

引用格式: 连旭, 裴童心, 汪文生, 等. 碳交易机制与技术应用对中国煤电行业碳减排的影响: 基于强化学习的多智能体仿真[J]. 资源科学, 2024, 46(6): 1186–1197. [Lian X, Pei T X, Wang W S, et al. The impact of carbon trading mechanism and technology application on carbon emission reduction in China's coal-fired power industry: Multi agent simulation based on reinforcement learning[J]. Resources Science, 2024, 46(6): 1186–1197.] DOI: 10.18402/resci.2024.06.11

碳交易机制与技术应用对中国煤电行业 碳减排的影响

——基于强化学习的多智能体仿真

连旭¹, 裴童心¹, 汪文生¹, 汤颜声²

(1. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083; 2. 电信科学技术研究院, 北京 100191)

摘要:【目的】“3060”双碳目标对中国煤电行业低碳发展提出了全新要求, 随着碳配额上限的逐步下调, 煤电行业如何进行低碳转型已引起业界与学术界的关注。碳交易机制通过政策约束引导煤电企业减少碳排放, 技术创新通过提高能效和降低排放, 在推动煤电企业向低碳模式转变中发挥关键作用。然而, 这一转型过程在微观层面的内在驱动机理尚未得到充分解析。【方法】以中国2022年2628家煤电企业为样本, 结合强化学习理论和多智能体模型, 基于Netlogo平台对碳交易机制下碳市场、政府和不同减碳倾向(倾向于优先选用技术减碳与否)煤电企业之间的交互影响与协同机制进行模拟与分析。【结果】研究表明: ①碳交易机制的实施可有效推动煤电企业进行技术减碳, 实现环境和经济的绩效双赢, 预计影响效果于2032年起愈发显著。②煤电企业减碳倾向受碳交易推行程度影响。2030年碳达峰目标实现之前, 煤电企业未如预期般积极应用技术进行减碳工作。③合理的碳交易价格将有效引导企业进行技术应用投资, 碳价越高越能刺激煤电企业的减碳积极性和碳市场的活跃度。碳价在各个阶段涨幅不同, 自2022年碳市场初始运行起至2030年, 碳价涨幅最大, 在2032至2060年的中后期阶段平稳上升。【结论】中国煤电行业实现低碳转型仍面临挑战, 需加快完善碳交易市场机制建设, 强化碳资产管理, 健全减碳激励支持体系和优化碳配额定价机制, 推动中国煤电行业技术减碳和高质量发展。

关键词: 碳减排; 碳交易机制; 节能技术; 多智能体模型; 低碳政策工具; 煤电行业; 中国

DOI: 10.18402/resci.2024.06.11

1 引言

2010年起, 人类引发的全球变暖以前所未有的速度增加, 每年排放CO₂约540亿t, 达到历史最高水平^[1]。全球变暖会带来诸多气候环境问题, 导致自然灾害增多, 影响人类的健康与生存, 因此减少CO₂排放至关重要。作为一种易实施且高效的低碳政策工具, 碳交易机制被越来越多的国家用于减少碳排放和改善环境质量^[2]。中国2022年碳排放量高达110亿t, 约占全球碳排放量的28.87%, 可见中国的碳减排举措会对全球减碳效果产生重大影响^[3]。

为了实现“3060”的双碳目标, 中国政府引入市场机制解决碳排放问题, 先后开设了地方碳交易市场和全国碳交易市场。然而, 刚刚起步的碳市场并不成熟, 出现了碳交易活跃度不高、碳配额价格整体偏低、碳市场波动大等问题^[4], 导致目前中国碳市场的有效性不如预期。归根结底是因为支撑碳市场良好运作的碳交易机制尚不健全, 鉴于2030年实现碳达峰的目标日益临近, 对该机制的改进和优化工作已经刻不容缓。

在实现双碳目标的进程中, 煤电行业备受关

收稿日期: 2023-12-14; 修订日期: 2024-03-25

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(23AGL033)。

作者简介: 连旭, 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 研究方向为能源管理与政策。E-mail: lianxu@student.cumtb.edu.cn

通讯作者: 汪文生, 男, 安徽桐城人, 教授, 博士生导师, 研究方向为能源管理与政策、大数据应用与智能决策。E-mail: wws@cumtb.edu.cn

2024年6月

注。电力行业是碳排放的主要贡献者,而燃煤发电是中国电力的主要来源,2022年燃煤发电量为总发电量的58.4%^[5]。改革开放以来,中国国民经济大步飞跃,城市化快速发展,电力需求量不断增加。伴随而来的是日益加剧的电力短缺问题和碳减排负担,煤电行业一方面要为广大客户提供优质的供电服务,另一方面还要控制自身的碳排放量^[6]。与此同时,在第三次能源革命的影响下,可再生能源崛起,以煤炭为主的传统化石能源消费将经历一个计划性的逐步减少和替代过程,紧逼煤电行业低碳转型^[7]。值得思考的是,面对未来逐渐增长的电力需求,如何降低煤电行业的碳排放成为了一个重要问题。

要想实现低碳发展,就必须采取减碳措施。根据波特假说,作为一类环境规制,碳交易机制激发的技术创新可以实现环境改善和经济效益的双赢目标^[8],这为通过碳交易机制协同技术应用以解决煤电行业低碳转型问题提供了理论依据。从现有研究来看,环境规制和技术应用可有效降低碳排放。结合政策和技术的双重视角,徐顺智等^[9]阐述了中国煤电行业的发展现状,建议采用奖惩阶梯式碳交易机制和洁净煤发电技术进行低碳减排工作;Du等^[10]分析了燃煤电力行业中技术和政策减碳措施的协同效应,指出两种措施彼此相互加成,可有效降低碳排放。上述研究为双碳目标背景下煤电行业的转型路径提供了明确的方向,其中,碳交易制度的应用不仅在实现企业持续减碳方面表现出色,还显著提升了企业的经济绩效^[11]。同时,技术应用在推动煤电企业向低碳模式转变中起着同样关键的作用。Zhao等^[12]研究证实,煤电企业应用技术进行低碳发展,可提高火电能源效率和减少负面环境影响;并有研究预测,到2050年中国所有火电厂都将采用先进技术进行碳减排^[13]。上述研究运用因素分解法和计量经济学方法等自上向下的研究方法,从时间和空间的角度评估了碳交易机制与技术应用对煤电行业的宏观层面影响。然而,碳交易机制能否有效实施,很大程度上取决于微观层面企业的响应情况,采用自下而上的方法进行研究更符合事物发展的客观规律。多主体建模方法(Agent based modeling, ABM)被认为是研究微观主体与宏观环境交互这一复杂系统最适宜的方法,能够通过

自下而上的方式,构建多智能体模型模拟并揭示系统内在的交互关系和演化机理^[14]。学者应用此方法对碳排放约束下再制造企业的最优产量^[15],碳排放监管下双渠道供应链的最优定价^[16]进行了研究;Yu等^[17]和Fang等^[18]以碳市场和低碳技术之间的动态互动为研究对象,探究了碳交易制度对生产不同产品的企业的配额交易量、产出减少量和碳减排量等异质性影响,提供了有价值的决策建议,帮助企业调整运营决策以实现利润最大化。

