

DOI:10.20061/j.issn.1673-4807.2025.04.012

区块链技术下碳核查监管演化博弈分析

王思琪,任南*

(江苏科技大学 经济管理学院,镇江 212100)

摘要:为研究区块链技术赋能碳核查监管的作用机制,构建加入区块链技术前后的“控排企业-第三方核查机构-政府监管部门”三方演化博弈模型,在分析碳核查监管系统稳定策略条件的基础上,进行数值仿真,对比验证区块链赋能碳核查监管的效能优势.研究发现:区块链技术通过加大机会主义行为实施难度、提升客观监管能力等方式,降低了严格监管成本以及核查难度,在一定阈值下减少了机会主义发生,有助于碳核查业务的监管与治理.

关键词:区块链技术;碳核查监管;机会主义;演化博弈

中图分类号:F272

文献标志码:A

文章编号:1673-4807(2025)03-078-08

Evolutionary game analysis of carbon verification and supervision under blockchain technology

WANG Siqi, REN Nan*

(School of Economics and Management, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: In order to study the effect mechanism of blockchain technology on the efficiency of carbon verification and supervision, a tripartite evolutionary game model of “control and emission enterprises, third-party verification institutions and government regulatory authorities” was constructed before and after the inclusion of blockchain technology. Based on the analysis of the stable strategy conditions of the carbon verification and supervision system, further numerical simulation was conducted to compare and verify the efficiency advantages of blockchain enabling carbon verification and supervision. The study found that blockchain technology can increase the difficulty of implementing opportunistic behaviors and improve the ability of objective supervision, reduce the cost of strict supervision and verification difficulty, reduce the occurrence of opportunism under a certain threshold, and contribute to the supervision and governance of carbon verification business.

Key words: blockchain, carbon verification and supervision, opportunism, evolutionary game

目前我国碳交易市场尚处于初级阶段,法律法规体系不尽完善^[1]、政府监管部门客观监管能力有限且核查核算方法标准不一^[2],碳核查往往易陷入监管不能的困境,违规事件难以杜绝.因此,如何对碳核查参与主体的机会主义行为进行有效监管,提升碳排放数据的整体质量和可信度,成为当前亟需应对的问题.

近年来,对碳核查领域进行了不同角度的研

究.从碳核查主体行为的视角出发,借助演化博弈理论构建碳核查三方博弈模型,深入分析复查率^[3-5]、工业增加值^[6]、碳价^[7]以及奖惩力度^[8]等因素对碳核查参与主体策略选择的影响,并提出严格监管和强化奖惩机制是破解难题的关键路径.从法律制度视角研究,揭示了委托代理制度迥异、责任边界模糊等是造成碳核查违规事件频发的主要原因^[9].针对监管问题,文献^[10-11]研究表明技

收稿日期:2024-12-17

基金项目:江苏省软科学项目(BR2023016-7)

作者简介:王思琪(2000—),女,硕士研究生

*通信作者:任南(1973—),女,教授,研究方向为信息管理与信息系统.E-mail:444755378@qq.com

引文格式:王思琪,任南.区块链技术下碳核查监管演化博弈分析[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2025,39(4):78-85.DOI:10.20061/j.issn.1673-4807.2025.04.012.

术革新具有解决“监管困境”难题的可行性。区块链技术凭借其多主体共识、数据不可篡改且可溯源等特性,已在监管领域得到广泛应用^[12-13]。例如,文献[14-15]研究表明区块链技术可有效提升供应链碳信息披露环节的信息可信度和协同共享水平。此外,基于联盟区块链设计的信用激励机制^[16]和碳信息管理框架^[17]等监管工具,助力实现了用户履约意愿提升和建筑行业碳排放信息的全生命周期溯源。可见,区块链技术对于信息透明度与真实性的提升与碳核查的监管目标高度契合,其应用优势主要体现在以下两方面:一方面,数据不可篡改和可溯源的特性增大了控排企业和第三方核查机构的数据篡改难度和造假成本,提升了政府监管部门对机会主义行为的监管能力;另一方面,多主体共识机制促进了碳核查多方协作效率的提升。然而,当前关于区块链技术在碳核查领域中遏制机会主义行为的作用机制和模式创新的探讨并不充分,关于监管方式变化提升碳核查监管效能的分析也较为有限。

基于此,文中采用演化博弈理论,从有限理性的视角出发,分别构建传统模式和区块链赋能模式下的碳核查监管博弈模型,分析各方在不同情境下的策略选择,识别遏制碳核查主体机会主义行为的关键因素,探讨区块链赋能碳核查监管的作用机制。同时,在充分考虑政府的客观监管能力和监管成本的基础上,进一步分析区块链技术引入前后的监管效能变化,以及如何通过技术手段提升碳核查的透明度和公信力。

