

中国气候与能源政策方案

定量分析及与“十三五”规划期的政策建议

2016 年 7 月

国家应对气候变化战略研究和国际合作中心，刘强、田川、郑晓奇

国家发展和改革委员会能源研究所，姜克隽、贺晨旻

美国能源创新（Energy Innovation），Hal Harvey, Sonia Aggarwal, Chris Busch,
Jeffrey Rissman, Robbie Orvis, Hallie Kennan

 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心
National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation (NCSC)

能源创新
ENERGY INNOVATION
POLICY & TECHNOLOGY, LLC



国家发展和改革委员会能源研究所
Energy Research Institute National Development And Reform Commission

致谢

本报告作者在此感谢以下人员为本项目提供的帮助：

能源基金会（中国），胡敏、杨鹂

芝加哥大学，Michael Greenstone

麻省理工学院，Richard McDowell、Matthew Zaragoza-Watkins、 Luke Strathmann、Claire Walsh

其他非从属编著者，Joel Swisher、Ruoting Jiang

目 录

执行摘要	1
政策设计原则	1
模型概述	2
一、情景分析	4
1.1 参考情景	4
1.2 政策情景	6
二、分行业政策评估结果	10
2.1 跨行业.....	10
2.2 电力行业	12
2.3 工业行业	14
2.4 交通行业	15
2.5 建筑行业	18
三、政策的成本及社会效益评估结果	19
四、政策整体评估结果	22
4.1 政策减排潜力分析	22
4.2 政策成本效益分析	23
4.3 按政策类型分类的减排潜力分析.....	25
4.4 按减排途径分类的减排潜力分析.....	25
4.5 按行业分类的减排潜力分析.....	27
五、政策建议	28
5.1 碳定价.....	28

5.2 持续提高可再生能源装机目标/可再生能源配额制.....	29
5.3 强化建筑节能标准	29
5.4 降低工业产品需求量.....	30
5.5 减少工业过程温室气体排放.....	30

执行摘要

本报告为国家应对气候变化战略研究和国际合作中心 (NCSC)、国家发改委能源研究所 (ERI) 及美国能源创新 (Energy Innovation , EI) 的联合研究成果，旨在识别中国的哪些能源与气候政策能够以最具成本效益的方式推动减排。

由以上三个机构构成的课题组合作开发了一套系统动力学模型，即“能源政策模拟模型” (EPS 模型)，识别并评估了 35 项气候、能源和环境政策对各类指标的综合影响，这些指标包括 CO₂ 和 PM_{2.5} 排放、各类能源消费量、现金流变化、因避免公众健康影响及气候变化而带来的货币化社会效益。课题组通过 EPS 模型测试了 10,000 多个情景，从而识别出了能够实现中国相关低碳目标的最具有减排效益的政策组合。课题组在研究报告中着重对两个情景进行了分析研究 (即低碳情景及强化低碳情景)，此外还讨论了参考情景及理论最强政策情景。

政策设计原则

制定能源与气候政策主要通过以下三种方式：法规管控 (如，绩效标准)、经济激励 (如，燃油税或碳税) 及研发支持。在制定相关政策时还应考虑预期政策成果、当地条件及市场状况。如果政策设计得当，这些政策可相互补充，加速新技术的部署，同时降低成本。

最成功的能源与气候政策制定往往基于以下 9 个原则：

1. 保证**持续完善**，确保政策一致性 & 执政效果的不断改善；
2. 设定**明确目标**以促进创新，并由市场决定达成目标的最佳方案；

3. **对实际效果进行奖励**，而非对投资进行奖励，这将为企业甚至全社会寻找最佳方案提供灵活性；
4. 政策设计应**随时间进行不断调整**，并配备以有效的政策测量、评估及调整计划；
5. 力争在**新基础设施设计及建设时期**引导投资，而非在基础设施建成并投运后再对其进行改造或替换；
6. 关注制造过程的上游部门，政策作用对象应**覆盖 100%市场**；
7. 政策**尽量广泛覆盖各类碳排放源**，减少“碳泄漏”，并识别最低成本的减排对象；
8. 确保政府的执政部门拥有充足的资金和人力资源，同时拥有执政的充分权限；
9. 促进**私营部门投资**和创新。

合理应用以上原则将推动政策的有效实施，并有助于降低成本、加速创新，为中国带来社会和经济效益。评估政策效果是政策设计的重要组成部分，不仅能使有限资源得到有效利用，还能对新政进行检验，从而为政策制定者不断优化完善相关政策提供有用信息。本报告详细阐述了最佳的政策评估指标及开展评估的最佳时机。

模型概述

EPS 模型是以中国政府官方数据为基础，对 35 项能源与气候政策效果及其相互作用进行评估的计算程序。可通过模型输出多项指标，包括 9 种不同污染物排放量、分行业分能源品种的能源消费量、电力装机容量及发电量、资本设备与运行维护支出变化等。

该模型划分了五个行业，即电力行业、工业行业、交通运输行业、建筑行业及区域供热行业。模型以 NCSC 和 ERI 提供的情景研究数据及其它出版研究数据构建了**参考情景 (RS)**，并以该情景作为其它政策情景比较的基准。参考情景充分考虑了已有的政策措施

及其可能效果而不考虑新政策，并纳入了影响未来燃料使用和排放的近期新政。例如，该情景中考虑了中国 2015 年轻型车燃油经济性标准，并使轻型车燃油经济性在模型运行周期内不断提高。

当用户操作模型并改变相关政策设置时，将构建形成新情景，并进而分析新情景相对于参考情景的变化¹。对于本模型而言，最有效的情景分析方式是评估某些关键指标在新情景与参考情景之间的差异，而非分析这些指标在新情景在某一年的绝对值。

按照政策制定者的实际要求，本研究进行了数千次的模型模拟，在此基础上重点分析了两种政策组合情景，即低碳情景及强化低碳情景。本模型中各个情景均采用了相同的 GDP 增长率等外生变量，各情景之间的差异主要在于不同政策是否实施以及同一政策的实施程度（例如，两类情景可能均采用了碳定价政策，但各情景的碳价值不同）。本报告着重分析的两种政策情景如下：

低碳情景 (LC)：由 NCSC 和 ERI 共同构建，在该情景中采用了能够使 CO₂ 排在 2030 年左右达到峰值的相关措施。

强化低碳情景 (ALC)：由 EI 构建，在该情景中采用了能够使 CO₂e 排放（包括非 CO₂ 温室气体，涵盖类型见下）在 2030 年达到峰值的相关措施，以及能够使 CO₂ 排放尽早达到峰值的相关措施，并更加关注成本效益。两个情景的具体政策将在下文展开分析。

¹ 模型涵盖年份为 2013 年至 2030 年，政策作用从 2013 年开始实施，并可实现 2013 年至 2030 年逐年的结果输出。如果政策在 2016 年开始实施，则峰值年份及其它结果可能出现在模拟期之后。

除了对以上两项情景进行着重分析，EI 还构建了**理论最强政策情景**（SIOP），即采取了国际上已有的最强政策组合，该情景下所有政策设置均为国际上的最佳实践水平。值得注意的是，该情景仅表示采取了最强政策组合后，理论上可实现的最低温室气体排放水平，并非推荐的政策情景，因而在报告中提及了该情景，但并未对其进行详细分析。

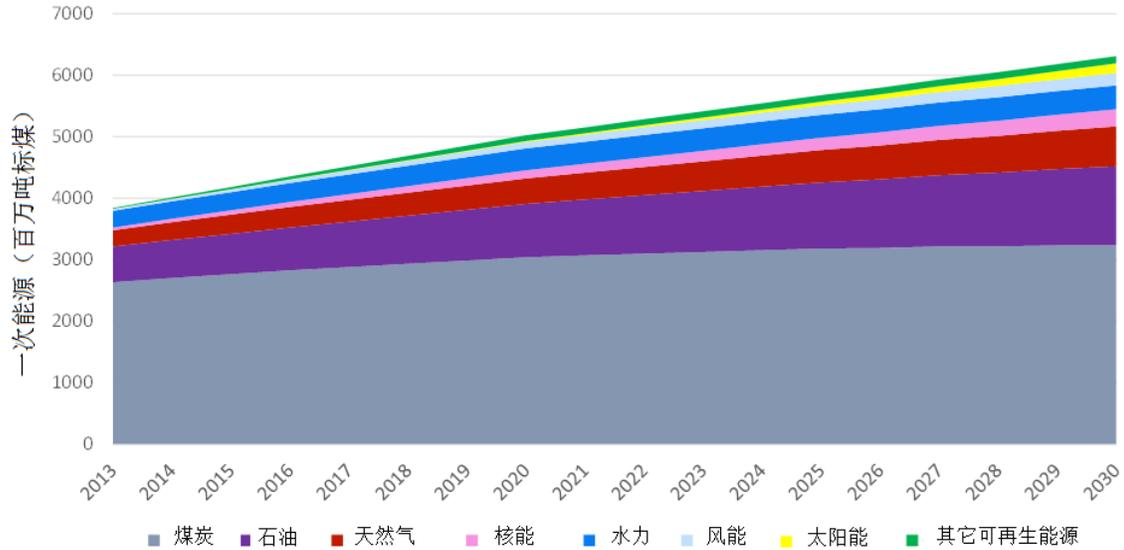
在本报告中所论及的 CO₂ 排放均指能源燃烧带来的 CO₂ 排放，而 CO₂e 排放包括的温室气体为：二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、挥发性有机化合物（VOC）、一氧化碳（CO）、含氟气体（包括 HFCs 等）及一氧化二氮（N₂O）。本报告中的 CO₂e 排放包括建筑、交通、电力和工业行业燃料燃烧导致的直接排放，及水泥生产等工业过程排放，但不包括土地利用、土地利用变化及林业（LULUCF）排放，也不包括 EPS 模型未覆盖的行业（如建造施工行业）的排放。