在前人研究成果的基础上,本文从煤电企业微观视角出发,综合考量碳交易机制的关键设计要素,采用多主体建模方法搭建自下而上的碳交易模型,对微观煤电企业技术减碳和碳交易决策的个体行为与宏观碳市场运营的动态交互影响进行仿真,探究其的内在驱动机理和“刺激—响应”机制。本文的贡献体现在如下3个方面:①突破现有研究对宏观行业数据的分析,模型仿真基于中国所有煤电企业发电量、碳排放量和技术减碳成本等真实数据。②首次考察了企业个体的减碳意愿(减碳倾向)对企业碳交易决策和碳市场运转效果的影响,为煤电行业实现低碳高效的可持续发展路径提供了模型支持。③引入机器学习算法设计主体行为规则,设计的企业主体更加智能和主动,通过感知外部环境变化,学习并更新自身属性和后期决策以求更好的达成目标,更符合现实特点。

2 模型与数据

本文搭建的多Agent碳交易仿真模型,包含3类主体:煤电企业Agent、政府Agent和碳市场Agent,每个主体依据各自规则交互行动并随时间演化,进而产生社会性的宏观表现(图1)。政府Agent在每次碳履约期初,制定碳配额分配方案硬性约束企业碳排放,在期中监管煤电企业Agent的碳交易行为和碳市场Agent的碳配额价格与供需情况,在期末对碳履约情况进行核查。煤电企业Agent于期初获得免费碳配额后,根据企业碳配额缺口、预测碳价和技术减碳成本等指标,制定减碳和碳配额策略;期中执行策略;期末结合碳交易市场信息和企业本期策略收益,通过强化学习对下期企业减碳与碳交易行为进行优化调整。碳市场Agent制定碳配额交易规则和提供交易平台,在碳履约的约束下,节能

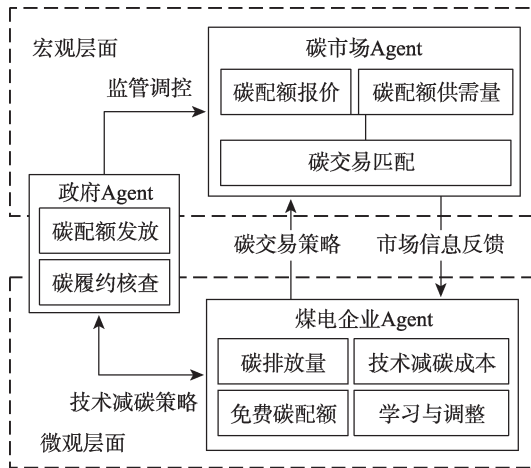


图1 多主体煤电企业碳交易模型框架

Figure 1 Framework diagram of carbon trading model for multi agent coal power enterprises

技术应用成熟的企业可出售富余碳配额以赚取环境收益,而其他企业则需购买碳配额以填补碳缺口,碳配额的稀缺性使得交易行为自发产生,从而在政府调控范围内形成了碳价。综上,各煤电企业的独立决策汇聚成了行业层面的减碳和碳交易行为,技术减碳量、碳价和碳配额交易量等相关数据映射出了碳市场宏观运行状况,这些数据又通过反馈作用影响煤电企业的减碳和碳交易策略制定,建立出了微观层面企业技术减碳策略和宏观层面的碳交易机制之间的联系。

2.1 模型假设

模型假设1:政府Agent对碳市场进行管控。碳价主要由碳配额供需情况决定,逐渐收紧的碳配额约束容易导致碳价产生剧烈波动,影响企业参与碳市场交易的积极性。为预防此类现象发生,政府以设定价格上下限的方式,引导市场预期,形成合理碳价,保证碳市场整体运行健康有序,推进国家和企业减碳目标顺利实现^[19]。同时,为了避免企业囤积碳配额使其过度资产化,导致碳市场中碳配额供大于求,从而引发碳价低迷的问题,本模型不许企业预支与存储碳配额,每期结束未售出的碳配额余量清零,不计入下一期。

模型假设2:煤电企业Agent选用节能技术进行减碳。根据《“十四五”节能减排综合工作方案》和《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》等政策文件,中国煤电行业未来发展应着重关注效率

提升和传统污染物控制,实现清洁与高效利用。目前可应用的减碳方法有节能技术改造、灵活性改造、绿色信贷政策^[20]、低碳供应链模式优化^[21]等。其中,以降低产量减碳的方式最为消极,影响企业经济效益并阻碍良性发展,并非长久之计。IPCC发布的《评估报告》证实节能技术能有效促进低碳经济发展,是推动碳减排的最有效手段,在全球工业减碳中起着主导性作用^[22]。因此,煤电企业选用节能技术进行减碳与中国能源发展战略相符,不仅能推动减污降碳协同增效、与碳交易制度契合,还能获得环境和经济的双份收益,对煤电行业实现低碳发展更具持久的驱动力^[23,24]。

模型假设3:煤电企业Agent减碳倾向存在差异。为了充分还原企业个体有限理性的特点,使模型设计更加逼近现实,构建具有异质性的煤电企业Agent,表现为企业规模异质性、交易报价异质性和减碳倾向异质性。其中,减碳倾向是指碳交易机制下煤电企业采取相关减碳行动的意愿,根据减碳倾向的不同将企业设定为积极型和消极型^[25]。在应对碳交易机制约束时,积极型企业优先考虑应用节能技术进行减碳。考虑到技术减碳存在的成本,故企业不一定完全应用节能技术进行减碳工作。根据《2022年中国碳价报告》的统计,41%的控排企业预计需要通过买入配额的方式达成履约目标^[26],说明当前仍有部分企业仅倾向于在碳市场购买所需配额以应对碳履约约束,即视为消极型企业。此外,各主体每期的减碳倾向并非固定不变,在期末会根据当期的减碳策略实施效果和外部碳市场反馈信息进行学习与演化,不断执行符合自身利益的减碳决策,设计的行为更贴近社会现实。

2.2 模型主体行为规则

2.2.1 政府Agent

政府Agent行为规则与流程如图2所示:

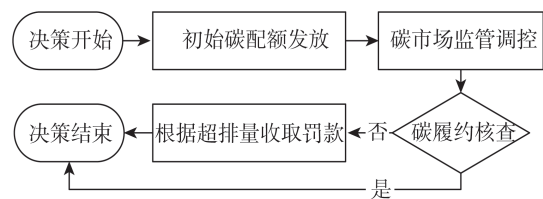


图2 政府Agent行为规则流程

Figure 2 Government agent behavior rule process

2024年6月

(1)期初发放初始碳配额。政府 Agent 遵循标杆法则,即参考煤电行业的平均碳排放强度,期初以年为周期向煤电企业发放免费碳配额 Q_i (t 为年份),并每年减少 α 的碳配额数量,旨在对其履约期的碳排放量产生硬性约束。

