

传统能源和新能源协调发展的演进策略研究: 基于“政策-市场-创新-行为”的驱动机制

商波¹,黄涛珍²

(1.常州大学商学院,江苏常州 213159; 2.河海大学公共管理学院,江苏南京 211100)

摘要:为提高能源绿色发展质量,我国政府提出能源转型各阶段不同能源之间的协调关系,鼓励传统煤电企业与新能源企业开展实质性联营。然而,如何通过有效途径开展联营成为能源协调发展的关键。从“政策-市场-创新-行为”系统框架入手,基于 CCER 和绿证的碳耦合机制,构建传统煤电能源企业参与新能源联营投资的演化博弈模型,用以探究传统能源和新能源的协调发展过程。通过稳定性检验,从政策、市场、创新、成本等角度分析关键因素对均衡策略行为的影响,研究认为:较高的补贴扣除、较低的 CCER 碳抵销比例和转让绿证的高机会成本不利于碳耦合机制的形成,绿证的碳抵销功能无法摆脱“补贴困境”,能源主体的趋利行为阻碍了碳耦合机制在能源协调发展的桥梁作用;收紧初始碳配额分配有利于推动碳耦合机制的发展,并逐步代替碳市场原有的强制性惩罚机制;传统能源企业投入的一次性发电设备成本决定其是否参与新能源联营投资,但传统能源企业投入设备的低碳创新成本不是影响双方决策行为的关键因素。研究以期为传统煤电与新能源、碳市场与绿证市场的耦合发展提供思路。

关键词:绿色发展;传统能源;新能源;协调发展;演化博弈;驱动机制

中图分类号:F283

文献标志码:A

文章编号:1671-4970(2024)06-0137-14

一、引言

在“双碳”目标愿景下,我国未来一次能源需求的增长将快于煤炭需求的增长,电力需求增速快于煤炭和一次能源的增速^[1],清洁能源取代传统能源将成为绿色需求主力。电力行业对于拉动经济产出方面具有主导作用,通过落实绿色电力替代政策以促进我国经济的绿色发展^[2]。2022年,我国政府发布的《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》提出了能源转型各阶段不同能源品种之间的互补、协调、替代关系,在明确传统煤电机组与非

化石能源发电的协调关系时指出,要加快建设全国碳排放权交易市场、绿色电力证书(简称“绿证”)交易市场,并对能源市场交易进行监管,统筹各类市场能源主体的协同转型。能源绿色低碳转型意味着不仅需要科技创新的激励、生态环保制度的保障、市场要素的配置,也要协调能源主体的利益行为关系。传统能源和新能源产业之间的利益协调是实现能源革命的关键^[3],因此,从政策、市场、创新、行为等综合视角来考察传统能源和新能源的协调发展过程已成为研究能源转型的一个重要议题。

已有研究针对能源主体的行为博弈、政策

引用本文:商波,黄涛珍.传统能源和新能源协调发展的演进策略研究:基于“政策-市场-创新-行为”的驱动机制[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2024,26(6):137-150.

基金项目:国家社会科学基金青年项目(22CJY026)

作者简介:商波(1989—),男,讲师,博士,主要从事能源技术经济研究。E-mail: shangb@cczu.edu.cn

对能源主体决策的影响、能源协调发展的市场作用等方面均有一定成果。一是在能源主体的行为博弈方面。有研究从供给侧的角度强调能源结构调整中协调多方利益的重要性和紧迫性^[4-5],普遍认为传统能源和新能源协调发展的关键在于政府监管力度、跨部门和不同能源企业的利益分歧^[6-7],两者在技术创新^[8]、环境保护^[9]、能源安全^[1]、经济效率^[10]等方面决定了电能的替代或互补关系。传统化石能源与新能源发电企业的竞争性表现为争夺市场份额^[11],其决策行为与政策约束之间的关系也变得较为复杂^[12],如碳市场引入额外新能源政策会削弱碳价信号,导致碳市场减排约束力下降,影响各类型发电企业的决策选择^[13]。二是在政策对能源主体决策的影响方面。能源转型的初始阶段是由政府推动而不是技术驱动^[14],由于能源转型触及不同能源企业、政府部门等各方利益,能源经济领域利益格局也将被重新分配^[15],需要政府在能源转型中发挥引导作用。赵昕等讨论了政府参与能源结构调整以及传统能源与新能源产业竞合关系的演化^[16-17],但竞合的缘由和机理并未得到解释;韩建国等又指出,能源转型并不是摒弃传统能源,而是要充分清洁化利用传统能源,适度发展新能源规模,实现两种能源的协调发展^[18-19]。三是在能源协调发展的市场作用研究方面,学者们主要围绕绿证交易和碳交易展开研究:如考虑绿证交易方式实现最低绿色能源消纳,侧重于研究绿证交易市场对新能源发电企业决策产生的影响^[20];关注传统化石能源企业对绿证的抵触^[21];考虑不同能源市场的交互机制则分为碳交易市场与新能源电力市场的联动作用^[22-24]、碳交易市场与传统能源电力市场的联动作用^[25-26],研究表明电力交易市场、碳交易市场与绿证交易市场的耦合联动存在长期均衡和短期均衡,碳价、绿证价格、电价、协调策略等信息相互传递^[27]。但现有研究大多是从两两驱动要素层面来分析传统和新能源的发展关系。如,Liu等研究了经济政策不确定性对传统能源和可再生能源企业投资的差异影响^[28];Liu等认为,强化市场环境和法规会加剧碳市场回报向能源市场和金融市场传递^[29];程承等分析了碳交易市场对可再生能源发电企业

创新的影响^[30],但能源转型的多维驱动研究却相对匮乏,体制机制、市场、创新等因素都深刻影响着电力能源行业的低碳水平^[31]。

综观文献,上述研究已从不同构面对传统能源和新能源的发展展开深层探究,但仍存在两方面的问题有待改进和完善:一方面,尽管有成果从碳市场和绿证市场的角度研究传统能源和新能源的投资关系,但都未从绿证和碳减排工具的耦合关系来揭示能源的协调发展;另一方面,尽管有研究考察能源的协调发展,但都针对清洁可再生能源发展,且聚焦技术、政策和环境的部分视角,仍缺少从“政策-市场-创新-行为”的系统框架来研究多维要素驱动传统能源和新能源的协调发展。鉴于此,本研究从“政策-市场-创新-行为”这一系统层面入手,深入分析传统能源企业和新能源企业协调发展的博弈策略及其演进性。传统能源绿色低碳转型、长期发展新能源是实现碳中和目标的必经之路,两者的协调过程不仅推动了技术的进步,也产生了能源价值增值。因此,本研究立足能源协调发展的时间经济价值,基于中国核证自愿减排量(CCER)和绿证的碳耦合机制构建了传统能源和新能源企业的演化博弈模型,通过均衡策略的稳定性检验,从政策、市场、创新的角度分析关键因素对均衡策略行为作用。

二、现实依据与理论假设

1. 现实依据

在“双碳”目标下,我国明确提出构建以新能源为主的电力系统,实现从传统化石能源向新能源消费的转变。在碳排放强度逐渐收紧的背景下,传统化石能源面临着“保供给”和“降污染”的发展任务,但在新能源成为主力电源前,传统化石能源在电力安全方面仍起托底保供的“压舱石”作用。针对煤电清洁化利用,尽管我国燃煤发电机组已全面实施了超低排放和节能改造,煤电清洁发电技术得到快速发展,但传统火电结构特征决定了其碳排放强度依然较大,仍需持续投入减排创新技术。此外,在传统火电领域展开绿色能源转型成为又一趋势,如内蒙古大唐托克托

200 万千瓦新能源外送项目于 2021 年开始投资建设,这意味着由传统火电向风、光、火多能互补转型。类似地,其他传统火电企业也纷纷投资建设风能、光伏等新能源发电项目。实际上,政府也积极支持传统煤电企业创新开发利用新能源,如《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》指出,要按照推动煤炭和新能源优化组合的要求,鼓励煤电企业与新能源企业开展实质性联营。

