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值情景
2016	484.6	424.4	423.8	421.7
2017	500.2	427.0	426.2	422.0
2018	516.2	430.0	428.3	421.8
2019	532.7	433.6	430.1	421.2
2020	549.8	437.6	431.6	420.0
2021	562.7	439.3	429.5	414.3
2022	575.8	441.2	427.1	408.0
2023	589.3	443.4	424.4	401.2
2024	603.0	446.0	421.3	393.9
2025	617.1	448.9	417.8	386.0
2026	631.5	452.1	411.8	379.0
2027	646.3	455.6	405.4	371.6
2028	661.4	459.5	398.4	363.5
2029	676.8	463.7	390.8	354.9
2030	692.6	468.3	382.7	345.7

附表 2 建筑部门电力需求（单位：亿 kWh）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值目标情景
2016	290.8	282.5	279.6	275.6
2017	301.8	288.8	285.0	279.6
2018	313.8	295.6	291.5	285.0
2019	326.2	303.3	298.1	291.0
2020	337.6	310.1	303.8	295.9
2021	348.0	316.5	309.2	300.7
2022	358.1	322.3	313.8	304.9
2023	367.9	328.4	318.7	308.9
2024	378.7	334.8	324.6	314.0
2025	390.0	342.2	330.8	319.8
2026	401.4	349.8	337.2	325.6
2027	412.7	356.6	343.5	331.5
2028	423.5	363.7	349.2	336.7
2029	435.4	371.6	355.9	343.4
2030	447.4	379.9	362.9	350.1

附表 3 轨道交通与电动汽车电力需求（单位：亿 kWh）

年份	参考	减排情景	强化减排情景	峰值目标情景
2016	7.1	7.5	10.8	12.9
2017	7.8	9.0	13.9	16.6
2018	8.6	10.5	16.9	20.3
2019	9.3	12.0	19.9	24.0
2020	10.1	13.5	23.0	27.7
2021	10.1	14.7	25.2	30.6
2022	10.1	15.9	27.5	33.6
2023	10.1	17.2	29.7	36.5
2024	10.1	18.4	32.0	39.4
2025	10.1	19.6	34.3	42.4
2026	10.1	20.8	36.5	45.3
2027	10.1	22.1	38.8	48.2
2028	10.1	23.3	41.0	51.2
2029	10.1	24.5	43.3	54.1
2030	10.1	25.7	45.5	57.0

附表 4 电厂自用电及线损电力需求（单位：亿 kWh）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值目标情景
2016	32.26	32.26	32.26	32.26
2017	32.26	32.26	32.26	32.26
2018	32.26	32.26	32.26	32.26
2019	32.26	32.26	32.26	32.26
2020	32.26	32.26	32.26	32.26
2021	32.26	32.26	32.26	32.26
2022	32.26	32.26	32.26	32.26
2023	32.26	32.26	32.26	32.26
2024	32.26	32.26	32.26	32.26
2025	32.26	32.26	32.26	32.26
2026	32.26	32.26	32.26	32.26
2027	32.26	32.26	32.26	32.26
2028	32.26	32.26	32.26	32.26
2029	32.26	32.26	32.26	32.26
2030	32.26	32.26	32.26	32.26

附表 5 农业及采掘业电力需求（单位：亿 kWh）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值目标情景
2016	9.51	9.51	9.51	9.51
2017	9.51	9.51	9.51	9.51
2018	9.51	9.51	9.51	9.51
2019	9.51	9.51	9.51	9.51
2020	9.51	9.51	9.51	9.51
2021	9.51	9.51	9.51	9.51
2022	9.51	9.51	9.51	9.51
2023	9.51	9.51	9.51	9.51
2024	9.51	9.51	9.51	9.51
2025	9.51	9.51	9.51	9.51
2026	9.51	9.51	9.51	9.51
2027	9.51	9.51	9.51	9.51
2028	9.51	9.51	9.51	9.51
2029	9.51	9.51	9.51	9.51
2030	9.51	9.51	9.51	9.51

附表 6 燃气和水的供应业电力需求（单位：亿 kWh）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值目标情景
2016	10.2	10.2	10.2	10.2
2017	10.6	10.6	10.6	10.6
2018	11.0	11.0	11.0	11.0
2019	11.4	11.4	11.4	11.4
2020	11.8	11.8	11.8	11.8
2021	11.9	11.9	11.9	11.9
2022	12.0	12.0	12.0	12.0
2023	12.2	12.2	12.2	12.2
2024	12.3	12.3	12.3	12.3
2025	12.4	12.4	12.4	12.4
2026	12.5	12.5	12.5	12.5
2027	12.6	12.6	12.6	12.6
2028	12.8	12.8	12.8	12.8
2029	12.9	12.9	12.9	12.9
2030	13.0	13.0	13.0	13.0

附表 7 其它交通电力需求（单位：亿 kWh）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值目标情景
2016	14.1	14.1	14.1	14.1
2017	14.8	14.8	14.8	14.8
2018	15.5	15.5	15.5	15.5
2019	16.2	16.2	16.2	16.2
2020	16.9	16.9	16.9	16.9
2021	17.6	17.6	17.6	17.6
2022	18.3	18.3	18.3	18.3
2023	19.0	19.0	19.0	19.0
2024	19.7	19.7	19.7	19.7
2025	20.4	20.4	20.4	20.4
2026	21.1	21.1	21.1	21.1
2027	21.8	21.8	21.8	21.8
2028	22.5	22.5	22.5	22.5
2029	23.1	23.1	23.1	23.1
2030	23.8	23.8	23.8	23.8

