

碳信用视角下企业自愿减排与碳交易行为的演化博弈研究

田昌民*, 邝映珊, 崔嘉伟, 周睿菲, 李强, 邓洁芳, 谢家意, 张志鹏

广州南洋理工职业学院智能工程学院 广东广州

【摘要】为了揭示碳信用视角下企业自愿减排与碳交易的行为规律,构建了政府-企业的演化博弈模型,剖析了碳价格、碳信用激励因子、碳信用惩罚因子和排放优化强度对政府和企业自愿减排与碳交易行为的影响机理。结果表明:碳价格过低,政府会选择不调整配额,以避免在短期内对市场产生过大的波动,以起到维护市场稳定的作用。碳交易价格上升,政府越会关注碳配额的优化分配。其次,碳信用激励和惩罚作用越大,企业的自愿减排意愿越强。排放优化强度越大,政府优化配额的难度增加,企业面临的减排任务也会变得艰巨。

【关键词】碳信用; 自愿减排; 碳交易; 演化博弈

【基金项目】广州南洋理工职业学院 2024 年度校级科研项目(NY-2024KYYB-01)、2024 年度校级“创新强校工程”项目(NY-2024CQ-KTAL020)、校级大学生创新创业训练计划项目(NY-2024CQDC-003)

【收稿日期】2024 年 12 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 1 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20250002

Research on the evolutionary game of voluntary emission reduction and carbon trading behavior of enterprises from the perspective of carbon credit

Changmin Tian*, Yingshan Kuang, Jiawei Cui, Ruifei Zhou, Qiang Li, Jiefang Deng, Jiayi Xie, Zhipeng Zhang
School of Intelligent Engineering, Guangzhou Nanyang Polytechnic College, Guangzhou, Guangdong

【Abstract】In order to reveal the behavioral patterns of voluntary emission reduction and carbon trading of enterprises from the perspective of carbon credit, a government enterprise evolutionary game model was constructed, and the impact mechanisms of carbon prices, carbon credit incentive factors, carbon credit punishment factors, and emission optimization intensity on the behavior of government and enterprises in voluntary emission reduction and carbon trading were analyzed. The results indicate that if the carbon price is too low, the government will choose not to adjust the quota to avoid excessive fluctuations in the market in the short term, in order to maintain market stability. As carbon trading prices rise, the government will pay more attention to optimizing the allocation of carbon quotas. Secondly, the greater the incentive and punitive effects of carbon credits, the stronger the voluntary willingness of enterprises to reduce emissions. The greater the intensity of emission optimization, the more difficult it is for the government to optimize quotas, and the emission reduction tasks faced by enterprises will also become daunting.

【Keywords】Carbon credit; Voluntary emission reduction; Carbon trading; Evolutionary game theory

1 引言

环境治理与减排之间的关系密切且相互依存^[1]。环境治理通过法律、政策、技术、管理等手段,改善环境质量、减少污染物排放,并促进生态保护与可持续发展^[2]。减排则是环境治理中的核心目标,同时也是应对气候变化、保护生态环境和推动社会经济

可持续发展的重要手段^[3]。我国于 2020 年提出了“2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和”的战略目标,成为全球环境治理的重要标杆。为实现这一目标,我国于 2021 年正式启动了全国碳排放交易市场(ETS),以推动温室气体减排^[4]。

在碳排放交易市场中,政府通过分配给企业排

*通讯作者:田昌民(1995-)男,安徽萧县人,硕士,研究方向:城市轨道交通管理、项目管理。

放许可(即碳配额),允许企业在市场上买卖这些配额,从而实现减排目标^[5]。这一市场机制能够调节排放量、优化资源配置,并激励企业采取更加成本效益的技术创新^[6]和减排措施^[7-8]。然而,在实际运行中,传统的碳配额分配方式(如历史排放法和基准法)^[9],带来过多的免费配额,进而可能削弱碳价提升对碳减排的作用效果^[10],出现企业减排动力不足,同时也会使低排放企业承担更多减排责任,造成配额分配的不公平^[11]。这些传统分配方法难以有效激励企业减排,同时还易受市场价格波动和政策不确定性的影响。因此,需要引入自愿减排机制。