随着绿色消费理念的持续深入,以风能和太阳能为主的新能源市场活力得到快速释放,2021 年我国正式启动的《绿色电力交易试点工作方案》极大地推动了新能源市场发展,对新能源产业投资产生积极影响。然而,新能源参与电力市场交易的核心在于保障新能源市场投资的预期收益和新能源行业投资的积极性。《关于享受中央政府补贴的绿电项目参与绿电交易有关事项的通知》指出,享受政策补贴或电网保障性收购的新能源项目,在参与绿电交易时获得高出煤电基准价格的溢价收益或绿证交易收益等额冲抵新能源政策补贴或者上交国家。若发电企业放弃补贴,则参与绿电交易获得的收益可全部归企业所有。而对于未被政策覆盖的新能源项目,可以优先参与绿色电力交

易,并获得全部发电效益,所以,纳入政策覆盖的新能源企业可根据实际经济效益权衡是否要退出补贴政策。在不同路径选择下,新能源企业的投资行为也不尽相同,这与市场交易的收益变化存在关系,继而影响新能源企业投资行为的变化轨迹。

对于新能源发电项目,政策优惠使新能源企业获得了变现绿色能源市场价值的“环境权益证书”,即 CCER 和补贴绿证。新能源企业既可以通过单独出售绿证获得补贴收益,也能够向传统火电企业出售 CCER 获得额外的碳资产收益,即碳交易、绿证交易为新能源发电企业提供环境效益变现的市场基础。当火电部门被纳入全国碳市场,为缓解减排压力,高排放传统能源企业需要投入更多的减排发电技术或购买碳排放配额或部分抵扣碳排放的 CCER 认证,这意味着环境外部性内化成了传统能源企业的发电成本,推高了传统电价,缩短了与新能源电价的差距,弱化了传统能源的竞争优势,一定程度会激发传统能源企业转型投资新能源的动机,与绿色电力市场形成耦合发展。

因此,在政策诱导、市场耦合、创新驱动和行为变化的多重驱动影响下,构建传统能源企业和新能源企业协调发展的系统性框架结构(图 1)。

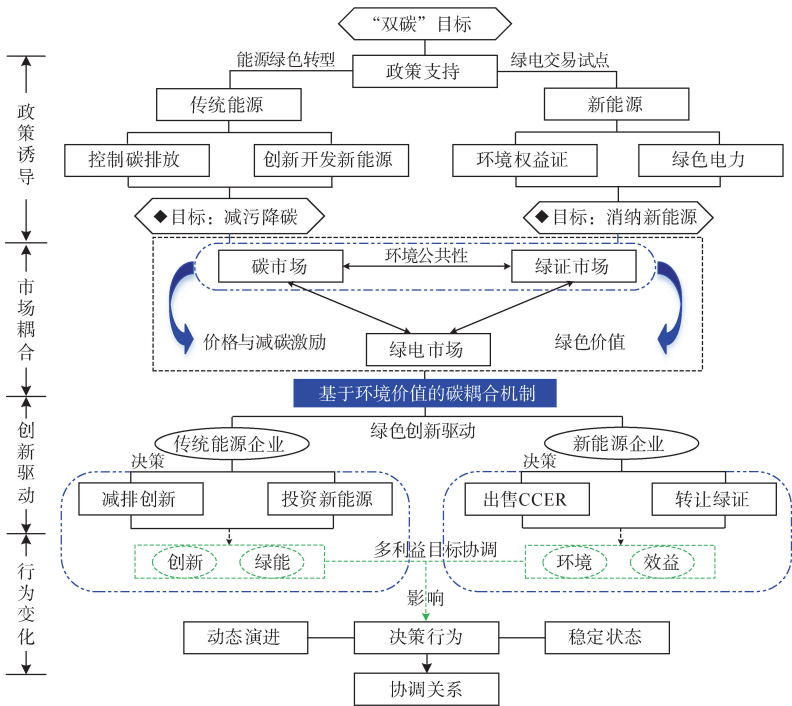


图 1 “政策-市场-创新-行为”框架下传统能源企业和新能源企业的协调发展

2. 理论假设

本研究中的传统能源是指由以煤炭为主的化石能源转化成的煤电能源,新能源以风能和太阳能为主。新能源企业享受国家补贴或电网保障性收购、CCER 项目认证等政策优惠,但实行差额政策优惠;传统能源企业为实现能源转型,可选择投资新能源发电项目作为其转型升级的重要路径,因此提出假设 H1:参与合作的主体包括传统煤电能源企业和新能源企业两类主体。

在碳市场,由于 CCER 以存量形式交易,规模相对较小,CCER 价格一般低于碳配额价格,但随着全国碳市场正式开启,在尚未重启 CCER 注册备案的条件下,市场存量 CCER 的实际余额碳抵销量在逐年减少。在临近履约周期配额清缴时,CCER 价格可能高于碳配额价格的情况。根据收益最大化原则,传统能源企业在成功投入低碳创新技术后,在价格较低时会优先使用 CCER 满足部分碳排放需求,并在初始碳配额状态下变现收益;反之,在创新成功前将面临不确定价格。由此提出假设 H2:传统煤电能源企业可以使用 CCER 满足部分碳排放需求,并利用 CCER 的价格优势获得碳收益。

《促进新时代新能源高质量发展实施方案》指出,鼓励煤电企业与新能源企业开展实质性联营。本研究旨在考察传统煤电能源企业参与投资新能源体现“实质性联营”,这种实质性参与的关键在于依托新能源为传统煤电能源提供的环境价值来实现,即通过绿证的碳抵销机制来实现传统煤电能源和新能源的协调发展,因此新能源企业可向传统能源企业提供 CCER 和绿证两种途径实现双方合作。在不改

变初始碳配额 Ω 的条件下,传统煤电能源企业通过购买 CCER 抵销 α 比例的碳排放量,剩余 $1-\alpha$ 比例的碳排放量可用绿证实现碳抵销,其中 $\alpha \in (0,1)$,由此提出假设 H3:绿证与 CCER 在碳交易市场可以形成互认机制,即绿证在碳市场与 CCER 形成互补的碳抵销耦合机制,通过碳耦合机制促进传统煤电能源和新能源的协调发展。

三、问题分析与模型构建

1. 问题分析

传统能源企业的清洁发展策略包括不参与联营、参与联营,其中不参与新能源联营意味着传统能源企业单独通过自身的低碳创新技术改进实现减排目标。假设其策略采用概率为 x ,或以 $1-x$ 的概率参与新能源联营,基于效益最优,新能源发电企业可能以 y 的概率出售 CCER,或以 $1-y$ 的概率转让绿证,其中 $x,y \in [0,1]$ 。

当传统能源企业不参与联营时,可通过自身的低碳创新来改造高碳发电技术,但创新存在成功前和成功后两种情况:若创新成功前的碳排放强度较大,将该状态发生的概率记为 p_{θ_1} ,不妨假设传统能源企业可使用合规履约的 CCER 抵销 α 的碳排放,但可能会以高价位水平 λ_1 或低价位水平 λ_2 向新能源企业购买 CCER,发生概率分别记为 $p_{\lambda_1}, p_{\lambda_2}$;若创新成功后概率记为 p_{θ_2} ,由于技术改造降低了碳排放强度,增加了传统能源企业获得变现碳收益的可能,但仍然会选择购买 CCER 满足最大碳收益,其中, $\sum_{i=1}^2 p_{\lambda_i} = 1, \sum_{i=1}^2 p_{\theta_i} = 1$ 。因此,传统能源企业不参与联营的收益 Π_{n1} 可表示为

$$\Pi_{n1} = p_{\theta_2} \underbrace{\left[p_{\lambda_1} \sum_{t=m}^n \frac{(\rho - c_{\lambda_1})\alpha\Omega}{(1+r)^t} + p_{\lambda_2} \sum_{t=m}^n \frac{(\rho - c_{\lambda_2})\alpha\Omega}{(1+r)^t} \right]}_{\text{改进成功后}(t>m)\text{的收益现值}} - p_{\theta_1} \underbrace{\left[p_{\lambda_1} \sum_{t=0}^m \frac{c_{\lambda_1}\alpha\Omega}{(1+r)^t} + p_{\lambda_2} \sum_{t=0}^m \frac{c_{\lambda_2}\alpha\Omega}{(1+r)^t} \right]}_{\text{改进成功前}(t\leq m)\text{的支出现值}} - \sum_{t=0}^m \frac{\chi}{(1+r)^t} = p_{\theta_2} \left(\rho \sum_{i=1}^2 p_{\lambda_i} - \sum_{i=1}^2 p_{\lambda_i} c_{\lambda_i} \right) \sum_{t=m}^n \frac{\alpha\Omega}{(1+r)^t} - p_{\theta_1} \sum_{i=1}^2 p_{\lambda_i} c_{\lambda_i} \left[\sum_{t=0}^m \frac{\alpha\Omega}{(1+r)^t} \right] - \sum_{t=0}^m \frac{\chi}{(1+r)^t} \quad (1)$$

