

碳达峰碳中和目标约束下重点行业的煤炭消费总量控制路线图研究



生态环境部环境规划院
Chinese Academy of Environmental Planning



自然资源保护协会
NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL

中国煤炭消费总量控制方案和政策研究 (煤控研究项目)

中国是世界煤炭生产和消费第一大国。以煤炭为主的能源结构支撑了中国经济的高速发展，但也对生态环境造成了严重的破坏。为了应对气候变化、保护环境和减少空气污染，国际环保组织自然资源保护协会 (NRDC) 作为课题协调单位，与政府智库、科研院所和行业协会等 20 多家有影响力的单位合作，于 2013 年 10 月共同启动了“中国煤炭消费总量控制方案和政策研究”项目（即“煤控研究项目”），为设定全国煤炭消费总量控制目标、实施路线图和行动计划提供政策建议和可操作措施，助力中国实现资源节约、环境保护、气候变化与经济可持续发展的多重目标。请访问网站了解更多详情 <http://coalcap.nrdc.cn/>



自然资源保护协会 (NRDC) 是一家国际公益环保组织，成立于 1970 年。NRDC 拥有 600 多名员工，以科学、法律、政策方面的专家为主力。NRDC 自上个世纪九十年代中起在中国开展环保工作，中国项目现有成员 30 多名。NRDC 主要通过开展政策研究，介绍和展示最佳实践，以及提供专业支持等方式，促进中国的绿色发展、循环发展和低碳发展。请访问网站了解更多详情 <http://www.nrdc.cn/>



生态环境部环境规划院 (CAEP) 成立于 2001 年，主要开展国家生态文明、绿色发展、环境经济等发展战略研究，承担国家和地方中长期环境战略规划与年度计划、污染防治和生态保护规划、流域区域和城市环境保护规划等理论方法研究、模拟预测分析、规划研究编制、实施评估考核等技术工作；承担中央财政专项资金项目技术咨询、技术服务和绩效评估等工作。规划院面向“双碳”的重大决策服务有扎实的研究基础与丰富的实践经验。依托于国家环境规划与政策模拟重点实验室与碳达峰碳中和研究中心，建有中国生态环境大数据共享平台，研发有中国高空间分辨率 (1km) 排放网格数据库 (CHRED)，中国城市二氧化碳排放数据集 (长时间序列)，碳排放 - 能源集成模型 (iCEM) 等成果，长期参与 IPCC 各类指南撰写工作，在国家 and 地方“双碳”决策中发挥重要作用。

封面图片: Image from Pxhere

煤控研究报告

《碳达峰碳中和目标约束下重点行业的煤炭消费总量控制路线图研究》

《中国典型省份煤电转型优化潜力研究执行摘要》

《碳达峰碳中和目标约束下重点行业的煤炭消费总量控制路线图研究执行摘要》

《碳达峰碳中和目标约束下水泥行业的煤炭消费总量控制路线图研究》

《碳达峰碳中和目标约束下电力行业的煤炭消费总量控制路线图研究》

《碳达峰碳中和目标约束下钢铁行业的煤炭消费总量控制路线图研究》

《碳达峰碳中和目标约束下煤化工行业煤炭消费总量控制路线图研究》

《山西省“十四五”煤炭消费总量控制政策研究》

《“十四五”电力行业煤炭消费控制政策研究》

《新冠疫情后的中国电力战略路径抉择：煤电还是电力新基建》

《中国散煤综合治理研究报告 2020》

《“十三五”时期重点部门煤控中期评估及后期展望》

《“十三五”电力煤控中期评估与后期展望》

《中国煤控项目“十三五”中期评估与后期展望研究报告》

《中国实现全球 1.5°C 目标下的能源排放情景研究》

《持续推进电力改革 提高可再生能源消纳执行报告》

《2012 煤炭的真实成本》

请访问网站了解更多详情 <http://www.nrdc.cn/>

煤控研究项目系列报告

碳达峰碳中和目标约束下重点行业的 煤炭消费总量控制路线图研究

报告编写人员

项目负责人：

曹 东 首席专家 / 研究员 生态环境部环境规划院

课题负责人：

电 力	张 静 博士	生态环境部环境规划院
钢 铁	薛英岚 博士	生态环境部环境规划院 中国科学院科技战略咨询研究院
水 泥	赵 静 博士	生态环境部环境规划院
煤化工	张鸿宇 博士	生态环境部环境规划院

课题研究人员：

蒋洪强	副总工 / 研究员	生态环境部环境规划院
张 伟	副研究员	生态环境部环境规划院
王丽娟	副研究员	生态环境部环境规划院
杜 唯	项目官员	自然资源保护协会
王 杨	项目官员	自然资源保护协会
龙 凤	副研究员	生态环境部环境规划院
李 勃	助理研究员	生态环境部环境规划院
胡 溪	高级工程师	生态环境部环境规划院
毕粉粉	助理研究员	生态环境部环境规划院
周 佳	助理研究员	生态环境部环境规划院
连 超	助理研究员	生态环境部环境规划院
陈潇君	正高级工程师	生态环境部环境规划院
宋晓晖	副研究员	生态环境部环境规划院
贺晋瑜	副研究员	生态环境部环境规划院
金 玲	助理研究员	生态环境部环境规划院
汪旭颖	助理研究员	生态环境部环境规划院

目录

执行摘要	I
1. 重点行业发展、煤耗及碳排放现状	10
1.1 重点行业发展现状	
1.2 重点行业煤耗和碳排放现状	
2. 研究方法	13
3. 电力行业控煤情景分析	15
3.1 经济发展对电力行业的需求分析	
3.2 电力供应与控煤措施情景设定	
3.3 未来十五年电力行业煤炭消耗量与碳排放预测	
4. 钢铁行业控煤情景分析	21
4.1 经济发展对钢铁行业需求分析	
4.2 控煤降碳措施分析及情景设定	
4.3 钢铁行业煤炭消耗与碳排放预测分析	
5. 水泥行业控煤情景分析	27
5.1 经济发展对水泥行业的需求分析	
5.2 控煤措施情景设定	
5.3 未来十五年水泥行业煤炭消耗量与碳排放预测	

6. 煤化工行业控煤情景分析	34
6.1 煤化工行业发展预测	
6.2 控煤降碳措施的分析及情景设定	
6.3 煤炭消耗与碳排放预测分析	
7. 双碳约束下重点行业煤炭控制总量控制路线图	43
7.1 重点行业煤炭消费总量控制情景分析	
7.2 重点行业达峰路线图	
8. 重点行业控煤路径投资及社会经济影响评估	50
8.1 重点行业控煤降碳措施投资成本	
8.2 重点行业控煤降碳措施大气污染物协同减排核算	
8.3 重点行业控煤降碳措施社会经济影响分析	
8.4 重点行业控煤对《2030年前碳达峰行动方案》达标贡献	
9. 重点行业控煤降碳重大政策	56
9.1 坚持节能优先战略	
9.2 积极推进碳排放总量控制	
9.3 完善产业结构调整政策	
9.4 推动循环经济发展政策	
9.5 完善煤电退出和新能源发展政策	
9.6 健全重点行业控煤降碳标准体系	
9.7 建立以总量控制为核心的碳交易市场	
9.8 健全财税激励和绿色金融政策	
参考文献	61

表目录

表 3-1	电力行业控煤情景设置	17
表 3-2	各类电源装机容量预测	18
表 4-1	不同情景下钢铁行业控煤降碳措施参数设定	23
表 5-1	水泥行业控煤情景设置	30
表 6-1	煤化工行业产品需求及产能预测	37
表 6-2	不同情景下减煤降碳措施应用比例	39
表 6-3	不同情景下煤化工产品产量预测	40
表 7-1	碳达峰碳中和约束下重点行业控煤目标	48
表 8-1	不同情景下重点行业控煤对《2030 年前碳达峰行动方案》达标贡献	55

图目录

图 1-1 我国重点行业煤炭消费总量	12
图 2-1 iCEM模型框架	14
图 3-1 不同情景下煤炭消耗量预测	19
图 3-2 政策情景和强化情景较基准情景的减煤量	20
图 3-3 需求变化对煤炭消耗量的影响	20
图 4-1 不同方法预测的我国未来粗钢需求	22
图 4-2 不同情景下我国钢铁行业煤炭消费量(含焦炭)	24
图 4-3 不同情景下我国钢铁行业二氧化碳排放量预测	25
图 4-4 政策情景下各措施减煤贡献	26
图 4-5 强化情景下各措施减煤贡献	26
图 5-1 我国水泥熟料和水泥产量预测	28
图 5-2 国内外先进控煤降碳措施工序图	29
图 5-3 不同情景下水泥行业的煤炭消耗量	31
图 5-4 不同情景下水泥行业的碳排放量	32
图 5-5 2021-2035年政策情景下各项措施的减煤贡献	33
图 5-6 2021-2035年强化情景下各项措施的减煤贡献	33

vi

执行摘要

2019 年我国火电、钢铁、水泥、煤化工四个重点行业煤炭消费总量为 24.1 亿吨标煤，占全国煤炭消费总量 86%，其中，电力行业煤炭消费占比最大，达到 54%，其次是钢铁、煤化工和水泥行业¹，占比分别达到 17%、9% 和 6%。

2019 年四个行业二氧化碳排放 77.6 亿吨（含过程排放），约占全国二氧化碳排放总量（含过程排放）的 72%，其中，电力、钢铁、水泥和煤化工行业占比分别为 42%、14%、12% 和 4%。加上净购入电力的间接排放，钢铁、水泥和煤化工行业碳排放量占全国二氧化碳排放总量比分别为 15%、12% 和 5%。

因此，开展控碳背景下的重点行业煤炭控制策略研究，对于推进实现国家碳达峰碳中和目标、推动行业生产方式与能源结构绿色转型具有重要意义。本研究采用自主开发的碳排放－能源集成模型（Integrated Carbon and Energy Model, iCEM），在“双碳”目标约束下，考虑控煤降碳措施力度不同，从小到大依次设置基准、政策、强化三个情景，提出了电力、钢铁、水泥和煤化工四大重点耗煤行业的控煤降碳目标及不同阶段路线图，开展了控煤降碳的社会、经济和环境的影响分析。

一、电力、钢铁、水泥和煤化工四个重点行业煤炭消费总体将于 2025 年达峰，峰值 24.9 亿吨标煤

综合考虑目标可达性、措施可行性和投入经济性，报告采用政策情景作为推荐情景。推荐情景下，四个重点行业总体的煤炭消费量将在 2025 年达到峰值，峰值 24.9 亿吨标煤，达峰前后有 5-6 年的平台期；碳排放将于同年达峰，峰值 80.1 亿吨。

具体到分行业层面，钢铁行业煤炭消费量已于 2020 年达峰，水泥行业将于 2021 年达峰，煤化工行业将于 2024 年达峰，而受电力需求增长驱动，电力行业将在 2028 年达峰。钢铁、煤化工行业碳排放与煤炭消费量同年达峰，电力、水泥碳排放分别于 2029 年和 2022 年达峰。

¹ 报告在重点行业整体分析中考虑了行业之间的耦合关系，包括钢铁行业用焦耗煤已从煤化工炼焦耗煤中剔除，钢铁、水泥、煤化工行业的电力使用所带来碳排放算在电力行业并从其他行业剔除。在分行业的达峰分析中，不考虑上述行业间耦合的扣除，以充分体现行业自身的情况。

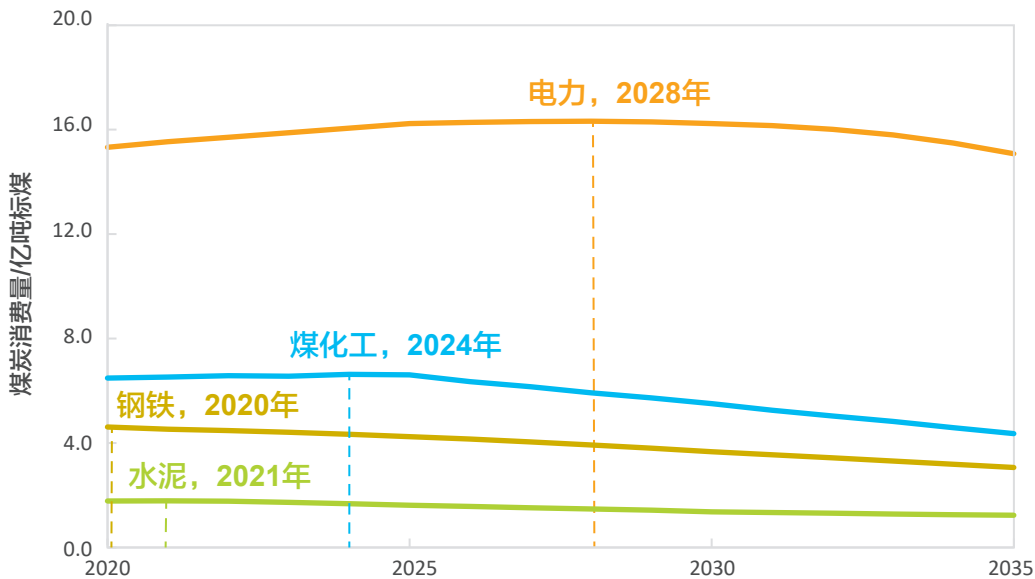
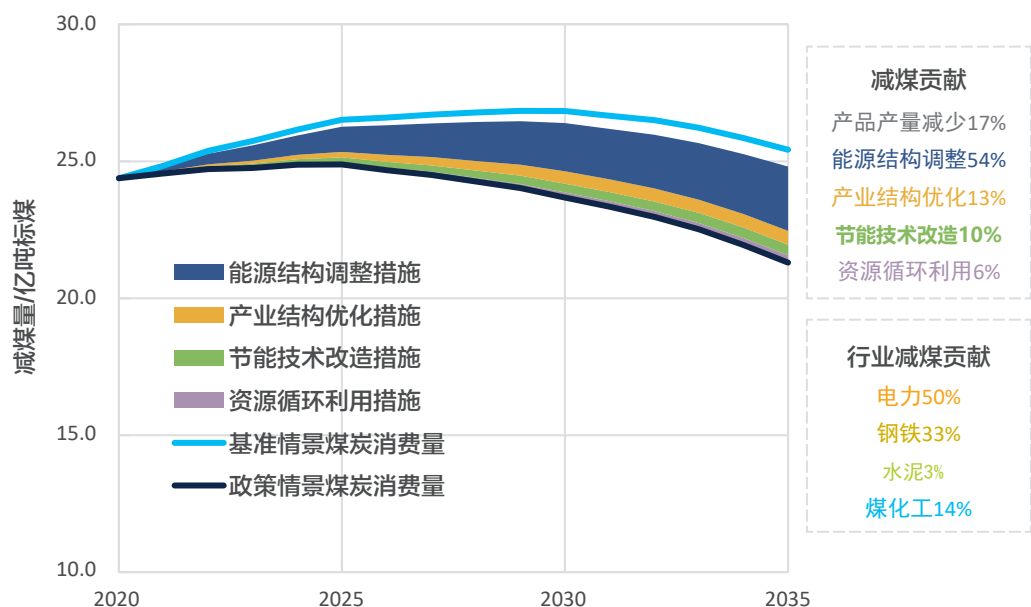


图 1 分行业的煤炭消费量

二、四个重点行业实现“双碳”背景下的煤炭消费控制需要从能源结构调整、产业结构优化、节能技术改造和资源循环利用四类措施入手，在推荐情景下，需相应投入资金 19.6 万亿元，年均可带动 GDP 增长 3627 亿元，并实现大气污染物的协同减排

大力推进清洁能源使用、加强行业产能调控与结构调整、推广能效提升技术和加快循环体系构建是四大行业减少煤炭消费量的有效措施。相较基准情景，政策情景在 2021-2035 年减少煤炭消费 9.2%，其中，产品产量减少带动煤炭消费减少约占 17%，能源结构调整、产业结构优化、节能技术改造、资源循环利用四项措施带来的减煤贡献分别为 54%、13%、10%、6%；分行业贡献来看，电力、钢铁、水泥、煤化工减煤贡献分别为 50%、33%、3%、14%。



为推动四大行业实现控煤降碳目标，累计需要在 2021-2035 年投资 19.6 万亿，年均投资约 1.3 万亿元，其中 90% 以上为电力行业的投资。投资将刺激经济高质量增长，带动 GDP 年均增长 3627 亿元。

四大行业煤炭消费控制还将带来显著的环境效益，二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）、颗粒物（PM）等大气污染物年均协同减排 29 万吨/年、65 万吨/年和 10 万吨/年。分行业来看，钢铁和电力为协同减排量最多的行业，尤其是钢铁行业对 NO_x 和 PM 的协同减排。

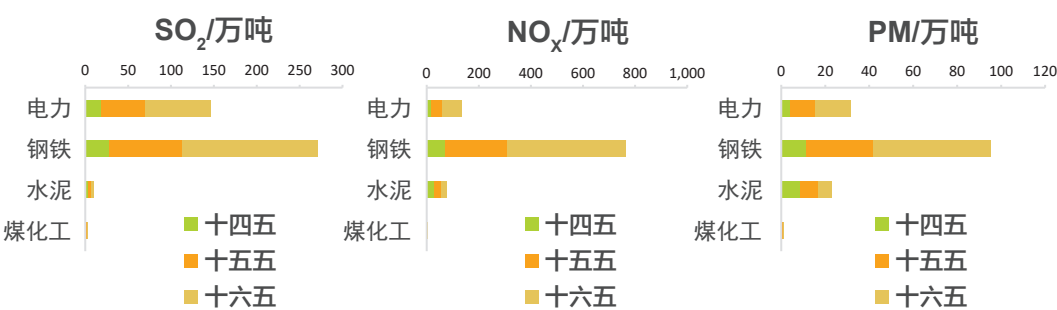


图 3 大气污染物协同减排量

三、电力行业煤炭消费将在 2028 年达峰，峰值为 16.3 亿吨标煤；大力发展以风电和太阳能为主的清洁能源是电力行业减少煤炭消费最有效的措施

随着经济结构调整，电力需求增速趋缓，未来工业部门、居民生活、5G 基站和大数据中心等将是我国电力增长的主要推动因素。基于电力需求预测，综合考虑电源结构优化和技术进步等措施，以及发电标准煤耗的变化、热电联产供热增加的耗煤量，我国电力行业煤炭消费量将于 2028 年达峰，峰值 16.3 亿吨标煤（24.6 亿吨煤）。由于天然气发电还有一定增长，电力行业碳排放将于 2029 年达峰，峰值 50.0 亿吨。

