doi：10. 14186/j. cnki. 1671-6620. 2026. 157

钢铁企业多情景碳排放预测与减排路径

王　芳[1]，周冠文[2]，高式林[1]，方　磊[1]
（1. 南京钢铁股份有限公司，南京 210035；2. 东南大学 能源与环境学院，南京 210096）

摘　要：针对钢铁企业碳排放基数大、减排路径不清晰的问题，本文开展了中长期碳排放预测与减排路径规划.以某千万吨级长流程钢铁企业为对象，基于长期能源替代规划系统（long-range energy alternatives planning system，LEAP）模型，设置基准情景、中度控碳情景和深度控碳情景，量化分析了 2020—2050 年余热余压回收、自备电厂清洁化改造、绿电替代，以及碳捕集、利用与封存（carbon capture，utilization and storage，CCUS）这四项措施的减排贡献.结果表明：在基准情景下，2050 年降碳率仅为 28.68%；在中度控碳情景下，绿电替代与 CCUS 协同发力，2050 年降碳率达 36.72%；在深度控碳情景下，依托绿电规模化与 CCUS 主导作用，2050 年降碳率最高达 45.83%，控碳力度与减排成效呈显著正相关，绿电替代与 CCUS 是钢铁企业实现深度减排的关键.

关键词：钢铁企业；碳排放预测；LEAP 模型；CCUS；减排路径
中图分类号：X 322；TF 4　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-6620(2026)05-0452-08

Multi-scenario carbon emission prediction and emission reduction pathway research for iron and steel enterprises

Wang Fang[1]，Zhou Guanwen[2]，Gao Shilin[1]，Fang Lei[1]
（1. Nanjing Iron and Steel Co.，Ltd.，Nanjing 210035，China；
2. School of Energy and Environment，Southeast University，Nanjing 210096，China）

Abstract：To address the issues of high carbon emissions and unclear emission reduction pathways in iron and steel enterprises，this study carries out medium- and long-term carbon emission prediction and emission reduction pathway planning. Taking a long-process iron and steel enterprisewith a capacity of tens of millions of tons as an example，three scenarios（baseline，moderate carbon control，deep carbon control）are set based on the LEAP（long-range energy alternatives planning system）model. The emission reduction contributions of four measures（waste heat recovery，power plant retrofitting，green power substitution，CCUS（carbon capture，utilization and storage））are quantified for 2020—2050. The results show that by 2050，the emission reduction percentage is only 28.68% in the baseline scenario，reaches 36.72% in the moderate scenario（through green power and CCUS synergy），and reaches a maximum of 45.83% in the deep scenario（relying on large-scale green power and CCUS）. Carbon control intensity is positively correlated with reduction effectiveness，and green power substitution together with CCUS are the keys to deep decarbonization.

Key words：iron and steel enterprise；carbon emission prediction；LEAP model；CCUS；emission reduction pathway

钢铁行业是国民经济的重要基础产业，也是能源消耗和二氧化碳排放高度集中的重点行业[1-2].传统长流程钢铁生产以焦化、烧结、球团、高炉炼铁、转炉炼钢和轧钢等工序为主体，生产过程中既存在煤、焦炭、喷吹煤粉等含碳燃料的大量消耗，也存在副产煤气、蒸汽、电力等能源在园区内部的复杂循环利用[3-4]. 因此，钢铁园区的碳排放并不是单一生产环节排放的简单叠加，而是由多工序、多能源、多物质流共同作用形成的系统性结果[5-7].单纯依靠末端统计或单一工序的节能改造（如余热余压回收、煤气高效利用、自备电厂机组效率提升等）[8-10]，已难以支撑企业制定中长期

收稿日期：2026-06-05.
基金项目：江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目（BT2024008）.
作者简介：王芳（1976—），女，研究员，E-mail：wangf@ njsteel. com. cn.
引文格式：王芳，周冠文，高式林，等. 钢铁企业多情景碳排放预测与减排路径［J］. 材料与冶金学报，2026，25（5）：452-459.（Wang Fang，Zhou Guanwen，Gao Shilin，et al. Multi-scenario carbon emission prediction and emission reduction pathway research for iron and steel enterprises［J］. Journal of Materials and Metallurgy，2026，25（5）：452-459.）

的系统性减排决策.因此,建立科学的碳监测核算体系及降碳成效评估能力，是钢铁企业响应国家政策及参与碳市场交易的核心前提.

针对钢铁园区这一复杂的高碳系统,国内外学者在碳流模型构建、核算方法及减排路径方面已开展了大量研究. Zhang 等[3]创新性地将“枢纽”概念应用于钢铁行业的碳流追踪和碳核算,提出了一种适用于工业过程的基于扩展物质流的能源枢纽模型,该模型能够定量评估各物料及能量流对 CO_2 排放变化的贡献及影响,为园区精准碳核算奠定基础.Liu 等[11]提出了基于碳平衡原理的碳流分析模型,并引入数据驱动的 Sankey 图可视化方法,对典型长流程工艺进行实证验证,强调了碳流可视化有助于挖掘节能减碳潜力. Wang 等[12]则采用跨过程物料与能量流模型、点源排放清单和省际贸易矩阵,完成从煤矿到终端钢材用户的全生命周期碳流追踪,量化了 2020 年中国钢铁行业排放构成及矿山瓦斯利用、CH_4 泄漏的排放贡献等.在核算标准方面,国际上主要依据《IPCC 国家温室气体清单指南》、ISO 14044 标准及世界钢铁协会的核算方法,国内则遵循《省级温室气体清单编制指南》及《中国温室气体排放核算与报告指南》[13-16].钢铁生产工艺流程复杂,精准核算各工序碳排放量,是工业园区完成碳减排工作的核心关键[17-19].

