碳中和创新联合体创新合作行为演化博弈研究

杜凤娇

（湖州师范大学经济管理学院，湖州 313000）

摘要：基于演化博弈理论，以碳中和创新联合体领军企业和科研院所创新合作构建演化博弈模型，对其合作稳定性及影响因素进行分析。研究表明：碳减排补贴、违约罚金、政府补贴、碳中和技术吸收效益、积极合作利润以及利润分配系数越高，合作主体越选择积极合作策略；超额收益、碳排放税率、研发成本以及成本分摊系数、额外成本分摊系数越高，合作主体越选择消极合作策略。基于此，从政府引导、企业主导、科研院所协同3个维度提出“激励相容＋风险共担＋价值共享”的复合治理策略，以期促进碳中和创新联合体创新合作的高质量发展。

关键词：碳中和创新联合体；创新合作；演化博弈

中图分类号：G311 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)11－0119－07

碳中和创新联合体是“双碳”背景下涌现的新型协同合作组织，由领军企业牵头，联合产业链上的其他创新主体，组建一个聚焦于降碳、减碳、负碳等碳中和关键技术研发、应用和服务模式于一体的创新型组织。各创新主体通过承担国家或市场科研项目，按照“共同参与、利益共享、风险共担”的原则，建立分工协作的契约化合作机制，其本质是整合碳中和相关要素，构建全产业联动平台，以解决关键低碳技术从研发到商业化应用的系统性挑战。国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》提出支持龙头企业联合高校、科研院所和行业上下游组建创新联合体，集中攻克低碳零碳负碳关键核心技术。科技部等9部门印发的《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030年）》提出，需通过产学研用深度融合推动绿色技术突破，强调以创新联合体为载体推动产业链的补链强链，不断形成可推广的碳中和技术集成解决方案。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确提出“以碳达峰碳中和为牵引，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，筑牢生态安全屏障，增强绿色发展动能。”国家的相关政策突出了碳中和创新联合体组建与高质量发展的重大意义。

碳中和创新联合体研发合作具有合作周期长、投资金额大、信用风险高的特点，尤其是作为牵头方的领军企业以及创新技术支持的科研院所，双方由于组织体系差异，在研发合作中面临的问题比较显著：①领军企业与科研院所双方如果没有在合约中明确规定合作成本及风险支出等具体内容，那么随着合作行为的深入，容易造成机会主义行为，进而影响碳中和创新联合体的稳定发展；②领军企业担心碳中和核心技术外溢，而科研院所忧虑收益被挤占，导致双方共享意愿不足；③碳中和技术投入高、验证周期长，碳中和创新联合体短期财务回报与长期气候效益错位，在缺乏有效控制机制的情况下，容易诱发碳中和创新联合体成员中途退出的情况。因此，研究碳中和创新联合体创新合作的影响因素及其演化博弈过程，能够为碳中和创新联合体的稳定合作提供理论基础。

1 文献综述

近年来，随着全球气候变化问题日益严峻，碳中和已成为国际社会广泛关注的焦点[1]。发达国家率先在低碳技术研发领域投入大量资金，加快部署，力争抢占技术高地[2]。然而，创新联合体的合作受到多种因素的影响，如企业的创新意愿、科研院所的合作支持、政府政策的引导、市场的正向反馈等[3]。现有研究认为联盟创新体可以通过技术转移、知识资源共享等方式加强低碳技术创新[4]。但联合体是一个复杂创新生态系统，多因素影响下很难达到最有效的状态[5]。针对碳中和创新联合体涉及多方利益主体的特征，演化博弈论因其能够刻画主体间的动态博弈过程而成为主流分析工具，因而学者们从多元主体互动的角度构建了各类演化博

收稿日期：2026-02-04

基金项目：浙江省教育厅一般科研项目（Y202248522）

作者简介：杜凤娇（1989—），女，陕西汉中人，博士，讲师，研究方向为低碳经济、产业创新。

弈模型。罗建利和王佳[6]从政府、企业、金融机构三方博弈分析，提出健全的金融支持体系有利于创新联合体长期稳定发展；戴剑勇和张澳[7]研究揭示了初始意愿、投资收益占比系数、协同创新收益正向影响产业链的协同创新。碳中和创新联合体合作创新的稳定性是研究的重点问题。刘苹等[8]认为多主体惩罚机制的引入能够有效提升低碳技术创新联盟的稳定性；何得雨等[9]研究表明，协同收益、政府补贴、惩罚成本、技术吸收效益、碳税越高，联合体双方期望合作意愿越强。虽然已有研究从演化博弈视角取得丰硕成果，但仍存在可深入研究的空间：①现有模型多聚焦政府与企业的双边博弈或引入金融机构的三方博弈，较少将科研院所作为核心内生主体纳入博弈支付矩阵，对其在知识溢出中的特殊作用考量不足；②以碳中和创新联合体作为研究对象进行探讨高质量创新合作的研究相对较少；③博弈模型未能充分考虑低碳技术创新的高投入、长周期、高风险特征，以及主体间合作意愿演化路径的非线性特征。