政策情景相较基准情景在 2021-2035 年累计减煤 7.0%。提高太阳能装机、提高气电装机、提高风电装机、煤电节能改造、提高生物质装机等措施分别贡献约 43%、19%、16%、14%、8%。

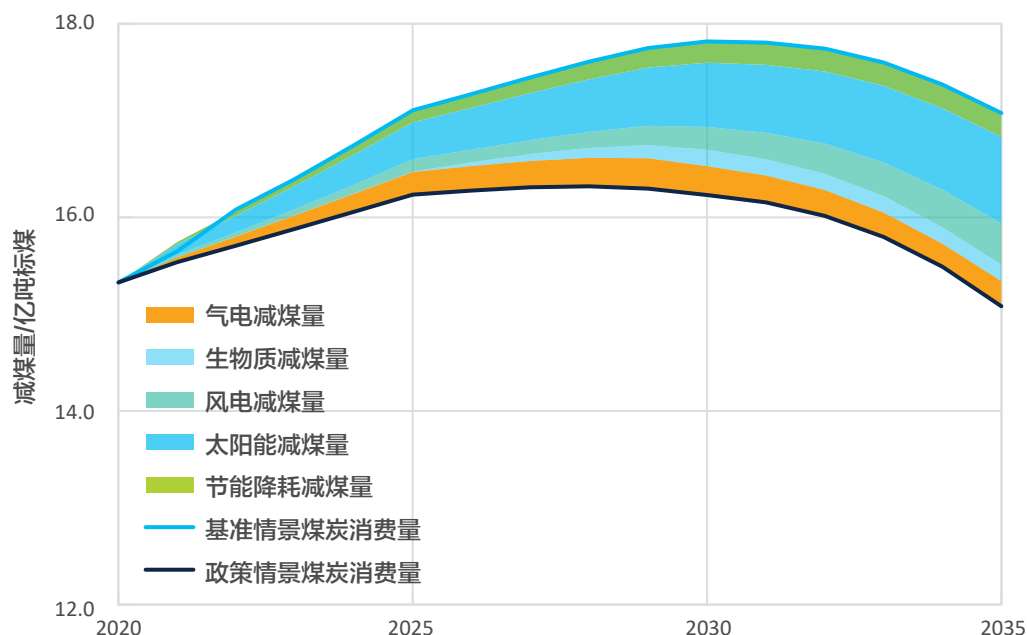


图 4 电力行业各措施减煤量

四、钢铁行业煤炭消费受产量影响巨大，如未来严格控制粗钢产量，行业煤炭消费已于 2020 年达峰，峰值约为 4.6 亿吨标煤；推进全废钢电炉短流程是钢铁行业减少煤炭消费最有效的措施

随着我国工业化和城镇化达到发达国家水平，结合国家对粗钢产量的管控政策导向，粗钢产量将在近年达到峰值，并在中远期呈下降趋势。综合考虑产量控制政策及推进短流程炼钢和加大废钢利用等措施，我国钢铁行业煤炭消费量已于 2020 年达峰，峰值约 4.6 亿吨标煤（含焦炭）；碳排放于同年达峰，峰值 16.4 亿吨。

政策情景相较基准情景在 2021–2035 年累计减煤 16.8%，其中，粗钢产量变动、推进全废钢电炉短流程、加大废钢利用、高炉炉料结构优化和节能技术改造的累计减煤贡献分别为 48%、26%、17%、4% 和 5%。

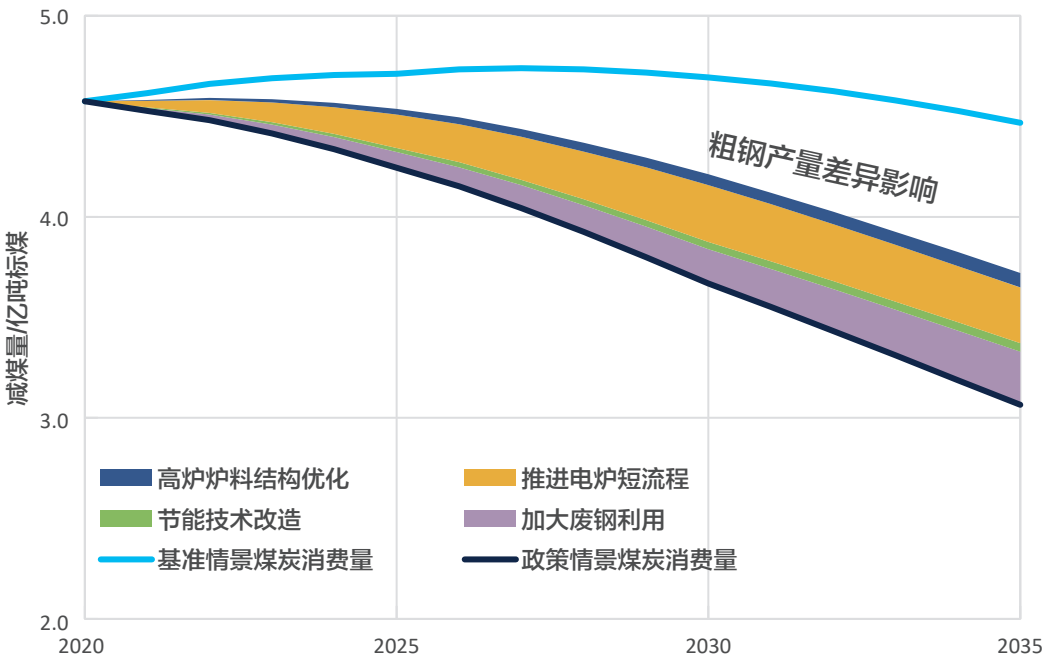


图 5 钢铁行业各措施减煤量²

五、水泥行业煤炭消费将在 2021 达峰，峰值 1.8 亿吨标煤；能源结构调整是水泥行业控煤降碳的有效措施，需要积极推广水泥窑协同处置生活垃圾的应用

我国已经进入典型的水泥消费峰值平台区，水泥熟料产量将在“十四五”期间将达到消费和产量峰值。综合考虑水泥的需求变化、水泥窑协同处置生活垃圾、淘汰落后产能、产能置换、先进烧成技术改造、钢渣替代石灰石和二氧化碳捕获、利用与封存技术，水泥行业煤炭消费将在 2021 年达到峰值，峰值 1.8 亿吨标煤，碳排放在 2022 年达峰，峰值为 13.7 亿吨。

相较基准情景，政策情景在 2021-2035 年累计减煤 5.2%，其中，产量减少、淘汰落后产能和产能置换、水泥窑协同处置生活垃圾、水泥窑节能技术改造和钢渣替代石灰石的减煤量分别占比约 81%、8%、4%、4% 和 3%。

2 加大废钢利用：对应废钢用于长流程炼钢的减煤效益，不包括废钢用于电炉短流程带来的减煤

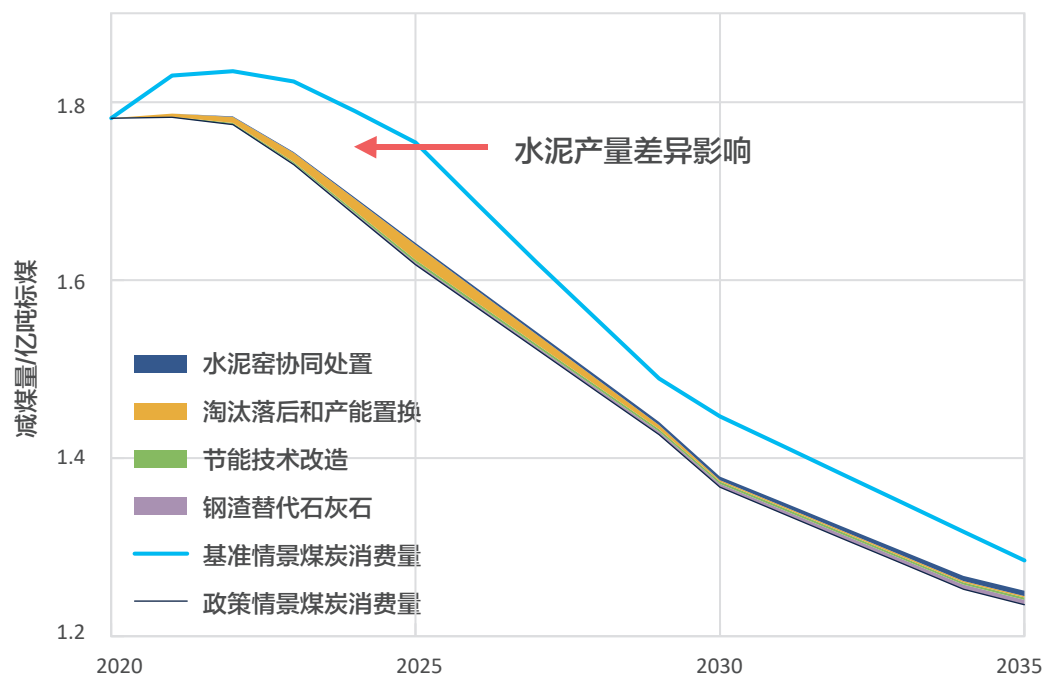


图 6 水泥行业各措施减煤量

六、煤化工行业煤炭消费将在 2024 年达峰，峰值 6.6 亿吨标准煤（含煤焦化），控制新型煤化工项目建设规模、挖掘原料替代的空间以及节能技术改造是减少煤化工行业煤炭消费的重要手段

未来传统煤化工行业煤制焦炭随着粗钢产量下降需求逐渐下降，煤制甲醇随着下游烯烃需求的增长而增长，煤制合成氨产量稳中有降；现代煤化工行业中，除煤制烯烃有较快发展外，煤制油、煤制天然气、煤制乙二醇增长缓慢。基于煤化工子产品需求变化，结合控煤降碳措施应用，煤化工行业煤炭消费量将于 2024 年达峰，达峰量为 6.6 亿吨标准煤（9.3 亿吨煤）；碳排放将在 2024 年达峰，达峰量为 5.7 亿吨。

相较基准情景，政策情景在 2021-2035 年累计减煤 5.5%，其中原料结构调整、产业结构调整、节能技术改造和燃料结构调整等措施减煤量分别占总减煤量 54%、25%、13% 和 8%。

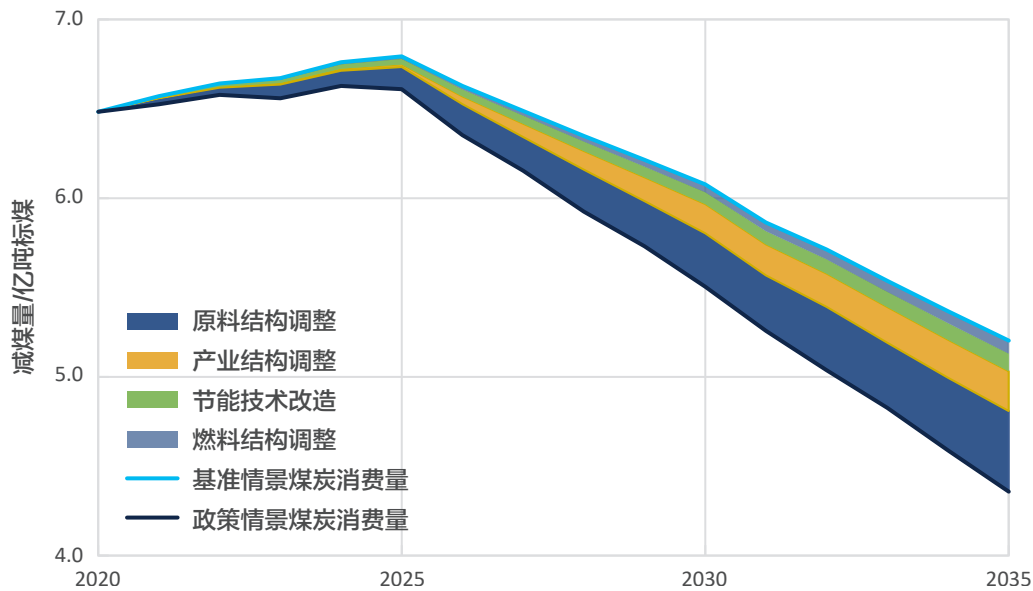


图 7 煤化工各措施减煤量

七、为有效推动重点行业煤控路径关键举措的顺利落地，应采取积极有效的措施，全面加大政策创新，逐步形成系统完善的碳交易市场机制、绿色低碳标准体系、行业准入政策、价格财税及投融资机制等

一是坚持节能优先战略，大力推广能效提升技术。加大现有机组的节能改造，积极推进高效、清洁火电技术研发，持续降低发电煤耗。加快重点行业节能改造，加大节能低碳技术的应用与创新，加快构建循环工业体系。

二是大力推进清洁能源使用，统筹优化煤电布局，合理配置调峰机组，提高电力平衡支撑能力。优化钢铁、水泥、煤化工行业原燃料结构，研究建立基于企业低碳绩效水平的差别化电价机制，要求自备电厂全面承担公用电厂义务。

三是强化源头降碳，深入推进钢铁行业供给侧结构性改革，提高水泥行业熟料落后产能和过剩产能淘汰标准，划定煤化工行业高碳 / 低碳产业或产品，并将高碳产业或产品纳入限制类和淘汰类名录，严格行业准入。

四是全面强化物料循环回收利用体系建设，推动废钢资源回收利用，提高炼钢废钢比，综合利用钢渣、粉煤灰等固体废物开展水泥原料替代，利用生活垃圾等替代水泥窑燃料。

五是加大政策创新，完善产业结构调整政策、短流程置换长流程政策、水泥窑协同处置废弃物的保障政策，健全企业节能降耗奖惩机制，完善煤电退出和调峰的市场机制，推动建立碳达峰碳中和目标约束下的总量－交易市场，完善重点工业行业低碳标准体系，价格财税及投融资机制等。



图 8 双碳约束下重点行业煤炭控制总量控制路线图

1

重点行业发展、煤耗及 碳排放现状

1.1 重点行业发展现状

改革开放以来，我国工业行业规模迅速扩大，主要产品产量快速增长。2020 年，我国电力总装机容量达到 22 亿千瓦，火力装机 12.5 亿千瓦，全国总发电量和火力发电量分别为 7.6、5.2 万亿千瓦时，我国装机容量、发电量多年位居世界第一。我国粗钢产量达到 10.65 亿吨，比 2001 年增长了 6 倍，占世界总产量的 56.7%，是世界钢铁生产第一大国。我国水泥产量达到 23.8 亿吨，约占世界水泥总产量的 57% 左右，已连续 35 年世界第一，水泥熟料产量仍处于上升态势。目前我国合成氨产量 5758 万吨、焦炭产量 4.7 亿吨、甲醇 6997 万吨，是世界上最大的合成氨、焦炭和甲醇生产国，合成氨产量约占世界总产量的 1/3，焦炭产量占世界总产量的 70%，甲醇产能占全球甲醇总产能的 67%。同时现代煤化工产品（煤制油、煤制天然气、煤制烯烃、煤制乙二醇）产能稳固提升，煤基制烯烃、乙二醇占全国总产能比重显著提高。

1.2 重点行业煤耗和碳排放现状

2019 年我国火电、钢铁、水泥、煤化工（不含炼焦）四个行业煤炭消费总量为 24.1 万吨标煤，占全国煤炭消费总量 86%，其中，电力行业煤炭消费占比最大，达到 54%，其次是钢铁、煤化工和水泥行业，占比分别达到 17%、9% 和 6%。

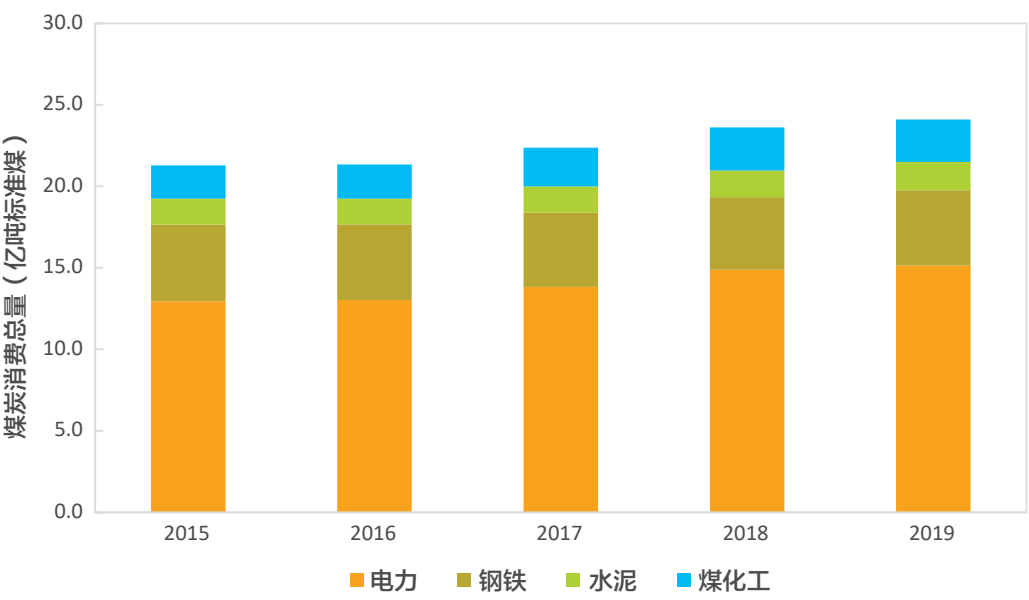


图 1-1 我国重点行业煤炭消费总量

2019 年四个行业二氧化碳排放 77.6 亿吨（含过程排放），约占全国二氧化碳排放总量（含过程排放）的 72%，其中，电力、钢铁、水泥和煤化工行业占比分别为 42%、14%、12% 和 4%。加上净购入电力的间接排放，钢铁、水泥、煤化工行业碳排放量占全国二氧化碳排放总量比分别为 15%、12% 和 5%。

