

综合碳定价体系对碳减排增汇的激励机制研究

王群朋¹, 邓浩彭², 邓航¹, 蔡建邦¹, 麻卫平³

(1. 广州航海学院, 航运学院, 广东 广州, 510725; 2. 广州航海学院, 智能交通与工程学院, 广东 广州, 510725;
3. 广州港引航站, 广东 广州 510700)

摘要: 为系统研究综合碳定价体系对碳减排与碳增汇的激励机制及其经济效益, 构建了动态综合碳定价模型, 将碳配额制度、碳税政策与碳交易市场有机整合。基于博弈分析框架, 探讨了企业在多重政策约束下的最优策略, 并动态调整碳税应对市场价格波动。数值试验结果表明, 综合碳定价体系有效提高了碳市场价格, 增加了企业减排成本, 促使其优化排放和投资决策。通过碳汇项目投资, 企业碳汇量显著增加, 验证了碳汇项目在实现双碳目标中的重要作用。结果发现, 综合碳定价体系能够有效激励企业积极减排增汇。碳交易市场为企业提供了灵活的减排选择, 而碳税政策则通过价格信号强化减排动因, 二者协同作用明显。研究成果为相关部门优化碳定价机制、发展低碳经济提供了理论依据和实践指导。

关键词: 碳定价; 碳减排; 碳增汇; 碳交易市场; 碳税政策

中图分类号: TU111.19+5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-8526(2025)01-0074-05

1 引言

全球气候变化形势愈发严峻, 实现碳中和渐已成为国际社会的共同愿景。《巴黎协定》要求各缔约国在本世纪中叶实现全球净零排放。我国在“十四五”规划中也提出完善碳排放权交易市场, 加快构建绿色低碳经济体系。这些宏大目标的达成, 离不开系统化的政策工具支持。其中碳定价机制凭借高效的资源配置与灵活的市场激励, 正逐步成为主导策略^[1]。然而, 碳定价机制的设计与实施仍面临碳价波动频繁、激励力度不足及市场机制稳定性欠佳等诸多问题^[2]。以中国和欧盟的碳市场实践为例, 碳定价机制的潜力与局限性可见一斑。

2023 年, 中国全国碳市场成交量同比增长 300%, 但平均碳价仅维持在 60 元/吨左右, 未能充分激励高碳排企业进行长期减排和技术升级^[3]。

欧盟碳交易体系(EU ETS)则在能源危机冲击下, 碳价从 2018 年的 8 欧元/吨飙升至 2022 年的 90 欧元/吨^[4]。对此, 李艳等^[5]指出, 尽管价格上涨为低碳技术投资创造了条件, 但市场波动加剧提高了企业投资的不确定性, 削弱了减排激励。Stechemesser 等^[6]分析了 41 个国家近 20 年来的 1500 项气候政策, 强调成功的环境政策需在约束与灵活性间取得平衡, 这对碳定价机制设计启示重大。

现有碳定价领域的研究多集中于单一政策工具的效应, 如碳税通过清晰的价格信号直接内化碳排放外部性^[7], 碳交易市场则提供了企业间灵活的减排选择^[8]。然而, 单一政策难以同时兼顾市场效率与技术创新需求^[6,9]。然而, 关于不同政策工具协同效应的研究较为匮乏, 特别是在动态调整机制下, 各工具间的互动关系如何影响企业决策、碳市场价格与碳汇增长, 尚缺乏深入定量分析。鉴于此, 亟需构建综合模型深入分析碳配额制度、碳税

收稿日期: 2024-09-24

基金项目: 广州市教育局高校课程教研室项目(2022KCJYS010); 2024 年广州航海学院大学生创新创业训练计划项目(S20240146)

第一作者简介: 王群朋(1987—), 男, 河南开封人, 讲师, 工学硕士, 主要从事航海气象与海上交通安全保障研究, E-mail: 625543777@qq.com。

