

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2026.05.002

价格调控对碳市场效率和稳定性的影响研究^①

黄丽清¹, 朱帮助^{2*}, 王平³, 江民星⁴

(1. 华南农业大学数学与信息学院, 广州 510642; 2. 广西大学工商管理学院, 南宁 530004;
3. 暨南大学管理学院, 广州 510632; 4. 南京信息工程大学商学院, 南京 210044)

摘要: 碳市场政企间信息不对称将导致政企难以达成稳定的碳减排履约合作, 造成碳市场效率和稳定性损失. 本研究构建跨期碳市场政企 Stackelberg 博弈模型, 从碳价调控视角构造碳市场基准、碳价下限调整、碳价上限调整和碳价上下限调整情景, 探讨跨期碳市场最优配额设定方案. 采用参与中国全国性碳市场 458 家电厂样本数据评估和揭示碳价调控对碳市场效率和稳定性影响. 研究发现, 碳价调控显著影响最优碳配额供给量、跨期碳市场效率和稳定性. 企业减排技术溢出、碳配额供给量上限和碳价上下限设定值是碳价调控机制影响碳市场效率和稳定性的重要因素. 当碳配额供给量上限大于配额阈值下限, 且碳价下限大于基准碳价阈值和小于碳价阈值下限时, 碳价下限和碳价上下限机制调整有助于提高碳价, 但降低市场稳定性和加重碳减排社会总成本. 当碳配额供给量上限大于配额阈值上限, 且碳价上限小于基准碳价阈值时, 碳价上限和碳价上下限机制调整有助于避免碳价大幅上涨且提高市场稳定性, 但加重碳减排社会总成本. 本研究将有助于为跨期碳市场建设, 保障碳市场有效且稳定运行提供理论支撑和政策借鉴.

关键词: 跨期碳市场; 碳价调控; Stackelberg 博弈; 市场效率; 市场稳定性

中图分类号: F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2026)05-0017-15

0 引言

全球气候变化对人类生存和生态系统造成巨大威胁. 世界各国高度重视气候变化, 积极采取各项措施以推动节能减排. 欧盟、中国等建立碳市场以促进低碳经济转型. 碳市场规制迫使企业碳减排以实现碳市场履约, 这将影响企业运营决策的各个环节, 导致企业生产运营成本变动. 作为政策性市场, 碳市场通过市场定价机制促进碳配额资源优化配置, 旨在通过碳定价实现低成本碳减排、提升企业减排积极性和风险管理. 建设高效率的碳市场是破解经济发展和碳减排两难矛盾的有效经济手段, 有助于我国实现碳中和目标^[1-4]. 碳价

是引导碳减排投资的关键信号, 蕴含了碳配额供需、减排成本与收益等信息. 碳配额供需变动是碳价形成的关键决定因素. 碳市场机制、企业生产计划等影响经济效益、碳配额供给与需求, 进而影响碳价波动和经济稳定^[5-7]. 碳价剧烈波动影响碳市场稳定性, 若碳市场无法形成稳定且有效的碳价信号, 则其促进减排的功能将大幅削弱, 影响企业减排履约成本, 最终损害市场稳定性和效率^[8]. 因此, 碳市场效率和稳定性存在紧密的相互影响, 探讨碳市场机制设计有必要从碳市场效率和稳定性双重维度全面剖析机制调控效果以推动持续碳减排的同时兼顾经济发展, 降低预期碳价不确定

① 收稿日期: 2024-10-31; 修订日期: 2025-12-22.

基金项目: 国家社会科学基金资助重大项目(23&ZD098); 教育部人文社会科学基金资助青年项目(23YJC630058); 广东省基础与应用基础研究区域联合基金资助项目(2023A1515110282); 广东省哲学社会科学规划共建资助项目(GD24XGL047).

通讯作者: 朱帮助(1979—), 男, 江苏宿迁人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: wpzbz@126.com

性引起的经营风险。中国作为世界上碳排放量最大的发展中国家,先后建立了北京、上海、湖北等试点碳市场。2021 年我国全国性碳市场开市,碳市场运行尚未成熟。全国性碳市场发展之初可能存在政企信息不对称,导致碳配额供需不平衡,从而削弱碳市场效率和稳定性。碳配额总量设定、分配和碳市场机制设计是碳市场建设和运行的关键环节,对碳市场效率和稳定性尤为重要^[8-10]。因此,深入探讨碳配额合理分配和建立碳市场稳定调整机制,以保障碳市场有效且稳定运行具有重要的现实意义。

碳市场通过碳配额供需变动形成碳价信号从而影响企业减排行为。现有研究从碳配额分配、碳配额跨期存储机制、拍卖机制、市场势力等碳市场因素^[11-15]、绿色债券市场、股票市场等宏观经济因素^[16,17]、电力市场、能源价格等能源市场因素^[18-21]剖析碳价变动的驱动力。Geng 和 Fan^[15]研究发现当碳市场不允许碳配额跨期借贷时,市场势力会扭曲碳价以获得高收益。李兴等^[21]研究发现考虑电力市场和碳市场传导率时,碳排放总量下降场景对应的最优碳价为 255.05 元/t。碳价变动影响碳减排和经济效益^[2,10]。因此,厘清影响碳价变动的驱动因素,有助于促进碳市场形成合理的碳价,为实现低成本碳减排提供科学支持。

碳配额设定和碳价调控是保障市场有效且稳定运行的关键调控手段。现有研究探讨了基于产量、效率、多准则、拍卖等碳配额设定机制调整对碳减排、利润、授权再制造和高耗能产业转移的影响^[12,15,22-24]。石平等^[25]构建考虑碳交易机制的供应链博弈模型探讨基于互惠的低碳供应链协调机制。相比碳市场单期定价机制,跨期碳市场定价机制时间灵活性强,有助于碳排放权交易市场形成较为稳定的价格预期,提升碳市场效率^[26]。然而,企业和政府作为碳市场参与者,双方利益关系复杂且各利益方相互制约。政府忽视企业自身利益需求,制定过于严格的碳配额供给方案将加重企业成本负担。过度的政企间利益分歧将引起碳市场效率损失,导致政企难以达成稳定的碳减排履约合作。因此,如何制定跨期碳市场配额设定机制以兼顾政企双方利益仍有待探讨。

碳价调控主要包括碳价下限、碳价上限和碳

价上下限管制^[8,27-30]。Zhang 和 Chang^[8]采用分位数参数化方向性产出距离函数法测算了我国省级等效边际减排成本,指出 2021 年—2024 年可行的碳价下限分别为 59.68 元/t、61.17 元/t、62.95 元/t 和 64.21 元/t。碳价波动导致碳市场减排成本不确定性,碳价调控促使碳价达到预期水平有助于促进碳减排,降低碳价波动和经济损失^[28-31]。谭彩霞等^[29]指出在碳达峰前期,政府设定碳价上下限有助于避免碳价过低削弱控排主体减排积极性,且防止碳价过高影响国民经济发展。段宏波和汪寿阳^[32]研究指出单纯的碳价政策不足以促进碳中和目标如期实现。科学制定跨期碳市场价格调控机制以激励碳减排并降低企业决策风险尤为重要。现有研究表明,碳配额供给、碳配额跨期流转、碳价调控机制是影响碳价稳定和碳市场效率的重要因素,但仍存在以下局限。第一,现有碳配额设定的研究较多单一考虑政府最大化社会总收益目标,忽略了规制期内企业的利益需求^[15,22,26],易造成碳配额供需严重不平衡,对碳市场效率和稳定性造成负面影响。第二,虽然 Jiang 等^[27]和 Zhang 等^[30]考虑了跨期碳市场情形的碳价调控机制,但是缺乏考虑政企双层互动博弈配额设定机制,未能结合多主体互动的碳配额数量调控和碳价调控手段探讨机制调整对碳市场效率和稳定性影响,无法为兼顾企业利益和碳市场稳定运行提供系统有效的跨期碳市场配额设定方案。第三,现有研究缺乏综合剖析政企双层互动博弈的跨期碳市场机制下,不同碳价调控机制对碳市场效率和稳定性的影响,未能全面考察不同电厂间减排技术溢出效应和碳价上下限设定情形下最优碳价调控机制,难以制定有效的碳价调控机制,损害碳市场效率和稳定性。

本研究构建跨期碳市场政企 Stackelberg 博弈模型,从碳价调控视角设置碳市场基准、碳价下限、碳价上限和碳价上下限四种机制调整情景,考察碳配额政企双层互动博弈设定机制和碳价调控机制对配额供给量、跨期碳市场效率和稳定性的影响。与现有研究相比,本研究主要贡献在于:第一,从多主体互动视角构建了跨期碳市场政企双层互动博弈配额设定模型,引入了考虑政企互动博弈的跨期碳配额双层配额设定机制,有助于厘清企业自身利益需求影响碳配额总量设定的内在

机理. 第二, 综合考虑多方主体利益和碳价调控手段, 探讨兼顾企业利益需求、市场效率和稳定性的跨期碳市场配额设定方案. 第三, 全面比较分析了单一跨期碳配额政企双层互动博弈设定机制, 考虑政企双层互动博弈的碳价调控机制对跨期碳市场效率和稳定性的影响, 揭示了碳价调控影响跨期碳市场效率和稳定性的关键因素. 本研究将为促进跨期碳市场资源优化配置, 提高碳市场效率和稳定性, 剖析政企互动决策下跨期碳市场配额设定方案提供科学支撑.