(2)期末核查碳排放履约情况。每期期末政府 Agent 对煤电企业当期的碳排放量 E_t 、免费碳配额量 Q_i 、技术减碳量 E_{tec} 和碳市场配额交易总量 ΣQ_{Total} 进行核算,得到履约核查值 E_{check} 。若 $E_{\text{check}} < 0$,表示煤电企业未完成碳减排履约,存在超排行为,并处以相应罚款 F 。

$$E_{\text{check}} = E_t - Q_i - E_{\text{tec}} - \Sigma Q_{\text{Total}} \quad (1)$$

$$F = -E_{\text{check}} \times \text{Pri} \times \beta \quad (2)$$

式中: β 为超排惩罚系数 ($\beta > 1$); Pri 为当期碳配额均价, $\text{Pri} = \frac{\sum \sum \text{Pri}_{n,t} \times Q_{\text{Total}}}{\sum \sum Q_{\text{Total},n,t}}$; n 为碳交易次数。

2.2.2 积极型企业 Agent

积极型企业 Agent 行为规则与流程如图 3 所示:

(1)计算碳配额缺口。估算履约期内发电碳排放量 E_t ,获取初始碳配额 Q_i ,二者的差值即为碳配额缺口 Q_{gap} 。

(2)预测碳价。借鉴魏一鸣等^[27]设计的碳价格模型,基于上期碳市场的碳价 Pri_{t-1} ,碳配额供给量 $\Sigma Q_{\text{sup},t-1}$ 和需求量 ($\Sigma Q_{\text{act},t-1} + \Sigma Q_{\text{pas},t-1}$),对当期碳价作出预测:

$$\text{Pri}_t = \text{Pri}_{t-1} \times \left[1 + \theta \times \left(\Sigma Q_{\text{act},t-1} + \Sigma Q_{\text{sup},t-1} - \Sigma Q_{\text{pas},t-1} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $\Sigma Q_{\text{act},t-1}$ 为积极型企业碳配额需求量; $Q_{\text{pas},t-1}$ 为

消极型企业碳配额需求量; θ 为价格调整系数,又称市场深度,代表了碳价的波动幅度。

(3)制定减碳策略。积极型企业虽有应用节能技术进行减碳的意愿,但仍会结合改造所需的边际技术减碳成本和自身碳配额缺口综合分析制定减碳策略。据此设计两个阶段的逻辑判断企业减碳的决策过程。假设积极型企业减碳策略集合 S 为 $\{0=$ 节能技术减碳, $1=$ 购买碳配额减碳, $2=$ 出售富余碳配额 $\}$ 。第一阶段决策企业通过比较边际技术减碳成本 C_{tec} 和预测碳价 Pri_t ,决定是否采用减碳技术,当第 m 项边际技术减碳成本 $C_{\text{tec},m}$ 高于预测碳价 Pri_t ,即技术投资高于市场购买成本,则企业不会应用第 m 项技术进行减碳:

$$S = \begin{cases} 0, & C_{\text{tec},m} \leq \text{Pri}_t \\ 1, & C_{\text{tec},m} > \text{Pri}_t \end{cases} \quad (4)$$

企业在考虑技术减碳成本的同时,还需计算减碳技术应用的减碳效果。第二阶段决策比较累计技术减碳量 ΣE_{tec} 与碳配额缺口 Q_{gap} ,判断企业能否通过应用减碳技术完成碳履约:

$$S = \begin{cases} 0, & \sum_{i=1}^{m-1} E_{\text{tec}} \leq Q_{\text{gap}} \\ 2, & \sum_{i=1}^{m-1} E_{\text{tec}} > Q_{\text{gap}} \end{cases} \quad (5)$$

当节能技术的边际减碳成本小于预测碳价,累计技术减碳量小于企业碳配额缺口时 ($S=0$),企业继续应用节能技术进行减碳并不断重复上述决策过程,直到满足 $S=1$ 或 $S=2$ 。

(4)进行碳交易。根据企业执行的减碳策略效果,若存在富余碳配额 ($Q_{\text{gap}} > 0$),则视为完成履约,碳交易策略为出售富余配额 Q_{sup} 以盈利。若企业未

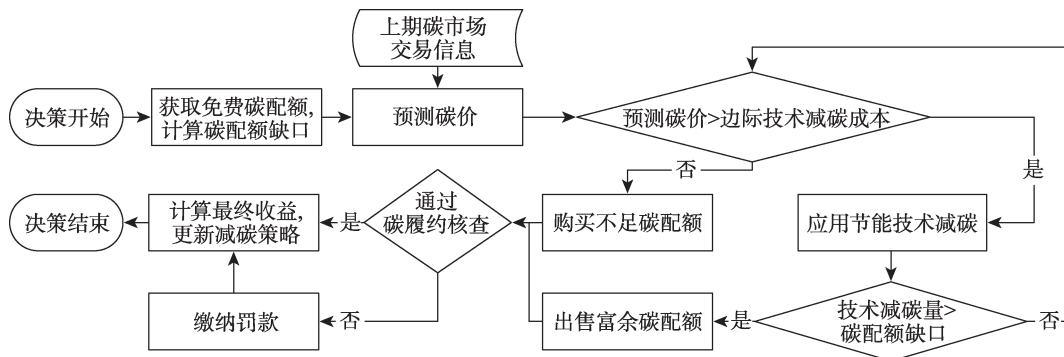


图3 积极型企业 Agent 行为规则流程

Figure 3 Active carbon reduction enterprises agent behavior rule process

填满碳缺口($Q_{\text{gap}} < 0$),碳交易策略为在碳市场中购买缺少的碳配额 Q_{act} 以完成履约。特别地,买方企业不一定购买得到全部的碳配额需求量,因此存在未完成履约的情况。

$$Q_{\text{sup}} = E_{\text{tec}} - Q_{\text{gap}} \quad (6)$$

$$\text{Max}(Q_{\text{act}}) = Q_{\text{gap}} - E_{\text{tec}} \quad (7)$$

(5)减碳倾向调整。期末碳交易行为结束,积极型企业 Agent 根据当期碳配额交易收支情况计算减碳收益 I_t ,并依此对自身减碳倾向进行强化学习,优化调整下一期的减碳策略。基于上述行为,应用 Roth-Erev 算法设计其减碳倾向更新公式。该算法的核心思想是,如果某一时间段内的决策获得了较高利益,下一时间段采用这种决策的概率就会增加,反之则降低,得到强化的策略倾向累计不断增强,而未得到强化的策略倾向保持不变^[28]。

$$I_t = (Pri_{\text{sell}} - C_{\text{tec}}) \times Q_{\text{sup}} - Pri_{\text{act}} \times Q_{\text{act}} \quad (8)$$

式中: Pri_{sell} 和 Q_{sup} 为碳配额出售的价格与数量; Pri_{act} 和 Q_{act} 为碳配额购买的价格与数量。

$$Ten(t+1) = \begin{cases} Ten_{\text{act}}(t) + I_t \\ Ten_{\text{pas}}(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: Ten_{act} 和 Ten_{pas} 分别为积极型企业 Agent 当期的积极和消极的减碳倾向; $Ten(t+1)$ 为下期的减碳倾向,决定着其在下期选择积极 Pro_{act} 或消极 Pro_{pas} 减碳策略的概率:

$$\begin{cases} Pro_{\text{act}} = Ten_{\text{act}}(t+1) / (Ten_{\text{act}}(t+1) + Ten_{\text{pas}}(t+1)) \\ Pro_{\text{pas}} = Ten_{\text{pas}}(t+1) / (Ten_{\text{act}}(t+1) + Ten_{\text{pas}}(t+1)) \end{cases} \quad (10)$$