一、情景分析

1.1 参考情景

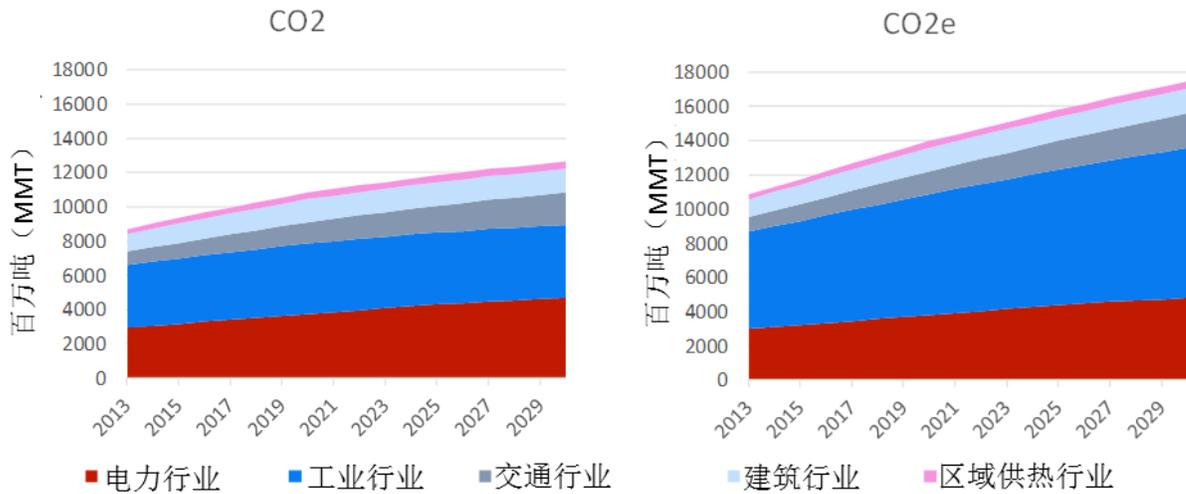
在参考情景下，CO₂ 排放量从 2013 年的 86.84 亿吨增加到 2030 年的 126.50 亿吨，CO₂e 排放量从 2013 年的 108.41 亿吨增加到 2030 年的 174.68 亿吨。

在参考情景下，如图表 1 所示，一次能源总消费量从 2013 年的 38.43 亿吨标煤增加到 2030 年的 63.11 亿吨标煤。尽管煤炭在一次能源消费中的比重从 2013 年的 69% 下降到 2030 年的 51%，但煤炭消费总量从 26.35 亿吨标煤增加到了 32.40 亿吨标煤。石油及天然气消费量分别从 2013 年的 5.81 及 2.63 亿吨标煤增加到 2030 年的 12.81 及 6.47 亿吨标煤。



图表 1 参考情景下的一次能源消费量

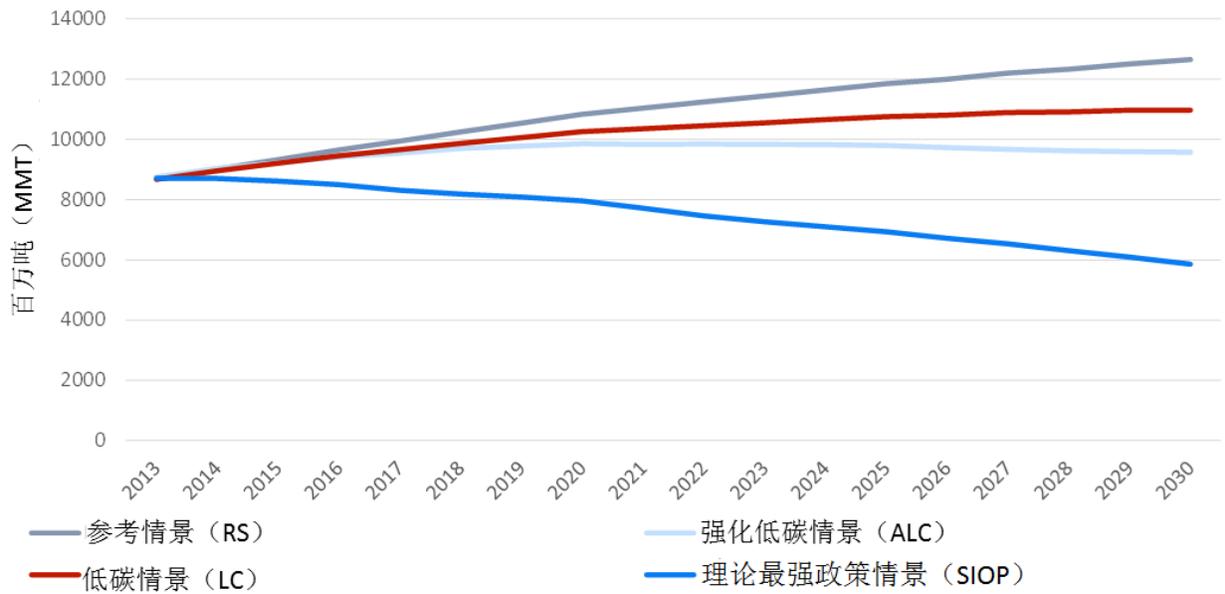
对于不同行业的排放，本报告将直接排放温室气体的行业作为排放源，如工业行业电力消费所产生的 CO₂ 排放量统计为电力行业排放，而非统计为工业行业排放。如图表 2 所示，对于参考情景的 CO₂ 排放来说，电力行业为最主要的 CO₂ 排放源，其排放占 2030 年总排放量的 37%。对于 CO₂e 排放来说，工业行业仍为最主要的 CO₂e 排放源，其排放占 2030 年总排放量的 50%。



图表 2 参考情景下各行业 CO2 及 CO2e 排放

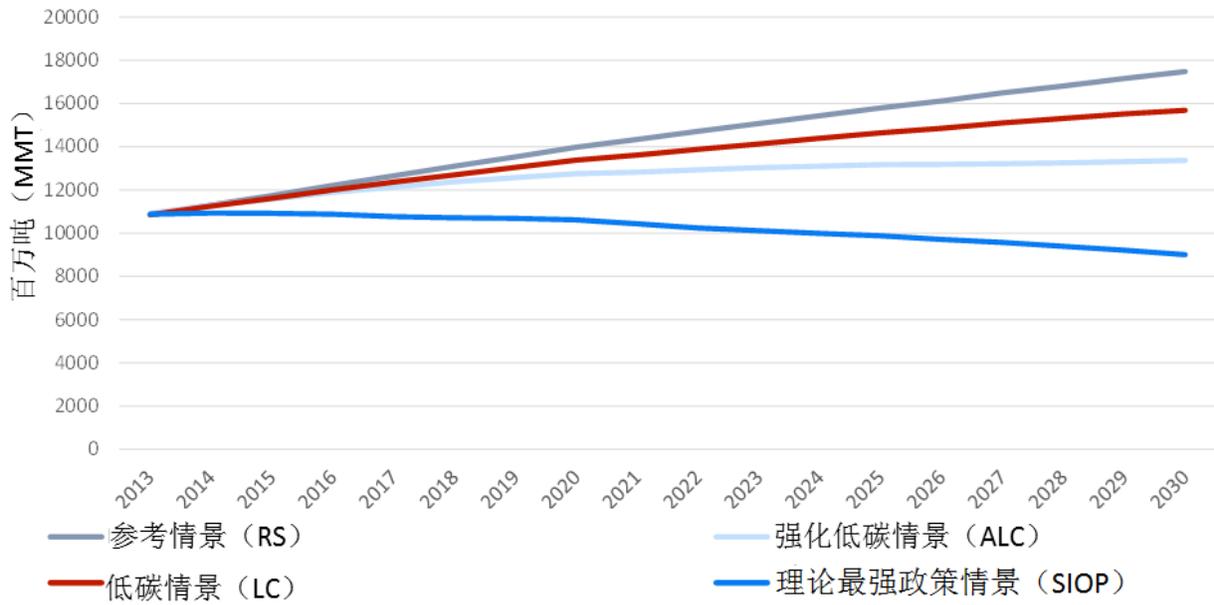
此外，参考情景下的 PM_{2.5} 排放从 2013 年的 2.6 百万吨增加到 2030 年的 3.0 百万吨，NO_x 排放从 2013 年的 14.9 百万吨增加到 2030 年的 22.9 百万吨。SO_x 排放也呈继续增长趋势，从 2013 年的 15.5 百万吨增加到 2030 年的 19.4 百万吨。

