

中国钢铁行业碳减排分析

模型及情景研究

报告摘要

中国能源模型论坛主题研究 1 (CEMF01)

2017 年 9 月

CEMF01 之钢铁行业模型分析

中国钢铁行业碳减排分析模型及情景研究

报告摘要

国家信息中心团队
李继峰（国家信息中心经济预测部副研究员）

中国能源模型论坛 (CEMF)
清华大学

【编者按】随着《巴黎协定》的达成，全球应对气候变化的框架初步形成。我国正处于新的五年规划阶段，面临着来自经济增长、能源资源约束以及环境治理方面的重重考验。如何在经济发展、能源消费与环境保护之间更好地决策，如何为决策提供坚实的科学支持和指导，都是当前面临的问题。中国能源模型论坛旨在运用并比较多种不同的能源经济模型，分析适合中国国情的能源及环境目标，探讨目标实现过程中的成本、相关效益及风险问题，明确影响目标实现的主要因素。

中国能源模型论坛主题研究一（CEMF01）于 2015 年底启动，研究主题为“巴黎协议，十三五规划目标和碳排放峰值-多模型比较研究”。CEMF01 基于自上而下的 CGE 模型和自下而上的模型，包括覆盖全经济、全行业范围的，和侧重于单行业的模型。为实现研究目标，CEMF 委托国内知名模型团队开展了相应研究，包括：

- 国家信息中心团队的 SIC-CGE 模型（全行业分析）
- 中国科学院科技战略咨询研究院团队的 CAS-PIC-Macro 模型（全行业分析）
- 清华大学能源环境经济研究所团队 CHINA-MAPLE 模型（全行业分析）
- 国家信息中心团队的 SIC-IIS 模型（钢铁行业）
- 环境保护部环境与经济政策研究中心团队的 PRCEE-TIMES-Cement 模型(水泥行业)
- 环境保护部环境与经济政策研究中心团队的 PRCEE-LEAP-Transportation 模型(交通行业)
- 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心 NCSC-ELECTRC-TIMES 模型（电力行业）

在此基础上，CEMF 团队完成了《中国碳排放峰值的多模型比较研究（CEMF01）》，主要采用多模型比较的研究方法，在多种情景下对同类模型的排放峰值进行比较，通过建立比较平台，对不同类型模型的结果进行比较，探讨模型之间的关联性、模型情景设定的合理性，分析同类模型结果差异的主要原因，对模型参数设定的科学合理性讨论，提高各个模型的公信力。同时，通过比较和调整校准得各自模型，形成新的、更具研究透明性和可信度的中国碳排放峰值的综合研究成果，供决策部门参考。

本报告的研究工作是在 CEMF 学术委员会的指导下完成的，研究过程中，得到了来自清华大学、国家发展和改革委员会能源研究所、国家应对气候变化战略中心、国家信息中心、环保部环境与经济政策研究中心、国务院发展研究中心、复旦大学、中国矿业大学、冶金工业规划研究院、中国石油和化学工业联合会、交通部科学研究院、中国电力企业联合会、国网能源研究院、中国环境科学研究院、中国农业科学研究院等多家单位的专家学者的大力支持，同时

也离不开 CEMF 秘书处的协调工作。

CEMF 研究报告将陆续刊发 CEMF01 研究成果及各分报告的摘要版本, 供读者参考。如您对本研究有咨询和建议, 请联系北京市清华大学公共管理 615 室, 中国能源模型论坛(100084), 或发送邮件至 cemf@tsinghua.edu.cn。我们的官方网站是 www.cemf.net.cn。

目 录

一、研究背景.....1

二、钢铁行业碳减排分析模型简介.....1

三、钢铁行业边际减排成本曲线及减排情景研究.....2

 3.1 基准情景下的钢铁行业技术选择及二氧化碳排放量测算3

 3.2 钢铁行业减排的边际成本曲线分析8

 3.3 150 元碳价格下的钢铁行业技术选择及二氧化碳排放量测算9

四、主要结论与建议..... 13

参考文献..... 14

图 1 钢铁行业优化模型包括的工艺范围示意图 2

图 2 我国 2030 年粗钢需求量（百万吨） 3

图 3 基准情景下 2030 年前电炉钢比重 4

图 4 基准情景下 2030 年前生铁与粗钢走势..... 4

图 5 基准情景下 2030 年前高炉炼钢的技术走势 5

图 6 基准情景下 2030 年前焦炉的技术结构..... 6

图 7 基准情景下 2030 年前干熄焦技术发展走势 6

图 8 基准情景下 2030 年前高炉节能技术发展走势 7

图 9 基准情景下钢铁行业的煤炭、电力消费需求 8

图 10 钢铁行业边际减排成本曲线 8

图 11 政策情景与基准情景的钢铁行业 CO2 减排效果 9

图 12 政策情景与基准情景的高炉钢比重比较10

图 13 政策情景与基准情景的高炉技术结构比较10

图 14 政策情景与基准情景的焦炉技术结构比较11

图 15 政策情景与基准情景的干熄焦技术结构比较12

图 16 政策情景与基准情景的高炉节能技术结构比较.....12

一、研究背景

2015 年《巴黎协定》提出了要把全球平均气温升幅控制在工业化前水平的 $1.5-2^{\circ}\text{C}$ 之内的温升控制目标 (UNFCCC, 2015), 这是需要世界各国共同努力才能够最终达成的目标。

我国的二氧化碳排放主要来自发电供热、钢铁、建材等高耗能行业, 抓住行业的节能减排也是我国实现二氧化碳排放在 2030 年前尽早达峰的牛鼻子。我国钢铁产业目前的碳排放量超过 18 亿吨, 是二氧化碳排放量和强度双高的行业, 其碳减排行动无疑受到社会各方面的密切关注。影响钢铁行业未来碳排放走势的因素既包括未来钢铁需求, 也包括工艺路线的选取和各种节能减排技术的应用。

