

“碳-电”市场间价格传导机制与动态演化研究

汪月新¹, 潘张榕¹, 郭军红¹, 周宇慈¹, 张晓萱², 薛松², 李薇¹

(1. 华北电力大学环境科学与工程学院, 北京 102206; 2. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:碳市场交易是高排放火电企业实现碳履约和低碳发展的重要手段, 研究碳价和电价在两个市场的相互传导和演化机制对企业参与“碳-电”市场交易策略的制定具有重要意义。通过研究火电企业参与碳排放权交易和电力市场交易过程, 分析了两个市场间各因素之间的因果关系, 构建了火电企业参与“碳-电”市场交易的系统动力学仿真模型。在此基础上, 研究了碳价和电价在两个市场间的传导和演化机制, 分析了电力需求和政府免费配额政策对电价和碳价的影响。结果表明: 两个市场中, 碳价和电价总体呈现“低保持—快速涨—高位平”的演化过程, 当电力需求较高时, “碳-电”耦合市场的引入有利于引导火电企业投入减排技术或向低碳能源发电转型; 通过政策提高免费配额的缺口比例, 可以有效发挥碳价在引导火电企业低碳减排的信号作用。

关键词:“碳-电”市场; 价格传导; 系统动力学; 碳价; 电价

中图分类号:F 062.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2025)05-0103-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250514

Research on Price Transmission Mechanism and Dynamic Evolution between Carbon and Electricity Markets

WANG Yuexin¹, PAN Zhangrong¹, GUO Junhong¹, ZHOU Yuci¹,
ZHANG Xiaoxuan², XUE Song², LI Wei¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Carbon market trading is an important means for high-emission thermal power enterprises to achieve carbon compliance and low-carbon development, and it is of great significance to study the mutual transmission and evolution mechanism of carbon price and electricity price in the two markets for enterprises to participate in the formulation of trading strategies in carbon and electricity markets. The causal relationship of the factors between the two markets is analyzed by studying the participation of thermal power enterprises in carbon emission trading and electricity market trading, and a system dynamics simulation model is constructed for thermal power enterprises to participate in carbon and electricity market trading. On this basis, the transmission and evolution mechanism of carbon price and electricity price between the two markets are studied, and the impact of electricity demand and government free quota policy on electricity price and carbon price is analyzed. The results show that carbon price and electricity price in the two markets generally show an evolution process of low maintenance-rapid increase-high level, and when the power demand is high, the introduction of carbon and electricity coupling market is conducive to guiding thermal power enterprises to invest in emission reduction technologies or transform to low-carbon energy power generation. Increasing the proportion of free quota gaps through policies can effectively play the role of carbon prices in guiding thermal power enterprises to reduce carbon emissions.

Key words: carbon and electricity market; price transmission; system dynamics; carbon price; electricity price

0 引言

目前,中国对低碳减排提出了“双碳”目标,即在 2030 年达到碳达峰,2060 年实现碳中和。实现这一目标的关键在于促进能源结构低碳转型,而能源转型的关键在于电力市场变革。通过建设碳市场耦合电力市场构建新型电力系统,对于实现低碳减排具有关键作用:一方面,通过有效的碳成本传导机制引导电力供求关系,即碳交易产生的发电企业减排成本和电力交易带来的收益将共同影响发电企业的发电决策;另一方面,通过价格机制将碳排放成本间接传导至电价,并通过电力交易将碳减排成本分摊至用户侧,引导电力消费用户参与到碳减排任务中^[1]。

国内外针对碳电价格传导机制问题,已开展了相应研究。文献[2-3]指出,政府通过调整碳配额供给与刺激市场配额需求这两种政策途径,引导碳市场交易,实现碳价传导。文献[4]通过将德国电力市场的碳排放成本传导至小时电价,实现了短期成本转嫁,并对不同负荷周期的成本传导结果进行了估计。文献[5]指出,碳排放权市场和电力市场的交易行为虽独立运行,但又相互关联,需将中国的碳排放总量限制政策与碳价、电价有效地联系起来,使两个市场形成有效衔接。文献[6]针对国内碳交易试点进行了研究,指出碳价格形成反映市场供需关系,政府通过直接和间接的干预措施参与了碳定价过程。文献[7]以广东省为例,研究发现碳排放权市场和电力市场之间存在相互制约的关系,主要表现在碳排放成本增加会提高电力市场的交易电价,而电力市场通过将碳减排成本传导至电价,将碳减排压力分摊到下游用户端,缓解上游发电端的碳市场减排压力,但同时也抑制了碳交易的活跃度。在碳电市场交易模型构建方面,文献[8]以江苏省为例,通过构建市场多主体行为决策模型,指出当前全国碳市场的交易活跃度不足,碳价和碳配额分配方式并未对电力企业的碳排放行为形成有效的约束,造成碳价和电价之间并未形成较深的联系。文献[9]基于火电机组出力特性模型与成本模型,计入碳电市场价格建立了机组竞价模型,进一步提出了以火电机组效益最大化为目标的出力优化模型,以及一种碳电市场环境下水电厂市场竞价策略及交易技术。