1 传统模式下碳核查监管模型

1.1 模型假设

考虑政府监管部门、第三方核查机构和控排企业之间行为逻辑的现实基础,构建传统模式下的碳核查监管博弈模型,提出如下假设:

假设1 博弈主体:政府监管部门、第三方核查机构和控排企业。这三类主体均为有限理性,且在碳核查过程中存在信息不对称。其中,政府监管部门追求社会效益最大化,进行碳核查工作并对参与主体进行监管,可以选择严格监管并支付相对高昂的成本,也可以选择宽松监管,概率分别为 z 与 $1-z$;第三方核查机构受政府监管部门委托对碳排放报告进行核查,基于自身利益最大化原则可以选

择合规核查,也可以选择机会核查,概率分别为 y 和 $1-y$;控排企业面对碳配额履约的压力,可以选择合规上报策略,实事求是履行减排义务,也可以选择机会上报策略,寻求机会收益,概率分别为 x 和 $1-x$ 。其中, $x, y, z \in [0, 1]$ 。

假设2 在碳核查与监管过程中,政府监管部门可得到积极推动减排的社会收益 V_g ,然而,相较于宽松监管,严格监管在核查的深度和广度方面更为全面,由此产生监管成本差额 C_g 。同时,根据委托代理契约,政府监管部门需向第三方核查机构支付核查工作报酬 R_2 ,并对复核结果符合规范的第三方核查机构进行奖励 J_2 。若控排企业和第三方核查机构发生违规行为,对其设定处罚 F_1, F_2 。

假设3 在控排企业选择机会上报的情况下,可能会通过向第三方核查机构行贿(贿金为 C_h)来达成合谋。此时,控排企业可通过虚假的碳排放数据谋取不正规利益 R_a ,但若合规上报真实的碳排放数据可为自身带来减排效益 R_1 。若第三方核查机构选择机会核查,例如擅自简化核查流程、降低人员专业门槛等,产生核查成本降低额 C_i ,但核查质量难以保证。进一步地,结合实际情况与行为动机,假设对于第三方核查机构而言,机会收益大于合规收益,即 $C_i + C_h - F_2 > J_2$,控排企业违规代价小于其非法所得,即 $R_1 < R_a - C_h - C_j - F_1$ 。

模型相关参数符号释义如表1。

表1 模型各参数释义
Table 1 Interpretation of the model parameters

参数	释义
R_1	企业进行碳核查获得的减排效益
R_2	第三方核查机构提供核查服务的劳动报酬
R_a	控排企业机会上报时的额外收益
C_j	控排企业机会上报时的造假成本
C_h	双方达成“合谋”时企业对核查机构的贿金
F_1	控排企业机会上报行为失败所受罚款
F_2	第三方核查机构机会核查失败所受罚款
J_2	复核结果优秀的第三方核查机构获得的奖励
C_i	第三方核查机构机会核查成本降低额
C_g	政府严格监管与宽松监管的监管成本差价
V_g	政府监管部门积极推动减排的社会收益

结合上述假设和相关参数设置,构建三方演化博弈模型,支付收益矩阵如表2。

表 2 三方支付收益矩阵
Table 2 Tripartite payoff matrix

上报方式	主体	政府部门严格监管 z		政府部门宽松监管 $1-z$	
		第三方机构 合规核查 y	第三方机构 机会核查 $1-y$	第三方机构 合规核查 y	第三方机构 机会核查 $1-y$
控排企业 合规上报 x	企业	R_1	R_1	R_1	R_1
	机构	R_2+J_2	R_2+C_1	R_2	R_2+C_1
	政府	$V_g-C_g-R_2-J_2$	$V_g-C_g-R_2$	V_g-R_2	V_g-R_2
控排企业 机会上报 $1-x$	企业	R_1-C_j	$R_a-C_j-C_h-F_1$	R_1-C_j	$R_a-C_j-C_h$
	机构	R_2+J_2	$R_2+C_1+C_h-F_2$	R_2	$R_2+C_1+C_h$
	政府	$V_g-C_g-R_2-J_2$	$F_1+F_2+V_g-C_g-R_2$	V_g-R_2	V_g-R_2

1.2 模型构建与求解

根据表 2, 设政府监管部门选择严格监管的期望收益为 E_{11} , 选择宽松监管的期望收益为 E_{12} , 分别得到:

$$E_{11} = xy(V_g - C_g - R_2 + J_2) + x(1-y)(V_g - C_g - R_2) + y(1-x)(V_g - C_g - R_2 - J_2) + (1-x)(1-y)(F_1 + F_2 + V_g - C_g - R_2) \quad (1)$$

$$E_{12} = xy(V_g - R_2) + x(1-y)(V_g - R_2) + y(1-x)(V_g - R_2) + (1-x)(1-y)(V_g - R_2) \quad (2)$$