钢铁需求受经济周期变化的影响较大, 具有较为明显的周期性特征。2013 年以来,

随着中国经济逐步进入新常态, 国内钢铁需求走势低迷。目前我国用钢量最大的是建筑业, 占需求总量的 56%; 剩下 44% 是制造业, 其中机械行业占比接近 20%, 汽车行业占比接近 8%, 其他比如船舶行业、家电行业、电力设备等行业占比 15% 左右。下表为 2008-2015 年钢铁下游主要行业粗钢需求测算表(万吨), 从表中我们可以知道机械、汽车、家电用钢逐年上升, 而建筑用钢在 2014 年到达最高用量后一直下滑。关于未来钢铁需求的研究需要从经济社会发展的角度进行系统考虑, 在本研究中主要借鉴已有研究成果, 而将重点放在探讨不同工艺路线的选取和节能减排技术的最优组合上。

二、钢铁行业碳减排分析模型简介

钢铁行业优化模型是根据钢铁行业运行特点构建的局部均衡模型。作为研究整个钢铁行业未来技术优化选择的模型体系, 我们既要考虑以铁矿和煤炭为主要投入的主要长流程生产工艺体系, 又要考虑以废钢、直接

还原铁和电力为主要投入的短流程生产工艺体系。

本课题主要包括的钢铁行业生产的 9 项工艺, 主要内容如下所示:

图 1 钢铁行业优化模型包括的工艺范围示意图

尽管我国目前以长流程炼钢为主，但根据国际经验和我国钢材蓄积量逐步增加的发展趋势，未来依靠废钢作为资源的电炉钢比例将逐步增加。因此，虽然我国目前钢材总产能已经出现过剩，但是在钢铁行业内部仍然存在着技术路线的优化调整。在本模型中通过两种技术路线的总成本的比较，按照成本最小化原则对未来的技术路线转换进行评估和测算。在主要的工艺技术上包括 1 种烧结技术、1 种球团技术、3 种炼焦技术、3 种高炉炼铁技术、3 种直接还原铁冶炼技术、1 种转炉炼钢技术、1 种电炉钢技术、1 种铸造技术、1 重轧钢技术，共 15 种技术。

另一方面，在行业总体技术路线调整的同时，针对现有长流程工艺进行的节能改造是目前各钢铁企业非常重视的工作。与技术路线转换需要较大资金和投入相比，在现有工艺技术上进行的节能减排改造也能起到降低能耗和污染物排放的作用，以满足短期节能减排总体要求。本模型中，以烧结、炼焦和高炉炼铁三个环节为例，引入了不同类型的节能减排改造技术，包括余热利用、同轴发电、CCS 等共 14 种节能减排技术，同样按照成本最小化的原则对未来的节能改造技术进行优选和评估。