由于碳中和创新联合体主体中领军企业与科研院所在本质上是不同性质的组织，双方参与合作的动机有很大的差异，所争取的目标对博弈各方的价值也并不一致，需要深入分析双方的合作关系，厘清合作稳定性的影响因素。因此，通过研究领军企业和科研院所创新合作，将碳中和技术溢出效应、碳税、政府补贴与合作分配机制内生化于博弈过程，揭示制度、市场与技术三重驱动下的耦合作用机理，构建碳中和创新联合体演化博弈模型，并分析其创新合作稳定性的影响因素，探究高质量稳定合作的演化路径，提出“激励相容＋风险共担＋价值共享”的复合治理策略，为促进碳中和创新联合体稳定合作提供理论支撑与实践指引。

2　演化博弈分析

2.1　模型假设

依据碳中和创新联合体创新合作行为的演化特征，基本假设如下。

(1)合作主体。模型的合作主体分别是领军企业(A)和科研院所(B)。合作主体是有限理性的，双方基于平等自愿原则进行合作。

(2)合作策略。在双方的创新合作博弈中，领军企业和科研院所采取的合作策略有积极合作和消极合作，各自选择的策略集合为{积极合作，消极合作}。领军企业选择积极合作的概率为 $x\in[0,1]$，选择消极合作的概率为 $1-x$；科研院所选择积极合作的概率为 $y\in[0,1]$，选择消极合作的概率为 $1-y$。

(3)分摊成本。假设碳中和技术创新的研发成本为 C，领军企业以 α_1C、科研院所以 α_2C 的比例进行分摊，其中，$\alpha_1+\alpha_2=1$。在碳中和创新联合体创新合作阶段，会有额外支出成本，假设领军企业和科研院所的额外成本分别为 β_1C、β_2C，其中，$\beta_1+\beta_2=1$，选择消极合作的一方不用支出额外成本。

(4)分配利润。假设当碳中和创新联合体参与主体不管是积极合作还是消极合作，都会有一个基本收益，领军企业获基本收益为 D_1，科研院所获基本收益为 D_2，积极合作获得的收益为 E，领军企业和科研院所的合作收益系数分别为 γ_1、γ_2，其中，$\gamma_1+\gamma_2=1$。假设采取消极合作，即独自完成碳中和技术研发，其所获超额收益分别为 F_1、F_2。

(5)碳中和收益。假设政府为碳中和创新联合体双方提供了专项资金 G。领军企业为加强科研院所积极合作，增加对科研院所额外补助 H。在碳中和背景下，政府对领军企业按税率 I 征收碳排放税，对碳减排额 δ 给予补助。假设领军企业和科研院所积极合作的碳排放量为 J_1，碳减排额为 K_1。如果一方采取消极合作，领军企业碳排放量为 J_2，碳减排额为 K_2，满足 $K_1-K_2=J_1-J_2$。

(6)碳中和技术吸收效益。为促进双方积极合作，提高碳中和技术的研发效率，用 ε_1、ε_2 分别表示领军企业和科研院所的碳中和技术吸收效益。

(7)惩罚机制。碳中和创新联合体在合作创新过程中，任何一方通过“搭便车”行为来获得收益，必须对其进行处罚，出现消极合作行为的合作方受到的惩罚金额为 L，所罚金额归积极合作方所有。

2.2　模型构建

根据以上模型假设，通过分析领军企业和科研院所在不同策略组合下的成本与收益，可以构建出碳中和创新联合体创新合作的支付矩阵。具体的支付值推导过程如下。

2.2.1　双方均采取“积极合作”策略

当领军企业与科研院所都选择积极合作时，双方共同分摊研发成本，同时由于共同合作能够实现技术突破，获得较高的合作超额收益。

领军企业能获得基本收益，加上收益系数的合作收益、政府为促进双方合作提供专项资金支持，同时获得政府因碳减排给予的补贴、技术吸收效益。在成本端，领军企业需要分担部分研发成本以及额外成本，缴纳碳税。此外，为了激励科研院所，

领军企业还会向科研院所支付一笔额外补助。其计算公式为 $D_1+\gamma_1E-\alpha_1C-\beta_1C+G-H-IJ_1+\delta K_1+\varepsilon_1$。

