

中国碳排放权交易市场价格波动 机制及实证*

——基于双层演化博弈视角的研究

王杰铖 高文武 陈诗一

内容提要:基于中国环境治理的属地管理模式,引入重叠利益理论分析框架,厘清企业、地方政府与中央政府三方主体的层级特点。然后,分别从局部和整体两个视角构建企业、地方政府与中央政府的双层演化博弈模型。在此基础上,引入拟合优度和事件研究法的思想,利用中国区域碳排放权交易市场(碳市场)的日度碳交易价格(碳价)数据开展实证检验,进而揭示中国碳价波动形成机制、推演碳价波动特征、甄别关键影响因素。研究发现:(1)经济增长和环境保护的双重目标会促进地方政企联动,催生碳市场参与者的投机行为,导致碳价大幅波动,致使碳价收益率分布呈现“尖峰厚尾”特征;(2)中央环保监管短期内会冲击碳市场需求,加剧碳价大幅波动频率,引致碳价收益率分布呈现“尖峰翘尾”特征;(3)中央环保监管常态化有助于稳定碳市场需求,促进碳价收益率分布特征由“尖峰翘尾”转为“尖峰厚尾”。

关键词:重叠利益理论 双层演化博弈 碳交易价格 波动机制 尖峰翘尾

一、引言

高碳行为引发全球变暖,气候治理已成为世界关注的核心议题(陈诗一,2022;王群勇等,2026),也是推动中国经济高质量发展的重要途径(陈诗一和陈登科,2018)。作为当前全球最大的发展中国家以及碳排放总量最高的国家,我国政府统筹国内国际“两个大局”,作出实现碳达峰碳中和的重大战略决策,展现了应对气候问题的大国担当(林伯强,2022)。2025年12月,习近平总书记在中央经济工作会议上进一步强调“双碳”工作的引领性,提出“坚持‘双碳’引领,推动全面绿色转型”,并指示“加强全国碳排放权交易市场建设”。2026年的政府工作报告中将“单

* 王杰铖,南华大学经济管理与法学学院,邮政编码:421001,电子信箱:jxwjc05@163.com;高文武(通讯作者),安徽大学大数据与统计学院,邮政编码:230601,电子信箱:wenwugao528@163.com;陈诗一,复旦大学经济学院,邮政编码:200433,电子信箱:shiyichen@fudan.edu.cn。本文研究得到南华大学博士科研启动基金项目(5524QD015)、国家自然科学基金面上项目(12271002)、国家自然科学基金创新研究群体项目(72121002)的资助。作者感谢陈登科、李大海、陆凤芝、许启发和匿名专家提供的建设性意见。当然,文责自负。

位国内生产总值二氧化碳排放降低3.8%左右”纳入年度主要预期目标,并指出“进一步扩大碳排放权交易市场覆盖范围”。由此可见,碳排放权交易(碳交易)机制是实现“双碳”目标的重要抓手。

碳交易机制源于《京都议定书》对不同类型国家减排义务和方式的差异化规定,其核心目标是通过市场化手段实现社会总减排成本的最小化。具体而言,政府赋予企业在一定时期内的碳排放权额度(碳配额),企业可根据自身排放与配额状况,在履约期末通过交易的方式缴足与其实际排放量相等的配额量(张希良等,2021)。在此背景下,我国积极推动区域碳排放权交易市场(以下简称“碳市场”)建设,自2013年起在广东、湖北、上海等八省市相继建立区域碳市场,并于2021年7月16日上线全国碳市场。^①

有别于传统金融市场,碳市场是政府约束和市场行为的共同产物。作为一种新兴政策性市场,其成立初期面临市场效率低、信息披露制度不完善、政策敏感性强等风险隐患,表现出更高的风险不确定性(特征性事实如图1所示),容易滋生价格“泡沫”并积聚金融风险(田静和张骏,2025;史永东等,2025)。同时,相关研究表明,碳市场还会与传统市场产生风险溢出效应,影响整个国家的宏观经济运行(刘志峰等,2023)。因此,碳市场的健康稳定发展对中国经济高质量发展起着至关重要的作用。在市场经济条件下,碳价的稳定性是反映碳市场健康发展的“晴雨表”,厘清碳价的形成机制对稳定碳价至关重要。为此,碳市场作为一个有机整体,其高度的政策相关性是否会影响碳价波动?我国环境治理中的“中央—地方”委托代理关系是否会诱发碳价波动新特征,以及能否通过其价格波动特征溯源风险成因?这一系列问题的剖析,有助于推动碳市场的平稳健康发展。

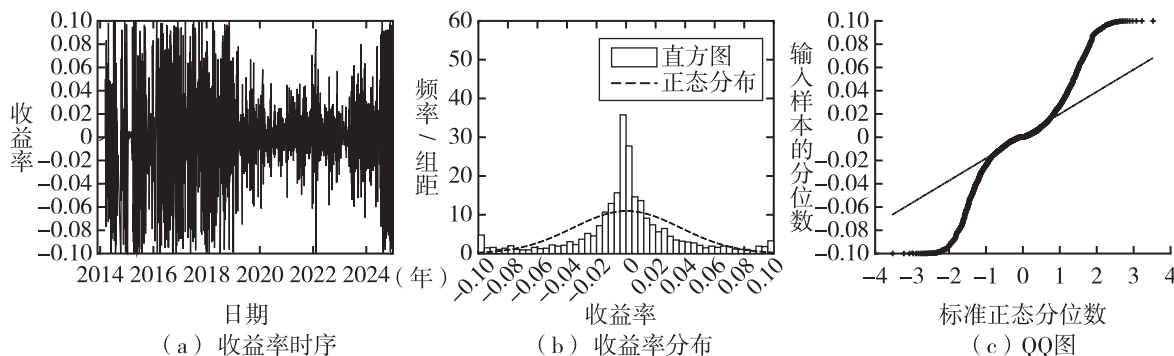


图1 碳价收益率特征性事实^②

碳市场采用数量型碳定价机制,政府核定的碳减排标准决定了市场上的碳配额数量(张希良等,2021)。因此,碳配额的设定和分配是碳市场设计过程中的基础问题(陆敏和方习年,2015)。学界围绕这一问题开展了大量研究,提出了历史排放

① 如未特别说明,本文“碳市场”均指强制型碳市场(碳排放权交易市场)。

② 以广东碳市场成立至2025年1月1日的日度收益率数据为例,收益率的计算过程见后文实证部分。图1清晰可见碳价收益率极端波动频发,既呈现“尖峰”一般性特点,又表现出尾部风险聚集程度远高于传统“厚尾”的差异性特点。

法、历史强度法、基准法等多种配额设定方法,但目前尚未形成统一共识,实践中仍面临诸多争议。当前,由于各国碳市场仍存在总量过剩、鞭打快牛、双重计算、基准随意、拍卖过少、规则不透明等诸多问题,导致在碳市场的机制设计上也有所差异(钱浩祺等,2019)。与欧盟碳市场不同,中国碳市场主要采用“自下而上”碳排放总量的确定方式和以历史法为主、基准法为辅的配额核算方式(胡珺等,2023)。而根据市场供求理论可知,在纯粹的碳市场中,当碳排放权供给缺乏弹性时,一旦需求侧受到冲击,其吸纳方法只能体现在碳价上。由此可见,这种数量型碳定价机制在增强碳减排量确定性的同时,伴随着碳价不确定性风险的增加,进而引发学者们对碳价波动问题的广泛关注。

学者们对碳价波动问题的研究主要从碳价波动特征及其影响因素两个方面开展。在碳价波动特征研究方面,众多学者采用广义自回归条件异方差(Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity, GARCH)族及其衍生模型(Zhou & Li, 2019; 公维凤等, 2022)、小波分析(吕靖焯等, 2021)、经验模态分解(Cao & Xu, 2016)等方法。研究表明,碳价不符合正态分布假设,既包含尖峰厚尾、异方差、波动聚集性等一般性波动特征,也包含非线性、发散性、长记忆性、分形、多尺度等特殊波动特征。在影响因素研究方面,学者们分别从政策、能源(刘自敏等, 2020)、宏观经济(Chevallier, 2009)、极端天气(易兰等, 2017)及气候情绪(刘振华等, 2025)等不同因素考察其对碳价波动的影响。其中,政策及其监管问题被普遍认为是影响碳价波动的重要因素(Blyth & Bunn, 2011; Christiansen et al., 2005)。其原因在于,碳市场区别于传统市场的最大特点在于其政策化价值特征。而政策及其监管问题内生于政府和企业的行为选择。政府和企业作为碳市场的两大核心主体,往往存在不同的目标需求,进而可能通过碳市场形成博弈,并反映于政府和企业的碳减排政策执行力中。为此,一些学者从博弈视角探讨了政府和企业碳减排行为之间的互动关系。例如,方国昌等(2024)通过演化博弈模型分析了不同条件下的地方政府和企业的碳减排策略组合。

综上所述,在传统风险管理框架下,学者们已对碳价的波动性及极端值开展了广泛的实证研究,但大多聚焦于波动聚焦性、非线性、发散性等特征的描述,而鲜有对特征成因的探讨,也未能充分考虑碳市场所特有的制度性约束。然而,碳市场有别于传统金融市场,本质上是一种政府主导的市场型规制工具,其价格不仅受市场供需规律影响,更深度嵌入了国家的制度结构(黄泰岩, 2025)。另外,以上研究虽发现碳价波动存在“尖峰”和“厚尾”等现象,但大多将其归因于市场微观结构或外部宏观冲击(如原油价格波动、宏观经济周期等),未能深刻剖析制度性冲击在碳价形成中的内生作用及其表现形式。因此,本文立足于我国政治集中统一和经济分级管理的制度特征,聚焦碳市场特有的政策化属性,探究该属性是否会诱发碳价形成新的差异化波动特征,并阐释其背后的形成机制。具体而言,首先,本文基于我国环境治理模式引入重叠利益理论,结合现实中各博弈主体的有限理性特点,分析各主体的博弈行为。其次,分别从局部和整体两个视角出发,构

建碳交易驱动下的企业、地方政府和中央政府双层演化博弈模型,进而厘清碳价内生动态演化机制,推演出碳价波动新特征。在整体视角上,中央政府的监管选择通过“激励—约束”机制影响地方政府和企业的行为;在局部视角上,地方政府与企业的博弈行为则决定了碳配额的实际供求关系并反映于碳价波动中。在这种特定的制度环境下,本文推演出,碳价不仅会呈现常规的波动特征,更可能在监管作用下诱发新的差异化波动模式,即碳价序列可能表现出“尖峰翘尾”的独特特征。最后,基于中国区域碳市场的日度碳价数据,借鉴拟合优度、Anderson-Darling (AD)检验以及事件研究法的思想,构建“尖峰翘尾”波动特征的识别方法,并实证验证理论分析的正确性。