1.2 政策情景



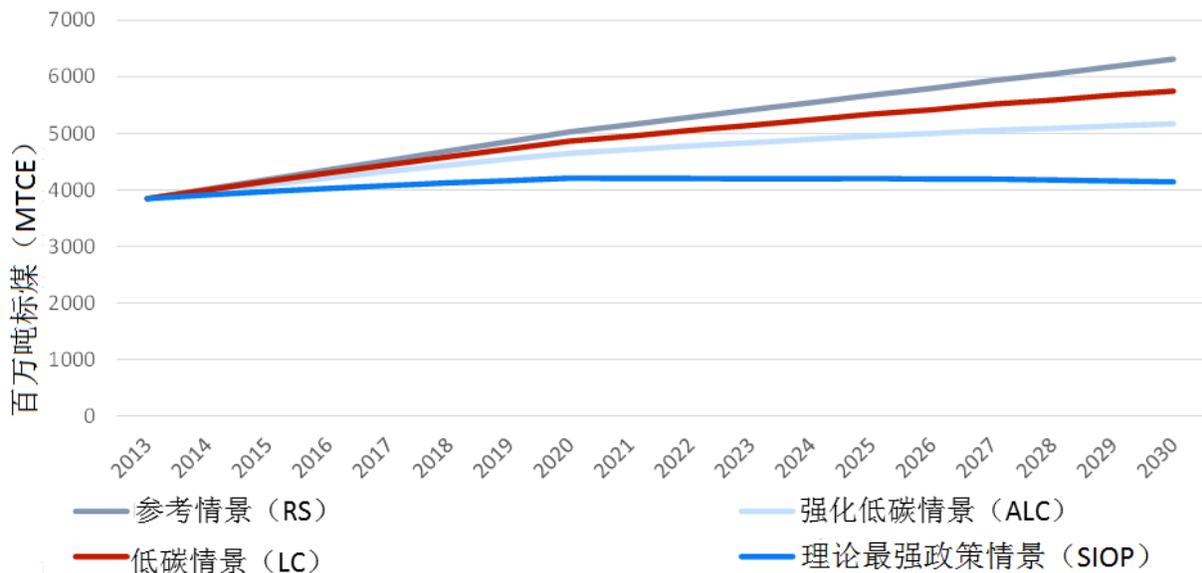
图表 3 各情景下的能源燃烧 CO2 排放

对于 CO₂ 排放量，在低碳情景下，CO₂ 排放将于 2029 年达到峰值，峰值水平 109.77 亿吨，到 2030 年将减少到 109.73 亿吨。在强化低碳情景下，CO₂ 排放将于 2022 年达到峰值，峰值水平 98.45 亿吨，到 2030 年将减少到 95.75 亿吨。在理论最强政策情景下，CO₂ 排放已在 2013 年达到峰值，峰值水平为 87.10 亿吨。



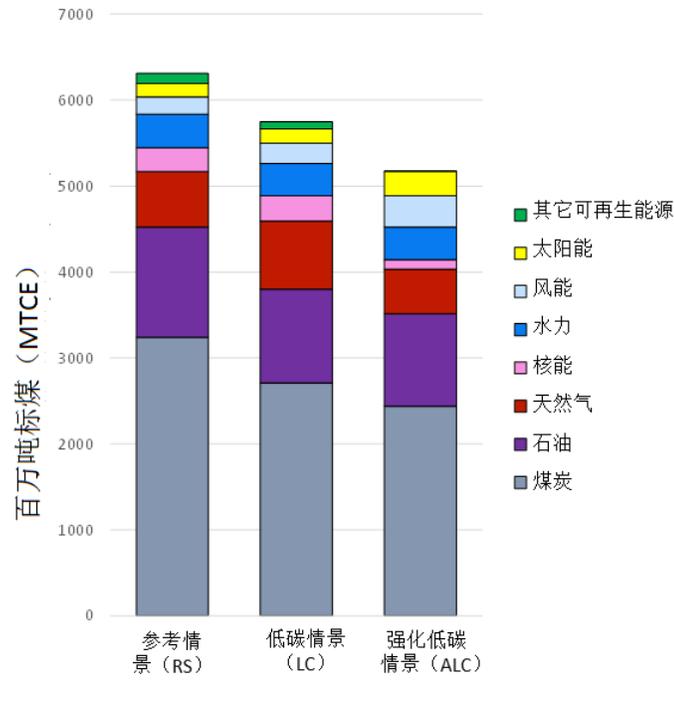
图表 4 各情景下的 CO₂e 排放 (包括工业过程排放)

对于 CO₂e 排放量，在低碳情景下，CO₂e 排在 2030 年前无法达到峰值，到 2030 年排放量将增加到 156.77 亿吨。在强化低碳情景下，CO₂e 排放将在 2030 年达到峰值，峰值水平 133.50 亿吨。在理论最强政策情景下，CO₂e 排放将于 2014 年 (由模型模拟得出的第一个年份) 达到峰值，峰值水平为 109.29 亿吨。



图表 5 各情景下一次能源消费量

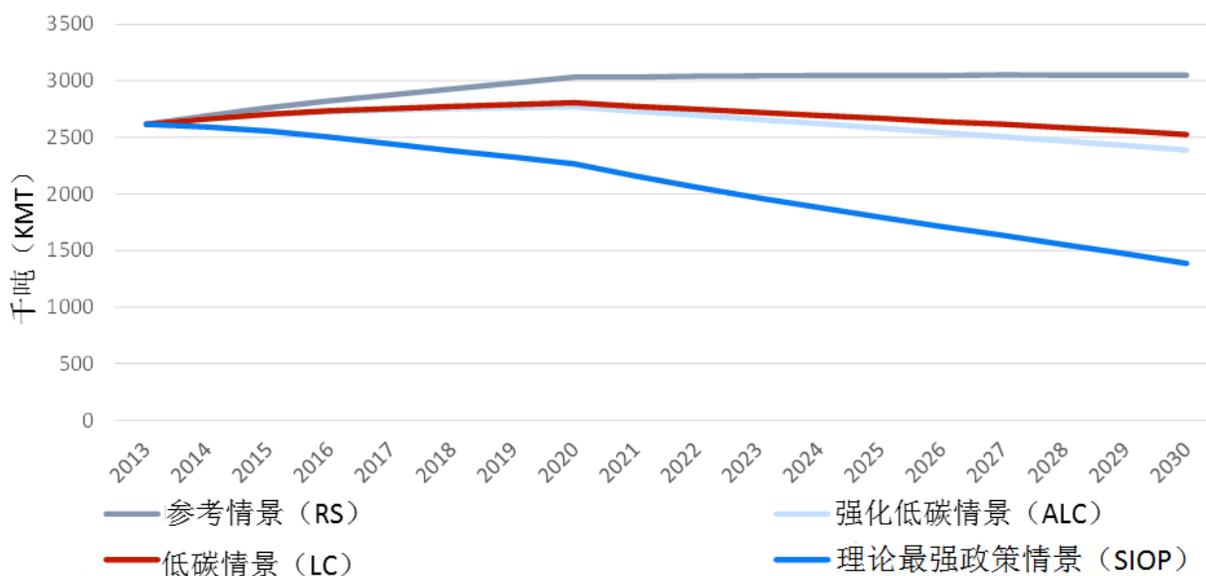
对于一次能源消费量及结构，低碳情景和强化低碳情景下的一次能源消费在模型模拟期内保持继续增长，到 2030 年分别增至 57.50 和 51.71 亿吨。到 2030 年，煤炭在一次能源消费中的比重从参考情景下的 51% 下降到低碳情景和强化低碳情景下的 47%，非化石能源在一次能源消费中的比重从参考情景下的 18% 增加到低碳情景和强化低碳情景下的 20% 和 22%。此外，到 2030 年，在低碳情景和强化低碳情景下，天然气的比重分别达到 13.7% 和 10%，风能分别达到 4% 及 7%，太阳能分别达到 3% 及 5%，水能分别达到 6% 及 7%，核能分别达到 5% 及 2%。



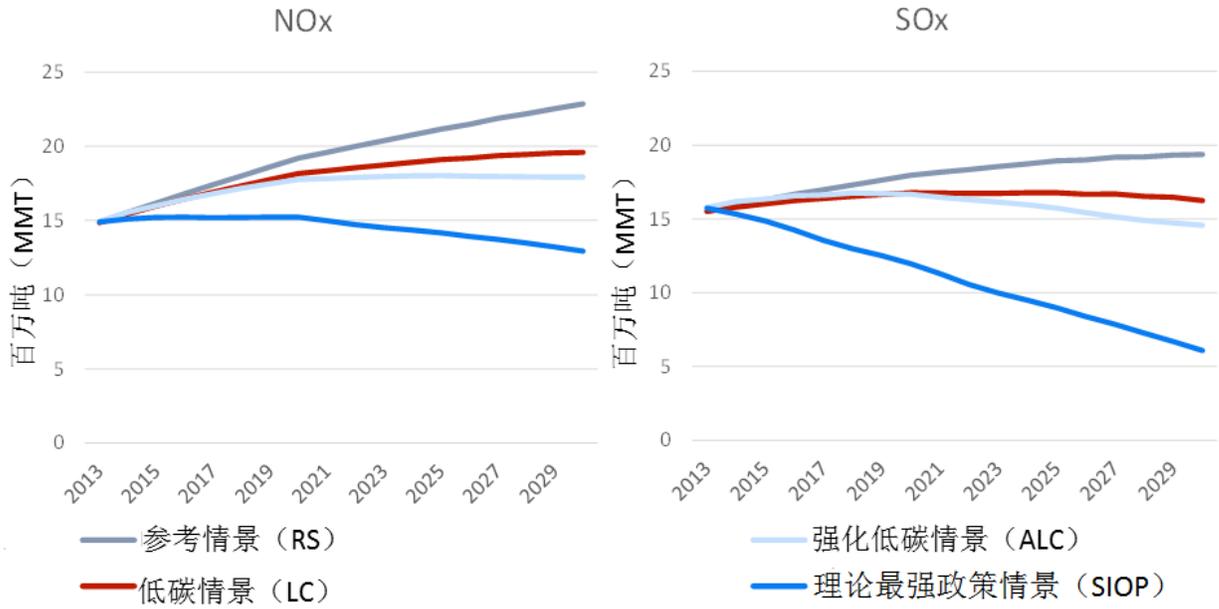
图表 6 2030 年各情景下一次能源消费量及结构

对于常规污染物排放，在低碳情景和强化低碳情景下，PM_{2.5} 排放均显著降低，在低碳情景下，PM_{2.5} 排放将于 2020 年达到峰值，峰值水平 2.8 百万吨，并在 2030 年减少到