三、钢铁行业边际减排成本曲线及减排情景研究

利用初步构建的钢铁行业模型，采用情景分析法，我们对未来钢铁行业实现不同碳减排目标进行最优技术路线分析。本研究首先对基准情景下的最优技术组合进行了测算，

得到了基准情景下的二氧化碳排放量；然后通过施加二氧化碳减排约束建立减排情景，探讨不同碳排放约束下的技术减排潜力和综合减排成本，得到边际减排成本曲线，最后

就推荐碳价格情景下的技术组合进行详细描述，提出相应的对策建议。

3.1 基准情景下的钢铁行业技术选择及二氧化碳排放量测算

在基准情景下，不施加任何二氧化碳减排约束，只是根据所设定的钢材需求进行整

个工艺流程的优化测算。首先参考冶金工业研究院的研究成果，未来到 2030 年的钢材需求假设如下图所示。

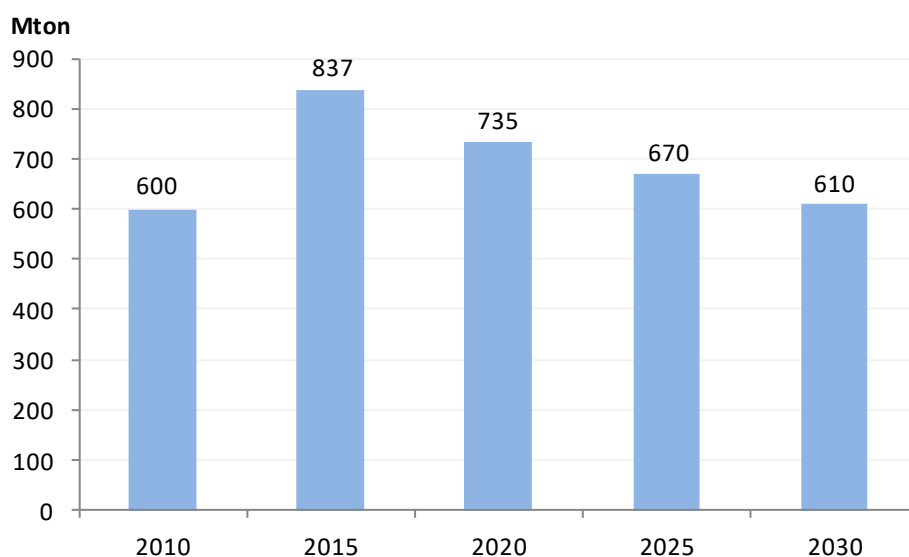


图 2 我国 2030 年粗钢需求量（百万吨）

数据来源：冶金工业研究院

总体来说，我国钢材产量 2015 年已经达峰，预计 2020 年将下降到 7.4 亿吨，2030 年下降到 6 亿吨，未来成逐步下降态势。

以满足这样的钢材需求为约束条件，按照整个钢铁行业 2030 年系统成本最小的优化

原则，测算钢铁行业各个工艺流程的技术选择。计算结果如下所示：

1、基准情景下电炉钢比重逐步提高

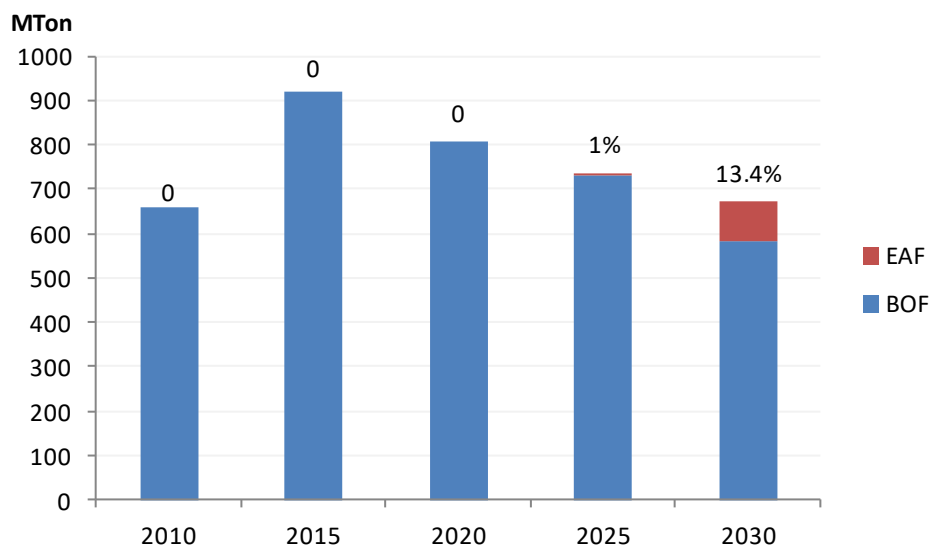


图3 基准情景下2030年前电炉钢比重

我国目前由于废钢资源有限电炉钢比例很小，但未来随着人均钢材蓄积量逐步达到发达国家水平，废钢规模逐步扩大，废钢价格逐步走低，电炉钢比例有望逐步提高，到2030年预计达到13.4%。

2、基准情景下生铁需求与粗钢需求逐步背离

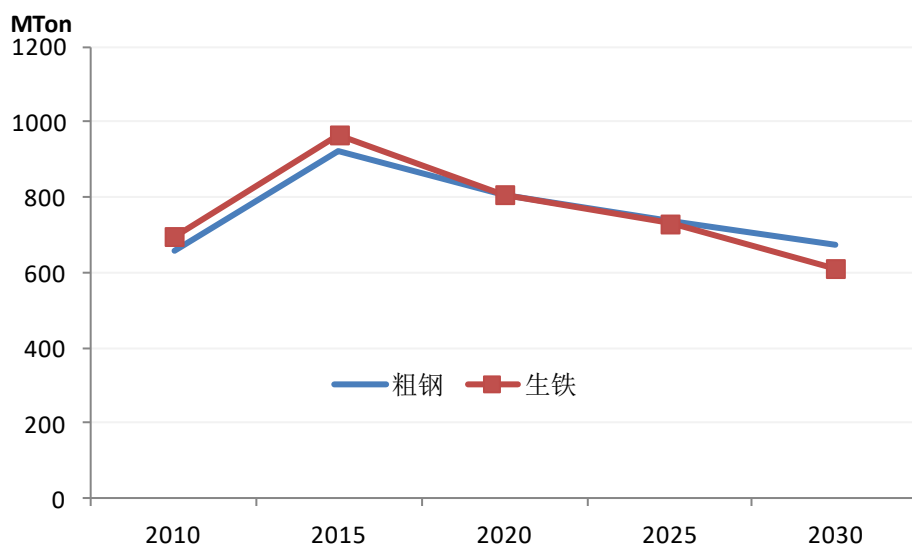


图4 基准情景下2030年前生铁与粗钢走势

如上图所示，2020 年之前生铁需求和生铁走势基本一致，考虑到生铁连成钢存在一定损耗(6%左右)，生铁需求量大于粗钢产量，但随着电炉钢比重逐步上升，生铁需求量逐步下降，2030年已经比粗钢产量低了0.6亿吨，仅有6.1亿吨。

3、基准情景下大型高炉将逐步替代中小型高炉

我国未来 5000 立方米以下的高炉都将逐步被淘汰。新建锅炉都将是 5000 立方米以上的大型高炉。预计到 2030 年之前我国现有的中小型高炉将被淘汰完毕。在本模型中还考虑了加装碳捕获与封存技术的高炉，但在没有碳排放约束的情况下，这种技术没有被采用。

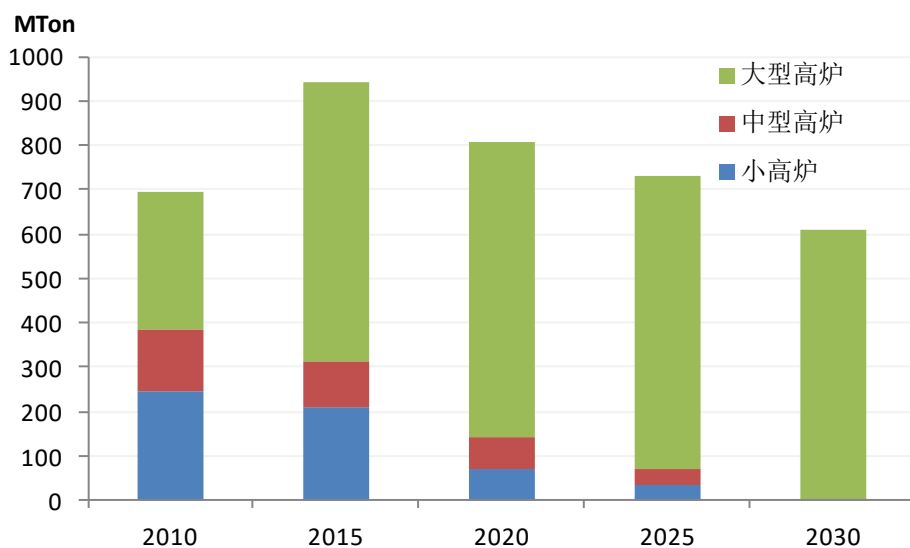


图5 基准情景下2030年前高炉炼钢的技术走势

4、基准情景下炼焦工艺改造相对较慢

在长流程钢铁冶炼工艺里，炼焦也是重要的耗能和污染排放环节。我国目前主流的工艺是4.3-6米的焦炉。4.3米以下的焦炉未来要逐步淘汰。在基准情景下，2020年4.3米以