尽管现有研究在单一技术或局部工序上取得了较大突破,但仍存在以下不足:一是现有碳流模型多侧重于宏观核算,对园区内部多工序协同及碳演化路径的精细化追踪不足;二是针对千万吨级长流程钢企,缺乏对“余热回收+绿电替代+CCUS”等多种措施在不同控碳强度下的协同减排效应及长期演变趋势的系统性情景预测.

基于此,本文中以南京某钢铁生产园区为研究对象,采用长期能源替代规划系统(long-range energy alternatives planning system,LEAP)模型开展 2020—2050 年碳排放情景预测,重点对比基准情景、中度控碳情景和深度控碳情景下的减排效果,并进一步分析不同措施在各阶段的贡献变化.该研究旨在建立适用于钢铁园区中长期碳排放预测的情景分析框架,量化不同控碳情景下园区碳排放总量与减排比例变化,并识别各类减排措施在不同阶段的贡献特征,以期为钢铁园区分阶段降碳路径提供理论基础.

1　研究对象和方法

1.1　研究对象

本文以南京某长流程钢铁生产园区为研究对象.该园区包含焦化、烧结、球团、高炉炼铁、转炉炼钢、轧钢及自备电厂等主要生产和能源转换单元,具有典型钢铁联合企业的生产特征.园区内部存在大量含碳物料和能源流动,且各工序之间存在较强的物质流、能量流和碳流耦合关系,整体碳排放受生产结构、能源效率及能源替代比例等多因素共同影响.为突出不同减排措施本身对碳排放的影响,本文在模型设定中作出如下基本假设:①到 2050 年前,园区主要生产工艺路线保持稳定,焦化、烧结、球团、高炉炼铁、转炉炼钢、轧钢及自备电厂等核心流程不发生根本性改变;②园区总体产能规模保持相对稳定.

1.2　研究方法

LEAP 是一种常用于能源系统规划和碳排放预测的模型工具,适合分析能源消费、技术措施和排放变化之间的关系,常与情景分析法相结合,具有数据输入透明和灵活度高等特点[20-21].本文选择 LEAP 模型构建钢铁园区碳排放预测框架,并以 2020 年为基准年,设置 2025、2030、2035、2040、2045 和 2050 年作为关键时间节点.模型输入参数主要包括余热余压回收利用率、自备电厂发电效率、绿电占比和 CCUS 覆盖率.模型系统边界为钢铁园区生产及能源转换边界,覆盖焦化、烧结、球团、高炉炼铁、转炉炼钢、轧钢和自备电厂等主要单元,上游原料开采、运输及下游钢材使用阶段不纳入本研究范围.层级结构采用“需求部门-能源转换-排放因子”.其中,粗钢产量及主要工序产量作为活动水平,煤、焦炭、喷吹煤、高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气、电力和蒸汽等作为能源品种,自备电厂作为能源转换模块.

在计算过程中,各工序能源需求和碳排放根据式(1)和(2)进行核算.

$$E(i,j,t) = AL(i,t) \times EI(i,j,t) \quad (1)$$

$$C(t) = \sum E(i,j,t) \times EF(j) \times OF(j) \quad (2)$$

式中:$E(i,j,t)$ 为 t 年工序 i 中能源 j 的消费量;$AL(i,t)$ 为工序活动水平;$EI(i,j,t)$ 为单位活动水平的能源强度;$EF(j)$ 为能源 j 的 CO_2 排放因子;$OF(j)$ 为氧化率.

情景参数通过改变能源强度、能源替代比例和 CCUS 覆盖率等变量进入模型,进而得到不同情景下的园区碳排放总量.基准年活动数据主要源自企业 2020 年生产统计和能源平衡汇总数据,

排放因子则参考《中国温室气体排放核算与报告指南》、IPCC 指南,以及相关行业核算方法[13-16].模型以 2020 年园区 CO_2 排放总量 17.5 Mt 作为基准年校准目标,对能源消费结构、能源转换关系和排放因子进行一致性核对.由于企业逐项能源台账涉及生产经营信息,本文仅公开用于情景预测的关键参数及汇总结果.