2.5 百万吨。在强化低碳情景下，PM_{2.5} 排放也将于 2020 年达到峰值，峰值水平 2.8 百万吨，并在 2030 年减少到 2.4 百万吨。在低碳情景下，NO_x 排放继续增长，到 2030 年达到 19.6 百万吨。在强化低碳情景下，NO_x 排放将于 2025 年达到峰值，峰值水平 18.0 百万吨，到 2030 年略有下降。在低碳情景下，SO_x 排放将于 2020 年达到峰值，峰值水平 16.8 百万吨，并在 2030 年减少到 16.2 百万吨。在强化低碳情景下，SO_x 排放将于 2018 年达到峰值，峰值水平 16.7 百万吨，并在 2030 年减少到 14.6 百万吨。



图表 7 各情景下 PM_{2.5} 排放



图表 8 各情景下 NOx 及 SOx 排放

二、分行业政策评估结果

2.1 跨行业

本研究考虑了多项跨行业政策，通过分析政策所能够实现的减排量，分析单项跨行业政策的减排贡献。研究结果显示，无论在低碳情景还是强化低碳情景下，碳定价都是减排潜力最大的政策。在低碳情景下，若碳价格在 2030 年达到 63 元/吨，则该政策在 2030 年对于 CO₂e 的减排贡献为 90.65%²。在强化低碳情景下，若碳价格在 2030 年达到 252 元/

² 本报告中的减排分析反映了低碳情景和强化低碳情景下，单项政策在其它政策配合下所产生的减排效果。欲了解更多信息，请参见总报告中的行业分析部分。

吨，则减排贡献为 96.51%。图表 9 列出了两个情景下各项跨行业政策的减排贡献及对应的减排成本。

图表 9 跨行业政策减排贡献与成本效益

低碳情景		
政策	2030 年减排贡献 (CO _{2e})	成本/吨 (元/吨 CO _{2e})
碳定价	90.65%	1,274
汽、柴油消费税	7.73%	5,239
加快部署碳捕集与封存 (CCS)	1.62%	95
强化低碳情景		
政策	2030 年减排贡献 (CO _{2e})	成本/吨 (元/吨 CO _{2e})
碳定价	96.51%	1,609
取消化石燃料补贴	3.49%	5,811

由上表可见，其它跨行业政策在两种情景下的减排贡献均较小。在低碳情景下，汽、柴油消费税和加快部署 CCS 的减排贡献仅为 7.73%和 1.62%。在强化低碳情景下，取消化石燃料补贴的减排贡献仅为 3.49%。

需要说明的是，单项政策的减排潜力取决于该政策在情景下的政策力度，而不同情景下对于政策力度的设置是存在显著差异的。如图表 9 所示，碳定价在低碳情景中设定为 63 元/吨，而在强化低碳情景下设定为 252 元/吨，相应产生了不同的减排贡献。政策力度设置差异同样表现在下文所论述的分行业政策分析中。因此，需要特别强调，政策对于减排的有效性同时取决于政策本身的减排效力及相应情景下所设定的政策力度。

2.2 电力行业

电力行业是 2013 年中国 CO₂ 和 CO₂e 排放的第二大排放行业³。在参考情景下，到 2030 年，电力行业的 CO₂ 和 CO₂e 排放将分别增加至 46.93 亿吨和 47.82 亿吨（EPS 模型将直接排放温室气体的行业作为排放源）。2030 年，煤电仍然是主要电力来源，占届时总装机容量（2.5 TW）的 50%，即约为 1.2 TW。核电、水电、太阳能发电、风电和生物质能发电装机容量将分别达到 111 GW、387 GW、299 GW、362 GW 和 40 GW，天然气发电装机容量达到 41 GW。

在低碳情景下，电力行业 CO₂e 排放将增至 41.10 亿吨，CO₂ 排在 2029 年达到峰值，峰值水平 41.88 亿吨。煤炭装机容量增长显著低于参考情景水平，在 2030 年达到 1.1 TW。天然气发电装机容量增长快于参考情景，2030 年达到 88 GW。此外，到 2030 年，核电、水电、太阳能发电、风电和生物质能发电装机容量将分别达到 117 GW、377 GW、420 GW、329 GW 及 29 GW。

在强化低碳情景下，电力行业的 CO₂ 排放将于 2029 年达到峰值，峰值水平 41.12 亿吨，而 CO₂e 排在 2018 年达到峰值，峰值水平 33.4 亿吨，并在 2030 年逐步下降到 31.40 亿吨。煤炭装机容量在模型运行期内基本维持缓慢增长，从 2013 年的 747 GW 增至 2030 年的 803 GW，装机容量较参考情景显著降低，且差额基本由可再生能源电力替代。到

³电力行业的 CO₂e 排放包括发电厂燃料燃烧产生的非 CO₂ 气体排放，主要为 CO 和 NO_x。与 CO₂ 排放相比，这些非 CO₂ 气体排放仅占极小一部分，而电力行业 CO₂e 排放的 98% 以上均为 CO₂ 排放。

2030 年，水电、太阳能光伏、光热、风电装机容量将分别达到 380 GW、630 GW、22 GW 及 630 GW。核能装机容量增至 44 GW，天然气发电装机容量到 2030 年降至 22 GW。

低碳情景中，通过实施强制性天然气发电装机容量控制目标，可实现中国到 2020 年天然气消费量在一次能源消费中的占比达到 10% 以上的目标。然而，强化低碳情景的设定更侧重于具有成本效益的减排政策，而大幅度提高天然气装机容量并实现目标会提高整体政策成本。因此，在强化低碳情景下，天然气消费量在一次能源消费中的比重仅达到 8.3%，并没有实现中国已提出的 2020 年天然气占比目标。

图表 10 电力行业政策减排贡献与成本效益

低碳情景		
政策	2030 年减排 (CO _{2e})	成本/吨 (元/吨 CO _{2e})
电力装机容量控制目标	89.04%	68
风电补贴	5.67%	64
天然气发电补贴	3.74%	1682
延长核电厂运行年限	1.52%	-156
延长水力发电厂运行年限	0.03%	-136
强化低碳情景		
政策	2030 年减排 (CO _{2e})	成本/吨 (元/吨 CO _{2e})
可再生能源配额制	96.32%	131
提前淘汰燃煤电厂	3.68%	278

图表 10 分别列出两种情景中电力行业单项政策的减排贡献 (针对电力行业政策所能实现的总减排量) 及对应的减排成本。低碳情景下，减排潜力最高的电力行业政策是强制性电力装机容量目标政策，CO_{2e} 减排贡献率达到 89.04%。风电和天然气发电补贴的减排贡献相对较小，仅为 5.67% 和 3.74%。

强化低碳情景中，可再生能源配额制是减排潜力最高的政策，CO₂e 减排贡献率是 96.32%。可再生能源配额制与强制性电力装机容量目标政策有一定的相似性，但更侧重于成本效益，并由市场决定非化石电力发电量。提前淘汰燃煤电厂的减排贡献率相对较小，仅为 3.68%。此外，在提高可再生能源电力占比的相关政策配合下，改善电网灵活性的各项政策（包括需求响应、输电或储能等）会更具有成本效益并能提高减排量。

2.3 工业行业

工业行业是 2013 年中国 CO₂ 和 CO₂e 排放的最大排放源⁴。参考情景下，工业行业 CO₂ 排放和 CO₂e 排放分别从 2013 年的 36.46 亿吨和 56.77 亿吨增加到 2030 年的 42.42 亿吨和 87.96 亿吨。

低碳情景和强化低碳情景下，工业行业 CO₂ 排放均在 2020 年达到峰值，其峰值水平分别为 39.66 亿吨和 37.81 亿吨。此外，参考情景中的工业行业 CO₂e 排放在 2013 至 2030 年间出现快速增长，因此尽管采取了相关工业行业减排政策，到 2030 年低碳情景和强化低碳情景的工业行业 CO₂e 排放仍未达峰，并分别增长至 83.13 亿吨和 69.26 亿吨。

图表 11 工业行业政策减排与成本效益

低碳情景		
政策	2030 年减排 (CO ₂ e)	成本/吨 (元/吨 CO ₂ e)

⁴ 工业行业的 CO₂e 排放包括：直接燃料燃烧排放和工业过程排放。其中，CO₂ 排放占直接燃料排放的 CO₂e 的 98% 以上。工业过程排放包括：石油和天然气工业的 N₂O 和 CH₄ 排放、化工生产过程的 N₂O、CH₄ 和含氟气体排放、废物处理和管理过程的 N₂O 和 CH₄ 排放、其它行业（半导体、铝、镁、平板显示器和光伏制造等）及工业行业供电系统的含氟气体排放。在所有工业过程排放中，CO₂ 占比 63%，含氟气体占比 23%，CH₄ 占比 14%，N₂O 占比 0.6%。