下的小焦炉淘汰基本完备。不过基准情景下6米以上的先进焦炉并未被采用，也反映出我国2014年出台的《焦化行业准入条件：2014年》更多地是从环保角度出发设定，经济性上仍然低于目前的主流焦炉。

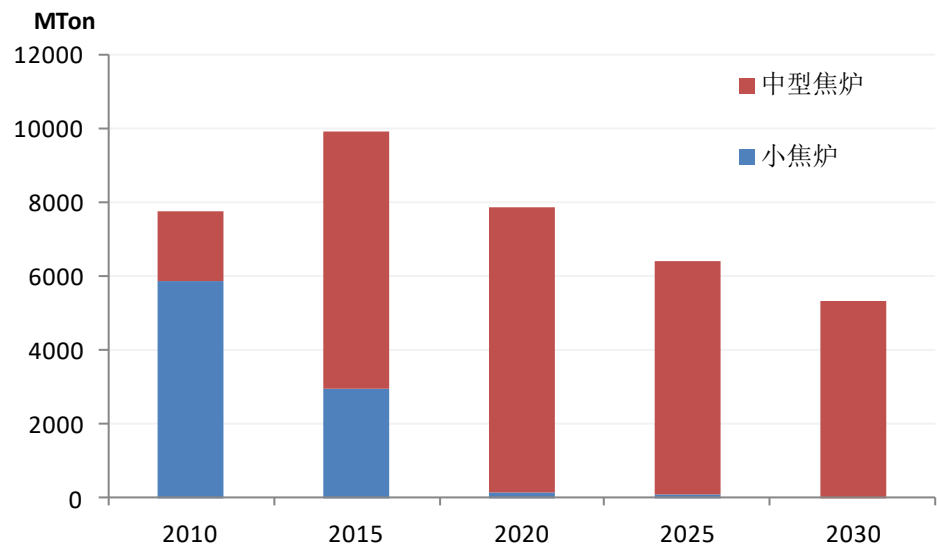


图 6 基准情景下 2030 年前焦炉的技术结构

5、基准情景下节能减排工艺技术也开始得到应用

利用余热余压发电的技术，在烧结环节还考虑了 2 种减排技术。

在模型设计中，我们在炼焦环节考虑了 2 种干熄焦技术，在高炉炼铁环节考虑了 4 种

（1）炼焦环节的两种干熄焦技术应用情况

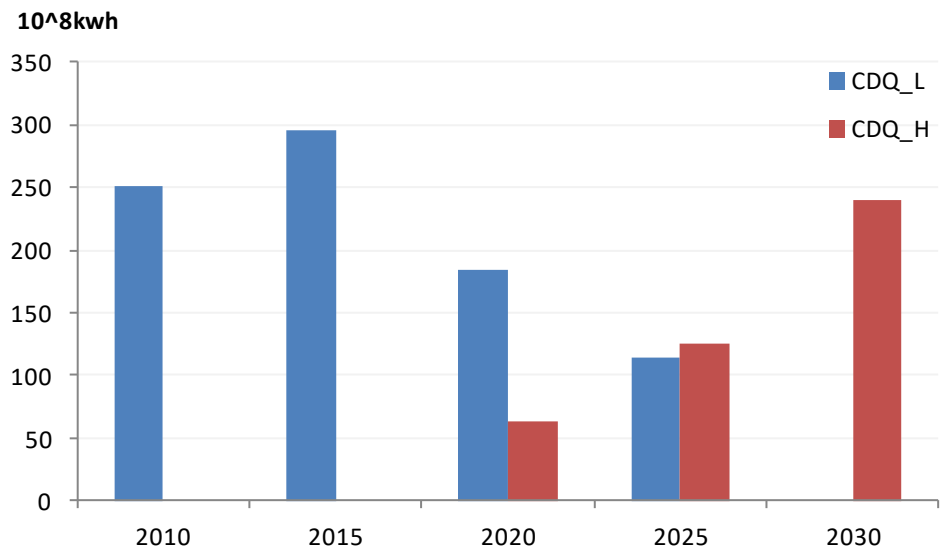


图 7 基准情景下 2030 年前干熄焦技术发展走势

干熄焦技术是具有经济效益的节能技术，因此在基准情景中也得到广泛应用。而且随着干熄焦技术的发展，传统中低温干熄焦技术将逐渐被高温高压干熄焦技术取代。

(2) 高炉环节的节能减排技术利用情况

高炉冲渣水直接换热回收余热技术（RHSW）和高炉余热透平发电技术（TRT）也是能够带来经济效益的节能技术，因此在基准情景中也得到了一定程度的应用。

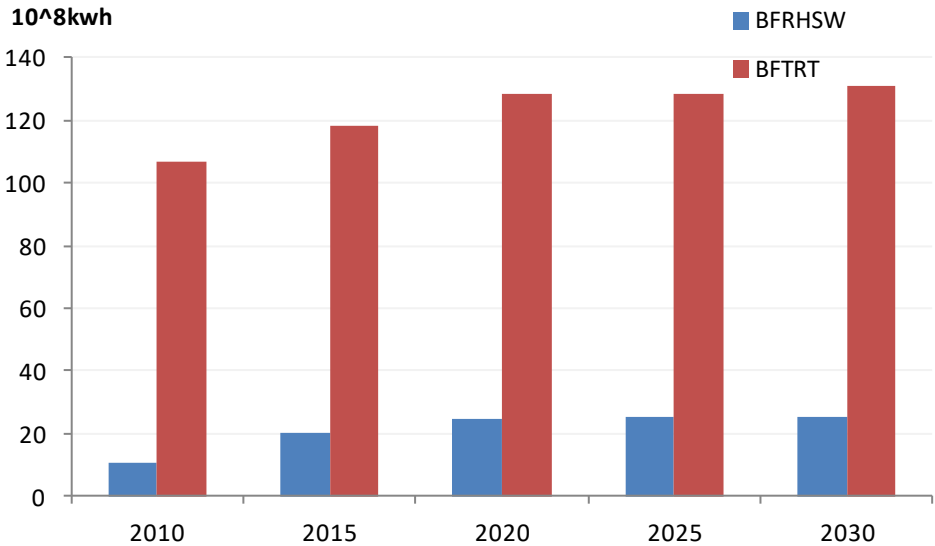


图 8 基准情景下 2030 年前高炉节能技术发展走势

不过除了以上四个技术之外，其他的节能减排技术基本都未采用。

6、基准情景下钢铁行业能源消费量及碳排放预测结果

钢铁行业能源消费主要包括炼焦洗精煤、动力煤和电力。在基准情景下，主要耗能如下图所示，炼焦洗精煤从 4.9 亿吨逐步下降到 2020 年的 4.5 亿吨，到 2030 年下降到 2.9 亿吨；