科研院所获得基本收益,加上收益系数的合作收益、政府为促进双方合作提供专项资金支持、技术吸收效益,并获得领军企业的额外补助。在成本端,科研院所需要分担部分研发成本以及额外成本。其计算公式为 $D_2+\gamma_2E-\alpha_2C-\beta_2C+G+H+\varepsilon_2$。

2.2.2 领军企业"积极合作",科研院所"消极合作"

在此情况下,领军企业依然全力投入,而科研院所则选择"搭便车",不付出应有的努力。

领军企业选择积极合作,获得基本收益,科研院所的消极合作导致碳排放量增加,政府不会给予双方补贴,由于存在惩罚机制,科研院所缴纳的罚金归领军企业所有,在成本端,领军企业需要分担部分研发成本以及额外成本,缴纳碳排放税。其计算公式为 $D_1-\alpha_1C-\beta_1C-IJ_2+\delta K_2+L$。

科研院所选择消极合作,获得基本收益,以及违约创新获得的超额收益,在成本端,需要分担研发成本以及缴纳罚金。其计算公式为 $D_2+F_2-\alpha_2C-L$。

2.2.3 领军企业"消极合作",科研院所"积极合作"

与上述情况相对应,科研院所选择全力投入,而领军企业采取"搭便车"。

领军企业选择消极合作,获得基本收益、违约创新获得的超额收益,以及碳减排补贴,在成本端,需要分担研发成本、缴纳碳排放税并支付罚金。其计算公式为 $D_1+F_1-\alpha_1C-IJ_2+\delta K_2-L$。

科研院所选择积极合作,可以获得基本收益、领军企业支付的罚金,在成本端,需要分担部分研发成本以及额外成本。其计算公式为 $D_2-\alpha_2C-\beta_2C+L$。

2.2.4 双方均采取"消极合作"策略

当双方都选择消极合作,联合体名存实亡,双方各自独立进行研发。

领军企业选择消极合作,可以获得基本收益,以及碳减排补贴,不用按比例分摊成本,需要缴纳碳税。其计算公式为 $D_1-IJ_2+\delta K_2$。

科研院所选择消极合作,只能获得基本收益,由于独立研发,不再计算与碳中和创新联合体相关的收益成本。其计算公式为 D_2。

根据上述4种情形下的损益计算结果,建立如表1所示的碳中和创新联合体创新合作支付矩阵。

表1 碳中和创新联合体创新合作支付矩阵

策略		科研院所	
		积极合作	消极合作
领军企业	积极合作	$D_1+\gamma_1E-\alpha_1C-\beta_1C+G-H-IJ_1+\delta K_1+\varepsilon_1$	$D_1-\alpha_1C-\beta_1C-IJ_2+\delta K_2+L$
		$D_2+\gamma_2E-\alpha_2C-\beta_2C+G+H+\varepsilon_2$	$D_2+F_2-\alpha_2C-L$
	消极合作	$D_1+F_1-\alpha_1C-IJ_2+\delta K_2-L$	$D_1-IJ_2+\delta K_2$
		$D_2-\alpha_2C-\beta_2C+L$	D_2

根据模型假设和表1,碳中和创新联合体领军企业选择积极合作的期望收益 M_{11}、消极合作的期望收益 M_{12}、平均期望收益分别为 $\overline{M}_1$,计算公式为

$$M_{11}=y(D_1+\gamma_1E-\alpha_1C-\beta_1C+G-H-IJ_1+\delta K_1+\varepsilon_1)+(1-y)(D_1-\alpha_1C-\beta_1C-IJ_2+\delta K_2+L) \tag{1}$$

$$M_{12}=y(D_1+F_1-\alpha_1C-IJ_2+\delta K_2-L)+(1-y)(D_1-IJ_2+\delta K_2) \tag{2}$$

$$\overline{M}_1=xM_{11}+(1-x)M_{12} \tag{3}$$

碳中和创新联合体科研院所选择积极合作的期望收益 M_{21}、消极合作的期望收益 M_{22}、平均期望收益分别为 $\overline{M}_2$,计算公式为

$$M_{21}=x(D_2+\gamma_2E-\alpha_2C-\beta_2C+G+H+\varepsilon_2)+(1-x)(D_2-\alpha_2C-\beta_2C+L) \tag{4}$$

$$M_{22}=x(D_2+F_2-\alpha_2C-L)+(1-x)D_2 \tag{5}$$

$$\overline{M}_2=yM_{21}+(1-y)M_{22} \tag{6}$$

碳中和创新联合体中领军企业和科研院所选择积极合作的复制动态方程为

$$\frac{dx}{dt}=x(M_{11}-\overline{M}_1)=x(1-x)\{y[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1]+L-(\alpha_1+\beta_1)C\} \tag{7}$$

$$\frac{dy}{dt}=y(M_{21}-\overline{M}_2)=y(1-y)\{x[\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F_2]+L-(\alpha_2+\beta_2)C\} \tag{8}$$

