

# 多约束目标下广州市高质量发展

## “一促三控” 协同战略研究

Research on the synergetic strategies of economic growth and energy-environmental-climate constraints in Guangzhou

2020 年 7 月

July, 2020

实施单位：中国科学院广州能源研究所

Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS



资助单位：能源基金会

Energy Foundation



# 目 录

摘 要 .....	1
第一章 广州发展现状 .....	3
一、能源消费 .....	3
二、碳排放量 .....	3
第二章 多约束目标控制的情景分析 .....	5
一、模型构建与协同评价方法 .....	5
二、多举措组合情景 .....	6
三、多举措分情景发展趋势 .....	7
第三章 三控目标的可达与协同效应分析 .....	12
一、能源目标达标分析 .....	12
二、碳强度目标达标分析 .....	13
三、污染物目标达标分析 .....	13
四、多举措的协同效应分析 .....	14
第四章 三控目标对宏观经济的影响分析 .....	16
一、成本定量分析 .....	16
二、多举措分情景的成本协同效益 .....	20
三、三控情景对经济的宏观影响 .....	21
第五章 结论与政策措施建议 .....	24
一、研究结论 .....	24
二、政策建议 .....	26

## 摘 要

为满足人民群众日益增长的美好生活需要，我国政府提出保障能源安全、爱护绿水青山、打赢蓝天保卫战、守住生态红线等一系列强有力的目标。在当前习近平新时代中国特色社会主义思想指引下及新旧动能转换的发展阶段，目标如何转化成具体的政策和行动，有必要在政策环境建设、行动方案制定、社会成本权衡、民众意愿提高等方面进一步探索、实验、评估和优化，以支撑科学决策。

项目构建了广州能源经济技术综合协同评估模型，分析发电、工业、交通、建筑等各领域措施的协同效应及节能减排贡献，设计了五个情景，分别是按现有政策和技术水平进行发展的基准情景，实行产业结构调整措施的行业情景、考察各领域节能技术措施的节能情景、叠加了结构调整与技术升级措施的低碳情景、低碳情景基础上进一步强化大气污染物末端治理措施的蓝天情景，研究并分析了不同情景下的三控目标达成情况、协同效应、投入成本及对宏观经济的影响。

**1、三控目标整体可达。**依据现有技术进步预见的发展潜力，通过产业结构调整、提高能源效率以及强化污染物末端治理三个系列的转型举措合力，如果“十四五”期间广州市的三控目标与前一个五年计划相当，则在保证情景所设举措和路径落实的条件下，广州市能够完成预期目标，同时也为中长期（2025,2030,2035年）广州市的能源双控、碳强度下降、碳峰值以及大气环境质量改善目标设定提供了决策依据和参考。

**2、三控举措有协同效应各具特点。**能源举措完成能源目标也促

进减碳目标完成，对碳排放控制目标为强协同，部分促进污染物减排，对污染物为弱协同。蓝天举措完成空气质量目标同时显著促进减碳目标完成，蓝天举措对碳排放为强协同，但对节能的协同效应为弱协同。从能源双控效果看，合理规划需求（优化交通网络，合理布局城市功能等）贡献 40%，优化产业结构贡献 19%，调整能源结构贡献 23%，提高能源效率贡献 18%。PM2.5 削减总量的 70%是通过需求优化、产业结构调整、能源结构优化和能效提升完成，30%通过强化和新增末端治理举措实现。

3、**三控举措的成本协同效益显著**。对比产业情景、节能情景和低碳情景下 2015 年到 2035 年的单位减排成本发现，低碳情景的单位减排成本相比产业情景和节能情景大幅降低，即产业结构调整措施和节能、能效措施对节能和减碳均有很好的成本协同效益。投入的年均单位节能量成本降低 44.6%，投入的年均减碳成本降低 45.1%。

4、**空气质量改善减少健康损失**。蓝天情景下可降低 82%的医疗支出和 60%的劳动力误工损失，减少约 500 亿元的健康损失。蓝天情景相对于基准情景，直接成本增加约 800 亿元，如果计入蓝天情景 PM2.5 减排带来的健康损失减少量，实际增量仅为 300 亿元。

5、**三控举措的实施对宏观经济影响较小**。中长期对能源消费、碳排放和污染物排放进行科学合理的控制，对宏观经济增长的整体影响较小，组合所有举措的蓝天情景相比基准情景，GDP 总量减少约 1%，居民消费总量降低 1.2%，对政府税收总量减少 0.02%。

## 第一章 广州发展现状

### 一、能源消费

广州市能源消费结构逐步优化，化石能源消费占比逐步降低，从2010年的75.13%降低到2018年的66.53%（图1.1），化石能源消费的降低主要是由于煤炭消费量的降低引起的，2010-2018年，煤炭能源消费量降低494.32万吨标煤。

油品消费量显著增大，占全市能源消费量的比例由2010年的38%上升到2018年41.73%；电力能源消费占比不断增大，从2010年的20.1%上升到2018年的28.54%；天然气能源消费量呈现稳步增长，包括太阳能、风能、核能等其他新能源在内的其他能源消费量增长缓慢，2010-2018年新能源消费增量仅为72.67万吨标煤。

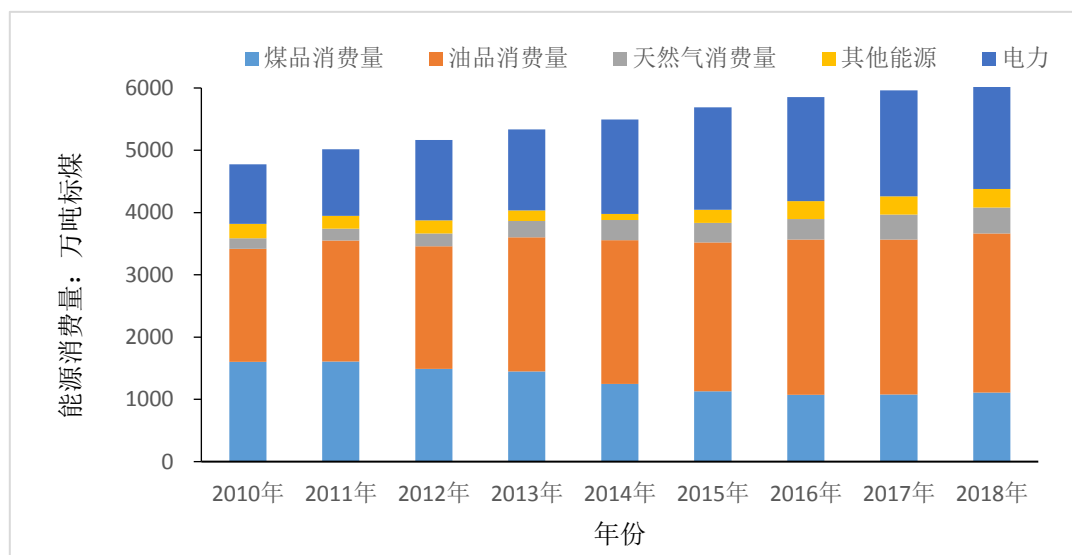


图1.1 广州市能源消费总量与结构图

### 二、碳排放量

2015年碳排放总量为12064.72万吨，主要来自油和电。分别占

47%和 36%，两者占比之和超过 80%。

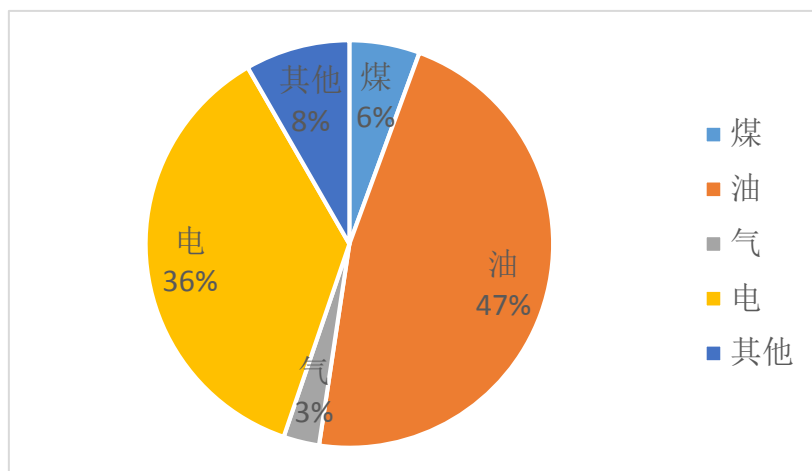


图1.2 2015年分能源品种消费端碳排放占比

2015年二氧化碳部门排放结构，工业占40%，交通32%，建筑28%。交通中最大的排放行业为货运，建筑中最大的排放行业为商业，工业中排名前五的行业分别为其他设备制造、化工，纺织，石化和交通设备制造。工业依然是碳排放主要来源，控碳之路还非常长。