因此, 政府监管部门的平均期望收益 \bar{E}_1 为:

$$\bar{E}_1 = zE_{11} + (1-z)E_{12} \quad (3)$$

由此可得政府监管部门的复制动态方程为:

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(E_{11} - \bar{E}_1) = z(1-z)(F_1 + F_2 - C_g - xF_1 - xF_2 - yF_1 - yF_2 - yJ_2 + xyF_1 + xyF_2) \quad (4)$$

同理, 计算第三方核查机构和控排企业的期望收益和平均期望收益, 分别得到二者的复制动态方程 $F(y)$ 、 $F(x)$ 为:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{21} - \bar{E}_2) = y(1-y)(xC_h - C_1 - C_h + zF_2 + zJ_2 - xzF_2) \quad (5)$$

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_{31} - \bar{E}_3) = x(1-x)(C_h + C_j + R_1 - R_a - yC_h + zF_1 - yR_1 + yR_a - xyF_1) \quad (6)$$

令 $F(z) = 0, F(y) = 0, F(x) = 0$, 联立 3 个方程, 并考虑非对称博弈中可只考虑纯策略均衡稳定点, 可以得到系统均衡点: $E_1(0, 0, 0)$ 、 $E_2(1, 0, 0)$ 、 $E_3(0, 1, 0)$ 、 $E_4(0, 0, 1)$ 、 $E_5(1, 1, 0)$ 、 $E_6(1, 0, 1)$ 、 $E_7(0, 1, 1)$ 、 $E_8(1, 1, 1)$ 。

1.3 均衡点的演化稳定性分析

按照 Friedman 提出的方法, 根据系统的雅可

比 (Jacobi) 矩阵的局部稳定性分析判断演化均衡点的稳定性. 由上述复制动态方程可得该三方博弈系统的雅可比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $a_{11} = (1-2x)(C_h + C_j + R_1 - R_a - yC_h + zF_1 - yR_1 + yR_a - yzF_1)$; $a_{22} = (1-2y)(xC_h - C_1 - C_h + zF_2 + zJ_2 - xzF_2)$; $a_{33} = (1-2z)(F_1 + F_2 - C_g - xF_1 - xF_2 - yF_1 - yF_2 - yJ_2 + xyF_1 + xyF_2)$ 。

根据李雅普诺夫 (Lyapunov) 第一法可知, 若所有特征值均为负值, 则该均衡点为演化稳定策略 (evolutionarily stable strategy, ESS); 若所有特征值中至少有一个为正值, 则该均衡点具有不稳定性. 将上述 8 个局部均衡点依次代入雅可比矩阵, 得到相应特征值及符号如表 3。

根据表 3 对政府监管部门、第三方核查机构和控排企业的演化稳定策略进行分析, 可知系统均衡点的稳定性主要分为 2 种情形:

(1) 情形 1 当 $C_g > F_1 + F_2$ 时, 政府监管部门严格监管的成本大于对控排企业和第三方核查机构违规行为的管制罚金总和, 此时 $E_1(0, 0, 0)$ 为 ESS, 即控排企业机会上报虚假的碳排放数据, 第三方核查机构机会核查, 出具不完全的核查报告, 政府监管部门选择宽松监管. 此状态下, 控排企业在自身利益最大化原则的驱使下与第三方核查机构达成“合谋”, 即使严格监管能够有效揭露其机会主义行为, 但严格监管时更深更强的监管力度导致监管成本增加, 财政负担加重使得政府倾向于采取宽松监管。

(2) 情形 2 当 $C_g < F_1 + F_2$ 时, 政府监管部门严格监管的成本小于对控排企业和第三方核查机构

违规行为的管制罚金总和,此时 $E_4(0,0,1)$ 为ESS,即控排企业机会上报虚假的碳排放数据,第三方核查机构机会核查,政府监管部门选择严格监管.此时控排企业和第三方核查机构达成“合谋”,但被政府监管部门查处并罚款,并且由于有效监管获得的管制罚金缓解了严格监管策略下的财政负担,所以政府严格监管意愿显著提升.

上述分析表明, F_1 、 F_2 、 C_g 是影响传统模式下碳核查监管博弈系统稳定性的关键参数.但从均衡点稳定性的不同情形可知,仅仅依靠奖惩机制设计尚不足以有效遏制高额机会收益诱发的违规行为.因此,降低政府严格监管的成本,对于激励政府加强监管力度、确保监管机制有效运行、推动碳核查工作有序进行至关重要.