动力煤从 1.4 亿吨逐步下降到 2020 年的 1.3 亿吨，到 2030 年下降到 0.9 亿吨；电力消费需求也从 3900 亿千瓦时，逐步下降到 2020 年的 3620 亿千瓦时，到 2030 年下降到 3030 亿千瓦时。钢铁行业二氧化碳排放也从 2015 年的 18.5 亿吨逐步下降到 2020 年的 16.2 亿吨，到 2030 年逐步下降到 8.5 亿吨。

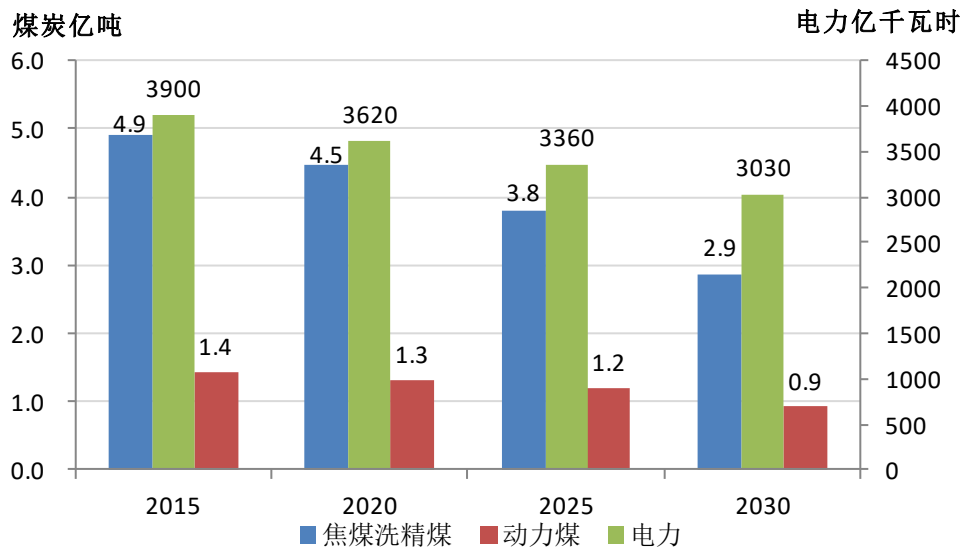


图 9 基准情景下钢铁行业的煤炭、电力消费需求

3.2 钢铁行业减排的边际成本曲线分析

利用所建立的钢铁行业减排优化分析模型，我们开展了钢铁行业减排的边际成本曲线研究。假设从 2015-2030 年的平均碳价格从 10 元/吨开始逐步增加,以 10 元/吨为步长,

逐步增加到 300 元/吨。计算每个情景下的 2030 年碳减排幅度 ((2030 年碳价情景的排放量-基准情景 2030 年碳排放量) / 基准情景 2030 年排放量)，如下图所示。