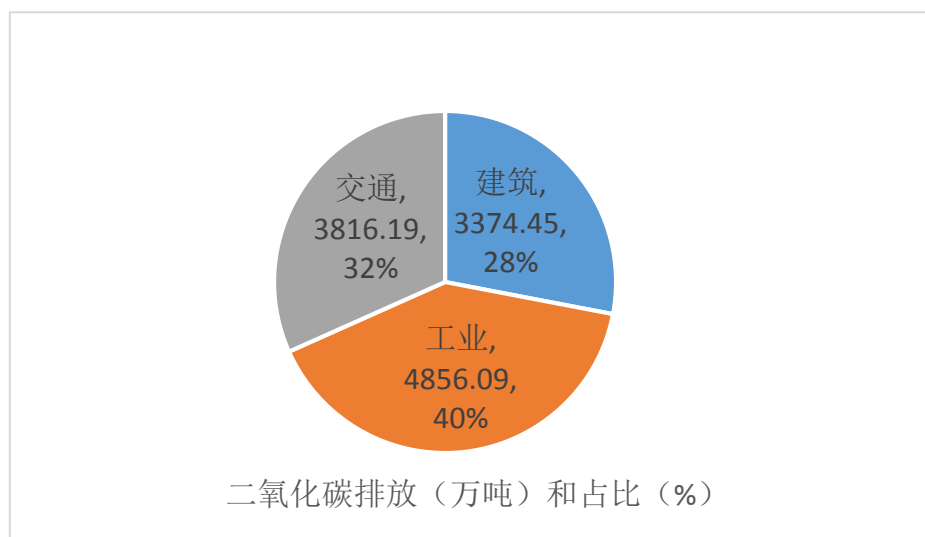
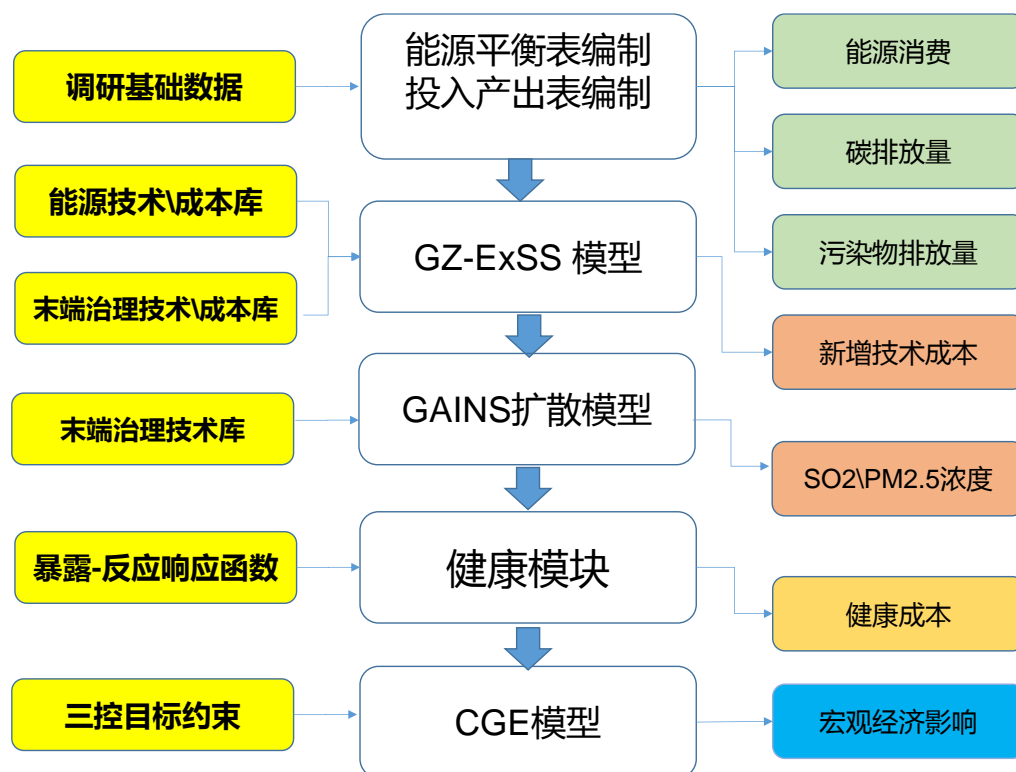


图1.3 2015年部门二氧化碳排放及占比

## 第二章 多约束目标控制的情景分析

### 一、模型构建与协同评价方法

本研究构建能源经济技术环境综合协同评估模型，模型框架图如图 2.1 所示。本研究详细考虑了客运、货运交通的运输结构、能效提升技术、能源结构调整等技术措施库，工业分 18 个细分行业部门的节能技术库。以 ExSS 模型为基础，增加了污染物排放模块、技术及成本模块，软连接 GAINS 扩散模型、健康模块和经济反馈 CGE 模型。构建了完成指数、综合完成指数和协同指数，设定了协同强弱判定标准，建立了协同减排成本分析方法，为评估组合举措对三控目标的协同效应及影响评价奠定基础。



## 二、多举措组合情景

采用情景分析方法，探讨不同因素对广州市未来能源需求、碳排放、污染物排放的影响，根据与未来经济社会、能源发展、技术发展、消费方式密切相关的主要因素，在既定的经济社会发展目标下，设计了五种发展情景，基准情景、产业情景、节能情景、低碳情景和蓝天情景。

### （1）基准情景

基准情景指在新常态的经济发展模式下，按照现有政策和技术水平进行发展，即以广州市各行业的发展现状和趋势，前端服务需求、产业结构、能源结构、能源效率等基本保持现有水平有略有优化和提高，主要用于对标。

### （2）产业情景

产业情景指在基准情景基础上，进行产业结构优化和前端服务需求降低，包括三产快速发展，工业向服务业转型，工业内部转型升级，前端需求服务进一步降低，主要评估产业结构调整 and 前端服务需求降低等措施对三控目标的影响。

### （3）节能情景

节能情景指在基准情景基础上，进行能源结构优化，终端能效提升。包括以下措施，发电部门煤改气，外购电力清洁化，交通部门油改电，工业部门电气化，建筑用电设备提高能效等级，主要评估能源结构调整和能效提升对三控目标的影响。

### （4）低碳情景



低碳情景指在基准情景基础上，进行产业结构优化、前端服务需求降低、能源结构优化，终端能效提升等。包括产业情景和节能情景下的系列措施，还大大提高外购电的清洁比例（外购电清洁比例 20% 提升至 50%）。主要评估全措施对三控目标的影响。

### （5）蓝天情景

蓝天情景指在低碳情景基础上，强化末端设备污染物去除水平，包括提高工业设备、居民生活设备、发电端的污染物去除率，以及进一步提高交通电动化水平，以评估最大化达成空气质量目标所付出的代价。

## 三、多举措分情景发展趋势

### 1、能源消费量

到 2035 年基准情景下能源消费总量为 1.37 亿吨标煤，节能情景相对基准情景能耗降低 3608 万吨标煤，万元 GDP 能耗相对 2015 年内下降约 54%。产业情景相对基准情景能耗下降 3958 万吨标煤，万元 GDP 能耗在 20 年内下降约 56%。低碳情景相对基准情景能耗降低 5987 万吨标煤，并且可以在 2029 年能源总量达峰。万元 GDP 能耗在 20 年内下降约 65%，每个五年下降率约 23%。

### 2、碳排放量

在基准情景下，到 2035 年碳排放总量将达到 2.7 亿吨 CO<sub>2</sub>，而通过产业结构调整，产业情景的碳排放强度下降 62.01%，且于 2031

年达峰，峰值为 17839 万吨。通过提高能源效率和能源结构转型的节能情景，碳排放强度下降 62.08%，每五年平均下降 21.53%，于 2031 年达峰，峰值为 17106 万吨。同时使用两类措施的低碳情景，CO<sub>2</sub> 排放量下降约 58%，碳强度下降 75.57%，每五年平均下降 29.69%，于 2024 年达峰，提前 7 年达峰，峰值为 13973 万吨。

### 3、 污染物排放

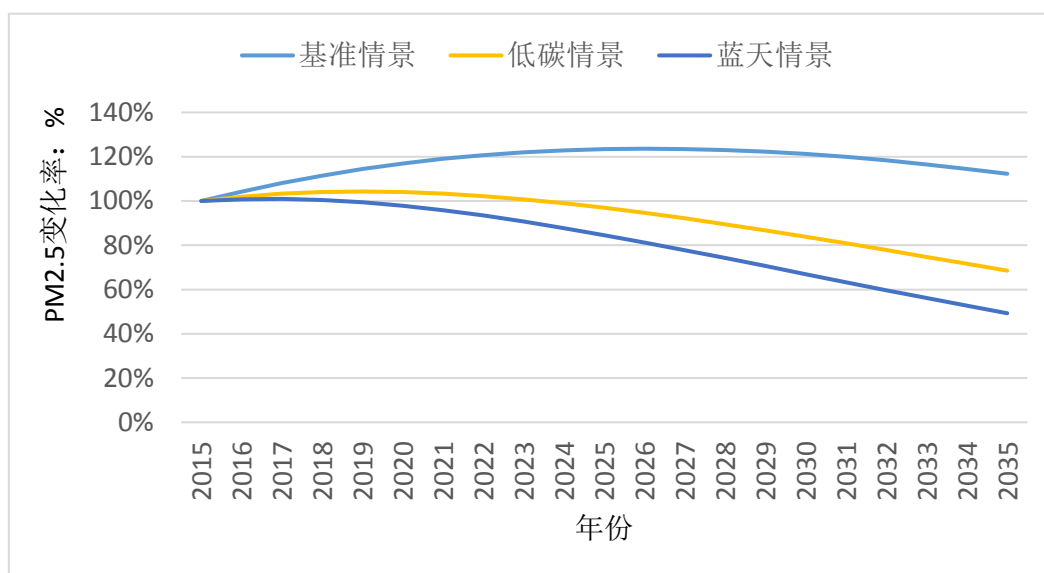


图2.2 相对于基准年的PM2.5排放量变化率

如图 3.5 所示，施加末端处理后，蓝天情景的进一步降低了 PM<sub>2.5</sub> 的排放水平。但相对于基准情景，使用前端措施减排的低碳情景对污染物降低效果较好。蓝天情景的强化末端处理措施，可以进一步降低 PM<sub>2.5</sub> 排放 20%。