基于构建的预测框架,在不同情景下评估 4 种减碳措施(见表 1)对钢铁生产园区未来碳排放的影响,并通过设置相关参数,模拟和量化不同情景下的碳减排潜力及碳排放变化趋势.具体而言,在同一情景和年份下,保持粗钢产量、工艺路线、电网排放因子及其他措施参数不变,仅改变某一项措施参数,计算其相对于参照情景的碳排放差额,即 $\Delta C(m, t) = C(\mathrm{ref}, t) - C(m, t)$.其中,$m$ 为 M1~M4 中的某一减排措施,$C(\mathrm{ref}, t)$ 为参照情景的碳排放,$C(m, t)$ 为采用单项措施调整后的碳排放量.该方法在不改变产能规模和外部条件的前提下,可以识别不同措施的边际减排贡献,避免将产能波动或电网碳强度变化误归因于单项技术措施.

表 1 减碳措施

Table 1 Carbon reduction measures

编号	名称	技术原理及对应排放源
M1	余热余压回收	标准态下,吨钢煤气及烟气回收量可提升 120 m^3,回收气体热值≥7.5 MJ/m^3,削减铁前燃料需求量与外购电依赖量
M2	自备电厂燃煤机组清洁化改造	升级超超临界(USC)汽轮机组+生物质混烧,供电煤耗降至280 gce/kWh,降低园区自备电厂排放
M3	绿电替代自发电厂燃煤机组	园区建设光伏/风电替代燃煤发电,减少自发电的碳排放
M4	CCUS	捕集高炉/转炉气尾流中难减排的 CO_2,用于化工原料或封存(吨钢捕集成本<200 元)

2 情景设定

本研究共设定 3 种情景:基准(Baseline)情景、中度控碳(medium control of carbon emissions, MC-CE)情景、深度控碳(deep control of carbon emissions, DC-CE)情景.

2.1 基准情景

基准情景主要用于反映园区在现有政策约束和常规技术进步条件下的碳排放变化趋势.该情景假设不大规模超前部署低碳技术,而是以现有节能降碳政策要求和较保守的技术推广速度为基础.如表 2 所列,直至 2050 年,余热余压回收利用率由 2020 年的 0.500 提升至 0.750,自备电厂发电效率由 0.390 提升至 0.450,绿电占比由 0.020 提升至 0.200,CCUS 覆盖率由 0.010 提升至0.180.该情景体现了钢铁园区在较低转型强度下的自然减排水平,可作为评价中度与深度控碳情景额外减排效果的参照.此外,本文所述“基准情景”并非无政策、无技术进步情景,而是“政策延续型基准情景”,即假定企业继续落实已明确的节能降碳政策和常规技术改造,但不额外引入超前部署的深度脱碳措施.因此,该情景中仍包含一定比例的绿电替代和 CCUS 示范应用,其作用主要是作为中度与深度控碳情景的比较参照.

表 2 基准情景参数

Table 2 Baseline scenario parameters

年份	余热余压回收利用率	自备电厂发电效率	绿电占比	CCUS 覆盖率
2020	0.500	0.390	0.020	0.010
2025	0.550	0.400	0.050	0.030
2030	0.600	0.410	0.080	0.050
2035	0.650	0.420	0.120	0.080
2040	0.700	0.430	0.150	0.120
2045	0.720	退出运行	0.180	0.150
2050	0.750	退出运行	0.200	0.180

注:“退出运行”表示对应年份传统自备燃煤发电单元不再作为主要发电来源,而由绿电替代及外部清洁电力补充,并非将设备热效率设定为 0.

2.2　中度控碳情景

中度控碳情景是在基准情景上提高节能低碳技术推广强度，强调低成本措施与适度CCUS技术的协同应用.该情景假设园区积极提升能源利用效率，扩大余热余压回收规模，推动自备电厂效率提升，并逐步增加园区分布式光伏、风电等绿电比例.如表3所列，直至2050年，余热余压回收利用率升至0.850，绿电占比升至0.550，CCUS覆盖率升至0.320.由此可见，该情景适用于分析园区推行偏积极、经济性良好的低碳转型措施对应的碳排放趋势.

表3　中度控碳情景参数

Table 3　MC-CE scenario parameters

年份	余热余压回收利用率	自备电厂发电效率	绿电占比	CCUS覆盖率
2020	0.500	0.390	0.020	0.010
2025	0.650	0.430	0.150	0.080
2030	0.700	0.450	0.250	0.120
2035	0.750	0.460	0.350	0.180
2040	0.800	0.480	0.450	0.250
2045	0.820	退出运行	0.500	0.280
2050	0.850	退出运行	0.550	0.320

2.3　深度控碳情景

深度控碳情景面向更高强度的碳减排目标，强调绿电规模化替代和CCUS大规模应用.该情景假设园区在2025年后显著提高低碳技术投入，较早完成自备电厂转型，并在2040年后基本退出传统燃煤发电方式.如表4所列，直至2050年，余热余压回收利用率提高至0.950，绿电占比提高至0.650，CCUS覆盖率提高至0.450.综上，该情景能够反映高强度政策约束和技术突破条件下的最大碳减排潜力.

表4　深度控碳情景参数

Table 4　DC-CE scenario parameters

年份	余热余压回收利用率	自备电厂发电效率	绿电占比	CCUS覆盖率
2020	0.500	0.390	0.020	0.010
2025	0.750	0.450	0.250	0.150
2030	0.800	0.470	0.350	0.220
2035	0.850	0.490	0.450	0.300
2040	0.900	退出运行	0.550	0.380
2045	0.920	退出运行	0.600	0.420
2050	0.950	退出运行	0.650	0.450

注：深度控碳情景中的余热余压回收利用率为综合利用水平和情景上限参数，表示可回收余热余压资源的利用程度，而非全部余热的物理回收率.