在构建碳电市场交易系统模型过程中,系统动力学模型以反馈控制理论为基础,能深入理解复杂系统的行为和变化,通过动态仿真可以为决策者提供科学依据,从而制定更有效的政策,因而被广泛应用^[10]。其中,Vensim 系统动力学工具是一个可观念化、文件化、模拟、分析与最佳化动态系统模型的图形接口软件,可建立包括因果循环图、存量流量图等动态模型,便于直观了解变量间的因果关系与回路^[11]。

由于中国碳市场仍然处于起步阶段,碳电两个市场的耦合机理尚不清晰,市场主体在不同市场间的交易行为对价格传导的影响机制研究也较少。因此,下面以 Vensim 软件为市场仿真工具,以发电企业为市场主体,构建碳排放权交易市场和电力市场耦合模型,研究碳价和电价在两个市场中的传导机制,并在不同政策情景下对碳电市场和用户交易行为进行模拟仿真,以期参与碳电市场交易的主体提供一定的决策支持。

1 碳电市场耦合模型构建

1.1 模型主体分类

目前,纳入全国碳市场的行业主要为火力发电行业^[12],因此,所研究的市场交易主体也主要是火力发电企业。通过厘清发电企业碳电市场交易的因果联系,构建碳电市场耦合模型,来研究发电企业碳电市场交易机制和价格传导。

1.2 模型边界设定

1)在碳排放权交易市场中,碳排放权配额根据基准线法,按照月发电量和碳排放量变化进行分配和计算,假设碳市场只有碳排放权配额这一种交易标的,中国核证自愿减排量(China certified emission reduction,CCER)对于碳排放配额清缴的抵消暂不纳入碳电市场耦合模型之中。

2)碳电市场耦合模型仅以发电端火电企业为市场主体,碳市场中仅考虑火电企业直接排放产生的碳配额需求,无间接碳排放量。

3)碳电市场耦合模型中:火电企业发电量为电力市场交易电量,不考虑发电企业自身耗电;电力需求为火电电力需求,不考虑绿电参与电力市场;电价变化仅由供需关系决定。

4)基于目前能源结构低碳转型的目标,假定火电行业不再新增装机容量。

1.3 模型搭建

碳市场是典型的市场激励性碳减排、促进低碳技术创新、应对气候变化的重要政策工具。碳排放权交易市场中,各个参与主体根据分配的配额及自身的减排成果和减排成本,选择是否参与市场购买配额或投资减排技术。如果企业的排放量低于其配额,它可以将多余的配额出售;如果超出配额,则需购买额外的配额。通过供需关系形成碳配额的市场价格,鼓励企业在排放控制上采取更为有效的措施。对于减排成本较低的企业,出售多余的配额可以带来额外收益,实际碳排放量低于分配配额的一方可以把履约后剩余的配额卖给实际碳排放量高于分配配额的一方,双方在碳市场中进行交易,形成市场配额供需关系,共同决定碳价^[13]。使用系统动力学方法构建碳-电耦合市场之间的因果循环图,通过正反馈和负反馈机制,可以更全面地展示碳价格和电力价格之间的传导机制和动态演化过程。

碳价格和电力价格之间的传导机制和动态演化过程如图 1 所示,图中:“+”表示正反馈机制,即在增强一种系统行为时,会导致相关因素的增长或加速;“-”表示负反馈机制,主要目的是抑制系统行为保持平衡,具体表现为,当增强一种系统行为时,相应因素将得到抑制而减少^[11]。在碳市场因果循环中:

1) 火力发电企业在供应电能的同时会产生碳排放。当碳价升高时,高碳企业减排成本增加,将使买方利润空间水平降低,买方会减少发电量以降低自身碳排放量,进而使碳市场交易需求下降而导致碳价回降。

2) 低碳企业在满足自身配额需求后,低碳卖方企业可通过市场交易出售多余碳配额。当碳价升高时,卖方企业利润空间水平上升。为获取更多的利润,卖方企业倾向于增加发电。当发电量增加时,相应的碳排放量增加,卖方碳配额需优先满足自身碳履约目标。市场的总碳配额需求增加,会促使碳市场中的供需关系趋紧,碳价随之升高,形成碳市场反馈回路。

3) 在电力市场回路中,卖方和买方企业根据各自的利润水平和社会电力消费的需求,影响自身发电决策,从而改变火电供应量,使电力供需关系发生变化。当电力价格上升,发电企业利润空间水平上升,促进企业发电使电力供给上升。同时,电力价格上升,将使下游用户端成本增加,使购电需求下降进而电力价格下降,形成电力市场反馈回路。