#### 4、分措施贡献

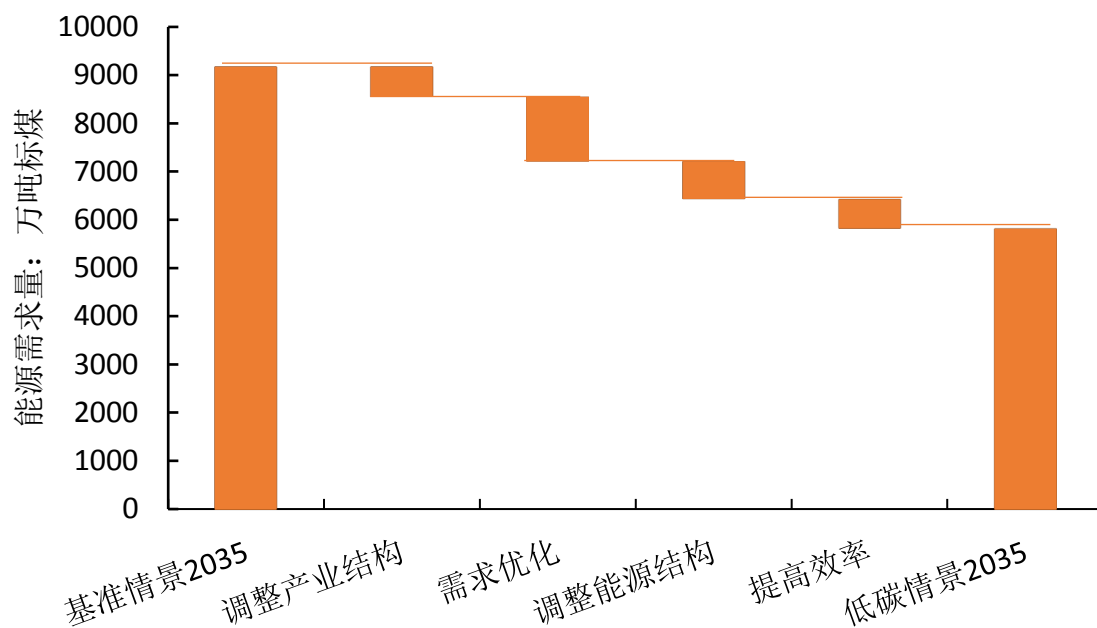


图2.3 2035年四类举措对能源消费总量控制的贡献分布

以 2035 年为例，低碳情景下能源消费量为 5822 万吨标煤（当量值），相对于基准情景能耗降低 3350 万吨标煤，依贡献率可知需求优化（优化交通网络，合理布局城市功能等）占 40%，调整能源结构 23%，调整产业结构 19%，提高能源效率占 18%。

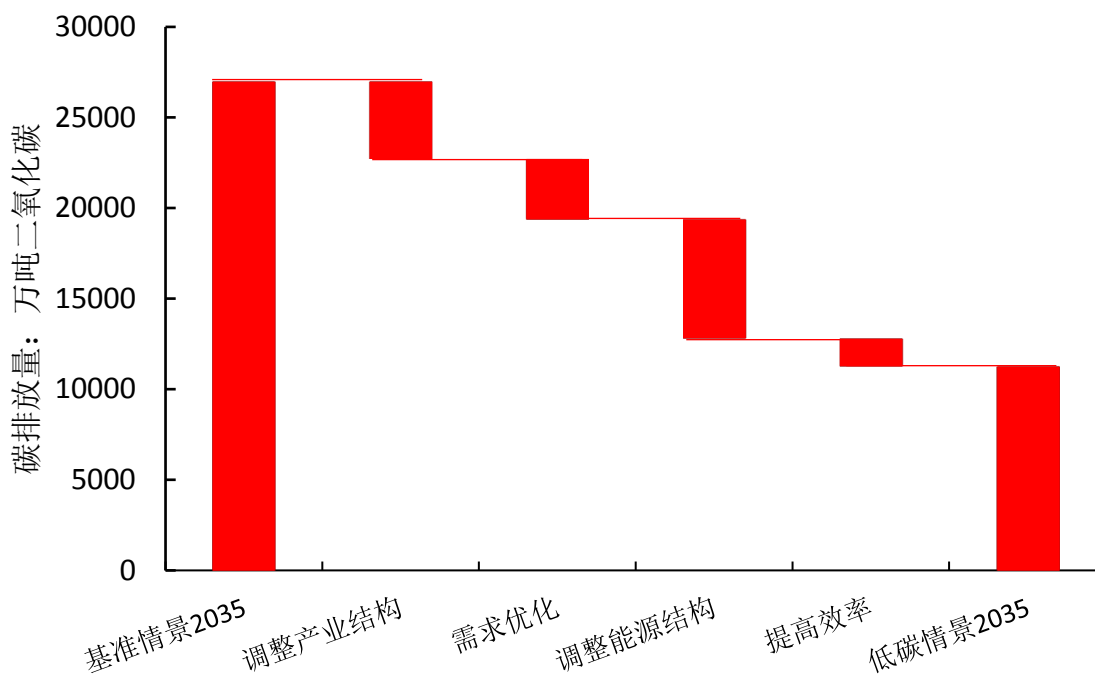


图2.4 2035年四类举措对碳排放总量控制的贡献分部

2035年，低碳情景碳排放为11257万吨二氧化碳，相对于基准情景降低15705万吨二氧化碳，下降58.2%，依贡献率排序调整能源结构占42%，调整产业结构27%，需求优化占21%，提高能效占10%。