3　结果与讨论

3.1　碳排放总量与减排效果预测

逐年代入2020—2050年的时间参数，并结合表2~4中的情景参数，模拟南京某钢铁生产园区在3种情景下的碳排放总量及减排效果，结果如图1~4所示.需要注意的是，本文结果为基于设定边界和参数的情景预测结果，并非对未来碳排放的唯一确定性预测.模型的不确定性主要来自绿电消纳比例、CCUS工程化进度、余热余压利用上限和自备电厂退出节奏.结合单因素扰动判断，2050年碳排放预测结果对CCUS覆盖率和绿电占比最为敏感，对余热余压利用率次之，对自备电厂效率参数的敏感性相对较低.因此，后文着重对比各情景的相对变化幅度与各项减排措施的贡献差异，切勿将计算所得单一数值视作确定的预测结果.

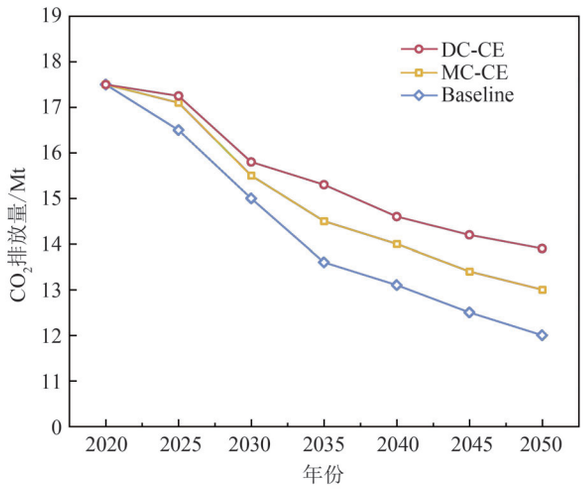


图 1 3 种不同情景下 CO_2 排放量变化趋势

Fig. 1 CO_2 emission trends under three different scenarios

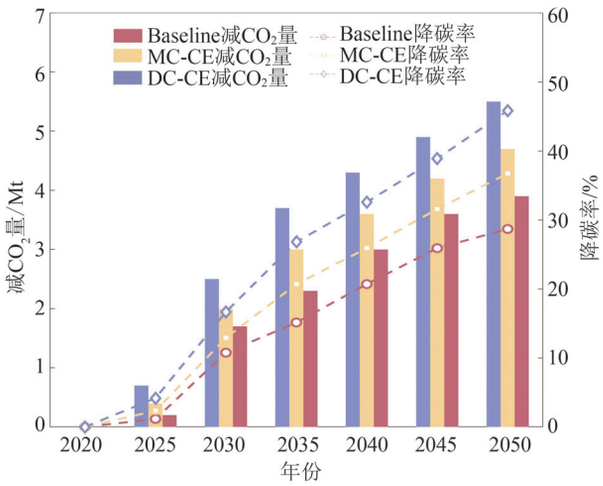


图 2 3 种不同情景下的减 CO_2 量及降碳率

Fig. 2 CO_2 reduction volumes and percentages under three different scenarios

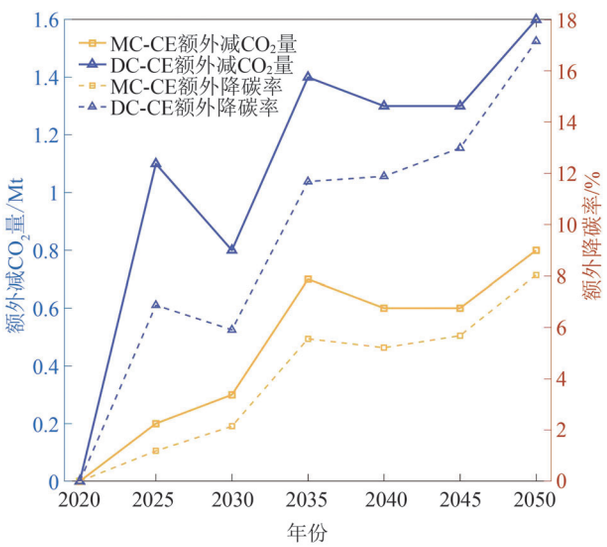


图 3 相对基准情景的额外减 CO_2 量及降碳率

Fig. 3 Additional CO_2 reduction volumes and percetages relative to baseline scenario