2.2.3 消极型企业 Agent

消极型企业 Agent 行为规则与流程如图4所示:

(1)计算碳配额缺口。与积极型企业 Agent 行为规则相同。

(2)进行碳交易。消极型企业 Agent 在碳交易

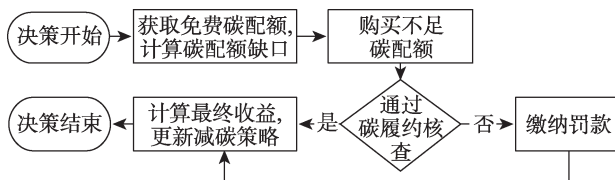


图4 消极型企业 Agent 行为规则流程

Figure 4 Passive carbon reduction enterprises agent behavior rule process

机制中处于被动地位,减碳行为仅能选择购买所需碳配额 Q_{pas} 的策略。特别地,作为买方企业,与积极型企业 Agent 行为规则相同,也不一定购买得到全部碳配额需求量,因此存在未完成履约的情况。

$$\text{Max}(Q_{\text{pas}}) = Q_{\text{gap}} \quad (11)$$

(3)减碳倾向调整。消极型企业 Agent 的策略只会带来两种结果:履约成功,下期依旧选择消极减碳倾向的概率增加;履约失败,则受到超出平均碳价数倍的超排惩罚,此时消极减碳倾向决策的选择概率得到降低,企业“被迫”考虑选择通过节能技术转换为积极型企业。基于上述行为,认为消极型企业 Agent 的当期履约结果决定了如何调整下期的减碳倾向,是制定减碳策略的关键参考依据。Bush-Mosteller 强化学习算法同时考虑了决策的正支付和负支付两种情况,但决策获得的利益大小与是否选择这个决策没有关联^[29]。据此设计消极型企业 Agent 在选择积极 Pro_{act} 与消极 Pro_{pas} 减碳策略的概率更新公式如下:

$$Pro_{\text{act}}(t+1) = \begin{cases} Pro_{\text{act}}(t) - \sigma \times Pro_{\text{act}}(t), CP = 0 \\ Pro_{\text{act}}(t) + \mu \times [1 - Pro_{\text{act}}(t)], CP = 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$Pro_{\text{pas}}(t+1) = \begin{cases} Pro_{\text{pas}}(t) + \sigma \times [1 - Pro_{\text{pas}}(t)], CP = 1 \\ Pro_{\text{pas}}(t) - \mu \times Pro_{\text{pas}}(t), CP = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: CP 为煤电企业当期的履约状态, $CP=1$ 为履约, $CP=0$ 为违约; σ 和 μ 分别为履约和违约的强化强度。

2.2.4 碳市场 Agent

碳市场 Agent 行为规则与流程如图5所示:

若卖方挂牌价在买方报价区间内,交易即刻发生,成交价格为卖方挂牌价,成交量取决于买卖双方报单量较小的一方;若卖方挂牌价超出买方报价区间,则双方不进行交易,买方继续搜索其他卖家;若买方未完成全部交易,继续匹配其他卖家。与其他商品市场交易类似,由于不完全信息和企业有限理性,煤电企业在碳交易中不会完全追求利润最大化,碳配额挂牌价是随机的且独立分布于一定区间内,避免因报价过高产生的亏损风险。

根据 Gode 等^[30]的研究,积极型企业卖方的碳配

2024年6月

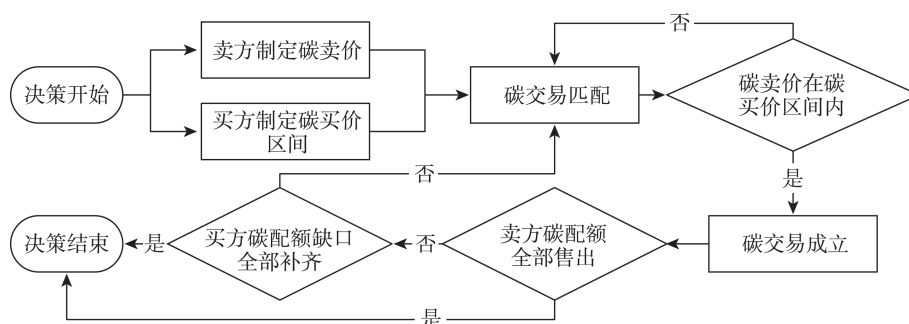


图5 碳市场 Agent 行为规则流程

Figure 5 Carbon market agent behavior rule process

额挂牌价 Pri_{sell} 取值于加权预测碳价 $Pri_t(1+\omega)$, 碳价下限 Pri_{lim} 和边际技术减碳成本 C_{tec} 三者的最大值, 其中 $\omega \sim (0.00, 0.01^2)$ 。

$$Pri_{sell} = \text{Max}[Pri_t(1+\omega), Pri_{lim}, C_{tec}] \quad (14)$$

积极型企业买方的碳配额购买报价 Pri_{act} 由碳价下限 Pri_{lim} , 预测碳价 Pri_t 和边际技术减碳成本决定, 服从均匀分布:

$$\begin{cases} Pri_{act} \sim U[Pri_{lim}, C_{tec}], Pri_t \leq Pri_{lim} \\ Pri_{act} \sim U[Pri_t, C_{tec}], Pri_t > Pri_{lim} \end{cases} \quad (15)$$

消极型企业买方的碳配额购买报价 Pri_{pas} 取决于碳价下限 Pri_{lim} 和超排惩罚单价 $\beta \times Pri_t$, 服从均匀分布:

$$Pri_{pas} \sim U[Pri_{lim}, \beta \times Pri_t] \quad (16)$$

2.3 数据来源与处理

本文的煤电企业发电量与碳排放数据源于 End Coal 数据库, 选取 2022 年中国 2628 家煤电企业数据 (因数据缺失未包含港澳台地区和西藏自治区企业)。其中, 发电量在 300 MW 等级以上的有 790 家, 平均年排放 CO_2 283 万 t; 发电量在 300 MW 等级以下的有 1838 家, 平均年排放 CO_2 102 万 t。技术应用参数取值根据《国家重点节能低碳技术推广目录》《2022—2023 年火电厂建设报告》与研究文献^[31,32], 设定煤电企业单位技术减碳量为 0.5~1.0 t, 单位技术减碳成本为 200~400 元/t。碳履约的参数设置参照中国各地碳市场现行管理办法和实践经验, 超排企业的处罚金额为平均碳价的 1~5 倍, 故将超排惩罚率设定为 3。碳配额年下降额的设定依据《全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案 (发电行业)》, 未来中国分配的碳配额基准值按照