## 5、部门和行业贡献

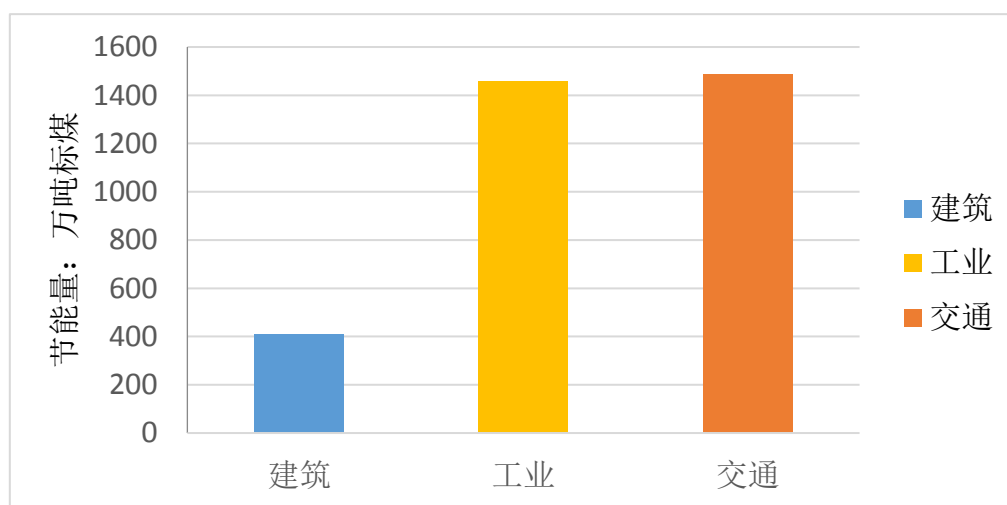


图2.5 低碳情景三个部门节能贡献量分布

相对基准情景节能 3349.62 万吨标煤，工业和交通减排量相当(各占 44%)。

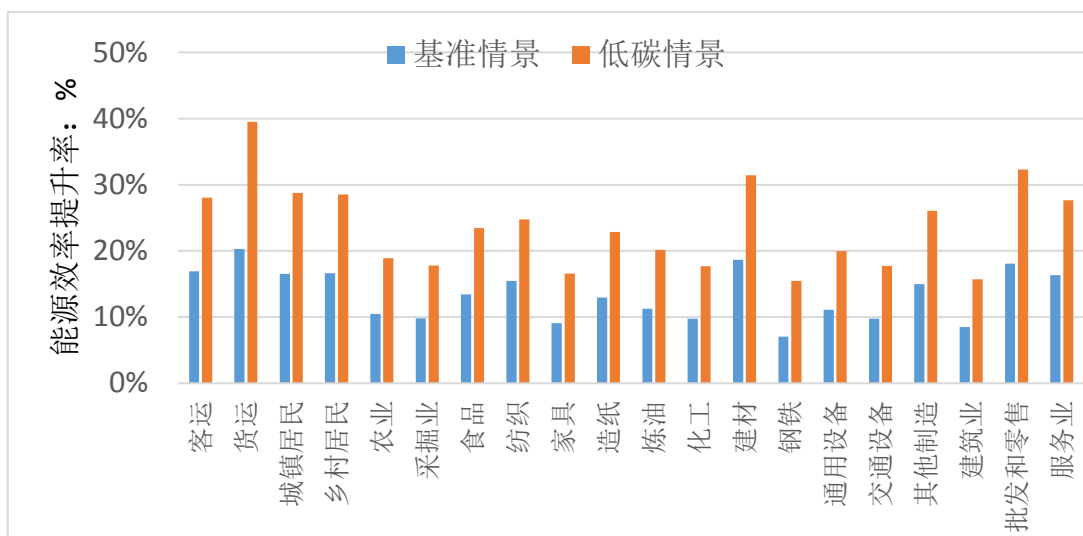


图2.6 基准情景和低碳情景分行业能效提升率

各行业在情景下能源效率提升情况，产业情景为自然提升，节能/低碳情景下为采取措施后的提升，平均行业提升为 20%-40%。

## 6、污染物前端后端去除贡献

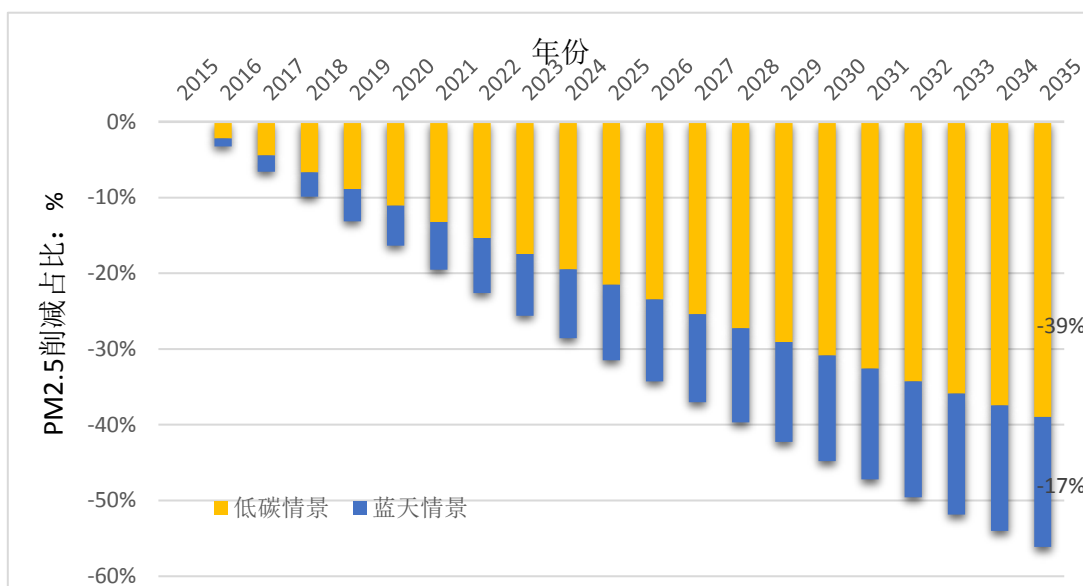


图2.7 低碳情景和蓝天情景PM2.5削减贡献对比

从情景对比发现前端调整和强化末端措施对污染物减排的贡献，

以 2035 年 PM2.5 为例，其下降贡献度，低碳情景下降 39%，蓝天情景额外下降了 17%。即 PM2.5 削减总量的 70% 是通过产业结构调整、节能和能效技术改进完成的，强化末端措施贡献剩下的 30%。

### 第三章 三控目标的可达与协同效应分析

#### 一、能源目标达标分析

按照“十三五”广州市能源总量控制的目标增量，假设十四五、十五五仍旧按照十三五的能源增量目标进行控制。2015 年能源消费量为 5688 万吨标煤，2020 年总量控制在 6284 万吨标煤水平，五年增量为 595 万吨标煤。“十三五”能源强度下降达到 30%。设定以后每五年目标呈递减趋势，强度下降率为 23%，25%，27% 和 29%。对照各情景政策措施施加后，能源强度目标可以达成。即使在最严格的低碳措施实施后，能源消费总量控制目标较难完成。在低碳情景下，能源消费量在 2031 年可达到峰值。

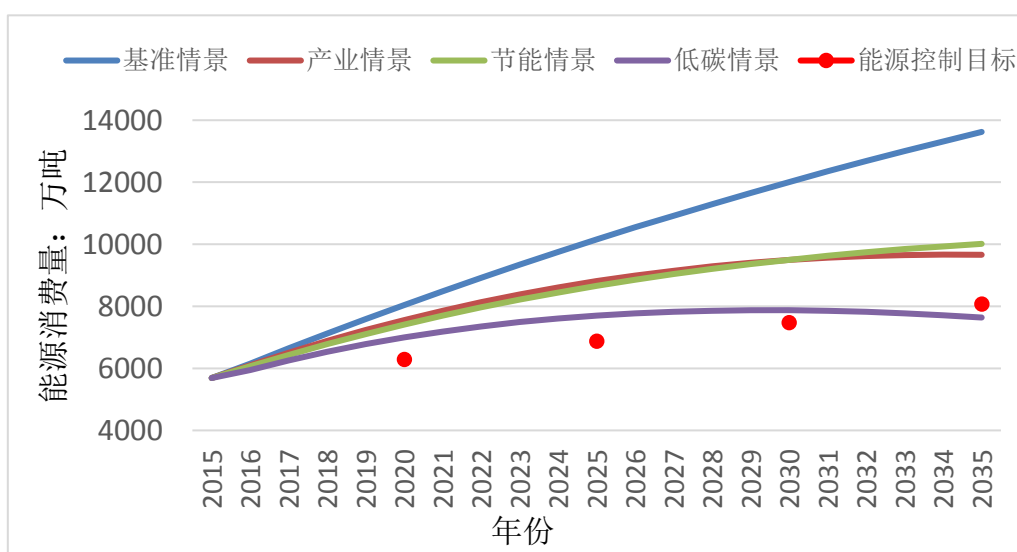


图3.1 四个情景能源消费总量与能源控制目标

## 二、碳强度目标达标分析

如果以广州市节能降碳十三五规划中的约束目标，即十三五碳排放强度下降 23%为参考，以后每五年按 25%，27%，29%的幅度下降，即碳强度在 2035 年相对于 2015 年下降 70%。产业情景碳强度下降 62.01%；节能情景碳强度下降 62.08；低碳情景碳强度下降 75.57%。

对比目标，低碳情景可在全时间段完成目标，低碳情景碳强度实际完成 75.6%，并且在 2024 年前后达到碳排放峰值。2024 年峰值为 13973 万吨二氧化碳。

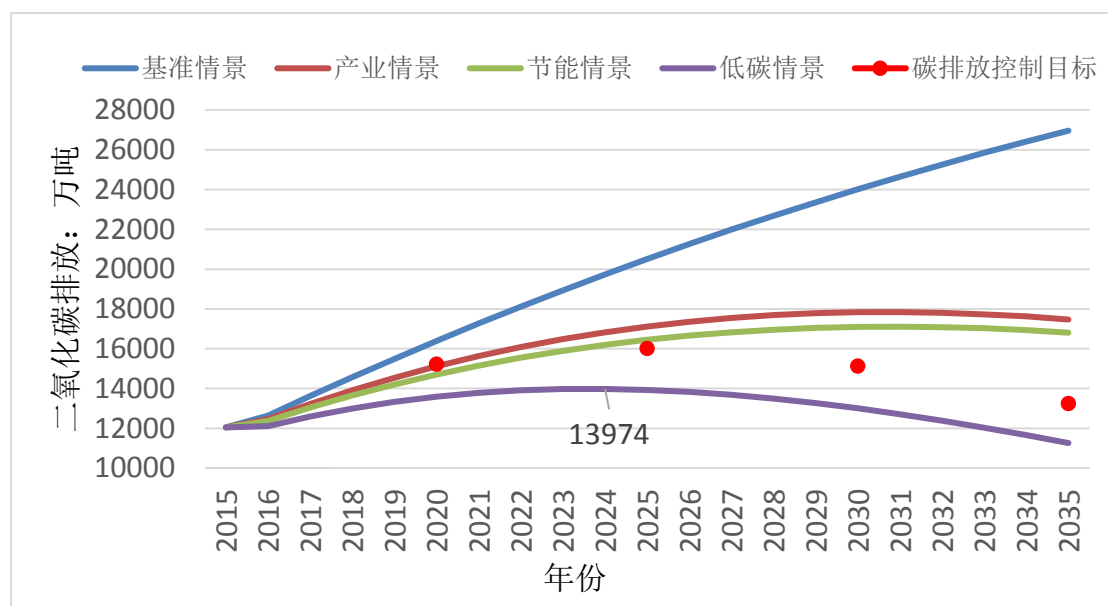


图3.2 四个情景碳排放总量与控制目标

## 三、污染物目标达标分析

按照空气质量标准设定，2025 年 PM<sub>2.5</sub> 达到 28 微克/立方米以下。2035 年 PM<sub>2.5</sub> 指数降低至 25 微克/立方米以下（比 2020 年下降 17%），以 PM<sub>2.5</sub> 排放量每五年下降 20%绝对量作为控制目标。对比各情景的目标完成情况，产业、节能和低碳情景，都难以完成如此高