4) 在碳市场和电力市场之间,当电力价格上升时,电力企业利润空间水平增加,将促使企业增加发电以获得更多利益,相应地导致碳配额需求增加使碳价上升。而当碳价升高时,碳排放成本增加,买方企业总体利润水平下降,而卖方利润水平增加,进而影响企业发电决策和电力市场供需关系,使电力价格发生变化。将碳减排成本传导至电价,可间接性地把碳减排压力分摊到下游用户端,并促进高碳企业低碳转型。

1.4 模型存量设置

系统动力学模型主要使用 3 种基本变量,即状态变量、速率变量、辅助变量。根据正反馈和负反馈机制,将碳市场和电力市场的不同变量连接,构建复杂的市场交互系统模型,并通过外生变量和常量输入,实现系统仿真。

1) 状态变量

$$V_{cp} = P_{c0} + E_c \quad (1)$$

式中: V_{cp} 为碳价格变化; P_{c0} 为碳初始价格; E_c 为碳价格超额需求。

$$I_{pc} = i_{pc0} + \frac{0.5d_{e0}r_e}{12t_{pc}} \cdot w_p \quad (2)$$

$$I_{sc} = i_{sc0} + \frac{0.5d_{e0}r_e}{12t_{sc}} \cdot w_s \quad (3)$$

式中: I_{pc} 为买家传统能源装机容量; d_{e0} 为电力初始需求; r_e 为电力需求增长率; w_p 为买家煤电厂商利润空间; t_{pc} 为买家传统能源装机年利用小时数; I_{sc} 为卖家传统能源装机; w_s 为卖家煤电厂商利润空间; t_{sc} 为卖家传统能源装机年利用小时数; i_{pc0} 为买家传统能源

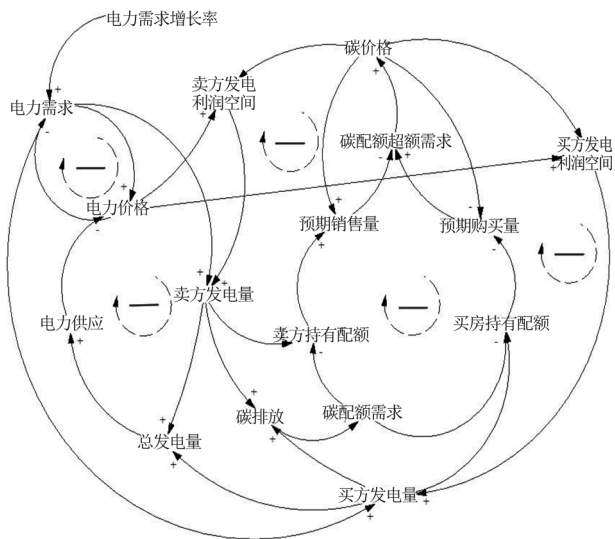


图 1 碳市场和电力市场因果循环

装机初始容量; i_{sc0} 为卖家传统能源装机初始容量。

$$V_{ep} = p_{e0} + E_e \quad (4)$$

式中: V_{ep} 为电力价格变化; p_{e0} 为电力初始价格; E_e 为电力超额需求。

2) 速率变量

$$E_c = \frac{Q_p^{wd} - Q_s^{wd}}{Q_s^{wd}} \quad (5)$$

式中: E_c 为碳配额超额需求; Q_p^{wd} 为期望购买量; Q_s^{wd} 为期望销售量。

$$E_e = \frac{P_e(D_e - S_e)}{50D_e} \quad (6)$$

式中: P_e 为电力价格; D_e 为电力需求; S_e 为电力供应。

3) 辅助变量

$$\begin{cases} Q_p^{wd} = 0, Q_p > D_c \\ Q_p^{wd} = \frac{40}{P_c(D_c - Q_p)}, Q_p \leq D_c \end{cases} \quad (7)$$

$$Q_s^{wd} = \frac{Q_s P_c}{P_{e0}} \quad (8)$$

式中: Q_p^{wd} 为预期购买量; Q_s^{wd} 为期望销售量; Q_p 为买家碳配额持有量; D_c 为买家碳配额需求; Q_s 为卖家碳配额持有量; P_c 为碳价格。

$$w_p = w_s = \frac{P_{e0} P_e}{P_c P_{e0}} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_c = 300, \\ \text{SMOOTH3I}(\text{碳价格变化}, 3, 40) > 300 \\ P_c = \text{SMOOTH3I}(\text{碳价格变化}, 3, 40), \\ 10 < \text{SMOOTH3I}(\text{碳价格变化}, 3, 40) < 300 \\ P_c = 10, \\ \text{SMOOTH3I}(\text{碳价格变化}, 3, 40) < 10 \end{cases} \quad (10)$$