2

研究方法

本研究以电力、钢铁、水泥和煤化工行业为重点，系统开展重点行业煤控路径研究。煤炭消耗核算范围包括原料煤和燃料煤，碳排放核算包含化石燃料燃烧产生的能源活动排放、工业过程排放与外购电力、热力间接排放。研究的基准年为 2020 年（部分行业因数据缺失基准年 2019 年），研究期为 2021-2035 年，展望至 2060 年。

本研究采用自主开发的碳排放 - 能源集成模型（Integrated Carbon and Energy Model, iCEM）进行重点行业控煤路线图研究。模型以碳达峰碳中和目标为约束，以经济发展需求、政策措施、能源消费、二氧化碳排放、经济社会分析等为主要内容，兼顾技术可达性和措施经济可行性，反复迭代优化，最终得到重点行业能源消费和碳减排路线图。模型涵盖了能源生产、工业（包括各行业）、建筑（包括生活和第三产业）、交通等全社会用能和碳排放部门，包括行业发展模块、技术措施模块、减煤降碳分析模块和社会经济影响评估模块，主要逻辑为人口、GDP、国民经济部门等经济社会驱动因子决定各类能源（煤、石油、天然气、电力等）和原材料（粗钢、水泥、化工产品等）需求，在多种情景下确定未来技术扩散度和组合模式，基于终端用能部门（或工序）的用能（耗煤、耗电等）强度和碳排放强度，得到终端能源消费量和碳排放量。

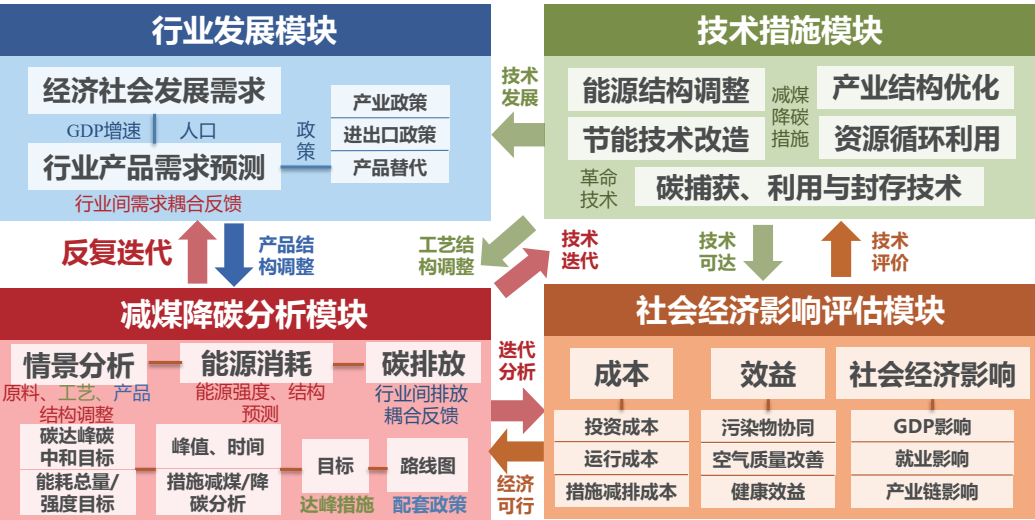


图 2-1 iCEM 模型框架

3

电力行业控煤情景分析

电力工业是国民经济发展中最重要的基础能源产业之一。随着经济社会的发展，我国电力规模持续增长。我国电源结构以煤电为主，2020 年煤电装机容量和发电量分别占全行业比重的 49% 和 61%。电力行业是我国最大的煤炭消耗和碳排放部门，占全国煤炭消费的 54%，占全国能源活动碳排放的 46% 左右，占全国二氧化碳排放（含工业过程）的 42%。电力行业研究范围包括煤电、气电、水电、核电、生物质、风电、光伏发电等各种电源结构。煤炭消耗核算范围包括发电煤耗、供热煤耗，碳排放核算范围包括燃煤、燃气、燃油等火电厂（含企业自备电厂）化石燃料燃烧（含热电联产供热部分燃料消耗）产生的二氧化碳排放。

3.1 经济发展对电力行业的需求分析

根据趋势预测法和部门需求预测法，本研究预计到 2025、2030、2035 年，全社会用电量将分别达到 9.3-9.5、11.0-11.2、12.2-12.7 万亿千瓦时，最大用电负荷将分别达到 13.3-13.9、16.0-17.0、18.1-19.8 亿千瓦。工业部门、居民生活、5G 基站和大数据中心将是电力增长的主要推动因素，分别占“十四五”新增用电量的 27%、25% 和 22%，“十五五”新增用电量的 17%、41% 和 7%，“十六五”新增用电量的 14%、37% 和 6%。互联网数据服务业及移动通信基站等新型基础设施将在“十四五”、“十五五”高速发展，是带动三产用电需求的最主要行业。

3.2 电力供应与控煤措施情景设定

依据对电力需求、电源结构、节能降耗、末端捕集等技术措施的分析，考虑控煤降碳措施力度不同，从小到大依次设置基准、政策、强化三个情景。电力需求方面，考虑未来需求侧节电措施推广、高耗能行业占比下降等因素，选取低需求（规划法预测结果）作为三个情景的需求设置因素。对于推荐情景，后文将电力需求作为情景设置的变量，分析电力需求高于预期对结果的影响（部门需求预测结果）。

表 3-1 电力行业控煤情景设置

情景设置	基准情景	政策情景	强化情景
情景描述	按现有规划发展的情景	考虑国家 2030 年前碳达峰，大力度发展风光发电	更多的考虑碳中和，电力行业提前达峰，更进一步加速风光发电发展，采用风光乐观开发量，加大对煤电约束
电源结构	到 2030 年，风电、光伏总装机达 14 亿千瓦，占电源总装机的比例提升至 41%	到 2030 年，风电、光伏总装机达 16 亿千瓦，占电源总装机的比例提升至 45%	到 2030 年，风电、光伏总装机达 18 亿千瓦，占电源总装机的比例提升至 49%
发电煤耗	保持现状 288.5 克标煤 / 千瓦时	持续降低，到 2025 年、2030 年、2035 年，发电标准煤耗为 286、284、283 克标煤 / 千瓦时	比政策情景下降快，到 2025 年、2030 年、2035 年，发电标准煤耗分别为 286、281、277 克标煤 / 千瓦时
CCUS 技术	无要求	无要求	CCUS 技术捕集及封存量从 2030 年开始年均增长 10 万吨

电源结构规划基于可开发资源量、电源项目建设周期、能源价格等方面因素，确定水电、核电、生物质发电规模，再统筹考虑非化石能源消费比例等，确定风电、光伏发电规模。对我国 2021—2035 年各类电源结构进行分析，确定装机规模及发电量等。

表 3-2 各类电源装机容量预测

单位：亿千瓦

情景	年份	煤电	气电	常规水电	核电	生物质	风电	光伏
基准情景	2015	9.0	0.7	3.2	0.3	0.1	1.3	0.4
	2020	10.8	1.0	3.4	0.5	0.3	2.8	2.5
	2025	12.0	1.2	3.9	0.7	0.5	4.2	4.9
	2030	12.5	1.7	4.1	1.2	0.8	6.2	7.8
	2035	11.9	2.0	4.2	1.7	1.1	8.7	11.1
政策情景	2025	11.6	1.5	3.9	0.7	0.5	4.4	6.0
	2030	11.8	2.0	4.1	1.2	0.9	6.6	9.7
	2035	11.1	2.3	4.2	1.7	1.2	9.4	13.8
强化情景	2025	11.2	1.5	3.9	0.7	0.5	5.1	6.1
	2030	11.1	2.0	4.1	1.2	0.9	7.9	10.4
	2035	9.8	2.3	4.2	1.7	1.2	10.9	16.4

综合考虑用电负荷、负荷率、需求响应削峰能力、要求合理备用率，上述电源规划均可满足全社会电力电量平衡。

3.3 未来十五年电力行业煤炭消耗量与碳排放预测

3.3.1 煤炭消耗与碳排放预测

煤炭消耗预测的考虑因素包括技术进步和发电机组“上大压小”等措施，以及发电标准煤耗的变化、热电联产供热增加的耗煤量。根据化石能源消费量，参照煤、天然气的碳排放因子，测算得到不同情景下的二氧化碳排放量，三种情景下“十四五”电力行

业煤炭消费量将持续增长。基准、政策、强化情景将分别于 2030、2028、2025 年达到煤炭消费峰值，峰值为 26.9、24.6、23.8 亿吨煤炭。政策情景、强化情景碳排放将分别于 2029 年前后、2026 年前后达峰，峰值分别为 50.0 亿吨、47.9 亿吨，满足 2030 年前碳排放达峰的约束，而基准情景因为气电增长，碳排放将在 2031 年达峰，峰值 54.2 亿吨。

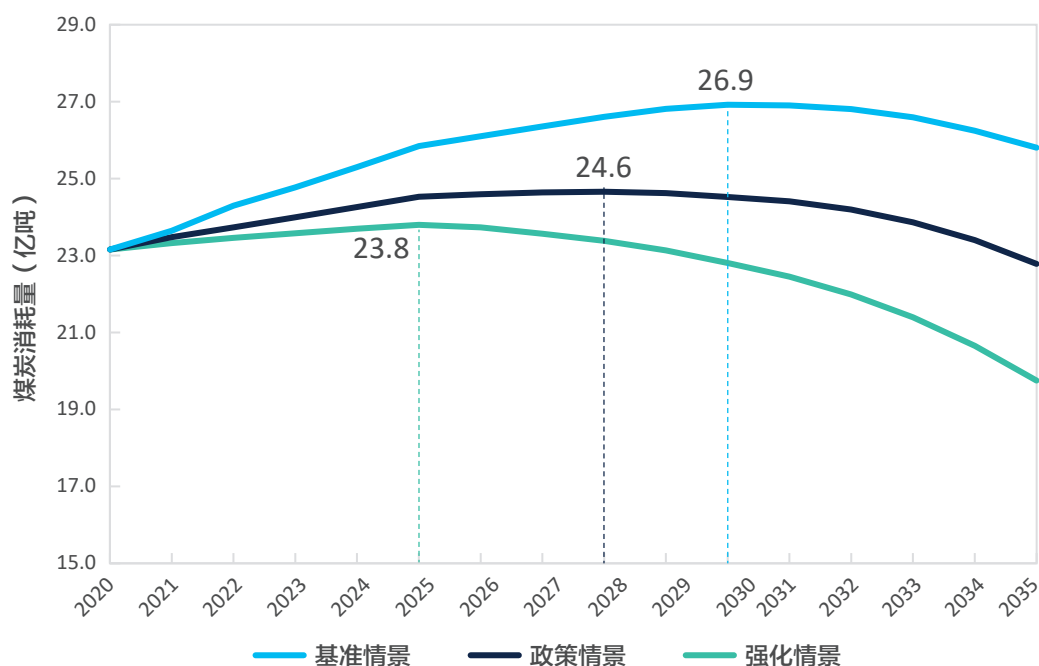


图 3-1 不同情景下煤炭消耗量预测

3.3.2 各措施控煤贡献分析

政策情景相较基准情景在 2021-2035 年累计减煤 7.0%。提高太阳能装机、提高气电装机、提高风电装机、煤电节能改造、提高生物质装机等措施分别贡献约 43%、19%、16%、14%、8%。强化情景下各项措施力度增大，2021-2035 年累计减煤 12.4%，其中风电和太阳能发电量增长贡献占比达到 70% 以上，大力发展以风电和太阳能为主的清洁能源是电力行业减少煤炭消费最有效的措施。

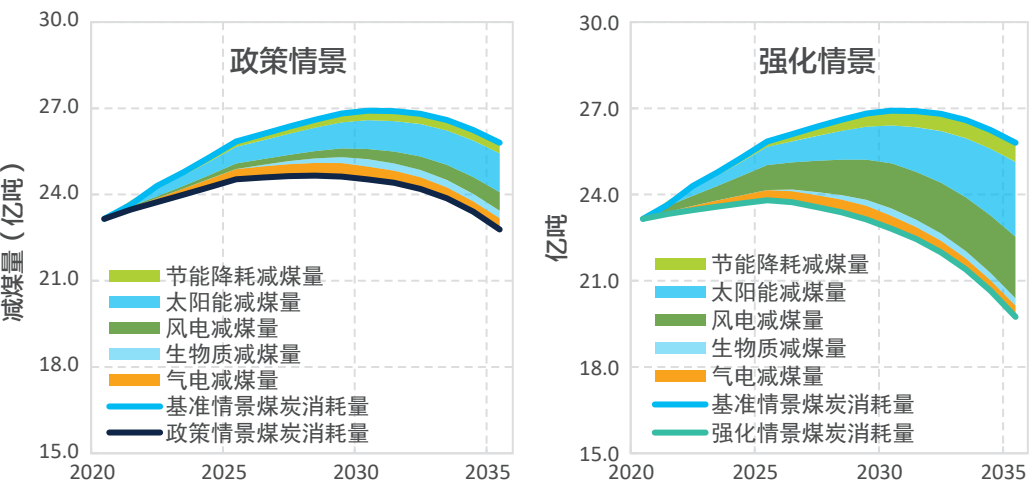


图 3-2 政策情景和强化情景较基准情景的减煤量

3.3.3 高电力需求下的煤炭消费与碳排放分析

在政策情景非化石能源装机、气电装机、发电煤耗不变的假设下，若电力需求在 2025、2030、2035 年分别增长 0.2、0.2、0.5 万亿千瓦时，达到 9.5、11.2、12.7 万亿千瓦时，煤电装机规模和煤炭消耗量将进一步增加，电力行业煤炭消费量达峰时间不变，但峰值将上涨 0.9 亿吨，碳达峰时间将推迟 2 年左右，峰值上涨 1.8 亿吨。因此，需求侧节能增效对于电力行业顺利实现双碳目标至关重要。

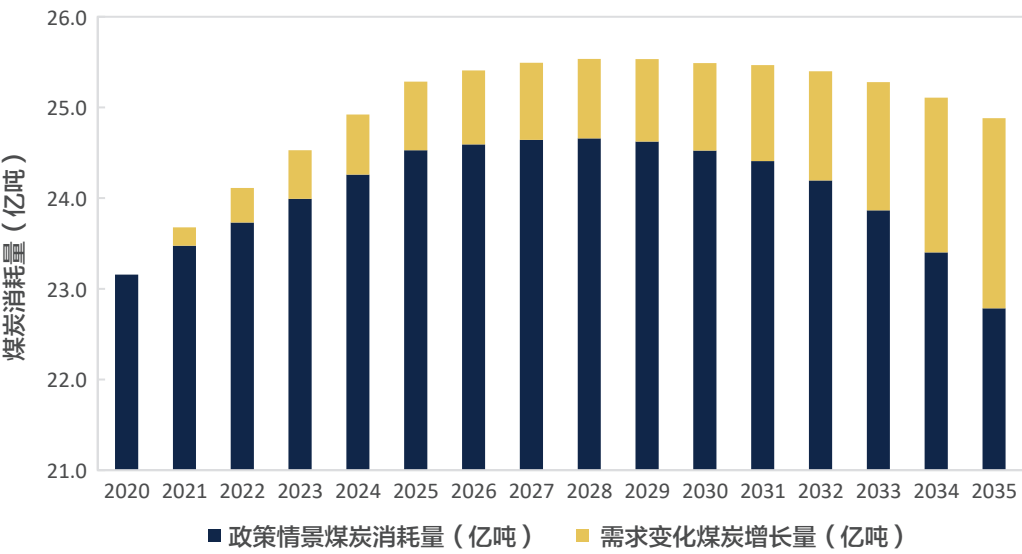


图 3-3 需求变化对煤炭消耗量的影响

4

钢铁行业控煤情景分析

钢铁行业是国民经济发展中最重要的基础原材料产业，“十三五”期间钢铁行业实现跨越式发展，有效支撑了我国房地产、基建、机械制造和新能源等产业的发展。2019年我国钢铁行业煤耗 4.6 亿吨标煤（含焦炭），约占全国煤炭消费总量的 17%，碳排放 16.4 亿吨，占全国碳排放总量的 15% 以上。钢铁行业的煤炭消耗研究范围包括钢铁生产各工序煤炭的消费。

4.1 经济发展对钢铁行业需求分析

本研究基于钢铁行业消费系数和下游部门需求两种方法，并结合我国处于工业化中后期的发展阶段和 2021 年开始实施的压减粗钢产量政策，预测我国未来粗钢需求。其中，消费系数法参照“十二五”和“十三五”期间我国单位 GDP 粗钢消费系数变化情况，得到未来单位 GDP 粗钢消费强度和粗钢产量；下游部门需求法分析我国在房屋建筑、机械、汽车、能源生产等部门的需求情况，并考虑装配式建筑、风电光伏等新能源推广可能带来的粗钢需求增量，得到未来的粗钢需求。此外，考虑碳中和的长远目标，本研究同时采用戴翰程等人基于 IMED/CGE 模型的预测结果³作为碳中和背景下的我国粗钢需求。