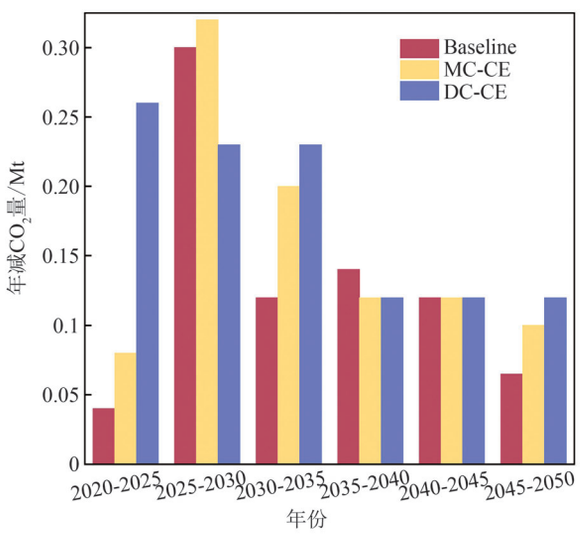


图 4 3 种不同情景的分时段年均减 CO_2 量

Fig. 4 Average annual CO_2 reduction volumes by time period under three different scenarios

从碳排放量及基础减排效果(见图 1~2):基准情景下 CO_2 排放量从 2020 年17.5 Mt降至 2050 年 13.6 MtCO_2,减 CO_2 量从 2025 年0.2 Mt逐步增至 2050 年 3.9 Mt,30 年间累计减排3.7 Mt;2025 年的降碳率仅 1.16%,2050 年达 28.68%,年均提升 0.92 个百分点,但后期增速放缓(2045—2050 年仅提升 2.78 个百分点).从图 2 中可以看出:基准情景在后期虽存在碳减排效应,但减排增速逐步放缓,整体碳减排力度偏弱;该情景采用最为保守的技术方案,2050 年整体降碳率不足 30%.

在中度控碳情景下,CO_2 排放量从 2020 年 17.5 MtCO_2下降至 2050 年 12.8 MtCO_2,降幅为 26.9%;减 CO_2 量在 2025 年为 0.4 Mt,2050 年增至 4.7 Mt,降碳率达 36.72%,年均提升 1.2 个百分点,整体增速较基准情景更平稳,控碳效果显著优于基准情景.

在深度控碳情景下,CO_2 排放量从 2020 年 17.5 Mt快速下降至 2050 年 12 Mt,降幅为31.4%;2025 年的减 CO_2 量已经达到 1.3 Mt,降碳率为8.02%;2050 年降碳率达到45.83%,比基准情景下高出 17.15 个百分点,比中度控碳情景高出 9.11 个百分点.由此可见,深度控碳情景下的碳减排效果最优,且至 2050 年可实现近 46%的降碳率,远超基准情景(28.68%)和中度控碳情景(36.72%).

从图 3 中可以看出,与基准情景相比,在中度与深度控碳情景下,额外减 CO_2 效果随时间的推

进持续增强.其中,在中度控碳情景下,额外减碳量在 2020—2050 年间增加了 0.8 Mt,额外降碳率提升至 8.04%;而深度控碳的减排优势更为显著,相对基准情景的额外减 CO_2 量达 1.6 Mt,额外降碳率升至 17.16%.两种控碳情景的额外减碳量和降碳率均呈现前期较慢、中期加速、后期稳定的增长特征,且深度控碳情景在各时段上均保持领先,并与基准情景的差距随时间的推进逐步扩大.

图 4 揭示了 3 种情景在不同年份的减排节奏差异.由图可知,基准情景下的年均减碳量波动较大,中期(2025—2030 年)达 0.30 Mt 后逐步回落;中度控碳情景下在初期(2020—2025 年)和末期(2045—2050 年)表现优于基准情景,但中期与之持平;深度控碳情景具有更强的减排潜力,初期(2020—2025 年)年均减 CO_2 量已经达到了0.26 Mt(为基准的 6.5 倍,为中期的 3.25 倍),除 2025—2030 年外,其余时段均保持最高的年均减碳量,尤其在末期仍能维持 0.12 Mt 的稳定减排强度.由此可见,深度控碳措施更能支撑长期减排.

3.2　不同控碳情景与减排措施下碳排放预测结果

图 5 示出了在基准情景下不同措施碳排放预测结果.

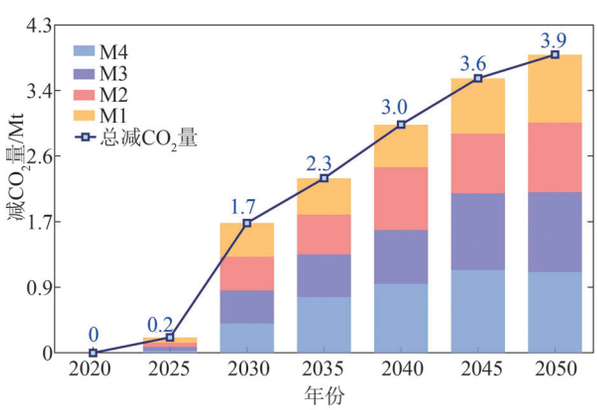


图 5　在基准情景下不同措施的减碳预测结果

Fig. 5　Predicted carbon reduction volumes of different measures under baseline scenario

由图可知:在基准情景下,2020—2050 年的总减 CO_2 量从 0 逐步增至 3.9 Mt,降碳率达 28.68%,减排成效主要依赖余热余压回收(M1)、电厂改造(M2)、绿电替代(M3)和 CCUS 技术(M4)的协同发力;短期(2025—2030 年)以 M1、M2 为主导,合计贡献超过 50%,主要依赖工业能效提升和煤电改造;中期(2035—2040 年)则依赖 M3、M4,绿电替代因该钢铁园区部署光伏/风电等分布式新能源,占比得到一定提升,CCUS 则随项目规模化,慢慢在减碳控碳方面发挥关键优势;长期(2045—2050 年)M3 和 M4 合计贡献超过 50%,但 M3 后期增速放缓、M4 依赖政策支持的问题逐渐显现.