本文的创新与边际贡献如下:第一,将重叠利益理论引入博弈主体的动态行为逻辑分析,拓展了重叠利益理论的应用范畴。通过引入重叠利益理论分析框架,剖析我国环境治理模式,厘清中央政府的监管选择、地方政府的履责行为与企业的减排行为之间的利益交叉与博弈时序。第二,基于我国制度结构的特点,分别从局部和整体两个视角构建了递进式的双层演化博弈模型,形成了多层次、多主体协同分析的研究视角。通过依据各方主体的博弈时序和层级特点,引入碳交易和公众意愿约束,构建中央政府、地方政府与企业的双层演化博弈模型,甄别影响因素并分析其影响路径。第三,在碳价形成机制中纳入制度结构带来的内生作用,并推演出“尖峰翘尾”新波动特征,为理解我国碳市场的运行机理提供了新的研究思路。基于碳市场的政策化属性,引入演化博弈模型推演制度结构对碳价的影响路径和表现形式,进而借鉴拟合优度的思想,给出“尖峰翘尾”新波动特征的定义和量化识别方法,丰富了资产价格波动特征的类别,并借鉴事件研究法,验证政策冲击是该特征形成的重要驱动因素,有助于完善我国金融市场风险防范体系。

本文安排如下:第二部分为理论分析,运用重叠利益理论阐释中央政府、地方政府与企业三者之间的博弈时序,构建演化博弈模型以揭示博弈机制与碳价波动之间的内在关联,进而推演出我国碳价波动新特征,并甄别影响碳市场稳定性的关键因素;第三部分通过数值仿真与实证分析验证上述理论分析的有效性;最后,总结全文并给出相应的政策建议。

二、理论分析

(一)重叠利益理论分析框架

参考齐杏发(2012)的研究工作,本文首先引入重叠利益理论分析框架解释空气污染治理中各方主体的行为逻辑,如图2所示。在图2(a)中, A 区域是企业利益 B 和地方政府利益 C 的交集。在图2(b)中, D 区域表示公众利益; A_1 区域表示地方政府、企业和公众利益的交集; A_2 区域表示地方政府和企业利益的交集(聂军和柳建文,2014)。

在我国制度背景下,中央政府和地方政府形成了一种委托代理关系,地方政府

在监督企业生产活动、发展地方经济(以GDP衡量)上具有一定的自主权(聂辉华, 2025; 祁毓等, 2024)。污染治理的管理模式便属于这一制度特点下的属地管理(尹振东, 2011), 有别于工商、税收等部门的垂直管理模式, 它直接受各地方政府管制(孙晓华等, 2022)。因此, 治理过程中最基础的主体为地方政府和企业。其中, 企业以追求利益最大化为行动指南, 地方政府则面临经济增长的压力(周黎安, 2007)。在此背景下, 地方政府与企业存在“共同利益”, 即位于A区域的情形。接下来, 通过一个“囚徒困境”的例子来更清晰地阐述形成过程。

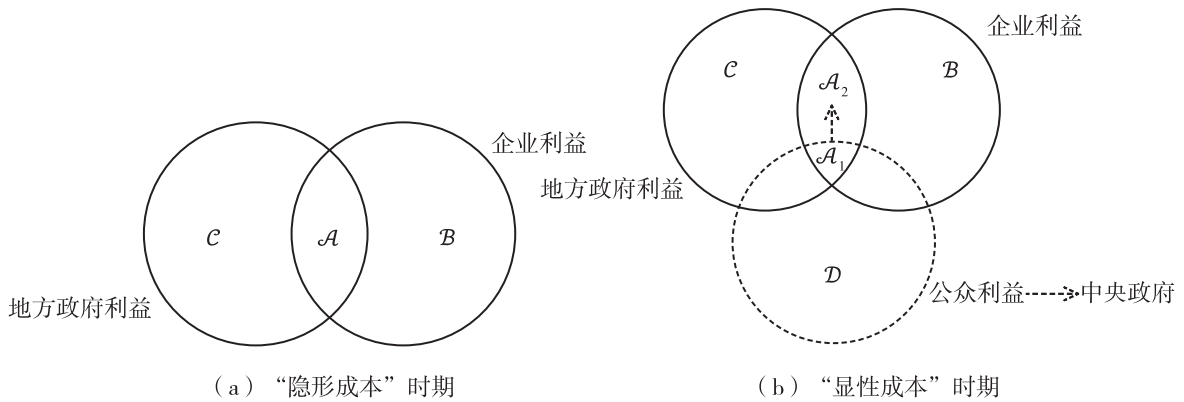


图2 污染治理下不同主体的重叠利益理论分析框架

假设两家企业1和2, 企业1使用非低碳技术的单位产品生产成本为1800元/吨, 企业2使用低碳技术的单位产品生产成本为2000元/吨。同时, 假设产品市场是充分竞争市场, 且均衡价格为1900元/吨, 那么企业1会更快发展并打败企业2。因此, 在理性预期到该结果的前提下, 企业2不得不选择非低碳技术生产。同时, 该情景也适用于地方政府。当不同地区的政府面临经济增长竞争时, 那么地方政府可能会与企业联动, 放松对非低碳生产技术的环境监管, 从而获取经济的高速增长, 导致污染物排放量激增。

当然, 随着全球气候恶化以及公众对生活质量需求的提高, 公众逐渐意识到环境污染造成的负外部性, 进而成为第三方主体介入, 影响地方政府和企业的行为, 形成图2(b)中的 \mathcal{A}_1 区域和 \mathcal{A}_2 区域。此时, 中央政府以达成环境治理目标为政策导向进行宏观调控, 致使地方政府面临经济增长考核和环境治理两类目标。因此, 地方政府既是环保政策的实施者和监督者, 又是经济增长“晋升锦标赛”的参与者, 成为整个治污体系中的关键环节(严成樑等, 2024)。然而, 由于生产信息的不对称性以及公众缺乏执法权, 地方政府和企业实际上处于主导地位, 公众则更多扮演约束方或隐性主体的角色, 三方主体的力量并不完全“对等”(\mathcal{A}_2 大于 \mathcal{A}_1)。在经济增长的目标驱动下, 公众的环保利益诉求可能难以得到有效回应或实现(位于 \mathcal{A}_2 区域的情形)。但是, 当气候恶化和环境污染等负面影响累积至公众意愿强烈到一定程度(例如发生群体性事件)时, 会引发社会稳定成本的骤增。为维持社会稳定, 中央政府将代替公众成为第三方主体, 对地方政企实施强制性监督, 如开展环保约谈、要求企业停产等, 以期推动地方政企目标的转变。然而, 动态地看, 受限于监管

成本以及地方政企联动影响程度的变化,中央政府可能形成一种周期性的监管或宏观调控。石庆玲等(2017)的实证研究则佐证该情形的存在,在属地管理模式下,中央环保约谈的空气污染治理效应在短期内有效。

综上所述,中央政府和地方政府的委托代理关系构建了以中央政府为“发动机”、地方政府为“传动轴”、企业为“四驱”的减碳体系。其中,地方政府与中央政府和企业的“契合度”是推动碳减排工作的关键因素,也是导致碳减排管理呈现区域性的重要原因,或将加剧碳市场风险。地方政府的双重角色容易诱发地方政府在碳减排策略选择中呈现“跷跷板”态势,甚至逐步与企业形成联动,加剧碳市场的信息不对称性,削弱碳市场的自我调节能力。中央政府在特定情景下的监管措施将对地方政企产生“立竿见影”的减排效应,但往往面临短期专项治理困境,对碳市场需求形成短期冲击,加剧碳价的不确定性。下面,基于上述理论分析框架,进一步引入演化博弈模型,模拟刻画各方主体间的动态互动关系,并综合局部和整体两个视角下的演化博弈模型,探究我国碳价波动形成机制、特征和稳定性。

(二)演化博弈模型

经典博弈模型建立在双方完全理性的假设前提下,有别于经济学假说中所认为的经济参与者具有有限理性的特征(李仲飞等,2015)。诺贝尔经济学奖获得者西蒙(2021)在经典著作《管理行为》中认为:现实环境中企业决策者通常选择“满意解”而非“最优解”,会在“够用”标准处停止搜索。同时,周黎安(2008)对我国政策落地过程的剖析工作也表明,地方政府往往遵循“先试点一再推广”的渐进逻辑,符合有限理性假设。因此,基于有限理性假设剖析碳交易背景下的政企博弈行为,探究其与碳价之间的关系更具现实意义。演化博弈模型认为博弈双方是有限理性的,双方的策略选择会根据对方的行为反馈进行调整,最终达到均衡状态。为刻画博弈主体采用某一特定策略的频数,进而推演博弈过程,参考Smith & Price(1973)的研究设计,构造复制动态方程:

$$\frac{du(t)}{dt} = u(t)[\omega_i(\Delta) - \bar{\omega}_i] \quad (1)$$

其中, $u(t)$ 表示博弈主体选择策略 Δ 的概率, $du(t)/dt$ 表示 t 时刻博弈主体选择策略 Δ 的增长率, $\omega_i(\Delta)$ 为选择策略 Δ 的期望收益, $\bar{\omega}_i$ 表示两种策略的平均期望收益。借助复制动态方程,演化博弈模型的稳定策略均衡解(Evolutionary Stable Strategy, ESS)求解过程如下(谢识予,2023):

假设博弈双方(主体1和主体2)的博弈矩阵基本形式为表1。

假设博弈主体选择策略 Δ_1 的概率为 x ,选择策略 Δ_2 的概率为 $1-x$ 。假设 g 为双方都采取策略 Δ_1 时的收益, c 为双方都采取策略 Δ_2 时的收益。当博弈主体策略选择组合为 (Δ_1, Δ_2) 和 (Δ_2, Δ_1) 时,主体1的收益分别为 k 和 f ,主体2的收益分别为 f 和 k 。令 $Q_1(Q_2)$ 为博弈主体选择策略 $\Delta_1(\Delta_2)$ 时的期望收益, \bar{Q} 为整体平均期望收益,则有:

$$\begin{aligned} Q_1 &= xg + (1-x)k \\ Q_2 &= xf + (1-x)c \\ \bar{Q} &= xQ_1 + (1-x)Q_2 \end{aligned} \tag{2}$$