式中: Π_{n1} 为收益现值; $c_{\lambda_1}, c_{\lambda_2} (c_{\lambda_1} > c_{\lambda_2})$ 分别为高价位和低价位购买的 CCER 支出; $\rho - c_{\lambda_i} (\rho > c_{\lambda_i})$ 为低碳发电技术改进成功后碳配额与 CCER 的价格差; $\alpha\Omega$ 为 CCER 的碳抵销量; $r(r>0)$ 为折现率; $t(t \in \{0, \cdots, m, \cdots, n\}, m < n)$

为传统发电设备的生命期; χ 为创新成本。此时,新能源企业通过出售 CCER 获得的环境溢价收益现值 Π_{n1} 可表示为

$$\Pi_{n1} = p_{\theta_2} \sum_{i=1}^2 p_{\lambda_i} c_{\lambda_i} \left[\sum_{t=m}^n \frac{\alpha\Omega}{(1+r)^t} \right] +$$

$$p_{\theta_1} \sum_{i=1}^2 p_{\lambda_i} c_{\lambda_i} \left[\sum_{t=0}^m \frac{\alpha \Omega}{(1+r)^t} \right] \quad (2)$$

若新能源企业通过出售绿证来获得环境溢价,考虑到补贴绿证价格较高,传统能源企业不愿以高于 CCER 的价格认购绿证,但承担一定处罚损失 $f(f>0)$,则传统能源企业的收益现值 Π_{i_2} $= - \sum_{t=0}^m \frac{\chi + f}{(1+r)^t}$ 。此时,新能源发电企业无法通过出售绿证变现环境收益,因此其收益 $\Pi_{n_2}=0$ 。

传统能源企业清洁化发展的另一途径是投资新能源,即传统能源企业结合新能源发电企业特征优化布局新建或改建煤电项目,辅助新能源企业扩大发电规模、提高绿电质量、实现降本增效的综合目标。假设,传统能源企业一次性投入的发电设备费用为 $K(K>0)$,包括设备引进、土地使用、建设费用等;投入发电设备属于低碳技术的可能性是 p_{θ_1} 或 p_{θ_2} ,参与新能源联营增加的年发电收益为 $\Delta\pi$,本着互利原则,新能源企业以较低的价格 p_{λ_2} 将 CCER 出售给传统能源企业。于是,传统能源企业获得 CCER 的收益现值 Π_{i_3} 可表示为

$$\Pi_{i_3} = \sum_{t=0}^n \frac{\Delta\pi}{(1+r)^t} + p_{\theta_2} p_{\lambda_2} \sum_{t=m}^n \frac{(\rho - c_{\lambda_2}) \alpha \Omega}{(1+r)^t} - p_{\theta_1} p_{\lambda_2} \sum_{t=0}^m \frac{c_{\lambda_2} \alpha \Omega}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^m \frac{\chi}{(1+r)^t} - K \quad (3)$$

由于联营合作使新能源发电产生了边际效应,新能源企业除了通过出售 CCER 获得对应环境溢价,同样也增加了新能源发电收益 μ ,因此新能源企业的收益现值 Π_{n_3} 可表示为

$$\Pi_{n_3} = \sum_{t=0}^n \frac{\mu}{(1+r)^t} + p_{\lambda_2} \left[p_{\theta_2} \sum_{t=m}^n \frac{c_{\lambda_2} \alpha \Omega}{(1+r)^t} + p_{\theta_1} \sum_{t=0}^m \frac{c_{\lambda_2} \alpha \Omega}{(1+r)^t} \right] \quad (4)$$

此外,传统能源企业参与新能源联营不仅增加了新能源企业的绿色发电量,而且也使其增加了绿证数量,这时,传统能源企业亦可通过内部消纳新能源以获得转让绿证。因此,在与 CCER 的耦合机制下,转让绿证用于抵销的碳排放量为 $(1-\alpha)\Omega$,但用于碳抵销的绿证只能转让一次。假设,新能源企业转让单个绿证的机会成本为 τ ,且获得绿证收益占总收益的权

重为 β ,则新能源企业的机会损失为 $\beta\tau(1-\alpha)\Omega$,但用于联营非交易的碳抵销转让绿证应当扣除补贴 S ,因此新能源企业转让绿证获得的综合收益现值 Π_{n_4} 可表示为

$$\Pi_{n_4} = \sum_{t=0}^n \frac{\mu}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{\beta\tau(1-\alpha)\Omega - S}{(1+r)^t} \quad (5)$$

传统能源发电企业通过联营投资新能源获得了用以全部抵销碳排放的绿证,节约了碳排放权交易成本。然而,利用较高价格和环保的绿证所节约的碳排放成本要优于高价购买 CCER 的费用,意味着新能源绿色价值与碳排放权的捆绑有助于传统能源企业优化绿色投资结构,因此传统能源发电企业的收益现值 Π_{i_4} 可表示为

$$\Pi_{i_4} = \sum_{t=0}^n \frac{\Delta\pi}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^n \frac{\beta\tau(1-\alpha)\Omega - S}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^m \frac{\chi}{(1+r)^t} - K \quad (6)$$

由此分析,可得传统能源企业和新能源企业的博弈支付(表 1)。

表 1 传统能源企业和新能源企业博弈支付矩阵

传统能源企业	新能源企业	
	出售 CCER(y)	转让绿证(1-y)
不参与联营(x)	Π_{i_1}, Π_{n_1}	Π_{i_2}, Π_{n_2}
参与联营(1-x)	Π_{i_3}, Π_{n_3}	Π_{i_4}, Π_{n_4}

2. 模型构建

(1)复制动态方程

假设传统能源企业不参与新能源联营时通过低碳创新获得的预期收益为 $U_{i,x}$,参与新能源联营获得的预期收益为 $U_{i,1-x}$, $U_{i,x}$ 和 $U_{i,1-x}$ 共同决定了传统能源企业不参与新能源联营的平均预期收益 $\bar{U}_i$,即 $\bar{U}_i = xU_{i,x} + (1-x)U_{i,1-x}$ 。其中: $U_{i,x} = y\Pi_{i_1} + (1-y)\Pi_{i_2}$, $U_{i,1-x} = y\Pi_{i_3} + (1-y)\Pi_{i_4}$ 。因此,传统能源企业选择不参与联营策略时,复制动态方程可用微分方程 $\dot{x}$ 表示,即

$$\dot{x} = x(U_{i,x} - \bar{U}_i) = x(1-x) \left[y(\Pi_{i_1} - \Pi_{i_2} - \Pi_{i_3} + \Pi_{i_4}) + \Pi_{i_2} - \Pi_{i_4} \right] \quad (7)$$

同理,新能源企业选择出售 CCER 策略的复制动态方程 $\dot{y}$ 为

y˙=y(U_{n,y}-U¯_n)=y(1-y)[x(Π_{n1}-Π_{n2}-Π_{n3}+Π_{n4})+Π_{n3}-Π_{n4}] (8)

式中:U_{n,y} 为新能源企业通过出售 CCER 获得的预期收益,U_{n,y}=xΠ_{n1}+(1-x)Π_{n3};U_{n,1-y} 为出售绿证获得的预期收益,U_{n,1-y}=xΠ_{n2}+(1-x)Π_{n4},平均预期收益 U¯_n=yU_{n,y}+(1-y)U_{n,1-y}。