图 6 示出了在中度控碳情景下不同措施碳排放预测结果.

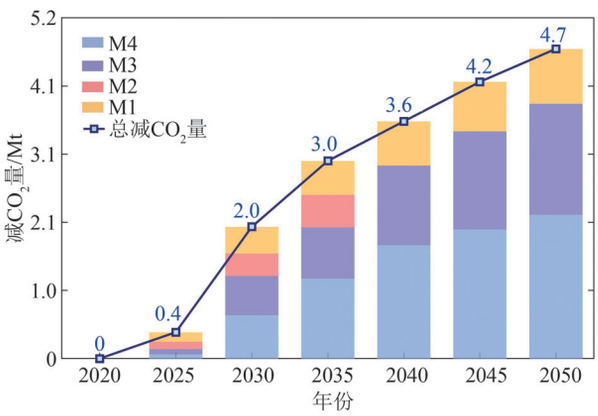


图 6　在 MC-CE 情景下不同措施的减碳预测结果

Fig. 6　Predicted carbon reduction volumes of different measures under MC-CE scenario

由图可知:在中度控碳情景下,2020—2050 年的总减 CO_2 量逐步增至 4.7 Mt,降碳率达 36.72%;与基准情景下相同,短期(2025—2030 年)以 M1 和 M2 为主导,中期(2035—2040 年)转向 M3 和 M4 协同发力,后期(2045—2050 年)M4 成为减排的关键因素.具体来看,M1 在 2025—2030 年贡献占比超过 20%,但 2040 年后,因工业余热资源趋近饱和而增速放缓;M2 在 2045 年后直接退出,届时园区的自发电厂已经不再需要燃气/煤气发电,全部被园区内自发的绿电替代;M3 受益于光伏/风电等分布式能源的推广,2030—2040 年减碳量增长最多,但 2045 年后受电网消纳能力限制,增速下降;M4 则从 2035 年起加速推广,2050 年贡献占比达 46.4%.

图 7 示出了在深度控碳情景下不同措施碳排放预测结果.由图可知,在深度控碳情景下,2020—2050 年的减 CO_2 量从 0 增至 5.5 Mt,降碳率在 2050 年达到 45.83%,整体的减排趋势较稳定.从各减排措施的贡献来看,M1 的贡献保持稳定增长,减 CO_2 量从 2025 年的 0.47 Mt 增至 2050 年的 0.94 Mt,是园区级减排的基础;M2 仅在 2025—2035 年有贡献,2040 年后减碳量为 0,在深度控碳后期将被其他技术取代;在 M3 的贡献下,减 CO_2 量从 2025 年的 0.26 Mt 快速增长至 2050 年的 2.00 Mt,园区内部光伏/风电等清洁能源大规模使用;M4 贡献最为显著,减 CO_2 量从 2025 年的 0.21 Mt 跃升至 2050

年的2.56 Mt,成为最为重要的减排措施.在深度控碳目标下,碳捕集利用与封存技术的规模化应用是实现大幅碳减排的核心支撑.

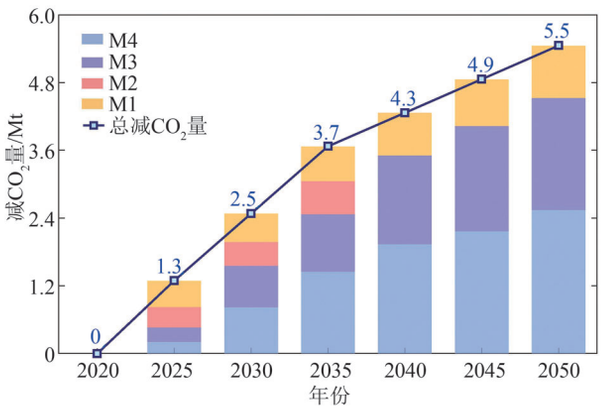


图7 在DC-CE情景下不同措施的减碳效果分析

Fig. 7 Effectiveness analysis of carbon reduction measures under DC-CE scenario

图8示出了不同控碳情景下各减排措施的贡献占比.在基准情景下,传统措施占比更高且贡献相对均衡,M1初期贡献占比最高(2025年约34.9%),但随时间的推进逐步下降;M2的贡献占比稳定在23%~28%,M3和M4的贡献占比虽逐步提升但不够明显,可见基准情景对新技术依赖度较低.相比之下,在中度控碳情景下,绿电与CCUS的作用较显著,M1的贡献占比下降更快,M2在2045年后退出,M3的贡献占比从19.9%增至35.9%,M4的贡献占比则快速提升至46.4%,成为影响碳排放最关键的因素.在深度控碳情景下,M4的贡献占比最高且增长最快,M1占比降至所有情景最低,M2提前至2040年退出,M3占比持续强化至37.2%.由此可见,降碳减排的力度越大,对绿电替代和CCUS技术的依赖度越高,传统措施的作用则越为弱化.