1 模型构建

假设碳市场存在电厂 j ^②, $j = 1, 2, \dots, N$, 电厂发电过程中排放二氧化碳. 为了实现低成本碳减排, 市场规制者在计划期 i 内实施碳交易机制, 计划期分为两期, $i=1, 2$. i 期碳价为 S_i , $S_i > 0$. 无碳市场规制下, 基准情形 i 期电厂 j 碳排放量为 u_{ij} . 碳市场规制下, E_{ij} 为 i 期电厂 j 碳排放量. 假设各期电厂持续供电, 则碳排放量均为正, 即 $E_{ij} > 0$. 为了约束电厂碳减排, 令 \bar{L} 为计划期内碳配额供给量上限. 假设电厂碳排放总量控制下市场规制者分配碳配额^③. 令 L_{ij} 为 i 期市场规制者分配至电厂 j 的碳配额, 计划期内碳配额供给量满足 $L = \sum_{j=1}^N (L_{1j} + L_{2j})$, $L_{ij} > 0$. i 期电厂 j 碳配额交易量为 X_{ij} , 由于各期碳配额总量固定, 则电厂间配额交易总量满足 $\sum_{j=1}^N X_{ij} = 0$. 电厂实施碳减排以实现碳市场履约, 其碳减排量为 $u_{ij} - E_{ij}$, $u_{ij} - E_{ij} > 0$. 技术进步影响边际减排成本, 技术溢出降低企业单位污染治理成本和经营成本^[33]. 令电厂 j 碳减排成本为 $C(E_{ij})$ 如式 (1) 所示, 其中 c_j 为单位碳减排成本, χ 为电厂间减排技术溢出效应, $0 \leq \chi < 1$. 碳减排成本和边际减排成本均随碳排放量递减^[26, 27].

$$C(E_{ij}) = 0.5c_j(1 - (i-1)\chi)(u_{ij} - E_{ij})^2 \quad (1)$$

1.1 市场规制者和企业的目标函数及碳减排约束

市场规制者根据不同跨期碳市场机制, 选择碳配额分配量 L_{ij} 以实现计划期内碳减排社会总成本 W 最小化. 碳排放总量约束下, 计划期内碳配额供给量不超过碳配额供给量上限 \bar{L} , 满足 $\sum_{j=1}^N (L_{1j} + L_{2j}) \leq \bar{L}$. 令 d 为单位碳排放环境损害系数, 碳排放环境损害表示为 dE_{ij} ^[34]. 碳减排社会总成本 W 定义为碳减排总成本与碳排放环境损害之和, 最优化问题如式 (2) 所示. 其中 δ 为利率贴现率, $0 < \delta < 1, d > 0$.

$$\begin{aligned} \min_{L_{ij}} W &= \sum_{j=1}^N (C(E_{1j}) + \delta C(E_{2j}) + dE_{1j} + \delta dE_{2j}) \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1}^N (L_{1j} + L_{2j}) \leq \bar{L} \\ &L_{ij} > 0 \end{aligned} \quad (2)$$

电厂 j 根据碳排放约束选择碳排放量 E_{ij} 和碳配额交易量 X_{ij} 以实现计划期内碳减排履约成本 ψ_j 最小化. 碳减排履约成本定义为碳减排成本与碳配额交易收益之和, 目标函数如式 (3) 所示.

$$\min_{E_{ij}, X_{ij}} \psi_j = \sum_{i=1}^2 \delta^{i-1} (C(E_{ij}) - S_i X_{ij}) \quad (3)$$

存储机制下, i 期电厂 j 碳配额存储量 B_i^j 非负, 且与电厂碳排放量、碳配额供给量和配额交易量相关, 如式 (4) 所示. 计划期期初电厂碳配额存储量 B_0^j 为零. 存储机制下电厂不允许跨期借贷碳配额, 则第一期期末碳配额存储量满足 $B_1^j \geq 0$, 即满足 $L_{1j} - X_{1j} - E_{1j} \geq 0$. 计划期内电厂 j 碳排放总量不超过其所持有的总配额量, 即计划期内碳排放总量不超过碳配额交易量和配额供给量总和, 如式 (5) 所示.

$$B_i^j = B_{i-1}^j + L_{ij} - X_{ij} - E_{ij} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^2 E_{ij} \leq \sum_{i=1}^2 (L_{ij} - X_{ij}) \quad (5)$$

基于此, 碳排放约束下电厂 j 最优化问题定义为式 (6).

② 2021 年 7 月, 中国全国性碳市场开市, 纳入首批碳交易范围的仅有电力行业.

③ 生态环境部发布《2021、2022 年度全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(征求意见稿)》, 指出“配额分配基准值设定需分年度规定, 以配额基本盈亏平衡、行业企业可承受为原则”. 这意味着配额供给量基本一定情形下, 电厂间配额分配需考虑电厂预期产出, 各期碳配额分配采用不同的配额分配基准值以贴近当期电厂生产实际情况, 隐含了碳排放总量控制的配额分配思想.

$$\begin{aligned}
 \min_{E_{ij}, X_{ij}} \psi_j &= \sum_{i=1}^2 \delta^{i-1} (C(E_{ij}) - S_i X_{ij}) \\
 \text{s. t. } L_{1j} - X_{1j} - E_{1j} &\geq 0 \\
 \sum_{i=1}^2 E_{ij} &\leq \sum_{i=1}^2 (L_{ij} - X_{ij}) \\
 E_{ij} &> 0
 \end{aligned} \quad (6)$$

碳市场规制者和电厂碳减排行为是双方互动决策的结果. 市场规制者作为领导者, 通过碳配额设定引导企业碳减排. 电厂作为追随者, 碳排放约束下选择决策以实现碳减排履约成本最小化. 同时, 电厂决策行为反馈至市场规制者, 进而影响市场规制者跨期碳配额设定和市场管制决策. 因此, 本研究设置跨期碳配额政企双层互动博弈设定机制(intertemporal carbon permit setting mechanism based on interactive game between government and firms, ICPSG) 构建跨期碳市场政企互动博弈的 Stackelberg 博弈模型, 其中市场规制者视为上层决策者, 电厂视为下层决策者.

1.2 碳价调控机制与情景设定

进一步地, 考虑碳价下限机制(carbon price floor mechanism, CPF)、碳价上限机制(carbon price ceiling mechanism, CPE) 和碳价上下限机制(carbon price collars mechanism, CPO). 碳市场实现跨期有效性时各期贴现碳价相等. 令 β_1 和 β_2 分别为碳价下限和碳价上限, $\delta^{i-1} S_i$ 为贴现碳价. CPF、CPE 和 CPO 机制下碳价分别满足 $\delta^{i-1} S_i \geq \beta_1$, $\delta^{i-1} S_i \leq \beta_2$ 和 $\beta_1 \leq \delta^{i-1} S_i \leq \beta_2$.

基于 ICPSG 机制引入碳价调控机制. 碳市场中单一 ICPSG 机制、结合 ICPSG 和 CPF 机制、结合 ICPSG 和 CPE 机制, 以及结合 ICPSG 和 CPO 机制的情景分别定义为基准情景(benchmark), 碳价下限调整情景(carbon price floor adjustment scenario, CP-FA), 碳价上限调整情景(carbon price ceiling adjustment scenario, CPEA) 和碳价上下限调整情景(carbon price collars adjustment scenario, CPOA).

1.3 跨期碳市场效率和稳定性评价

参考张希良等^[35]指出的减排成果有效性、减排成本有效性等碳市场有效性评价标准, 本研究从经济和环境维度考察碳配额总量控制下跨期碳市场机制调整对碳减排成本和碳价的影响, 以表

征企业实现碳市场履约的减排成本效率以及合理的碳价变动, 进而评估不同碳市场机制调整的跨期碳市场效率和稳定性.

碳市场效率方面, 本研究基于碳减排社会总成本评价碳价调控对市场效率的影响. 相比基准情景, 若不同碳价调控机制情景下计划期内碳减排社会总成本较低, 则该碳价调控机制提升了碳市场效率. 反之, 该碳价调控机制造成了碳市场效率损失. 碳市场稳定性方面, 本研究从计划期内碳价波动范围视角评价碳价调控对市场稳定性影响. 相比基准情景, 若不同碳价调控机制情景下碳市场第一期和第二期碳价间波动范围较小, 则该碳价调控机制提高了市场稳定性. 反之, 该碳价调控机制加剧了碳市场波动性.

2 模型求解与分析

本研究采用逆向归纳法求解跨期碳市场政企互动博弈的 Stackelberg 博弈模型, 首先讨论电厂的均衡策略. 参考朱帮助等^[26]和 Hintermayer^[36], 假设第一期碳配额供给量充足, 根据式(6)且由最优化一阶条件可得碳价和电厂 j 碳排放量满足式(7)~式(9), 其中 S' 为跨期碳市场均衡碳价.

$$S_1 = \delta S_2 = S' \quad (7)$$

$$S_1 = c_j (u_{1j} - E_{1j}) \quad (8)$$

$$S_2 = c_j (1 - \chi) (u_{2j} - E_{2j}) \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可得, 电厂 j 最优碳排放量 E_{ij}^* 为

$$E_{ij}^* = u_{ij} - \frac{S'}{c_j \delta^{i-1} (1 - \chi)^{i-1}} \quad (10)$$

各期碳配额交易量满足 $\sum_{j=1}^N X_{ij} = 0$, 由式(6)和式(10)可得 S' 满足式(11).

$$S' = \xi (U_1 + U_2 - L_1 - L_2) \quad (11)$$

其中 $\xi = \frac{\delta(1-\chi)}{\kappa_1(1+\delta(1-\chi))}$, $\sum_{j=1}^N \frac{1}{c_j} = \kappa_1$, $\sum_{j=1}^N u_{1j} = U_1$, $\sum_{j=1}^N u_{2j} = U_2$, $\sum_{j=1}^N L_{2j} = L_2$, $\sum_{j=1}^N L_{1j} = L_1$, $U_1 + U_2 > L_1 + L_2$.