政策与碳交易市场的协同效应,以探寻如何平衡减排激励与经济效益。

为此,本研究提出一种综合碳定价体系,综合考虑碳配额制度、碳税政策与碳交易市场。参考Ard和Biagini等^[10]的研究方法,建立企业碳排放与碳汇投资的动态Stackelberg博弈模型,深入剖析碳交易市场与碳税政策的协同作用对碳汇的积极影响。通过对企业碳排放行为、市场价格动态变化及碳汇量演化的量化研究,验证综合碳定价体系如何在不同市场环境 with 政策框架下实现经济效益与环境效益的双赢;同时,进一步探讨综合碳定价体系对“双碳”目标的助推作用,以期构建灵活高效的碳定价体系提供理论依据。

2 基本概念

2.1 碳定价

碳排放是一种典型的公共物品,其非排他性和非竞争性导致了市场失灵,进而引发了资源过度取用的“公地悲剧”。在没有明确产权界定的情况下,企业缺乏足够的激励限制自身的碳排放。碳定价是一种推动低碳发展和减排的经济手段,其形式主要为碳税、碳配额制度和碳交易市场,旨在将碳排放的外部成本内化为价格,使得碳排放不再是“免费”的公共资源使用行为,促进企业和个人为排放买单,进而激励减排增汇。

2.2 碳配额制度

碳配额制度是一种基于市场的减排机制,其核心在于“限额与交易”,即相关机构设定总碳排放上限,并将可交易的限额分配给各排放主体,引导企业在限额内自主减排。企业根据自身实际排放,在市场上灵活地买卖配额以达到排放合规。通过价格信号和市场交易机制,碳配额制度有效激励企业创新技术和优化管理,提升减排效率并投资碳汇项目,最终实现经济效益与环境效益的兼顾。

2.3 碳税政策

碳税是一种内化外部性的庇古税,其基本原理是设定每单位碳排放的固定费用,使碳排放行为的经济成本显现,从而激励减排行为^[11]。碳税政策在提供明确的价格信号的同时还具有相对较低的实施成本和较高的经济效率。然而,碳税也可能带来激励扭曲,产生碳泄漏、抑制经济增长等风险。因此,碳税政策需要配套措施,以确保公平合理的资

源配置并维持长期的减排动力。

2.4 综合碳定价体系

在碳配额制度和碳税政策的基础上,建立碳交易市场可以将碳排放权商品化,通过市场机制控制碳排放量^[6]。政府根据国家设定的总体减排目标,结合各地区和企业的实际情况分配碳排放配额。高碳排放企业的排放量高于其分配的碳配额,需要在市场上购买额外的碳配额或缴纳碳税;而低碳排放企业的排放量低于其配额,可以在市场上出售多余配额。

在博弈分析框架下,企业基于利润最大化原则,综合考虑边际减排成本、碳税额度和碳交易市场价格,选择成本较低的最优策略^[12]。高碳排放企业会选择通过减少排放或购买配额来降低成本;低碳排放企业通过减少碳排放量,增加可出售的碳配额,从而获得额外的经济收益。市场价格信号的调节作用使得高碳排放企业和低碳排放企业都选择对自身最有利的减排策略,最终实现经济效益与环境效益的双赢。

碳配额制度、碳税政策和碳交易体系可以形成良好的协调互补机制。碳配额制度设定排放上限和分配各企业碳排放配额,构成资源配置的基础;碳交易体系经由市场交易,引导资源优化配置;碳税政策则直接定价,提供稳定的价格信号。三者形成合力,在不同经济环境和政策目标下灵活调整^[13]。碳市场价格过低时,碳税可以提供底部支撑,确保碳价格足以激励减排,而在碳市场价格过高时,相关部门可以适当调整碳税税率,以平衡经济负担。

3 构建综合碳定价体系的动态模型

为量化政策组合对碳排放、市场价格动态及碳汇演化的影响,本节构建了集成碳税、碳配额和碳市场三大政策工具的综合碳定价体系,然后采用动态Stackelberg博弈模型^[14]分析政府(Leader)与企业(Follower)的动态交互。

3.1 模型假设

企业在面对碳配额限制、碳税以及碳市场价格时,需要权衡减少碳排放与投资碳汇项目,以作出利润最大化的决策组合。以下提出模型的4个假设:

1) H_1 : 企业的碳排放决策受碳市场价格、碳税政策和碳汇投资机会的影响。

2) H_2 : 碳市场价格遵循随机游走模型, 受市场供需动态变化和碳税的影响。

3) H_3 : 政府根据碳市场价格动态调整碳税以稳定市场价格和激励碳汇投资。

4) H_4 : 碳汇投资能有效增加碳汇量, 并且投资意愿与碳价格和碳税正相关。

3.2 企业决策模型

企业 i 面对碳配额限制、碳税和碳市场价格时, 通过优化碳排放量 E_i 和碳汇投资量 I_i 实现利润最大化, 其目标函数为:

$$\max_{E_i, I_i} [\prod_i (E_i, I_i)] = p_m (A_i - E_i) + \eta_i I_i - c_{e,i} E_i^2 - c_{s,i} I_i, \text{ s. t. } \begin{cases} E_i \leq A_i, \\ E_i, I_i \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_i 为分配给企业 i 的碳配额, p_m 为碳市场价格, η_i 为碳汇收益系数, 表示碳汇项目的经济效益, $c_{e,i}$ 为碳排放成本系数, $c_{s,i}$ 为碳汇投资成本系数。

3.3 碳市场价格动态模型

碳市场价格 p_m 由市场供需关系决定, 同时受企业净排放量和政府政策调整的影响。其动态变化描述为:

$$\frac{dp_m}{dt} = \kappa [\sum_i (E_i - Q_i) - S] + \lambda \frac{dT}{dt}, \quad (2)$$

式中, κ 为价格对市场供需变化的敏感性系数, λ 为碳税对价格调节的灵敏度, S 为碳市场的总供给量, $\sum_i (E_i - Q_i)$ 为市场总净排放量。

根据式(2)可知, 企业的最优排放量 E_i^* 将直接影响 p_m , 形成政策与市场的反馈闭环。

3.4 碳汇动态演化模型

碳汇量指通过碳汇项目吸收和储存二氧化碳的总量, 其随碳汇投资的动态演化为:

$$\frac{dQ_i}{dt} = \delta_i I_i, \quad (3)$$

式中, δ_i 为碳汇转化效率, 表示单位投资带来的碳汇增长量。

3.5 政府决策模型

政府通过动态调整碳税 $T(t)$ 和碳配额 $A_i(t)$, 以最小化社会总成本, 其目标函数为:

$$\min_{T(t), A_i(t)} E \left\{ \int_0^T [\alpha \sum_i c_{e,i} E_i^2 + \beta \sum_i c_{s,i} I_i + \gamma (Q^* - \sum_i Q_i)^2] dt \right\}, \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \int_0^T \sum_i E_i dt \leq E_{\max}, \\ \sum_i Q_i(T) \geq Q^*, \\ T(t), A_i(t) \geq 0. \end{cases}$$

式中, Q^* 为目标碳汇量, E_{\max} 为总排放量上限, α, β, γ 为权重系数, 分别反映减排成本、投资成本与碳汇偏差的相对重要性。

3.6 Stackelberg 博弈均衡

1) 企业最优响应

在政府政策给定的条件下, 通过对式(1)求偏导, 企业可得最优响应策略:

$$E_i^* = \frac{p_m}{2c_{e,i}}, \quad I_i^* = \frac{\eta_i}{c_{s,i}}. \quad (5)$$

式中, E_i^* 和 I_i^* 分别为企业 i 的最优碳排放量和最优碳投资量。

2) 政府动态调控

政府通过动态调整碳税和碳配额, 以稳定碳市场价格和激励减排:

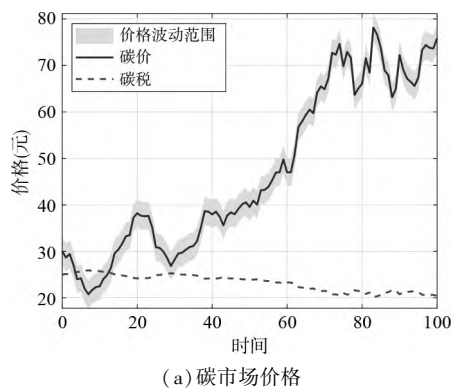
$$T(t) = T_0 + \gamma [p_m(t) - p_0], \quad A_i(t) = A_{i,0} - \delta_i t, \quad (6)$$