在相关研究中,韦铁等^[12]认为自愿减排交易机制可以激励更多的社会主体主动参与碳减排活动,提升全社会的减排意识。刘迪一等^[13]认为兼具激励性和自愿性的个人碳交易机制在环境治理中会起到有效作用。Li R, et al^[14]认为中国的碳包容性政策(China's carbon inclusion policy, CIP)是一种创新的自愿减排机制,可以通过推动消费侧减排来实现双碳目标。魏琦等^[15]认为政府正向激励机制和消费者反向倒逼机制可以促进企业的自愿碳减排行为。

以上文献梳理发现,自愿减排研究主要集中于个人或家庭方面在消费端的作用。但是企业由于追求核心业务的盈利目标,容易忽视企业减排业务方面的投入,常常以购买碳配额的方式维持现有减排水平,为此企业对减排技术创新的投入动力不足。因此,需要从企业的内生动力角度,考虑企业的碳信用(Carbon Credit),碳信用是指按照相关的标准或机制制定的规则、程序和方法,开发温室气体减排或增汇项目产生的,经过独立第三方机构审定、核查和核证,所签发的温室气体减排指标^[16]。通过碳信用可以激励企业自主减排的创新性行为,提高企业整体减排能力,确保碳市场价格信号准确反映减排成本 and 市场需求,从而促进碳交易与自愿减排的协同效应,实现更加公平、有效的碳配额分配和环境治理目标。

在相关研究中,徐方明等^[17]认为免费碳配额的供给数量以及各地方市场碳信用比例可实现碳汇资本运营的良性循环。李艺轩^[18]认为碳信用交易是应对气候变化的碳金融工具的一种,能有效提升碳减排项目的经济性。Salma A, et al^[19]认为建立碳信用标准对于实现碳交易至关重要,有利于鼓励对碳行

业的投资,实现环境治理可持续发展。Zhang Y, et al^[20]认为在低碳供应链的消费领域中,可以利用碳信用额让消费者可以兑换优惠券或企业产品。Kalaiselvan S A, et al^[21]认为基于区块链的碳信用生态系统,可以建立透明度、可访问性和标准化的碳信用交易平台,解决传统碳交易系统经常存在实施分散、信用过度和交易成本过高等问题。Pande R^[22]认为目前自愿碳信用市场试图将碳信用视为一种商品进行交易。Delacote P, et al^[23]认为碳信用机制的可信度在受到威胁,需要提高整个碳信用价值链的透明度。

基于以上分析可知,碳信用机制有利于促进碳减排、提升经济性、推动低碳消费、提高交易平台透明度,但也面临信用可信度、配额分配不合理和政策不明确等挑战。尤其是碳市场中企业营利行为的动态性、复杂性,可能导致碳配额的分配和市场激励机制的失衡,影响市场的稳定性和减排效率。因此,有必要引入演化博弈方法,通过分析企业在政策和市场条件下的策略演化,优化碳配额分配和激励机制,从而实现更加公平、有效的减排目标,并促进碳市场治理的稳健发展。演化博弈能够揭示企业在竞争和合作中的行为模式,从而为政策设计者提供科学依据,推动碳市场的长期健康发展。

但是,由于碳市场中企业行为的动态性、营利性以及多主体之间的博弈问题,传统的政策分析方法难以有效预测和引导企业的减排行为,这导致了碳配额分配不公平、市场激励不足和政策效果不稳定。鉴于此,本文利用演化博弈方法,分析企业在不同政策和市场条件下的策略演化,为优化碳配额分配和激励机制,实现更加公平、有效的减排目标,促进碳市场治理的稳健发展提供理论支持。

2 模型构建与求解

2.1 模型假设

假设 1: 政府通过碳配额分配、碳信用激励政策来激励企业减排,同时企业根据政府的政策和市场条件做出决策,选择是否自愿减排、是否参与碳信用交易,维持当前的排放水平这一假设考虑了政府在碳市场中的主导作用以及企业对政策变化的响应。故政府的策略为:

(1) 通过政府优化配额分配实施激励政策,鼓励减排

(2) 政府维持现有的配额分配政策, 不进行调整。

企业的策略为:

(1) 企业选择通过自愿减排或采取减排措施来减少碳排放。

(2) 企业选择购买碳配额, 维持当前的排放水平。

假设 2: 在有限理性的情况下, 政府选择优化配额分配的概率为 x , 维持现有配额分配的概率为 $1-x$, 其中 $x \in (0,1)$, 企业选择自愿减排的概率为 y , 维持当前排放水平的概率为 $1-y$, 其中 $y \in (0,1)$ 。

这一假设是考虑了决策者在决策过程中由于信息的不完全、计算能力的有限、时间的限制以及认知偏差等因素, 无法做到完全理性或优化决策。将有限理性纳入模型考虑, 可以更真实地反映现实中的决策过程, 并且有助于更好地理解政府和企业之间的行为互动。

假设 3: 当政府采取维持现有的配额分配量 Q_2 的政策, 不进行调整策略时, 政府不支出优化成本 C_1 。此时, 政府也不会对企业自愿减排行为进行碳信用激励。另外也存在碳配额供给充足, 企业购买碳配额的需求降低, 也愿意当前排放水平^[24]。

这一假设是考虑了政府在碳配额供给充足、市场价格稳定的情况下, 选择维持现有配额分配政策

以减少优化成本, 同时避免对企业自愿减排行为进行额外激励, 确保市场稳定和企业行为的可预见性。

假设 4: 政府在优化配额分配策略中产生的碳配经济(如碳税等)为 pQ_1 , p 为碳配价格, Q_1 为碳配额, $Q_1 = kQ_2$, k 为优化强度, $k \in [0,1]$ 。优化碳额分配的成本为 C_1 。

当政府采取优化配额分配策略, 企业采取维持当前排放水平策略时, 这里假设政府优化配额分配量差 $Q_2 - Q_1 = \delta$ 作为考核企业的碳排放要求。若企业不满足政府优化后的碳排放要求 δ , 会进行碳量处罚 $W\delta$ 。其中, W 为处罚因子。

当政府采取优化配额分配策略, 企业采取自愿减排策略, 政府会根据企业自愿主动减排满足碳量 δ 要求而给予碳信用激励 δF , 其中 F 为政府的激励成本因子。企业采取自愿减排策略的技术成本为 $\frac{1}{1+\delta} C_2$, 其中 $\frac{1}{1+\delta}$ 表示自愿减排的碳量越多, 其边际成本越小。与此同时, 企业采取自愿减排带来的碳减少量会增加政府在减排管理上的效益, 同时这部分减少的碳量企业也可以通过碳交易方式将节省出的碳配额售卖于其他企业, 获取收益 $p\delta$ 。

这一假设考虑了政府通过优化碳配额分配来激励减排, 并通过碳税、处罚和激励措施来影响企业行为, 同时考虑企业因技术成本和碳交易获益而决定是否自愿减排。

基于以上假设, 构建博弈收益矩阵见表 1。

表 1 演化博弈模型的支付矩阵

		企业	
		自愿减排 $H_1(y)$	维持当前排放水平 $H_2(1-y)$
政府	优化配额分配 $G_1(x)$	$pQ_1 - C_1 - \delta F + \delta$ $-pQ_1 - \frac{C_2}{1+\delta} + \delta F + p\delta$	$pQ_1 - C_1 + \delta W$ $-pQ_1 - \delta W$
	维持现有配额分配 $G_2(1-x)$	$pQ_2 + \delta$ $-pQ_2 - \frac{C_2}{1+\delta} + p\delta$	pQ_2 $-pQ_2$

2.2 演化模型构建

2.2.1 政府收益及复制动态方程

政府采取“优化配额分配策略”的期望效益为:

$$U_{G_1} = y(pQ_1 - C_1 - \delta F + \delta) + (1-y)(pQ_1 - C_1 + \delta W) \quad (1)$$

政府采取“维持现有配额分配”的期望效益为:

$$U_{G_2} = y(pQ_2 + \delta) + (1-y)(pQ_2) \quad (2)$$

政府平均效益期望效益为:

$$U_G = xU_{G_1} + (1-x)U_{G_2} \quad (3)$$

政府选择“优化配额分配策略”策略的复制动态方程为:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_{G_1} - U_G) \quad (4)$$