2.1 不同情景下最优碳配额供给量

对于基准情景, 将式(10)和式(11)代入市场规制者目标函数, 结合 1.2 小节各机制情景的碳

价约束, 可得基准、CPFA、CPEA 和 CPOA 情景下最优碳配额供给量^④, 分别为 L_B^* 、 L_F^* 、 L_C^* 和 L_O^* , 如表 1 所示。令 σ_1 、 μ 、 σ_2 、 ζ 和 σ_3 分别为基准配额阈值、基准碳价阈值、配额阈值下限、碳价阈值下限和配额阈值上限。由于配额分配量为正, 则需满足 $\sigma_1 > 0$, $\mu > 0$, $\beta_1 < \zeta$ 。

表 1 最优碳配额分配量

Table 1 Optimal carbon permit cap

机制情景	最优碳配额分配量
Benchmark	$L_B^* = \begin{cases} \sigma_1, \bar{L} \geq \sigma_1 \\ \bar{L}, 0 < \bar{L} < \sigma_1 \end{cases}$
CPFA	$L_F^* = \begin{cases} \bar{L}, 0 < \bar{L} \leq \sigma_2 \text{ 且 } 0 < \bar{L} < \sigma_1 \\ \sigma_2, \bar{L} > \sigma_2 \text{ 且 } \mu < \beta_1 < \zeta \\ \sigma_1, \bar{L} \geq \sigma_1 \text{ 且 } 0 < \beta_1 \leq \mu \end{cases}$
CPEA	$L_C^* = \begin{cases} \sigma_3, \bar{L} \geq \sigma_3 \text{ 且 } 0 < \beta_2 < \mu \\ \bar{L}, \bar{L} \geq \sigma_3 \text{ 且 } 0 < \bar{L} < \sigma_1 \\ \sigma_1, \bar{L} \geq \sigma_1 \text{ 且 } \beta_2 \geq \mu \end{cases}$
CPOA	$L_O^* = \begin{cases} \bar{L}, \sigma_3 \leq \bar{L} \leq \sigma_2 \text{ 且 } 0 < \bar{L} < \sigma_1 \\ \sigma_2, \bar{L} > \sigma_2 \text{ 且 } \mu < \beta_1 < \zeta \\ \sigma_3, \bar{L} \geq \sigma_3 \text{ 且 } 0 < \beta_2 < \mu \\ \sigma_1, \bar{L} \geq \sigma_1 \text{ 且 } \beta_1 \leq \mu \leq \beta_2 \end{cases}$

其中 $\sigma_1 = U_1 + U_2 - \frac{\kappa_1 d(2 - \chi)}{1 - \chi}$, $\mu = \frac{d\delta(2 - \chi)}{1 + \delta(1 - \chi)}$, $\zeta = \frac{\delta(1 - \chi)(U_1 + U_2)}{\kappa_1(1 + \delta(1 - \chi))}$, $\lambda = \frac{\kappa_1(1 + \delta(1 - \chi))}{\delta(1 - \chi)}$, $\sigma_2 = U_1 + U_2 - \beta_1 \lambda$, $\sigma_3 = U_1 + U_2 - \beta_2 \lambda$ 。结果表明, ICPSG 和碳价调控机制显著影响市场规制者最优碳配额设定, \bar{L} 不总是市场规制者最优碳配额供给量。由 L_B^* 、 L_F^* 、 L_C^* 和 L_O^* 可知, 碳配额供给量上限、碳价上下限设值和电厂间减排技术溢出效应显著影响市场规制者最优碳配额供给量。命题 1 阐述碳价调控对碳配额供给量设定的影响。本研究的命题证明过程均见附录^⑤。

命题 1 碳配额供给量上限和碳价上下限满足 $\bar{L} \geq \sigma_1$ 且 $\beta_1 \leq \mu \leq \beta_2$ 情形, 或满足 $\sigma_3 \leq \bar{L} \leq \sigma_2$ 且 $0 < \bar{L} < \sigma_1$ 情形时, 碳价下限调整、碳价上限调整以及碳价上下限调整均未能影响 ICPSG

机制下跨期碳市场最优碳配额供给量。

命题 1 阐述了相比基准情景, 碳价调控未能影响 ICPSG 机制下碳配额设定的情形。命题 1 表明若 $\bar{L} \geq \sigma_1$ 且 $\beta_1 \leq \mu \leq \beta_2$ 时, 或者若 $\sigma_3 \leq \bar{L} \leq \sigma_2$ 且 $0 < \bar{L} < \sigma_1$ 时, 基准、CPFA、CPEA 和 CPOA 情景的最优碳配额供给量相等。结果表明, 碳价调控机制不总能影响碳配额分配, 碳配额供给量上限和碳价上下限设值影响最优碳配额供给量。可能的原因是当 $\bar{L} \geq \sigma_1$ 且 $\beta_1 \leq \mu \leq \beta_2$ 时, 不同情景下碳市场供需引起的碳价变动均在碳价上下限范围内, 该情形下政府相比基准情景不需要调整碳配额供给量。若 $\sigma_3 \leq \bar{L} \leq \sigma_2$ 且 $0 < \bar{L} < \sigma_1$ 情形下, 基准情景和各碳价调控机制情景下碳配额供给量相比碳配额需求紧缺, 则碳配额总量控制下各情景最优碳配额供给量均设定为碳配额供给量上限。

2.2 不同情景下均衡碳价

将不同情景下最优碳配额供给量代入式 (11) 可得基准、CPFA、CPEA 和 CPOA 情景下均衡碳价, 分别为 S_B' 、 S_F' 、 S_C' 和 S_O' , 如表 2 所示。

表 2 均衡碳价

Table 2 Equilibrium carbon price

机制情景	取值范围
Benchmark	$S_B' = \begin{cases} \mu, \bar{L} \geq \sigma_1 \\ SR, 0 < \bar{L} < \sigma_1 \end{cases}$
CPFA	$S_F' = \begin{cases} SR, 0 < \bar{L} \leq \sigma_2 \text{ 且 } 0 < \bar{L} < \sigma_1 \\ \beta_1, \bar{L} > \sigma_2 \text{ 且 } \mu < \beta_1 < \zeta \\ \mu, \bar{L} \geq \sigma_1 \text{ 且 } 0 < \beta_1 \leq \mu \end{cases}$
CPEA	$S_C' = \begin{cases} \beta_2, \bar{L} \geq \sigma_3 \text{ 且 } 0 < \beta_2 < \mu \\ SR, \bar{L} \geq \sigma_3 \text{ 且 } 0 < \bar{L} < \sigma_1 \\ \mu, \bar{L} \geq \sigma_1 \text{ 且 } \beta_2 \geq \mu \end{cases}$
CPOA	$S_O' = \begin{cases} SR, \sigma_3 \leq \bar{L} \leq \sigma_2 \text{ 且 } 0 < \bar{L} < \sigma_1 \\ \beta_1, \bar{L} > \sigma_2 \text{ 且 } \mu < \beta_1 < \zeta \\ \beta_2, \bar{L} \geq \sigma_3 \text{ 且 } 0 < \beta_2 < \mu \\ \mu, \bar{L} \geq \sigma_1 \text{ 且 } \beta_1 \leq \mu \leq \beta_2 \end{cases}$

④ 根据最优化一阶条件、互补松弛条件和库恩塔克条件可得基准情景下最优碳配额供给量。类似地, 碳价调控机制下基于碳价约束条件和碳配额供给量约束条件, 根据互补松弛条件和对偶可行性条件, 结合拉格朗日乘子的取值范围求解各碳价调控情景下最优碳配额供给量的取值区间。

⑤ 由于正文篇幅限制, 命题证明过程均见附录, 读者可向作者索取附录材料。

其中 $SR = \frac{\delta(1-\chi)(U_1+U_2-\bar{L})}{\kappa_1(1+\delta(1-\chi))}$. 结果表明, 碳配额供给量上限、电厂间减排技术溢出效应和三种碳价调控机制显著影响均衡碳价. S'_B 、当 $\bar{L} \geq \sigma_1$ 且 $0 < \beta_1 \leq \mu$ 或当 $0 < \bar{L} \leq \sigma_2$ 且 $0 < \bar{L} < \sigma_1$ 时 S'_F 、当 $\bar{L} \geq \sigma_3$ 且 $0 < \bar{L} < \sigma_1$ 或当 $\bar{L} \geq \sigma_1$ 且 $\beta_2 \geq \mu$ 时 S'_C 、当 $\sigma_3 \leq \bar{L} \leq \sigma_2$ 且 $0 < \bar{L} < \sigma_1$ 或当 $\bar{L} \geq \sigma_1$ 且 $\beta_1 \leq \mu \leq \beta_2$ 时 S'_O . 均衡碳价随 χ 增加而递减.