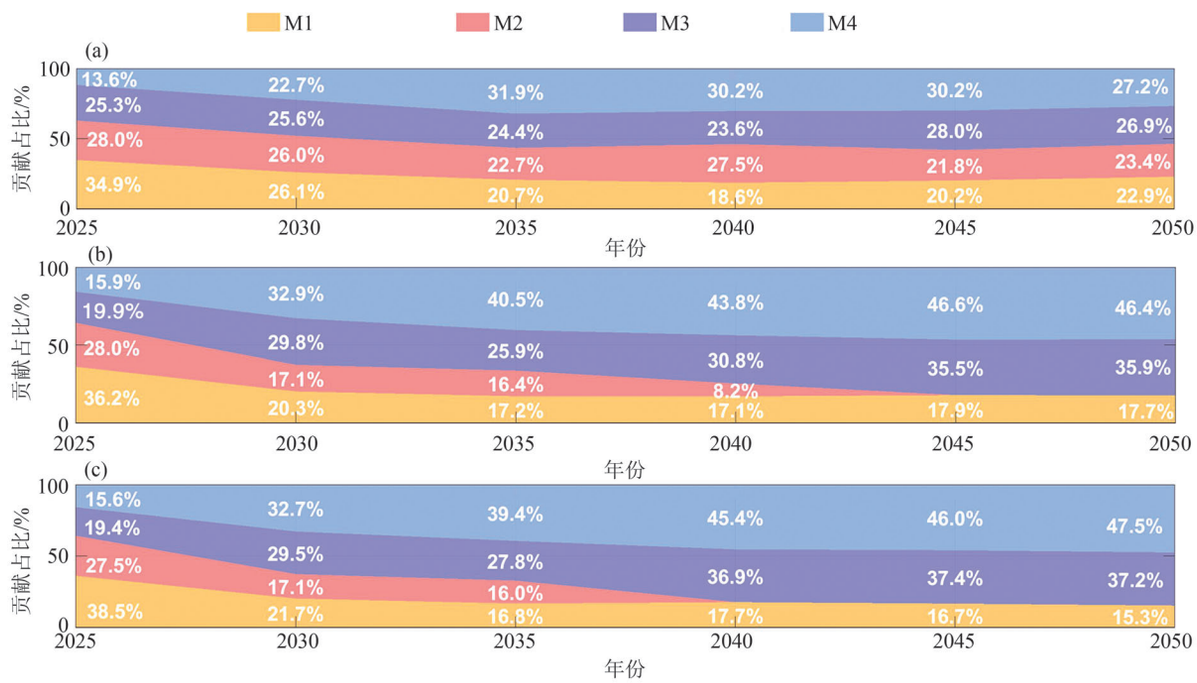


图8 不同减排情景下各措施贡献占比的对比

Fig. 8 Comparison of contribution shares of various measures under different emission reduction scenarios

(a)—基准情景;(b)—MC-CE情景;(c)—DC-CE情景.

3.3 分阶段减排启示及适用范围

从分阶段路径来看,2035年前,该园区碳减排仍应优先依托余热余压回收、煤气高效利用和自备电厂效率提升等成熟措施,以较低成本获得稳定减排;2035—2040年后,传统节能措施边际贡献逐步下降,绿电替代和CCUS的作用明显增强,应成为中长期深度减排的重点方向.对于长流程钢铁企业而言,绿电替代主要削减电力相关排放,CCUS则面向高炉、转炉等难减排排放源,两者具有互补性.本文情景分析适用于主体工艺路线和产能规模相对稳定的长流程钢铁园区,但若未来企业发生大比例电炉短流程替代、氢冶金导入或产能结构显著调整,则需要重新构建活动水平和能源转换模块.

4 结论

(1)不同控碳情景下,钢铁园区碳排放均呈下降趋势,但减排幅度存在明显差异.基准情景

下,2050 年降碳率为 28.68%,减排潜力有限;中度控碳情景下,2050 年降碳率提高至 36.72%;深度控碳情景下,2050 年降碳率达到 45.83%,是 3 种情景中的最优路径.

(2)不同措施的贡献具有明显阶段性.余热余压回收和自备电厂改造在近期减排中发挥基础作用,但长期增长空间有限;绿电替代和 CCUS 技术在中后期贡献快速提高,是支撑园区深度脱碳的核心措施.其中,CCUS 在深度控碳情景下 2050 年贡献占比可达 47.5%,显示出其对长流程钢铁难减排排放源的重要支撑作用.

(3)与已有侧重行业或区域尺度的钢铁碳排放预测研究相比,本文更关注企业级长流程钢铁园区在既有工艺路线约束下的中长期减排路径识别.本文的主要贡献在于:将企业能源统计、能源转换和排放核算统一纳入 LEAP 情景框架;通过控制变量法分解余热余压回收、自备电厂改造、绿电替代和 CCUS 等措施的阶段性贡献;提出适用于长流程钢铁园区的分阶段减排策略,为企业制定中长期降碳方案提供参考.