根据式(7)、式(8),令 $\frac{dx}{dt}=0$,$\frac{dy}{dt}=0$,得到演化动态系统的5个局部均衡点,分别为 $M(0,0)$、$N(1,0)$、$O(0,1)$、$P(1,1)$、$Q(x^*,y^*)$,其中:

$$x^*=\frac{(\alpha_2+\beta_2)C-L}{\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F_2},$$

$$y^*=\frac{(\alpha_1+\beta_1)C-L}{\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1},$$

$0\leqslant x^*,y^*\leqslant 1$。

2.3 演化稳定策略分析

根据式(7)、式(8)以及雅可比矩阵规则,得出 $\boldsymbol{J}$ 为

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}\frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}x} & \frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}y}\\ \frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}x} & \frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}\end{bmatrix}。$$

其中：

$$\frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}x}=(1-2x)\{y[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1]+L-(\alpha_1+\beta_1)C\};$$

$$\frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}y}=x(1-x)[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1];$$

$$\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}x}=y(1-y)(\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F_2);$$

$$\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}=(1-2y)\{x[\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F_2]+L-(\alpha_2+\beta_2)C\}。$$

根据演化动态系统的 5 个局部均衡点得出雅可比矩阵行列式与迹，见表 2。

由表 1 可知，科研院所采用消极合作，领军企业采取不同策略所得到的收益差为 $L-\alpha_1C-\beta_1C$，科研院所采用积极合作，领军企业采取不同策略所得到的收益差值为 $\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-\beta_1C-H+\varepsilon_1-F_1+L$。领军企业采用消极合作，科研院所采取不同策略所得到的收益差为 $L-\alpha_2C-\beta_2C$，领军企业采用积极合作，科研院所采取不同策略所得到的收益差为 $\gamma_2E+G-\beta_2C+H+\varepsilon_2-F_2+L$。

基于以上分析，得出如下结论。

(1)当 $L-\alpha_1C-\beta_1C<0$ 且 $L-\alpha_2C-\beta_2C<0$ 时，双方都趋向于消极合作，不利于碳中和技术的创新。由于 $L-\alpha_1C-\beta_1C<0$ 和 $L-\alpha_2C-\beta_2C<0$ 分别代表领军企业和科研院所采取不同策略下的收益差额，值均小于 0，并且违约受到的惩罚 L 小于合作创新的成本。因而，双方基于自身利益最大化，会倾向于采取消极合作策略，最终达到的演化结果为 ESS(消极合作，消极合作)。

(2)当 $\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-\beta_1C-H+\varepsilon_1-F_1+L<0$ 且 $L-\alpha_2C-\beta_2C>0$ 时，科研院所采取不同策略得到的收益差值为 $L-\alpha_2C-\beta_2C>0$，即违约受到的惩罚 L 大于合作创新的成本，科研院所不会选择消极合作而是采取积极合作。在科研院所选择积极合作策略下，领军企业采取不同策略的收益差为 $\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-\beta_1C-H+\varepsilon_1-F_1+L<0$，即 $\gamma_1E+G-\beta_1C-H+\varepsilon_1-(I-\delta)K_1<F_1-(I-\delta)K_2-L$，即领军企业合作研发的创新收益 γ_1E，加上政府专项资金支持 G 和技术吸收效益 ε_1，减去额外成本 β_1C、对科研院所的额外补贴 H 以及碳税与碳减排补助差值 $(I-\delta)K_1$ 后，小于领军企业消极合作得到的超额收益 F_1，减去碳税与碳减排补助差值 $(I-\delta)K_2$ 以及违约罚款 L，说明领军企业通过独自研发所获得的收益大于合作研发收益。因此，领军企业会消极合作，进行独自创新，系统达到的稳定状态是 ESS(消极合作，积极合作)。