基于上述均衡结果, 命题 2 和命题 3 阐述了价格调控机制对碳价及市场稳定性的影响. 为了便于描述, 本研究根据碳配额供给量和碳价均衡解的取值区间, 将 CPFA、CPEA 和 CPOA 情景进一步命名为 CPFA I-CPFA II, CPEA I-CPEA II, 及 CPOA I-CPOA III 情形, 如表 3 所示.

表 3 碳市场机制调整情形设置

Table 3 Carbon market mechanism adjustment cases

机制情景	取值范围	情形
Benchmark	$\bar{L} \geq \sigma_1$ 或 $0 < \bar{L} < \sigma_1$	Benchmark
CPFA	$0 < \bar{L} \leq \sigma_2$ & $0 < \bar{L} < \sigma_1$ 或 $\bar{L} \geq \sigma_1$ & $0 < \beta_1 \leq \mu$	CPFA I
	$\bar{L} > \sigma_2$ & $\mu < \beta_1 < \zeta$	CPFA II
CPEA	$\bar{L} \geq \sigma_3$ & $0 < \bar{L} < \sigma_1$ 或 $\bar{L} \geq \sigma_1$ & $\beta_2 \geq \mu$	CPEA I
	$\bar{L} \geq \sigma_3$ & $0 < \beta_2 < \mu$	CPEA II
CPOA	$\sigma_3 \leq \bar{L} \leq \sigma_2$ & $0 < \bar{L} < \sigma_1$ 或 $\bar{L} \geq \sigma_1$ & $\beta_1 \leq \mu \leq \beta_2$	CPOA I
	$\bar{L} > \sigma_2$ & $\mu < \beta_1 < \zeta$	CPOA II
	$\bar{L} \geq \sigma_3$ & $0 < \beta_2 < \mu$	CPOA III

命题 2 存在碳价调控影响碳价变动的情形.

(i) 相比基准情景, CPFA I、CPEA I 和 CPOA I 情形下碳价调控未能影响碳价.

(ii) 当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时, CPFA 和 CPOA 情景下碳价随碳价下限增加而递增, 且相较于 CPEA 和基准情景有助于提高碳价.

(iii) 当 $\bar{L} > \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$ 时, CPEA 和 CPOA 情景下碳价随碳价上限增加而递增, 且相较于 CPFA 和基准情景有助于抑制碳价过高.

命题 2 对比分析了价格调控机制对碳价的影响. 当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时, 实施 CPF 或者 CPO 机制有助于提高碳价. 可能的原因是该情形

下 CPFA 和 CPOA 情景的碳价下限高于基准碳价阈值, 则相比基准情景政府趋于减少碳配额供给量以加大碳减排约束力, 提高了碳配额需求, 进而提高碳价, 碳价下限越高, 均衡碳价趋于越高. 当 $\bar{L} > \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$ 时, 实施 CPE 或 CPO 机制有助于避免碳价大幅上涨. 可能的原因是该情形下市场规制者设定的 CPEA 和 CPOA 情景的碳价上限低于基准碳价阈值, 则相比基准情景政府趋于增加碳配额供给量以降低电厂减排成本, 进而减轻了电厂减排压力, 碳价上限表征碳价上涨的最大值, 碳价上限越高, 均衡碳价上升的幅度越高. 命题 2 表明实施碳价调控机制能否影响碳价变动取决于碳配额供给量上限和碳价上下限设置.

命题 3 碳配额总量控制下存在碳价调控提高市场稳定性情形.

(i) CPFA I、CPEA I 和 CPOA I 情形下碳市场稳定性与基准情景的相同.

(ii) 当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时, CPFA 和 CPOA 情景下碳市场稳定性相较于 CPEA 和基准情景的低.

(iii) 当 $\bar{L} > \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$ 时, CPEA 和 CPOA 情景下碳市场稳定性相较于 CPFA 和基准情景的高.

命题 3 揭示了碳价调控对市场稳定性的影响. 命题 3(i) 表明 CPFA I、CPEA I 和 CPOA I 情形下碳价调控未能提升碳市场稳定性, 可能的原因是在此情形下 CPF、CPE 和 CPO 机制调整未能影响碳配额供给量, 则均衡碳价与基准情景的相同, 碳价调控不影响碳市场价格变动. 命题 3(ii) 表明当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时, 实施碳价下限或者碳价上下限机制调整加剧了碳市场波动.

可能的原因是当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时, CPF 和 CPO 机制的碳配额供给量较基准情景的低, 碳配额供给量收紧以提高碳价水平从而满足碳价下限约束. 碳市场发展初期市场势力企业可能抬高或压低碳价以实现自身利益最大化, 从而降低了碳市场稳定性. 命题 3(iii) 表明当 $\bar{L} > \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$ 时, 实施 CPE 或 CPO 机制调整提高了碳市场稳定性. 可能的原因是当 $\bar{L} > \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$ 时, CPE 和 CPO 机制的碳配额供给量较基准情景

的高,以避免过高碳价从而满足碳价上限约束,碳价下跌可能引起企业惜售碳配额且降低了计划期内碳价波动范围,从而增强了碳市场稳定性。

2.3 不同情景下碳减排效率

根据不同情景下均衡碳价、式(2)和式(10)可得基准、CPFA、CPEA和CPOA情景下最优碳减排社会总成本以表征碳减排效率,分别为 W_B^* 、 W_F^* 、 W_C^* 和 W_O^* ,如表4所示。

表4 最优碳减排社会总成本

Table 4 Optimal social carbon emission reduction costs

机制情景	最优碳减排社会总成本
Benchmark	$W_B^* = \begin{cases} RW_1, \bar{L} \geq \sigma_1 \\ RW_2, 0 < \bar{L} < \sigma_1 \end{cases}$
CPFA	$W_F^* = \begin{cases} RW_1, \bar{L} \geq \sigma_1 \text{ 且 } 0 < \beta_1 \leq \mu \\ RW_2, 0 < \bar{L} \leq \sigma_2 \text{ 且 } 0 < \bar{L} < \sigma_1 \\ RW_3, \bar{L} > \sigma_2 \text{ 且 } \mu < \beta_1 < \zeta \end{cases}$
CPEA	$W_C^* = \begin{cases} RW_1, \bar{L} \geq \sigma_1 \text{ 且 } \beta_2 \geq \mu \\ RW_2, \bar{L} \geq \sigma_3 \text{ 且 } 0 < \bar{L} < \sigma_1 \\ RW_4, \bar{L} \geq \sigma_3 \text{ 且 } 0 < \beta_2 < \mu \end{cases}$
CPOA	$W_O^* = \begin{cases} RW_1, \bar{L} \geq \sigma_1 \text{ 且 } \beta_1 \leq \mu \leq \beta_2 \\ RW_2, \sigma_3 \leq \bar{L} \leq \sigma_2 \text{ 且 } 0 < \bar{L} < \sigma_1 \\ RW_3, \bar{L} > \sigma_2 \text{ 且 } \mu < \beta_1 < \zeta \\ RW_4, \bar{L} \geq \sigma_3 \text{ 且 } 0 < \beta_2 < \mu \end{cases}$

其中 $\kappa_2 = \frac{U_1 + U_2 - \bar{L}}{\kappa_1(1 + \delta(1 - \chi))}$, $\tau = \frac{d(2 - \chi)}{(1 - \chi)(1 + \delta(1 - \chi))}$, $\eta = d(U_1 + \delta U_2)$, $\varepsilon = \delta(1 - \chi)(U_1 + U_2 - \bar{L}) / \kappa_1(1 + \delta(1 - \chi))$, $RW_1 = \frac{\kappa_1 \mu^2}{2} + \frac{\kappa_1 \delta(1 - \chi) \tau^2}{2} - \kappa_1 d \mu - \kappa_1 \delta d \tau + \eta$, $RW_2 = \frac{\kappa_1 \varepsilon^2}{2} + \frac{\kappa_1 \delta(1 - \chi)(\kappa_2)^2}{2} - \kappa_1 d \varepsilon - \kappa_1 \kappa_2 \delta d + \eta$, $RW_3 = \frac{\kappa_1 (\beta_1)^2}{2} + \frac{\kappa_1 (\beta_1)^2}{2\delta(1 - \chi)} - d\beta_1 \kappa_1 - \frac{\kappa_1 \beta_1 d}{1 - \chi} + \eta$, $RW_4 = \frac{\kappa_1 (\beta_2)^2}{2} + \frac{\kappa_1 (\beta_2)^2}{2\delta(1 - \chi)} - d\kappa_1 \beta_2 - \frac{\kappa_1 d \beta_2}{1 - \chi} + \eta$. 由表4可知,碳配额供给量上限和电厂间减排技术溢出效应显著影响最优碳减排社会总成本。命题4和命题5进一步阐述了碳价下限、碳价上限和碳价调控机制对碳减排社会总成本的异质性影响。

命题4 碳配额总量控制下碳价上下限变动对碳减排社会总成本影响不同。

(i) CPFA I、CPEA I和CPOA I情形下碳价上下限变动不影响碳减排社会总成本。

(ii) 当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时,提高碳价下限加重了CPFA和CPOA情景下碳减排社会总成本。

(iii) 当 $\bar{L} \geq \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$ 时,提高碳价上限有助于降低CPEA和CPOA情景下碳减排社会总成本。