5　参考文献

[1] Zhang B, Lu Y, Li H, et al. Iron ore substitution and carbon emission reduction by scrap steel recycling under carbon neutrality goal[J]. Journal of Industrial Ecology, 2025, 29(1): 217-232.

[2] Imada S. Sharing CO_2 abatement costs in the iron and steel sector: a shared responsibility input-output approach [J]. Ecological Economics, 2025, 230: 108504.

[3] Zhang H X, Sun W Q, Li W D, et al. A carbon flow tracing and carbon accounting method for exploring CO_2 emissions of the iron and steel industry: an integrated material-energy-carbon hub[J]. Applied Energy, 2022, 309: 118485.

[4] Gu Y Q, Pan C C, Sui Y R, et al. CO_2 emission accounting and emission reduction analysis of the steel production process based on the material-energy-carbon correlation effect [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(59): 124010-124027.

[5] Zhang Y, Hu S, Yan D, et al. Proposing a carbon emission responsibility allocation method with benchmark approach[J]. Ecological Economics, 2023, 213: 107971.

[6] Sun J C, Na H M, Yan T Y, et al. A comprehensive assessment on material, exergy and emission networks for the integrated iron and steel industry[J]. Energy, 2021, 235: 121429.

[7] Sun W Q, Wang Q, Zheng Z, et al. Material-energy-emission nexus in the integrated iron and steel industry [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 213: 112828.

[8] 李新创,李冰. 全球温控目标下中国钢铁工业低碳转型路径[J]. 钢铁,2019,54(8):224-231.
(Li Xinchuang, Li Bing. Low carbon transition path of China's iron and steel industry under global temperature-control target [J]. Iron & Steel, 2019, 54(8): 224-231.)

[9] 李冰,李新创,李闯. 国内外钢铁工业能源高效利用新进展[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程,2017,9(1):68-77.
(Li Bing, Li Xinchuang, Li Chuang. Progress on efficient utilization of energy resources of steel industry home and abroad [J]. Journal of Engineering Studies, 2017, 9(1): 68-77.)

[10] 叶友斌,邢芳芳,刘锟,等. 我国钢铁企业二氧化碳排放结构探讨[J]. 环境工程,2012,30(增刊 2):224-227.
(Ye Youbin, Xing Fangfang, Liu Kun, et al. CO_2 emission structure of integrated iron and steel enterprises in China[J]. Environmental Engineering, 2012, 30(Sup 2): 224-227.)

[11] Liu M Y, Zhou Q, Yin Y L, et al. Analysis and visualization of carbon flow in iron and steel production processes[C]//2022 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT). Shanghai, China. IEEE, 2022: 985-989.

[12] Wang K, Liu S H, Liu K Y, et al. Tracking carbon flows in China's iron and steel industry[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(31): 11510-11519.

[13] Dong Z M, Yao S J. Digital finance reduces urban carbon footprint pressure in 277 Chinese cities[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 16526.

[14] De Souza Freire F, Da Silva N O, De Oliveira V R F. Economic growth and greenhouse gases in Brazilian States: is the environmental Kuznets curve applicable hypothesis? [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(15): 44928-44942.

[15] Rahmatmand B, Tahmasebi A, Lomas H, et al. A technical review on coke rate and quality in low-carbon blast furnace ironmaking[J]. Fuel, 2023, 336: 127077.

[16] 陈亮,郭慧婷,孙亮,等. 钢铁生产企业《温室气体排放核算与报告要求》国家标准解读[J]. 中国能源,2016,38(8):43-46.
(Chen Liang, Guo Huiting, Sun Liang, et al. Requirements of the greenhouse gas emission accounting and reporting: iron and steel production enterprise national standard interpretation[J]. Energy of China, 2016, 38(8): 43-46.)

[17] Yu S J, Lin F J, Zhao G, et al. Accurate carbon accounting based on industrial metabolism for the lean management of carbon emission[J]. Energy Reports, 2023, 9: 3872-3880.

[18] Ren L, Zhou S, Peng T D, et al. A review of CO_2 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.

[19] Ding N, Xi Y H, Jiang W T, et al. State-of-the-art carbon metering: Continuous emission monitoring systems for industrial applications[J]. Heliyon, 2025, 11(3): e42308.

[20] 李姗姗,费翔,董洪光,等. 基于 LMDI 和 LEAP 模型的山西省碳排放影响因素及预测[J]. 中国环境科学,2025,45(7):4052-4063.
(Li Shanshan, Fei Xiang, Dong Hongguang, et al. Analysis of carbon emission influencing factors and forecast in Shanxi Province based on LMDI and LEAP model [J]. China Environmental Science, 2025, 45(7): 4052-4063.)

[21] 李宝珠,刘雅洁,张少聪. 基于 LEAP 模型的天津市多情景能源消费和碳排放预测[J]. 环境科学,2025,46(3):1492-1501.
(Li Baozhu, Liu Yajie, Zhang Shaocong. Multi-scenario energy consumption and carbon emission prediction in Tianjin based on LEAP model [J]. Environmental Science, 2025, 46(3): 1492-1501.)