政府策略的复制动态方程表现了优化配额分配

策略和维持现有配额分配策略的群体演化过程，反映出复制动态方程的意义：假设优化配额分配策略的效益比平均效益高，那么群体中选择策略将随博弈的开展比例上升。

将（1）式和（3）式带入政府选择“优化配额分配策略”策略的复制动态方程（4），可以得到：

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_{G1} - U_G) = x(x-1)(C_1 - W\delta - Q_1p + Q_2p + F\delta y + W\delta y) \quad (5)$$

2.2.2 企业收益及复制动态方程

企业采取“自愿减排”的期望效益为：

$$U_{H1} = x(-pQ_1 - \frac{C_2}{1+\delta} + \delta F + p\delta) + (1-x)(-pQ_2 - \frac{C_2}{1+\delta} + p\delta) \quad (6)$$

企业采取“维持当前排放水平”的期望效益为：

$$U_{H2} = x(-pQ_1 - \Delta W) + (1-x)(-pQ_2) \quad (7)$$

企业平均效益期望效益为：

$$U_H = yU_{H1} + (1-y)U_{H2} \quad (8)$$

企业选择“自愿减排”策略的复制动态方程为：

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_{H1} - U_H) = -\frac{y(y-1)(\delta p - C_2 + \delta^2 p + F\delta x + W\delta x + F\delta^2 x + W\delta^2 x)}{\delta + 1} \quad (9)$$

2.3 演化模型求解

将式（5）与式（9）组成的方程组为该博弈的动态复制系统。令式（5）、式（9）分别等于 0，即

$$\begin{cases} F(x) = \frac{dx}{dt} = 0 \\ F(y) = \frac{dy}{dt} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

得到两组稳定状态的解为：

$$x_1 = 1, \quad x_2 = 0, \quad x_3 = \frac{\delta p + \delta^2 p - C_2}{(F+W)\delta(1+\delta)} \quad (11)$$

$$y_1 = 0, \quad y_2 = 1, \quad y_3 = \frac{W\delta + (Q_1 - Q_2)p - C_1}{(F+W)\delta} \quad (12)$$

3 模型的均衡策略分析

3.1 复制动态方程分析

3.1.1 政府复制动态方程分析

（1）当 $C_1 - W\delta - Q_1p + Q_2p + F\delta y + W\delta y = 0$ ，即 $y = \frac{W\delta + (Q_1 - Q_2)p - C_1}{(F+W)\delta}$ 。此时始终等于 0，此时所有 x 都处于稳定。也就是说，当企业采取“自愿减排”的比例

为 $y = \frac{W\delta + (Q_1 - Q_2)p - C_1}{(F+W)\delta}$ ，政府采取“优化配额分配策略”、“维持现有配额分配”两种策略收益相同没有差别。如图 1（a）所示。

（2）当 $y > \frac{W\delta + (Q_1 - Q_2)p - C_1}{(F+W)\delta}$ 时， $U_{G1} - U_G > 0$ ，这

时若想 $F(x) = \frac{dx}{dt} = 0$ ，则需 $x_1 = 1$ 或 $x_2 = 0$ 。所以 x_1 和 x_2 是 x 的两个动态稳定点。又因为 $U_{G1} - U_G > 0$ ，所以政府采取“优化配额分配策略”的效益高于平均水平，所以此时 $x_1 = 1$ 即政府采取“优化配额分配策略”是此复制动态情况下的演化稳定策略，在此状态下即使少数的个体选择“维持现有配额分配”也会在学习中改变，从而具有抗突变的能力。而如果 $x_2 = 0$ 的情况下，政府选择采取“维持现有配额分配”，就会发现此行为选择的效益低于原有策略，就会通过不断的博弈、试错、学习而采用“优化配额分配策略”的策略。如图 1（b）所示。

（3）当 $y < \frac{W\delta + (Q_1 - Q_2)p - C_1}{(F+W)\delta}$ 时， $U_{G1} - U_G < 0$ 与上述情况相同，需 $x_1 = 1$ 或 $x_2 = 0$ 。又因为 $U_{G1} - U_G < 0$ ，所以政府采取“优化配额分配策略”的效益低于平均水平，所以此时 $x_2 = 0$ 即政府采取“维持现有配额分配”是此复制动态情况下的演化稳定策略。如图 1（c）所示。