工业燃料替代	71.00%	2,847
提高工业设备能效	29.00%	-1,289
强化低碳情景		
<i>政策</i>	<i>2030 年减排 (CO₂e)</i>	<i>成本/吨 (元/吨 CO₂e)</i>
降低工业产品需求量	31.51%	-157
避免非甲烷非 CO ₂ 温室气体排放	30.32%	68
提高工业设备能效	30.30%	-1,202
提前淘汰落后工业产能	5.58%	-1,238
工业燃料替代	2.29%	2,858

图表 11 分别列出两种情景中工业行业单项政策的减排贡献率 (针对工业行业政策所能够实现的总减排量) 和减排成本。低碳情景下，减排潜力最高的工业行业政策为工业燃料替代，即工业行业的煤改气及煤改电，其减排贡献达到 71%，而提高工业设备能效的减排贡献达到 29%。

强化低碳情景下，减排潜力最高的三项政策分别是降低工业产品需求量、避免非甲烷非 CO₂ 温室气体排放和提高工业设备能效，其减排贡献分别为 31.51%、30.32%及 30.30%。提前淘汰落后产能和工业燃料替代的减排贡献相对较小，分别仅为 5.58%和 2.29%。

2.4 交通行业

考虑未来交通出行需求持续提高，各情景下交通行业 CO₂ 排放和 CO₂e 排放将保持持续增长态势⁵。但与参考情景相比，低碳情景和强化低碳情景下各项交通政策的实施仍带来了大幅减排。参考情景下交通行业 2030 年的 CO₂ 排放和 CO₂e 排放分别为 18.94 亿吨和

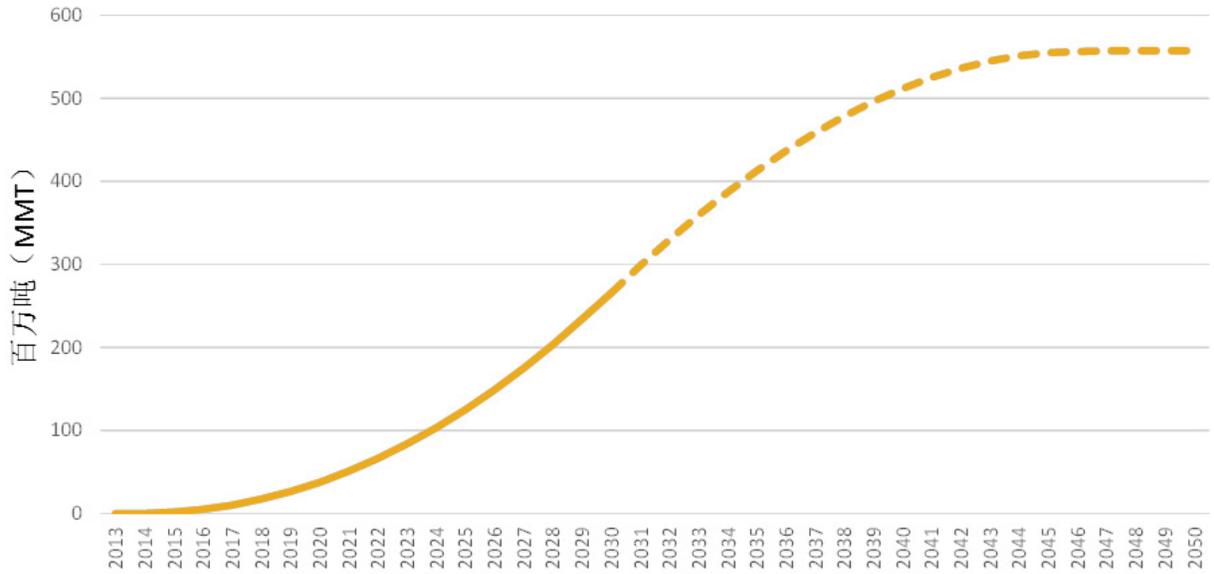
⁵ 交通运输行业的 CO₂e 排放包括：由燃料燃烧带来的 CO₂、VOCs、CO、NO_x、CH₄ 和 N₂O 排放。其中，CO₂ 占 CO₂e 排放的 93%左右，其次分别为 CO (占比 2.9%)、NO_x (占比 2.8%)、VOCs (占比 0.8%)、CH₄ (占比 0.2%) 和 N₂O (占比 0.2%)。

20.36 亿吨；低碳情景下，分别降低至 15.37 亿吨和 16.51 亿吨；强化低碳情景中，分别降低至 15.86 亿吨和 17.04 亿吨。

图表 12 交通行业政策减排与成本效益

低碳情景		
政策	2030 年减排 (CO _{2e})	成本/吨 (元/吨 CO _{2e})
提高重型车和轻型车燃油经济性	83.82%	-2,673
提高轻型车和重型车的电气化水平	12.76%	873
交通需求管理	3.43%	-2,779
强化低碳情景		
政策	2030 年减排 (CO _{2e})	成本/吨 (元/吨 CO _{2e})
提高重型车和轻型车燃油经济性	96.35%	-2,674
交通需求管理	3.65%	-2,781

图表 12 分别列出两种情景中交通行业单项政策的减排贡献率（针对交通行业政策所能够实现的总减排量）和减排成本。低碳情景下，提高重型车和轻型车燃油经济性是交通行业减排潜力最高的政策，其减排贡献达到 83.82%；其次分别为提高轻型车和重型车的电气化水平和交通需求管理，减排贡献分别为 12.76%和 3.43%。强化低碳情景下，提高重型车和轻型车燃油经济性对交通运输行业的 CO_{2e} 减排贡献达到 96.35%，交通需求管理的减排贡献则为 3.65%。在强化低碳情景下，提高重型车和轻型车燃油经济性对交通运输行业的 CO_{2e} 减排贡献达到 96.35%，交通需求管理的减排贡献则为 3.65%。



图表 13 交通行业燃油经济性政策在 2030 年后释放的 CO₂ 减排效果

需要强调的是，许多交通行业政策的减排效果在 2030 年前不会完全体现，而是在 2030 年之后的一段时间才会完全释放。原因在于，燃油经济性政策是分阶段逐步实施的，即直到 2030 年政策才逐步达到情景设置的执行力度。且机动车平均使用年限一般为 16 年，即使 2030 年销售的新车均达到燃油经济性标准，整个交通行业机动车的燃油经济性也只有在 2030 年后的很长一段时间才会达到规定的标准水平。可见，即使从模型模拟初期便开始提升燃油经济标准，在 2030 年之前也仅能发挥一半的减排潜力（见图表 13）。

2.5 建筑行业

参考情景中，到 2030 年，建筑行业的 CO₂ 排放和 CO₂e 排放将继续增长，分别达到 13.85 亿吨和 14.10 亿吨⁶。低碳情景下，建筑行业的 CO₂ 排放和 CO₂e 排放都在 2020 年达到峰值，分别为 12.41 亿吨和 12.44 亿吨。强化低碳情景下，建筑行业的 CO₂ 排放和 CO₂e 排放也会在 2020 年达到峰值，分别为 12.83 亿吨和 13.07 亿吨。与提高机动车燃油经济性相似，由于存量建筑和电器的更新缓慢，2030 年之前实施的建筑节能标准需要 2030 年之后许多年才会充分释放政策减排效果。

图表 14 建筑行业政策减排与成本效益

低碳情景		
政策	2030 年减排 (CO ₂ e)	成本/吨 (元/吨 CO ₂ e)
强化建筑节能标准	56.01%	-1,076
加快既有建筑节能改造	22.31%	-910
强化电器能效标识制度	10.30%	-1,015
加强建筑人员的培训教育	7.58%	-911
强化电器能效标准	3.80%	-1,640
强化低碳情景		
政策	2030 年减排 (CO ₂ e)	成本/吨 (元/吨 CO ₂ e)
强化建筑节能标准	66.44%	-1,079
加快既有建筑节能改造	22.30%	-929
强化电器能效标准	11.26%	-1,567

图表 14 分别列出两种情景中建筑行业单项政策的减排贡献率 (针对建筑行业政策所能够实现的总减排量) 和减排成本。低碳情景下，减排潜力最高的建筑行业政策为强化建

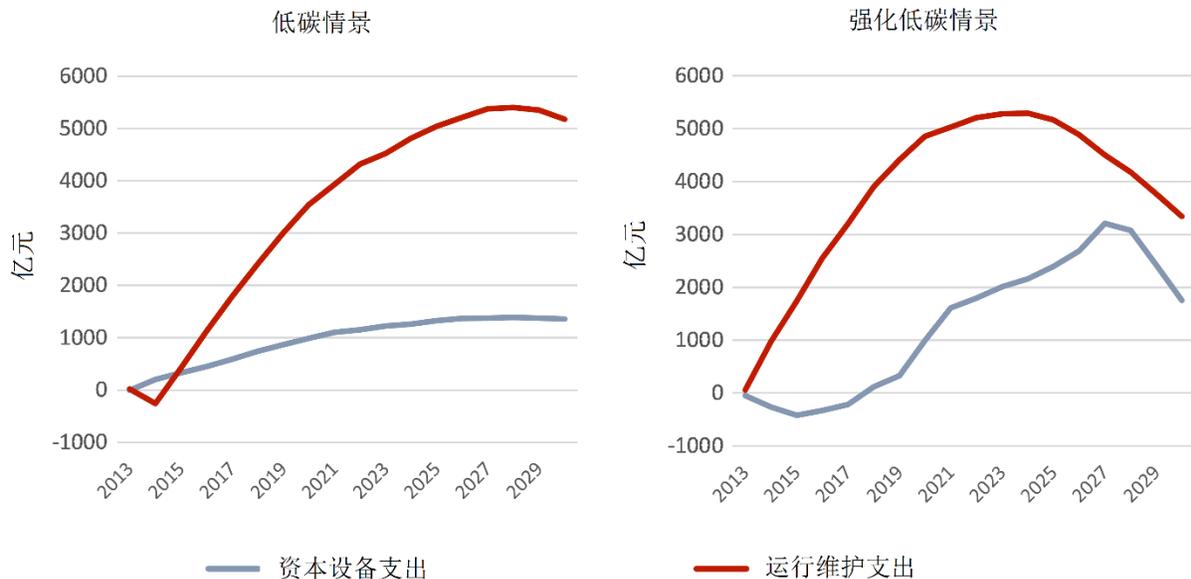
⁶建筑行业 CO₂e 排放包括：直接燃料燃烧产生的 CO₂、CO、NO_x、CH₄ 和 N₂O 排放。其中，CO₂ 在建筑行业 CO₂e 排放中的占比达到 98%。