(3)当 $L-\alpha_1C-\beta_1C>0$ 且 $\gamma_2E+G-\beta_2C+H+\varepsilon_2-F_2+L<0$ 时，领军企业采取不同策略得到的收益差值为 $L-\alpha_1C-\beta_1C>0$，即违约惩罚成本 L 大于积极合作研发的创新成本 $\alpha_1C+\beta_1C$，因而，领军企业会采取积极合作。在领军企业积极合作时，科研院所采取不同策略的收益差值为 $\gamma_2E+G-\beta_2C+H+\varepsilon_2-F_2+L<0$，即 $\gamma_2E+G-\beta_2C+H+\varepsilon_2<F_2-L$，即科研院所合作研发的创新收益 γ_2E，加上政府专项资金支持 G、领军企业的额外补贴 H 以及技术吸收效益 ε_2，减去额外成本 β_2C 后，小于科研院

表 2　碳中和创新联合体创新合作博弈均衡点的雅可比矩阵行列式与迹

(x,y)	$\det\boldsymbol{J}$	$\mathrm{tr}\boldsymbol{J}$
(0,0)	$[L-(\alpha_1+\beta_1)C][L-(\alpha_2+\beta_2)C]$	$[L-(\alpha_1+\beta_1)C]+[L-(\alpha_2+\beta_2)C]$
(0,1)	$\{[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1]+L-(\alpha_1+\beta_1)C\}[(\alpha_2+\beta_2)C-L]$	$\{[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1]+L-(\alpha_1+\beta_1)C\}+[(\alpha_2+\beta_2)C-L]$
(1,0)	$[\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F_2+L-(\alpha_2+\beta_2)C][(\alpha_1+\beta_1)C-L]$	$[\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F_2+L-(\alpha_2+\beta_2)C]+[(\alpha_1+\beta_1)C-L]$
(1,1)	$\{[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1]+L-(\alpha_1+\beta_1)C\}\{[\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F_2]+L-(\alpha_2+\beta_2)C\}$	$-\{[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1]+L-(\alpha_1+\beta_1)C\}-\{[\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F_2]+L-(\alpha_2+\beta_2)C\}$
(x^*,y^*)	$-\left\{[(\alpha_1+\beta_1)C-L][(\alpha_2+\beta_2)C-L]\cdot\frac{\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1-F_1-\beta_1C+L}{\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1}\cdot\frac{\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2-F_2-\beta_2C+L}{\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F_2}\right\}$	0

所独自创新得到的超额收益 F_2 减去违约罚款 L,说明科研院所独自创新得到的收益大于合作研发收益。因此,科研院所会采取消极合作,进行独自创新,系统达到的稳定状态是 ESS(积极合作,消极合作)。

(4)当 $\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-\beta_1C-H+\varepsilon_1-F_1+L>0$ 且 $\gamma_2E+G-\beta_2C+H+\varepsilon_2-F_2+L>0$ 时,双方都愿意积极合作进行碳中和创新合作。领军企业合作研发的创新收益 γ_1E,加上政府专项资金支持 G 以及碳中和技术吸收效益 ε_1,减去额外成本 β_1C、对科研院所的额外补贴 H 以及碳税与碳减排补助差值 $(I-\delta)K_1$ 后,大于领军企业消极合作得到的超额收益 F_1,减去碳税与碳减排补助差值 $(I-\delta)K_2$ 以及违约罚款 L。科研院所合作研发的创新收益 γ_2E,加上政府专项资金支持 G、领军企业的额外补贴 H 以及技术吸收效益 ε_2,减去额外成本 β_2C 后,大于科研院所独自创新得到的超额收益 F_2 减去违约罚款 L,说明双方合作研发收益均大于违约独自研发收益。因此,碳中和创新联合体各方都倾向于积极合作获得更多收益,系统达到的稳定状态是 ESS(积极合作,积极合作)。

(5)根据表 2,碳中和创新联合体创新合作演化稳定策略还有两种特殊情况:①违约惩罚 $L<\min[(\alpha_1+\beta_1)C,(\alpha_2+\beta_2)C]$,领军企业 $\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-\beta_1C-H+\varepsilon_1-F_1+L>0$ 且科研院所 $\gamma_2E+G-\beta_2C+H+\varepsilon_2-F_2+L>0$,此时需采取混合策略,系统稳定的状态是 ESS(积极合作,积极合作)、ESS(消极合作,消极合作);②违约惩罚 $L>\max[(\alpha_1+\beta_1)C,(\alpha_2+\beta_2)C]$,领军企业 $\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-\beta_1C-H+\varepsilon_1-F_1+L<0$ 且科研院所 $\gamma_2E+G-\beta_2C+H+\varepsilon_2-F_2+L<0$,此时需采取混合策略,系统稳定的状态是 ESS(积极合作,消极合作)、ESS(消极合作,积极合作)。