代入式(1)得:

$$\begin{aligned} F_{(*)}(x) &= \frac{du(t)}{dt} = x(Q_1 - \bar{Q}) = x(1-x)(Q_1 - Q_2) \\ &= x(1-x)[k - c + x(g - f - k + c)] \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)表明,所对应策略主体比例的增长率等于该策略得益与主体平均得益之差。 $Q_1 - \bar{Q}$ 大于0表示该策略占比趋于增长,小于0表示趋于衰减,等于0称为动态系统稳态,据此可判断出主体的频数变化趋势。令 $F_{(*)}(x) = 0$ 可求出三个不同的解 $x_1 = 0, x_2 = 1, x_3 = (c - k)/(g - f - k + c)$ 。其中使得 $F_{(*)}(x)$ 的一阶导数 $F'_{(*)}(x)$ 小于零的解称为演化博弈模型的ESS。

表 1 博弈矩阵

博弈 双方		主体 2	
		策略 A_1	策略 A_2
主体 1	策略 A_1	g	k
	策略 A_2	f	c

(三)地方政府和企业博弈模型

根据上述理论分析得到博弈时序和演化博弈模型的基础知识,从地方政企的局部视角出发,引入碳交易因素,建立地方政府和企业的演化博弈模型,探讨双重目标下地方政府和企业博弈策略与碳价波动之间的作用机制。

1. 基本假设

碳交易作为一种有效的市场手段,影响地方政企的行为模式,可能促使地方政企自发趋于最优减排路径。因此,构建以地方政府 G 和企业 E 为两大博弈主体的碳减排演化博弈模型,揭示碳交易因素对地方政企双方博弈策略的影响路径。^①

假设地方政企均为有限理性的博弈者,在碳减排过程中,企业可以选择“是”与“否”,地方政府可以选择“履责”或“不履责”。 T 为当期分配的总碳配额,当前的配额分配方式以免费分配为主、有偿分配为辅; α 为免费分配的占比。假设企业选择“是”时收益为 R_1 ,需要付出的减排成本为 C_1 ,碳排放量为 T_1 ,此时 T_1 往往低于免费碳配额 αT ,则企业可通过出售碳配额获益 $P_1 = p_1(\alpha T - T_1)$,其中 p_1 为碳交易价格;选择“否”时生产经营收益为 R_2 ,碳排放量为 T_2 ,此时 T_2 往往高于免费碳配额 αT ,则碳配额购置成本为 $P_2 = p_1(T_2 - (1 + \beta)\alpha T) + p_2\beta\alpha T$ 。其中, β 为中国核证自愿减排量(China Certified Emission Reduction, CCER)的可抵消比例, p_2 为CCER的购买价格。这里,CCER市场为自愿型碳市场,区别于碳排放权交易市场的强制性,企业可

① 因篇幅所限,地方政企演化博弈模型的基本参数设置及说明表详见本刊网站登载的附录。

通过自愿购买 CCER 来抵消一定比例的应缴配额。假设地方政府选择“履责”时的成本为 C_2 ，在企业减排（不减排）时的收益为 $U_1(U_2)$ 。根据方国昌等(2024)的研究，地方政府在履责过程中可通过交易手续费、会员费等方式获取碳交易利润，交易额分配系数为 θ 。此时，地方政府从碳交易中的获益分别为 θP_1 和 θP_2 。同时， R_3 表示减排带来的企业品牌溢价等额外总收益，在履责情形下地方政府可以与企业分享该部分收益。若地方政府不履责，则无法分得碳市场的成果，企业也无须进行碳交易。此外，地方政企在碳减排工作中通常不会采取完全积极或消极的行为策略。为便于分析，对双方的行为进行了相对的界定，以参数间的差距（如 R_1 和 R_2 、 U_1 和 U_2 ）表征不同行为（减排和不减排）的差异。由上述基本假设构建地方政企的博弈矩阵。^①

2. 模型构建

根据博弈矩阵和演化博弈理论(式(1)—(3))，可导出政企双方行为概率随时间变化的博弈系统 H_1 ：

$$\begin{cases} F_C(x) = dx/dt = x(1-x)(y\theta P_1 - y\theta P_2 + 0.5yR_3 + \theta P_2 - C_2) \\ F_E(y) = dy/dt = y(1-y)(xP_1 + xP_2 - 0.5xR_3 + R_1 - C_1 + R_3 - R_2) \end{cases} \quad (4)$$

进一步，令 $F_C(x)$ 和 $F_E(y)$ 为 0，可得系统 H_1 在区域 $[0, 1]^2$ 上有五个均衡点： $A(0, 0)$ 、 $B(0, 1)$ 、 $C(1, 1)$ 、 $D(1, 0)$ 、 $Z(w_0, v_0)$ ，其中 $0 \leq w_0 = (C_1 - R_3 + R_2 - R_1) / (P_1 + P_2 - 0.5R_3) \leq 1$ ， $0 \leq v_0 = (C_2 - \theta P_2) / (0.5R_3 + \theta P_1 - \theta P_2) \leq 1$ 。这里， $A(0, 0)$ 、 $C(1, 1)$ 分别对应于（不减排，不履责）策略、（减排，履责）策略， $B(0, 1)$ 和 $D(1, 0)$ 分别对应于（不减排，履责）策略、（减排，不履责）策略， $Z(w_0, v_0)$ 是这四个策略的一个临界点。

接下来，分析这些均衡点的稳定性。为此，根据式(4)构建雅可比矩阵：

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{dF_C(x)}{dx} & \frac{dF_C(x)}{dy} \\ \frac{dF_E(y)}{dx} & \frac{dF_E(y)}{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-2x)(y\theta P_1 - y\theta P_2 + 0.5yR_3 + \theta P_2 - C_2) & x(1-x)(\theta P_1 - \theta P_2 + 0.5R_3) \\ y(1-y)(P_1 + P_2 - 0.5R_3) & (1-2y)(xP_1 + xP_2 - 0.5xR_3 + R_1 - C_1 + R_3 - R_2) \end{bmatrix}$$

经过计算，得到五个均衡点演化相图如图 3(a) 所示。^②

由图 3(a) 可知，地方政企演化博弈系统存在两个 ESS 点 $A(0, 0)$ 和 $C(1, 1)$ 。当两条模仿者动态曲线均收敛于 $A(0, 0)$ 时，地方政企消极应对碳减排工作成为常态。此时，碳市场的受关注程度低，整体碳市场参与度与活跃度低，受到外部冲击时价格波动幅度大。当两条模仿者动态曲线均收敛于 $C(1, 1)$ 时，地方政企积极推动碳减排工作成为常态。此时，碳市场的受关注程度高，其潜藏的风险能得到市场参与

① 因篇幅所限，地方政企的博弈矩阵详见本刊网站登载的附录。

② 因篇幅所限， $\det(J_1)$ 和 $\text{tr}(J_1)$ 的表达式、稳定性分析详见本刊网站登载的附录。

主体的及时调整和纠正,有利于发挥市场自我调节机制,整体碳市场参与度与活跃度高,受到外部冲击时价格波动较小。点 $Z(w_0, v_0)$ 是判断两条动态曲线收敛于 $A(0, 0)$ 或 $C(1, 1)$ 的关键临界点。

下面,分析各模型参数变动对演化博弈策略的影响趋势。为此,令区域BCDZ的面积为 S_1 ,则有:

$$S_1 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{C_1 - R_3 + R_2 - R_1}{P_1 + P_2 - 0.5R_3} + \frac{C_2 - \theta P_2}{0.5R_3 + \theta P_1 - \theta P_2} \right) \quad (5)$$

当 $S_1 > 0.5$ 时,博弈双方有更高的概率趋向于(减排,履责)策略,反之,则趋向于(不减排,不履责)策略。因此,可借助 S_1 来分析模型的参数变动对博弈双方策略选择的影响趋势。对式(5)左右两边,分别关于模型参数求偏导,可以得到以下结论。^①

地方政企选择推动碳减排工作的成本 C_1 和 C_2 与 S_1 负相关,表明地方政企减排成本越高,鞍点 $Z(w_0, v_0)$ 向 $A(0, 0)$ 点靠近,形成(不减排,不履责)的概率越高。同时,中国各区域碳市场所处地域经济发达程度有较大的差异性,经济发达区域的企业单位减排成本通常高于欠发达地区,导致经济发达地区政企博弈策略选择收敛于均衡点 $A(0, 0)$ 的概率要高于经济欠发达地区,(不减排,不履责)策略的可能性更大。收益 P_1 、成本 P_2 、系数 θ 与 S_1 正相关,表明碳市场越活跃,鞍点 $Z(w_0, v_0)$ 向 $C(1, 1)$ 点靠近,地方政企有更大的概率选择(减排,履责)策略,此时碳市场表现越稳定,碳价波动越小。此外,因 P_1 和 P_2 均与 S_1 正相关,由 $P_1 = p_1(\alpha T - T_1)$ 和 $P_2 = p_1(T_2 - (1 + \beta)\alpha T) + p_2\beta\alpha T$ 分析可知,随着碳减排工作的推动, P_1 和 P_2 都会增大。而 α 、 β 、 T 、 T_1 和 T_2 短时间内不会变动,所以 p_1 会上升。预见到该情况的发生,企业会选择购买CCER来降低总成本,甚至发生 p_2 大于 p_1 的短期“倒挂”现象。长期来看,CCER的碳抵消机制有利于 p_1 的稳定,最终趋于 $p_1 \approx p_2$ 。进一步联立 P_1 和 P_2 ,可得 α 的均衡解为: $\alpha = [p_1(T_1 + T_2)] / [(p_1(2 + \beta) - p_2\beta)T] \approx (T_1 + T_2) / (2T)$ 。表明随着碳减排技术的提升, T_1 和 T_2 会下降,免费碳配额分配的占比 α 会越来越小,由此可见,有偿碳配额分配是未来的发展趋势,例如碳配额拍卖的形式。

事实上,上述(减排,履责)和(不减排,不履责)在现实中也有体现。例如,在某市“可再生能源示范区”,地方政府与企业创建协作机制,用“资源+土地+政策”换取“资本+技术+产业”,实现从绿电到绿氢再到绿色产业的跨越,成为地方经济增长新支柱。在这一模式下,地方政企双方通过让渡短期收益,共同分享绿电溢价和产业升级带来的长期红利,实现了环境效益与经济效益的协同增长。反观某钢铁公司,作为当地支柱企业,长期开发高碳违法项目。而地方政府因对其经济增长贡献存在较强依赖,放松环境监管要求,导致碳排放量不降反升。