筑节能标准，其减排贡献达到 56.01%；其次是加快既有建筑节能改造，其减排贡献为 22.31%。强化电器能效标识制度、加强建筑人员的培训教育、强化电器能效标准等政策对建筑行业的减排贡献较小，分别仅为 10.30%、7.58%和 3.80%。

强化低碳情景中，强化建筑节能标准同样为减排潜力最高的建筑行业政策，其减排贡献达到 66.44%；其次分别为加快既有建筑节能改造和强化电器能效标准，其减排贡献分别为 22.30%与 11.26%。

三、政策的成本及社会效益评估结果

EPS 模型可实现对于每种政策情景下的现金流变化的追踪及评估。尽管现金流可通过许多不同方法进行评估，但在本报告中着重关注两个输出指标，第一个指标追踪政策实施导致的资本设备支出变化，如新建发电厂或建筑供暖系统带来的支出变化；第二个指标追踪政策实施导致的运行维护支出变化，即燃料使用和劳务税带来的支出变化，其中前者在运行维护支出中的占比显著高于后者。此外，模型评估的资本设备支出和运行维护支出均考虑了税务带来的支出，且均未考虑政府补贴带来的支出。需要特别说明的是，在模型中仅考虑了补贴类政策为行业 and 消费者带来的支出降低，而没有考虑政府为企业和消费者支付的资金，这意味着在模型中的补贴类政策仅会降低支出。另一需要特别说明的是，模型评估的所有支出变化均为参考情景与所评估情景之间支出变化的差值，具体数值并不代表政策的总支出，而仅代表相对于参考情景由于政策的实施带来的支出变化。



图表 15 各情景下的资本设备支出及运行维护支出

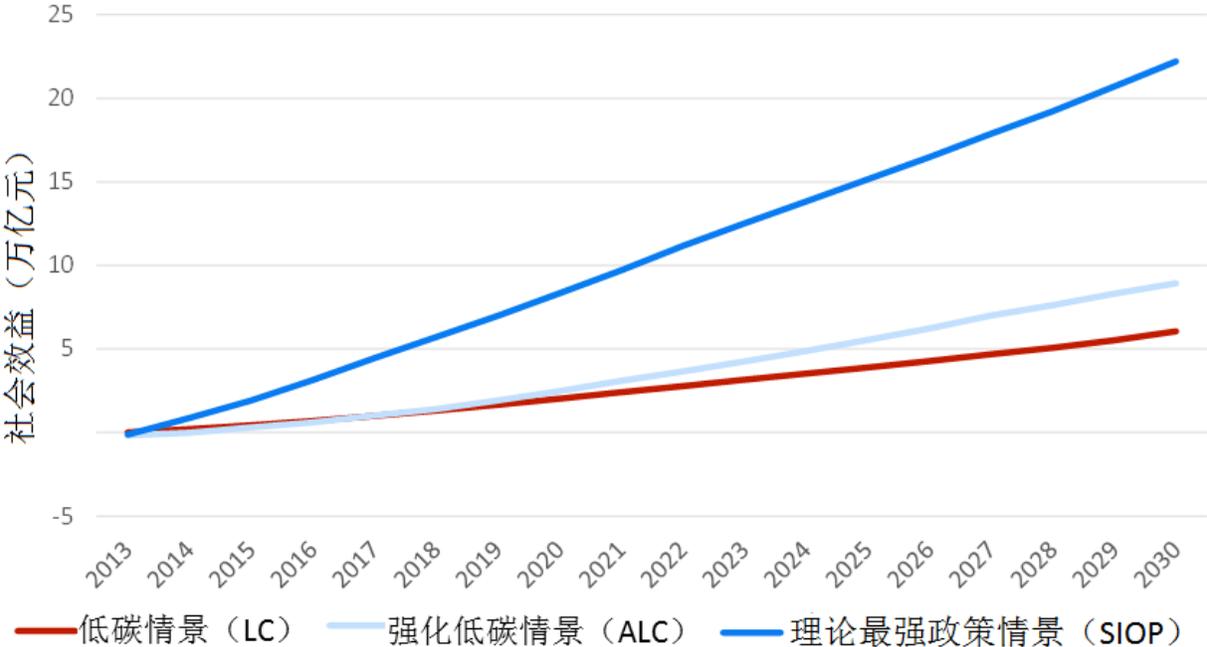
到 2030 年，低碳情景下由于政策的实施带来的资本设备支出增量为 1360 亿元⁷，运行维护支出增量到 2028 年达到峰值，峰值水平 5400 亿元，并在 2030 年降低至 5180 亿元。综合而言，到 2030 年资本设备和运行维护支出的净增量达到 6540 亿元，相当于 2030 年预测 GDP 的 0.48%。

在强化低碳情景下，由于政策的实施带来的资本设备支出增量于 2024 年达到峰值，峰值水平 5290 亿元，并在 2030 年降低至 3340 亿元。运行维护支出增量到 2027 年达到峰值，峰值水平 3210 亿元，并在 2030 年降低至 1750 亿元。综合而言，到 2030 年，资本设备和运行维护支出的净增量达到 5090 亿元，相当于 2030 年预测 GDP 的 0.38%。此外，如果维持 2030 年政策不变，由于能效的提高将使得 2030 年以后（持续到 2040 年和 2050

⁷ 本报告中，除特殊说明，所有货币值均为 2012 年人民币不变价。

年)的运行维护支出有所降低,当能效政策充分发挥其效果时,届时运行维护支出增量将为负值,也就是由于政策的实施带来了净收益。

各情景下支出的差异主要来源于燃油消费税及能效标准政策的实施。低碳情景采用了针对汽油及柴油的燃油消费税政策,而强化低碳情景并未实施燃油消费税政策。强化低碳情景实施了碳定价政策,而该政策将导致燃料成本的增加,仅其一项政策的实施将使2030年的燃料费增量达到2.5万亿元,相当于届时GDP的1.8%。然而能效政策的实施将影响燃料的使用量,进而抵消大部分由于燃油税的实施而增加的燃料支出。从更长的时间尺度看,各类能效标准政策的实施,包括机动车燃油经济性标准、建筑节能标准、电器能效标准及工业能效标准,将随着时间的推移而提高能源节约水平并降低燃料使用支出,并可平抑强化低碳情景下由碳定价政策提高的燃料使用支出。



图表 16 各情景下的社会效益

EPS 模型还追踪了社会效益，本报告中的社会效益指的是由于避免颗粒物污染导致的过早死亡以及由于 CO₂e 排放带来的气候损失的货币化数值之和。由于避免颗粒物污染导致的过早死亡的货币化数值，是指以 PM_{2.5} 总减排量与单位减排量的死亡人数、单位死亡人数的经济成本的乘积，未考虑由于污染物导致的未致死疾病所带来的成本；由于 CO₂e 排放带来的气候损失的货币化数值，是指 CO₂e 总减排量与单位碳的社会成本（包含了由于全球温度升高带来的成本）的乘积，2013 年碳的社会成本为 244 元/吨，到 2030 年增加到 363 元/吨，关于社会效益的更多信息请参阅完整报告。

在低碳情景下，2030 年的社会效益增量为 6.1 万亿元，相当于 2030 年预测 GDP 的 4.5%。在强化低碳情景下，2030 年的社会效益增量为 8.9 万亿元，相当于 2030 年预测 GDP 的 6.6%。可以看出，这些货币化的社会效益显著高于相应情景下的资本设备支出及运行维护支出。

四、政策整体评估结果

4.1 政策减排潜力分析

对单项政策在全行业能够实现的减排贡献进行分析，低碳情景和强化低碳情景下，政策减排贡献排名前五的政策图表 17 所示。

图表 17 各情景下最具减排潜力的前五名政策

低碳情景		
政策	2030 年减排 (CO ₂ e)	成本/吨 (元/吨 CO ₂ e)
碳定价	27.49%	1274
强制电力装机容量目标	20.15%	68
强化建筑节能标准	16.69%	-1076