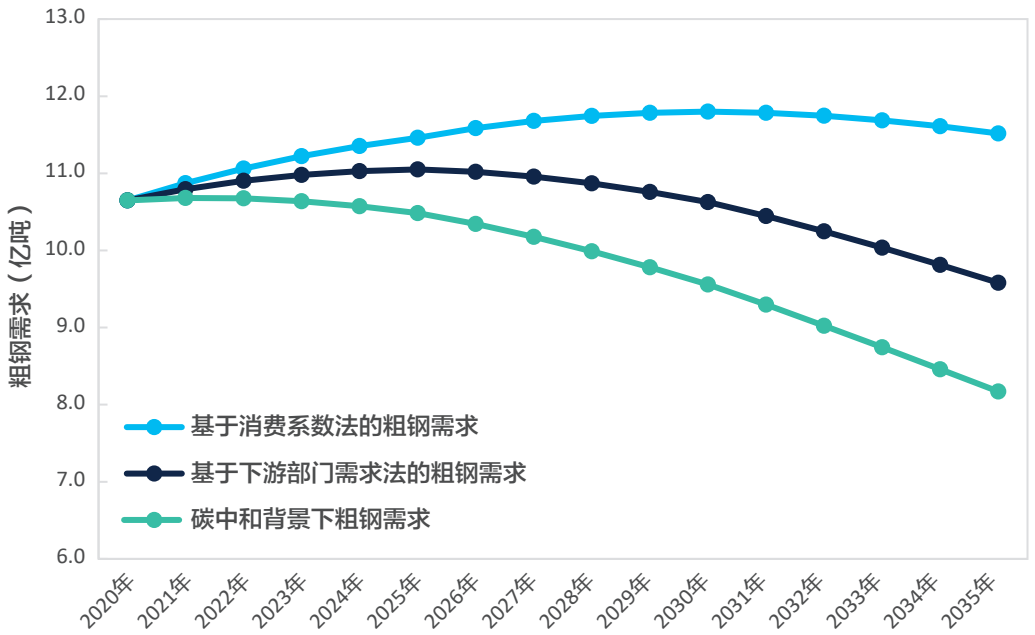


图 4-1 不同方法预测的我国未来粗钢需求

3 Decarbonizing China’s iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality

4.2 控煤降碳措施分析及情景设定

粗钢产量和控煤降碳措施的实施力度是影响钢铁行业煤炭消耗和碳排放的重要因素。研究设定基准、政策和强化三个钢铁行业发展情景，粗钢产量分别采用基于消费系数法、下游部门需求法和碳中和背景下的产量预测；钢铁行业控煤降碳措施主要包括产能结构优化、资源循环利用、原燃料结构调整、节能技术改造以及碳中和革命性技术研发，不同情景的减排路径通过设定各措施在不同阶段的发展水平来表征。

表 4-1 不同情景下钢铁行业控煤降碳措施参数设定

措施	参数	情景	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
产能结构优化	电炉钢占比（%）	基准情景	10	12	15	20
		政策情景		15	20	25
		强化情景		18.2	26.3	34.4
	电炉钢废钢比（%）	基准情景	66	70.7	75.3	80
		政策情景		74	82	90
		强化情景		75.7	85.3	100
资源循环利用	社会废钢收得率（%）	基准情景	1.4	1.8	2.2	2.6
		政策情景		1.9	2.5	3
		强化情景		2	2.6	3.2
	废钢资源量（亿吨）	基准情景	2.63	3.39	4.08	4.60
		政策情景		3.51	4.32	4.97
		强化情景		3.53	4.39	5.12
原燃料结构调整	高炉球团矿配比（%）	基准情景	13	15.3	17.7	20
		政策情景		18.7	24.3	30
		强化情景		22	31	40
碳中和革命性技术研发	氢冶金和CCUS技术规模	基准情景	-	不考虑部署氢能炼铁和碳捕集利用与封存等革命性技术试点		
		政策情景		在 2035 年以前，部署 500 万吨产能的氢能炼铁和碳捕集利用与封存技术作为试点示范		
		强化情景		在 2035 年以前，部署 1000 万吨产能的氢能炼铁和碳捕集利用与封存技术作为试点示范		

4.3 钢铁行业煤炭消耗与碳排放预测分析

4.3.1 煤炭消耗与碳排放预测

在基准情景下，我国钢铁行业煤炭消费将在 2027 年达到峰值 4.7 亿吨标煤左右（含焦炭，下同），随后进入平台期，预计“十六五”期间开始下降，到 2035 年降至 4.5 亿吨标煤。在政策和强化情景下，我国钢铁行业煤炭消费量已于 2020 年达峰（4.6 亿吨标煤），在 2021-2035 年一直呈下降趋势，强化情景的降速更快。

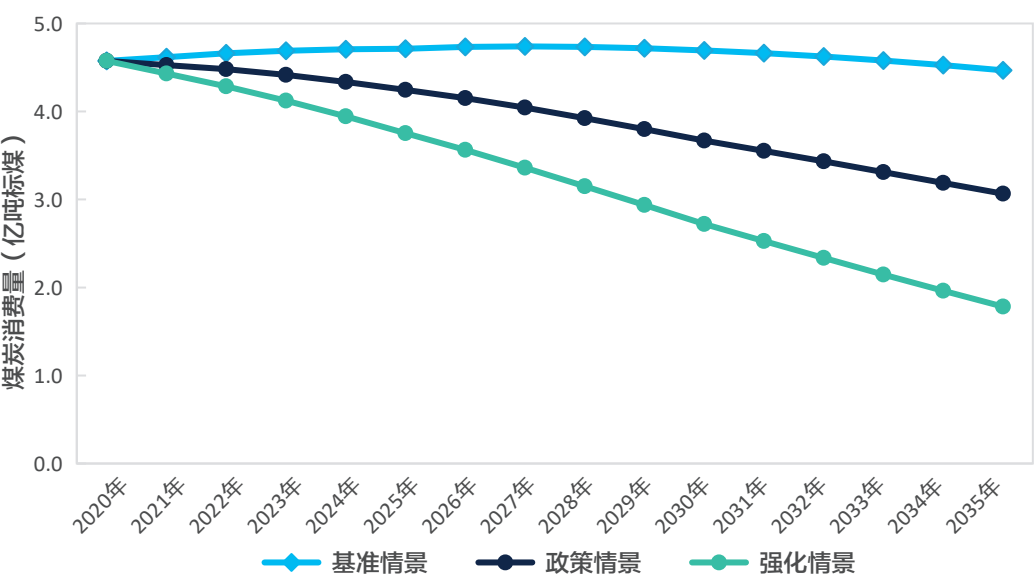


图 4-2 不同情景下我国钢铁行业煤炭消费量（含焦炭）

基准情景下我国钢铁行业碳排放在 2024 年前后达峰，峰值 16.8 亿吨左右，“十四五”期间处于平台期，“十五五”开始快速下降；政策情景和强化情景下在 2020-2021 年左右达峰，且下降速度相对较快，峰值在 16.4 亿吨左右。

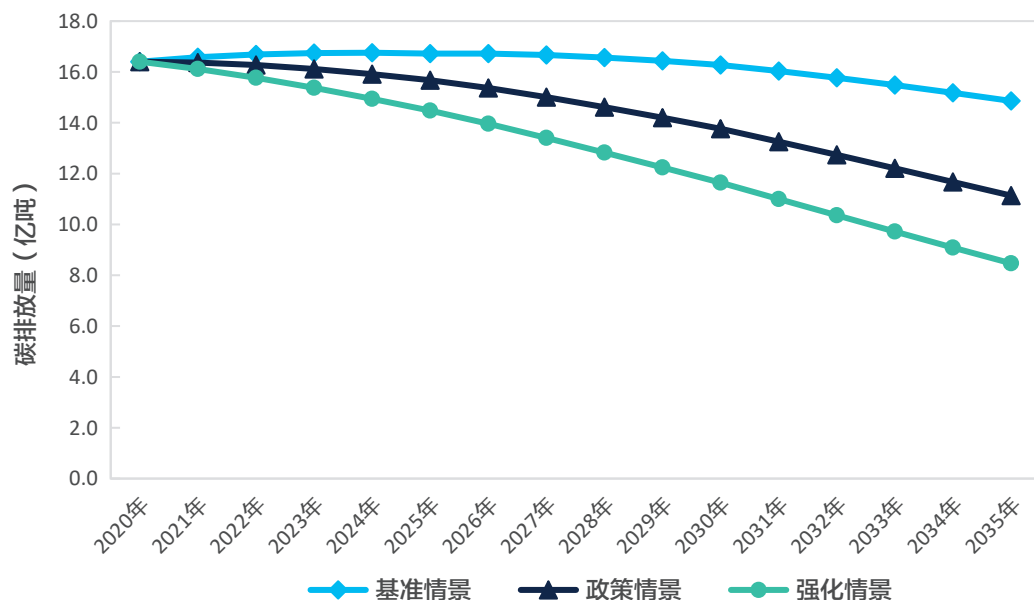


图 4-3 不同情景下我国钢铁行业二氧化碳排放量预测

4.3.2 各措施控煤贡献分析

减煤量核算分为产量带来的减煤贡献，以及控煤降碳措施的减煤贡献两部分：通过假定控煤降碳措施不变，计算仅产量变化带来的减煤量；以及假定产量不变，计算不同情景对应的控煤降碳措施带来的减煤量。研究产能结构优化（推进全废钢电炉短流程）、原燃料结构调整（高炉炉料结构优化）、节能技术推广、资源循环利用（加大废钢利用）和钢铁行业碳中和革命性技术试点示范（氢冶金和碳捕集利用与封存）五个措施的减煤贡献，其中碳中和革命性技术试点示范在 2021-2035 年产能相对较小，减煤贡献忽略不计。

相较基准情景，政策情景在 2021-2035 年累计减煤 16.8%，扣除产量差异的影响后，产能结构优化对钢铁行业减煤贡献在 50% 以上，其次为资源循环利用（占比约 33%），节能技术改造和原燃料结构调整的减煤贡献相对较小。

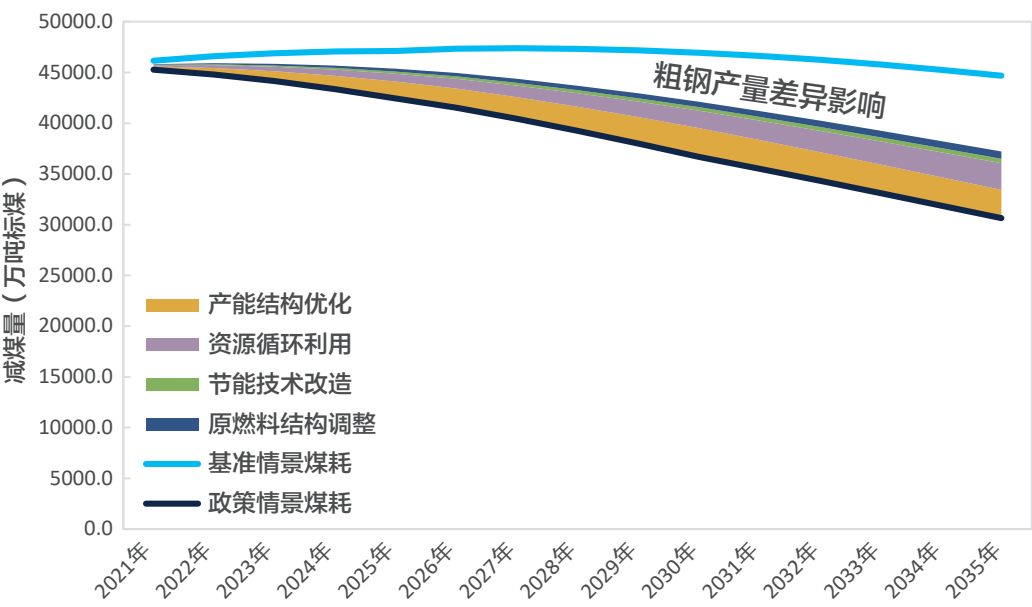


图 4-4 政策情景下各措施减煤贡献

相较基准情景，强化情景在 2021-2035 年累计减煤 32.7%，产能结构优化和资源循环利用依然是减煤贡献最大的两个措施。“十六五”期间，由于炼钢废钢比相对较高，资源循环利用措施的减煤贡献愈加增大。

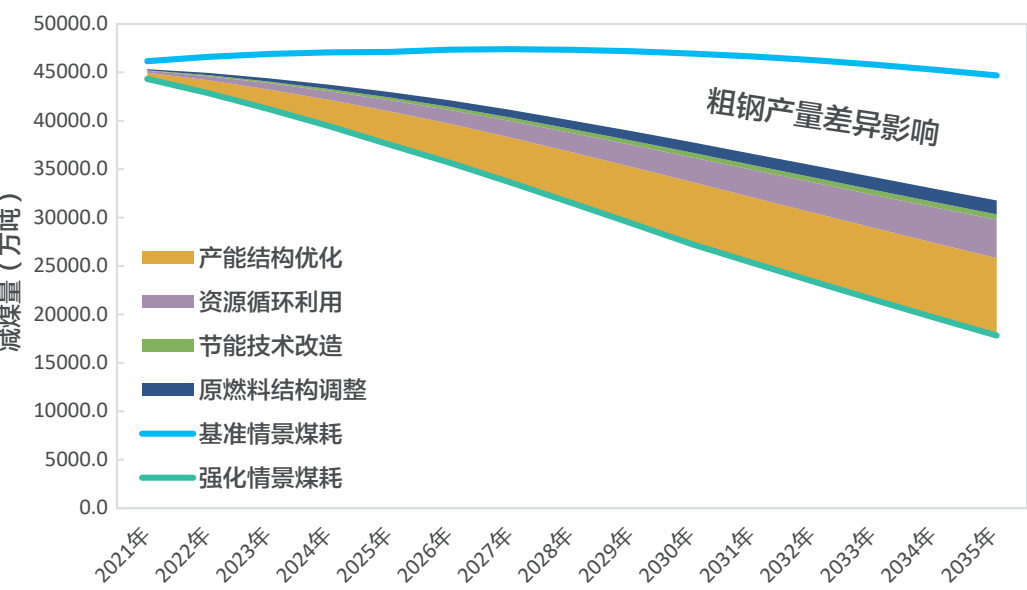


图 4-5 强化情景下各措施减煤贡献

5

水泥行业控煤情景分析

水泥行业是我国国民经济发展的一个重要基础产业，也构成了现代城市建筑的躯干。我国是世界上水泥产量最大的国家，2020 年水泥产量为 23.8 亿吨，约占世界水泥总产量的 57%。水泥行业的煤炭消费量约占全国煤炭消费的 6%，二氧化碳排放占全国碳排放总量的 12% 左右（包括工业过程排放）。

5.1 经济发展对水泥行业的需求分析

采用多因素拟合分析法 + 类比分析法、需求预测法和需求侧管理法预测水泥熟料消费量。多因素拟合分析法 + 类比分析法基于城镇化率、人均 GDP、固定资产形成总额、三次产业结构、固定资产投资结构等发展趋势，借鉴发达国家（地区）水泥消费峰值后的变化趋势，结合我国国情，对中长期水泥熟料消费量进行的预测。需求预测法是依据房屋竣工面积的预测，对水泥和熟料消费需求进行测算。需求侧管理法是通过提高材料的利用效率和加强循环再利用降低水泥的需求，到 2025，2030 和 2035 年水泥用量预测值分别比需求预测法降低 2%，3% 和 5%。

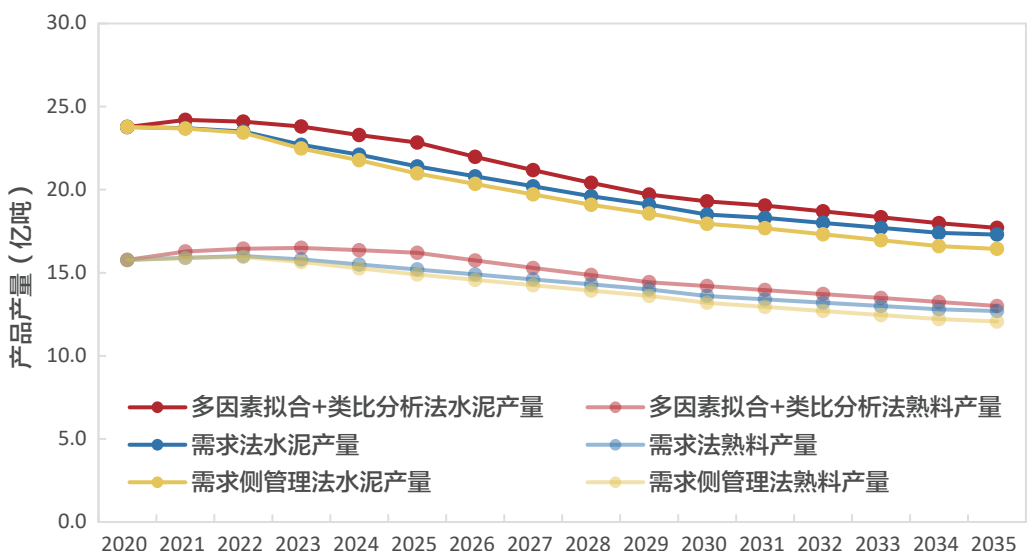


图 5-1 我国水泥熟料和水泥产量预测

5.2 控煤措施情景设定

水泥行业控煤降碳措施包括产业结构优化、能源结构调整、节能技术改造、资源循环利用和末端捕集封存五类。研究设定基准、政策和强化三个水泥行业发展情景。基准情景下，水泥行业依据现有政策发展。政策情景下，水泥行业实施较强的控煤降碳措施。强化情景下，水泥行业的各项控煤降碳措施均提高到最大强度。基准、政策和强化情景下的水泥和水泥熟料产量分别对应多因素拟合分析法、需求法和需求侧管理法的产量。