命题4阐述了碳价上下限变动对碳减排社会总成本的影响。命题4表明市场规制者通过调整碳价下限和上限以降低碳市场减排社会总成本,需考虑碳配额供给量上限及碳价上下限与配额阈值和碳价阈值间的关系。命题4(ii)和命题4(iii)指出碳价上下限变动影响碳减排社会总成本。可能的原因是,当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时,CPFA和CPOA情景下政府相较基准情景趋于减少碳配额供给,碳价下限设值越高,碳配供给量收紧力度越大以提升碳价,则电厂碳排放成本越高,从而加重了碳减排社会总成本。当 $\bar{L} \geq \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$ 时,CPEA和CPOA情景下政府相较基准情景趋于增加碳配额供给,碳价上限设值越高,配额总量控制下碳配额供给量越大,则电厂碳减排压力下降,从而降低碳减排社会总成本。市场规制者过度提高碳价下限以避免过低碳价或过度限制碳价上限以避免过高碳价均可能造成跨期碳市场效率损失。

命题5 碳配额总量控制下存在碳价调控降低碳减排社会总成本的情形。

(i) CPFA I、CPEA I和CPOA I情形下碳价调控不影响碳减排社会总成本。

(ii) 当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时,CPFA和CPOA情景较基准和CPEA情景加重碳减排社会总成本。

(iii) 当 $\bar{L} > \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$ 时,CPEA和CPOA情景较基准和CPFA情景加重碳减排社会总成本。

命题5对比分析了碳价调控对碳减排社会总成本的影响。当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时,实施碳价下限或者碳价上下限机制调整相较基准情景趋于减少碳配额供给,从而电厂减排压力上升,提高

了电厂碳配额需求,碳价上涨,加重了电厂碳减排成本。当 $\bar{L} > \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$ 时,实施CPE或CPO机制调整相较基准情景趋于增加碳配额供给,从而电厂减排压力下降,电厂趋于增加碳排放,从而加重了环境损害,则不利于减少碳减排社会总成本。然而,CPFA I、CPEA I和CPOA I情形下碳价调控未能影响碳减排社会总成本。命题5结果表明市场规制者实施碳价机制调控是否损害碳市场效率,需充分考量碳配额供给量上限、碳价上下限、不同机制情景下配额阈值和基准碳价阈值,以避免实施碳市场机制调整加重企业碳减排成本。

3 讨 论

3.1 跨期碳配额政企双层互动博弈设定机制

现有研究考察了实现社会总减排收益最大化的单期和跨期碳市场配额分配条件^[26,27],本研究拓展了已有研究的结论,揭示了政企互动博弈下最优跨期碳配额供给量。我国碳市场配额供给量设定主要基于减排总目标,未考虑企业间的减排技术溢出效应对碳配额需求的影响。电厂间减排技术溢出效应越高,电厂下一期单位碳减排成本越低,电厂趋于增加碳减排以实现低成本碳市场履约而避免高额的碳超额排放罚金,进而碳减排量增加,碳配额需求下降,引起均衡碳价下跌。我国碳市场建设过程中稳定的碳价预期是激励电厂长期节能减排的重要因素之一。因此,设定碳配额供给量时考虑企业间减排技术溢出有助于碳市场有效运行。

3.2 碳价下限机制调整

当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时,CPFA情景较基准情景有助于提高碳价但碳减排社会总成本较高。类似地,已有研究发现碳价调控机制影响经济效益^[29,30]。根据《2021、2022年度全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(征求意见稿)》和《2023、2024年度全国碳排放权交易发电行业配额总量和分配方案》,当前全国性碳市场尚未采用CPF机制。CPF机制明确了碳市场参与者碳减排成本下限,有助于激励低碳型电厂碳减排以通过碳市场实现盈余配额交易获益,并且约

束高碳型电厂碳减排以实现碳市场履约,加重了碳密集型电厂减排成本,电厂碳配额需求增加,最终导致碳价上涨,碳减排总收益下降。虽然ICPSG机制充分考虑了各利益主体的决策目标,但是碳市场政企信息不对称和电厂策略性行为可能导致计划期内碳市场剧烈波动。因此,新兴碳市场或中国全国性碳市场建设初期可根据现阶段市场情形将CPF机制纳入碳市场机制设计以提升碳市场效率和稳定性。

3.3 碳价上限机制调整

相比基准情景,当 $\bar{L} > \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$ 时,CPEA情景下碳价较低,碳市场稳定性和碳减排社会总成本较高。Jiang等^[27]和Mo等^[28]研究发现碳价稳定机制降低碳价波动性,有助于提升经济发展质量。类似地,本研究指出CPE机制提升了碳市场稳定性。碳价过高将加重企业生产运营成本。CPE机制限制了碳价上涨空间,实现了碳市场机制引导与政府干预相结合,有助于削弱政企信息不对称下电厂过度抬高碳价的负面影响。然而,碳价上限约束降低了电厂加强碳减排以高价出售碳配额获益的可能,且市场规制者碳价上限设定普遍高于电厂边际碳减排成本,可能加重了碳密集型电厂碳减排成本,降低企业减排积极性。虽然我国试点碳市场、全国性碳市场、欧盟碳市场等均未直接纳入CPE机制,但是各碳市场单位碳超额排放罚金潜在设定了碳价上限。市场规制者设定罚金水平需结合基准碳价阈值和碳配额供给量上限以避免过度加重企业减排成本。

3.4 碳价上下限机制调整

相比基准情景,当 $\bar{L} > \sigma_2$ 且 $\mu < \beta_1 < \zeta$ 时,CPOA情景的碳价和碳减排社会总成本较高,碳市场稳定性较低。当前,全国性碳市场、欧盟碳市场等均未直接采用碳价上下限的碳价调整机制。过高或过低碳价均会降低碳市场资源配置效率,剧烈变动的碳价将影响碳市场稳定性。实现长期节能减排要求企业从根本上实现能源结构转型升级和低碳技术提升。电厂各项低碳技术投资具有不可逆性和收益不确定性,这将增加了电厂长期低碳技术投资风险,降低了电厂长期持续减排的动力。碳价上下限机制给予电厂碳价变动预期,避免了过高和过低碳价。当 $\bar{L} > \sigma_3$ 且 $0 < \beta_2 < \mu$

时, CPO 机制较基准情景虽然有助于抑制碳价大幅上涨和提高碳市场稳定性,但是加重了碳减排社会总成本. Jiang 等^[27]指出纳入碳价调控机制有助于降低碳价波动. 本研究验证了关于碳市场稳定性的结论,并在此基础上拓展了 CPO 机制关于碳市场效率的研究结论. 结果表明 CPO 机制提高市场稳定性的同时不一定能兼顾市场效率.

4 数值分析

本研究选取参与全国性碳市场的电厂碳排放量相关数据和现有文献作为参考进行数值分析. 纳入全国性碳市场的电厂主要为燃煤电厂和燃气电厂,本研究构建了 2019 年参与全国性碳市场的燃煤和燃气电厂碳排放量、供电煤耗、机组及装机容量等数据集,数据来自《电力行业火电机组能效水平对标竞赛》、《电力工业统计资料汇编》、《全国电力机组手册》等,详见 Qian 等^[37]. 数据样本共有 92 家装机容量大于 100MW 的燃气电厂和 366 家装机容量不小于 300MW 的燃煤电厂,涵盖 1 014 个燃煤电厂机组. 对于燃煤电厂,样本数据总装机容量和发电量分别占全国总装机容量和发电量的 50.23% 和 50.02%. 对于燃气电厂,样本数据总装机容量和发电量分别占全国总装机容量和发电量的 69.36% 和 69.73%. 因此,样本数据具有较好的代表性. 样本电厂碳排放总量为 1 905 359.397 kt,令 U_1 和 U_2 为 19 053 593.97. 令 $\delta = 0.95$,碳配额供给量上限在基期基础上逐期递减 3.4%,则 \bar{L} 为 36 185 747.31. 由于企业单

位碳减排成本数据难以获得,参考 Seifert 等^[38]并结合全国性碳市场碳价取值范围,令 $d = 50$,燃煤和燃气电厂单位碳减排成本分别满足 $c_j = 0.024$, $c_j = 0.05$. 全国性碳市场自 2021 年 7 月 16 日开市,2021 年 7 月 16 日至 2022 年 7 月 15 日各交易日最高价最大值和最低价最小值分别为 62.29 元/t 和 38.5 元/t. 令基准情形下碳价下限 $\beta_1 = 38$ 元/t,令基准情形下碳价上限 $\beta_2 = 100$ 元/t 以避免过低的碳价上限. 碳价数据均来自国泰安数据库. 根据参数设置计算 μ 并令 β_1 为 51 元/t 满足 $\mu < \beta_1 < \zeta$,令 β_2 为 45 元/t 满足 $\beta_2 < \mu$. Δ CPFA I、 Δ CPEA I、 Δ CPOA I、 Δ CPFA II、 Δ CPEA II、 Δ CPOA II 和 Δ CPOA III 分别对应 CPFA I、CPEA I、CPOA I、CPFA II、CPEA II、CPOA II 和 CPOA III 情形下图 3 中计划期内碳价波动范围相比基准情景的差值,以及图 4 中碳减排社会总成本相比基准情景的差值.