强度的下降目标，蓝天情景的强化污染物去除措施效果较好，在各个阶段基本靠近完成线。

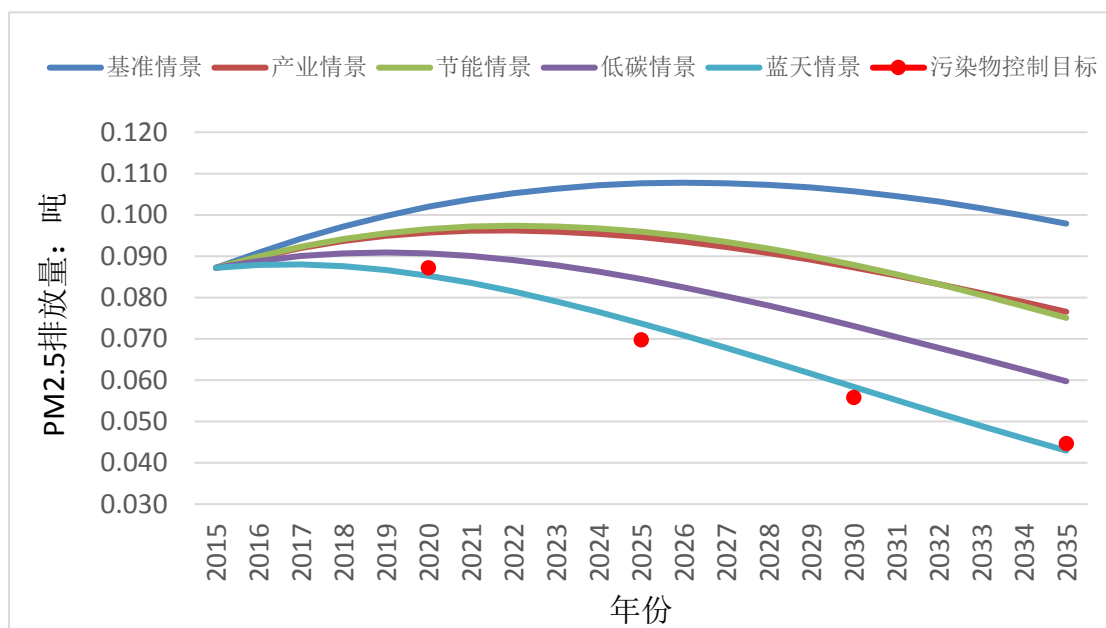


图3.3 五个情景PM2.5排放量与控制目标

#### 四、多举措的协同效应分析

对比各情景的综合目标完成度情况可见，各情景的系列措施对几个目标的完成具有良好的促进作用，低碳情景下三指数均有上升，蓝天情景污染物指数提升，综合完成指数随时间和情景逐步上升。

论单个控制指标，碳强度目标完成度较高。对于三控整体目标，蓝天情景高于低碳情景，情景措施对三控目标均有积极效果。



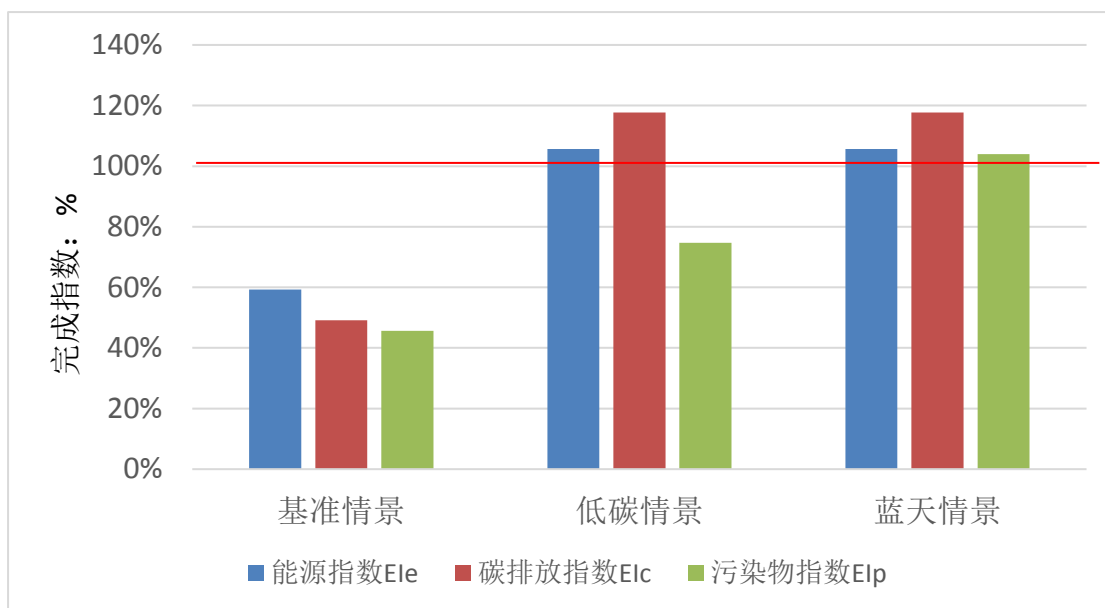


图3.4 三情景下能源-碳排放-污染物目标完成指数

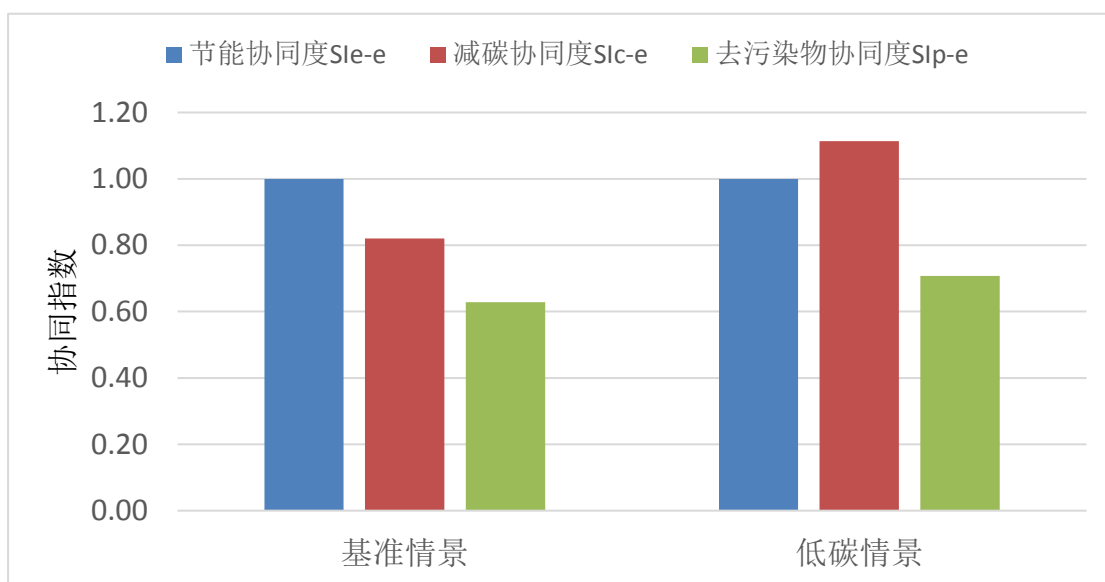


图3.5 2035年基准和低碳情景协同度-以能源为主举措

2035年，以节能为主举措时，对碳排放为强协同，对污染物为弱协同。节能措施对减碳的协同度高于污染物减排，系列措施的叠加能增加综合协同度，但存在边际递减效应。当以去污染物为主举措时，对节能的协同度降为弱协同，对碳排放为强协同。

去污染物系列措施对节能和减碳的协同度均呈下降趋势，且对节能的协同度下降速度超过对减碳的协同度。

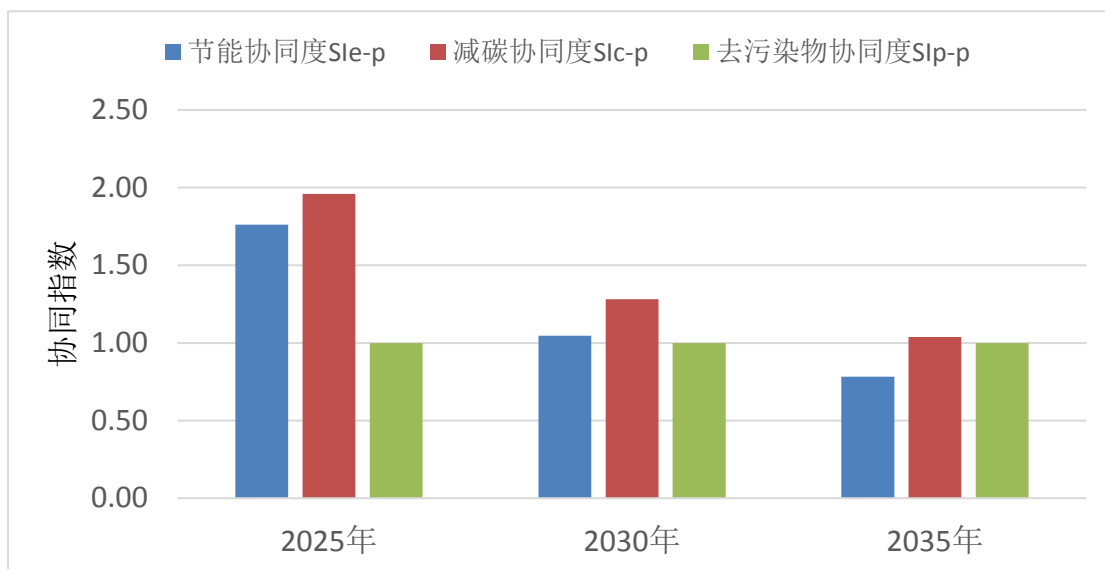


图 3.6 蓝天情景下各时间节点协同度-以污染物削减为主举措

## 第四章 三控目标对宏观经济的影响分析

### 一、成本定量分析

项目中的成本指因能源转型等措施下引起的额外成本，包含直接成本和间接成本两部分，直接成本又分为技术成本和末端治理成本，技术成本指由于设备技术改进和规模扩大所引起的年度新增费用。末端治理成本指生产末端的污染物去除装置运营引起的费用增加。间接成本为由于大气污染物引起的健康损失所增加的住院（看病）费用和工作时间损失。