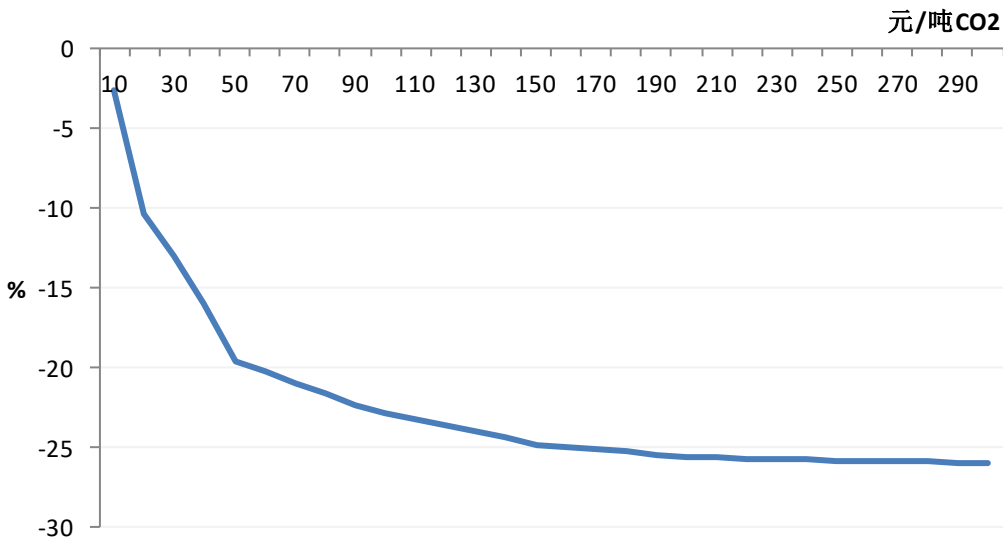


图 10 钢铁行业边际减排成本曲线

计算结果表明，利用钢铁模型得到的减排边际成本曲线可以看到随着碳价的增加，减排效果先是快速增加，但在 100-150 元/吨碳价格范围内，碳价格增加引起的减排效果

逐步递减。因此，从钢铁行业减排的成本效益分析来看，应选择 100-150 元/吨左右碳价格作为未来 15 年碳减排政策的经济成本目标区域。

3.3 150 元碳价格下的钢铁行业技术选择及二氧化碳排放量测算

（一）碳减排效果

选取 2015-2030 年平均 150 元/吨碳价格作为政策情景，计算钢铁行业碳排放量如下

图所示，2015 年减排 5900 万吨，2020 年减排 1.2 亿吨，2030 年减排 2.1 亿吨，相对减排幅度 25%。

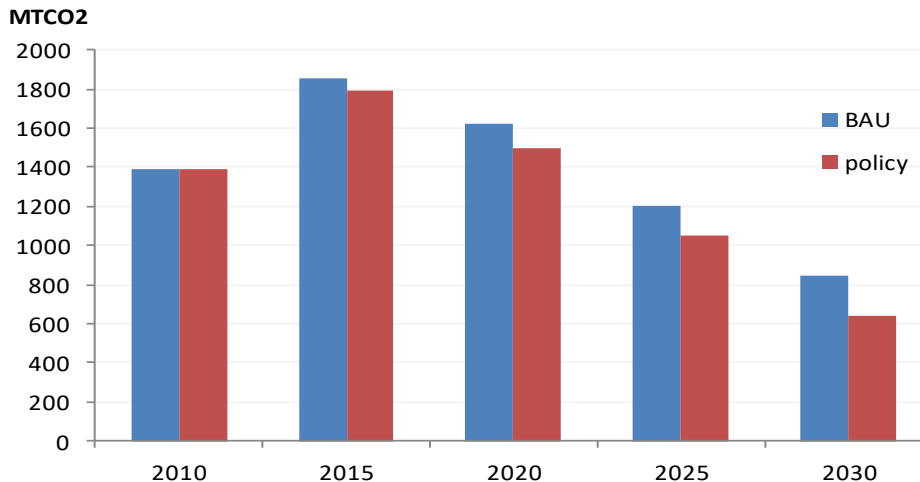


图 11 政策情景与基准情景的钢铁行业 CO₂ 减排效果

相应的能源消费结构中，炼焦洗精煤和动力煤逐步下降，而电力消费较基准情景有所增加。如下表所示：

	焦煤洗精煤(亿吨)		动力煤(亿吨)		电力(亿千万时)	
	基准情景	政策情景	基准情景	政策情景	基准情景	政策情景
2015	4.9	4.8	1.4	1.4	3900	4024
2020	4.5	4.1	1.3	1.2	3620	3886
2025	3.8	3.3	1.2	1.0	3360	3798
2030	2.9	2.2	0.9	0.7	3030	3784

主要的技术选择情况如下所示：

1、与基准情景相比，在政策情景下高炉-转炉长流程炼钢的比例将显著下降。2020 年

电炉钢比例就上升到 12%，到 2030 年进一步提高到 22%。

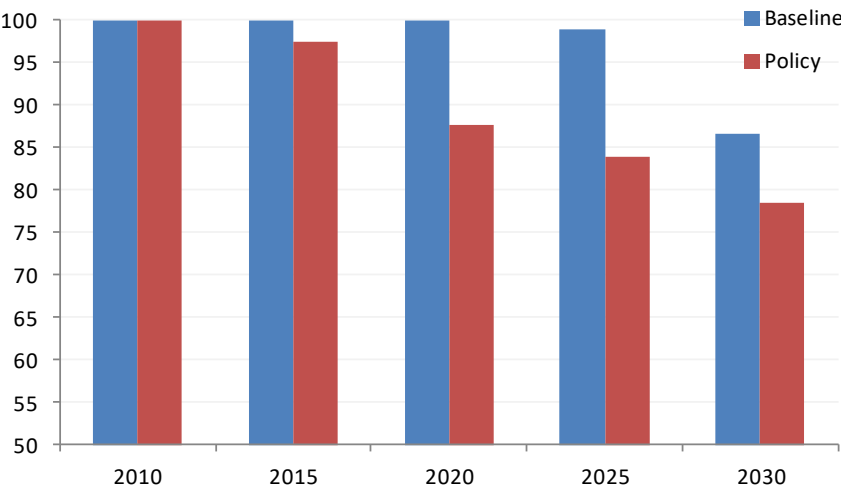


图 12 政策情景与基准情景的高炉钢比重比较

2、政策情景下高炉炼铁工艺大规模引入 CCS 技术。如下图所示，在我们给出的三种主流高炉技术中，在中小型高炉都将逐步退出的前提下，由于高炉炼铁需求相对基准情景减少，先进高炉炼铁的需求量也相对下降，

相比基准情景下降了 40%。不过，值得关注的是，在包含 CCS 的炼铁技术能够于 2025 年前后进入商业化应用的假设下，政策情景中这项技术迅速得到应用，在 2025 年前后就有超过 3 亿吨的大型高炉加装 CCS 技术。

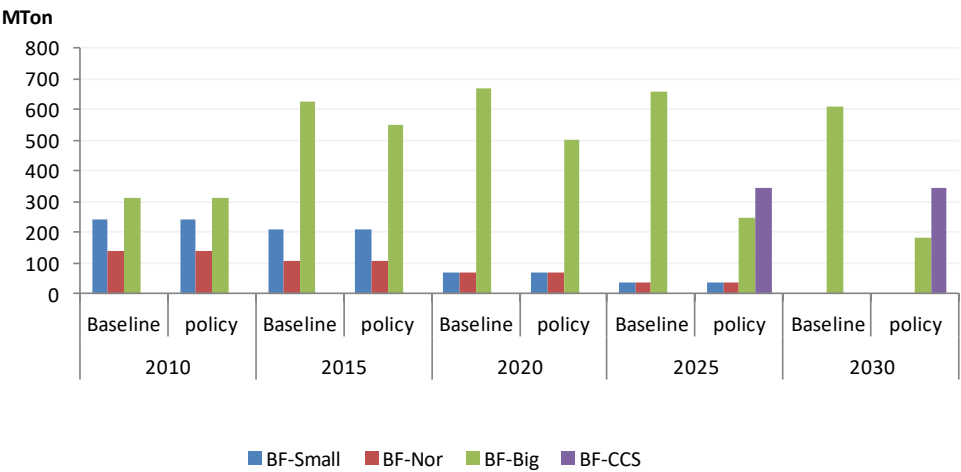


图 13 政策情景与基准情景的高炉技术结构比较

3、焦炭生产结构显著优化

实施碳排放总量控制政策，对基础工艺流程技术影响最大的是焦炭生产技术的选择。在基准情景下，不需要投资 6 米以上的先进焦炉就可以满足生产需求；但是在政策情景下，由于碳排放的总量控制政策，除了小焦炉迅速退出以外，现有的 4.3-6 米的主力焦炉