综上分析,本文提出如下假说1:

^① 因篇幅所限,偏导结果详见本刊网站登载的附录。

假说1:经济增长和环境保护的双重目标会导致碳价收益率分布呈现“尖峰厚尾”特征。

(四)地方政企联动与中央政府博弈模型

在碳交易驱动下,地方政企趋向于形成两种稳定的博弈策略:(减排,履责)和(不减排,不履责)。(减排,履责)有利于提高碳市场参与度与活跃度,稳定碳市场;而(不减排,不履责)则会导致虚假治理,使得中央政府对治污的投入不见成效,严重阻碍了经济高质量发展和人民对美好生活的追求。为避免地方政企消极行为的发生,深入推进环境污染防治,打赢蓝天保卫战,实现“双碳”战略,中央政府作为碳减排工作发起者,探索了一系列空气污染治理措施,以期提高地方政府环保工作的责任意识和企业碳减排动力,力图推动地方政企由(不减排,不履责)向(减排,履责)转变,治理空气污染。^①然而,受监管成本和公众环保诉求强度变化的影响,理性的博弈双方会基于自身利益进行决策,形成地方政企联动与中央政府新的博弈模式。为此,本文进一步剖析地方政企联动与中央政府之间的博弈机制,探究两者间博弈结果对碳市场造成的影响,推演碳价波动特征,寻找碳价波动特征的成因和根源。

1. 基本假设

公众意愿作为重要的外部约束,严重影响博弈双方的策略选择,可能促使地方政企和中央政府自发趋于最优减排路径。因此,在地方政企博弈模型基础上,引入公众意愿约束的强度因子 $\eta \in (0, 1)$,从整体视角构建地方政企联动 L 和中央政府 M 的碳减排演化博弈模型,分析其策略选择对碳市场供求关系的影响。^②

假设地方政企联动和中央政府均为有限理性的博弈主体。地方政企联动的策略选择有(减排,履责)与(不减排,不履责),中央政府的策略选择有“监管”或“不监管”。假设地方政企联动选择(减排,履责)时减排成本为 C_4 ($C_4 = C_1 + C_2$),选择(不减排,不履责)时受到中央政府的问责惩罚为 D_1 。同时,假设中央政府选择“监管”时付出的监管成本为 C_3 (卢瑶,2017)。假设地方政企选择(不减排,不履责)且中央政府选择“不监管”时,地方政企联动受到的名誉损失和公信力下降为 F_1 。同时,中央政府作为最广大人民根本利益的代表,受到的公信力、国际地位的损失程度为 ηF_2 ,表明公众诉求越强烈,则损失程度越高(崔宁等,2023)。由上述基本假设,构建地方政企联动和中央政府的博弈矩阵。^③

2. 模型构建

参照地方政企演化博弈模型的构建和求解思路,可求得地方政企联动和中央政府的演化博弈系统 H_2 :

① 因篇幅所限,中央政府空气污染治理措施类型详见本刊网站登载的附录。

② 因篇幅所限,地方政企联动与中央政府博弈模型的基本参数设置及说明表详见本刊网站登载的附录。

③ 因篇幅所限,地方政企联动和中央政府的博弈矩阵详见本刊网站登载的附录。

$$\begin{cases} F_L(x) = dx/dt = x(1-x)[y(D_1 - F_1) + (-C_4 + F_1)] \\ F_M(y) = dy/dt = y(1-y)[x(-\eta F_2) + (-C_3 + \eta F_2)] \end{cases}$$

分别令 $F_L(x)$ 和 $F_M(y)$ 为 0, 则系统 H_2 在区域 $[0, 1]^2$ 上存在五个均衡点: $A(0, 0)$ 、 $B(0, 1)$ 、 $C(1, 1)$ 、 $D(1, 0)$ 和 $Z(w_1, v_1)$, 分别对应于(不减排, 不履责, 不监管)策略、(不减排, 不履责, 监管)策略、(减排, 履责, 监管)策略、(减排, 履责, 不监管)策略以及四种策略的临界点。其中, $0 \leq w_1 = (-C_3 + \eta F_2) / (\eta F_2) \leq 1, 0 \leq v_1 = (C_4 - F_1) / (D_1 - F_1) \leq 1$ 。五个均衡点的演化相图如图 3(b) 所示。^①

由图 3(b) 可知, $B(0, 1)$ 和 $D(1, 0)$ 为两个 ESS 点, 具有长期动态稳定性。这表明在碳减排背景下, 地方政企联动与中央政府博弈双方会形成互补关系来推动“双碳”目标的实现。在地方政企选择(减排, 履责)的情况下, 碳减排工作具有良好的内驱动力, 地方政企减排意识和责任的提升会提高全要素生产率和促进经济发展方式转型, 激发碳市场活力, 有利于依靠市场这只“看不见的手”及时调整和纠正碳市场风险, 增强碳市场稳定性, 中央政府则不需要耗费过多的人力物力进行环保督察。此时, 这种博弈稳定策略会增强公众及碳市场参与主体对碳市场的关注, 稳定碳市场上碳配额供求关系, 减少过度投机等非理性经济行为的发生, 降低碳价极端波动发生频率, 使碳价波动特征回归到传统的“尖峰厚尾”特征。

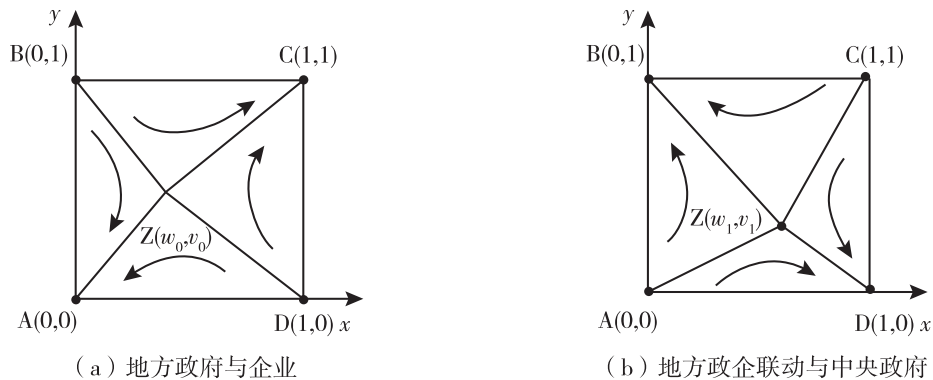


图 3 演化相图

在地方政企选择(不减排, 不履责)的情况下, 地区为保持本地相对优势, 倾向于采取粗放式发展模式。企业通过大量消耗能源资源获取经济效益, 而地方政府为追求短期经济效益, 与企业形成效益目标联动, 深陷“为增长而竞争”的困局。在此过程中, 地方政府环境治理行为出现扭曲, 不仅导致环境污染事件频发、生态与经济损失加剧, 也与中央的绿色发展战略布局形成背离, 导致碳市场缺乏活力、市场参与主体对碳配额的需求急剧下降, 碳价持续走低。面对日益严峻的治污压力, 中央政府通过行政管制手段推进生态文明建设, 强化环保监管, 推动地方环保责任落实, 力求打破地方政企在减排事务上的激励趋同状态。具体措施包括环境政策修订、排污标准提

^① 因篇幅所限, 五个均衡点的稳定性分析详见本刊网站登载的附录。

升、行政约谈、环保税征收、环保督察、干部岗位调整、大气环境限期整改等。这些监管措施在短期内会刺激市场参与主体对碳配额的需求,催生过度投机等非理性经济行为,加剧碳市场泡沫,造成碳价频繁大幅波动,使市场风险在尾部不断积聚。由此,本文提出如下假说2:

假说2:中央环保监管短期内会诱发碳价收益率分布呈现“尖峰翘尾”特征。

接下来,分析各模型参数变动对演化博弈策略的影响趋势。为此,令区域ADCZ的面积为 S_2 ,则有:

$$S_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{C_3}{\eta F_2} + \frac{C_4 - F_1}{D_1 - F_1} \right) \quad (6)$$

当 $S_2 > 0.5$ 时,博弈双方有更高的概率趋向于(减排,履责,不监管)策略;反之,则有更高的概率趋向于(不减排,不履责,监管)策略。下面,借助 S_2 来分析模型的参数变动对博弈双方策略选择的影响趋势,对式(6)左右两边,分别关于模型参数求偏导,可以得到以下结论。^①

C_3 的增加有利于推动地方政企向“减排”环保偏好转变,碳减排关注度的提升有利于碳市场参与者对其可能出现的风险及时调整和纠正,增强碳市场稳定性,降低碳价发生极端波动的频率,使其呈现传统时序的“尖峰厚尾”特征。反之, C_3 的减少导致碳市场参与度和活跃度降低、稳定性下降,供求关系易受到冲击,诱发“尖峰翘尾”特征。由假设2的分析可知,为深入推进污染防治,中央政府会采取监管措施来增强地方政企的环保责任意识,力图推动地方政企联动关系由(不减排,不履责)向(减排,履责)转变。但是,更强的行政管制往往意味着更高的经济成本。同时,公众意愿强度 η 会随 S_2 的增加而减小。根据理性经济人假设可推知,在成本增加且公众意愿强度下降的情形下,环境监管措施往往注重效率,即博弈主体通过增加 C_3 获得 S_2 的增大后,伴随 η 的减小会减少 C_3 ,而 C_3 的减少又会制约 S_2 增大。这也可能会引发治理成效体现出“一刀切”“运动式”治理带来的空气质量临时性改善,且伴随着快速反弹的“报复性”污染,形成“先减产—后恢复”的策略性行为。因此, C_3 的长期保持甚至增加是推动地方政企向“减排”环保偏好转变、稳定碳市场的关键。综上分析,本文提出如下假说3:

假说3:中央环保监管常态化会促进碳价收益率分布特征由“尖峰翘尾”转为“尖峰厚尾”。

三、数值仿真与实证分析

(一)数值仿真

为验证碳减排演化博弈模型的正确性,分别从局部和整体两个视角将企业、地方政府和中央政府之间的博弈机制进行可视化,直观体现碳交易驱动下减排成本、监管成本、中央监管等因素对博弈方行为及碳市场演进的影响路径。参考石敏俊等(2013)的研究,在当前碳交易机制情境下,企业减排成本 C_1 约为60元/吨 CO_2 (为