#### 1、多举措分情景技术成本

作为对照情景，基准情景的成本相对稳定，基准情景下，发电结构、能源结构和产业结构均按照现有的社会情景发展，不会出现大幅度变动，主要成本体现在经济规模扩大所引起的发电装机扩容、生产

设备增量上，由初始的 30 亿元上升到 2035 年的 34 亿元，年均新增量基本保持平稳。产业情景下，模拟由于产业结构调整对三控目标的影响，维持经济增长所增加成本主要来自产业转移过程中生产设备规模变化引起的成本，至 2035 年，新增成本达到 62.39 亿元，年新增成本增加了约 83.50%。节能情景下，通过调整发电结构、终端能源消费结构和提升能源效率等三控目标的影响，维持经济增长所增加的成本来自发电结构大规模调整、用能设备更新、设备技术升级，至 2035 年新增成本达到 141.74 亿元，年新增成本增加了约 3.16 倍。低碳情景，通过模拟综合调整产业结构和能源结构等对三控目标的影响，2035 年新增成本约 78.66 亿元，年新增成本增加了约 1.31 倍。蓝天情景在低碳情景上增加了末端设备的升级费用，2035 年达到 83.86 亿元。均低于节能情景。产业结构调整 and 能源结构调整组合措施可大幅降低成本（低碳/蓝天情景）。

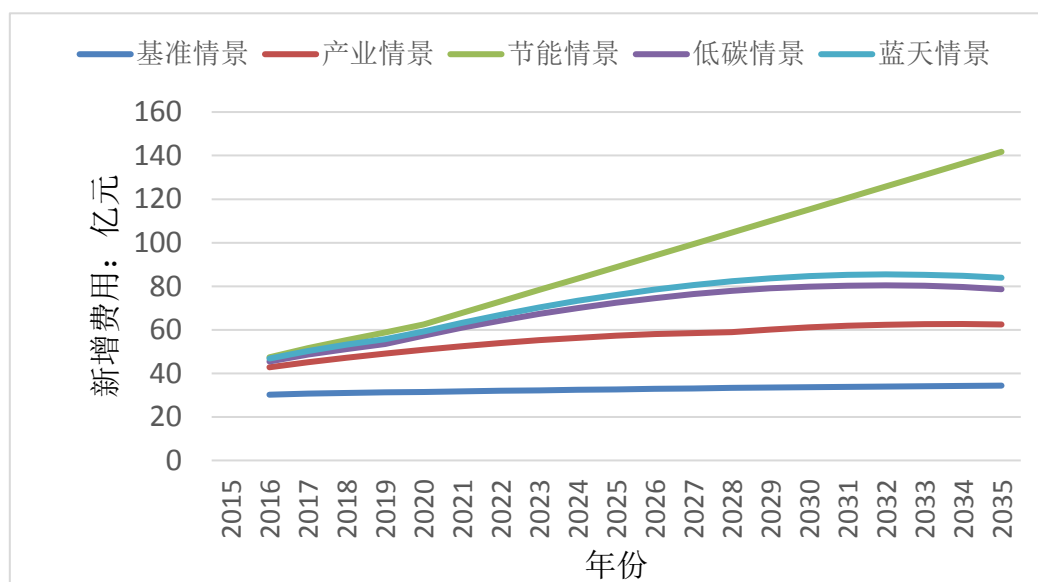


图4.1 五个情景下设备技术改进和规模扩大新增费用

## 2、多举措分情景末端成本

基准情景下，末端成本随着经济的增长，稳步上升，在维持现有去除率的前提下，末端成本在 20 年间增长了 61.80%。产业情景，调整产业结构后，高附加值和三产的单位产值生产设备需要的处理量降低，末端成本在 20 年间增幅 27.08%，且在后 15 年基本处于平台期，不再增长。节能情景，由于发电结构和能效提升，维持相同经济规模所需要的生产设备规模大幅降低，末端成本进一步下降，20 年间增长 16.38%，区间基本处于缓慢增长区。低碳情景，维持相同的经济规模，不仅单位产值生产设备的处理量下降，生产设备规模也大幅降低，末端成本呈下降趋势，20 年间下降约 12%。是所有情景中末端成本最低的，2025 年比基准情景低 46.01%。蓝天情景对末端设备的去除率提出了更高要求，单位处理量的成本大幅提升，在后期增幅非常明显。20 年内增加幅度达到 30%左右。

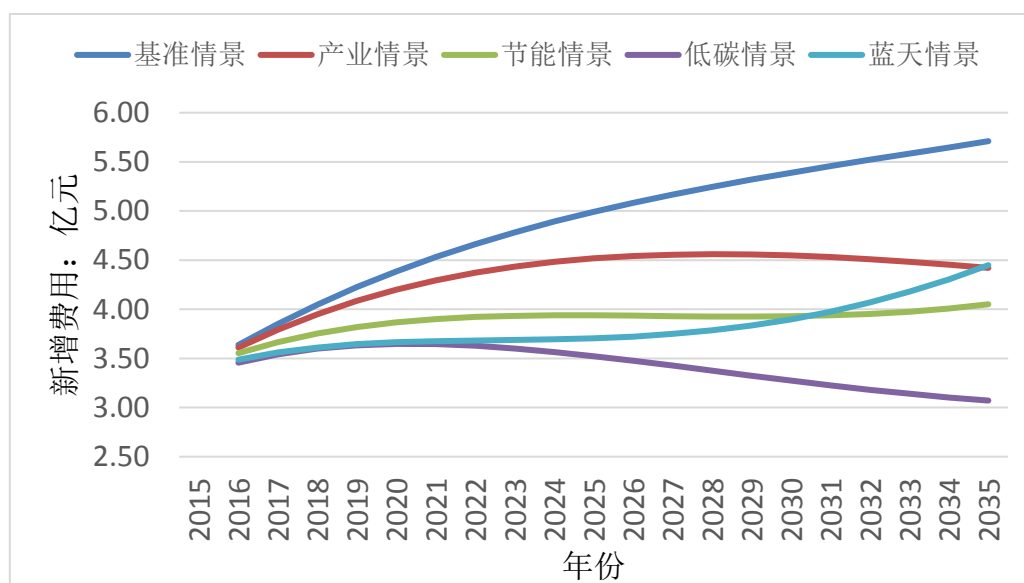


图4.2 五个情景下污染物去除装置运营费用增加

### 3、健康成本和劳动力损失

在不同情景下，由于各情景污染物排放的变化，居民健康支出出现了显著变化，基准情景、产业情景、节能情景、低碳情景和蓝天情景，2035年的由空气污染物造成的额外健康成本增加量分别为9.06亿元、6.55亿元、4.03亿元、2.42亿元、1.61亿元，造成的额外的劳动力损失成本分别为80.81亿元、72.73亿元、64.65亿元、48.49亿元、32.32亿元。随着空气污染物排放的减少，额外的健康损失和劳动力损失大幅降低。

基准情景20年累计成本达到1859亿元，占比最大的为劳动力损失成本，超过50%，产业情景和节能情景技术成本大幅上升，产业情景节能情景的技术改进成本占比达到约70%。技术转型的成本高昂，且单独的产业结构调整或能源结构调整等支出的额外技术成本并不能等量的减少健康损失和劳动力损失。低碳情景下，20年累计总成本2227.59亿元，占比最大的为技术成本，相对于基准情景，在大幅达成三控目标的前提下，额外成本仅增加约20%，且组合措施下，支出的额外技术成本基本可以减少等量的健康损失和劳动力损失，蓝天情景20年累计总成本2155.64亿元，在低碳情景的基础上，增加了技术成本和末端治理成本投入，进一步减少了健康损失和劳动力损失，支出的额外技术成本可以减少更多的健康损失和劳动力损失，年均成本几乎与基准情景相当，即在组合措施下，花费额外约16%的成本，达成了三控目标，还用技术成本减少了几乎等量的居民健康损失。

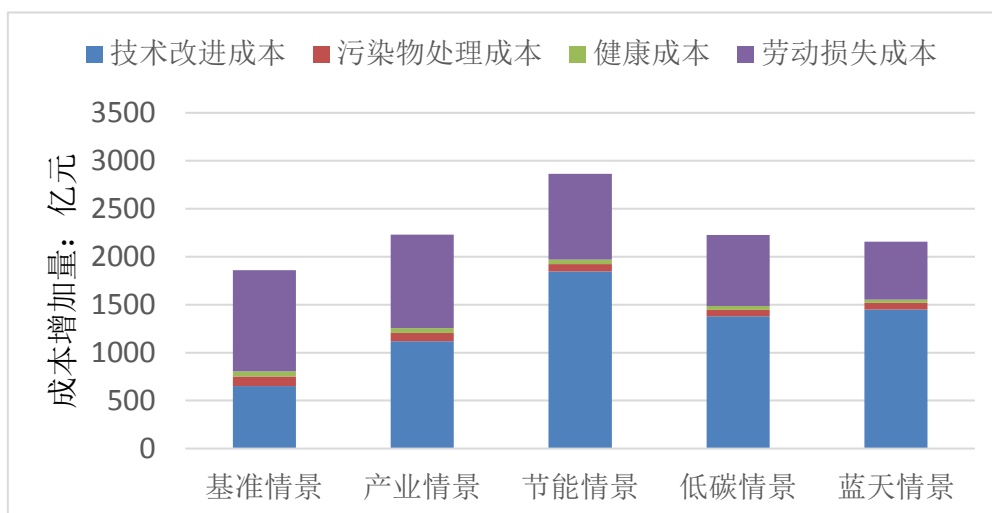


图4.3 五个情景2015年-2035年四类成本累计量

## 二、多举措分情景的成本协同效益

各情景下三控目标完成度有所差异，通过单位节能量或减碳的成本比较各类措施的贡献度。产业措施和节能措施对节能和减碳有很好的协同效果，其节能成本协同系数为 44.6%，减碳成本协同系数为 45.1%。低碳情景下，完成相同的节能目标可节约 44.6%的成本，完成相同的减碳目标节约 45.1%的成本。从节能情景能耗成本远高于产业情景可知，不调整产业结构而全靠技术节能减碳的成本是非常高昂的。