3 碳中和创新联合体创新合作影响因素分析

由于在本文中主要是针对双方由消极合作到积极合作的状态研究,主要探讨影响双方创新合作的影响因素,因而,对双方都消极合作或积极合作的情况展开研究,应满足的要求如下:

$$\begin{cases} L<\min[(\alpha_1+\beta_1)C,(\alpha_2+\beta_2)C] \\ \gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-\beta_1C-H+\varepsilon_1-F_1+L>0 \\ \gamma_2E+G-\beta_2C+H+\varepsilon_2-F_2+L>0 \end{cases} \tag{9}$$

碳中和创新联合体创新合作演化博弈的相位图如图 1 所示。

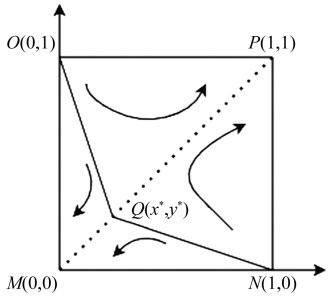


图 1 相位图

由图 1 可知,碳中和创新联合体双方的初始落点位置以及面积 S_{NQOP} 的大小决定了系统趋于稳定的路径。若 $S_{MNQO}<S_{NQOP}$,说明双方选择积极合作的可能性更高;若 $S_{MNQO}>S_{NQOP}$,说明双方选择消极合作可能性更高;若 $S_{MNQO}=S_{NQOP}$,说明双方选择消极合作和积极合作的概率是一样的。由此可知,碳中和创新联合体双方行为策略选择与 S_{NQOP} 密切相关,通过分析 S_{NQOP} 的影响因素,可以有效研究碳中和创新联合体双方演化博弈的路径。通过相位图求得 S_{NQOP},如式(10)所示。

$$\begin{aligned} S_{NQOP}&=1-\frac{1}{2}(x^*+y^*) \\ &=1-\frac{1}{2}\left[\frac{(\alpha_2+\beta_2)C-L}{\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F_2}+\frac{(\alpha_1+\beta_1)C-L}{\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1}\right] \end{aligned} \tag{10}$$

$$\frac{\partial S_{NQOP}}{\partial F_1}=-\frac{1}{2}\left\{\frac{(\alpha_1+\beta_1)C-L}{[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F]^2}\right\}<0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial S_{NQOP}}{\partial F_2}=-\frac{1}{2}\left[\frac{(\alpha_2+\beta_2)C-L}{(\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F)^2}\right]<0 \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{NQOP}}{\partial C}=-\frac{1}{2}\Bigg\{&\frac{(\alpha_2+\beta_2)(\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2-F_2)+\alpha_2L}{(\gamma_2E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2C-F)^2}+ \\ &\frac{(\alpha_1+\beta_1)[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1-F_1]+\alpha_1L}{[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1]^2}\Bigg\}<0 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\frac{\partial S_{NQOP}}{\partial I}=\frac{1}{2}\left\{\frac{(K_2-K_1)[(\alpha_1+\beta_1)C-L]}{[\gamma_1E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1C-F_1]^2}\right\}<0 \tag{14}$$

$$\frac{\partial S_{NQQP}}{\partial \beta_i}=-\frac{1}{2}\left[\frac{C}{\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1}+\frac{C}{\gamma_2 E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2 C-F_2}\right]<0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial S_{NQQP}}{\partial \alpha_i}=-\frac{1}{2}\left\{\frac{C(\gamma_2 E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2 C-F_2)-C[(\alpha_2+\beta_2)C-L]}{(\gamma_2 E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2 C-F_2)^2}+\right.$$
$$\left.\frac{C[\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1]-C[(\alpha_1+\beta_1)C-L]}{[\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1]^2}\right\}<0 \quad (16)$$

由式(11)～式(16)可得，S_{NQQP} 对超额收益 F_1、F_2，研发成本 C，碳排放税率 I，额外成本分摊系数 β_i 以及成本分摊系数 α_i 的一阶偏导数小于 0，说明 S_{NQQP} 分别为它们的单调递减函数。因而，随着双方消极合作的超额收益、研发成本、碳排放税率、额外成本分摊系数、成本分摊系数增加，S_{NQQP} 变小，选择积极合作的概率减小，系统会向 $M(0,0)$ 演化，双方趋向于 ESS(消极合作，消极合作)的状态。