4.1 跨期碳市场最优碳配额供给量

图 1 描述了 CPFA、CPEA 和 CPOA 情景下最优碳配额供给量与 χ 间的变动关系. 不同情景下最优碳配额供给量均随 χ 增加而递减. Benchmark、CPFA I、CPEA I 和 CPOA I 情形下最优碳配额供给量相等. 相比 Benchmark、CPFA I、CPEA I 和 CPOA I,CPEA II 和 CPOA III 情形下最优碳配额供给量相等且较高,CPFA II 和 CPOA II 情形下最优碳配额供给量相等且较低. 随 χ 递增,CPFA II 和 CPOA II 情形下最优碳配额供给量较 Benchmark 下降 0.5% 至 1.01%,CPEA II 和 CPOA III 情形下最优碳配额供给量较 Benchmark 增加 0.56% 至 0.94%. 图 1 的结果验证了 2.1 中的理论分析和命题 1 的结论.

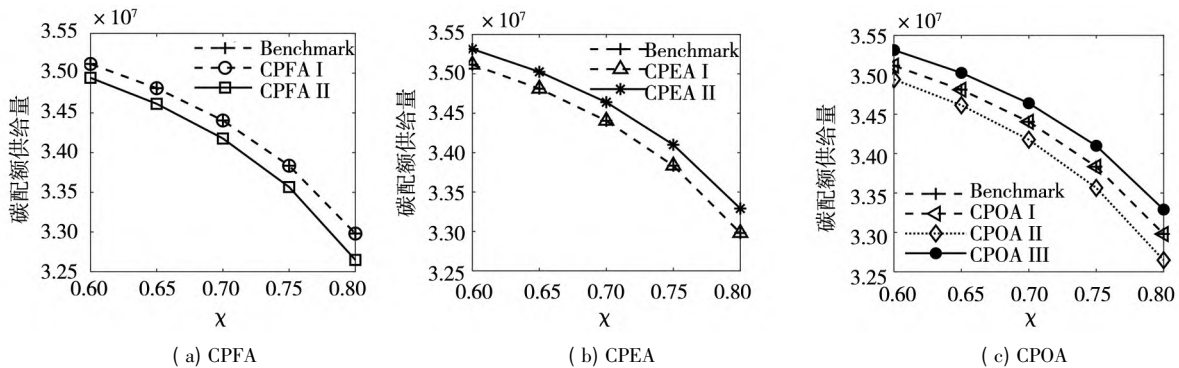


图 1 碳价调控与碳配额供给量的关系

Fig. 1 The relationship between carbon price regulation and permit supply

4.2 跨期碳市场稳定性比较

图2描述了碳价调控对碳价变动的影响. 同一 χ 时, Benchmark、CPFA I、CPEA I和CPOA I情形下碳价相等, 碳价随 χ 增加而递减且变动范围为47.9至48.19之间, 符合全国性碳市场碳价范围, 验证了数值模拟中参数设值的合理性. 当 β_1

为51和55时, CPFA II和CPOA II情形下碳价随 χ 增加恒等于51和55, 且相比 Benchmark 的均较高. 当 β_2 为41和55时, CPEA II和CPOA III情形下碳价随 χ 增加恒等于41和45, 且相比 Benchmark 的均较低. 结果表明, 存在碳价调控提高碳价的情形. 图2的结论与命题2相一致.

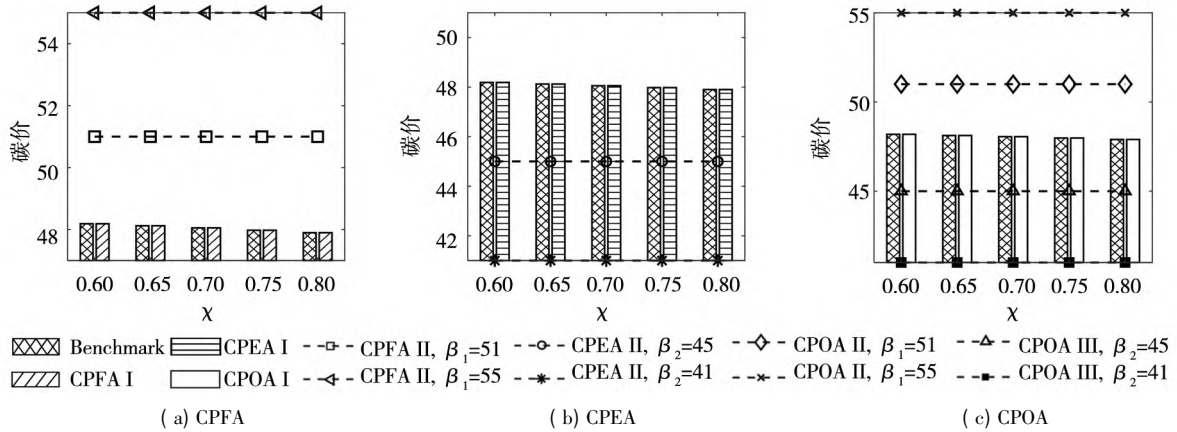


图2 碳价与碳价调控的关系

Fig. 2 The relationship between carbon price and price regulation

图3描述了碳价调控对碳市场稳定性的影响. 不同 χ 下, Δ CPFA I、 Δ CPEA I和 Δ CPOA I均为0, 结果表明CPFA I、CPEA I和CPOA I情形下碳市场稳定性与基准情景的相同, 碳价调控未能提升碳市场稳定性. 图3(a)和图3(c)中, Δ CPFA II和 Δ CPOA II均大于0, 结果表明CPFA II和CPOA II情形下碳市场波动较基准情

景的高, 碳价下限调整和碳价上下限调整降低了碳市场稳定性. 图3(b)和图3(c)中, Δ CPEA II和 Δ CPOA III均小于0, 结果表明CPEA II和CPOA III情形下碳市场波动较基准情景的低, 碳价上限和碳价上下限调整提升了碳市场稳定性. 图3的结论与命题3相一致.

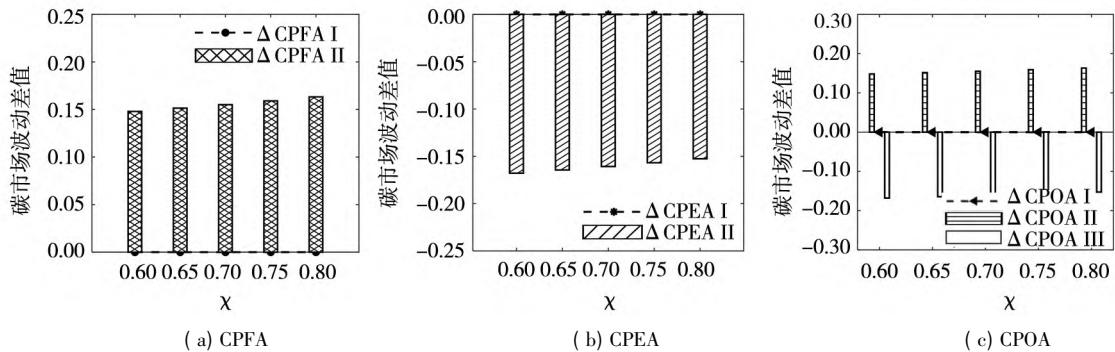


图3 碳价调控与碳市场稳定性的关系

Fig. 3 The relationship between carbon price regulation and market stability

4.3 跨期碳市场效率比较

图4描述了碳价调控对碳减排社会总成本的影响. 不同 χ 下, Δ CPFA I、 Δ CPEA I和 Δ CPOA I均为0, 结果表明 Benchmark、CPFA I、CPEA I和CPOA I下碳减排社会总成本均相等. 不同 χ 下, Δ CPFA II、 Δ CPEA II、 Δ CPOA II和

Δ CPOA III均大于0. 结果表明, 基准情景较CPFA II、CPEA II、CPOA II和CPOA III情形下碳减排社会总成本低, CPFA II、CPEA II、CPOA II和CPOA III下碳价调控加重了碳减排总成本, 降低了碳市场效率. 图4的结论与命题5相一致.

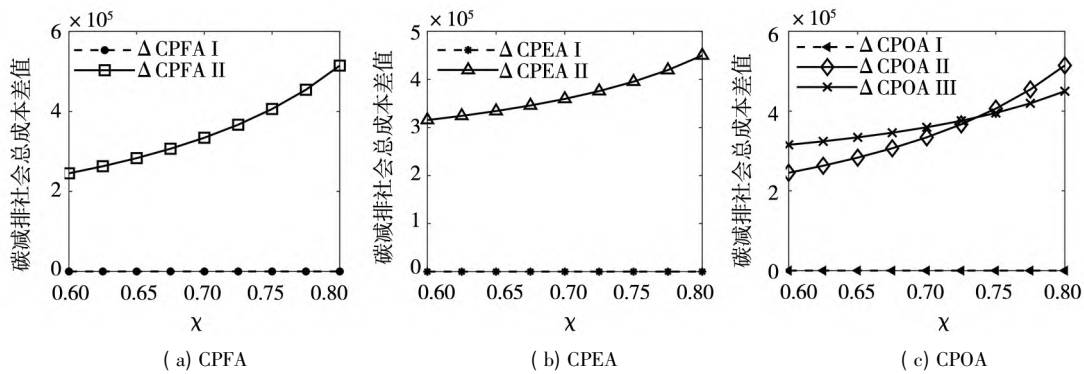


图 4 碳价调控与碳减排社会总成本的关系

Fig. 4 The relationship between carbon price regulation and social carbon emission reduction total costs

图 5 描述了碳价上下限变动对碳减排社会总成本的影响。图 5 (a) 中, $\Delta CPFA II$ 和 $\Delta CPOA II$ 分别表示 CPFA II 和 CPOA II 情形下, $\beta_1 = 55$ 时碳减排社会总成本相比 $\beta_1 = 51$ 时的变化率。随 χ 递增, $\Delta CPFA II$ 和 $\Delta CPOA II$ 递增且均大于 0, 结果表明提高碳价下限加重了碳减排社会总成