也将在 2025 年左右基本退出，2025 年之后，以 6 米以上大型先进焦炉为主。

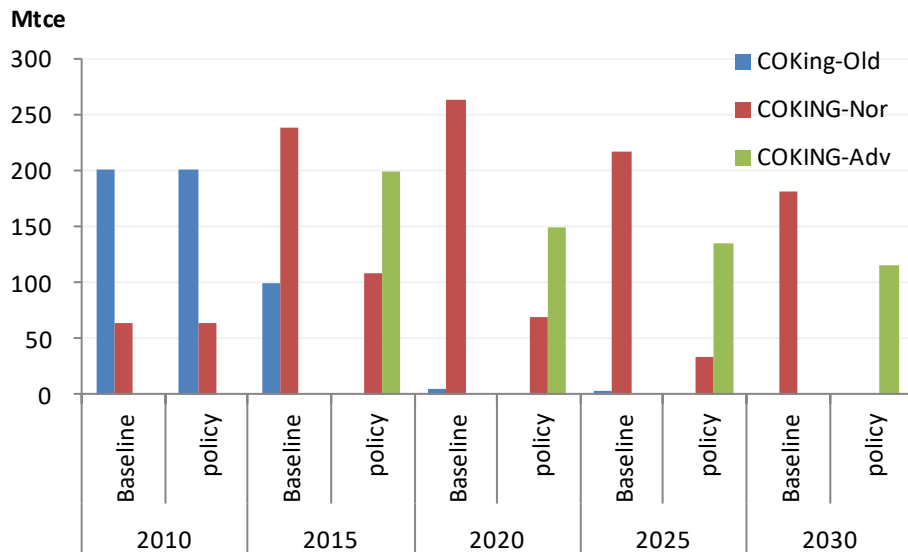


图 14 政策情景与基准情景的焦炉技术结构比较

4、减排技术应用水平显著提高

(1) 先进干熄焦技术得到快速推广

在基准情景下，高温高压干熄焦技术应用的较晚。在政策情景中，高温高压干熄焦技术得到更快推广。2025 年以后随着大型焦

炉的使用，高温高压干熄焦技术基本上完全取代中低温干熄焦技术。由高温高压干熄焦产生的余热发电在 2030 年有望达到 130 亿千瓦时。

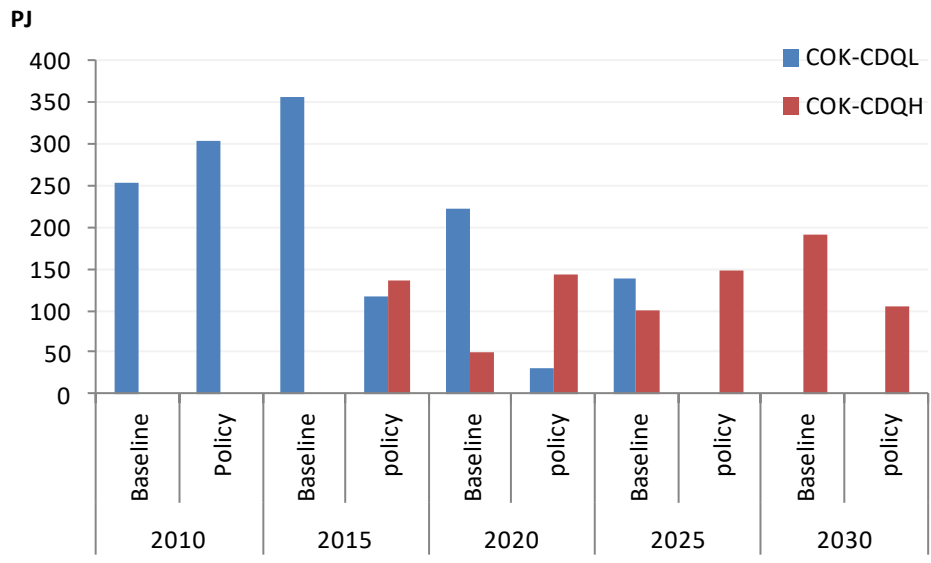


图 15 政策情景与基准情景的干熄焦技术结构比较

(2) 高炉炼铁环节的节能技术推广显著加快

由于节能减排的政策推动，政策情景下的高炉冲渣水余热回用技术和透平发电技术

都得到了更充分的推广应用，2030 年发电量达到 271 亿千瓦时，较基准情景下提高了 120 亿千瓦时。

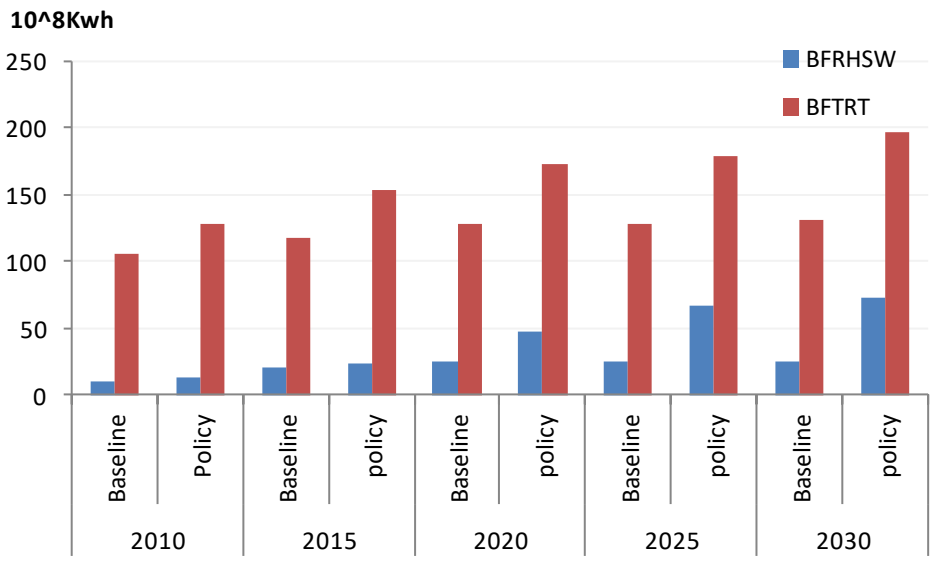


图 16 政策情景与基准情景的高炉节能技术结构比较

四、主要结论与建议

根据对我国钢铁行业应对碳排放总量控制的技术优化分析，可以分析出未来钢铁行业发展的趋势有以下特点：

（1）我国钢材需求已经处于峰值期，相应的二氧化碳排放将持续下降。受整体经济环境与国家经济结构的调整，在基准情景下钢铁行业发展已经开始出现“触顶”态势，钢材需求达峰必将导致粗钢及生铁产量出现峰值，进一步考虑到电炉钢的替代规模越来越大，长流程钢铁工艺规模将持续负增长，相应的导致钢铁行业整体对煤炭的消费需求和二氧化碳排放持续下降。

（2）根据钢铁行业边际减排成本曲线的研究，在碳价格较低的情况下（小于 100 元/吨），钢铁行业减排量会随着碳价格上升而快速增加；当碳价格从 100-150 元/吨的范围内，碳价继续上升的减排效果增幅逐步减弱；当碳价大于 150 元/吨，进一步的减排空间明显缩小。因此对于钢铁行业来说，综合减排效果和经济性，最有效的碳价格范围在 100-150 元/吨。

（3）加快促进电炉钢快速发展是未来控制二氧化碳排放的主要途径。电炉以使用废

钢为主，加快电炉钢发展有助于减少我国对新产生铁的需求，从而降低钢铁行业的煤炭消费量。模型测算表明大力发展电炉钢是进一步促进钢铁行业未来控制二氧化碳排放的重要技术路径。

（4）加大对现有长流程工艺的改造也是控制二氧化碳排放的必要选择。未来到 2025 年之前长流程炼钢依然是主要的技术路径，其中的高炉炼铁和炼焦两个环节可用的节能减排技术种类多，加大减排压力就有可能促进这些技术的快速推广。具体而言，对现有长流程工艺的技术改造包括对整个工艺流程的以新代旧，例如使用 6 米以上焦炉和 5000 立方米以上的高炉替代现在主流的中小型焦炉和高炉；同时也包括在现有工艺上补充新的节能减排技术，例如加装先进的干熄焦技术和在高炉炼铁环节回收余亚余热的发电技术。此外，在有二氧化碳减排约束的情况下，还应该重视 CCS 技术在钢铁行业的推广应用。尽管目前 CCS 技术的成本依然较高，但 10 年之后的应用前景已经越来越光明。

参考文献

- [1] 陈光, 杨婷, 丁毅等. 钢铁生产能量流解析及炼焦主要单元应用 [J]. 冶金能源, 2013, 32(5): 3-8.
- [2] Hu C, Han X, Li Z, et al. Comparison of CO₂ emission between CO R EX and blast furnace iron-making system [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21: S116-S120.
- [3] 李冰, 程小矛. 焦化行业碳排放核算及消减策略分析 [J]. 冶金能源, 2011, 30(5): 7-9.
- [4] IPCC 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [5] 盛刚. 钢铁联合企业生产工序碳排放流模型建构与 CO₂ 排放分析 [D]. 北京: 冶金自动化研究院, 2011.