联立式(7)(8)可得方程组,即传统能源和新能源企业协调发展策略随时间变化的演化博弈系统。

(2)策略解

根据方程组(7)和式(8)可得,令 x˙=0 且 y˙=0,可求出 4 个纯策略(0,0),(0,1),(1,0),(1,1) 和一个混合策略(x*,y*),x*=D-B+F+L/A-C-E+L,y*=H+I-K+L/A-E+H+L,且 0≤x*,y*≤1。

其中:A=p_{θ2}p_{λ1}∑_{t=m}^n(ρ-c_{λ1})αΩ/(1+r)^t,B=p_{θ2}p_{λ2}∑_{t=m}^n(ρ-c_{λ2})αΩ/(1+r)^t,C=p_{θ2}p_{λ1}∑_{t=m}^n(ραΩ)/(1+r)^t,D=p_{θ2}p_{λ2}∑_{t=m}^n(ραΩ)/(1+r)^t,E=p_{θ1}p_{λ1}∑_{t=0}^m(c_{λ1}αΩ)/(1+r)^t,F=p_{θ1}p_{λ2}∑_{t=0}^m(c_{λ2}αΩ)/(1+r)^t,G=∑_{t=0}^mχ/(1+r)^t,H=∑_{t=0}^mf/(1+r)^t,I=∑_{t=0}^nΔπ/(1+r)^t,J=∑_{t=0}^nμ/(1+r)^t,L=∑_{t=0}^nβτ(1-α)Ω-S/(1+r)^t。

M=[(1-2x)[y(A-E+H+L)-H-I-L+K]x(1-x)(A-E+H+L);y(1-y)(C-A+E-L)(1-2y)[x(C-A+E-L)+D-B+F+L]] (10)

下面分析均衡点的稳定性,以均衡点(0,0)为例,其对应的雅克比矩阵为

M_{(0,0)}=[-(H+I+L-K)0;0D-B+F+L] (11)

根据求解结果可知:一方面,新能源企业获得的补贴 S 与绿证收益占比 β、传统能源企业 CCER 支出费用 c_{λ1}、c_{λ2}、CCER 抵销的碳排放比例 α 等及概率条件共同决定了传统能源企业采用混合策略 x* 的结构形式。新能源企业转让绿证的机会成本为 τ、超碳排放惩罚 f、碳配额收益 ρ、传统能源企业参与联营获得的年收益为 Δπ、一次性投入的发电设备费用为 K 等现金流及概率条件决定了新能源企业采用混合策略 y* 的结构形式。另一方面,包括碳市场(c_{λ1},c_{λ2},α,Ω,ρ)、绿证市场(τ,β)在内的利益要素对不同能源企业的协调发展策略形成了直接的交互关系,影响双方策略的动态变化。

(3)策略的稳定性

然而,所求策略均衡点不一定是稳定的,也可能存在稳定状态,需进一步判断均衡点是否具有稳定性。根据李雅普诺夫稳定性理论,通过计算策略均衡点对应的雅克比矩阵特征值的符号来判断其稳定性,若特征值的实部或复数的实部小于零,则该均衡点是渐进稳定的。对式(7)和式(8)演化博弈系统简化得:

{x˙=x(U_{t,x}-U¯_t)=x(1-x)[y(A-E+H+L)-H-I-L+K];y˙=y(U_{n,y}-U¯_n)=y(1-y)[x(C-A+E-L)+D-B+F+L]} (9)

由此可计算出对应的雅克比矩阵:

求出矩阵(11)的特征值分别为 λ1=-H-I-L+K,λ2=D-B+F+L。若满足 K<H+I+L 且 D+F+L<B,则 λ1<0,λ2<0。此时,均衡点(0,0)是渐进稳定的。同理,其他均衡点的稳定性及满足条件如表 2 所示。

表 2 均衡策略的稳定条件

均衡策略	特征值 λ1	特征值 λ2	渐进稳定条件
(0,0)	-(H+I+L-K)	D-B+F+L	H+I+L-K>0 且 D-B+F+L<0
(1,0)	H+I+L-K	C-A+E+D-B+F	H+I+L<K 且 C+D+E+F<A+B
(0,1)	A-E-I+K	-(D-B+F+L)	A+K<E+I 且 D+F+L>B
(1,1)	-(A-E-I+K)	-(C-A+E+D-B+F)	A+K>E+I 且 C+E+D+F>A+B
(x*,y*)	λ1*	λ2*	λ1*<0 且 λ2*<0,λ1*≥0 或 λ2*≥0

四、结果分析

1. 策略的稳定性检验

(1) 参数赋值

自构建以新能源为主体的新型电力系统被提出以来,传统煤电与新能源正经历从优化组合到实质联营的转变,其是指基于贯彻落实“双碳”目标、助力新型电力系统建设等背景而提出的理念。然而,传统煤电和新能源联营目前尚无典型案例和成熟模式,碳市场、绿证市场和绿电市场也尚未有效衔接起来并形成联营的市场基础,仍面临诸多影响联营效果的挑战性难题。因此,为解决前述关键研究问题,探索更为契合实际的能源协调发展路径,挖掘助推能源绿色转型的隐含政策信息,本研究基于实际,对模型参数初始值进行取值。

根据复旦碳价指数^①,2022 年全国碳市场履约使用 CCER 的最高和最低买入价格预期分别为 62.1 元/t 和 30.62 元/t,全国碳排放配额最高卖出价格为 63.3 元/t,因此令 $c_{\lambda_1}=62.1, c_{\lambda_2}=30.62, \rho=63.3$ 。按照《碳排放权交易管理办法(试行)》规定,重点排放单位可使用 CCER 抵销不超过 5% 的碳配额,可取 $\alpha=5\%, \Omega=0.4$,这时,绿证可抵销的碳排放比例为 95%。假设传统发电设备的使用寿命 t 为 30 年, $m=7$, 贴现率 $r=7\%$,传统能源企业获得的收益 $\Delta\pi=0.42, \chi=0.2, f=0.05$,新能源企业获得的额外收益 $\mu=0.56$,转让绿证的机会成本 $\tau=0.33$,绿证收益比重 $\beta=0.6$ 。概率参数取值为: $p_{\theta_1}=0.4, p_{\theta_2}=0.6, p_{\lambda_1}=0.5, p_{\lambda_2}=0.5$ 。经计算可得, $A=0.055, B=1.4985, C=2.9026, D=2.9026, E=1.5871, F=0.7826, H=0.3195, I=5.6318$ 。

(2) 稳定性检验

检验均衡策略为 $(0,0)$ 时的稳定性:若均衡策略 $(0,0)$ 是稳定的,则应满足 $K<H+I+L$ 且 $D+F+L<B$ 。不难发现,由于 $D>B$,这与稳定性条件 $D+F+L<B$ 矛盾,因此 $(0,0)$ 不是均衡稳定的。

检验均衡策略为 $(1,0)$ 时的稳定性:若均衡策略 $(1,0)$ 是稳定的,则应满足 $H+I+L<K$ 且

$C+D+E+F<A+B$ 。由于 $D>B$ 且 $C>A$,因此, $C+D>A+B$,这与 $C+D+E+F<A+B$ 矛盾,可得 $(1,0)$ 也不是均衡稳定的。

检验均衡点为 $(0,1)$ 时的稳定性:根据均衡点为 $(0,1)$ 的稳定性条件可知, $A+K<E+I$ 且 $D+F+L>B$,若取 $S=0.05$,则计算 $L=0.3384$,此时 K 取 4。其他参数保持不变,再将相关参数初始值分别代入微分方程组,可得传统能源和新能源企业的均衡策略 $(0,1)$ 的稳定性和演进结果(图 2)。