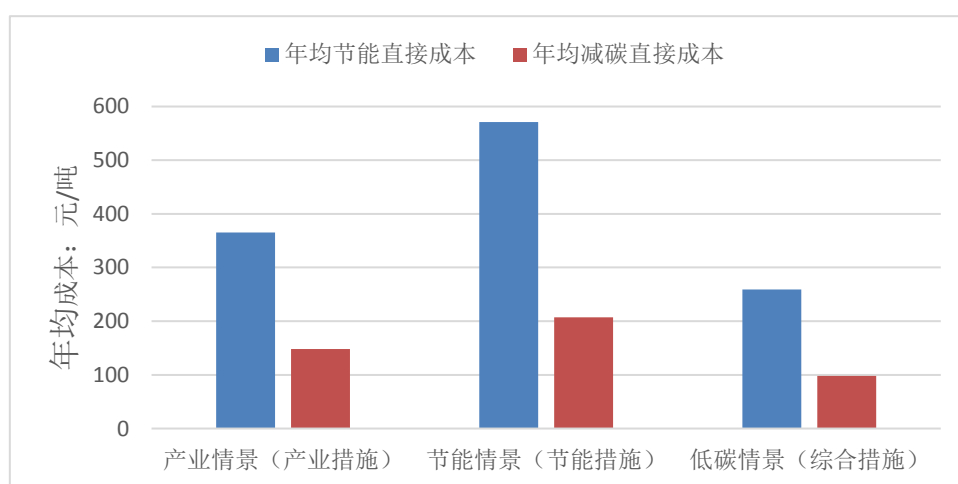


图4.4 三类措施下的年均节能直接成本和减碳直接成本

产业情景下，四种污染物（SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NMVOC 和 PM<sub>2.5</sub>）去除设施年均去除增加的直接成本见图 4.5。产业措施和节能措施对各种污染物的末端成本有很好的协同效果，SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NMVOC 和 PM<sub>2.5</sub> 成本协同系数分别为 39.85%、45.98%、43.61%和 54.35%。低碳情景下，单位污染物去除的成本大幅降低。在产业和节能综合措施下继续强化末端污染物去除措施，即蓝天情景，四种污染物末端强化措施的成本协同系数分别为-4.05%、4.57%、-14.68%和 23.34%。SO<sub>2</sub> 和 NMVOC 的协同系数为负，后者达到了近 15%。产业和节能综合措施对四种污染物均有较好的协同效果，成本降低幅度在 40%-54%之间，但末端强化措施与综合措施的协同效果因污染物种类有所区别，对 NO<sub>x</sub> 特别是 PM<sub>2.5</sub> 具有一定的协同效果，但是对 SO<sub>2</sub> 无成本协同效果，对 NMVOC 反而产生了近 15%左右的成本增加。

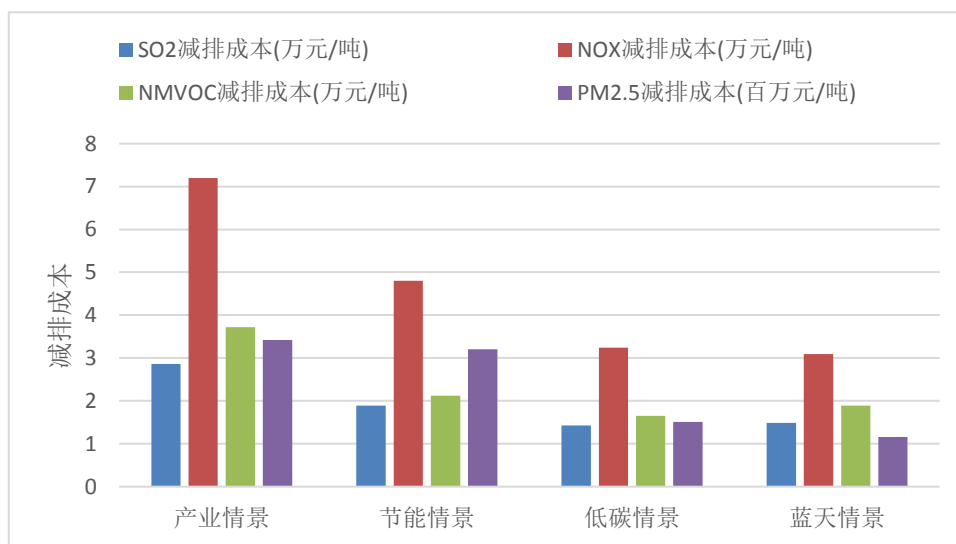


图4.5 四个情景下四类污染物的年均减排成本

### 三、三控情景对经济的宏观影响

对应 ExSS-GZ 技术模型的基准情景和 4 个政策措施情景，应用

一促三控 CGE-GZ 模型，设置 CGE 模中的产业情景、节能情景、低碳情景和蓝天情景。基准情景下 GDP 按照 6.7% 的速度增长。

在各情景措施除了对完成三控目标有积极促进作用外，也会对社会宏观经济产生影响，以基准情景作为对比，各情景对 GDP 造成的影响见图，各情景对 GDP 的影响时间和幅度均有区别，产业情景和节能情景在实施近 9 年后（2024 年）才对经济造成明显的影响（幅度大于 -0.01%），低碳情景在实施 5 年后有明显影响，蓝天情景在实施仅 2 年后有明显影响。年均影响分别为 0.23%、0.36%、0.72% 和 1.08%，最大影响均出现在 2035 年，幅度分别为 0.96%、1.39%、2.62% 和 3.03%。蓝天情景的 GDP 影响较为明显。

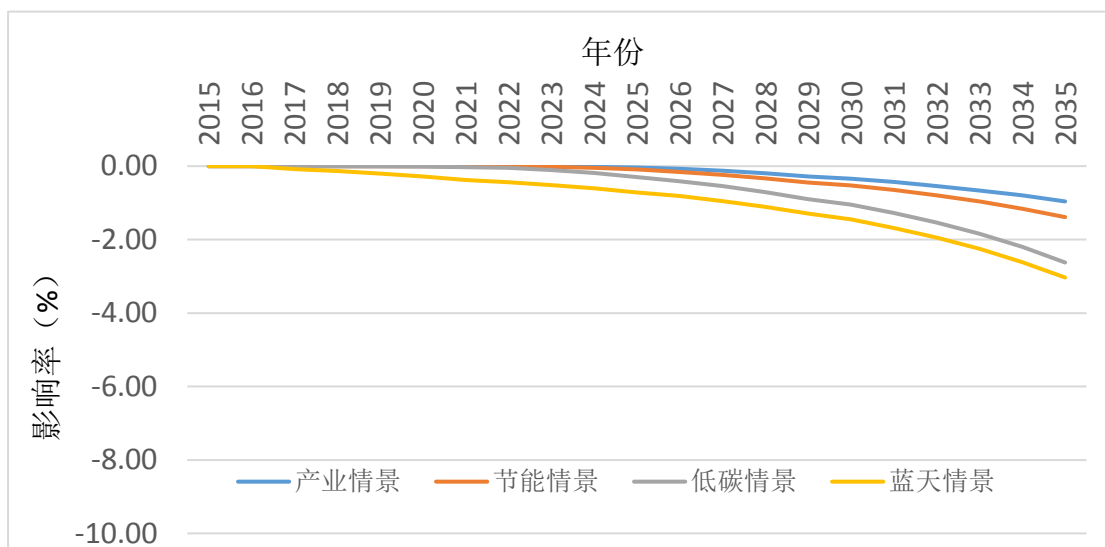


图4.6 四种情景措施对GDP的逐年影响

对于消费的影响，各情景均在 2025 年以后对消费才有明显影响，低碳和蓝天情景在前期有小幅促进作用。年均影响分别为 0.08%、0.20%、0.61% 和 1.20%，2035 年对消费的影响幅度分别为 0.55%、1.12%、3.48% 和 4.53%，蓝天情景对消费的影响较大。