本。图 5 (b) 中, $\Delta CPEA II$ 和 $\Delta CPOA III$ 分别表示 CPEA II 和 CPOA III 情形下, $\beta_2 = 45$ 时碳减排社会总成本相比 $\beta_2 = 41$ 时的变化率。同一 χ 下, $\Delta CPEA II$ 和 $\Delta CPOA III$ 均小于 0, 结果表明提高碳价上限有助于降低碳减排社会总成本。图 5 的结论与命题 4 相一致。

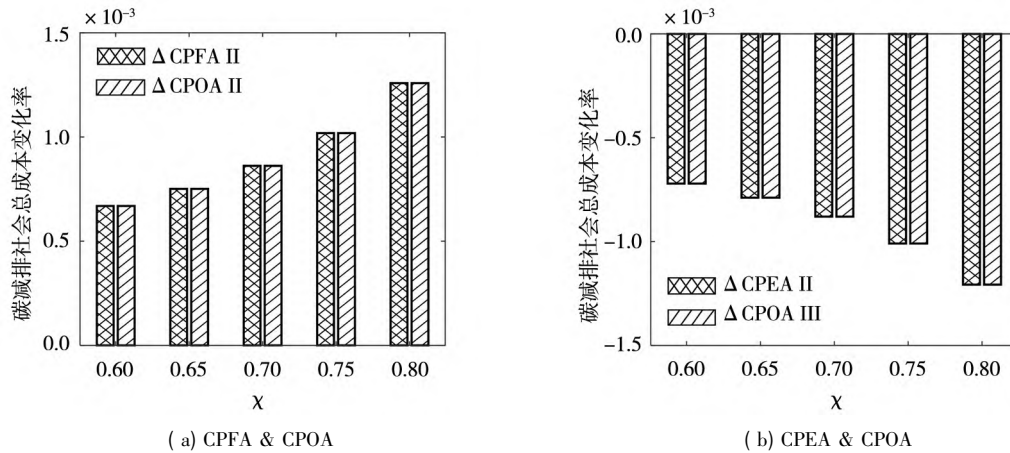


图 5 碳价上下限与碳减排社会总成本的关系

Fig. 5 The relationship between carbon price collars and social carbon emission reduction total costs

5 结束语

本研究构建了跨期碳市场政企 Stackelberg 博弈模型, 引入跨期碳配额政企双层互动博弈设定机制和碳价调控机制, 构造了碳市场基准、碳价下限、碳价上限和碳价上下限四种机制调整情景, 结合参与全国性碳市场的 458 家电厂数据, 从碳减排成本、碳价及其波动性维度剖析跨期碳配额政企双层互动博弈设定和碳价调控对碳配额分配、碳市场效率和稳定性影响。结果表明, 电厂间减排技术溢出效应和碳价上下限显著影响碳配额分

配。当碳配额供给量上限大于配额阈值下限, 且碳价下限大于基准碳价阈值和小于碳价阈值下限时, 碳价下限和碳价上下限机制调整较基准情景有助于提高碳价, 但降低市场稳定性和加重碳减排社会总成本。当碳配额供给量上限大于配额阈值上限, 且碳价上限小于基准碳价阈值时, 碳价上限和碳价上下限机制调整较基准情景有助于抑制过高碳价且提高市场稳定性, 但加重了碳减排社会总成本。本研究的碳市场管理启示如下。

首先, 设计政企双层互动博弈配额设定机制, 有助于降低碳配额供需失衡对碳市场效率和稳定性的负面影响。不同机制情景的最优碳配额供给

量不恒等于配额供给量上限,并受企业间减排技术溢出效应影响。作为政策性市场,政府碳配额设定机制对企业碳减排成本影响巨大。欧盟碳市场、我国试点碳市场以及全国性碳市场等多基于基线法和祖父法设定碳配额,然而碳配额设定过程中忽略了企业自身碳减排履约成本最小化需求。跨期碳配额政企双层互动博弈设定机制有效实现了总量控制下政府和企业的利益均衡。市场规制者应根据现阶段碳市场运转情形尝试实施跨期碳配额政企双层互动博弈设定机制,搭建企业减排技术信息交流平台,促进企业减排技术信息共享以避免碳配额严重供需失衡。

其次,科学选择碳价调控机制有助于提升跨期碳市场效率和稳定性。相比基准情景,当碳配额供给量上限大于配额阈值下限,且碳价下限大于基准碳价阈值和小于碳价阈值下限时,碳价下限和碳价上下限机制调整下碳价较高。当碳配额供给量上限大于配额阈值上限,且碳价上限小于基准碳价阈值时,碳价上限和碳价上下限机制调整有助于抑制碳价大幅上涨且提高市场稳定性。碳价和碳配额交易流动性低是碳市场运行初期的普遍难题。市场规制者有必要结合现阶段碳减排目标,科学评估现阶段碳市场交易活跃度、减排履约、市场稳定性等运行现状,有的放矢地采取合适的碳价调控机制以完善碳市场运行管理,可选择

碳价上限机制以避免碳价过高和提高市场稳定性,可选择碳价下限和碳价上下限机制以提高碳价。

第三,合理设定碳价下限范围有助于提升碳市场减排约束力。当碳配额供给量上限大于配额阈值下限,且碳价下限大于基准碳价阈值和小于碳价阈值下限时,提高碳价下限有助于提高碳价,然而加重碳减排成本。碳价下限降低了企业低碳减排成本不确定,提高碳价有助于促进企业碳减排,企业衡量碳价下限与低碳减排投资成本,以实现低成本减排从而达到自身碳减排履约成本最小化。市场规制者有必要在合理选择碳价调控机制的基础上,全面地考虑碳减排成本和碳市场减排履约情况,避免设置过高的碳价下限造成企业碳减排成本过重,最终影响社会经济可持续发展。

本研究尚有一些方向值得进一步研究。首先,本研究基于静态视角探讨碳价调控对碳市场效率和稳定性的影响,尚未考虑外部市场的不确定冲击。其次,本研究考虑碳市场为完全竞争市场,但是我国碳市场机制建设仍未成熟,可能存在市场势力扭曲碳价。因此,未来研究可纳入经济周期、能源价格等随机冲击,探索不完全竞争市场下最优碳价调控机制,以应对市场势力和外部市场不确定冲击对碳市场稳定且有效运行的负面影响。

参 考 文 献:

- [1] Cui J, Wang C, Zhang J, et al. The effectiveness of China's regional carbon market pilots in reducing firm emissions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(52): e2109912118.
- [2] Luan L, Liu P, Mei Y. The impact of pilot carbon market on firms' performance in China [J]. *Energy Economics*, 2025, 142: 108164.
- [3] 陈诗一, 王 畅, 郭 越. 面向碳中和目标的中国工业部门减排路径与战略选择 [J]. *管理科学学报*, 2024, 27(4): 1-20.
Chen Shiyi, Wang Chang, Guo Yue. Strategic measures and pathway towards China's industrial carbon neutrality [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2024, 27(4): 1-20. (in Chinese)
- [4] Zheng J, Li X, Nam K. Impacts of local and regional carbon markets in Hong Kong and China's Greater Bay Area: A dynamic CGE analysis [J]. *Energy Policy*, 2025, 204: 114651.
- [5] Fan X, Chen K, Chen Y. Is price commitment a better solution to control carbon emissions and promote technology investment? [J]. *Management Science*, 2023, 69(1): 325-341.
- [6] 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 Boqiang. China's high-quality economic growth in the process of carbon neutrality [J]. *Economic Research Journal*, 2022, 57(1): 56–71. (in Chinese)
- [7] Chai J, Zhang X, Zhang X, et al. Effects of scenario-based carbon pricing policies on China's dual climate change mitigation goals: Does policy design matter? [J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2023, 8(2): 167–175.
- [8] Zhang C, Chang N. Introducing a floor price in China's national carbon market [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 392: 126599.
- [9] 王梅, 周鹏. 碳排放权分配对碳市场成本有效性的影响研究 [J]. *管理科学学报*, 2020, 23(12): 1–11.
Wang Mei, Zhou Peng. Assessing the impact of emission permit allocation on the cost effectiveness of carbon market [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2020, 23(12): 1–11. (in Chinese)
- [10] 杜兴强, 张心舒, 谢裕慧, 等. 碳排放权交易能否促进企业节能减排? ——基于碳排放权交易试点政策的一项准自然实验 [J]. *管理科学学报*, 2025, 28(7): 22–38.
Du Xingqiang, Zhang Xinshu, Xie Yuhui, et al. Does carbon emission trading promote corporate energy conservation and emission reduction? Evidence from a quasi-natural experiment based on the pilot policy of carbon emission trading [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2025, 28(7): 22–38. (in Chinese)
- [11] Jeitschko T, Kim S, Pal P. Curbing price fluctuations in cap-and-trade auctions under changing demand expectations [J]. *Energy Economics*, 2024, 139: 107804.
- [12] Zhang L, Luo J, Zhu J, et al. Carbon allowance decision optimization with multi-agent simulation: Incorporating behavioral drivers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 392: 126699.
- [13] 钱浩祺, 吴力波. 信息不对称视角下我国工业企业碳排放权设定与定价机制研究 [J]. *环境经济研究*, 2022, 7(1): 36–55.
Qian Haoqi, Wu Libo. Allocation and pricing mechanism of carbon emissions permit of China's industrial firms under asymmetric information [J]. *Journal of Environmental Economics*, 2022, 7(1): 36–55. (in Chinese)
- [14] 朱庆华, 夏西强, 李梦雅, 等. 碳配额分配方法对授权再制造影响研究 [J]. *管理科学学报*, 2024, 27(5): 60–75.
Zhu Qinghua, Xia Xiqiang, Li Mengya, et al. The effect of carbon allowance allocation methods on authorized remanufacturing [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2024, 27(5): 60–75. (in Chinese)
- [15] Geng W, Fan Y. The effect of market power on the inter-temporal allocation of abatement under a rate-based emissions trading scheme [J]. *Energy Economics*, 2024, 136: 107715.
- [16] Broadstock D, Fouquet R, Kim J. Carbon pricing and stock performance: Are carbon prices already more influential than energy prices? [J]. *Energy Policy*, 2025, 206: 114775.
- [17] He Z, Liu Z, Zhang C, et al. How do carbon pricing spillover effects impact green asset price volatility? An empirical study based on the TVP-VAR-DY model [J]. *Economic Analysis and Policy*, 2025, 85: 2162–2179.
- [18] Lau C, Soliman A, Albasu J, et al. Dependence structures among geopolitical risks, energy prices, and carbon emissions prices [J]. *Resources Policy*, 2023, 83: 103603.
- [19] 刘自敏, 朱朋虎, 杨丹, 等. 交叉补贴、工业电力降费与碳价格机制设计 [J]. *经济学(季刊)*, 2020, 19(2): 709–730.
Liu Zimin, Zhu Penghu, Yang Dan, et al. Cross-subsidy, industrial electricity price reduction and carbon price mechanism design [J]. *China Economic Quarterly*, 2020, 19(2): 709–730. (in Chinese)
- [20] Pahle M, Tietjen O, Osorio S, et al. Safeguarding the energy transition against political backlash to carbon markets [J]. *Nature Energy*, 2022, 7: 290–296.
- [21] 李兴, 刘自敏, 杨丹, 等. 电力市场效率评估与碳市场价格设计——基于电碳市场关联视角下的传导率估计 [J]. *中国工业经济*, 2022, (1): 132–150.
Li Xing, Liu Zimin, Yang Dan, et al. Power market efficiency evaluation and carbon market price design: Estimation of pass-through rate based on the perspective of power-carbon market correlation [J]. *China Industrial Economics*, 2022,