式中,SMOOTH3I()为三阶指数平滑函数。

$$Q_{pc} = \frac{I_{pc} t_{pc}}{12} \quad (11)$$

$$Q_{sc} = \frac{I_{sc} t_{sc}}{12} \quad (12)$$

式中, Q_{pc} 和 Q_{sc} 分别为买家和卖家传统能源电量。

$$\begin{cases} P_e = 0.75, \\ \text{SMOOTH3I}(\text{电力价格变化}, 5, 0.38) > 0.75 \\ P_e = \text{SMOOTH3I}(\text{电力价格变化}, 5, 0.38), \\ 0.33 < \text{SMOOTH3I}(\text{电力价格变化}, 5, 0.38) < 0.75 \\ P_e = 0.33, \\ \text{SMOOTH3I}(\text{电力价格变化}, 5, 0.38) < 0.33 \end{cases} \quad (13)$$

$$S_e = (Q_{pc} + Q_{sc})(1 - l) \quad (14)$$

式中, l 为网络损耗。

发电端碳排放权和电力市场关联模型如图 2 所示。

碳电市场耦合模型以月为时间尺度,模拟时长为 120 个月,主要参数和数据来源如下:

1) 碳排放权交易市场

参考中国碳排放交易网公布的数据,以 8 个碳交易试点的平均碳交易价格 40 元/t 作为碳初始价格。某区域 2022 年火力发电量 159.14 TWh,按照二氧化碳排放因子为 0.78 kg/kWh^[7]计算,可得出其年碳排放总量为 124 Mt,卖方所持有的月初初始配额为 0.1 t。由于碳电市场耦合模型是基于碳排放权交易制度实施之后进行仿真模拟,因此在模型初始运行时,买方煤电厂商持有的碳排放权量的初始值均设置为 0。该区域煤电设备年利用小时数为 5924 h/年。单位煤电产生的碳排放量为 0.78 kg/kWh。

2) 电力市场

根据煤电上网电价,设置电力价格的初始值为 0.38 元/kWh,电力价格下限为 0.33 元/kWh,电力价格上限为 0.75 元/kWh。煤电累计装机容量的初始值为区域 2021 年年底累计装机容量,为 90.98 GW,电力需求增长率赋值为 7%。碳电耦合市场电力需求的初始值只考虑煤电发电量,为 159.14 TWh。根据国家电网公司发布的相关报告选取网损为 6.8%。

2 结果分析

2.1 基准情景

基于构建的碳电市场耦合模型,在现有的碳电市场交易数据和政策(基准情景)下,对参与碳市场和电力市场的发电企业交易情况进行仿真模拟,结果如图 3 所示。

从图 3 中可见,碳价格和电力价格总体趋势都呈现“低保持—快速涨—高位平”3 个阶段。

碳电市场运行初期,碳市场中大多数企业碳配额可以满足自己的需求。因此,碳市场上总碳配额供应基本满足需求,碳交易行为并不活跃,基本维持在初始价格 40 元/t。此阶段,碳价对发电企业利润影响小,卖方和买方利润空间基本不受影响,发电量仅随着电力需求增加而增加。而发