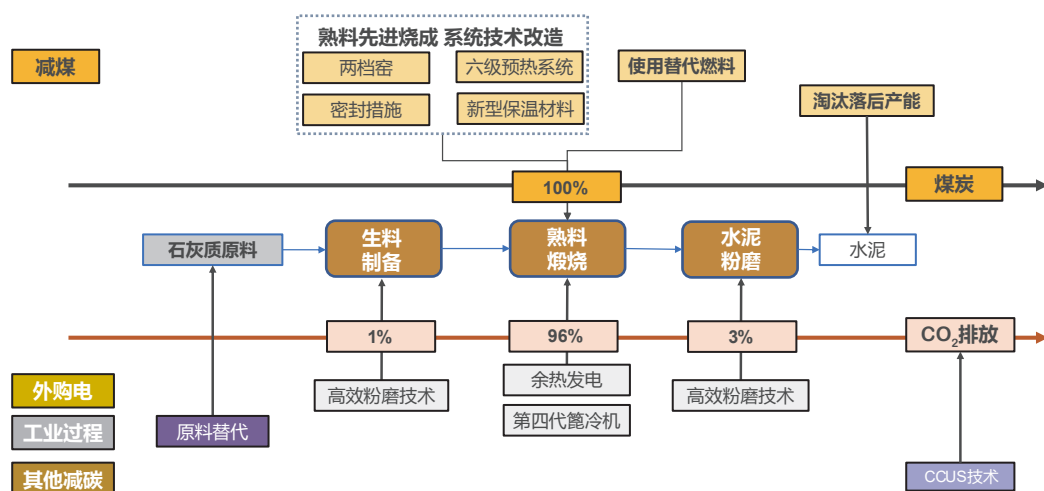


图 5-2 国内外先进控煤降碳措施工序图

产业结构优化。产业结构优化措施包括淘汰落后产能和产能置换。加快淘汰落后产能是提高工业水平、调整产业结构、加快节能减排的重要举措。产能置换是利用市场化、法治化手段推动水泥玻璃行业供给侧结构性改革、化解过剩产能的有效手段。通过产能置换严禁新上扩大产能项目，有效遏制产能无序扩张，积极推动化解过剩产能、调整产业布局、推动兼并重组、提升技术装备水平、节能减排等。

能源结构调整。积极推进燃料替代是水泥行业减煤的重要措施。城市生活垃圾发热量较高，并且二氧化碳、二氧化硫以及重金属排放比较少，可以满足水泥企业节能减排需求。截至 2020 年，能够进行生活垃圾协同处置的水泥窑有 68 条，年处理量达到 691 万吨生活垃圾。

节能技术改造。水泥行业的节能技术包括先进烧成技术、高效粉磨技术和高效隔热

保温材料及砌筑技术等。先进烧成技术通过提高预热器系统的换热效果，大幅度降低预热器出口废气温度以降低熟料烧成热耗。高效粉磨技术包括辊压机、立磨、高细磨及其各种磨组成的联合粉磨等先进设备和系统，以及高效选粉机、高性能水泥助磨剂等粉磨节能技术。高效隔热保温材料及砌筑技术通过窑衬砌筑技术的提高及使用高性能隔热保温耐火衬料，有效降低窑筒体温度。

原料替代。替代原料主要有燃料渣（包括粉煤灰、煤矸石、炉渣等）、冶金渣（包括高炉矿渣、钢渣、赤泥等）、化工渣（包括碱渣、硫铁矿渣、电石渣）等。考虑到电石渣产量有限，这里原料替代措施主要针对钢渣替代。

末端捕集利用封存。末端捕集利用封存是指将对二氧化碳大型排放源所排放的二氧化碳进行捕集、压缩后输送并封存，或进行工业应用（如食品加工、离岸驱油及生产化学产品等）的一种技术。

表 5-1 水泥行业控煤情景设置										
措施		2025 年			2030 年			2035 年		
一级措施	二级措施	基准情景	政策情景	强化情景	基准情景	政策情景	强化情景	基准情景	政策情景	强化情景
能源结构调整	燃料替代 / 条	180	200	230	180	200	230	180	200	230
产业结构优化	产能置换	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1
节能技术改造	先进烧成技术	30%	40%	50%	40%	50%	60%	50%	60%	75%
	高效粉磨技术	40%	45%	60%	60%	70%	80%	80%	90%	95%
	高效保温技术	30%	35%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%
资源循环利用	原料替代	10%	15%	20%	15%	25%	30%	20%	35%	40%
新增末端捕集封存	CCUS 技术 / 万吨	50	80	100	100	150	200	150	200	300

5.3 未来十五年水泥行业煤炭消耗量与碳排放预测

5.3.1 煤炭消耗与碳排放预测

基准情景下，我国水泥行业煤炭消费在“十四五”前期短暂增长，到 2022 年达到煤耗峰值（峰值 1.83 亿吨标煤），随后开始下降，到 2030 年降低 21%。在政策情景下，我国水泥行业煤炭消费在 2021 年达峰（峰值 1.783 亿吨标煤），到 2030 年下降 23%。在强化情景下，我国水泥行业煤炭消耗在 2020 年达峰（1.782 亿吨标煤）后以更快速度下降，到 2030 年，煤炭消耗总量比峰值年下降 26%。

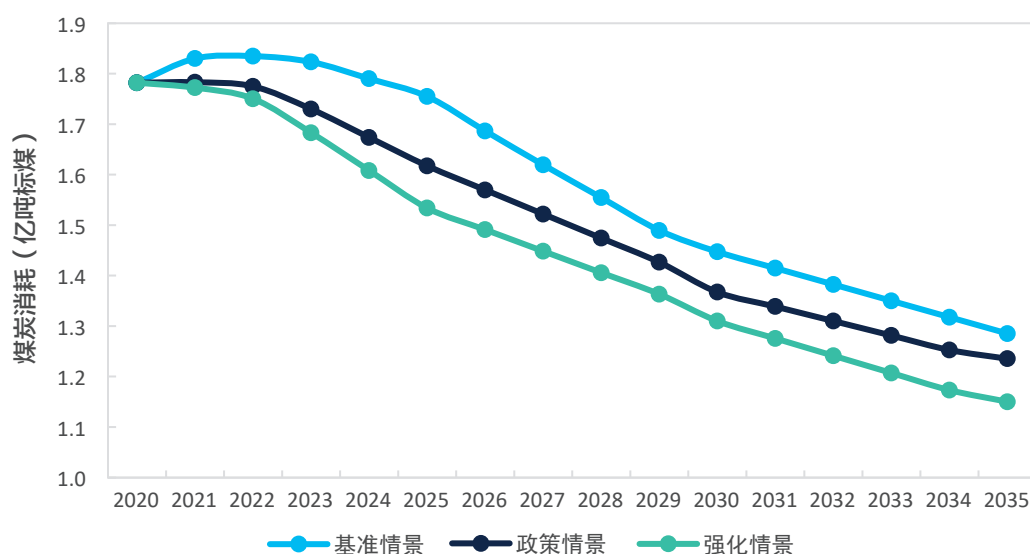


图 5-3 不同情景下水泥行业的煤炭消耗量

三种情景下，水泥行业的碳排放在都在“十四五”前期达到峰值，峰值在 14 亿吨左右。基准、政策、强化情景下，2030 年水泥行业碳排放分别较峰值下降 17%、18% 和 21%。

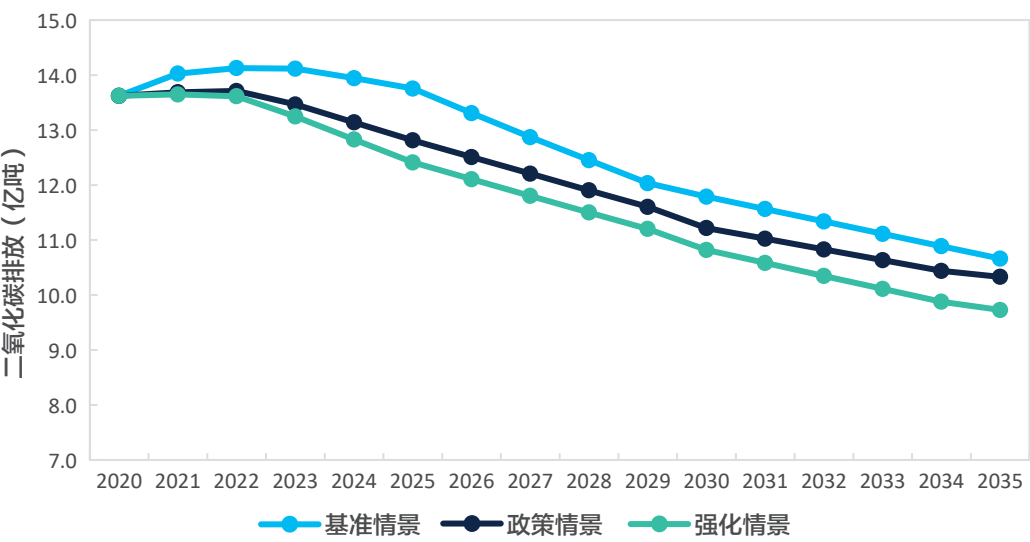


图 5-4 不同情景下水泥行业的碳排放量

5.3.2 各措施减煤贡献分析

减煤量核算分为需求（即产量）带来的减煤贡献，以及各措施的减煤贡献两部分，计算相对于基准情景的减煤量。

相较基准情景，政策情景在 2021–2035 年累计减煤 5.2%，其中，产量减少、淘汰落后产能和产能置换、水泥窑协同处置生活垃圾、水泥窑节能技术改造和钢渣替代石灰石的减煤量分别占比约 81%、8%、4%、4% 和 3%。

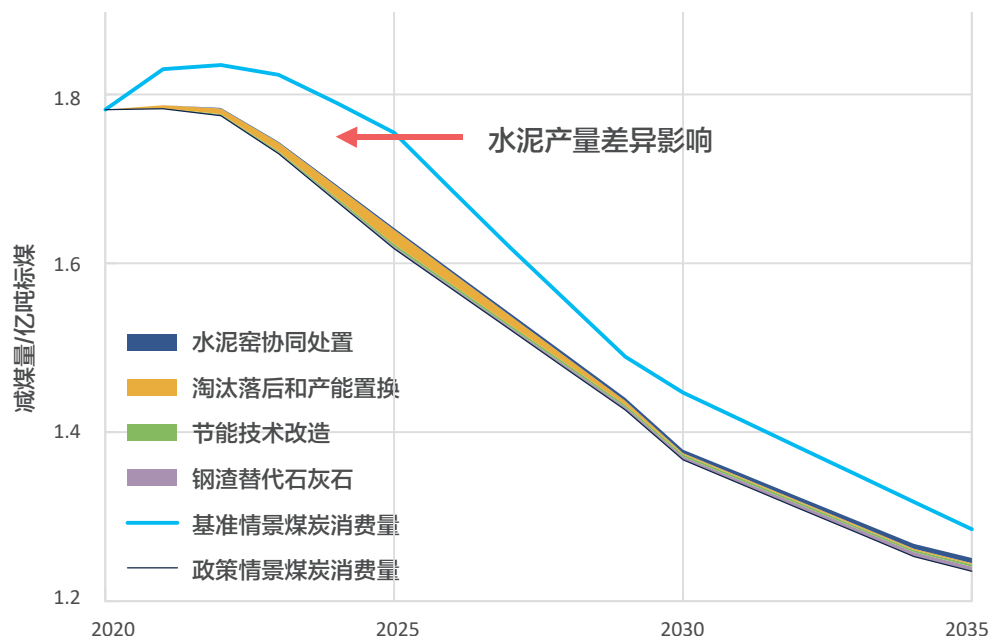


图 5-5 2021-2035 年政策情景下各项措施的减煤贡献

相较基准情景，强化情景在 2021-2035 年累计减煤 9.2%，其中，产量减少、淘汰落后产能和产能置换、水泥窑协同处置生活垃圾、水泥窑节能技术改造和钢渣替代石灰石的减煤量分别占比约 74%、14%、6%、3% 和 3%。

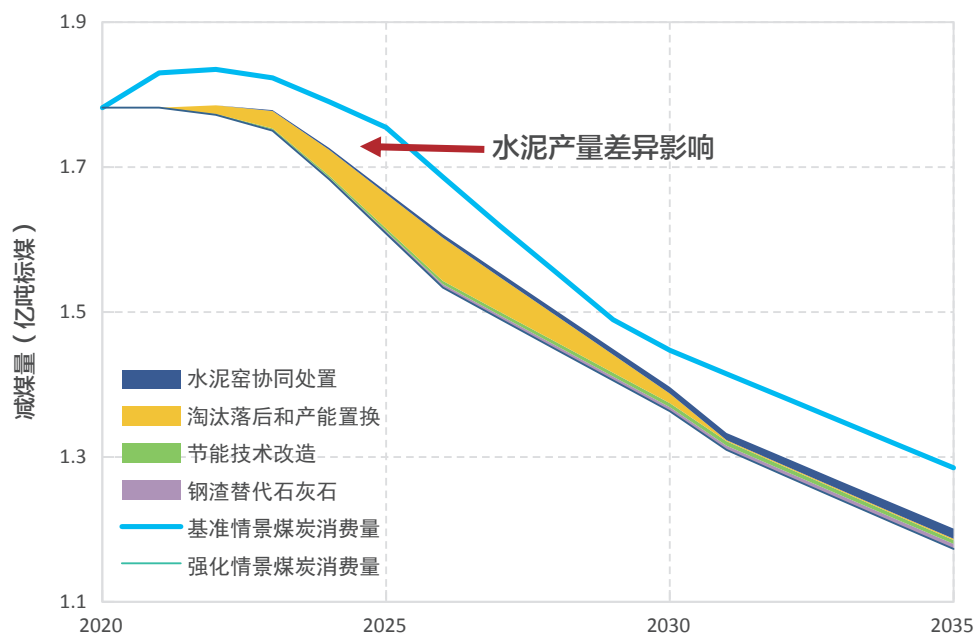


图 5-6 2021-2035 年强化情景下各项措施的减煤贡献

6

煤化工行业控煤情景分析

煤化工行业是基于我国资源禀赋特点发展的重点行业，是我国工业经济的重要组成部分，近年来我国煤化工产业规模呈现稳步增长趋势。2019年，煤化工行业煤炭消耗量9.0亿吨原煤（含煤焦化），约占我国煤炭消费总量的22%；二氧化碳排放量5.4亿吨，约占全国二氧化碳排放总量的5%。煤化工行业研究范围包括煤制合成氨、煤焦化、煤制半焦、煤制甲醇、煤制油（含直接液化和间接液化）、煤制天然气、煤制芳烃、煤制乙二醇等。

6.1 煤化工行业发展预测

煤化工行业发展预测是基于煤化工各子行业的特点，对影响子行业煤耗和碳排放的关键因素进行识别，结合生态环境治理要求、经济社会发展趋势判断行业发展趋势。

1) 合成氨、焦化、半焦以及甲醇行业与下游产品市场需求密切相关，采用部门需求法预测产能，预测依据：

- 合成氨：到“十四五”末，受肥效提高、有机肥替代以及环保、新材料和专用化学品等工业消费提高的影响，合成氨在农业领域的消费量将降至3600万吨左右，年均降速超过2%；合成氨在工业领域的消费量将增至2100万吨左右，年均增速将高于5%。
- 焦化：受国家环保政策因素和下游产业技术进步（废钢利用技术发展，电炉钢占比增大），焦化行业正在向产能压缩的方向发展。焦炭未来需求量的预测根据“以钢定焦”原则及冶金工业经济发展研究中心对粗钢产量、电炉钢比例、冶金焦比的预测计算得出。
- 半焦（兰炭）：目前，兰炭主要应用于电石、冶金、化肥造气等传统行业，需求有限。近年来，兰炭作为散煤的主要替代品产量略有提升，但采用兰炭替代散煤仅为权宜之计，未来仍将走向无煤的清洁能源路线。“十四五”期间，预计兰炭产量保持不变；到“十五五”“十六五”期间，兰炭产量逐年减少。
- 煤制甲醇：我国甲醇需求主要来自传统消费、醇醚燃料、甲醇制烯烃这三个领域。1) 在传统消费领域中，甲醇主要用于生产甲醛、醋酸、甲胺等产品，市场发展已趋于成熟，未来市场需求将保持相对稳定，不会出现大幅度的增长。2) 在醇醚燃料领域，工信部、国家发改委等8部委在2019年3月发布《关于在部分地区开展甲醇汽车应用的指导意见》，重点在陕西等资源禀赋条件较好且具有甲醇汽车运行经验的地区，加快M100甲醇汽车的应用，未来甲醇作为燃料需求量或会增加。3) 甲醇制烯烃领域，随着技术的成熟，近几年增长势头较好。

2) 煤制油、煤制天然气、煤制烯烃、煤制乙二醇行业主要为大型项目，尚处于工业示范阶段，项目建设、达产的周期较长，通常为五年以上，因此采用项目法核算，分类统计试运行、在建和核准项目，在此基础上综合考虑国内外产品市场竞争、能源安全和资源环境约束等因素，预测其发展趋势，预测依据简述如下：

- 煤制油：国内目前煤直接液化制油项目只有神华鄂尔多斯煤直接液化制项目，已建成一期的 108 万吨 / 年生产线，二三线项目处于核准阶段，按照新建项目 3 年建设、3 年达产的周期，2025 年煤直接液化产能不会增加，预计在 2030 年形成 142 万吨产能。国内在建的煤间接液化制油项目只有伊泰内蒙古 200 万吨间接煤制油项目和伊泰伊犁 100 万吨煤制油项目，预计 2025 年会投产运行、增加 300 万吨产能；基于已核准项目清单，若全部投产运行，则 2035 年煤间接液化产能将达到 1700 万吨。
- 煤制天然气：目前国内在建的天然气项目有 4 个，其中大唐阜新 40 亿立方煤制气项目一期已经处于试车状态，预计 2021 年投产运行；大唐克旗煤制气二期、内蒙古汇能鄂尔多斯煤制气二期预计“十四五”期间投产运行；北控京泰鄂尔多斯 40 亿立方煤制气项目预计“十五五”期间建成运行投产。但由于早期发展过快，煤制天然气产业目前陷入低迷状态，多数项目仍处于前期阶段，无实质性进展，预计 2030 年能再增加核准项目产能的 10%，到 2035 年煤制天然气产能保持不变。
- 煤制烯烃：目前国内核准、在建和试生产的煤制烯烃项目大约有 11 个（产能 610 万吨）。假定核准项目不再建设，在建和试生产的煤制烯烃项目（产能 530 万吨）“十四五”期间 40% 左右投产运行（以预生产项目为主），“十五五”期间 30% 左右投产运行，“十六五”期间剩余 30% 左右投产运行，预测对应的煤制烯烃产能情况。
- 煤制乙二醇：目前国内核准、在建和试生产的煤制乙二醇项目大约有 20 个，一般煤制乙二醇新建项目周期为 2 年建设、1 年试运行投产。预计在“十四五”期间，预生产、在建的煤制乙二醇项目 50% 投产运行，新增加约 287 万吨产能；“十五五”期间，预生产和在建项目全部投产；预计核准项目在“十六五”期间转化成在建状态，按照发挥 50% 的产能计算，则 2035 年煤制乙二醇的产能将达到 1200 万吨。