附录 4 深圳市碳排放路径情景分析结果汇总

附表 8 深圳市碳排放情景汇总（单位：万吨 CO₂）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值目标情景
2016	7567.52	7024.17	6981.30	6860.83
2017	7865.23	7069.46	7001.79	6878.90
2018	8173.44	7172.41	7076.97	6898.90
2019	8485.48	7280.44	7146.05	6910.96
2020	8798.99	7388.85	7207.96	6897.09
2021	9061.42	7517.30	7274.79	6915.77
2022	9323.95	7642.80	7331.89	6924.42
2023	9584.92	7767.74	7382.29	6736.56
2024	9858.45	7899.82	7437.68	6738.19
2025	10139.38	8027.67	7478.44	6738.85
2026	10416.30	8163.89	7310.23	6734.95
2027	10700.30	8301.67	7324.66	6729.65
2028	10977.63	8435.22	7321.98	6614.10
2029	11270.26	8581.91	7324.21	6599.88
2030	11559.75	8724.88	7221.19	6571.22

附表 9 制造业碳排放总量（单位：万吨 CO₂）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值情景
2016	3145.7	2732.1	2728.0	2685.5
2017	3243.0	2690.5	2685.4	2656.3
2018	3344.4	2682.0	2671.3	2626.5
2019	3446.7	2675.0	2653.8	2592.7
2020	3557.0	2676.1	2639.4	2554.0
2021	3637.4	2685.6	2627.0	2516.2
2022	3720.4	2697.5	2613.2	2476.2
2023	3802.7	2708.8	2595.0	2338.8
2024	3891.0	2726.1	2578.9	2296.4
2025	3983.5	2740.6	2556.2	2253.6
2026	4070.9	2757.3	2429.1	2209.5
2027	4166.1	2781.5	2396.0	2168.3
2028	4257.0	2801.4	2353.4	2075.9
2029	4356.5	2830.1	2314.6	2030.2
2030	4451.8	2854.5	2224.8	1975.0

附表 10 交通部门碳排放总量（单位：万吨 CO₂）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值目标情景
2016	2024.05	1976.15	1955.97	1925.53
2017	2151.14	2066.04	2028.08	1969.94
2018	2278.23	2155.57	2098.00	2007.72
2019	2405.12	2243.14	2163.96	2038.70
2020	2531.98	2328.92	2226.10	2062.35
2021	2645.87	2408.49	2273.60	2094.16
2022	2759.96	2486.74	2317.58	2121.96
2023	2874.19	2563.62	2357.99	2135.04
2024	2988.72	2639.30	2395.01	2154.30
2025	3103.48	2713.08	2427.72	2169.58
2026	3218.35	2786.07	2433.81	2180.84
2027	3333.56	2857.87	2446.40	2188.22
2028	3449.01	2928.40	2454.50	2184.86
2029	3564.66	2997.63	2458.13	2184.00
2030	3680.42	3065.47	2450.48	2179.05

附表 11 建筑部门碳排放总量（单位：万吨 CO₂）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值目标情景
2016	1936.17	1859.94	1842.42	1798.67
2017	2007.34	1863.03	1840.58	1805.43
2018	2084.94	1887.49	1863.55	1821.31
2019	2165.58	1917.39	1887.62	1839.97
2020	2239.80	1941.31	1905.13	1845.80
2021	2307.39	1981.34	1938.68	1872.81
2022	2372.35	2017.36	1967.37	1895.99
2023	2436.20	2054.79	1997.36	1846.53
2024	2506.39	2094.54	2033.57	1873.50
2025	2579.54	2135.50	2066.97	1903.94
2026	2653.63	2182.66	2032.52	1935.07
2027	2726.70	2225.03	2069.22	1965.86
2028	2797.10	2268.71	2102.74	1953.96
2029	2874.04	2318.06	2141.92	1988.51
2030	2951.96	2369.31	2143.39	2022.25

附表 12 电力业碳排放总量（单位：万吨 CO₂）

年份	参考情景	减排情景	强化减排情景	峰值情景
2016	5302.9	4808.8	4803.2	4708.5
2017	5472.0	4756.7	4751.4	4689.6
2018	5649.8	4768.0	4762.0	4677.0
2019	5833.2	4787.8	4771.7	4664.5
2020	6014.6	4806.0	4774.1	4628.4
2021	6157.9	4855.2	4798.5	4619.8
2022	6300.5	4902.4	4816.2	4604.4
2023	6444.6	4953.4	4833.9	4365.6
2024	6595.7	5007.5	4854.6	4348.7
2025	6751.7	5056.1	4861.5	4332.3
2026	6910.4	5121.4	4648.8	4321.9
2027	7070.6	5184.2	4651.9	4308.4
2028	7230.4	5250.5	4648.7	4177.9
2029	7398.1	5324.1	4647.8	4162.4
2030	7568.7	5401.5	4535.3	4142.6