“适度从紧”原则, 每年保持 4~5 g/kWh 的降幅, 故将设定为 4.5 g/kWh。碳交易市场的参数设置取自中国 2022 年全国和地方碳市场的碳价情况。其中, 全国碳市场平均碳价为 59 元/t; 地方试点碳市场中, 北京碳市场碳价处于全国领先水平, 成交均价最高为 149 元/t; 上海、湖北、重庆碳价在 40 元/t 左右波动; 福建、天津碳市场活跃度不足且成交量低, 最低碳价均低于 30 元/t。同时参照宋亚植等^[33]的研究, 设定碳价下限为 30 元/t, 初始碳价 59 元/t。

3 结果与分析

3.1 煤电行业技术减碳演化情况

根据图 6 的仿真结果, 碳市场发展前中期 (2022—2040 年), 煤电行业节能技术的投资成本先快速上涨, 投资持续 20 年后热度逐渐减缓, 最终在 2048 年稳定于 670 亿元左右。可分析为煤电企业积极响应国家能源发展战略, 于模拟前期 (2022—2030 年) 大量增加技术投资以实现煤电的低碳高效利用。随着节能技术的持续应用与效果提升, 煤电企业碳

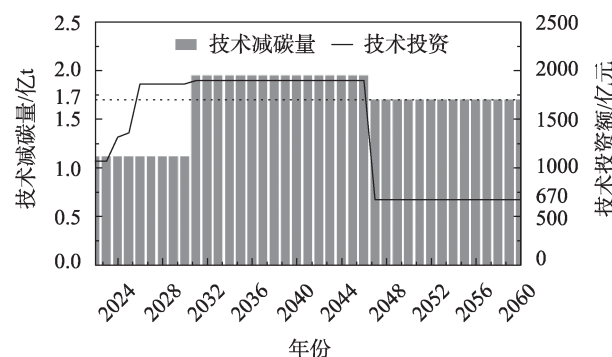


图6 模拟情景下2022—2060年煤电行业技术减碳演化情况

Figure 6 Evolution of carbon reduction technology in the coal power industry from 2022 to 2060 under simulated scenarios

减排压力逐渐减轻,清洁绿色的发电模式不再存在棘手的碳缺口问题,节能技术不再作为重点的减碳投资。技术减碳量趋势与技术投资相似,在不考虑技术进步的情况下,自2048年起,煤电企业的技术减碳量稳定在约1.7亿t的水平,说明碳市场的建设与运行能有效促使煤电企业应用节能技术应对减碳目标,助力煤电行业实现低碳绿色转型。

3.2 煤电企业碳履约演化情况

如图7a所展示,煤电企业的超标排放数量在前期(2022—2030年)呈现出明显的波动性。进入中后期阶段(2030—2050年),该数量保持稳定且无明显变化。至2056年,超标排放的企业数量持续减少,直至最终消失。这是由于碳市场运行前期,企业获得的免费碳配额较多,碳配额缺口相对较小。

同时碳价尚未涨高,超排罚款金额相对较低,煤电企业的违约成本较小。在第一个双碳目标碳达峰节点后,煤电企业持续进行技术减碳工作,虽然仍存在超排现象,但每个企业的超排量不断降低,故超排企业数量会保持一定时间的平稳。随着后期碳价的持续升高,超排罚款金额增加造成违约成本大幅提高,煤电企业继续应用节能技术完成减碳工作,所有企业均实现碳履约。图7b呈现了随着碳市场的不断建设,煤电行业的超排量呈现下降趋势,由期初2022年的160亿t降到期末2060年的97亿t。上述现象说明在碳交易机制约束下,煤电企业技术减碳效果不断加强,最终煤电行业可实现100%的碳履约,碳排放量也得到了有效降低,大力推动了国家双碳战略目标的顺利实现。

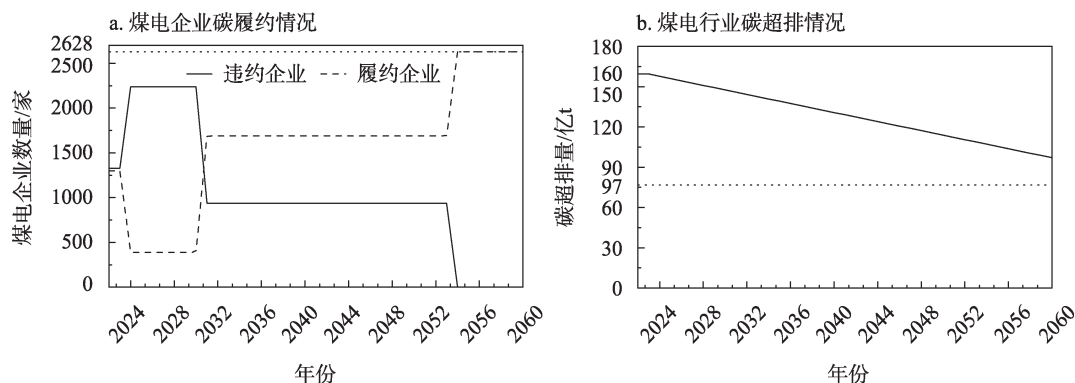


图7 模拟情景下2022—2060年煤电企业碳履约演化情况

Figure 7 Evolution of carbon performance in the coal power enterprises from 2022 to 2060 under simulated scenarios

3.3 煤电企业减碳倾向演化情况

图8呈现了2022年碳市场初始运行,积极型企业与消极型企业在数量上的均衡态势,随着时间推进至2030年,消极型企业的减碳倾向逐渐完全转变为积极型,并在之后保持这一稳定状态。可分析为在2030年碳达峰目标实现之前,煤电企业有试探和观望心理,自身减碳倾向并未出现很大程度的调整,但随着碳达峰目标的接近,外部社会环境带来的压力增加,主动减碳企业数量不断增加,最终所有煤电企业均选择应用节能技术的积极减碳策略。说明碳交易机制的实施能提高煤电企业技术减碳倾向,促进煤电企业优先选用节能技术来实现煤电的清洁利用和开展碳资产管理工作,提高宏观碳市

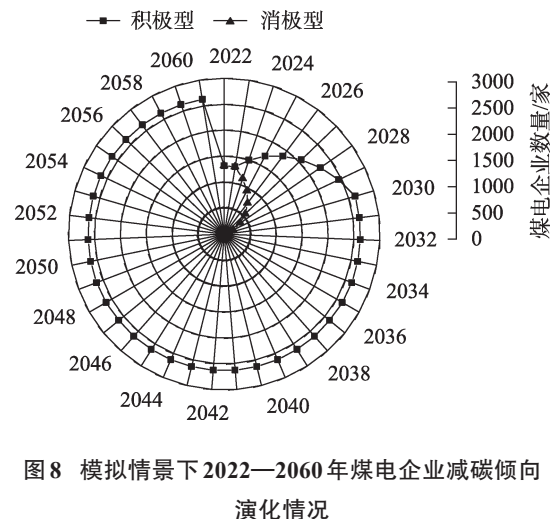


图8 模拟情景下2022—2060年煤电企业减碳倾向演化情况

Figure 8 Evolution of carbon reduction tendency in coal power enterprises from 2022 to 2060 under simulated scenarios