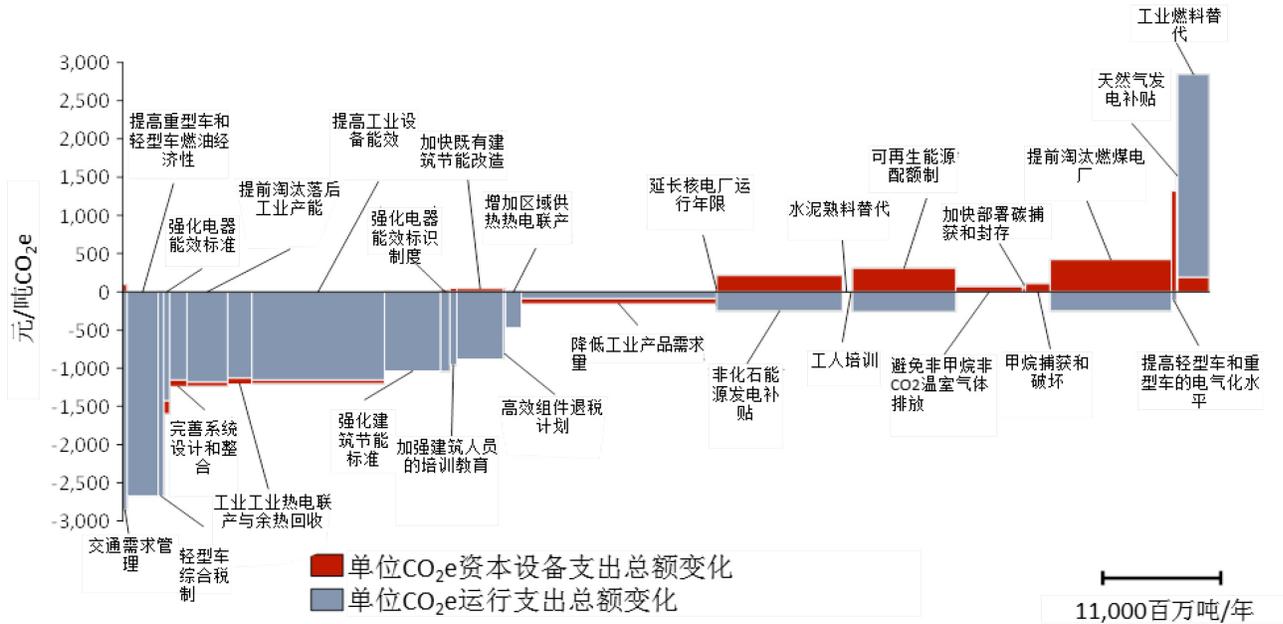
提高重型车和轻型车燃油经济性	6.72%	-2673
加快既有建筑节能改造	6.65%	-910
强化低碳情景		
<i>政策</i>	<i>2030 年减排 (CO₂e)</i>	<i>成本/吨 (元/吨 CO₂e)</i>
碳定价	32.46%	1,609
可再生能源配额制	16.54%	131
降低工业产品需求量	10.74%	-157
避免非甲烷非 CO ₂ 温室气体排放	10.34%	68
提高工业设备能效	10.33%	-1,202

低碳情景和强化低碳情景下，减排潜力最高的政策均为碳定价，其减排贡献约为 30% 左右。位居减排潜力第二位的是能够增加可再生能源装机容量及发电量的政策，分别为低碳情景下的强制性电力装机容量目标和强化低碳情景的可再生能源配额制。低碳情景下，强化建筑节能标准的减排贡献排名第三，约为 16.69%，其次是提高重型车和轻型车燃油经济性及加快既有建筑节能改造。强化低碳情景下中，降低工业产品需求量、避免非甲烷非 CO₂ 温室气体排放及提高工业设备能效三项政策减排贡献排名第三，其减排贡献率基本都约为 10%。

4.2 政策成本效益分析

通过追踪及记录温室气体排放和现金流的变化情况，EPS 模型可以评估哪些政策最具有减排潜力及成本效益。政策减排潜力已在上文进行分析，各项政策的减排成本如图表 18 所示。图表 18 将各项政策按照单位 CO₂e 减排成本（即单位减排量的资本设备支出和运行维护支出变化之和）由低到高的排序情况，位于图左侧的政策单位减排成本为负值，说明该项减排政策可带来净收益。这类政策具有减少燃料使用和低实施成本的特点，如燃油经济性标准或能效标准等政策。位于图右侧政策的单位减排成本为正值，说明该项政策需要

增加固定投资或运行维护支出，主要是定价类政策，如燃油税或碳定价等政策，这是因为排放者必须为其带来的排放直接支付费用。每项政策柱形宽度说明该项政策的减排潜力，同时需要说明的是，图表 18 主要是对单项政策的评估，并不反映政策之间的相互作用。此外，对成本效益的分析并未考虑税收类及补贴类政策，因为这些政策的成本效益直接取决于税收（或减少补贴支出）带来的收入的利用方式，不属于本模型的研究范围。



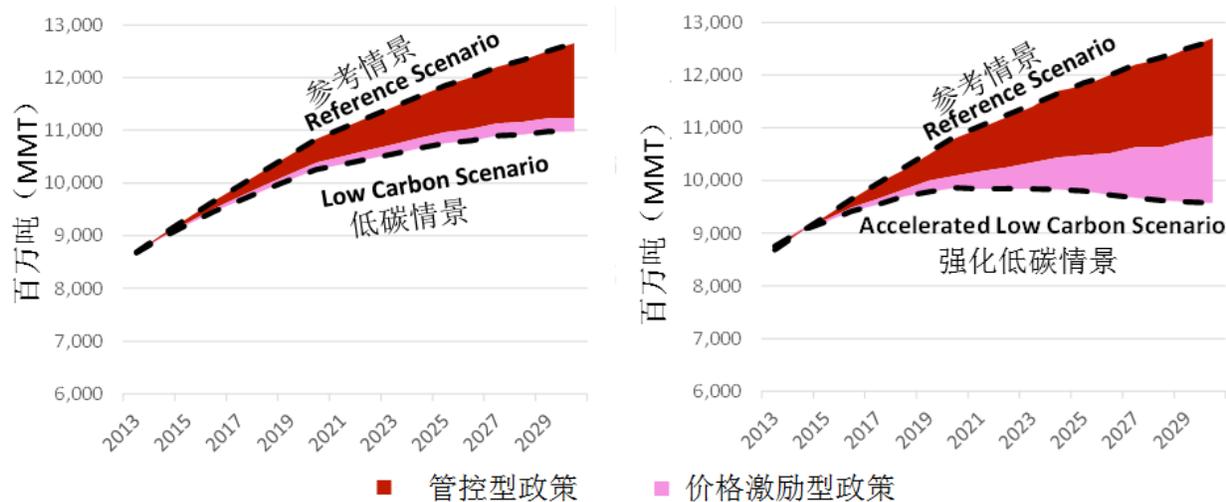
图表 18 政策减排潜力与成本效益

最具有成本效益的政策是指单位减排成本最低、减排潜力最大的政策。这些政策包括：提高重型车和轻型车燃油经济性、提前淘汰落后工业产能、提高工业设备能效、强化建筑节能标准及降低工业产品需求量。尽管图中并未显示，碳定价也具有显著的减排潜力，将在以后章节进行详细讨论。

4.3 按政策类型分类的减排潜力分析

按政策类型，本研究将所有减排政策划分为两类，即管控型政策和价格激励型政策。

管控型政策以设定标准或绩效目标为特征，包括建筑节能标准、燃油经济性标准及可再生能源配额制。价格激励型政策通过税收和补贴方式实现减排，包括碳定价、燃油税及非化石能源发电补贴。



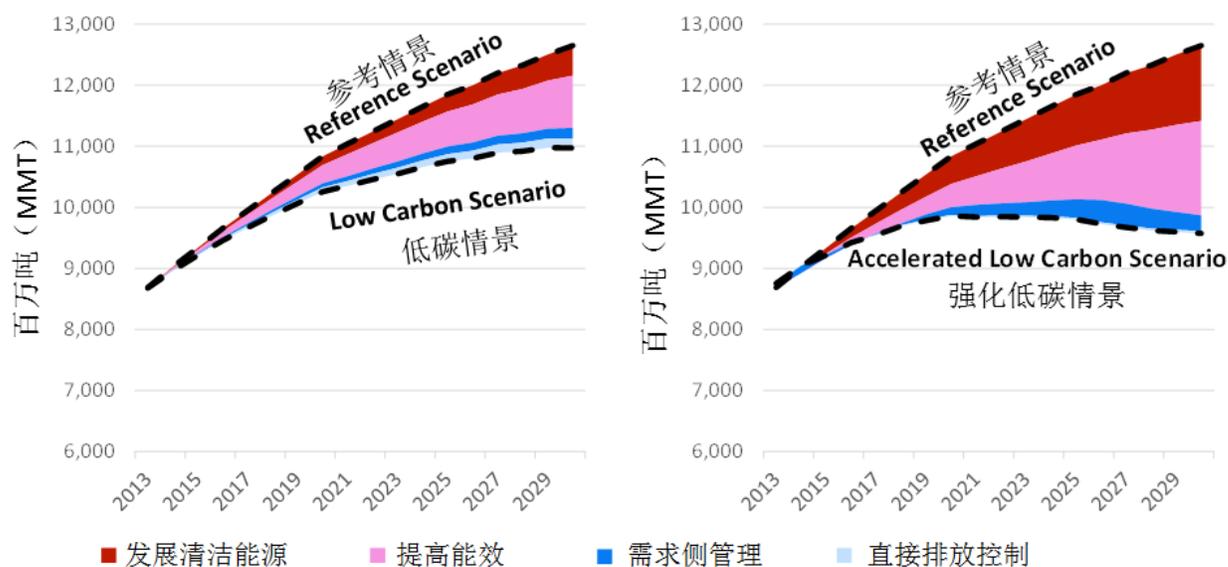
图表 19 按政策类型分类的减排潜力

低碳情景和强化低碳情景下，管控型政策的减排贡献最大。但是，价格激励型政策也可实现明显的减排效果，尤其是在高排放产品需求和服务需求具有弹性的情况下。此外，碳定价在两种情景境下都可实现显著减排，是价格激励型政策中最具有减排潜力的。强化低碳情景中，2030 年价格激励型政策的减排贡献达到 40%。