表3 均衡点特征值及符号判定

Table 3 Characteristic value and symbol determination of equilibrium point

均衡点	矩阵特征值	实部符号	稳定条件
$E_1(0,0,0)$	$-C_1-C_h, F_1+F_2-C_g, C_h+C_j+R_1-R_a$	$(-, N, -)$	①
$E_2(1,0,0)$	$-C_g, -C_1, R_a-C_j-R_1-C_h$	$(-, -, +)$	\
$E_3(0,1,0)$	$C_j, -C_g-J_2, C_h+C_1$	$(+, -, +)$	\
$E_4(0,0,1)$	$C_g-F_1-F_2, F_2-C_1-C_h+J_2, C_h+C_j+F_1+R_1-R_a$	$(N, -, -)$	②
$E_5(1,1,0)$	$C_1, -C_j, -C_g-J_2$	$(+, -, -)$	\
$E_6(1,0,1)$	$C_g, J_2-C_1, R_a-C_j-C_h-F_1-R_1$	$(+, N, +)$	\
$E_7(0,1,1)$	$C_j, C_g+J_2, C_1+C_h-F_2-J_2$	$(+, +, +)$	\
$E_8(1,1,1)$	$C_1-J_2, -C_j, C_g+J_2$	$(N, -, +)$	\

注:“N”表示符号不确定;“+”表示符号为正;“-”表示符号为负.①表示 $C_g > F_1 + F_2$;②表示 $C_g < F_1 + F_2$

2 区块链赋能模式下的碳核查监管模型

2.1 模型假设与支付收益矩阵

假设4 区块链技术的部署与应用需要投入一定的成本.作为系统建设的主体,政府监管部门需要承担初始投资和运维成本 C_3 ,第三方核查机构在采用区块链碳核查系统时需要耗费技术建设、人员培训等应用成本 C_2 ,企业接入区块链碳核查系统

则需要承担设备建设和应用成本 C_1 .同时,假定区块链碳核查系统的应用也带来一定效益:凭借其真实性与透明度的优势,第三方核查机构可实现核查成本的降低额 L_2 ,通过智能合约监管与数据共享机制,政府监管部门可实现监管成本降低额 L_3 .

结合假设1~4和相关参数设置,构建区块链赋能模式下的碳核查监管博弈模型,并计算得到复制动态方程组:

$$\begin{cases} F(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)(C_h+C_j+R_1-R_a-y C_h+zx F_1-y R_1+yz R_a-zy F_1) \\ F(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)(L_2-C_1-C_h+zx C_h+zx F_2+yz J_2-xy F_2) \\ F(z) = \frac{dz}{dt} = z(1-z)(F_1+F_2+L_3-C_g-xy F_1-xy F_2-y F_1-y F_2-xy F_1+xy F_2) \end{cases} \quad (8)$$

2.2 均衡点的演化稳定性分析

求解式(8),可知此时系统有均衡点: $E_1(0,0,0)$ 、 $E_2(1,0,0)$ 、 $E_3(0,1,0)$ 、 $E_4(0,0,1)$ 、 $E_5(1,1,0)$ 、 $E_6(1,0,1)$ 、 $E_7(0,1,1)$ 、 $E_8(1,1,1)$.同样的,将局部均衡点依次代入雅克比矩阵,计算得到相应特征值及其符号如表4.

收益,此时 $E_1(0,0,0)$ 为ESS,即控排企业机会上报,第三方核查机构机会核查,政府监管部门宽松监管.此时,政府监管部门存在区块链技术应用效果不显著的现象,这种情况通常出现在区块链技术应用初期,此时基于区块链的碳核查系统尚未完全成熟,存在较高的操作难度和风险,各参与方均需承担较大的边际成本.由于区块链技术未能有效降低核查与监管成本,系统最终演化至最不理想的均衡稳定状态.

进一步分析,得到系统均衡点的稳定性的4种情形:

(1) 情形1 当 $F_1+F_2+L_3 < C_g, L_2 < C_1+C_h$ 时,政府监管部门监管成本降低额与管制罚金之和小于严格监管成本,核查机构成本降低额小于机会核查

(2) 情形2 当 $F_1+F_2+L_3 > C_g$ 且 $C_1+C_h-F_2 > J_2+L_2$ 时,政府监管部门监管成本降低额与管制罚金之

和大于严格监管成本,机会核查收益与罚金之差大于核查机构成本降低额与合规核查奖励之和,此时 $E_4(0,0,1)$ 为 ESS,即控排企业机会上报,第三方核查机构机会核查,政府监管部门严格监管.此时,区块链技术应用带来的的核查成本降低额与管制罚金共同缓解了政府监管部门的财政负担,进而提升了严格监管意愿.但第三方核查机构仍会受机会收益驱使,选择机会上报.可见,对于政府而言,监管成本虽是影响策略选择的重要因素,但机会主义行为产生的巨额收益使得区块链技术难以有效遏制此类投机行为的频繁发生.