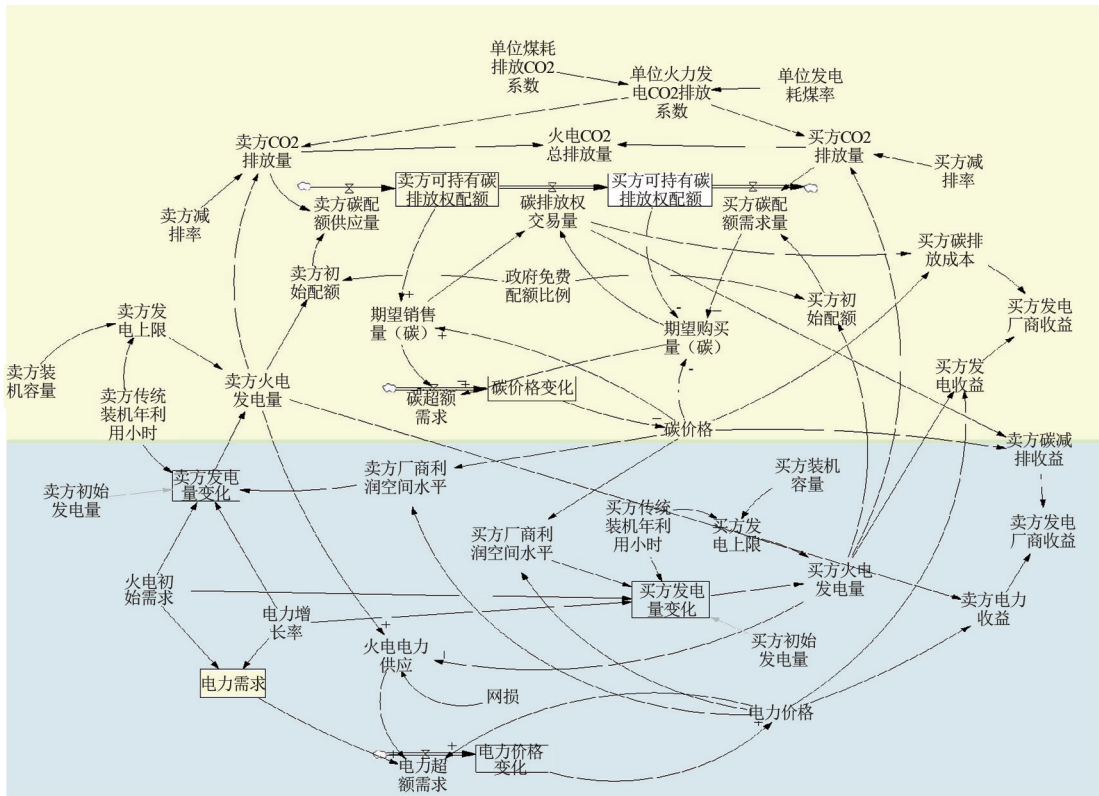


图 2 发电企业在碳排放权和电力市场交易存量流

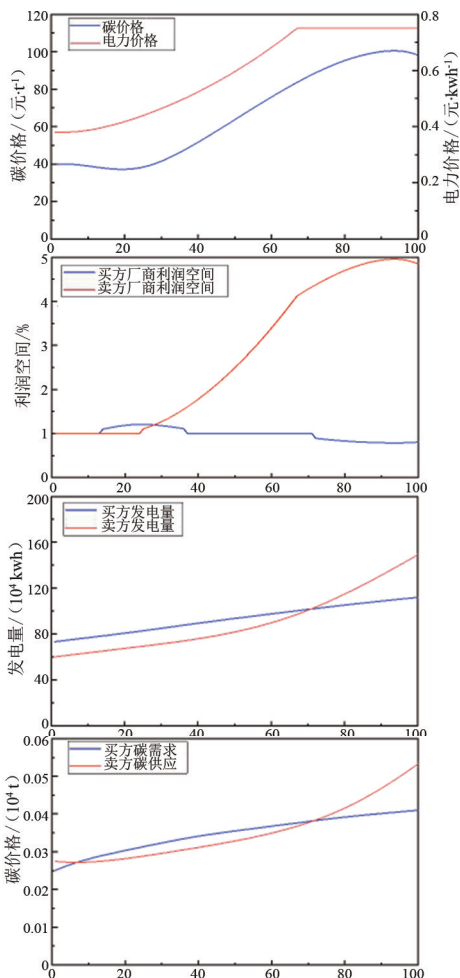


图 3 基准情景下发电企业在碳电市场交易模拟结果

电企业因利润水平较低,发电量缓慢增长。电力价格在“低保持”阶段由电力供需关系决定,此阶段电力供给基本可满足电力需求,电力价格上升缓慢,基本保持在 0.38 元/kWh;

“快速涨”阶段,初期发电企业因碳价和电价的变化,其利润空间水平不高,发电行为并不积极,主要受电力需求的影响。当发电总供给逐渐落后于用电需求,电力价格逐渐从 0.38 元/kWh 升高至 0.75 元/kWh,企业发电收入随之增长利润空间增加,发电量受电力需求和利润空间影响而增加。随着时间推移,发电量增加,碳市场配额需求增加,使得碳供应逐渐无法满足碳需求,碳价逐渐从 38 元/t 上涨到 102 元/t。在此阶段,碳价和电价上升,使可卖出多余配额的卖方发电企业获得更高收益,利润空间水平提高;而对碳配额无法满足自身排放需求的买方,碳交易成本与电力收益对其利润空间产生的影响基本持平。

“高位平”阶段,当碳价升高到一定值时,买方碳成本逐渐高于电价带来的收益,使利润空间压缩,发电量在电力需求和利润空间的影响下缓慢增长,碳需求也增长减缓;而卖方因利润空间增加,发电量增加,因自身减排效果好,可卖出的碳配额供应增加。当碳电市场趋于成熟时,碳供应逐渐满足碳需

求,碳价格增加速度减缓,并逐渐到达高点,这时碳价格基本维持在 100 元/t 左右。

在碳价和电价交互机制下,随着碳电市场的运行,卖方因自身减排技术较好,碳价和电价的升高有利于卖方发电企业的发展,而减排技术较差的买方发电企业则会受到碳排放成本的影响压缩发电空间,从而促进企业低碳转型。