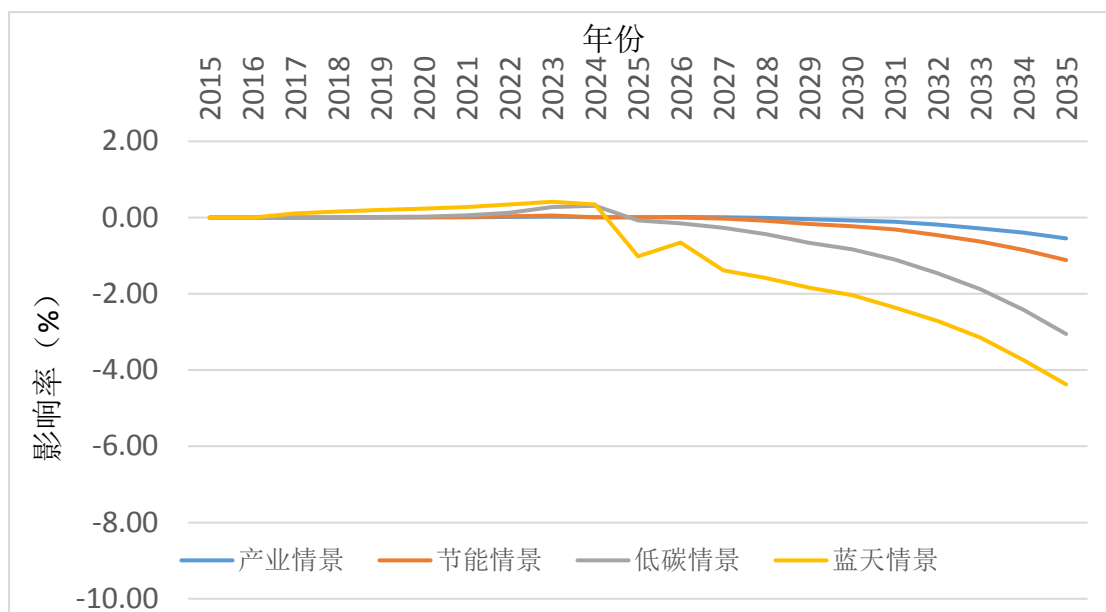


图4.7 四种情景措施对消费的逐年影响

前期只有蓝天情景对税收有小幅影响，后期才有较明显影响，2035 年对税收的影响幅度分别为 0.02%，0.03%，0.046%和 0.043%，仅低碳和蓝天情景有少量影响，低碳和蓝天情景对税收影响区别不大，整体来说，对税收的影响较小，年均低于 0.02%，最高幅度低于 0.05%。

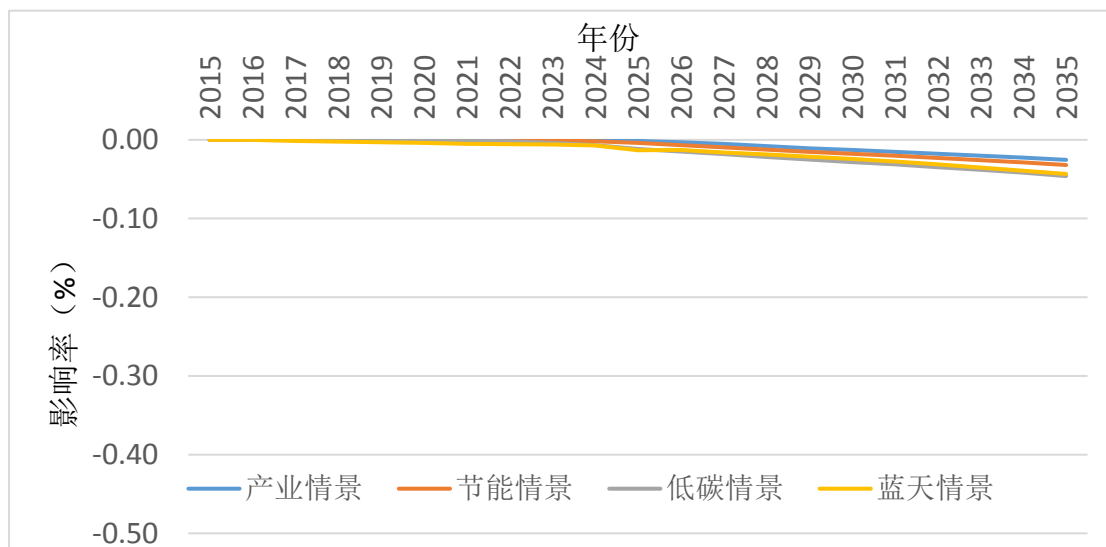


图4.8 四种情景措施对税收的逐年影响

## 第五章 结论与政策措施建议

### 一、研究结论

#### 1、三控目标可行性

研究结果表明，依据现有技术进步预见的发展潜力，通过产业结构调整、引入先进技术提高能源效率以及强化污染物末端治理三个系列的转型举措合力，到 2035 年蓝天情景下能源消费总量在 2029 年达峰，峰值为 7900 万吨标煤。碳排放总量 2024 年前后达峰，峰值为 1400 万吨。PM<sub>2.5</sub> 排放量下降 50%，以保证广州市 2035 年 PM<sub>2.5</sub> 指数降低至 25 微克/立方米以下的目标实现。如果“十四五”期间广州市的三控目标与前一个五年计划相当，则在保证情景所设举措和路径落实的条件下，广州市能够完成预期目标，同时也为中长期（2025,2030,2035 年）广州市的能源双控、碳强度下降、碳峰值以及大气环境质量改善目标设定提供了决策依据和参考。

#### 2、措施协同效应

情景措施对三控目标均有积极效果，到 2035 年，以能源举措为主时，完成能源强度目标也促进碳目标完成，且能源举措对碳排放控制目标为强协同。举措完成能源目标同时促进污染物减排，但能源举措对污染物为弱协同。节能系列措施对减碳的协同效应高于对污染物减排的协同效应。当蓝天举措为主时，完成空气质量目标同时显著促进碳目标完成，蓝天举措对碳排放为强协同，但对节能的协同效应转

为弱协同。研究表明，产业结构调整、能源效率提升等前端措施完成节能任务外，可以额外促进减碳和污染物削减任务。而末端治理措施只有在前端措施的辅助下，才能协同的完成三控任务。

### 3、三控目标的成本效益

对比产业情景、节能情景和低碳情景下 2015 年到 2035 年的单位减排成本发现，低碳情景的单位减排成本相比产业情景和节能情景大幅降低，即产业结构调整措施和节能/能效措施对节能和减碳都有很好的成本协同效益。低碳情景下，相比产业情景和节能情景，投入的年均单位节能量成本降低 44.6%，投入的年均减碳成本降低 45.1%。蓝天情景下，产业结构调整、节能技术导入上叠加末端治理措施，对 NOX 和 PM2.5 单位污染物减排成本相比低碳情景进一步降低，SO2 和 VOC 的减排成本相较于低碳情景有所增加，VOC 与能源措施协同效应较弱，因此需要对其投入更多的专项治理技术和成本。蓝天情景下可降低 82%的医疗支出和 60%的劳动力误工损失，总计约减少了约 500 亿元的健康损失。蓝天情景相对于基准情景，直接成本增加约 800 亿元，如果计入蓝天情景控排 PM2.5 排放带来的健康损失减少量，实际增量仅为 300 亿元。

### 4、对宏观经济的影响

中长期对能源消费、碳排放和污染物排放进行科学合理的控制，对宏观经济增长的整体影响较小，组合所有举措的蓝天情景相比基准

情景，GDP 总量年均减少约 1%，居民消费总量年均降低 1.2%，最大降低 4.5%，对政府年均税收总量影响较小为 0.02%，最大不超过 0.05%。

## 二、政策建议

1、从三控目标完成度来看，按照技术潜力实施系列举措，能源强度目标，碳强度下降目标相对容易完成，难完成的是能源消费总量控制目标及 PM2.5 的浓度下降目标。仅凭节能举措无法完成三控目标，必须同时转变发展方式及调整产业结构才能确保三控目标完成，也就是经济转型和能源转型必须协同和并行。

2、情景分析可知，PM2.5 削减总量的 70% 是通过产业结构调整、节能和能效技术改进完成，即是在低碳情景下实现；30% 是在蓝天情景下通过强化和新增末端治理举措实现。因此广州市在蓝天保卫战工作部署中，不能把控排任务只压在环保部门，偏重于部署污染物的末端治理，更应该并行考虑前端（污染物发生源）的产业结构调整、能源结构优化及节能技术改进，在源头大幅减少污染物的生成。

3、达成三控目标的蓝天情景，到 2035 年，相比于基准情景，对宏观经济的影响为 GDP 总量降低约 1%，但可减少 PM2.5 造成的健康损失和劳动力损失约 500 亿元，具有增进社会福利的潜力。另一方面，本研究还未考虑劳动力和健康损失降低间接对宏观经济的影响，实际 GDP 损失应小于现在的评估值。

4、本研究模型仅考虑与能源相关的前端技术及末端技术措施，对印刷、加油站等非能源过程及工艺的 VOC 排放措施未涉及，这部分应该额外考虑专用治理技术。广州市中长期将扩大天然气利用，这

是今后 NO<sub>x</sub> 排放增加的隐患，对 PM<sub>2.5</sub> 控制也存在不利影响，环保部门应与节能减碳部门共同出台组合政策，加大污染物排放源的控制技术和末端脱氮技术的应用，显著降低污染物排放，以获得减碳与治污的协同效益。

5、促进三控目标达成不仅是对能源安全、保护绿水青山和应对气候变化的贡献，同时，因为环境质量的改善而减少了医疗支出、劳动力误工损失，增进人口健康和劳动力保护，对经济高质量发展有重要贡献，是坚定能源转型和污染物治理决心的重要支撑，但是这方面的社会及经济效益往往被忽视。建议节能、低碳和污染物削减的主管部门应联合卫健部门，在财政支持、政策资源等方面联合出台相关资金共同投入机制，并把对环境保护的贡献纳入对宏观经济发展的评估。