$$\frac{\partial S_{NQQP}}{\partial \delta}=-\frac{1}{2}\left\{\frac{(K_2-K_1)[(\alpha_1+\beta_1)C-L]}{[\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1]^2}\right\}>0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial S_{NQQP}}{\partial L}=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{\gamma_2 E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2 C-F_2}+\frac{1}{\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1}\right]>0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial S_{NQQP}}{\partial E}=\frac{1}{2}\left\{\frac{\gamma_2[(\alpha_2+\beta_2)C-L]}{(\gamma_2 E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2 C-F_2)^2}+\frac{\gamma_1[(\alpha_1+\beta_1)C-L]}{[\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1]^2}\right\}>0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial S_{NQQP}}{\partial G}=\frac{1}{2}\left\{\frac{(\alpha_2+\beta_2)C-L}{(\gamma_2 E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2 C-F_2)^2}+\frac{(\alpha_1+\beta_1)C-L}{[\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1]^2}\right\}>0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial S_{NQQP}}{\partial \varepsilon_1}=\frac{1}{2}\left\{\frac{(\alpha_1+\beta_1)C-L}{[\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1]^2}\right\}>0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial S_{NQQP}}{\partial \varepsilon_2}=\frac{1}{2}\left[\frac{(\alpha_2+\beta_2)C-L}{(\gamma_2 E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2 C-F_2)^2}\right]>0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial S_{NQQP}}{\partial \gamma_i}=\frac{1}{2}\left\{\frac{E[(\alpha_2+\beta_2)C-L]}{(\gamma_2 E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2 C-F_2)^2}+\frac{E[(\alpha_1+\beta_1)C-L]}{[\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1]^2}\right\}>0 \quad (23)$$

由式(17)～式(23)可得，S_{NQQP} 对碳减排补贴 δ，违约罚金 L，积极合作收益 E，政府补贴 G，碳中和技术吸收效益 ε_1、ε_2 以及积极合作利润分配系数 γ_i 的一阶偏导数大于 0，说明 S_{NQQP} 分别为它们的单调递增函数。因而，对于碳中和创新联合体的领军企业和科研院所而言，随着碳减排补贴、违约罚金、积极合作收益、政府补贴、碳中和技术吸收效益、积极合作利润分配系数的增加，S_{NQQP} 变大，选择积极合作的概率增大，系统会向 $P(1,1)$ 演化，双方趋向于 ESS(积极合作，积极合作)的状态。

$$\frac{\partial S_{NQQP}}{\partial H}=\frac{1}{2}\left\{\frac{(\alpha_2+\beta_2)C-L}{(\gamma_2 E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2 C-F_2)^2}-\frac{(\alpha_1+\beta_1)C-L}{[\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1]^2}\right\} \quad (24)$$

由式(24)可知，碳中和创新联合体合作面积 S_{NQQP} 对领军企业给科研院所的额外补助 H 的一阶偏导数非单调，因而，需要对额外补助进一步分析。

$$\frac{\partial^2 S_{NQQP}}{\partial^2 H}=-\left\{\frac{(\alpha_2+\beta_2)C-L}{(\gamma_2 E+G+H+\varepsilon_2+\alpha_2 C-F_2)^3}+\frac{(\alpha_1+\beta_1)C-L}{[\gamma_1 E+(I-\delta)(K_2-K_1)+G-H+\varepsilon_1+\alpha_1 C-F_1]^3}\right\}<0 \quad (25)$$

由式(25)可知，碳中和创新联合体合作面积 S_{NQQP} 对额外补助 H 的二阶导数小于 0，因而，S_{NQQP} 存在关于 H 的极大值 S_{max}。当 S_{NQQP} 对 H 的一阶偏导数为 0 时，可以得到 H 能使 S_{NQQP} 达到最大值，此时，碳中和创新联合体双方向 $P(1,1)$ 演化的概率增大，双方会倾向于选择 ESS(积极合作，积极合作)的策略。

4　结论与建议

通过构建碳中和创新联合体创新合作的演化博弈模型，对影响合作主体稳定性的因素进行研究，得到如下主要结论：①领军企业和科研院所双方的最终博弈结果与博弈系统初始状态有关；②碳减排补贴、违约罚金、积极合作收益、政府补贴、碳中和技术吸收效益，以及积极合作利润分配系数越高，领军企业和科研院所越希望采取积极合作策略；③超额收益、研发成本、碳排放税率、额外成本分摊系数以及成本分摊系数越高，领军企业和科研院所越倾向于独自创新获取超额收益，双方采取消极合作策略；④碳中和创新联合体合作面积对领军企业给科研院所的额外补