表 6-1 煤化工行业产品需求及产能预测

单位：万吨			
领 域	2025 年	2030 年	2035 年
煤直接液化	108	250	250
煤间接液化	1113	1400	1700
煤制天然气 (单位：亿立方米)	90	150	150
煤制烯烃	1260	1440	1600
煤制乙二醇	765	1053	1200
煤制合成氨	5700	5300	5000
煤焦化（焦炭）	48000	38000	30000
半焦	4085	2600	1100
煤制甲醇	3863	4125	4288

6.2 控煤降碳措施的分析及情景设定

6.2.1 控煤降碳措施分析

煤化工行业控煤降碳措施主要包括原料结构调整、燃料结构调整、节能技术改造、末端捕集利用和产业结构调整。将未来煤化工行业分为基准、政策和强化三种发展情景，分别设定不同控煤降碳措施应用比例，表征煤化工行业未来可能的发展路径。

（1）原料结构调整

合成氨和甲醇行业具备较好的原料替代应用前景。目前，我国煤制合成氨占合成氨总产能的 75%。而从世界范围来看，在 2000 年至 2018 年阶段，天然气在合成氨原料组合中处于支配地位，份额稳定在 70%；其次是煤炭，占比 28%。而我国受制于天然气

资源局限和市场制约，以天然气为原料的合成氨产能增长缓慢，但可以采用焦炉煤气作为合成氨的原料，促进炼焦生产资源综合利用的同时，减少合成氨煤耗及二氧化碳排放量。且随着光伏、风电等新能源发展，绿氢的生产成本得到进一步下降，未来可代替煤制合成气用于合成氨、甲醇等下游产品。

(2) 燃料结构调整

化石燃料燃烧排放的二氧化碳约占现代煤化工产业（主要指煤制油、制天然气、煤制烯烃、煤制乙二醇）二氧化碳排放量的 30%，排放主要来自为煤化工工艺装置提供动力蒸汽、热源和自发电而配套建设的锅炉装置。目前，大多数企业从经济性的角度选择蒸汽驱动工艺装置的大型压缩机，从而增大了燃煤消耗。实际上，工艺装置中此类压缩机可以选择电力驱动。将大型空分和中小型压缩机组由汽轮机驱动调整为电驱，进一步降低煤炭消耗；同时减少二氧化碳排放。

(3) 节能技术改造

节能技术改造包括低温余热发电技术、先进煤气化技术和自动化控制技术。其中，低温余热发电技术是利用工业过程中产生的余热进行发电，将低温热能直接转化成高品质的电能。煤化工行业工业过程涉及热媒水、热弛放气、热尾气等多种余热资源，适合采用低温余热发电技术，如煤化工领域全部采用低温余热发电技术，单位产品能耗至少下降 10% 以上。先进煤气化技术是将固定床间歇式气化技术转为更先进的气化技术，以实现高气化率及低能耗。自动化控制技术是指自动化、智能化改造，以降低人力物力，降低单位产品能耗。

(4) 末端捕集技术

我国在 CCUS 等多个技术环节取得长足进步，关键技术实现了重大突破，经过工程示范推广，现已具备了技术工业化应用能力。目前，化工行业已建成神华鄂尔多斯 10 万吨/年的 CCS 示范项目（2011 年），延长石油 5 万吨/年的二氧化碳捕集利用项目（2012 年），新疆敦化利 10 万吨/年二氧化碳捕集项目（2016 年），共计 25 万吨/年二氧化碳消纳能力，仅占化工行业每年二氧化碳排放量的 0.05%。化工行业由于尾气中二氧化碳含量占 70% 以上，分离回收二氧化碳成本相对其他行业较低，CCUS 相关技术具有广阔的应用前景。

(5) 产业结构调整

目前，现代煤化工（主要指煤制油、煤制天然气、煤制烯烃、煤制乙二醇）仍有大量的核准项目，如未来投产建设，将会对煤化工行业的耗煤量和二氧化碳排放产生重大的影响。应统筹考虑国家能源安全、我国市场需求和“双碳”约束，适当控制现代煤化工发展规模，严格控制新增产能，有序开展相关建设。

表 6-2 不同情景下减煤降碳措施应用比例

措施		基准情景			政策情景			强化情景		
一级措施	二级措施	2025年	2030年	2035年	2025年	2030年	2035年	2025年	2030年	2035年
原料结构调整	原料替代（煤制合成氨 & 甲醇占比）	75%	75%	75%	70%	55%	40%	60%	40%	20%
	燃料结构调整									
节能技术改造	现代煤化工电气化改造比例	0%	0%	0%	10%	30%	50%	30%	60%	90%
	应用低温余热发电技术	5%	10%	15%	30%	60%	90%	30%	60%	90%
	应用先进煤气化技术占比	10%	30%	50%	20%	60%	100%	20%	60%	100%
	自动化改造占比	5%	10%	15%	10%	30%	50%	20%	60%	100%
末端捕集利用	CCUS 技术占比	0%	0%	0%	1%	3%	5%	2%	5%	10%
产业结构调整	新型煤化工（煤制油、煤制天然气、煤制烯烃、煤制乙二醇）在建、核准项目	如期进行	如期进行	如期进行	在建如期进行，核准50%建设			在建如期进行，核准不建设		

6.2.2 产品产量预测

煤化工行业产品产量的预测是在当前现有的经济社会发展规划和行业政策发展之下，结合产品的进出口比例和市场需求预测，以及不同情景下的措施应用比例，综合计算得出。

表 6-3 不同情景下煤化工产品产量预测

单位：万吨

煤化工 产品产 量预测	基准情景			政策情景			强化情景		
	2025 年	2030 年	2035 年	2025 年	2030 年	2035 年	2025 年	2030 年	2035 年
合成氨	4275	3975	3750	3990	2915	2000	3420	2120	1000
焦炭	4.8 万	3.8 万	3 万	4.7 万	3.8 万	3 万	4.5 万	3.6 万	2.9 万
半焦	4085	2600	1100	4085	2600	1100	4085	2600	1100
甲醇	6937	7929	8616	6121	5130	4054	4897	3731	2027
煤直接 制油	80	175	200	80	123	140	80	80	80
煤间接 制油	890	1120	1360	890	1000	1120	890	890	890
煤制天 然气	76.5 亿 m ³	135 亿 m ³	142.5 亿 m ³	76.5 亿 m ³	110 亿 m ³	119 亿 m ³	76.5 亿 m ³	110 亿 m ³	110 亿 m ³
煤制 烯烃	1045	1224	1360	1045	1162	1287	1045	1162	1162
煤制乙 二醇	497	737	840	497	684	780	497	684	684

6.3 煤炭消耗与碳排放预测分析

6.3.1 煤炭消耗与碳排放

基于未来煤化工产品的产量预测，以及不同产品的单位煤耗和碳排放系数，计算得出不同情景下煤化工行业煤炭消耗量及二氧化碳排放量。基准情景下，煤炭消耗量达峰年为 2025 年，达峰量为 9.6 亿吨。政策情景下，煤炭消耗量达峰年为 2024 年，达峰量为 9.3 亿吨。强化情景下，煤炭消耗量达峰年为 2021 年，达峰量为 9.1 亿吨。

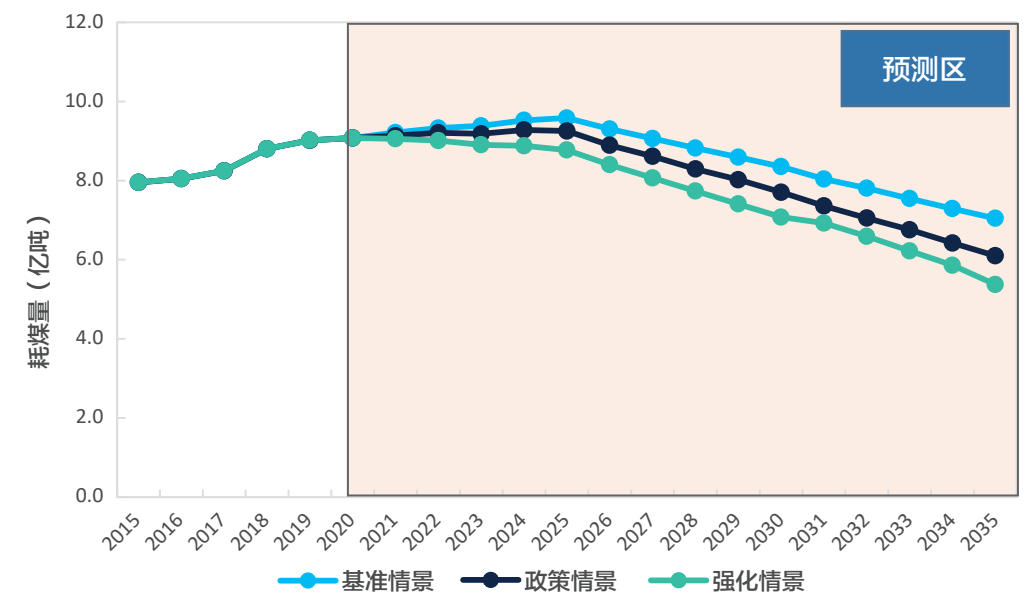


图 6-1 煤化工行业不同情景煤炭消耗量

在基准、政策、强化情景下,二氧化碳排放分别于2030年、2024年、2021年左右达峰,峰值分别为6.4亿吨、5.7亿吨、5.5亿吨。

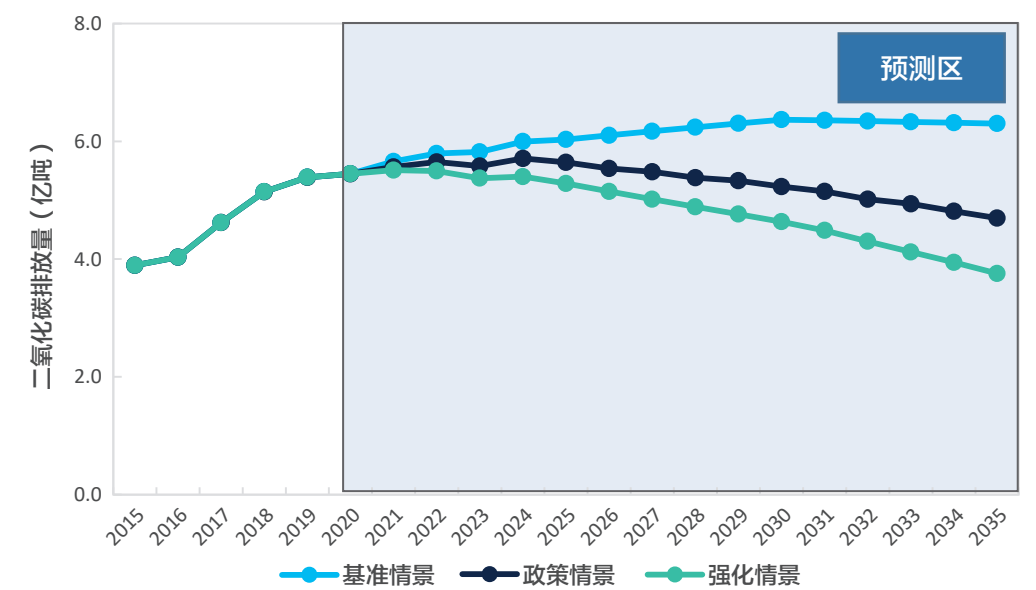


图 6-2 煤化工行业不同情景二氧化碳排放量

6.3.2 各项措施的减煤分析

相较于基准情景，政策情景到 2035 年累计减煤 5.5%，其中，原料结构调整和产业结构调整减煤贡献较大，分别占总减煤量 54% 和 25%。在强化情景下，到 2035 年累计减煤 10.6%，其中原料结构调整和产业结构调整措施分别占总减煤量 53% 和 26%。

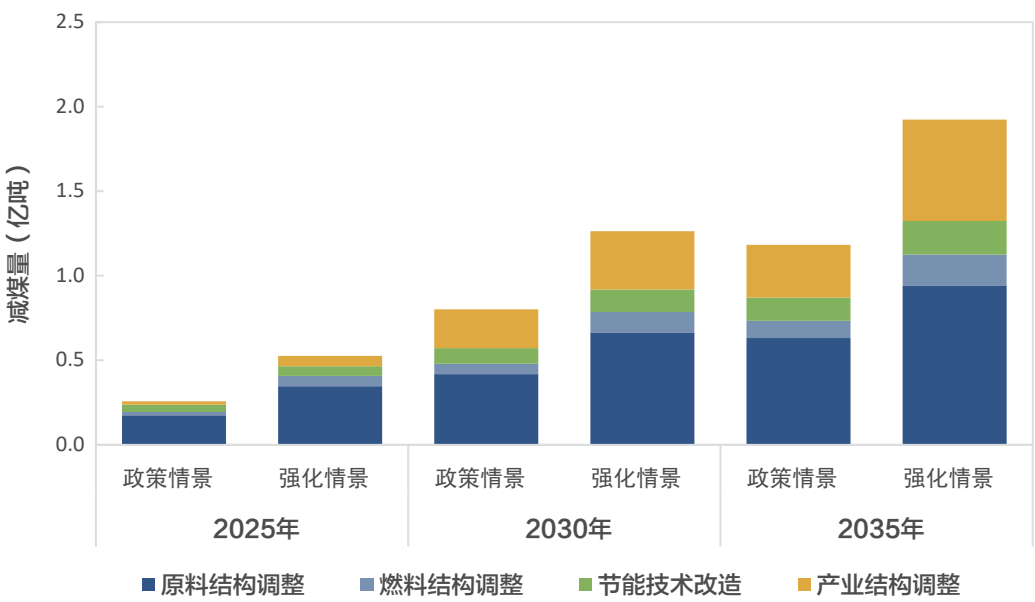


图 6-3 煤化工行业不同情景不同措施减煤量

7

双碳约束下重点行业煤炭控制总量控制路线图

7.1 重点行业煤炭消费总量控制情景分析

7.1.1 重点行业煤炭消耗与碳排放预测

未来 10 年是我国基本实现现代化关键阶段，工业化、城镇化、信息化等多重发展带来煤炭消耗与碳排放增长的刚性压力。基准情景下，四行业煤炭消耗量合计将于 2029 年达峰，峰值为 26.8 亿吨标煤，碳排放于 2030 年达峰，峰值为 85.6 亿吨。在采取积极措施的政策情景下，四行业煤炭消耗量合计将于 2025 年达峰，峰值为 24.9 亿吨标煤，达峰前后有六年的平台期（2021-2026 年），碳排放于 2025 年达峰，峰值为 80.1 亿吨。在进一步加强措施力度的强化情景下，四行业煤炭消耗量合计可能已于 2020 年达峰，峰值为 24.4 亿吨标煤，碳排放将于 2022 年达峰，峰值 78.1 亿吨。

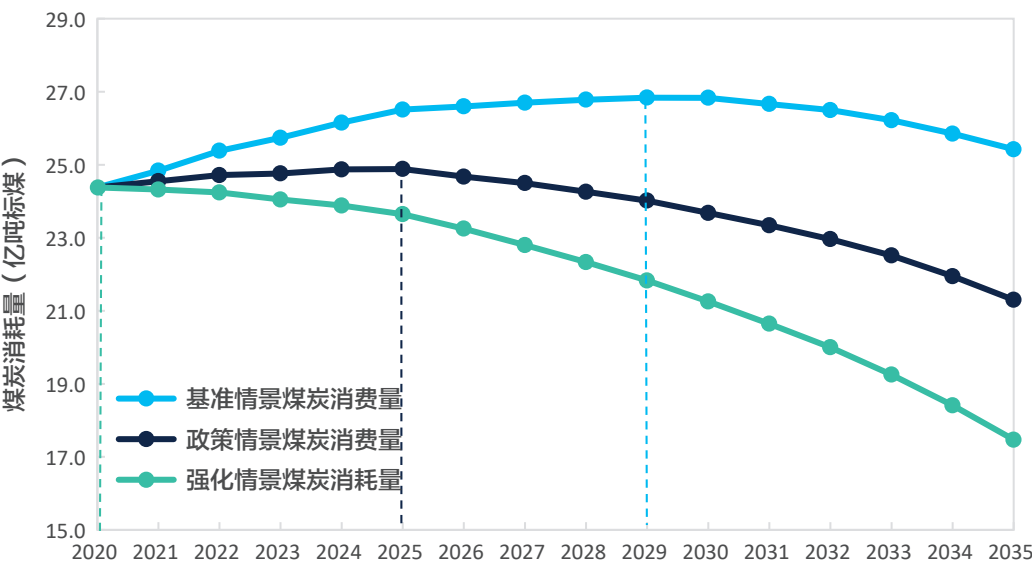


图 7-1 不同情景下四个行业煤炭消耗总量

分行业看，基准情景下，水泥和钢铁行业煤炭消耗量率先达峰，煤化工将于“十四五”末期达峰、电力将在“十五五”末期达峰。政策情景下，钢铁行业已于 2020 年达峰，水泥行业在 2021 年达峰，煤化工行业将“十四五”中后期达峰，电力将于“十五五”中后期达峰。强化情景下，钢铁、水泥、煤化工行业加强措施力度，均已达峰，电力行业将于“十四五”末期达峰。