2.2 电力需求情景

为了实现碳减排目标,因政策影响推动社会产业结构低碳转型,将影响到社会电力消费增长率^[14]。因此,通过调节电力需求增长率参数,如表 1 所示,模拟未来不同电力需求增长率对碳价格和电力价格变化的影响。

表 1 电力需求情景说明

情景	电力需求增长率/%
H(基准情景)	7
D1	9
D2	5
D3	3

注:基准情景中电力需求率数据来源于文献[6]。

如图 4 所示,和基准情景 H 的碳价格比较,情景 D2、D3 电力需求增长速度较低,发电企业根据未来电力需求预测,其发电量增长缓慢,相应的碳排放量也增长缓慢,因此对碳排放权的需求并不急切,碳供应大多能满足碳需求。这时碳价格下降并保持了较长的低价阶段。但因为碳价长时间走低,买方利润空间大幅增加,使发电量增长而碳需求增加,导致碳价上升。D2、D3 相比情景 H 碳价上升时间推移,在第 100 月时,D2 碳价为 84.4 元/t,较基准情景 H 下降 24.1 元/t,D3 碳价为 62.1 元/t。电力价格因为电力需求增长而上升,D2、D3 情景下,碳价和电价影响发电企业利润空间,对买方利润空间影响较大,发电量增加较快。相比基础情景 H,D2、D3 电力供需关系较为放松,但总体电力需求仍高于电力供应,使得电力价格上升速度较缓,电力需求每下降 2%,电价到达上限约束时间推后约 5 个月。

情景 D1 中,电力需求快速增长。为满足需求端电力需求,发电企业发电量增加,使碳价上升时间前移。但达到碳价格高点时,卖方因为利润增加,发电量增长较快,但买方利润空间压缩其发电量增长缓慢。此时碳市场供大于求,碳价格在维持一段时间高价后下降,D1 碳价达到顶点时与基准情景 H 相差 15 元/t。

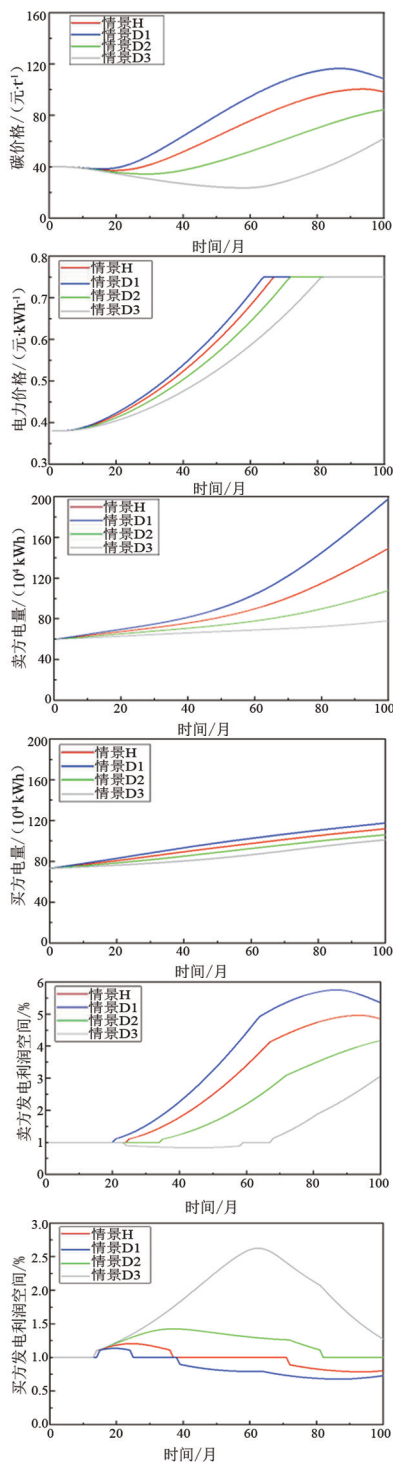


图 4 电力需求情景模拟结果

从电力需求情景结果中可以看出,需求率增加时,发电企业因为需求而增加发电,导致碳市场碳排放总量增长、碳配额需求增加,碳成本也随之增长,碳价格增长速度加快。通过碳排放权和电力交易市场的价格交互,碳价格和电力价格随着电力需求增长率的增加而上升的趋势更为明显,引起发电企业利润空间变化从而影响发电决策。从图 4 中发电企业利润空间和发电量的结果中可见:当电力需求增

长率较低时,发电企业发电供给可满足用户端电力消费,电力超额需求量少,相应的碳排放较少,对于碳配额需求也减少,逐渐达到碳减排目标,碳市场中交易活跃度下降。当电力需求增长率较高时,发电企业需要供给的电力增加使碳排放总量增长,碳市场配额需求也增长,此时买方发电企业的碳成本加大使其发展空间受到挤压;这鼓励了减排技术较好的卖方企业多发电,而买方发电企业只能通过提高减排技术投入或购买碳配额以减轻减排压力。