- (1): 132 – 150. (in Chinese)
- [22] Wang H , Feng T , Kong J , et al. China’s provincial net-zero emissions effort: High-quality choices behind up-bottom quota schemes [J]. *Resources , Conservation and Recycling* , 2025 , 215: 108118.
- [23] Li J , Wang Z , Wu W , et al. Mitigating electricity supply risks through flexible quota reallocation under cross-sectoral carbon market expansion [J]. *Energy Policy* , 2026 , 209: 114958.
- [24] 汤维祺 , 吴力波 , 钱浩祺. 从“污染天堂”到绿色增长——区域间高耗能产业转移的调控机制研究 [J]. *经济研究* , 2016 , 51(6) : 58 – 70.
Tang Weiqi , Wu Libo , Qian Haoqi. From pollution-heaven to green-growth: Impact of carbon market relocation of energy-intensive-sectors [J]. *Economic Research Journal* , 2016 , 51(6) : 58 – 70. (in Chinese)
- [25] 石 平 , 韩 坤 , 后 锐. 碳交易机制下基于互惠的供应链广告合作与减排成本分担契约 [J]. *管理科学学报* , 2024 , 27(12) : 57 – 81.
Shi Ping , Han Kun , Hou Rui. Co-op advertising and carbon emission reduction cost-sharing contracts in coordinating supply chain with reciprocal behavior under cap-and-trade regulation [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2024 , 27(12) : 57 – 81. (in Chinese)
- [26] 朱帮助 , 江民星 , 袁胜军 , 等. 配额初始分配对跨期碳市场效率的影响研究 [J]. *系统工程理论与实践* , 2017 , 37(11) : 2802 – 2811.
Zhu Bangzhu , Jiang Mingxing , Yuan Shengjun , et al. Exploring the impacts of initial permits allocation on the efficiency of intertemporal carbon market [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice* , 2017 , 37(11) : 2802 – 2811. (in Chinese)
- [27] Jiang M , Li Y , Wang F , et al. Hybrid policies for emission control under asymmetric information: A comparative analysis [J]. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* , 2025 , 69(4) : 766 – 776.
- [28] Mo J , Tu Q , Wang J. Carbon pricing and enterprise productivity: The role of price stabilization mechanism [J]. *Energy Economics* , 2023 , 120: 106631.
- [29] 谭彩霞 , 耿世平 , 谭忠富 , 等. “双碳”下基于多机制多主体的中国动态碳价研究 [J/OL]. *系统工程理论与实践* , 2025: 1 – 21.
Tan Caixia , Geng Shiping , Tan Zhongfu , et al. Study on China’s dynamic carbon price based on multiple mechanisms and entities under the “Dual Carbon” policy [J/OL]. *Systems Engineering: Theory & Practice* , 2025: 1 – 21. (in Chinese)
- [30] Zhang X , Hueng C , Lemke R. Using a price floor on carbon allowances to achieve emission reductions under uncertainty [J]. *Economic Analysis and Policy* , 2023 , 80: 1096 – 1110.
- [31] Ji C , Wang X , Wang X , et al. Design and impact assessment of policies to overcome oversupply in China’s national carbon market [J]. *Journal of Environmental Management* , 2024 , 354: 120388.
- [32] 段宏波 , 汪寿阳. 中国的碳中和: 技术经济路径与政策选择 [J]. *管理科学学报* , 2024 , 27(2) : 1 – 17.
Duan Hongbo , Wang Shouyang. China’s carbon neutrality: Tech-economic pathways and policy options [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2024 , 27(2) : 1 – 17. (in Chinese)
- [33] 许 恒 , 张一林 , 曹雨佳. 数字经济、技术溢出与动态竞合政策 [J]. *管理世界* , 2020 , 36(11) : 63 – 84.
Xu Heng , Zhang Yilin , Cao Yujia. Digital economy , technology spillover and dynamic cooperation policy [J]. *Journal of Management World* , 2020 , 36(11) : 63 – 84. (in Chinese)
- [34] Fang L , Zhao S. On the green subsidies in a differentiated market [J]. *International Journal of Production Economics* , 2023 , 257: 108758.
- [35] 张希良 , 张 达 , 余润心. 中国特色全国碳市场设计理论与实践 [J]. *管理世界* , 2021 , 37(8) : 80 – 95.
Zhang Xiliang , Zhang Da , Yu Runxin. Theory and practice of China’s national carbon emissions trading system [J]. *Journal of Management World* , 2021 , 37(8) : 80 – 95. (in Chinese)
- [36] Hintermayer M. A carbon price floor in the reformed EU ETS: Design matters! [J]. *Energy Policy* , 2020 , 147: 111905.
- [37] Qian H , Ma R , Wu L. Market-based solution in China to finance the clean from the dirty [J]. *Fundamental Research* ,

2024 , 4(2) : 324 – 333.

[38] Seifert J , Uhrig-Homburg M , Wagner M. Dynamic behavior of CO₂ spot prices [J]. *Journal of Environmental Economics and Management* , 2008 , 56(2) : 180 – 194.

Impacts of price regulation on the efficiency and stability in carbon market

HUANG Li-qing¹ , ZHU Bang-zhu^{2*} , WANG Ping³ , JIANG Min-xing⁴

1. College of Mathematics and Informatics , South China Agricultural University , Guangzhou 510642 , China;
2. School of Business , Guangxi University , Nanning 530004 , China;
3. School of Management , Jinan University , Guangzhou 510632 , China;
4. School of Business , Nanjing University of Information Science and Technology , Nanjing 210044 , China

Abstract: Information asymmetry between the government and firms in the carbon market hinders firms from achieving sustainable emission reductions , thereby undermining carbon market efficiency and stability. This paper develops an intertemporal carbon market Stackelberg game model between the government and the firms. Scenarios of the benchmark , the carbon price floor adjustment , the carbon price ceiling adjustment , and the carbon price collars adjustment are constructed. The optimal carbon permit cap is then derived. The impacts of carbon price regulation on carbon market efficiency and stability are explored theoretically and numerically by analyzing a sample of 458 power plants in China's national carbon market. The results reveal that carbon price regulation significantly affects carbon permit cap setting , market efficiency and stability. The carbon permit allocation ceiling and carbon price collars are critical factors influencing carbon market efficiency and stability. When the carbon permit allocation ceiling exceeds the carbon permit threshold floor , and the carbon price floor is greater than the benchmark carbon price threshold but lower than the carbon price threshold floor , carbon price floor and collars adjustments help raise the carbon price. However , these adjustments reduce carbon market stability and aggravate social carbon emission abatement costs. When the carbon permit allocation ceiling exceeds the carbon permit threshold ceiling and the carbon price ceiling is less than the benchmark carbon price threshold , both carbon price ceiling and collars adjustments help prevent a sharp rise in carbon price and increase market stability , but they do not decrease social carbon emission abatement costs. This paper provides theoretical support and policy implications for the construction of an intertemporal carbon market to ensure its effective and stable operation.

Key words: intertemporal carbon market; carbon price regulation; Stackelberg game; market efficiency; market stability