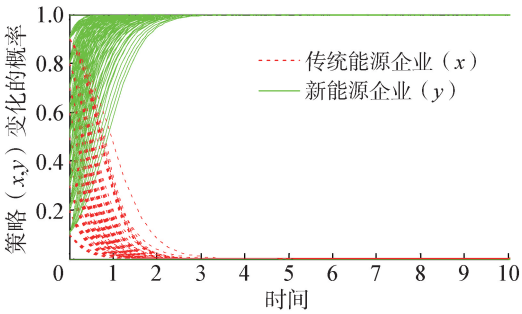


图 2 均衡策略 $(0,1)$ 的稳定性

检验均衡点为 $(1,1)$ 时的稳定性:若均衡策略 $(1,1)$ 是稳定的,则应满足 $A+K>E+I$ 且 $C+E+D+F>A+B$ 。若仍保持 $S=0.05$,此时 K 取 8。其他参数保持不变,并将相关参数初始值分别代入微分方程组,即可得到均衡策略 $(1,1)$ 的稳定性和演进结果(图 3)。

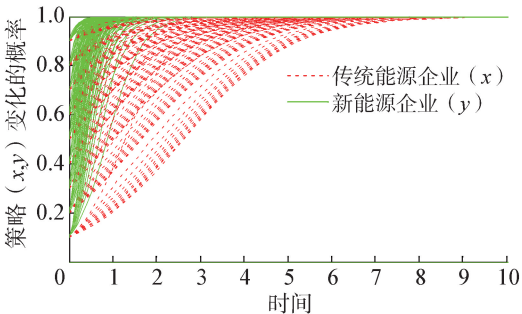


图 3 均衡策略 $(1,1)$ 的稳定性

混合策略 (x^*, y^*) 的稳定性及演进性检验。根据式(10),可求出混合策略 (x^*, y^*) 的特征值分别为

^① 根据 2022 年“通知公告—复旦大学可持续发展研究中心(fudan.edu.cn)”的实际数据赋予相应参数值。

$$\lambda_1^* = \frac{(D-B+F+L)(A-C-E-D+B-F)(A-E+H+L)}{(A-C-E+L)^2}$$

$$\lambda_2^* = \frac{(H+I-K+L)(A-E-I+K)(C-A+E-L)}{(A-E+H+L)^2}$$

若混合策略 (x^*, y^*) 是均衡稳定的,则应满足 $\lambda_1^* < 0, \lambda_2^* < 0$ 。由条件可知, $A-C-E-D+B-F < 0$,则有 $(D-B+F+L)(A-E+H+L) > 0$,经分析 L 应满足 $L < -2.1867$,取 $S = 0.3$,则 $L = -3.0138$ 。进一步根据特征值 $\lambda_2^* < 0$,可知 $C-A+E-L > 0$,于是 $(H+I-K+L)(A-E-I+K) < 0$,经分析 K 应满足 $K < 2.9375$,不妨取 $K = 2.7$ 。其他参数保持不变,可得到混合策略的特殊情形为均衡点 $(0, 0)$ (图4)。

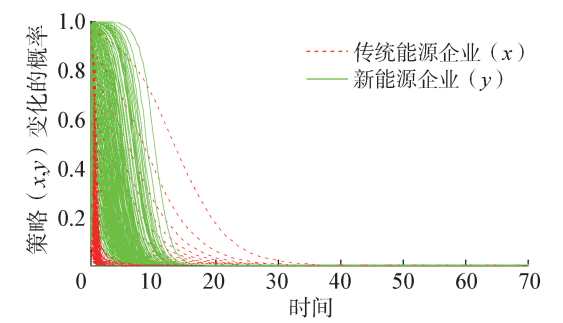


图4 均衡策略 (x^*, y^*) 的特殊情形

2. 驱动因素对策略演进的影响

稳定性检验表明,纯策略均衡点 $(0, 1)$ 以及混合策略特殊情形 $(0, 0)$ 是双方策略行为的演化结果,意味着传统能源企业愿意参与新能源联营投资,并在较短时间收敛于稳定状态,这与国家政策导向相契合,新能源企业可能低价出售CCER或转让绿证实现合作。以纯策略均衡点 $(0, 1)$ 为例,分析政策、市场、创新等驱动要素对双方行为的影响,以识别影响能源协调发展的关键因素。

(1) 政策参数分析

政策参数包括绿证补贴 S ,碳配额 Ω 和超额排放惩罚 f ,首先分析绿证补贴 S 变化的影响。当 S 变化幅度较小时, S 对策略 $(0, 1)$ 无影响;当 S 从0.05增加到2.75时,双方策略曲线呈周期性的振荡变化(图5),这意味着从新能源企业转让绿证的机会损失中扣除的补贴越大,即实行大幅度绿证补贴退坡政策,将使双方陷入长期的不稳定策略关系,表明通过补贴绿证与碳抵销捆绑的联营方式仍无法摆脱“补贴

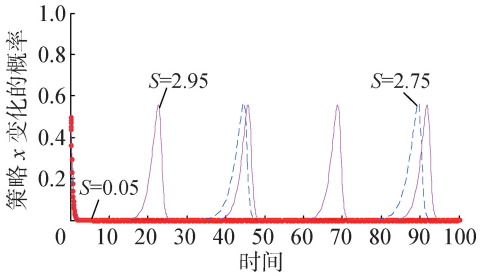
困境”。这可能是由前期高昂的绿证补贴导致,也一定程度上反映了我国目前绿证市场和碳市场难以有效衔接的问题。

从碳政策的角度看,在碳配额总量逐渐收缩的情况下(图6), Ω 由0.4降到0.07,不会长期影响传统能源企业参与联营合作策略,且新能源企业由单一的选择出售CCER向转让绿证的联营策略转变(即 $y \rightarrow 1 \rightarrow 0$),此时,CCER与绿证在碳市场形成耦合机制。对于超额排放惩罚 f ,经模拟分析,在耦合机制作用下, f 对传统能源和新能源企业的策略行为 $(0, 1)$ 不产生直接影响(图7),由此表明碳抵销耦合机制能够有效促使传统能源企业利用消纳新能源解决碳排放问题,逐步替代了碳市场原有的强制性惩罚机制。

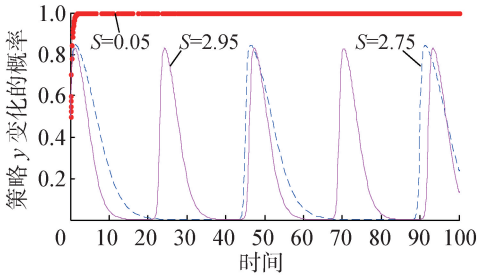
(2) 市场参数分析

碳市场 $(c_{\lambda_1}, c_{\lambda_2}, \rho, \alpha)$ 、绿证市场 (τ, β) 等利益参数的交互作用形成了复杂的市场耦合关系。

①考虑碳市场参数的变化情况。若 ρ, Ω 及其他参数不变, c_{λ_2} 的增加对策略 $(0, 1)$ 不产生影响; c_{λ_1} 和 c_{λ_2} 同时增加时,策略 $(0, 1)$ 经历“稳定 $1 \rightarrow$ 振荡 $\rightarrow$ 稳定2”的阶段变化,最终回归 $(0, 1)$ 策略(图8),传统能源企业仍然会通过联营方



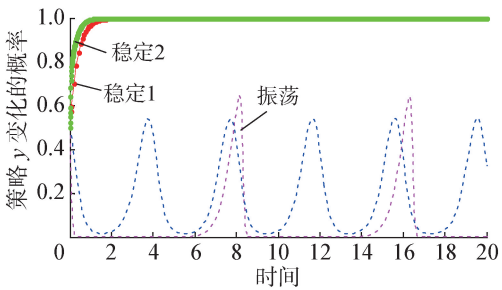
(a) S 对策略 x 的影响



(b) S 对策略 y 的影响

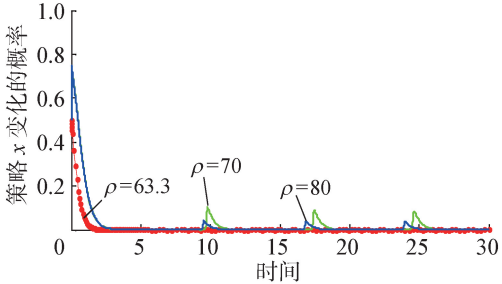
图5 补贴 S 对策略 $(0, 1)$ 的影响

式获得 CCER。若 c_{λ_1} 、 c_{λ_2} 、 Ω 及其他参数不变,图 9(b) 显示可知,在碳收益 ρ 逐渐增加的情况下,传统能源企业不参与新能源联营,从趋利角度看,新能源企业会选择转让出售价格较高的补贴绿证。此外,在碳市场如果用于 CCER 的碳抵销比例 α 设置过低,同样不利于传统和新能源的协调发展,如图 10 显示可知,逐渐降低的 α 值使传统能源企业和新能源企业长期陷