(3) 情形 3 当 $C_i < L_2$ 且 $C_g + J_2 > L_3$ 时,在区块链技术的应用背景下,第三方核查机构核查成本降低额大于其机会核查成本降低额,政府监管部门严格监管成本与合规奖励之和大于监管成本降低额,此时 $E_5(1,1,0)$ 为 ESS,即控排企业合规上报,第三方核查机构合规核查,政府监管部门宽松监管.这表

明区块链技术有效抑制了第三方核查机构的机会主义行为,但当其对监管成本的降低效果不够显著时,政府监管部门会倾向于采取宽松的监管策略.

(4) 情形 4 当 $C_i < L_2 + J_2$ 且 $C_g + J_2 < L_3$ 时,第三方核查机构核查成本降低额与合规奖励总和大于其机会核查的成本降低额,政府监管部门严格监管成本与合规奖励之和小于监管成本降低额,此时 $E_8(1,1,1)$ 为 ESS,即控排企业合规上报,第三方核查机构合规核查,政府监管部门严格监管.这一状态下,区块链技术提供了更为高效和便捷的工作方式,显著降低了核查成本,促进了合规核查意愿.同时,区块链技术也有效降低了政府部门的严格监管成本,缓解了财政压力,提升了政府严格监管意愿.最终,控排企业、第三方核查机构和政府监管部门共同达到一个有利于碳核查工作高效开展且合规运行的稳定状态.

表 4 均衡点特征值及符号判定
Table 4 Characteristic value and symbol determination of equilibrium point

均衡点	矩阵特征值	实部符号	稳定条件
$E_1(0,0,0)$	$L_2 - C_i - C_h, F_1 + F_2 - C_g + L_3, C_h + C_j + R_1 - R_a$	$(N, N, -)$	①
$E_2(1,0,0)$	$L_3 - C_g, L_2 - C_i, R_a - C_j - R_1 - C_h$	$(N, N, +)$	\
$E_3(0,1,0)$	$C_j, L_3 - C_g - J_2, C_h + C_i - L_2$	$(+, N, N)$	\
$E_4(0,0,1)$	$C_g - F_1 - F_2 - L_3, C_h + C_j + F_1 + R_1 - R_a, F_2 - C_i - C_h + J_2 + L_2$	$(N, -, N)$	②
$E_5(1,1,0)$	$C_i - L_2, -C_j, L_3 - C_g - J_2$	$(N, -, N)$	③
$E_6(1,0,1)$	$C_g - L_3, J_2 - C_i + L_2, R_a - C_j - C_h - F_1 - R_1$	$(N, N, +)$	\
$E_7(0,1,1)$	$C_j, C_g + J_2 - L_3, C_i + C_h - F_2 - J_2 - L_2$	$(+, N, N)$	\
$E_8(1,1,1)$	$-C_j, C_g + J_2 - L_3, C_i - J_2 - L_2$	$(-, N, N)$	④

注:“N”表示符号不确定;“+”表示符号为正;“-”表示符号为负.①表示 $F_1 + F_2 + L_3 < C_g, L_2 < C_i + C_h$;②表示 $F_1 + F_2 + L_3 > C_g, C_i + C_h - F_2 > J_2 + L_2$;③表示 $C_i < L_2, C_g + J_2 > L_3$;④表示 $C_i < L_2 + J_2, C_g + J_2 < L_3$

3 仿真与分析

为更直观地展示区块链赋能的碳核查监管模式有效性,运用 Matlab 对加入区块链前后的博弈系统进行仿真.参数设定主要基于现行政策文件和相关文献.根据中国政府采购网公开的 2024 年各地招标信息显示,政府委托第三方核查机构进行碳核查的中标金额大多分布在 50~100 万元之间,文中取其中位数设 $R_2 = 75$ 万元.依据 2024 年国务院发布的《碳排放权交易管理暂行条例》,将设处罚金额 $F_1 = 50$ 万元, $F_2 = 20$ 万元.其余参数参考碳核查监管的现实背景以及已有文献^[18]对仿真参数的设定方法,并基于前提约束条件设置如下: $R_1 = 20, R_a = 95, C_j = 5, C_h = 20, J_2 = 5, C_i = 5, C_g = 225, V_g = 10$,单位均为万元.