^① 因篇幅所限,偏导结果详见本刊网站登载的附录。

便于描述,后文均采用消除量纲后的数值,即 C_1 设为60)。参考许文博和许恒周(2021)研究中企业减排成本、地方履责成本、中央政府监管成本与中央监管下地方政企所受惩罚之间的比例关系(1:1/5:2/5:1/11.25),将 C_2 设为12、 C_3 设为24、 D_1 设为5.3。参考方国昌等(2024)的研究,将交易额分配系数 θ 设为0.1、 R_1 设为120、 R_2 设为100、 R_3 设为30、 T 设为25、 T_1 设为24、 T_2 设为26、 p_1 设为20。从长期看, p_1 和 p_2 趋于相等,因此 p_2 的初始值也设为20。当前我国碳配额分配方式以免费分配为主,因此 α 的初始值设为1。此外,CCER市场的碳抵消机制启动较晚,且抵消比例不超过5%,因此 β 的初始值设为0。参考聂军和柳建文(2014)的研究可知,环境群体性事件除事后救济型外还存在事先预防型,即因民众对尚未上马或投产项目的环评结果存疑而引发的群体性事件。因此,不监管不减排时地方政企和中央政府名誉损失 F_1 和 F_2 远大于 C_1 ,分别设为 $F_1 = 2C_1 = 120$ 和 $F_2 = 3C_1 = 180$,强度因子 η 的初始值取区间中点0.5。

综上所述,各参数初始值设定为: $\theta = 0.1, p_1 = p_2 = 20, C_1 = 60, C_2 = 12, C_3 = 24, R_1 = 120, R_2 = 100, R_3 = 30, T = 25, T_1 = 24, T_2 = 26, D_1 = 5.3, F_1 = 120, F_2 = 180, \alpha = 1, \beta = 0, \eta = 0.5$ 。通过计算可得地方政企博弈模型的鞍点位置为 $Z(0.40, 0.67)$,中央政府与地方政企联动博弈模型的鞍点位置为 $Z(0.73, 0.42)$ 。下面,分别取六个点:(0.1, 0.6)、(0.2, 0.4)、(0.3, 0.2)、(0.8, 0.4)、(0.7, 0.5)、(0.6, 0.6)进行数值模拟,得到两个博弈模型随时间的动态演化过程如图4所示。

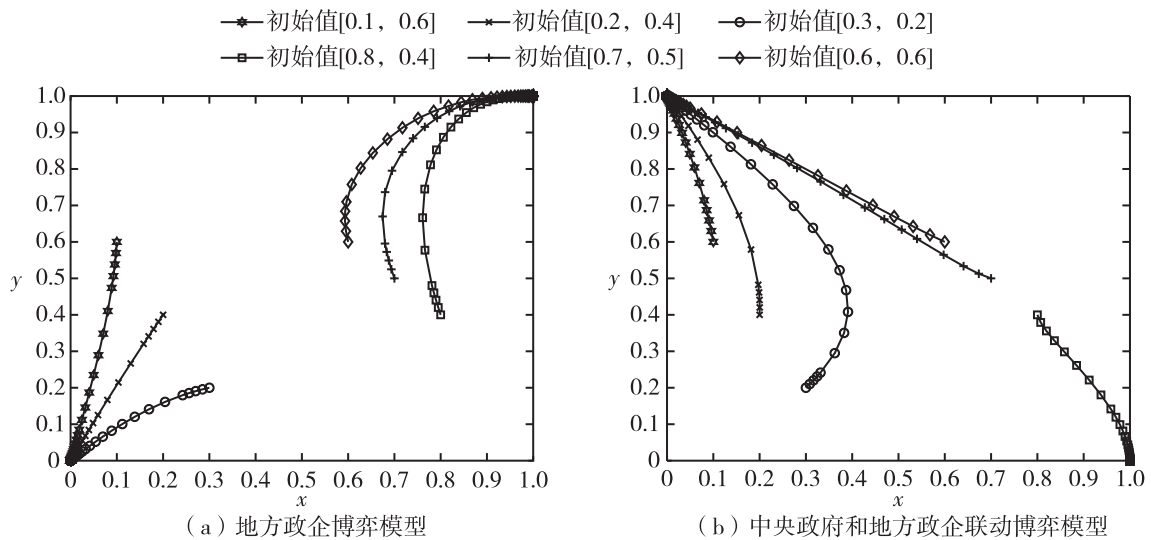


图4 企业、地方政府与中央政府策略选择的动态演化过程

由图4可得,博弈演化结果与初始值的位置有关。在图4(a)中,针对地方政企博弈模型,当初始值落在 S_1 (即图3(a)的右上区域BCDZ)时,初始值逐渐收敛于(1, 1),地方政府与企业积极推动碳减排工作,当初始值落在 $1-S_1$ (即图3(a)的左下区域BADZ)时,初始值逐渐收敛于(0, 0),地方政府与企业不推动碳减排工作。图4(b)的中央政府与地方政企联动博弈模型则表明,在碳减排工作中,中央政府和地方政企联动之间会呈现互补关系,随初始点的位置不同,逐渐收敛于(0, 1)和(1, 0)

两个点。此外,不同影响因素的选取会影响区域面积 S_1 和 S_2 的大小,进而影响博弈主体策略选择收敛于均衡点 $(0, 0)$ 和 $(1, 1)$ 以及 $(0, 1)$ 和 $(1, 0)$ 的速度。

在此基础上,采用控制变量法分别将所考虑的影响因素依次作为变量,探究影响因素的变动对博弈结果的影响,刻画博弈结果的演化过程。由于中心点 $(0.5, 0.5)$ 的收敛方向可以判断出面积 S_1 和 S_2 的大小关系,所以设定初始点为 $(0.5, 0.5)$ 。同时,分别取 $C_1 \in \{60, 65\}$ 、 $C_2 \in \{12, 13\}$ 、 $P_1 \in \{20, 22\}$ 、 $P_2 \in \{20, 22\}$ 、 $\eta \in \{0.5, 0.7\}$ 、 $C_3 \in \{24, 28\}$ 、 $C_4 \in \{72, 80\}$ 、 $D_1 \in \{5.3, 6\}$ 、 $F_1 \in \{120, 130\}$ 、 $F_2 \in \{180, 190\}$ 。结果表明:^①在地方政企博弈模型中,随着碳减排成本(C_1 和 C_2)的增加,博弈双方趋于推动碳减排策略的速度越来越慢,趋于不减排策略的速度越来越快,表明碳减排成本的增加对地方政企减排联动的形成起到抑制作用,加剧碳市场风险。而碳市场参与度与活跃度(P_1 和 P_2)的增大能加快博弈双方收敛至碳减排策略的演化速度,对地方政企减排联动的形成起到促进作用,降低碳市场风险。在中央政府和地方政企联动博弈模型中,随着中央政府监管成本 C_3 、惩罚力度 D_1 、地方政企联动损失 F_1 的增加和公众意愿强度 η 、中央政府收益 R_3 、减排成本 C_4 、中央政府损失 F_2 的减少,博弈双方向策略(减排,履责,不监管)收敛的演化速度逐步加快,有利于碳市场的稳定发展。反之,则博弈双方向策略(不减排,不履责,监管)收敛的演化速度逐步加快,加剧碳价极端波动,不利于碳市场稳定发展。

在此基础上,进一步刻画监管政策通过影响市场需求和投机行为进而作用于碳价的传导路径。从短期来看,对于履约企业而言,由于 α 的变动将直接影响碳市场的需求量,因此将免费分配系数 α 作为反映市场需求变动的代理变量,取 $\alpha \in \{0.99, 1\}$ 。同时,从短期来看,碳市场和CCER市场的价格差会存在套利机会,因此将CCER的碳抵消比例 β 作为反映投机行为变化的代理变量,取 $p_2 = 0.5p_1 = 10$ 、 $\beta \in \{0, 0.01\}$ 。结果表明:^②随着 α 的增加,市场需求下降,博弈主体的策略曲线会快速由减排策略转变为不减排策略;随着 β 的增加,投机行为增加,策略曲线收敛到不减排策略的速度越来越快。该结果表明,从短期来看,政策监管的变动会影响市场需求和投机行为,进而影响碳价波动。其中,市场需求的变动较投机行为的变动而言,对碳价波动的影响程度更大。

(二)实证分析

由于广东、湖北、上海三个碳市场成立时间早,休市时间短,数据样本量大、稠密性高,极具代表性。因此,本文以这三个碳市场的收盘价作为研究对象,分析其波动特征。^③样本区间为三个碳市场成立至2025年1月1日的日度数据(广东:2013年12月19日至2025年1月1日;湖北:2014年4月8日至2025年1月1日;上

^① 因篇幅所限,各参数的变动对地方政企行为、中央政府与地方政企联动行为的影响路径模拟详见本刊网站登载的附录。

^② 因篇幅所限,免费分配系数 α 和CCER的碳抵消比例 β 的影响路径详见本刊网站登载的附录。

^③ 福建、天津、深圳、重庆四个碳市场数据量较小,中间休市时间长、休市频率高,北京碳市场的涨跌幅限制区别于其他碳市场,故未将其纳入研究对象。

海:2013年11月26日至2025年1月1日),数据来自Wind数据库。在剔除停市带来的空值数据后,得到的样本数量分别为2421个、2530个、1714个。^①三个碳市场的价格序列均呈现波动剧烈且震荡幅度较大的特点。为此,用收益率序列 $Returns_t = (p_t - p_{t-1})/p_{t-1}$ 来刻画碳价波动幅度。其中, p_t 和 p_{t-1} 分别为该碳市场在第 t 日和第 $t-1$ 日的收盘价。由于我国碳市场具有涨跌幅限制(三个碳市场均为 $\pm 10\%$),为避
 避免因“周末”效应带来的影响,将超出涨跌幅限制值的收益率进行了剔除,得到样本观测值分别为2362个、2511个、1609个。^②

为进一步研究碳价波动幅度的整体分布特征,给出三个碳市场的价格收益率序列的频率直方图。在传统资产价格收益率序列的分布特征分析中,正态分布、t分布经常被作为刻画“尖峰厚尾”特征的参照对象(黄卓和李超,2015),因此本文也给出了基于正态分布和t分布的拟合曲线,如图5所示。其中,柱状图对应于区间划分个数均为50的频率直方图,虚线对应正态分布曲线,实线对应自由度为1的t分布曲线(自由度越小,尾部越厚)。三个碳市场的偏度和峰度分别为:-0.1086和4.4856(广东)、0.2605和6.6454(湖北)、-0.0064和4.8139(上海)。可见,三个市场的峰度均大于3,表明它们均具有“尖峰”特征。