2.3 免费配额情景

碳价格形成过程中政府起到重要作用,且政府主要通过调整碳配额的供给与刺激市场配额需求两种途径实现碳价格的传导,以发挥碳市场促进碳减排、引导能源低碳发展的作用^[2]。根据电力配额试算方案,下面基于基准法在表 2 所示不同免费配额缺口下,模拟通过政策手段缩紧碳排放权配额发放的情景,分析对碳价格和电力价格变化的影响,结果如图 5 所示。

表 2 免费配额政策情景分析

情景	免费配额缺口/%
H(基准情景)	0(全部免费分配)
P1	3
P2	5
P3	10

由图 5 可见,在不同的免费配额缺口比例下,碳价格的总体趋势不变。随着免费配额缺口的增加,即碳配额拍卖比例提高,碳市场的碳配额收紧,使得碳配额供需结构发生变化,供给无法满足需求,导致碳排放价格将迅速上涨。电力价格在不同碳配额分配情景下的变化趋势差异并不显著,其原因是拍卖机制的引入直接影响了碳配额的供需关系,而对电力市场的影响是间接的,碳成本将部分地传递到电价上。随着免费配额缺口比例上升,电力价格将提前上涨达到上限。选取电力价格趋势达到上限时的 10 个月电价仿真数据,如表 3 所示,随着月份的增加,配额政策情景下的电力价格变化越大。以第 68 月模拟结果为基准,配额缺口比例每增加 1%,电价约增加 0.001 1 元/kWh,即 1.10 元/MWh;碳价变化曲线见图 5,配额缺口比例每增加 1%,碳价增加约 20 元/t。

从图 5 的买方发电量和利润空间曲线上还可以看出,通过政策调整碳市场配额供给的免费配额缺口增加,对于本身减排技术较差的买方碳减排压力增加,其发电利润空间受到挤压,只能通过从卖方手

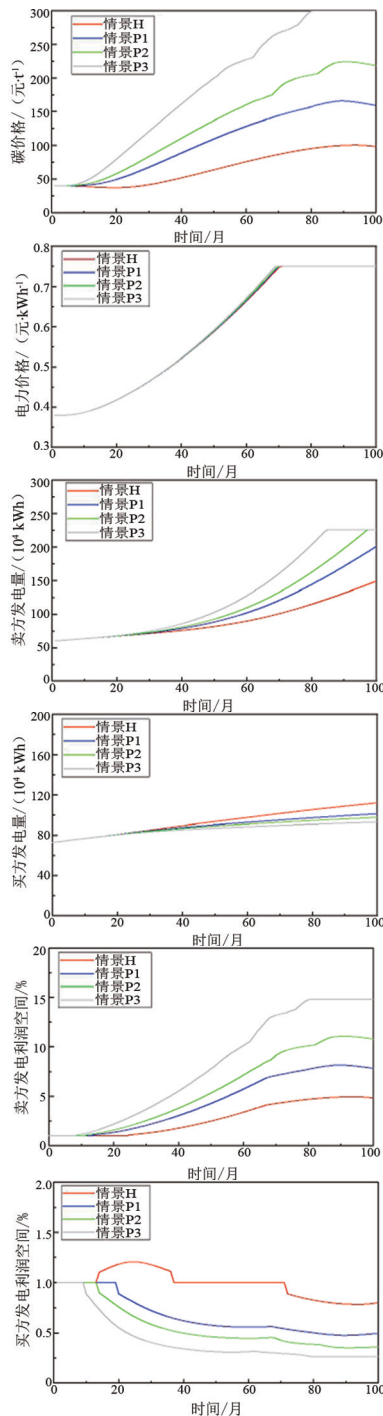


图 5 碳配额分配情景下的仿真模拟结果

表 3 免费配额情景下部分电价仿真数据 单位:元/kWh

月份	情景 H	情景 P1	情景 P2	情景 P3
62	0.679 737	0.681 67	0.683 890	0.687 980
63	0.687 946	0.689 978	0.692 304	0.696 672
64	0.696 242	0.698 376	0.700 807	0.705 462
65	0.704 626	0.706 862	0.709 401	0.714 350
66	0.713 097	0.715 438	0.718 086	0.723 335
67	0.721 657	0.724 103	0.726 861	0.732 418
68	0.730 303	0.732 857	0.735 727	0.741 598
69	0.739 038	0.741 700	0.744 684	0.750 000
70	0.747 861	0.750 000	0.750 000	0.750 000
71	0.750 000	0.750 000	0.750 000	0.750 000