- [6] 上官方钦, 张春霞, 胡长庆, 等. 中国钢铁工业的 CO₂ 排放估算 [J]. 中国冶金, 2010, 20(5): 37-42.
- [7] 王建军. 钢铁企业物质流、能量流及其相互关系研究与应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [8] 余国普, 李良华. 宝钢炼焦节能技术现状及发展方向探讨 [C] // 第九届(2013) 中国钢铁年会论文集, 北京, 2013.
- [9] 杨婷. 钢铁生产流程能量流解析及应用 [D]. 合肥: 安徽工业大学, 2013.
- [10] 张欣欣, 张安强, 冯妍卉, 等. 焦炉能耗分析与余热利用技术 [J]. 钢铁, 2012, 47(8): 1-4.
- [11] 张肖, 向晓东, 刘汉杰, 等. 钢铁行业碳排放量核算方法的实证性研究 [J]. 工业安全与环保, 2012, 38(6): 86-88.

中国能源模型论坛（CEMF）由清华大学公共管理学院、清华大学产业发展与环境治理研究中心（CIDEG）与美国环保协会（EDF）共同发起成立，旨在为国内外能源、经济、环境和人类健康模型团队提供对话互动和观点交流的平台，为决策者和其他群体理解各类模型创造机会，共同推动中国能源与环境模型的能力建设，提升中国能源、环境与经济领域的科学决策水平。

The China Energy Modeling Forum (CEMF), initiated jointly by the School of Public Policy and Management at Tsinghua University, the Center for Industrial Development and Environmental Governance (CIDEG) at Tsinghua University and Environmental Defense Fund (EDF), is a platform for domestic and international modeling professionals working in energy, economic development, environment, human health and climate change fields to exchange and refine modeling ideas—and for non-technical policymakers and investors to improve their understanding of the strengths and weaknesses of different models in different applications. It aims to enhance capacity building of Chinese modeling teams, increase credibility of models and strengthen scientific policy development and decision making in the fields of environment, energy and economy with the support of modeling.

中立 Neutrality

协同 Synergy

独立 Independence

透明 Transparency



CHINA
ENERGY MODELING
FORUM

地址(Address): 清华大学公共管理学院615室
Room 615, School of Public Policy and Management, Tsinghua
University, Beijing, P.R. China, 100084
电话(Tel): 86-10-62789263 传真(Fax): 86-10-62772497
邮箱(E-mail): cemf@tsinghua.edu.cn
网站(Website): <http://www.cemf.net.cn>