助的二阶导数小于0,可以取得极大值,使碳中和创新联合体合作面积最大,此时,领军企业和科研院所选择积极合作策略的概率较大。

根据研究结论,从政府引导、企业主导、科研院所协同3个维度提出"激励相容+风险共担+价值共享"的复合治理策略,具体实施路径如下。

(1)构建阶梯式引导与监管体系。政府应从单纯的"资金输血"转向"制度优化""精准监管",实施动态补贴机制,将补贴额度与碳中和创新联合体的碳排放量、技术成果转化率等直接挂钩,实行"前高后低"的阶梯式补贴。监管方面,建立信用惩戒制度,针对合作中出现的"搭便车"或违约行为,政府应构建碳中和创新联合体信用信息共享平台,对于被投诉违约且查实的主体,将其列入"黑名单",在一定期限内限制其申报政府项目及享受税收优惠,以此强化违约惩罚机制的威慑力。

(2)推行契约化成本分摊与风险共担。领军企业作为碳中和创新联合体的组织者,应利用契约设计解决成本利润分配不均以及风险规避问题,降低合作摩擦成本。制定差异化的成本利润分配契约,领军企业在合作协议中明确研发成本分摊、利润分配相关指标以及额外支出补偿措施,领军企业承担主要的设备购置与相关成本,科研院所主要负责创新技术。在合作协议中设定刚性违约金,其金额高于科研院所独自研发的预期超额收益,确保科研院所违约成本高于守约收益,从而促使科研院所积极合作。

(3)强化技术吸收与利益共享机制。科研院所应从被动执行转向主动融入,通过提升技术吸收能力与明确利益诉求,增强合作黏性。科研院所应建立技术吸收效益转化通道,通过"产学研用"一体化培养机制,将碳中和创新项目与学科建设、人才培养相结合,提升自身的技术吸收效益。争取动态化的利润分配权益,科研院所应在协议签署初期明确知识产权归属与收益分成,增加成果转化提成,尤其是商业化之后,需要保障科研院所享有技术转让或股权收益,从而稳定碳中和创新联合体持续合作的信心,以实现系统最优,达到积极合作的平衡状态。

参考文献

[1] 聂子勋. 我国实现双碳战略的阶段性目标及路径[J]. 商业经济研究, 2023(23): 181-183.

[2] EIKELAND P O, SKJRSETH J B. The politics of low-carbon innovation: implementing the European Union's strategic energy technology plan[J]. Energy Research & Social Science, 2021, 76: 102043.

[3] 黄雷, 冉春红, 阳晓君. 低碳技术与产业发展集成的问题与动力因素分析[J]. 软科学, 2017, 31(4): 31-36.

[4] 姜彤彤. 产学研协同创新效率评价研究综述[J]. 中国管理信息化, 2019, 22(15): 216-219.

[5] 徐刚, 杨超. 基于演化博弈分析的产学研协同创新引导模式优化与选择[J]. 研究与发展管理, 2020, 32(1): 123-133.

[6] 罗建利, 王佳. 多方博弈视域下创新联合体的绿色技术创新策略[J]. 经济研究导刊, 2024(14): 30-34.

[7] 戴剑勇, 张澳. 产业链低碳技术协同创新演化博弈: 以核电产业链为例[J]. 南华大学学报(社会科学版), 2024, 25(3): 1-12.

[8] 刘苹, 张一, 汪熠杰. 惩罚机制下低碳技术创新联盟稳定性研究: 基于随机演化博弈视角[J]. 资源开发与市场, 2022, 38(1): 16-22.

[9] 何得雨, 邹华, 杨宣虎, 等. "双碳"目标引领下创新生态系统之联合体协同演化博弈[J]. 沈阳大学学报(社会科学版), 2021, 23(6): 636-644.

Research on Evolutionary Game of Innovation Cooperation Behavior in Carbon Neutrality Innovation Consortium

DU Fengjiao

(School of Economics and Management, Huzhou Normal University, Huzhou 313000, China)

Abstract: Based on evolutionary game theory, an evolutionary game model of innovation collaboration between leading enterprises and scientific research institutions within the carbon neutrality innovation consortium was constructed, and the stability of their cooperation and influencing factors were analyzed. It is found that higher carbon emission reduction subsidies, default penalties, government subsidies, benefits from carbon-neutral technology absorption, profits from active cooperation, and profit distribution coefficients increase the likelihood of cooperation entities adopting proactive collaboration strategies. Conversely, higher excess gains, carbon emission tax rates, R&D costs, cost-sharing coefficients, and additional cost-sharing coefficients make cooperation entities more inclined toward passive cooperation strategies. Accordingly, a composite governance strategy of "incentive compatibility+risk sharing+value sharing" is proposed from the three dimensions of government guidance, enterprise leadership, and research institute collaboration, aiming to promote high-quality development of innovation cooperation within the carbon neutrality innovation consortium.

Keywords: carbon neutrality innovation consortium; innovation cooperation; evolutionary game