3.1 区块链技术加入前后博弈系统仿真对比分析

基于上述参数设定,对区块链技术加入前后的博弈系统进行仿真分析,得到相应的系统演化路径图,如图 1、2.

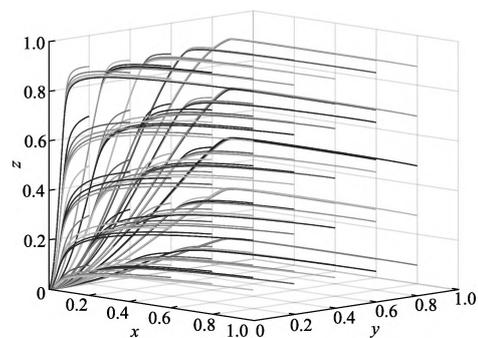


图 1 传统模式下碳核查监管系统演化路径
Fig.1 Evolution path of carbon verification and supervision system under traditional model

由图 1 可知,在传统模式下的碳核查监管系统中,无论参与主体的初始行为策略比例如何,系统最终会趋向于(0,0,0)点,即(机会上报,机会核查,宽松监管)这一最不利的稳定状态,而区块链赋能模式下的碳核查监管系统(图 2)则相反地演化至(1,1,1)点,表现为企业合规上报碳排放数据、第三方核查机构合规核查,政府监管部门严格监管,共同达成了碳核查工作运行的理想状态.这一现象有力地验证了前文对两种模式下碳核查系统演化稳定性的理论分析.

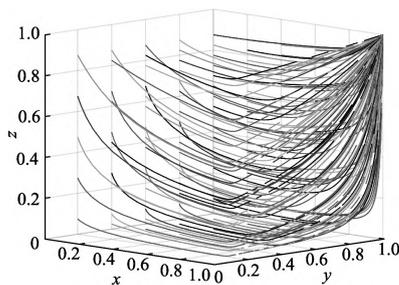


图 2 区块链赋能模式下的碳核查监管系统演化路径
Fig.2 Evolution path of carbon verification and supervision system under blockchain enabled model

由此看来,区块链技术的引入为碳核查监管系统带来了显著变化,有效降低了第三方核查机构的核查成本和政府监管部门严格监管的成本,放宽了碳核查监管博弈系统达到帕累托最优稳定状态所需的条件,在一定条件下有效促使了博弈系统向最理想的稳定状态演化.

3.2 核查成本降低额变化

保持其他变量初始值不变,分析核查成本降低额 L_2 对博弈系统的具体影响机制.如图 3, L_2 的变化并未改变博弈系统的稳定状态,可见系统的均衡状态对于 L_2 的变化并不敏感,最终均会朝着最理想的稳定状态演化.

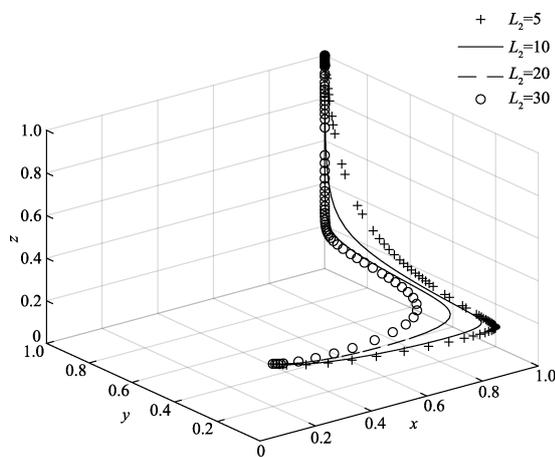


图 3 核查成本降低额对博弈系统演化的影响

Fig.3 Effect of verification cost reduction on the evolution of game system

然而值得注意的是,当 L_2 处于较低水平时,博弈系统的收敛速度相对迟缓,且与 L_2 呈现显著的正相关关系.这一发现意味着通过提高区块链技术引入后核查成本的降低幅度,能够有效增强企业合规上报、第三方机构合规核查以及政府严格核查的积极性,从而推动碳核查工作朝着更加公平、公正的方向发展.

图 4 显示,当 L_2 逐步增大,第三方碳核查机构的策略加速向合规核查策略演化.这一现象表明, L_2 变化虽不会改变第三方碳核查机构的策略选择,但 L_2 与合规核查意愿呈正相关关系.因此,区块链技术持续赋能第三方核查机构,提升其核查能力并降低相关成本,将有助于缓解碳核查过程中的信息不对称问题,提升核查质量,进而促进碳排放权交易市场的健康可持续发展.