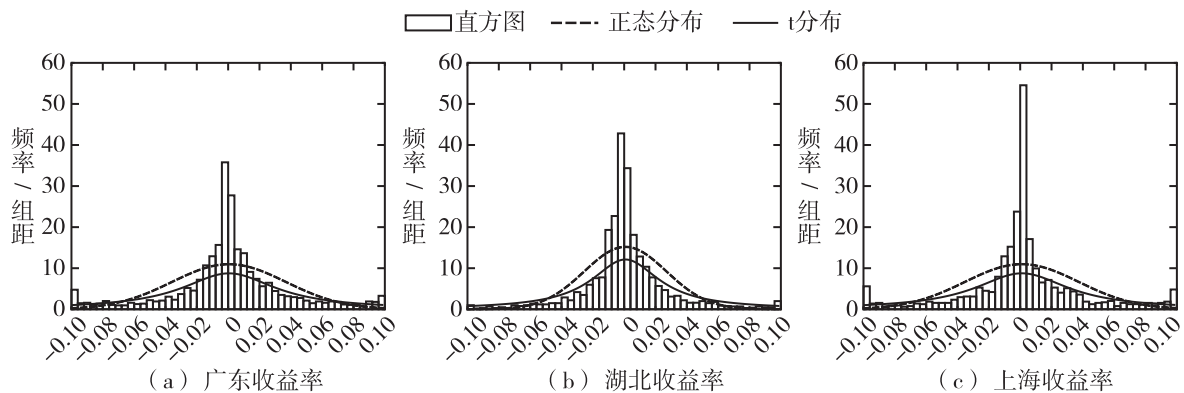


图5 碳价收益率序列的分布对比

通过对比还可以发现,三个碳市场价格收益率的频率直方图在峰处更尖,在尾部均呈现不同程度的翘起,既有别于正态分布和t分布的尾部下降特点,也不同于传统收益率序列的“尖峰厚尾”特征。这种尾部翘起的特征表明市场尾部风险发生概率更大,本文称这种现象为“尖峰翘尾”特征。参照巴塞尔委员会设定的资产风险管理置信水平标准(99%),结合t分布自由度越小,尾部越厚的特点,选择自由度为1的t分布作为“翘尾”的参照对象。其原因是,在风险管理中,实现风险预警的关键在于对风险因子尾部特征的精准刻画,例如,著名的风险度量指标——在险价值(Value at Risk, VaR)。而自由度为1的t分布可以视为现有风险管理实践中的极端厚尾情形,当实际尾部风险超过自由度为1的t分布所代表的极端厚尾风险时,意味着现有框架下的市场风险预警模型均面临风险低估,甚至预警失灵的可能,威

① 因篇幅所限,三个市场对应的碳交易收盘价时序图详见本刊网站登载的附录。

② 因篇幅所限,三个市场对应的碳价收益率序列图详见本刊网站登载的附录。

胁我国金融风险防范体系。因此,基于服务风险管理实践的角度,参考李阳和丁冬(2020)的研究工作,借鉴拟合优度的思想并引入AD检验,采用两步法定义“翘尾”特征如下:假设碳价收益率序列 $\{X_i\}_{i=1}^n$ 服从自由度为1的t分布。(1)根据AD检验对分布尾部敏感性强的特性,采用AD检验检验 $\{X_i\}_{i=1}^n$; (2)计算碳交易在样本区间 $[\min(X_i), \max(X_i)]$ 上的1%和99%置信水平上可能面临的最大损益分别为 $-x_L$ 和 x_R 。若满足AD检验的P值小于显著性水平0.05的同时,满足 $k_L = \#(X_i \leq x_L)/n > 0.01$ 或 $k_R = \#(X_i \geq x_R)/n > 0.01$,则称该碳价收益率序列具有左(右)“翘尾”特征。

根据以上定义,分别得到广东、湖北、上海三个碳市场的P值为 $2.5402e-7$ 、 $2.3895e-7$ 和 $3.7290e-7$ (均远小于0.05,拒绝原假设), k_L 和 k_R 值分别为0.0233和0.0174(广东)、0.0056和0.0104(湖北)、0.0267和0.0242(上海)。因此,三个碳市场均呈现“尖峰翘尾”特征。其中,广东和上海碳市场的收益率分布左尾和右尾均有翘起,湖北碳市场的收益率分布右尾翘起。这种“尖峰翘尾”特征表明碳价极端波动频发,其尾部风险聚集现象较传统市场更加明显。上述实证结果验证了假说2碳价收益率分布呈现“尖峰翘尾”特征。

同时,考虑到上述样本区间涵盖了2021年7月以来全国以及区域碳市场并行的时间段。因此,本文也对三个碳市场非并行时段的波动特征(广东:2013年12月19日至2021年7月15日;湖北:2014年4月8日至2021年7月15日;上海:2013年11月26日至2021年7月15日)进行了测算,样本数量分别为1510个、1687个和967个。经计算,得到三个碳市场的峰度分别为3.7998、6.0546和3.8663,P值分别为 $3.9735e-7$ 、 $3.5566e-7$ 和 $6.2048e-7$ (均远小于0.05,拒绝原假设), k_L 和 k_R 值分别为0.0298和0.0225(广东)、0.0059和0.0119(湖北)、0.0403和0.0383(上海)。因此,三个碳市场均呈现出“尖峰翘尾”特征,验证了假说2仍然成立。

综合上述三个碳市场的数值结果可见,上海碳市场的 k_L 和 k_R 值远高于广东和湖北碳市场,表现为“翘尾”程度最高、价格极端波动频率最剧烈,其次是广东,湖北碳市场最低,这可能由于各碳市场所处地区经济发展程度不同。事实上,经济越发达的地区,地方政企致力于碳减排工作的单位减排成本越高。例如,He(2015)基于影子价格分析法研究发现,中国区域碳减排边际成本差异巨大,东部地区的平均减排成本远高于中西部地区;Jiang et al.(2023)在碳减排边际成本中进一步考虑了污染物协同效益,研究发现,在相同减排水平下,中国经济更发达的东部省份面临比中西部省份更高的减排成本。由第二部分理论分析可知,当减排成本增加时, S_1 减少,促使地方政企博弈模型的鞍点向右上移动,提高博弈双方选择“不减排”策略的概率。这时,市场对政策预期的稳定性降低,导致碳价极端波动频繁,加剧碳市场尾部风险程度。

考虑到在中国管理体制下,区域碳市场不存在完全剔除中央政府环保监管影响的实际数据。因此,为验证地方政企演化博弈模型的正确性,基于反事实分析法,本文参考孙晓华等(2022)的工作,借鉴事件研究法的思想来尽可能消除中央政

府监管措施对碳市场形成的冲击。结合国内外经济社会发展实际,本文筛选出可能对碳市场产生较大冲击的中央政府监管措施。^①根据事件发生的时间节点,事前窗口长度设置为5(对应一周),事后窗口长度分别设置为10、15和20(分别对应两周、三周和四周),得到三个碳市场不同情况下的偏度、峰度、 k_L 和 k_R 的值,如表2所示。然后,将剔除中央政府监管措施冲击后的碳价序列作为市场条件下的预期收益率,分别提取实际收益率分布和预期收益率分布的10%尾部特征(双尾),采用t检验对两条尾部特征序列进行检验,进而对不同窗口长度选择进行系统性敏感性测试,其异常收益率的显著性检验结果(P值)同样见表2。

表2 三种窗口长度下的碳市场收益率序列统计特征

窗口长度	统计特征	碳市场		
		广东	湖北	上海
15	偏度	0.0744	0.3097	0.0281
	峰度	6.1796	6.6991	6.0900
	k_L	0.0044	0.0025	0.0070
	k_R	0.0077	0.0063	0.0023
	P值	0.0031	0.0375	0.0106
20	偏度	-0.0093	0.3258	0.0987
	峰度	6.7188	6.7653	6.2172
	k_L	0.0047	0.0017	0.0050
	k_R	0.0071	0.0056	0.0025
	P值	0.0021	0.0122	0.0070
25	偏度	-0.0307	0.3422	0.1087
	峰度	6.9030	6.8038	6.4259
	k_L	0.0050	0.0013	0.0051
	k_R	0.0068	0.0053	0.0043
	P值	0.0020	0.0139	0.0059

由表2可见,所有的 k_L 和 k_R 值均小于0.01,峰度均大于3,偏度不等于0,对应的碳价收益率分布均呈现“尖峰厚尾”特征;同时,P值均小于5%,表明中央政府的监管措施对分布尾部产生显著影响。不仅验证了地方政企演化博弈模型的有效性,而且展现了中央政府的监管措施会对碳市场价格造成短期冲击,也进一步验证了中央政府和地方政企共同体演化博弈模型的有效性。上述实证结果验证了假说1:经济增长和环境保护的双重目标会导致碳价收益率分布呈现“尖峰厚尾”特征,同时也佐证了假说2:中央环保监管短期内会诱发碳价收益率分布呈现“尖峰翘尾”特征。

前文研究发现,我国碳市场在不同监管背景下呈现“尖峰厚尾”与“尖峰翘尾”两种不同的波动特征。为验证该特征是否具有普遍性及其背后的制度逻辑,进一步选取欧盟碳市场作为对比样本进行横向对比验证。一般地,欧盟碳市场具有“大市场,小政府”的市场经济特点,且作为全球最大的碳市场,其市场成熟度高于中

^① 因篇幅所限,具体措施信息详见本刊网站登载的附录。

国。同时,因欧盟无“中央—地方”此类层级架构,其碳价波动受层级利益博弈的影响较弱。因此,本文首先选取欧盟碳市场成立初期的碳配额(EUA)交易收盘价数据作为研究对象,观测值数为2160个。^①经过计算,EUA收益率序列的偏度和峰度分别为-0.1214和17.2230,P值为 $2.7778e-7$, k_L 和 k_R 值分别为0.0005和0.0014(均小于0.01)。上述结果表明,欧盟碳市场收益率序列的分布缺乏“尖峰翘尾”特征,主要表现为经典的“尖峰厚尾”特征。其原因在于,欧盟监管体系的核心特征是具有前瞻性和刚性。欧盟在每年的《欧盟排放交易体系运营报告》中会提前公布下一年度的配额拍卖计划、配额总量以及行业分配标准。这种制度安排使得市场参与者能够基于明确的规则进行长线布局,而非被动应对监管突击。同时,其碳配额总量的核算是一个自上而下、刚性递减的过程,这种刚性的监管规则防止了监管层面的大幅度波动,减轻了市场的恐慌情绪。而中国当前的碳配额核算是一种基于历史数据的后验方式,在面临短期监管措施(突击核查、高强度管控等)时,容易引发碳市场主体抢购配额应对监管冲击。通过对比分析可见,“尖峰翘尾”特征的根源在于监管的突发性和不可预测性,进一步验证了本文所建立的地方政企演化博弈模型的有效性。