中购买碳配额,或是减少火力发电以减轻自身碳减排责任。因此,通过调整免费配额缺口比例,鼓励发电企业发展减排技术和措施,促进电力行业低碳转型,以实现碳电市场引导碳减排作用。

3 结 论

为实现“双碳”目标,碳排放权交易制度是目前较为广泛的市场调节手段。上面通过对发电商参与碳电耦合市场的交易行为,研究碳排放权和电力市场交易机制及价格传导,探究碳电耦合市场对碳减排目标的作用。研究结果表明:

1)当电力需求增长率每下降 2%,电力价格因上涨速度减缓到达上限时间约推迟 5 个月;而碳价也因发电企业减少发电供给而对碳市场需求下降而降低约 20 元/t。此时,高碳发电企业因碳成本减少而利润增加,将增加发电;而低碳发电企业因获得收益降低,发电倾向下降。当电力需求处于较低水平时,高碳火电企业发电量逐渐高于低碳火电企业发电量,不利于推动火电企业低碳转型。

2)当免费配额缺口每增加 1%,会使电价约提升 1.10 元/MWh,碳价约上升 20 元/t。这时,减排技术较差的发电企业利润空间和发电量明显下降。实施配额拍卖制度有利于鼓励具有较好减排技术的发电企业发电和减排技术的投入,并使减排技术较差的发电企业积极进行减排技术投入。

所构建的碳电耦合市场,主要研究火电企业之间的碳交易行为,分析碳排放权和电力市场交易机制及价格传导,并基于未来电力结构改革和碳市场政策方面,探究碳电耦合市场对碳价格、电价的传导作用,分析企业生产和交易行为。未来随着碳市场的扩容,水泥、钢铁和电解铝等行业后续可考虑纳入到市场仿真模型中。此外,所建模型以月为时间步长,更偏向从宏观层面研究碳电市场的中长期变化趋势,但目前碳市场主要通过影响发电主体成本实现对电力系统的传导,碳市场和电力市场之间存在时间尺度和政策目标不统一的问题,未来可进一步从日尺度、两个市场交易政策协同等层面深入研究碳电价格的传导机制。

参考文献

[1] 李雪慧,冯永晟,管世杰. 碳成本传导的理论含义和

研究范式[J]. 学习与探索, 2022, 327(10):138-148.

- [2] FANG G C, TIAN L X, LIU M H, et al. How to optimize the development of carbon trading in China-Enlightenment from evolution rules of the EU carbon price[J]. Applied Energy, 2018, 211:1039-1049.
- [3] CHEN X, WANG X J. Effects of carbon emission reduction policies on transportation mode selections with stochastic demand[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 90:196-205.
- [4] HINTERMANN B. Pass-through of CO₂ emission costs to hourly electricity prices in Germany[J]. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 2014, 3:857-891.
- [5] WANG H R, FENG T T, ZHONG C. Effectiveness of CO₂ cost pass-through to electricity prices under "electricity-carbon" market coupling in China[J]. Energy, 2023, 266:126387.
- [6] 郑爽,孙峥. 论碳交易试点的碳价形成机制[J]. 中国能源, 2017, 39(4):9-14.
- [7] 赵长红,张明明,吴建军,等. 碳市场和电力市场耦合研究[J]. 中国环境管理, 2019,11(4):105-112.
- [8] 薛贵元,吴晨,王浩然,等. “双碳”目标下碳市场与电力市场协同发展机制分析[J]. 电力科学与工程, 2022,38(7):1-7.
- [9] 朱瑛,郭健伟,周亦洲,等. 考虑碳-绿证市场耦合的多虚拟电厂电-碳 P2P 交易模型[J]. 电力自动化设备, 2025,45(1):51-58.
- [10] 冯天天. 绿证交易及碳交易对电力市场的耦合效应分析模型研究[D].北京:华北电力大学(北京), 2016.
- [11] 宋悦琳. 计及碳交易与绿证交易的电力市场交易机制研究[D].上海:上海电机学院, 2020.
- [12] 李健华,陈雪,付浩,等. 碳电市场环境火电厂市场竞价策略及交易技术[J]. 四川电力技术, 2023, 46(3):46-52.
- [13] 高姣倩. 碳排放交易机制下的发电权交易策略研究[D]. 上海:上海电力学院, 2017.
- [14] 吴育青,罗智超. 产业结构导致的电力需求变化探究——基于深圳市的经验分析[J]. 现代经济信息, 2014(1):312-313.

作者简介:

汪月新(2000),女,硕士研究生,研究方向为气候变化、系统仿真等;

潘张榕(1996),男,博士研究生,研究方向为气候变化、系统仿真等;

郭军红(1984),男,博士,高级工程师,研究方向为气候变化、系统仿真等。 (收稿日期:2025-02-19)