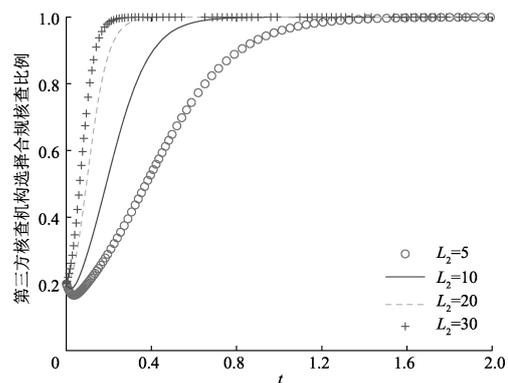


图 4 核查成本降低额变化时核查机构行为演化路径
Fig.4 Evolution path of verification institution behavior when the amount of verification cost reduction changes

3.3 监管成本降低额变化

不改变上述变量初始值,分析监管成本降低额 L_3 对博弈系统的具体影响机制.如图 5,严格监管成本降低额 L_3 的变动会显著影响政府、第三方核查机构和控排企业三方群体的策略选择.当 $L_3 = 50$ 或 $L_3 = 150$ 时,博弈系统未能收敛到(1,1,1)的理想状态;而当 $L_3 > 150$ 时,博弈系统开始向(1,1,1)收敛.

进一步观察可知,存在一个阈值 L_3^* ($150 < L_3^* < 250$),当满足 $L_3 < L_3^*$ 时,博弈系统倾向于收敛至(0,0,0),此时碳核查监管将遇到巨大阻碍.相反,而当 $L_3 > L_3^*$ 时,博弈系统收敛到最优稳定状态(1,1,1),且 L_3 越大,碳核查达到理想均衡状态的演化速度越快.可见,提升区块链技术在降低监管成本方面的应用效能,将有效促进系统向碳核查的理想稳定状态转化.

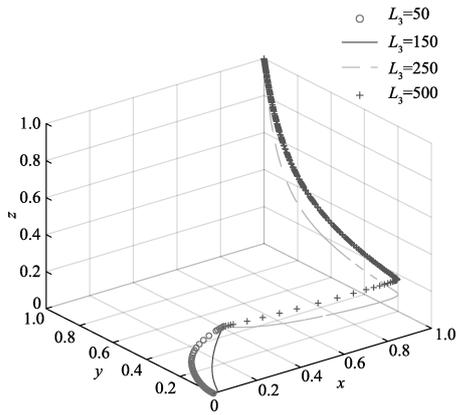


图5 监管成本降低额对博弈系统演化的影响
Fig.5 Effect of supervision cost reduction on the evolution of game system

同时,考虑核查成本降低额 L_3 变化对博弈系统中政府监管部门策略演化的影响.由图6可知,当 $L_3 = 50$ 或 $L_3 = 150$ 时,政府监管部门朝着宽松监管策略演化;当 L_3 逐渐增大,政府监管部门最终会趋向严格监管策略.此时,亦存在一个临界值 L_3^{**} ($150 < L_3^{**} < 250$),当满足 $L_3 > L_3^{**}$ 时,政府监管部门将稳定地演化至严格监管策略,并且随着 L_3 的增大,这一过程将变得更加迅速;相反,当满足 $L_3 < L_3^{**}$ 时,政府监管部门则更倾向于选择宽松监管策略.由此可见,区块链技术通过降低监管成本可极大地激发政府部门的监管积极性.

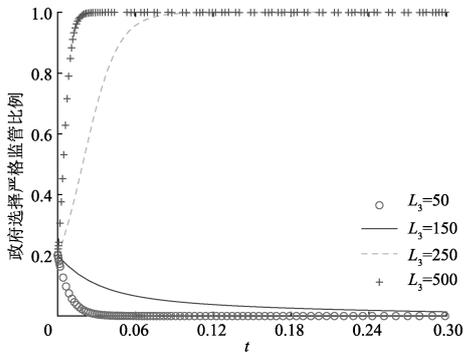


图6 监管成本降低额变化时核查机构行为演化路径
Fig.6 Evolution path of verification institution behavior when the amount of supervision cost reduction changes

4 结论与建议

通过构建三方演化博弈模型并进行数值仿真,对比两种碳核查监管模式的演化稳定状态,深入探讨了区块链技术对碳核查监管的作用机制.主要结论如下:

(1) 区块链技术显著提升了碳核查主体的合规意愿.核查成本降低与监管成本降低是是推动这

一趋势的关键因素,其中核查成本降低额与主体合规策略加速演化呈正相关性.然而,相较于政府监管部门的监管成本而言,第三方核查机构核查成本的变动影响范围较为有限,其演化结果对参数的敏感度也较低.