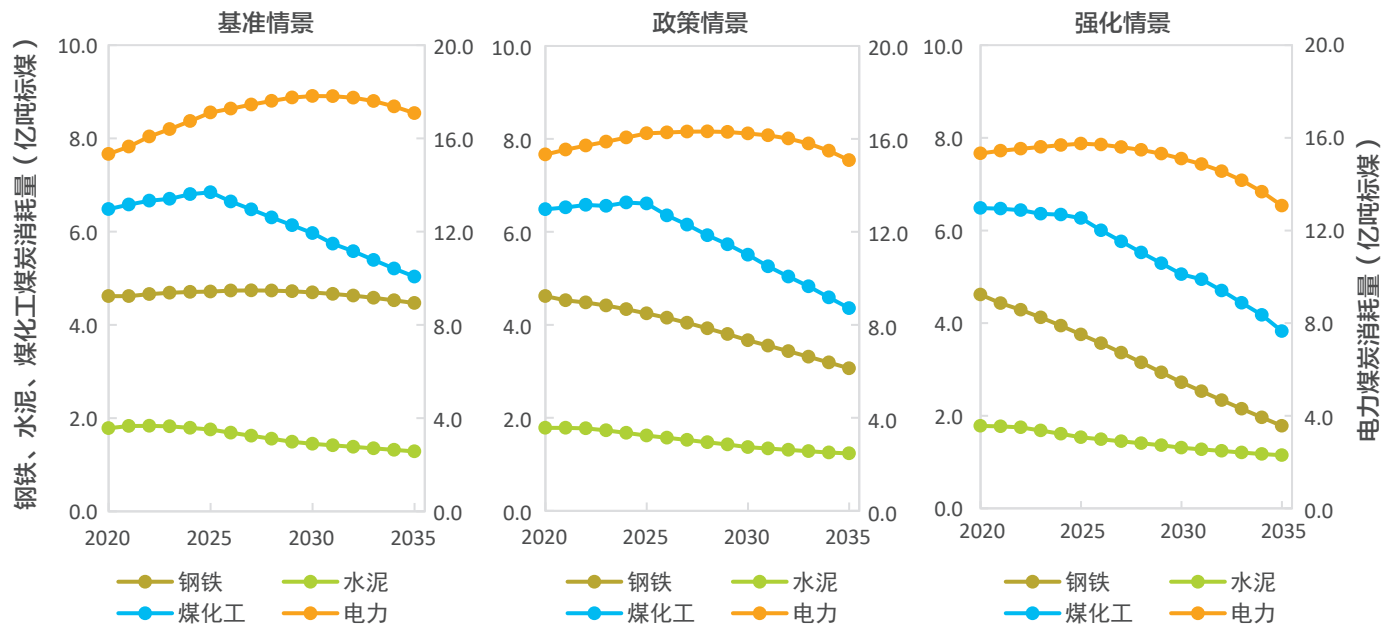


图 7-2 不同情景下电力、钢铁、水泥、煤化工（含焦炭）行业煤炭消耗量对比

7.1.2 不同措施的减煤贡献分析

大力推进清洁能源使用、加强行业产能调控与结构调整、推广能效提升技术和加快循环体系构建是四大行业减少煤炭消费量的有效措施。相较基准情景，政策情景在2021-2035年减少煤炭消费9.2%，其中，产品产量减少带动煤炭消费减少约占17%，能源结构调整、产业结构优化、节能技术改造、资源循环利用四项措施带来的减煤贡献分别为54%、13%、10%、6%；强化情景下各项措施力度增大，2021-2035年累计减少煤耗16.7%，年均减煤量4.4亿吨标煤，其中，产品产量减少带动煤炭消费减少约占19%，能源结构调整、产业结构优化、节能技术改造、资源循环利用四项措施减煤贡献分别占比43%、13%、20%、5%。

分行业贡献来看，相比基准情景，政策情景下电力、钢铁、水泥、煤化工减煤贡献分别为50%、33%、3%、14%。强化情景下电力、钢铁、水泥、煤化工减煤贡献分别为49%、35%、3%、13%。

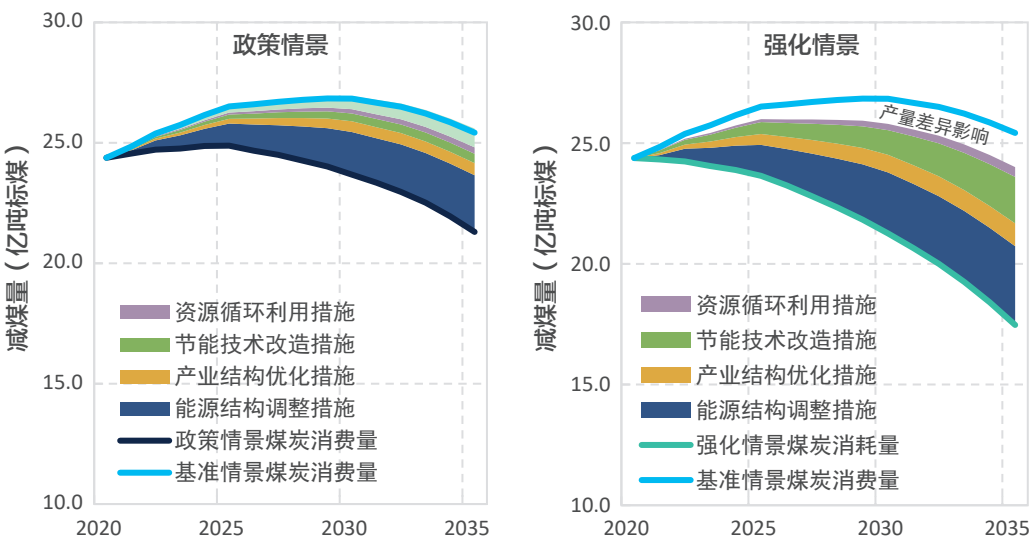


图 7-3 四行业政策情景和强化情景较基准情景的减煤量

7.2 重点行业达峰路线图

7.2.1 重点行业推荐情景与控煤目标

对比三种情景各项指标，推荐情景为政策情景，理由如下：

基准情景为现有规划发展的情景，未针对碳达峰碳中和采取进一步的控煤降碳措施，碳排放达峰时间未在 2030 年前。强化情景更多的考虑碳中和，未来减排压力相对较小，但面临措施力度大、投资要求高的问题，现阶段实现难度大。政策情景兼顾了碳达峰、减煤和措施可行性，因此，统筹考虑我国立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局总体要求和 2030 年非化石能源占能源消费比重承诺，在双碳背景约束下，推荐政策情景。

政策情景下，煤炭消耗量将在“十四五”缓慢增长，2025 年达到峰值，峰值 24.9 亿吨标煤，达峰前后有 5-6 年的平台期，碳排放将于同年达峰，峰值 80.1 亿吨。在此情景下，钢铁行业煤炭消耗量或已达峰，水泥行业煤炭消耗量将于 2021 年达峰，煤化工行业煤炭消耗量将于 2024 年达峰，电力行业煤炭消耗量将在 2028 年达峰。

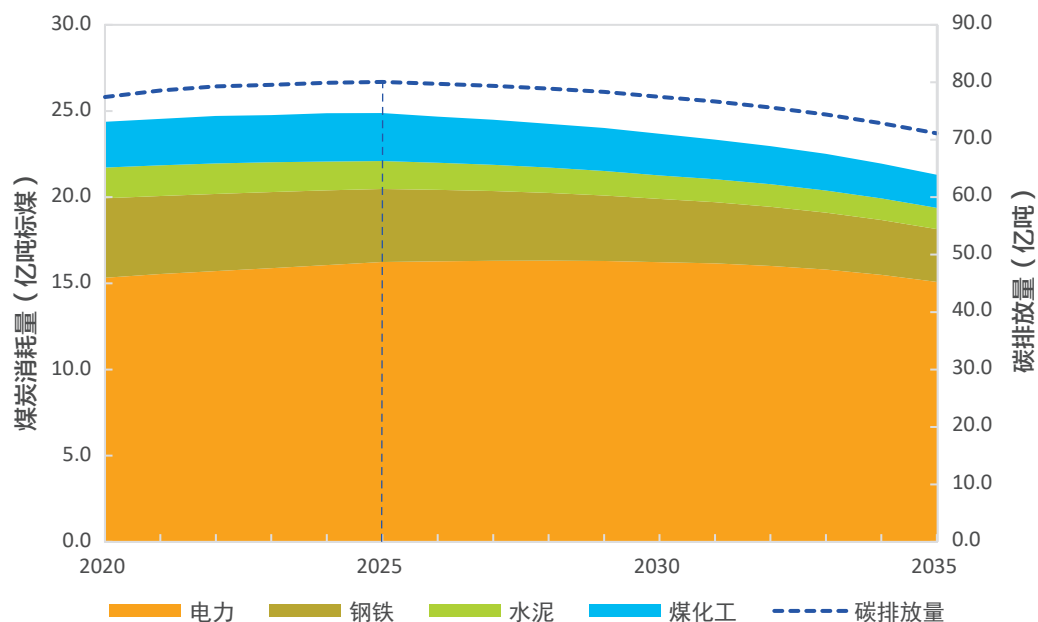


图 7-4 推荐情景下重点行业煤炭消耗和二氧化碳排放

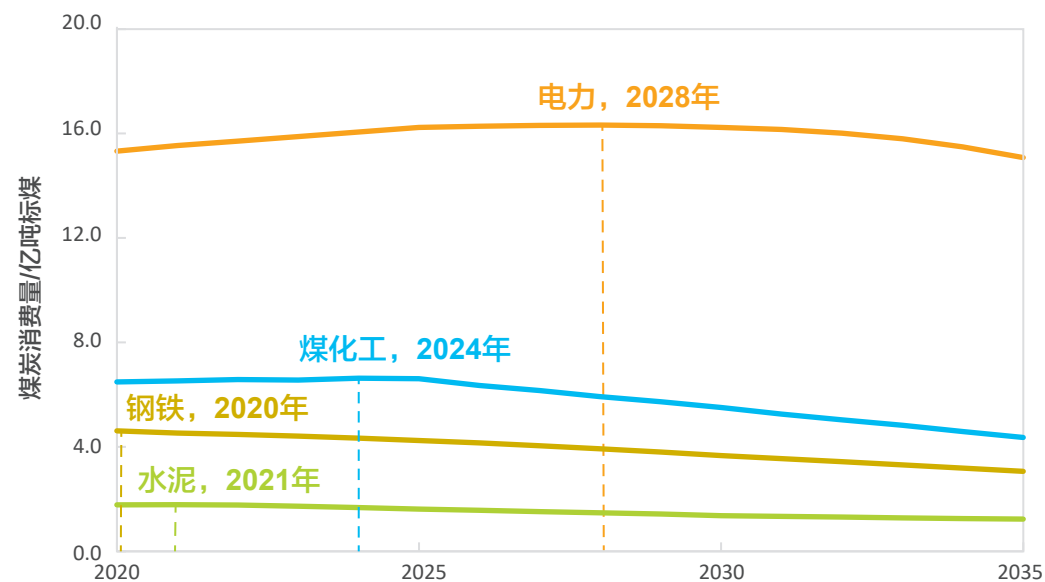


图 7-5 推荐情景下分行业煤炭消耗量

表 7-1 碳达峰碳中和约束下重点行业控煤目标

指标	单位	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
煤炭消费总量	亿吨标煤	24.4	24.9	23.7	21.3

7.2.2 重点行业达峰路线图



图 7-6 重点行业控煤降碳路线图

（1）“十四五”阶段（2021–2025 年）

煤电发展难以做到“急刹车”，因此仍会有一定增长，加大推进现役机组节能升级改造，持续降低发电煤耗。非化石能源发电加速发展，配套调峰抽水蓄能、新型储能大规模部署。全力推进全废钢电炉短流程，逐步提高电炉钢废钢利用率。严格执行水泥熟料产能减量置换，新建线使用先进烧成技术，实行高效节能综合技术改造。煤化工行业推广先进煤气化技术、自动化智能化改造，稳步推进燃料结构调整。钢铁、水泥、煤化工煤炭消耗和碳排放达峰。同时，积极探索大规模储能技术、氢冶金技术和 CCUS 等技术示范应用。

（2）“十五五”阶段（2026–2030 年）

煤电装机和煤炭消耗量进入峰值平台期，2030 年前对存量煤电机组大力实施灵活性改造，非化石能源持续加速替代，电力行业煤炭消耗和碳排放达峰。加大废钢利用，废钢成为钢铁行业铁素原料的主要替代，电炉钢占比进一步提升，继续提高球团矿配比和节能技术推广。工业行业持续推进余热发电技术改造，鼓励原料替代。有效降低储能、氢冶金、低碳水泥新产品和 CCUS 等技术成本。煤化工行业全面推广节能改造技术，稳步推进燃料结构调整，自动化、智能化技术在传统煤化工领域广泛应用。同时，严控现代煤化工发展速度，严格审批新的现代煤化工项目。

（3）“十六五”阶段（2031–2035 年）

2030 年后，不再新增煤电装机，部分煤电机组保持很低的利用小时数，但仍作为应急电源储备，风光等可再生能源持续加速发展。电炉钢占比高，废钢资源量进一步扩大。大规模储能、氢冶金和 CCUS 等技术逐步商业化应用。加大力度推进水泥企业高效节能技术改造，加强水泥企业原料替代，煤化工行业深入推广节能改造技术，稳步推进燃料结构调整。

（4）2060 年碳中和目标展望

2035 年–2060 年，煤电将有序退出，但仍将保留少量具有灵活性的、配备 CCUS 技术的煤电。低碳水泥新品种能够广泛应用，水泥窑协同处置全面推广，替代燃料成为水泥生产中的主要燃料。粗钢产量将随着需求降低而进一步下降，氢冶金技术发展成熟。绿氢技术将在煤化工领域得到较好的应用，BECCS、CCUS 技术将成为工业行业碳中和的重要技术手段。

8

重点行业控煤路径投资
及社会经济影响评估

8.1 重点行业控煤降碳措施投资成本

分措施来看，能源结构调整为投资最大的措施，主要因为电力行业新建风电、光伏等新能源发电机组的投资较大，其次依次为节能技术改造、产业结构优化和资源循环利用，末端捕集封存由于技术成熟度不足，在研究期间处于试点示范阶段，因此投资最低。



8.2 重点行业控煤降碳措施大气污染物协同减排核算

四大重点行业大气污染物和二氧化碳的排放大多来自化石燃料的燃烧，二者的“同源性、同时性”使大气污染控制和碳减排之间相互交织和影响。

在政策情景下，四大行业 2021–2035 年 SO₂、NO_x 和 PM 的年均减排量分别为 28.7 万吨、65.2 万吨和 10.1 万吨；随着控煤降碳措施的持续深入，“十四五”至“十六五”的污染物协同减排量持续增加。分行业来看，钢铁和电力为协同减排量最多的行业，尤其是钢铁行业对 NO_x 和 PM 的协同减排；两个行业分别带来二氧化硫、氮氧化物、颗粒物年均协同减排 18.1 万吨、50.8 万吨、6.4 万吨，以及 9.8 万吨、9.0 万吨和 2.1 万吨。水泥和煤化工行业的协同减排量相对较小。在强化情景下，四大行业 2021–2035 年 SO₂、NO_x 和 PM 的年均减排量分别为 40.5 万吨、83.4 万吨和 14.8 万吨。



图 8-2 政策情景下大气污染物协同减排量

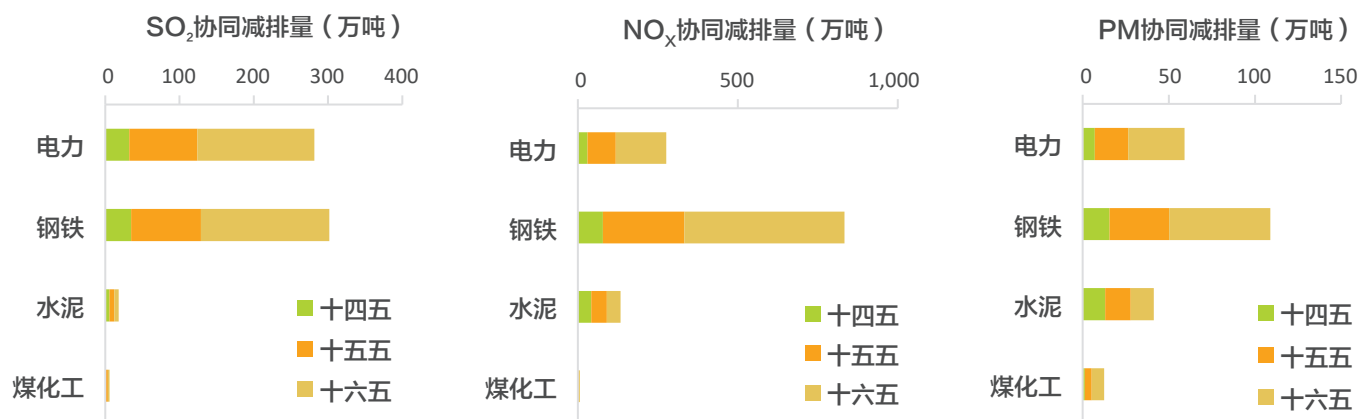


图 8-3 强化情景下大气污染物协同减排量

8.3 重点行业控煤降碳措施社会经济影响分析

基于 2017 年中国投入产出表中的 149 个部门相互关系构建数据库，利用 CGE 模型计算得出，2021–2035 年重点行业控煤降碳对经济带动作用大于产生的负面效果，对 GDP 的总体贡献为 0.357%，以 2020 年 GDP 为基准，年均带动 GDP 3627 亿元，可能扩大贸易逆差。