2024年6月

场交易活跃度,其结果与碳市场运转降低碳排放的建设初衷不谋而合。

3.4 碳市场碳价演化情况

从图9中可看出模拟期内碳价持续稳定走高,2030年碳价突破1533元/t,2060年达到2230元/t。反映出了随着时间的推移,煤电企业获得的免费碳配额供给量逐渐减少,碳履约压力推动碳价不断上涨。注意到碳价于2027—2029年涨速最快,这是由于双碳目标的第一个时间节点碳达峰2030年将至,中国首次向国际社会展示的碳减排承诺成效,受到了政府及企业的高度关注,但紧迫的时间导致部分企业减碳观念尚未转变或节能改造不充分,仅可通过购买碳配额以完成碳履约,旺盛的碳配额需求刺激碳价阶段性迅速上涨。而在碳中和目标2060年时,所有煤电企业均已实现节能技术应用,碳配额供需关系趋于平衡,故不再会出现大幅度的碳价变化。同时,由碳价的走势可看出,未来煤电行业碳市场的发展状态非常平稳,呈现类似指数增长的趋势,符合碳配额通货紧缩的特性。

3.5 碳市场碳配额交易量演化情况

如图10所示,碳配额交易开市即活跃,碳配额供需数量基本保持均衡状态。在碳市场的初期运营阶段(2022—2030年),碳配额交易呈现出波动性并随之下降。然而,进入中期至后期阶段(2030—2060年),交易量持续上升,最终在2060年达到约87亿t的峰值。碳配额购买量变化前期与总体交易量变化相似,但中后期购买量持续下降。碳配额出售量于模拟初期增加,随后迅速下降,之后直至期

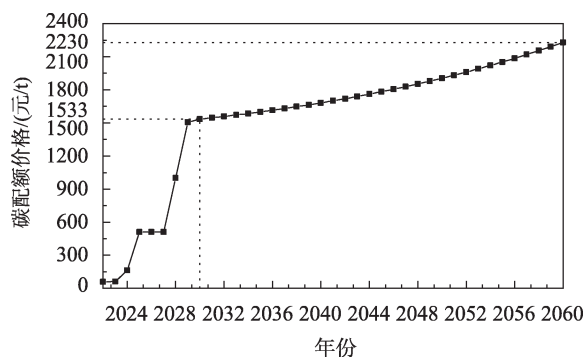


图9 模拟情景下2022—2060年碳市场配额价格演化情况

Figure 9 Evolution of carbon market quota prices from 2022 to 2060 under simulated scenarios

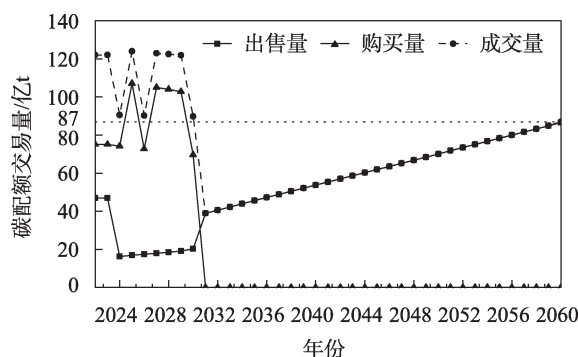


图10 模拟情景下2022—2060年碳市场碳配额交易量演化情况

Figure 10 Evolution of carbon market carbon quota trading volume from 2022 to 2060 under simulated scenarios

末出售量逐渐增加。这是由于碳交易机制实施初期,大部分煤电企业尚未全面推行节能技术进行减碳,碳配额购买量远大于出售量。随着节能技术的逐步应用与减碳意识的持续提升,整个煤电行业选择积极减碳策略,煤电的高效利用形成了富余碳配额,使碳配额出售量超过购买量并逐渐拉大差距,推动碳配额交易量持续上涨。

4 讨论

4.1 多主体煤电企业碳交易模型仿真的不确定性

多主体煤电企业碳交易模型在数据选取、参数设置和模型结构等方面存在差异性,造成了模拟情景下煤电企业技术减碳行为和碳市场运行状态的不确定性。技术减碳演化情况方面,Li等^[12]的研究与本文结果一致,即煤电企业以技术导向为转型路径可在提升发电效率的同时减少燃煤造成的环境污染;但其预测中国煤电行业全面应用节能技术、实现低碳转型的时间为2050年,本文预测时间为2030年,差异可能在于本模型引入机器学习进行设计,企业每期的减碳倾向得以动态调整。此外,部分研究中企业发电量与碳排放量的取值是固定范围内的正态分布随机数^[34]或按照企业所在区域进行聚类划分并固定取值^[35],弱化了企业规模异质性,故最后煤电行业的减碳总量存在较大差异。碳市场演化情况方面,本模型的预测碳价与Qi等^[36]的研究和PAL(Predict Ability Ltd)预测机构对中国碳市场未来的碳价预测数值区间和演化趋势较为一致,一定程度上验证了本模型的准确性。碳交易量预测

上,本文与刘楠峰等^[9]的研究结果均表明技术减碳可激发碳市场的活跃度,碳交易演化趋势相似,但本文的预测结果大于其预测结果,差异原因主要在于模拟选取的碳配额发放和碳违约惩罚等政策相关数据的取值不同。王育宝等^[37]的研究对可再生能源参与的碳市场交易进行了预测,观察到的碳配额成交量呈现出“倒N型”的变化趋势,与本文发现相似。然而,该研究的每期成交量均大于本文预测结果。这一差异可能源于由可再生能源转化而来的低碳绿电逐步替代传统火电的现象。随着煤电企业面临的市场压力增大,其发电量在短期内逐渐减少,导致碳排放量相应下降。绿电的增加使得碳配额供给更为充足,从而碳价维持在较低水平。在这种情况下,多数煤电企业通过购买碳配额即可满足碳履约要求,进而推动了碳配额成交量的增加。

精准预测煤电行业的碳排放量与技术减碳情况、碳市场的碳价与交易量可为煤电企业低碳生产决策和政府碳交易机制设计提供更有针对性的模型支持,搭建科学详实的仿真模型仍需要进一步深化与完善。模型设计方面,模型构建虽考虑了节能技术成本与效果的因素,但未考虑技术进步与创新的情形。长期来看,节能技术的升级会带来投入成本降低和减碳效果的提升,影响着煤电企业的减碳策略选择,进而改变宏观碳市场的运行状态。数据选取方面,本文综合选取了全国和地方代表性碳市场数据,而地方碳市场参与度由于经济水平和产业结构等因素存在价格与交易量的差异,想要综合准确地预测煤电行业技术减碳情况与碳市场运行趋势仍存在一定的挑战。因此,多主体煤电企业碳交易模型的构建还需要更全面精准的设计,行为规则涵盖煤炭生产和物流等全生命周期环节,加入其他行业碳交易市场参与交互,建立数据驱动的碳交易信息平台,实现煤电企业技术减碳决策和碳交易行为的精细化和全流程管理。

4.2 煤电行业低碳转型路径

基于上文多主体煤电企业碳交易模型仿真分析,为推动中国煤电行业实现可持续发展提出如下发展路径:

(1)完善碳交易市场机制建设。目前,中国碳交易市场主体较为单一,政府部门可在发电行业基

础上,逐步扩大碳交易市场的行业覆盖范围。考虑不同煤电企业所在地区的产业结构和经济发展水平,合理调整免费碳配额和超排罚金。同时,借鉴金融行业的发展经验,建立数据驱动的碳交易信息平台,促进碳交易各相关方的对接与合作,充分发挥碳交易机制的减碳效应。

(2)强化碳资产管理。双碳背景下,碳配额已成为重要的金融资产。煤电企业应成立专门的碳交易部门,通过对企业年度发电计划、技术减碳投资计划、碳市场碳价与配额供需动态等数据资料进行分析,为企业制定低成本减碳决策提供支持。同时,培养与引进碳资产相关人才,通过专业化的管理对冲市场交易风险,提高碳资产管理效率,更好地提高碳交易机制带来的经济效应。

(3)健全减碳激励支持体系。政府部门可为煤电企业的绿色技术进步、生产设备改造等减碳措施予以信贷支持和资金补贴等经济手段,减轻煤电企业减碳和碳交易的风险担忧和投资压力,并通过宣传与培训加强煤电企业的可持续发展减碳倾向,提高积极减碳意愿并参与碳交易。

(4)优化碳配额定价机制。政府部门应重点参考边际技术减碳成本,合理制定碳配额定价,确保市场碳价高于社会平均碳减碳成本,充分发挥出碳交易机制的收益激励作用。同时,结合地区实际情况,设置碳价下限,使碳价稳定在有效区间内,保证碳市场平稳有序运行。

5 结论

煤电行业的减碳发展是中国实现绿色低碳经济的重要挑战之一,厘清煤电企业内在技术减碳行为与碳市场外在环境变化的交互影响和演化规律是明确未来煤电行业发展方向的重要基础。本文使用了中国煤电企业与碳市场数据,利用NetLogo平台对碳交易制度下煤电企业的技术减碳和碳交易决策行为进行模拟,从煤电企业的节能技术投资与减碳量、超额排放量和减碳倾向演化趋势,碳市场碳价和碳配额交易量的角度进行了仿真与分析,研究发现:

(1)碳交易机制的实施可有效推动煤电企业进行技术减碳,实现环境和经济的绩效双赢,预计影响效果于2032年起愈发显著。碳市场配额供给不

2024年6月

断紧缩,促使煤电企业应用节能技术进行减碳工作,有效降低整个煤电行业的碳排放量。同时,碳交易机制为煤电企业碳管理提供了额外的盈利契机,积极型企业依靠技术减碳出售富余碳配额获得经济收益,技术减碳倾向也随之得到加强。

(2)煤电企业减碳倾向受碳交易推行程度影响。2030年碳达峰目标实现之前,煤电企业受到履约义务和惩罚措施的约束,存在观望心态,未如预期般积极应用技术进行减碳工作,参与碳交易主要是为了完成碳履约。随着第一个双碳目标2030年碳达峰的结束和减碳理念的不断深入,消极型企业开始逐渐转化为积极型企业。2060年碳中和目标前,中国煤电行业普遍应用节能技术进行减碳。

(3)合理的碳交易价格将有效引导企业进行技术投资,碳价越高越能刺激煤电企业减碳的积极性和碳市场的活跃度,提升碳配额交易量,增强碳市场的碳减排效果。此外,碳价在各个阶段涨幅不同,自2022年碳市场初始运行起至2030年,碳价涨幅最大,在2032—2060年的中后期阶段平稳上升。

参考文献(References):

- [1] Forster P M, Smith C J, Walsh T, et al. Indicators of global climate change 2022: Annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence[J]. *Earth System Science Data*, 2023, 15(6): 2295–2327.
- [2] Cai W G, Ye P Y. Does carbon emission trading improve low-carbon technical efficiency, Evidence from China[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 29: 46–56.
- [3] Wang Q, Yang X. New insight into aggressive intended nationally determined contributions in China, What lessons China should learn from Germany to reduce production-based carbon emission[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123522.
- [4] Liu Z, Deng Z, He G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(2): 141–155.
- [5] 国家能源局. 2022年全国电力工业统计数据[DB/OL]. (2023–01–18) [2023–10–20]. https://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c_1310691509.htm. [National Energy Administration. Statistical Data of the National Power Industry in 2022[DB/OL]. (2023–01–18) [2023–10–20]. https://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c_1310691509.htm.]
- [6] Zhi Z, Ming Z, Bo Y, et al. Multipath retrofit planning approach for coal-fired power plants in low-carbon power system transitions, Shanxi Province case in China[J]. *Energy*, 2023, DOI: 10.1016/j.energy.2023.127502.
- [7] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. *经济研究*, 2022, 57(1): 56–71. [Lin B Q. China's high-quality economic growth in the process of carbon neutrality[J]. *Economic Research Journal*, 2022, 57(1): 56–71.]
- [8] Yu H, Peng F, Yuan T, et al. The effect of low-carbon pilot policy on low-carbon technological innovation in China: Reexamining the porter hypothesis using difference-in-difference-in-differences strategy[J]. *Journal of Innovation & Knowledge*, 2023, DOI: 10.1016/j.jik.2023.100392.
- [9] 徐顺智, 赵瑞彤, 王孝全, 等. 燃煤发电行业低碳化发展路径分析[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(12): 83–94. [Xu S Z, Zhao R T, Wang X Q, et al. Analysis on low-carbon development path of coal-fired power generation industry[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(12): 83–94.]
- [10] Du L L, Zhao H J, Tang H Y, et al. Analysis of the synergistic effects of air pollutant emission reduction and carbon emissions at coal-fired power plants in China[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2021, DOI: 10.1002/ep.13630.
- [11] 刘楠峰, 范莉莉, 李树良, 等. 碳交易制度对企业碳减排绩效影响[J]. *系统工程*, 2022, 40(3): 13–23. [Liu N F, Fan L L, Li S L, et al. The influence of the carbon trading system on the enterprises' carbon emission reduction performance[J]. *Systems Engineering*, 2022, 40(3): 13–23.]
- [12] Zhao Y, Cui Z, Wu L, et al. The green behavioral effect of clean coal technology on China's power generation industry[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 675: 286–294.
- [13] Li R, Tang B J, Shen M, et al. Low-carbon development pathways for provincial-level thermal power plants in China by mid-century [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118309.
- [14] Amirkhani A, Barshooi A H. Consensus in multi-agent systems: A review[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2022, 55(5): 3897–3935.
- [15] Chen Y Y, Li B Y, Zhang G Q, et al. Quantity and collection decisions of the remanufacturing enterprise under both the take-back and carbon emission capacity regulations[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, DOI: 10.1016/j.tre.2020.102032.
- [16] 王红春, 高吉彤, 郭循帆. 碳交易机制下双渠道供应链定价决策研究[J]. *价格理论与实践*, 2022, (7): 109–112. [Wang H C, Gao J T, Guo X F. Research on pricing decision in dual-channel supply chain under carbon trading mechanism[J]. *Price: Theory & Practice*, 2022, (7): 109–112.]
- [17] Yu S M, Fan Y, Zhu L, et al. Modeling the emission trading scheme