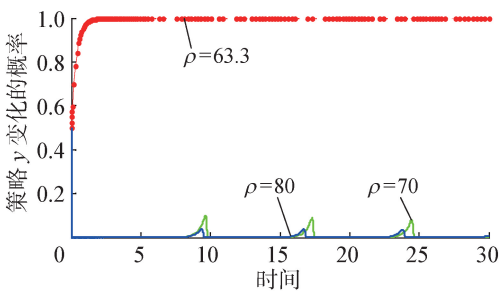


(b) CCER 价格对策略 y 的影响

图 8 CCER 价格对策略 (0,1) 的影响

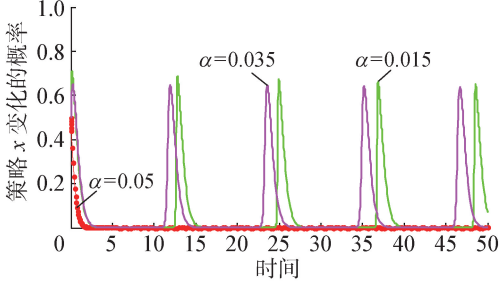


(a) ρ 对策略 x 的影响

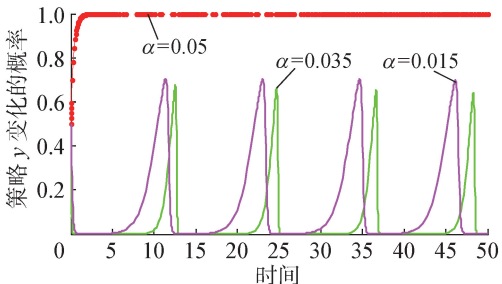


(b) ρ 对策略 y 的影响

图 9 碳收益 ρ 对策略 (0,1) 的影响

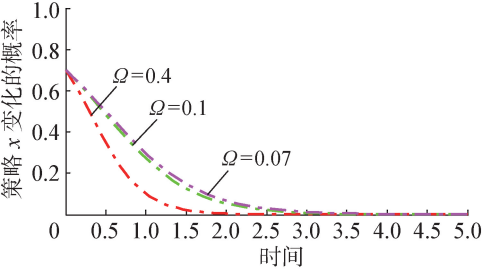


(a) α 对策略 x 的影响

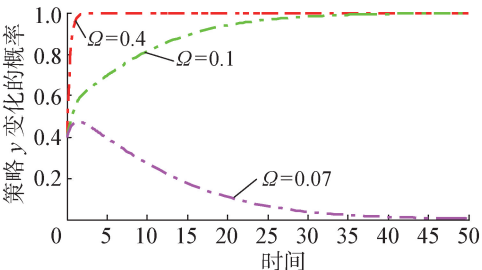


(b) α 对策略 y 的影响

图 10 CCER 碳抵销比例 α 对策略 (0,1) 的影响



(a) Ω 对策略 x 的影响



(b) Ω 对策略 y 的影响

图 6 碳配额 Ω 对策略 (0,1) 的影响

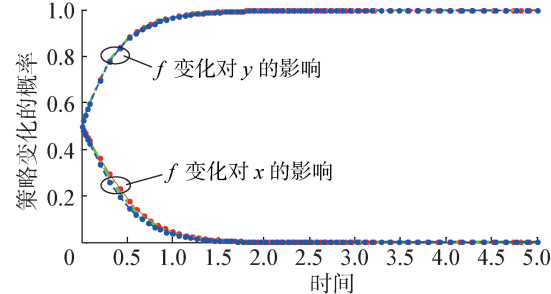
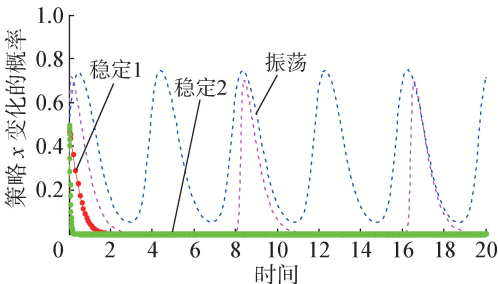


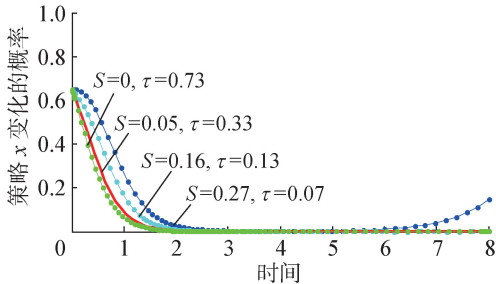
图 7 惩罚 f 对策略 (0,1) 的影响



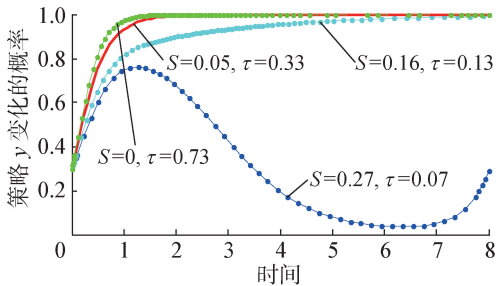
(a) CCER 价格对策略 x 的影响

人不稳定的混合策略状态。

②考虑绿证市场参数的变化情况。若其他参数保持不变,当扣除补贴 S 逐渐降低、机会成本 τ 增加时,双方策略 $x \rightarrow 0, y \rightarrow 1$,即传统能源企业获得碳抵销绿证的环境效益诱导其选择参与新能源投资,新能源企业因为转让绿证损失了较高的机会成本使其会选择出售 CCER 策略(图 11)。在此情形下,难以通过绿证与 CCER 的碳抵销耦合机制促进传统能源和新能源的协调发展,这也表明新能源对补贴政策的依赖性依然较大,绿证补贴在促进传统能源与新能源的绿色市场衔接方面仍发挥关键的调节作用。图 12 也显示:尽管 β 的增加对双方策略选择未造成根本影响,但仍反映其选择 CCER 交易的动机更强烈。



(a) S 和 τ 对策略 x 的影响



(b) S 和 τ 对策略 y 的影响

图 11 绿证补贴 S 和机会成本 τ 对策略 $(0,1)$ 的影响

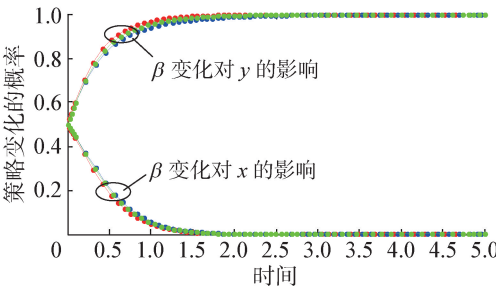


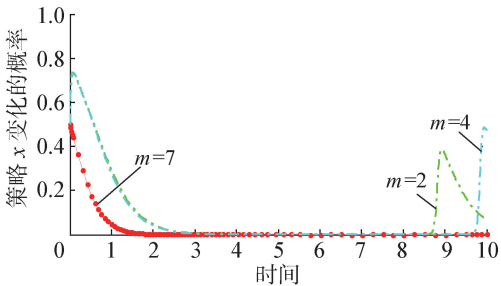
图 12 绿证收益占比 β 对策略 $(0,1)$ 的影响

(3) 减排创新参数分析

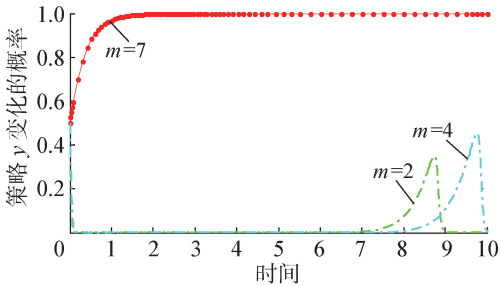
图 13 显示:当减排创新时间 m 越迟,在减碳目标下,传统能源企业参与联营投资的策略 x 由阶段性波动演化到相对稳定 ($x \rightarrow 0$),投资动机也越强;而新能源企业策略 y 由阶段性波动 ($y \rightarrow 0$) 再到稳定 ($y \rightarrow 1$),CCER 成为最优策略选择。这是由于,传统能源企业延迟的低碳创新能力决定了其前期碳排放量较大,对碳冲抵的绿证需求也较大,在有机会成本的条件下,转让绿证不会成为新能源企业的最优策略,从减排创新概率的角度也可以说明这一观点。在图 14 中,若减排创新成功的概率较低 ($p_{\theta_2} = 0.3$),新能源企业选择转让绿证策略的概率 y 处于较早周期性的振荡变化中。