由上述分析可见,中央政府的环保监管措施会冲击碳市场的需求,诱发碳价“尖峰翘尾”特征。而中央生态环境保护督察制度常态化的特点有别于传统的环境监管理念,因此本文进一步考察在中央生态环境保护督察制度下碳价波动特征的变化。选取第二轮环保督察启动时间(2021年8月25日)作为时间节点,将上述广东、湖北、上海三个碳市场样本划分成两部分,样本数量分别为1540个和822个(广东)、1715个和796个(湖北)、983个和626个(上海),测算其 k_L 和 k_R 值如表3所示。

表3 划分节点前后碳价收益率的 k_L 和 k_R 对比结果

特征	广东		湖北		上海	
	1	2	1	2	1	2
k_L	0.0292	0.0097	0.0058	0.0025	0.0397	0.0064
k_R	0.0221	0.0109	0.0122	0.0075	0.0376	0.0032

由表3可见,三个碳市场的 k_L 和 k_R 值在划分节点前后差异显著,碳价收益率分布在划分节点前均呈现明显的“尖峰翘尾”特征,在划分节点后 k_L 和 k_R 值快速下降,向“尖峰厚尾”特征转变,表明中央生态环境保护督察制度的常态化会促进地方政企减排联动的形成,稳定碳市场需求,减少碳价极端波动。上述实证结果验证了假说3:中央环保监管常态化会促进碳价收益率分布特征由“尖峰翘尾”转为“尖峰厚尾”。

结合上述分析可见,实证基于反事实分析法,引入事件研究法和拟合优度的思想,验证了第二部分理论分析所提出的三个假设,即经济增长和环境保护的双重目标会导致碳价收益率分布呈现“尖峰厚尾”特征,中央环保监管短期内会诱发碳价

^① 观测值数为广东、湖北、上海四个碳市场观测值数2362个、2511个、1609个的平均数。因篇幅所限,EUA的收盘价、收益率时序表现及其分布对比图详见本刊网站登载的附录。

收益率分布呈现“尖峰翘尾”特征,以及中央环保监管常态化会促进碳价收益率分布特征由“尖峰翘尾”转为“尖峰厚尾”。这种“翘尾”特征削弱了碳市场的核心功能,即价格发现,会将碳市场由“自然市场”推向“监管市场”,导致价格不再单纯反映碳减排的真实成本,而是变成了监管强度的“弹簧”。当监管压力(履约需求)来临时,价格会剧烈波动,导致“黑天鹅”事件的概率被放大、系统性风险上升,致使投资者和金融机构对碳资产持观望态度,抑制市场的流动性和深度。同时,也不利于企业绿色低碳转型。碳价本应反映减排的真实成本,而在价格信号失真情况下,企业会误判碳成本,选择购买配额而非减排,增加了经营的不确定性,导致市场无法有效指导企业进行低成本减排。此时,企业致力于通过买售配额的短期应对方式代替长期的减排转型,降低绿色创新的动力。

四、结论与政策建议

本文基于我国环境治理管理模式的层级特点,在碳交易和公众意愿等条件约束下,分别从局部和整体多重视角构建了企业、地方政府与中央政府碳减排双层演化博弈模型。在此基础上,采用反事实分析法对我国区域碳市场的日度碳价数据开展实证检验,进而揭示我国碳价波动形成机制、推演碳价波动特征、甄别关键影响因素。得到以下结论。

第一,经济增长和环境保护的双重目标会促进地方政企联动,催生碳市场参与者的投机行为,导致碳价大幅波动、致使碳价收益率分布呈现“尖峰厚尾”特征。在我国特色制度环境下,地方政府作为“双碳”目标的实施主体,同时承担实现区域经济增长与达成环境治理的双重任务。由于经济增长的“显式”激励(财政收入、晋升机会)与环境治理的“隐式”约束(达标即可、惩罚有限)之间存在不对称性,地方政府可能倾向于采取短期策略:平时通过政企联动推动高碳产业扩张以获取经济增长收益,环保考核临近时则通过行政手段强制干预。这种“跷跷板”式的联动关系将会加剧碳市场信息不对称,强化市场参与者的投机预期,导致过度交易、盲目跟风等非理性行为,最终放大碳价波动幅度,使其收益率分布呈现“尖峰厚尾”特征。

第二,中央环保监管短期内会冲击碳市场需求,加剧碳价大幅波动频率,引致碳价收益率分布呈现“尖峰翘尾”特征。环境保护成本的隐性化与经济增长收益的显性化易驱使地方政企形成利益偏好联动,致使环境持续恶化,损害公众利益。为此,中央政府会通过环保监管措施遏制环境污染,力图推动政企联动关系由利益偏好联动向减排偏好联动转变。但监管冲击在短期内会刺激市场参与主体对碳配额的需求,滋生过度投机等非理性经济行为,加剧碳市场泡沫,造成碳价大幅波动,使碳市场风险尾部集聚,诱发碳价收益率分布呈现“尖峰翘尾”特征。

第三,中央环保监管常态化有利于稳定碳市场,推动碳价收益率分布特征由“尖峰翘尾”向“尖峰厚尾”转变。中央环保监管会推动政企联动关系向共同减排转变,但这种转变具有可逆性。短期的中央环保监管措施在推动政企联动关系由利益偏好向减排偏好转变后,由于监管结果与企业间未能形成激励闭环,一旦监管压

力减弱,伴随着由减排偏好向利益偏好转变的“回弹”效应,再次冲击碳市场需求,加剧市场风险;而长期、常态化的中央环保监管措施能够持续传递稳定的政策预期,推进政企联动关系从利益偏好向减排偏好的真正转型,稳定碳市场需求,促进碳价收益率分布特征由“尖峰翘尾”向“尖峰厚尾”转变。

综上所述,本文揭示了中国碳市场价格波动幅度大、极端波动频发、尾部风险较高的制度性成因,与相关文献(公维凤等,2022;吕靖焘等,2021;王韧等,2023)关于碳市场高风险的研究结论相互印证。区别于既有研究多从市场微观结构解释碳价波动,本文立足于中央政府、地方政府与企业间的博弈关系,揭示了政策驱动型碳市场的价格形成机制,为碳市场风险防控提供了新的识别思路。此外,针对上述结论,本文分别从抑制投机、平滑冲击、稳定预期三个方面提出如下政策建议。

第一,从“堵疏结合”到“利益重塑”。首先,重构地方政绩考核体系。在地方党政领导干部综合考核评价体系中,引入碳排放生产率(单位碳排放所创造的GDP)等绿色绩效考核指标作为核心指标,推动经济增长与碳减排目标形成内在、正向的激励相容,引导地方政府由“控总量”转向“提效率”,鼓励其优先支持能带来高经济附加值和低碳排放的产业,防止其通过纵容碳市场投机来“补贴”落后产能企业。其次,建立碳市场“投机度”监测与地方考核联动机制。由国家生态环境主管部门联合金融监管机构,结合碳市场的换手率偏离度、持仓集中度、非履约期交易活跃度与价格振幅等指标设计“投机度”指数,进而利用该指数分季度评估各地区企业在碳市场中的交易行为。评估结果作为地方政府年度考核的加分或扣分依据,促使地方政府从“市场投机的旁观者”转变为维护市场稳定的“第一责任人”,主动约束辖区内企业的非理性交易行为。

第二,从“冲击应对”到“预期管理”。一方面,建立环保监管的“预期管理”与信息发布机制。每年年初可通过新闻发布会、官方网站等渠道,公布本年度环保监管的重点行业、关键领域和核心问题类型,为企业预留充足的调整期。同时,每季度召开政策宣讲会,解读监管政策动向、回应市场关切、澄清不实传闻,为市场提供清晰的政策框架和稳定的预期。此外,推动环保监管行动与碳市场履约周期“错峰”实施,避免监管压力与履约压力叠加引发的企业恐慌性抢购配额行为。另一方面,设计并实施具有中国特色的市场稳定储备机制。结合我国碳价波动的差异化特征,强化对市场运行风险的动态评估能力。在市场风险评估结果的基础上,建立规则化、自动化的市场配额总量储备机制,实现配额出入储备池的智能化,排除人为临时干预,为市场提供了高度的确定性和可预测性,进而有效吸收因环保监管等外部冲击造成的供需失衡。此外,随着未来碳配额有偿拍卖比例的增加,可引入“价格走廊”机制控制价格上下限。例如,参照CCER价格设置配额的拍卖底价,避免因价格过低削弱企业减排动力;同时,建立成本控制储备,当配额价格超过预设阈值时,向市场投放储备配额,稳定市场价格。由此,为企业履约成本提供可预期的上下限来实现价格波动的有序管控。

第三,从“被动适应”到“主动融合”。首先,建立基于环保监管评级的动态配额调整机制。结合企业上一轮环保督察整改成效、环境信息披露质量、环保设施运行情况等多维度信息,构建分级分类的企业环保监管评级体系。同时,在核算下一年度免费配额分配量时,依据企业评级结果实施差异化的配额分配系数,形成“奖优罚劣”的激励约束机制。此外,对于存在数据造假的企业,加大惩处力度,取消其一定年限内的配额免费分配资格,激励企业由“被动应付”转向“主动提升”,从根源上稳定企业端的配额需求,减少因数据造假、瞒报漏报等问题带来的市场不确定性。其次,扩容市场参与主体与丰富交易产品体系。通过发布未来五年碳市场拟纳入的行业清单和时间节点,为新纳入行业的企业预留充足的政策适应期,避免市场扩容引发的短期冲击。同时,分阶段引入多元化交易主体,如符合条件的绿色金融试点商业银行、非履约目的的机构投资者以及合格的境外机构投资者,改善市场流动性,增强运行稳定性,提升国际化水平。最后,稳步推进碳期权、碳期货等金融衍生品创新,为碳市场参与主体提供高效、低成本的风险对冲工具。多元主体的长期资金与套期保值需求,叠加衍生工具的风险分散功能,能够吸收市场短期供需冲击,强化价格信号的有效性,避免政策预期突变引发的非理性暴涨暴跌风险,降低尾部风险发生的频率与幅度,提升碳市场的内生性波动调节能力,从而推动碳市场由高波动向稳健运行转变。