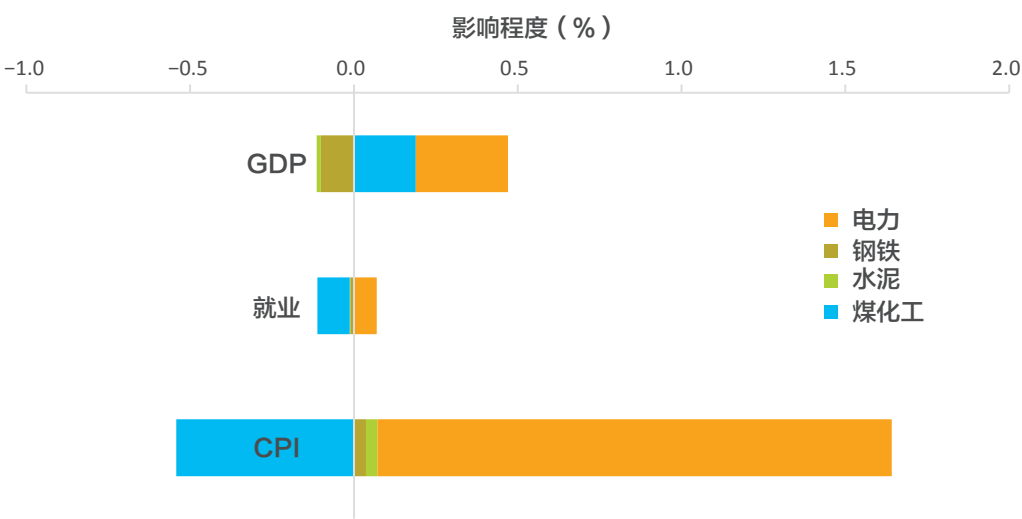


图 8-4 四大重点行业对宏观经济影响贡献

产业层面，149 个行业产出整体在（-5.54%~19.35%）之间波动。锅炉及原动设备、建筑安装和有色金属压延加工等部门产出呈上升趋势，平均涨幅为 2.08 个百分点；非金属矿采选、煤炭开采和洗选等行业产出呈下降趋势，平均降幅为 0.82 个百分点。

重点行业控煤降碳措施的实施对煤炭行业（煤炭开采与洗选业）有较强的负面效应，煤炭行业产出在 2021-2035 年均下降 2.6%。下游重点用煤行业中间需求的下降影响最大，库存和出口也将造成一定的产出下降，居民消费上涨对煤炭行业有小幅的提振作用，但不足以抵消整体的产出下降。

8.4 重点行业控煤对《2030 年前碳达峰行动方案》达标贡献

2021 年 10 月 26 日，国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》（下称《行动方案》）。《行动方案》明确，到 2025 年，非化石能源消费比重达到 20% 左右，单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 13.5%，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%，为实现碳达峰奠定坚实基础。到 2030 年，非化石能源消费比重达到 25% 左右，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65% 以上，顺利实现 2030 年前碳达峰目标。

单位国内生产总值能源消耗：基准、政策、强化情景下，到 2025 年全国单位 GDP 能耗将分别下降 11.4%、13.7%、15.1%，基准情景比规划值低，政策、强化情景分别比规划值 13.5% 高出 0.2、1.6 个百分点。

非化石能源消费比重：政策情景下，全国非化石能源消费比重到 2025 年达到 20%，到 2030 年达到 25%，与规划值相当。基准情景均比规划值低。强化情景下，到 2025 年、到 2030 年全国非化石能源消费比重分别达到 21%、27%。

单位国内生产总值二氧化碳排放：政策情景下，由于电力、钢铁、水泥、煤化工煤控带来的碳排放强度变化将使得 2025 年全国单位 GDP 二氧化碳排放较 2020 年下降 19%，比规划值 18% 高出 1 个百分点。到 2030 年将比 2005 年单位 GDP 二氧化碳排放下降 67%。基准情景比规划值低，强化情景下，到 2030 年将比 2005 年单位 GDP 二氧化碳排放下降 69%。

表 8-1 不同情景下重点行业控煤对《2030 年前碳达峰行动方案》达标贡献

规划指标	规划值	基准情景	政策情景	强化情景
到 2025 年，非化石能源消费比重达到 20% 左右	20%	19% (不可达)	20%	21%
到 2025 年，单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 13.5%	13.5%	11.4% (不可达)	13.7%	15.1%
到 2025 年，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%	18%	15% (不可达)	19%	22%
到 2030 年，非化石能源消费比重达到 25% 左右	25%	23% (不可达)	25%	27%
到 2030 年，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65% 以上	65%	64% (不可达)	67%	69%

9

重点行业控煤降碳重大
政策

为有效推动碳达峰碳中和目标约束下重点行业煤炭消费总量控制路径与关键举措的顺利落地，应加强重大政策的引导激励，坚持节能优先战略，形成系统完善的总量控制与碳交易市场机制、行业准入及产业结构政策、煤电退出和新能源发展政策、控煤降碳标准体系、价格财税及投融资机制等，推动重点行业控煤降碳措施的政策效应明显提升。

9.1 坚持节能优先战略

需求侧用电能效提升指在保证经济发展和居民生活水平提高的情况下，以更少的电力消费满足同等服务需求，缓解能源供给的压力，其在重点行业控煤路径中发挥着关键作用。电力领域，加大现有机组的节能改造，积极推进高效、清洁火电技术研发，持续降低发电煤耗。工业领域，加大重点行业节能低碳技术的推广应用与创新，加快构建循环工业体系。同时，在用户侧利用高标准约束新兴基础设施能耗强度、提升用电技术等手段，推动电网节能减排，全面实施电网节能管理，强化节能降低用电需求。

9.2 积极推进碳排放总量控制

建立以碳排放总量控制为核心的低碳政策体系，分解落实碳排放总量指标，推动重点行业梯次实施总量控制。完善监测、统计、核查等总量控制的配套管理机制，推进重点行业企业编制温室气体排放自行监测方案，组织开展火电、钢铁等重点行业温室气体排放与排污许可管理相关试点研究。推进煤炭消费替代和转型升级，推动重点用煤行业减煤限煤，将控制煤炭消费总量与提高重点行业能源利用效率结合起来，“十四五”时期严格合理控制煤炭消费增长，大幅提升重点行业能源利用效率，“十五五”时期煤炭消费逐步减少。

9.3 完善产业结构调整政策

坚决执行钢铁、水泥等产能置换政策，落实高耗能行业有序用电工作，严控增量、优化存量，建立以区域环境质量改善和碳达峰目标为导向的产业准入及退出清单制度。研究修订《产业结构调整指导目录》，增加碳排放控制要求，提高水泥行业熟料落后产能和过剩产能淘汰标准。落实钢铁产能置换、超低排放、清洁运输、煤炭消费总量替代、污染物排放减量替代等政策要求。严控传统煤化工新增产能，出台国家层面的煤制合成氨和焦化行业产能置换办法，实行等量或减量置换。控制现代煤化工发展规模，制定煤化工行业高碳 / 低碳产业或产品名录，并将高碳产业或产品纳入限制类或淘汰类。研究出台自备电厂参与电力系统辅助服务的指导意见，明确自备电厂可再生能源消纳责任。新建项目禁止配套自备燃煤电厂。

9.4 推动循环经济发展政策

加大废钢资源回收利用，完善水泥窑协同处置废弃物的保障政策。推进废钢回收、拆解、加工、分类、配送一体化发展，提升优质废钢资源保障能力。有序放开废钢资源进口，充分发挥进口废钢的市场调节作用，降低铁矿石的对外依存度。推动废钢现货、期货平台建设，促进形成公开透明有序的废钢定价机制。在废钢铁回收行业范围内统一所得税核定方法，推行简易征税办法试点。优化钢铁行业原燃料结构，提高炼铁炉料球团矿配比，加大对“大比例使用球团矿”企业的政策支持，减少球团矿生产设备的限产比例。调整资源综合利用税，将生活垃圾或生活垃圾预处理可燃物纳入资源综合利用水泥产品的废渣目录范围。对水泥窑协同处置工业固体废物企业减征所得税，推动提高行业燃料替代比例。完善生活垃圾管理体系，保障生活垃圾能够在水泥行业中应用。加强垃圾分类政策的实施落地。

9.5 完善煤电退出和新能源发展政策

充分发挥煤电的电力平衡保障作用，建立完善电力容量市场、辅助服务市场等电力市场机制，建立煤电容量回收机制，对承担调峰任务的煤电机组、非供暖季停发的背压机组给予合理补偿。推动新能源大规模开发布局政策。统筹推进新能源推广应用与生态环境保护的协调发展，做好新能源发展规划与国土资源、生态环境、林业草原、海洋海事等相关规划对接。推动电价政策改革。深化燃煤机组上网电价形成机制改革，研究制定煤电两部制电价机制。深化钢铁、煤化工、水泥等重点行业差别（阶梯）电价政策，针对不同碳绩效的企业实施不同的电价政策。对全废钢电炉炼钢等企业实施用电价格补贴，推动废钢现货、期货平台建设。研究出台储能设施成本疏导机制。

9.6 健全重点行业控煤降碳标准体系

研究建立以应对气候变化为发展目标的电力、钢铁、水泥、煤化工等行业控煤降碳标准体系，优化完善重点行业清洁生产标准体系，将“控煤降碳”相关指标充分纳入并体现。鼓励和支持控煤降碳技术创新，加快制订和实施促进重点行业控煤降碳的市场准入标准、强制性能效标准和环保标准等。发布钢铁行业碳排放分级绩效评价标准，推动钢铁行业全面开展低碳绩效评价工作，并将低碳绩效评价结果与差别水价、电价、停限产等地方政策挂钩。研究适应新一代电力系统构建的体制机制和标准规范。开展碳排放管理标准化顶层设计研究，制定完善保障碳市场顺利推进的重点行业核算、报告与核查标准，制定完善重点行业碳排放和技术基准值标准。

参考文献

- [1] 生态环境部环境规划院, 基于重点行业 / 领域国家碳达峰路径研究报告 [R], 2021.
- [2] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望 2020[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [3] 戴剑锋, 吴婧, 邱健, 王雪松, 倪翊龙. 考虑风光联合消纳模型的中长期电源规划方法研究 [J]. 电力勘测设计, 2020(01):1-8.
- [4] 张宁, 汤芳, 代红才. “十四五” 能源电力发展重大问题展望 [J]. 能源, 2020(01):27-31.
- [5] 杜祥琬, 冯丽妃. 碳达峰与碳中和引领能源革命 [N]. 中国科学报, 2020-12-22(001).
- [6] 王志轩. 中国电力需求侧管理变革 [J]. 新能源经贸观察, 2018(09):27-34.
- [7] 朱法华, 王玉山, 徐振等. 中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究 [J], 电力科技与环保, 2121,37(3):9-16.
- [8] 全球能源互联网发展合作组织, 中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望 [M], 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [9] 张静. 基于环境绩效的中国电力行业绿色发展路线图优化设计 [D]. 北京师范大学, 2019.
- [10] Energy Intelligence, The energy cost report renewable cost trend unstoppable[R], 2020.
- [11] 王志平等, 火电厂灵活性深度调峰改造技术及应用 [M], 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [12] 袁家海, 徐燕, 雷琪, 电力行业煤炭消费总量控制方案和政策研究 [M], 北京: 中国水力水电出版社, 2019.
- [13] 康俊杰, 杨富强, 吴迪, 碳达峰目标下的“十四五” 煤电发展 [R], 电力决策与舆情参考, 2021(32):23-37.
- [14] 陈怡, 田川, 曹颖, 刘强, 郑晓奇. 中国电力行业碳排放达峰及减排潜力分析 [J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(05):632-640.
- [15] International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap[R]. 2020.
- [16] Ren L, Zhou S, Peng TD, Ou XM. A review of CO₂ emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 143: 110846.
- [17] Ren M, Lu PT, Liu XR, M.S. Hossain, Fang YR, Tatsuya Hanaoka, Brian O' Gallachoir, James Glynn, Dai HC. Decarbonizing China' s iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality[J]. Applied Energy, 2021, 298: 117209.
- [18] Tan XC, Li H, Guo JX, Gu BH, Zeng Y. Energy-saving and emission-reduction technology selection and CO₂ emission reduction potential of China' s iron and steel industry under energy substitution policy[J]. Journal of Cleaner Production,

2019, 222: 823-834.

[19] 卜庆才, 吕江波, 李品芳, 袁红莉, 廖建彬, 葛景华. 2020-2030 年中国废钢资源量预测 [J]. 中国冶金, 2016, 26(10): 45-49.

[20] 高玉冰, 邢有凯, 何峰, 蒯鹏, 毛显强. 中国钢铁行业节能减排措施的协同控制效应评估研究 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 388-399.

[21] 黑色金属矿产资源强国战略研究专题组. 黑色金属矿产资源强国战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.

[22] 酆秀萍, 上官方钦, 周继程, 王海风, 张春霞. 钢铁制造流程中碳素流运行与碳减排途径 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.

[23] 上官方钦, 酆秀萍, 周继程, 王方杰, 卜庆才, 张春霞. 中国废钢资源发展战略研究 [J]. 钢铁, 2020, 55(6): 8-14.

[24] 徐建伟, 计晶韵, 郇环. 全球钢铁企业布局的新特点及城市钢厂发展启示 [J]. 开发研究, 2017(6): 41-48.

[25] 冶金工业规划研究院. 钢铁行业煤炭消费总量控制方案和政策研究 [R]. 北京: 2020.

[26] 冶金科技发展中心. 钢铁行业“十四五”煤炭消费总量控制规划 [R]. 北京: 2020.

[27] 中国废钢铁应用协会. 废钢铁产业“十四五”发展规划 [R]. 北京: 2021.

[28] Liu XB, Fan YB, Li C. Carbon pricing for low carbon technology diffusion: A survey analysis of China's cement industry[J]. Energy, 2016, 106:73-86.

[29] 符冠云, 田智宇. 节能和提高能效对控制煤炭消费总量的贡献分析 [J]. 中国能源, 2017,39(05):26-28+40.

[30] 付立娟, 杨勇, 卢静华. 水泥工业碳达峰与碳中和前景分析 [J]. 中国建材科技, 2021,30(04):80-84

[31] 高旭东, 范永斌, 王郁涛. 水泥行业“十三五”科技发展报告 [J]. 中国水泥, 2021(07):28-39.

[32] 高旭东, 范永斌, 曾学敏. 水泥工业“十三五”煤控形势分析及后期展望 [J]. 中国水泥, 2019(09):36-42.

[33] 何峰, 刘峥延, 邢有凯, 高玉冰, 毛显强. 中国水泥行业节能减排措施的协同控制效应评估研究 [J]. 气候变化研究进展, 2021,17(04):400-409.

[34] 何捷. 中国水泥工业大气污染物排放现状、核查和监管趋势 [J]. 中国水泥, 2014(06):65-67.

[35] 何捷, 李叶青, 萧瑛, 聂卿, 王加军. 水泥窑协同处置生活垃圾的碳减排效应分析 [J]. 中国水泥, 2014(09):69-71.

[36] 李琛. 中国水泥行业可提前实现碳达峰去产能是关键 [J]. 江苏建材, 2021(02):54-55.

[37] 刘晶, 汪澜. 应用替代原料减少水泥行业 CO2 排放实例分析 [J]. 新型建筑材料, 2017, 44(007):97-99.

[38] 刘作毅. 谈水泥行业碳减排路径 [J]. 中国建材, 2021(07):98-99.

[39] 马现奇, 高旭东, 范永斌, 李铁冰. 国内水泥行业氮氧化物治理及氨排放浅议 [J]. 中国水泥, 2019(05):78-80.

[40] 茅正东, 李光耀. 某 5000t/d 水泥熟料生产线窑头余热锅炉的升级改造 [J]. 水泥技术, 2018(02):100-104.

[41] 王志敏, 王林. 建材企业开展碳达峰及碳中和探讨 [J]. 建材发展导向, 2021,19(08):9-11.

[42] 赵金兰, 闫浩春, 刘韬, 刘佳, 赵春芝. 论水泥企业碳中和的路径 [J]. 新世纪水泥导报, 2021,27(02):1-6+67.

[43] 周颖, 张宏伟, 蔡博峰, 何捷. 水泥行业常规污染物和二氧化碳协同减排研究 [J]. 环境科学与技术, 2013,36(12):164-168+180.

- [44] 刘殿栋,王钰.现代煤化工产业碳减排、碳中和方案探讨[J].煤炭加工与综合利用,2021(05):67-72.
- [45] 自然资源保护协会.煤化工产业煤炭消费量控制及其政策研究[R].2016.[2021-03-15]
<https://max.book118.com/html/2019/0323/7022110162002014.shtml>
- [46] 中国煤炭加工利用协会.现代煤化工“十三五”煤控评估总结及“十四五”煤控规划研究[R].2021.[2021-03-15]
- [47] 闵楠,黄昊英.“碳达峰·碳中和”背景下的煤化工产业发展[J].化工管理,2021(11):83-84.
- [48] 韩红梅.煤化工生产和消费过程的碳利用分析[J].煤化工,2020,48(01):1-4+14.
- [49] 赵晓飞.碳中和框架之下,能化行业的机遇与变革[J].中国石油和化工,2021(04):12-15.
- [50] 张鸿宇,周丽,张希良.我国现代煤化工产业现状及政策综述[J].现代化工,2018,38(05):1-5.
- [51] 张媛媛.现代煤化工的碳排放及其对经济性影响研究[D].中国矿业大学(北京),2017.
- [52] 韩红梅,朱彬彬,龚华俊,李岩,刘思明,王宇博,吴潜,王韧.现代煤化工行业“十三五”回顾和“十四五”发展展望(一)[J].化学工业,2020,38(04):27-30.
- [53] 韩红梅,朱彬彬,龚华俊,李岩,刘思明,王宇博,吴潜,王韧.现代煤化工行业“十三五”回顾和“十四五”发展展望(二)[J].化学工业,2021,39(01):17-20.
- [54] Crivellari A.,Casson Moreno V.,Cozzani V.,Dincer I. Multi-criteria sustainability assessment of potential methanol production processes[J]. Journal of Cleaner Production,2021,293,126226.
- [55] Dong Xiang, Peng Li, Xiaoyou Yuan, Huiju Cao, Lingchen Liu, Yuxin Liu.Energy consumption and greenhouse gas emissions of shale gas chemical looping reforming process integrated with coal gasification for methanol production[J]. Applied Thermal Engineering,2021,193,116990.

联系我们

地址：中国北京市朝阳区东三环北路 38 号泰康金融大厦 1706

邮编：100026

电话：+86 (10) 5927-0688

传真：+86 (10) 5927-0699

 再生纸印刷