(4) 成本费用分析

对传统能源企业一次性投入的发电设备费用 K 和低碳技术创新成本 χ 的成本费用进行分析。图 15(a) 为 K 对 $(0,1)$ 的影响,结果显示:当 K 增加时,传统能源企业选择联营投资策略的时间出现递延,且当投资费用超过边界时,传统能源企业将放弃投资新能源,可见,一次性发电设备投资成本是传统能源企业参与新能源联营的重要因素,但是对新能源企业的影响不大(图 15(b))。



(a) m 对策略 x 的影响



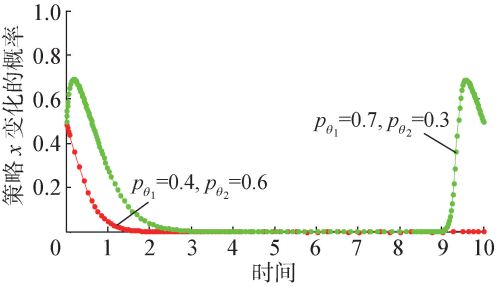
(b) m 对策略 y 的影响

图 13 创新时间 m 对策略 $(0,1)$ 的影响

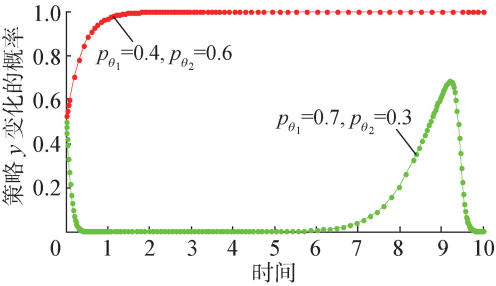
五、研究结论与政策启示

基于“政策-市场-创新-行为”框架,系统分析传统能源和新能源协调发展过程,以企业为决策主体,基于 CCER 和绿证的碳耦合机制,构建传统能源和新能源企业的演化博弈模型,分析两种能源企业协调发展的均衡策略及其演进性。通过稳定性检验,从政策、市场、创新等角度分析关键因素对均衡策略行为的作用结果:一是实行大幅度绿证补贴退坡政策、设置较低的 CCER 碳抵销比例不利于传统能源和新能源企业建立稳定的联营关系,但收紧碳配额分配有利于推动 CCER 和绿证的碳耦合机制,并逐步代替碳市场原有的强制性惩罚机制。二是从趋利角度看,传统能源企业期望通过联营获得有价格优势的 CCER,但在 CCER 价格和碳配额不变条件下,碳收益的增加使双方无法开展联营合作,新能源企业只会转让价格较高的补贴绿证,但此时很难通过碳耦合机制形成能源的协调发展。三是用于碳抵销的绿证带有补贴性质,在联营合作的转让过程,补贴的扣减幅度、机会成本仍是碳耦合机制形成的阻碍因素,这种合作无法摆脱“补贴困境”。四是传统能源企业投入的一次性发电设备成本是其参与与新能源联营的决定因素,但在绿证捆绑碳排放权的联营模式下,传统能源企业投入设备的低碳创新成本不是影响双方决策行为的关键因素。

基于此次研究,本研究得到以下促进传统煤电能源与新能源协调发展、碳市场与绿证市场耦合发展的政策启示:首先,创新绿证与 CCER 协调控碳新政策。在现有纳入新能源补贴的政策范围,考虑加快启动基于绿证的碳减排核算的能源协调发展新模式,与 CCER 形成控碳耦合机制,明确绿证与 CCER 在传统化石能源领域实现环境价值的功能定位。具体而言:一方面,要合理利用绿证转化 CCER 的减碳功能,关键在于探索绿证转换 CCER 的统一媒介条件,突破信息互通屏障。若将碳抵销绿证运用于推动能源联营发展,应当失去其二次流入外部交易市场的环境权益,以避免减碳工具的循环使用和环境价值的重复计算。另一方面,在推进绿证的减碳功能转换应用中需考虑

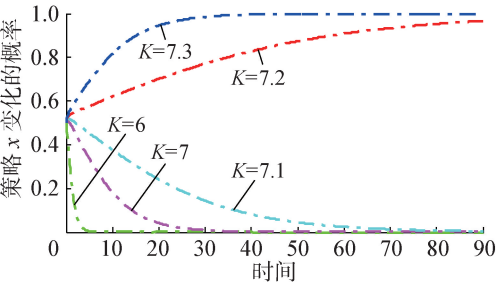


(a) p_{θ_1} 和 p_{θ_2} 对策略 x 的影响

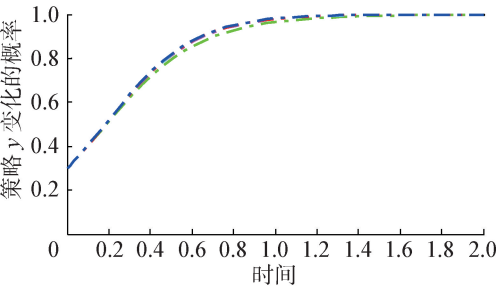


(b) p_{θ_1} 和 p_{θ_2} 对策略 y 的影响

图 14 创新概率 p_{θ_1} 和 p_{θ_2} 对策略(0,1)的影响



(a) K 对策略 x 的影响



(b) K 对策略 y 的影响

图 15 设备投资 K 对策略(0,1)的影响

从均衡解的结构形式来看,混合策略(x^* , y^*)并包含低碳技术创新成本 χ 要素,由此判断,在绿证捆绑碳排放权的联营模式下,低碳技术创新成本不是影响双方策略行为的关键因素。

绿证补贴扣减幅度对碳耦合机制形成的负面影响,正确处理新能源企业在外部交易市场获得变现绿证效益的补贴冲抵,做好绿证补贴冲抵与绿证减碳机制的政策衔接,科学运用环境权益政策促进绿证在碳市场的流动。

其次,发挥减碳优化政策与碳交易市场的协同机制。在碳排放总量控制下,针对初始碳配额分配实施减少免费分配和有偿分配相结合的优化政策。研究显示,降低碳配额有利于推动 CCER 和绿证的碳耦合机制的形成,适时收紧初始碳配额分配有利于倒逼传统煤电能源企业通过市场途径满足碳排放需求。为此,需结合不同地区的真实市场碳价,或适时引入有偿碳配额分配,并逐步提高有偿分配比例。在减碳政策优化的条件下,同时考虑增加绿证在碳市场的使用量,但需启动绿证的碳抵销功能,可考虑将纳入联营合作前提的碳抵销绿证作为激励手段,并提供相应的支持政策,在碳市场与 CCER 形成互补机制。尤其在“证电合一”的政策背景下,这样做有利于促使传统煤电企业优化能源结构,提高清洁能源投资比例,发挥碳政策、碳市场对能源协调发展的协同作用。

再次,加大能源转型主体和联营项目的支持力度。经济性是传统煤电和新能源企业联营的主要问题,在联营模式和效益尚不确定时,需要有力的政策保障机制压底。为此要加强顶层设计,对参与新能源联营投资的传统煤电能源企业提供必要的财政支持,缓解煤电企业过高的联营成本压力。尤其在示范项目的培育方面,应积极引导高新能源占比和高煤电占比的大型央企开展示范项目,优先给予专项能源结构优化的投资基金,支持联营投资活动。针对传统煤电能源和新能源联营的技术瓶颈,建立重大技术攻关的创新合作机制,并将利益共享、风险共担纳入创新合作机制的计划安排,同时加快出台促使能源资源合理配置的激励政策,提高联营合作的稳健性和持续性。