(2) 区块链技术有效激发了监管动力并提升了监管效能.监管模式的转变促使监管成本下降,推动政府监管部门转向严格监管策略.同时,区块链技术赋能为监管提供了更加精准、透明的工具支持,显著提升了监管效率和有效性,推动了碳核查向“合规”状态的转变,为减排工作的顺利开展提供了有力保障.

基于以上结论,为了促进区块链技术更好地提高碳核查监管效能,提出以下政策建议:

(1) 构建融合区块链技术的统一碳排放数据共享平台,实现碳排放数据的高效管理与规范核查.推进区块链技术的应用时需充分考量碳核查场景的功能需求,例如采用联盟链架构支持多方协作并且具备节点准入机制实现用户权限管理,为碳排放数据的存储和传输提供安全与隐私的可靠保障.

(2) 建立区块链技术应用与协同的激励机制.核查成本与监管成本降低是决定区块链技术赋能碳核查及监管工作有效性的关键性因素,而这两者又依赖于多方主体对区块链技术的协同采纳与应用.因此,政府应设立激励机制,如在区块链碳核查平台建设初期对企业和机构提供财政补贴、税收优惠等政策支持,有效激发企业与机构对使用区块链碳核查系统的积极性,以提升区块链碳核查系统的普及率与应用深度.

(3) 强化主体合规认知与责任感.考虑主体使用偏好对区块链碳核查模式的应用和落地的影响,政府应通过多元化渠道加强政策宣传,提升社会对碳核查制度重要性的认识.同时,加大对碳数据造假与核查失实等违规行为的惩处力度,形成有效震慑.此外,明确界定各利益相关方在确保碳排放数据真实性、合法性与完整性方面的责任,共同维护碳市场的健康发展,助力实现“双碳”目标.

参考文献 (References)

[1] 任洪涛.“双碳”背景下碳排放数据质量监管的制度省思与法治完善[J].广西社会科学,2023(2):11-19.
[2] 王江,王鹏.碳数据质量合规与企业寻租监管——演化博弈视角下第三方核查监管制度的完善研究[J].中国地质大学学报(社会科学版),2024,24

- (2):75-92.
- [3] 王丹丹, 营利荣, 付帅帅. 基于多方参与的“碳核查”业务权利寻租行为监管及控制研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(9): 225-231.
- [4] PAN Y, YANG W, MA N, et al. Game analysis of carbon emission verification: A case study from Shenzhen's cap-and-trade system in China[J]. Energy Policy, 2019, 130: 418-428.
- [5] DAI J, YAN J, GAO H. Study of Chinese carbon emission trading market mechanism based on the game theory[J]. Global NEST Journal, 2022, 24(1): 9-15.
- [6] 潘燕春, 杨雯, 马建华, 等. C&T 条件下碳排放核查三方博弈研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(9): 66-74.
- [7] 武小平, 刘鹏, 杨琳, 等. 基于第三方核查的物流企业碳排放监管演化博弈分析[J]. 统计与决策, 2022, 38(1): 184-188.
- [8] 马歆, 霍猛. 碳数据核查三方演化博弈与稳定性控制研究[J]. 生态经济, 2020, 36(1): 26-33.
- [9] 罗凡. “双碳”目标下碳排放第三方核查机制的制度省思与法治完善[J]. 环境保护, 2023, 51(增1): 55-58.
- [10] 孙睿, 何大义, 苏汇淋. 基于演化博弈的区块链技术在供应链金融中的应用研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(3): 125-134.
- [11] 张志朋. 区块链赋能碳数据安全治理的逻辑与规制[J]. 情报杂志, 2023, 42(5): 86-93.
- [12] 谭春桥, 党华平, 覃展辉. 区块链赋能下国有企业审计监管主体策略选择演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2023, 32(4): 14-22.
- [13] 韩普, 顾亮, 叶东宇, 等. 奖惩视域下区块链政务数据共享演化博弈研究[J]. 管理工程学报, 2024, 38(4): 122-132.
- [14] 田雨, 王道平, 郝玫. 基于区块链技术的供应链碳信息披露与共享机制[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(11): 3666-3683.
- [15] 王心, 王雅生, 张书华, 等. 区块链技术下绿色供应链减排策略与智能合约[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(1): 265-278.
- [16] 任南, 朱宏琳. 联盟链下云制造服务供需平台信用激励机制设计与仿真[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2023, 37(1): 71-77.
- [17] LUO Y, SHEN J, LIANG H, et al. Supporting building life cycle carbon monitoring, reporting and verification: A traceable and immutable blockchain-empowered information management system and application in Hong Kong [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2024, 208: 107736.
- [18] 刘文君, 张婷, 黄聃. 碳核查机构寻租行为和政府奖惩机制——基于三方演化博弈的仿真分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2023, 48(6): 187-197.

(责任编辑:曹莉)