式中, T_0 为基准碳税, $A_{i,0}$ 为企业 i 的初始碳配额。

4 模型验证

4.1 数值试验

为了验证模型的合理性, 设计数值试验模拟企业的排放决策、碳市场价格的动态变化以及碳汇量的演化, 以分析不同政策组合的效果。通过数值试验, 获得了碳市场价格、企业排放量和碳汇量随时间的动态变化数据, 并将其可视化, 如图1所示:



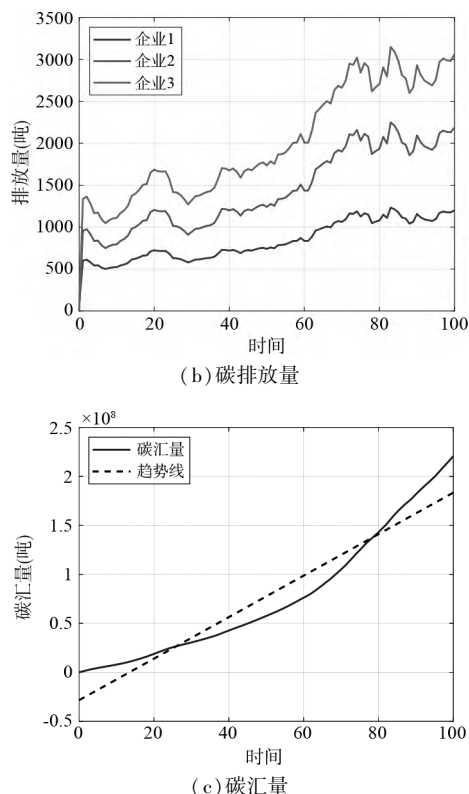


图1 碳市场价格、企业排放量和碳汇量随时间变化图

Fig.1 Plot of Carbon Market Prices, Corporate Emissions, and Carbon Sinks Levels Over Time

4.2 结果分析

数值试验结果表明,碳市场价格随着时间的推移波动上涨,显示综合碳定价体系成功引导了市场的供求关系。碳价上涨进一步增加了企业的碳排放成本,促使企业不得不重新审视其碳排放决策。尽管碳定价体系对大部分企业产生了约束作用,但不同企业的排放行为存在显著差异。部分企业在碳市场价格上涨的情况下依然选择增加排放,可能由于其生产扩张或碳市场中存在足够的配额^[15]。政策实施初期,虽然部分企业的排放量呈现一定的上升趋势,但长期来看,随着碳市场价格的逐步上涨以及政策的持续调整,这些企业终将迫于巨大的经济压力减少排放并增加碳汇投资^[16]。综合碳定价体系为碳中和目标的实现提供了有效的长效激励。企业对碳汇项目的投资显著增加了碳汇量。碳汇项目作为碳减排的重要补充手段,展现出了强大的碳捕获能力,成为实现绿色低碳发展的重要工具。

5 结语

本研究以积极响应国家“双碳”战略目标为导

向,以构建综合碳定价体系为核心,结合碳配额制度、碳税政策与碳交易市场,系统探讨了其对碳减排与经济效益的协同影响。结果表明,该体系能够通过市场化手段优化资源配置,提升政策实施效率,增强企业绿色转型动能,同时验证了碳汇项目在推动经济与生态协调发展中的重要作用。

研究成果可为相关部门提供一定的理论依据和实践指导。通过合理设计碳定价政策,能够在市场价格波动时灵活调整碳税税率,从而确保碳定价机制的有效性,为推动低碳经济发展、实现全球气候目标提供有力支持。特别是在中国这样的新兴市场经济体,综合碳定价体系的实施将有助于实现可持续发展目标,并为其他国家和地区提供参考。

目前本研究还存在一些局限,模型尚未充分考虑复杂的外部变量,且仍需进一步探索企业的异质性反应。未来研究将聚焦以下几点:一是扩展模型,将更多市场因素纳入考量,如国际碳市场的影响、不同国家间政策的协调等;二是开展案例研究,通过案例分析验证模型应用的实际效果;三是研究碳市场与其他环境政策之间的相互作用,找到更全面的低碳发展策略。通过这些努力,将进一步发挥综合碳定价体系的潜力,更好地推动低碳经济发展。

参考文献:

- [1] World Bank. 2024. State and Trends of Carbon Pricing 2024. Washington, DC: World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/41544> License:[CC BY 3.0 IGO].
- [2] 李大元,曾益,张璐. 欧盟碳排放权交易体系对控排企业的影响及其启示[J]. 研究与发展管理,2017,29(6):91-98.
- [3] 薛飞,周民良. 中国碳交易市场规模的减排效应研究[J]. 华东经济管理,2021,35(6):11-21.
- [4] 国际财经研究专家工作室国合司“双碳”课题组,袁浩峻,岳书旭,等. 欧盟碳市场价格变化分析及对我国的启示[J]. 中国财政,2023,(9):81-83.
- [5] 李艳,李南萱,王鑫雨,等. 中国区域碳市场发展对碳减排的影响研究[J]. 中国市场,2024,(15):1-4.
- [6] Stechemesser A,Koch N,Mark E,et al. Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades[J]. Science,2024,385(6711):884-892.
- [7] 杨永杰. 碳排放的外部性理论和内部化路径[J]. 生产力研究,2013(12):53-54,77.
- [8] 徐新扩,刘梦. 中国碳市场减排效应研究[J]. 合作经济与科技,2024(8):70-74.
- [9] AHMAD M,LI X,WU Q. Carbon taxes and emission trading systems: Which one is more effective in reducing carbon emissions? —A meta-analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 476: 143761.
- [10] AïD R,BIAGINI S. Optimal dynamic regulation of carbon emissions

- market: A variational approach[J]. arXiv preprint arXiv:2102.12423, 2021.
- [11] 张晓盈, 钟锦文. 碳税的内涵、效应与中国碳税总体框架研究[J]. 复旦学报(社会科学版), 2011(4): 92 - 101.
- [12] 谢晶晶, 奚祥胜. 基于合作博弈的碳配额交易价格形成机制研究[J]. 管理评论, 2016, 28(2): 15 - 24.
- [13] 王硕, 张丽华. 国际碳交易机制复杂化及中国应对[J]. 国际展望, 2021, 13(3): 42 - 57, 153 - 154.
- [14] ZHOU D, AN Y, ZHA D, et al. Would an increasing block carbon tax be better? A comparative study within the Stackelberg Game framework[J]. Journal of environmental management, 2019, 235: 328 - 341.
- [15] 王明喜, 鲍勤, 汤铃, 等. 碳排放约束下的企业最优减排投资行为[J]. 管理科学学报, 2015, 18(6): 41 - 57.
- [16] 余萍, 刘纪显. 碳交易市场规模的绿色和经济增长效应研究[J]. 中国软科学, 2020(4): 46 - 55.

Research on the Incentive Mechanism of Integrated Carbon Pricing System for Carbon Emission Reduction and Sink Increase

WANG Qun-peng¹, DENG Hao-peng², DENG Hang¹, CAI Jian-bang¹, MA Wei-ping³

(1. School of Shipping and Maritime Studies, Guangzhou Maritime University, Guangzhou Guangdong 510725, China; 2. School of Intelligent Transportation and Engineering, Guangzhou Maritime University, Guangzhou Guangdong 510725, China; 3. Guangzhou Maritime Pilot Station, Guangzhou Guangdong 510700, China)

Abstract: To systematically analyze the incentive mechanisms and economic benefits of an integrated carbon pricing system on carbon emission reduction and sink increase, a dynamic integrated carbon pricing model was developed. This model integrated the carbon allowance system, carbon tax policy and carbon trading market. Within a game-theoretic framework, the optimal strategies of firms under multiple policy constraints were examined, and carbon taxes were dynamically adjusted to address market price fluctuations. Numerical experiments demonstrate that the integrated carbon pricing system effectively increase carbon market prices, raise firms' emission reduction costs, and prompt optimized emission and investment decisions. Investments in carbon sequestration projects significantly enhance carbon sequestration levels, highlighting their critical role in achieving dual carbon goals. The results indicate that the integrated carbon pricing system effectively motivate firms to actively reduce emissions and enhance sequestration. The carbon trading market provide flexible options for emission reduction, while the carbon tax policy reinforce emission reduction incentives through price signals, showcasing strong synergistic effects. This study offers theoretical insights and practical guidance for optimizing carbon pricing mechanisms and fostering low-carbon economic development.

Key words: carbon pricing; carbon reduction; carbon sequestration; carbon trading market; carbon tax policy; game-theoretic analysis