- from an agent-based perspective: System dynamics emerging from firms' coordination among abatement options[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 286(3): 1113–1128.
- [18] Fang C H, Ma T J. Technology adoption with carbon emission trading mechanism: Modeling with heterogeneous agents and uncertain carbon price[J]. *Annals of Operations Research*, 2021, 300: 577–600.
- [19] 张晗, 孟佑贤. 激励约束视角下中国碳市场的碳减排效应[J]. *资源科学*, 2022, 44(9): 1759–1771. [Zhang H, Meng J X. Carbon emission abatement effect of China's carbon market from the perspective of incentives and constraints[J]. *Resources Science*, 2022, 44(9): 1759–1771.]
- [20] 李博阳, 罗光锐, 邢冰冰, 等. 绿色信贷对可再生能源发展的影响: 理论剖析与实证解读[J]. *资源科学*, 2023, 45(4): 800–811. [Li B Y, Luo G R, Xing B B, et al. The impact of green credit on the development of renewable energy: Theoretical analysis and empirical interpretation[J]. *Resources Science*, 2023, 45(4): 800–811.]
- [21] 刘桂东, 李银珍, 曾建中. “双碳”目标下供应链低碳转型与效率提升研究[J]. *南方金融*, 2022, (10): 22–33. [Liu G D, Li Y Z, Zeng J Z. Low carbon transformation and efficiency improvement of supply chain under the goal of “Double Carbon”[J]. *South China Finance*, 2022, (10): 22–33.]
- [22] Friedlingstein P, O'sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2023[J]. *Earth System Science Data*, 2023, 15(12): 5301–5369.
- [23] 陈晓红, 王钰, 李喜华. 环境规制下区域间企业绿色技术转型策略演化稳定性研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(7): 1732–1749. [Chen X H, Wang Y, Li X H. Research on green technology transformation strategy of inter-regional enterprises under environmental regulation based on an evolutionary game theory[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2021, 41(7): 1732–1749.]
- [24] 刘强, 田川, 郑晓奇, 等. 中国电力行业碳减排相关政策评价[J]. *资源科学*, 2017, 39(12): 2368–2376. [Liu Q, Tian C, Zheng X Q, et al. Evaluation of CO₂ emission reduction policies in China's power sector[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2368–2376.]
- [25] Zhou Y, Fan J, Zhao D T, et al. The impact of carbon trading on regulated agents in China[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21: 377–390.
- [26] Slater H, 王庶, 黎瑞鑫. 2022年中国碳价报告[R]. 北京: ICF, 2023. [Slater H, Wang S, Li R X. China Carbon Price Report 2022 [R]. Beijing: ICF, 2023.]
- [27] 魏一鸣. 碳金融与碳市场: 方法与实证[M]. 北京: 科学出版社, 2010. [Wei Y M. Carbon Finance and Carbon Market: Models and Empirical Analysis[M]. Beijing: Science Publishers Ltd, 2010.]
- [28] Chandrakala K R M V, Kiran P. Multi-agent based modeling and learning approach for intelligent day-ahead bidding strategy in wholesale electricity market[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121014.
- [29] Jia D Y, Guo H, Song Z, et al. Local and global stimuli in reinforcement learning[J]. *New Journal of Physics*, 2021, DOI: 10.1088/1367-2630/ac170a.
- [30] Gode D K, Sunder S. Allocative efficiency of markets with zero-intelligence traders: Market as a partial substitute for individual rationality[J]. *Journal of Political Economy*, 1993, 101(1): 119–137.
- [31] Jie D F, Xu X Y, Guo F. The future of coal supply in China based on non-fossil energy development and carbon price strategies[J]. *Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2020.119644.
- [32] Nakaishi T. Developing effective CO₂ and SO₂ mitigation strategy based on marginal abatement costs of coal-fired power plants in China[J]. *Applied Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116978.
- [33] 宋亚植, 刘天森, 梁大鹏, 等. 碳市场合理初始价格区间测算[J]. *资源科学*, 2019, 41(8): 1438–1449. [Song Y Z, Liu T S, Liang D P, et al. Reasonable initial price interval calculation of carbon market[J]. *Resources Science*, 2019, 41(8): 1438–1449.]
- [34] Wang B, Ji F, Zheng J, et al. Carbon emission reduction of coal-fired power supply chain enterprises under the revenue sharing contract: Perspective of coordination game[J]. *Energy Economics*, 2021, DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105467.
- [35] Eguchi S. CO₂ reduction potential from efficiency improvements in China's coal-fired thermal power generation: A combined approach of metafrontier DEA and LMDI[J]. *Energies*, 2022, 15(7): 2430.
- [36] Qi S Z, Cheng S H, Tan X J, et al. Predicting China's carbon price based on a multi-scale integrated model[J]. *Applied Energy*, 2022, DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119784.

The impact of carbon trading mechanism and technology application on carbon emission reduction in China's coal-fired power industry: Multi-agent simulation based on reinforcement learning

LIAN Xu¹, PEI Tongxin¹, WANG Wensheng¹, TANG Yansheng²

(1. School of Management, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Institute of Telecommunications Science and Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: [Objective] The “3060” dual carbon target introduces new requirements for the low-carbon development of China's coal-fired power industry. With decreasing carbon quota limits, the focus on low-carbon transformation in this industry has increased among industry and academia. The carbon trading mechanism directs coal-fired power enterprises to reduce emissions and innovate through policy constraints. By enhancing energy efficiency and reducing emissions, it is vital in driving coal-fired power enterprises toward a low-carbon model. However, the micro-level driving mechanism of this transformation process remains underexplored [Methods] This study uses a sample of 2628 coal-fired power enterprises in China from 2022, employing reinforcement learning theory and multi-agent models. Through the Netlogo platform, it simulates and analyzes the interactive and collaborative effects between the carbon market, government, and coal-fired power enterprises with varying carbon reduction tendencies under the carbon trading mechanism. [Results] The research reveals that: (1) The carbon trading mechanism effectively promotes technological carbon reduction in coal-fired power enterprises, achieving both environmental and economic benefits, with significant impacts expected from 2032 onwards. (2) The carbon reduction tendency of these enterprises is influenced by the degree of carbon trading implementation. Before reaching the carbon peak target by 2030, these enterprises did not actively employ carbon reduction technologies as anticipated. (3) A reasonable carbon trading price effectively encourages investment in technology application. Higher carbon prices stimulate greater carbon reduction efforts and increase market activity. The carbon price growth is most significant from 2022 to 2030 and continues to rise steadily from 2032 to 2060. [Conclusion] China's coal-fired power industry faces challenges in achieving low-carbon transformation. Accelerating the construction of carbon trading market mechanisms, strengthening carbon asset management, improving carbon reduction incentives, and optimizing carbon quota pricing mechanisms are essential for promoting technological emission reduction and the high-quality development of China's coal-fired power industry.

Key words: carbon emission reduction; carbon trading mechanism; energy saving technology; multi-intelligence modelling; low carbon policy instruments; coal-fired power industry; China