最后,鼓励传统煤电与新能源探索多元化联营模式。构建 CCER 与绿证的碳抵销耦合机制作为联营模式,通过转让绿证并消纳新能源来实现能源绿色价值,相当于置换部分传统煤电能源,但能源置换效率的关键在于如何有效

核算实际和间接的减碳量、煤炭供需变化、联营投资的溢出价值、产业规模效益等。除此以外,也可鼓励能源企业积极探索产生经济效益的其他联营模式,如煤电灵活性改造联营模式;对于大型新能源项目,可依托新能源基地建设优势配套煤电机组,结合产业布局进行灵活煤电技术改造,持续提高新能源消纳量比例;股权融资联营模式是新能源企业通过多种资本吸引方式使传统煤电企业成为联营者,并由政府提供相应的政策支持。由此可知,煤电与新能源联营模式的探索路径较多,但从实践效果和时间跨度来看,联营模式仍要结合能源企业自身的运营情况理性选择。

参考文献:

- [1] 林伯强,吴微. 中国现阶段经济发展中的煤炭需求[J]. 中国社会科学,2018(2):141-161.
- [2] WU W L, CHENG Y Y, LIN X Q, et al. How does the implementation of the policy of electricity substitution influence green economic growth in China? [J]. Energy Policy,2019,131: 251-261.
- [3] 许勤华,李文琪. 全国碳中和背景下的中国能源安全方略[J]. 南通大学学报(社会科学版),2023,39(1):117-129.
- [4] 林伯强,李江龙. 环境治理约束下的中国能源结构转变——基于煤炭和二氧化碳峰值的分析[J]. 中国社会科学,2015(9): 84-107.
- [5] 吕卫丽,叶海涛. 当代西方能源治理的三大思潮批判——兼论中国能源治理的启示[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版),2022,24(4):23-30.
- [6] 张增凯,彭彬彬,解伟,等. 能源转型与管理领域的科学研究问题[J]. 管理科学学报,2021,24(8): 147-153.
- [7] YUDHA S W, TJAHJONO B. Stakeholder mapping and analysis of the renewable energy industry in Indonesia[J]. Energies,2019, 12(4): 1-20.
- [8] WESSEH P K, LIN B Q. Energy substitution and technology costs in a transitional economy [J]. Energy,2020,203: 1-9.
- [9] 罗国祥,赵晓琳. 欧洲能源转型及对我国的启示[J]. 理论探讨,2023(5):159-163.
- [10] 郑新业,吴施美,李芳华. 经济结构变动与未来中国能源需求走势[J]. 中国社会科学,2019(2):92-112.

- [11] FURLAN C, MORTARINO C. Forecasting the impact of renewable energies in competition with non-renewable sources [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 1879-1886.
- [12] SEMMLER W, BARTOLOMEO G D, FARD B M, et al. Limit pricing and entry game of renewable energy firms into the energy sector[J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2022, 61: 179-190.
- [13] 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.
- [14] BLAZQUEZ J, FUENTES R, MANZANO B. On some economic principles of the energy transition [J]. *Energy Policy*, 2020, 147: 1-9.
- [15] 高瑜, 张庆宇. 我国能源政策转型的关键问题与主攻方向[J]. *中国行政管理*, 2018(5): 151-152.
- [16] 赵昕, 朱连磊, 丁黎黎. 能源结构调整中政府、新能源产业和传统能源产业的演化博弈分析[J]. *武汉大学学报(哲学社会科学版)*, 2018, 71(1): 145-156.
- [17] 胡剑波, 罗志鹏. 多情景模拟下我国制造业能源消费结构与碳达峰预测研究[J]. *江西社会科学*, 2022, 42(4): 50-60.
- [18] 韩建国. 能源结构调整“软着陆”的路径探析——发展煤炭清洁利用、破解能源困局、践行能源革命[J]. *管理世界*, 2016(2): 3-7.
- [19] 李磊, 蒋沁怡. 数字经济发展与我国城市能源效率的提升[J]. *贵州大学学报(社会科学版)*, 2023, 41(3): 72-83.
- [20] SIDDIQUI A S, TANAKA M, CHEN Y. Are targets for renewable portfolio standards too low? The impact of market structure on energy policy [J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(1): 328-341.
- [21] AN X, ZHANG S, LI X, et al. Two-stage joint equilibrium model of electricity market with tradable green certificates[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2019, 41(6): 1615-1626.
- [22] 林伯强, 李江龙. 基于随机动态递归的中国可再生能源政策量化评价[J]. *经济研究*, 2014, 49(4): 89-103.
- [23] FANG D, ZHAO C, YU Q. Government regulation of renewable energy generation and transmission in China's electricity market [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 775-793.
- [24] LI Y B, WU M, LI Z. A real options analysis for renewable energy investment decisions under China carbon trading market[J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1-10.
- [25] BOUTE A, ZHANG H. The role of the market and traditional regulation in decarbonising China's energy supply[J]. *Journal of Environmental Law*, 2018, 30(2): 261-284.
- [26] REN X H, LI J Y, HE F, et al. Impact of climate policy uncertainty on traditional energy and green market: evidence from time-varying granger tests [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 173: 113058.
- [27] SCHUSSER S, JARAITE J. Explaining the interplay of three markets: green certificates, carbon emissions and electricity [J]. *Energy Economics*, 2018, 71: 1-13.
- [28] LIU R Y, HE L Y, LIANG X, et al. Is there any difference in the impact of economic policy uncertainty on the investment of traditional and renewable energy enterprises? ——A comparative study based on regulatory effects [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255(10): 1-13.
- [29] LIU Y, YANG X Q, WANG M. Global transmission of returns among financial, traditional energy, renewable energy and carbon markets: new evidence[J]. *Energies*, 2021, 14(21): 1-33.
- [30] 程承, 安润飞, 董康银, 等. 碳交易机制引导下可再生能源发电企业创新策略研究——基于演化博弈视角[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(3): 82-94.
- [31] 刘强, 田川, 郑晓奇, 等. 中国电力行业碳减排相关政策评价[J]. *资源科学*, 2017, 39(12): 2368-2376.

**The Evolutionary Strategy of Harmonious Development of Traditional and New Energy Sources:
A Study Based on the Driving Mechanism of Policy, Market, Innovation and Behavior** /SHANG
Bo¹, HUANG Taozhen² (1.School of Business, Changzhou University, Changzhou 213159, China;
2. School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To improve the quality of green energy development, the Chinese government puts forward the coordination relationship among different energy sources at various stages of energy transformation, and encourages the traditional coal power enterprises and new energy enterprises to carry out substantive joint operation. However, how to carry out joint operation through effective ways has become the key to the coordinated development of energy sources. To explore the coordinated development process of traditional and new energy, this study constructs an evolutionary game model for traditional energy enterprises to participate in new energy joint investment based on the carbon coupling mechanism of CCER and green certificate from the system framework of policy, market, innovation and behavior. Through stability test, this study analyzes the influence of key factors on equilibrium strategy behavior from the perspectives of policy, market, innovation and cost. The main conclusions show that higher subsidy deduction, lower CCER carbon offset ratio and higher opportunity cost of green certificate are not conducive to the formation of carbon coupling mechanism. The carbon offsetting function of green certificate cannot get rid of the “subsidy dilemma”, and the profit-seeking behavior of energy agents hinder the bridge role of carbon coupling mechanism in the coordinated energy development. The tightening of carbon quota allocation is conducive to promoting the development of carbon coupling mechanism, which replaces the original mandatory penalty mechanism of carbon market gradually. The one-time power generation equipment cost invested by traditional energy enterprises determines whether they participate in new energy joint investment. However, the low carbon innovation cost of input equipment of traditional energy enterprises is not the key factor affecting the decision-making behavior of both sides. This study aims to provide inspiring ideas for the coupling development of traditional coal power and new energy sources, carbon and green certificate market.

Key words: green development; traditional energy sources; new energy sources; harmonious development; evolutionary game; driving mechanism