4.4 按减排途径分类的减排潜力分析

按减排途径，本研究将所有政策划分为四类，即发展清洁能源、提高能效、需求侧管理、直接排放控制政策。发展清洁能源政策通过增加新能源和可再生能源份额和推动燃煤

替代，降低能源消费的碳排放强度，这类政策包括：可再生能源配额制、工业燃料替代、提前淘汰燃煤电厂；提高能效指提高交通工具、制造业、建筑物和电器等能源效率，这类政策包括：机动车燃油经济性标准、工业能效标准及建筑节能标准；需求侧管理政策是直接减少能源或能源密集型产品的需求，主要包括降低工业产品需求量；直接排放控制政策指通过处理（如，燃烧）或捕集的方式来减少排放，主要包括：CCS、CH₄ 捕获、避免非CO₂ 温室气体排放。



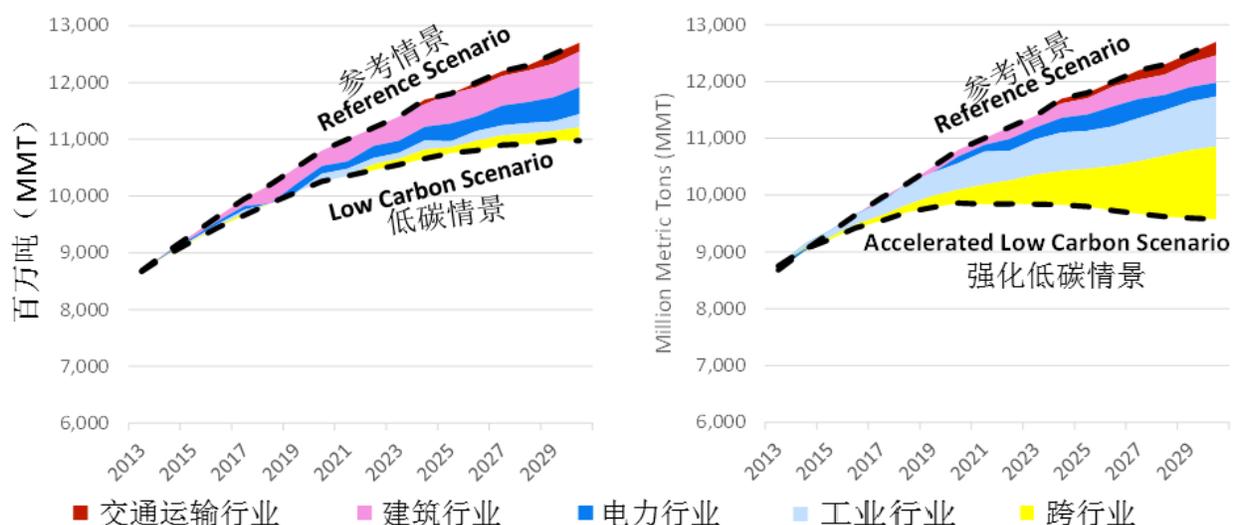
图表 20 按减排途径分类的减排潜力

低碳情景和强化低碳情景下，提高能效类政策均为最主要的减排途径，其次为发展清洁能源类政策。需求侧管理和直接排放控制类政策的 CO₂ 减排贡献很小，但考虑所有温室气体（包括 CH₄ 及含氟气体等在内），则直接排放控制政策的减排贡献会更为显著。例如，强化低碳情景中，考虑所有温室气体减排效果，2030 年直接排放控制政策的减排贡献率将达到 13%。

4.5 按行业分类的减排潜力分析

按不同行业，本研究将所有划分为四大行业（即交通、建筑、电力和工业）政策及跨行业政策。在低碳情景及强化低碳情景下，各个行业的政策均带来了一定的减排贡献。低碳情景下设置了严格的建筑节能标准、建筑节能改造和电器能效标准等政策，建筑行业政策的减排贡献最为突出。电力行业政策（主要指强制性电力装机容量目标）强有力地推动了电力行业实现显著减排。考虑到中国已在工业行业开展了较大力度的节能减排工作，在参考情景设置时已纳入了工业行业的相关政策，因此在低碳情景下，工业行业政策的减排潜力并不十分显著。此外，交通行业及跨行业政策（以碳定价为主）减排贡献仅占 2030 年减排量的很小份额。

强化低碳情景下，跨行业的碳定价政策的减排贡献最大。由于采取非常严格的工业能效标准，以及通过降低工业产品需求量推动工业结构转向轻工业，工业行业政策也产生了显著的 CO₂ 减排效果。若以 CO₂e 减排为评价对象，则工业行业政策的减排贡献进一步提高。此外，建筑行业和电力行业政策的减排贡献基本相当



图表 21 按行业分类的减排潜力

五、政策建议

通过对不同政策情景进行分析，将有助于识别最具减排潜力及最具成本效益的能源与气候政策。在此着重分析在减排潜力和成本效益方面排名前五位的五大政策，并给出相关政策建议。

5.1 碳定价

碳定价是最强有力的减排政策。在低碳情景和强化低碳情景下，碳定价政策均为减排贡献最高的政策，而该政策的减排贡献量取决于每吨碳的具体价格。尽管碳定价的成本效益略低于其它一些政策，但其减排潜力明显高于其它政策。此外，如果使用碳定价带来的部分收入来抵消其成本，则碳定价的成本效益有望提高。完整报告中将对这一方法进行详细讨论。

中国目前正在推进全国碳交易市场建设，以扩大碳交易机制对减碳的促进作用。从历史交易记录来看，试点市场的平均碳价在 10-40 元之间⁸，显著低于低碳情景和强化低碳情景下的碳价（分别为 53 元和 252 元）。为了提高碳定价政策的减排成效，未来几年中国应制定并保持更高的碳价（至少为 60 元/吨）。中国在对碳市场进行部署时，政策制定者应注意调度上游资源，以减少行政成本，并尽可能扩大覆盖范围。另外需要考虑的是初

⁸市场准备伙伴计划，中国碳市场观察，2016 年 2 月，报告原文：

<https://www.thepmr.org/system/files/documents/0203-PMR%20%20China%20Carbon%20Market%20Monitor%20%233%20FINAL%20EN.pdf>

期如何分配许可证，建议采用拍卖机制来分配配额。最后，考虑到中国非 CO₂ 温室气体减排的巨大潜力，政策制定者应分析扩大碳市场以覆盖这些非 CO₂ 气体的可能性。

5.2 持续提高可再生能源装机目标/可再生能源配额制

另外一项强有力的政策是，电力行业的强制可再生能源装机目标或可再生能源配额制。尽管装机目标有助于提高可再生能源在中国电力结构中的占比，但其无法确保非化石电力的调度。与此相反，针对可再生能源发电量的可再生能源配额制（以发电量而非装机量为政策对象）可同时推动可再生能源装机量及发电量的提高。因此，建议两项政策配合实施，前者用于促进可再生能源装机量的提高，后者用于确保可再生能源电力的输送和消纳。

鉴于中国正在修订其“十三五”时期的非化石能源装机目标，本报告建议中国将 2030 年可再生能源装机目标设定在 30% 以上，并建议针对电力行业设定非化石能源发展的相关目标而非设定针对全国全行业的非化石发展目标。在“十三五”相关规划中对 2030 年设定强有力的可再生能源发展目标，将有助于促进可再生能源占比的提高和实现碳减排。

另外需要着重考虑的一个问题是，天然气将在中国电力行业中发挥的作用。在低碳情景下，提高天然气装机容量目标及天然气发电补贴将最终导致成本和排放的增加。为此，有必要确保天然气发电厂仅用于替代燃煤发电厂，不与其他非化石能源发电形成直接竞争。

5.3 强化建筑节能标准

建筑节能标准的减排潜力和成本效益均较高。为了提高建筑节能标准，中国应以住建部一星绿色建筑作为最低标准。中国近期的经验表明，住建部一星，甚至二星和三星建筑的成本几乎与低效建筑相同，但其可带来巨大的长期效益。考虑到建筑的长期使用年限，

并考虑到中国未来几十年内将继续建造更多的建筑，强化建筑节能标准未来将带来持续的成本节约效益。此外，需要强调的是，强有力的建筑节能标准必须以强有力的执行机制作为支撑，包括各省应聘请足够的建筑用能监察员，为工程师、建筑工人和建筑用能监察员制定培训计划。

5.4 降低工业产品需求量

对于工业行业来说，产业结构调整的减排潜力最大。工业行业是中国最大的 CO₂e 排放源，也是第二大 CO₂ 排放源（仅次于电力行业，且本研究将工业等终端用能行业的 CO₂ 排放统计于电力行业中）。向更加重视发展质量而非数量的知识型和服务型经济转型，将减少工业生产规模，节约能源，同时减少碳排放。降低重工业产品需求的相关措施还可帮助预防碳泄漏，即避免将相应产品的制造业及排放转移到其它国家。

5.5 减少工业过程温室气体排放

减少工业过程排放，尤其是含氟气体的排放，具有显著的 CO₂e 减排潜力。按照《中美元首气候变化联合声明》要求，应争取在未来几年逐步消除氢氟碳化物。除了减少氟气体的排放，减少其他工业过程排放同样具有较大的减排潜力，包括降低甲烷燃烧或排放、减少水泥生产过程排放的 CO₂ 排放等。通过采取这些具有成本效益的政策来减少工业行业排放，中国有望大大减少整体的温室气体排放。