参考文献

- 陈诗一、陈登科,2018:《雾霾污染、政府治理与经济高质量发展》,《经济研究》第2期。
- 陈诗一,2022:《低碳经济》,《经济研究》第6期。
- 崔宁、周宇、赵晓亮,2023:《四方主体参与碳减排的演化博弈研究》,《中国环境科学》第12期。
- 方国昌、何宇、田立新,2024:《碳交易驱动下的政企减排演化博弈分析》,《中国管理科学》第5期。
- 公维凤、王丽萍、王传会、高仲芳,2022:《我国碳排放权市场交易价格波动特征研究——对5个碳交易试点的实证分析》,《中国软科学》第4期。
- 胡琨、方祺、龙文滨,2023:《碳排放规制、企业减排激励与全要素生产率——基于中国碳排放权交易机制的自然实验》,《经济研究》第4期。
- 黄泰岩,2025:《统筹好政府和市场关系的中国理论创造》,《经济研究》第7期。
- 黄卓、李超,2015:《动态金融高阶矩建模:基于Generalized-t分布和Gram-Charlier展开分布的比较研究》,《中国管理科学》第10期。
- 李阳、丁冬,2020:《基于拟合优度检验的非参数EWMA控制图》,《系统科学与数学》第5期。
- 李仲飞、郑军、黄宇元,2015:《有限理性、异质预期与房价内生演化机制》,《经济学(季刊)》第2期。
- 林伯强,2022:《碳中和进程中的中国经济高质量增长》,《经济研究》第1期。
- 刘振华、王昱舒、袁馨婷、丁志华,2025:《媒体气候情绪与碳市场波动预测——基于新闻文本分析的经验证据》,《系统工程理论与实践》第4期。
- 刘志峰、张子沄、戴鹏飞、刘文华,2023:《碳市场与股票市场间的崩盘风险溢出效应研究:新冠疫情、投资者情绪与经济政策不确定性》,《系统工程理论与实践》第3期。
- 刘自敏、朱朋虎、杨丹、冯永晟,2020:《交叉补贴、工业电力降费与碳价格机制设计》,《经济学(季刊)》第2期。
- 陆敏、方习年,2015:《考虑不同分配方式的碳交易市场博弈分析》,《中国管理科学》第S1期。
- 卢瑶,2017:《环保督察与地方政府履责行为的博弈分析》,《管理世界》第11期。

吕靖焯、曹铭、张金锁、樊秀峰,2021:《基于小波多分辨率的中国碳排放权市场价格波动性研究》,《系统工程理论与实践》第7期。

聂辉华,2025:《基层中国的运行逻辑》,上海人民出版社。

聂军、柳建文,2014:《环境群体性事件的发生与防范:从政企合谋到政企合作》,《当代经济管理》第8期。

齐杏发,2012:《转型期地方政府重叠利益行为模式研究——以房地产调控为例》,《华东经济管理》第5期。

祁毓、杨春飞、陈诗一,2024:《绿色转型发展中的财政激励与协同治理——来自“山水工程”试点的证据》,《经济研究》第10期。

钱浩祺、吴力波、任飞州,2019:《从“鞭打快牛”到效率驱动:中国区域间碳排放权分配机制研究》,《经济研究》第3期。

石敏俊、袁永娜、周晟吕、李娜,2013:《碳减排政策:碳税、碳交易还是两者兼之?》,《管理科学学报》第9期。

石庆玲、陈诗一、郭峰,2017:《环保部约谈与环境治理:以空气污染为例》,《统计研究》第10期。

史永东、邢伟泽、甄虹线,2025:《气候变化和金融稳定:一个理论分析框架》,《经济研究》第8期。

孙晓华、袁方、翟钰、王昀,2022:《政企关系与中央环保督察的治理效果》,《世界经济》第6期。

田静、张骏,2025:《中国碳市场与金融市场间极端风险溢出效应——基于分位数关联网络的实证研究》,《金融经济研究》第6期。

王群勇、王浩竹、宋润宇,2026:《气温冲击、贸易网络与经济增长》,《经济研究》第1期。

王韧、袁珺、许豪、宁威,2023:《中国碳市场风险价值度量与实证研究》,《中国软科学》第7期。

西蒙,2021:《管理行为》,中译本,机械工业出版社。

谢识予,2023:《经济博弈论(第五版)》,复旦大学出版社。

许文博、许恒周,2021:《中央、地方政府与企业低碳协同发展的实现策略——以京津冀地区为例》,《中国人口·资源与环境》第12期。

严成樑、赵扶扬、牛欢,2024:《环境目标责任制、环境治理与内生经济增长》,《经济研究》第4期。

易兰、杨历、李朝鹏、任凤涛,2017:《欧盟碳价影响因素研究及其对中国的启示》,《中国人口·资源与环境》第6期。

尹振东,2011:《垂直管理与属地管理:行政管理体制的选择》,《经济研究》第4期。

张希良、张达、余润心,2021:《中国特色全国碳市场设计理论与实践》,《管理世界》第8期。

周黎安,2007:《中国地方官员的晋升锦标赛模式研究》,《经济研究》第7期。

周黎安,2008:《转型中的地方政府:官员激励与治理》,上海人民出版社。

Blyth, W., and D. Bunn, 2011, “Coevolution of Policy, Market and Technical Price Risks in the EU ETS”, *Energy Policy*, 39(8), 4578—4593.

Cao, G. X., and W. Xu, 2016, “Multifractal Features of EUA and CER Futures Markets by Using Multifractal Detrended Fluctuation Analysis Based on Empirical Model Decomposition”, *Chaos Solitons and Fractals*, 83(2), 212—222.

Chevallier, J., 2009, “Carbon Futures and Macroeconomic Risk Factors: A View from the EU ETS”, *Energy Economics*, 31(4), 614—625.

Christiansen, A. C., A. Arvanitakis, K. Tangen, and H. Hasselknippe, 2005, “Price Determinants in the EU Emissions Trading Scheme”, *Climate Policy*, 5(1), 15—30.

He, X.P., 2015, “Regional Differences in China’s CO₂ Abatement Cost”, *Energy Policy*, 80, 145—152.

Jiang, H. D., P. Purohit, Q. M. Liang, L. J. Liu, and Y. F. Zhang, 2023, “Improving the Regional Deployment of Carbon Mitigation Efforts by Incorporating Air-quality Co-benefits: A Multi-provincial Analysis of China”, *Ecological Economics*, 204, 107675.

Smith, J. M., and G. R. Price, 1973, “The Logic of Animal Conflict”, *Nature*, 246(5427), 15—18.

Zhou, K., and Y. Li, 2019, “Influencing Factors and Fluctuation Characteristics of China’s Carbon Emission Trading Price”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 524(6), 459—474.

Price Volatility Mechanism of China's Carbon Emissions Trading Market and Empirical Analysis: A Double-layer Evolutionary Game Perspective

WANG Jiecheng^a, GAO Wenwu^b and CHEN Shiyi^c

(a: School of Economics, Management and Law, University of South China;

b: School of Big Data and Statistics, Anhui University;

c: School of Economics, Fudan University)

Summary: High-carbon activities drive global warming, making climate governance a top development issue of global concern. The carbon market serves as a core instrument for addressing global climate challenges, a key lever for China to implement its “dual carbon” strategy, and a driving force for advancing high-quality economic development in China.

As an emerging policy-driven market, it faces considerable risks and potential hazards in its initial stage, such as low market efficiency and high policy sensitivity, which may even threaten the country's macroeconomic performance. Under a market economy, asset prices often serve as a signal reflecting the level of market risk. Therefore, clarifying the formation mechanism of carbon prices helps stabilize carbon prices and promote the sound and steady development of the carbon market. Different from traditional financial markets, the carbon market is essentially a government-led market-based regulatory instrument. Its price not only follows the general laws of supply and demand in the market but is also deeply embedded in the national institutional structure. In this context, this paper explores whether the institutional characteristics of political centralization and economic decentralization in China affect carbon prices, whether they induce new patterns of carbon price volatility, and whether the sources of risk can be identified in reverse through the patterns of such price volatility.

This paper incorporates the institutional characteristics of political centralization and economic decentralization in China, introduces the analytical framework of overlapping interests theory, and systematically analyzes the interactive relationships and hierarchical features among three stakeholders: enterprises, local governments, and the central government under the principal-agent model of environmental governance. From both partial and overall perspectives, this paper further introduces carbon trading and public willingness constraints to construct a double-layer evolutionary game model involving enterprises, local governments, and the central government. On this basis, it clarifies the logical relationship between the behaviors of game players and the patterns of the carbon market under the institutional structure, and reveals the endogenous dynamic evolution mechanism of carbon prices. The findings are threefold. (1) The dual goals of economic growth and environmental conservation will facilitate the interaction between local governments and enterprises, leading to speculation among carbon market participants, greater volatility in carbon prices, and a carbon price yield distribution characterized by “leptokurtosis and fat tails”. (2) The environmental supervision from the central government will shock carbon market demand in the short term, increase the frequency of large carbon price volatility, and generate a carbon price yield distribution characterized by “leptokurtosis and distorted tails”. (3) The normalization of environmental supervision from the central government helps stabilize carbon market demand and promote the transformation of the distribution feature from “leptokurtosis and distorted tails” to “leptokurtosis and fat tails”. Subsequently, this paper defines and quantitatively identifies the feature of “leptokurtosis and distorted tails” by introducing the concept of goodness of fit. Drawing on counterfactual analysis and event study methodology, it empirically validates the theoretical analysis using daily carbon price data from the Guangdong, Hubei, and Shanghai regional carbon markets from their establishment to January 1, 2025. Finally, targeted policy implications for the development of China's carbon market are proposed from three aspects: curbing speculation, mitigating shocks, and stabilizing expectations.

Keywords: Overlapping Interests Theory; Double-layer Evolutionary Game; Carbon Trading Price; Volatility Mechanism; Leptokurtosis and Distorted Tails

JEL Classification: C73, O13, I38

(责任编辑:冀 木)(校对:曹 帅)