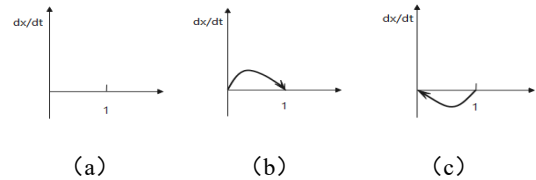


图 1 政府的复制动态相位图

综上所述，政府的演化稳定策略中 $y = \frac{W\delta + (Q_1 - Q_2)p - C_1}{(F+W)\delta}$ 是 $x_1 = 1$ 和 $x_2 = 0$ 这两个演化稳定的分界点，所以政府对企业在碳减排中优化出的碳配额越多 $(Q_1 - Q_2)p$ ，优化成本 C_1 越小，对企业在碳排惩罚力度 $W\delta$ 越大，政府则采取“优化配额分配策略”的动力越大。而对于碳信用激励成本 $F\delta$ 来说，由于减排惩罚力度 $W\delta$ 同时存在于分子分母。又因为 $C_1 < W\delta + (Q_1 - Q_2)p$ ，所以 $F\delta$ 的变化会引起分子产生更多变化，即激励成本 $F\delta$ 变小会让政府采取“优化配额分配策略”的动力增大，但是它产生的影响因素相对较小。而在实际项目中这样的博弈可以表现为，当政府碳配额优化成本 C_1 、碳信用激励成本 $F\delta$ 越小，对企业的碳排惩罚力度 $W\delta$ 越大，获得的额外收益越大，政府就会在不断地博弈学习中

采取“优化配额分配策略”策略，而政府碳配额优化成本 C_1 、碳信用激励成本 $F\delta$ 越大，对企业的碳排惩罚力度 $W\delta$ 越小，获得的额外收益越小，政府会在不断地博弈学习中采取“维持现有配额分配”策略。

3.1.2 企业复制动态方程分析

(1) 当 $\delta p - C_2 + \delta^2 p + F\delta x + W\delta x + F\delta^2 x + W\delta^2 x = 0$,

$x = \frac{\delta p + \delta^2 p - C_2}{F\delta + W\delta + F\delta^2 + W\delta^2}$ 时，此时始终等于 0，此时所有 y 都处于稳定。也就是说，当政府采取“优化配额分配策略”的比例为 $x = \frac{\delta p + \delta^2 p - C_2}{F\delta + W\delta + F\delta^2 + W\delta^2}$ ，企业采取“自愿减排”、“维持当前排放水平”两种策略收益相同没有差别。如图 2 (a) 所示。

(2) 当 $x > \frac{\delta p + \delta^2 p - C_2}{F\delta + W\delta + F\delta^2 + W\delta^2}$ 时，

$U_{H1} - U_H > 0$ ，这时若想使 $F(y) = \frac{dy}{dt} = 0$ ，则需 $y_1 = 0$ 或 $y_2 = 1$ 。所以 $y_1 = 0$ ， $y_2 = 1$ 是 y 的两个动态稳定点。又因为 $U_{H1} - U_H > 0$ ，所以企业采取“自愿减排”的效益高于平均水平，所以此时 $y = 1$ 即企业采取“自愿减排”是此复制动态情况下的演化稳定策略。如图 2 (b) 所示。

(3) 当 $x < \frac{\delta p + \delta^2 p - C_2}{F\delta + W\delta + F\delta^2 + W\delta^2}$ 时， $U_{H1} - U_H < 0$

与上述情况相同，需 $y_1 = 0$ 或 $y_2 = 1$ 。又因为 $U_{H1} - U_H < 0$ ，所以企业采取“自愿减排”的效益低于平均水平，所以此时 $y = 0$ 即企业采取“维持当前排放水平”是此复制动态情况下的演化稳定策略。如图 2 (c) 所示。

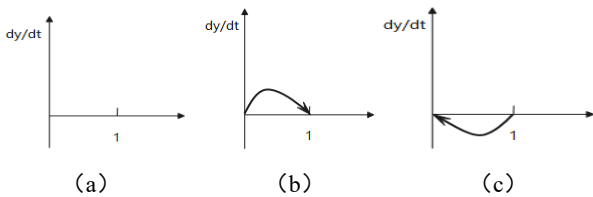


图 2 企业的复制动态相位图

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dF(x)}{dx} & \frac{dF(x)}{dy} \\ \frac{dF(y)}{dx} & \frac{dF(y)}{dy} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (2x-1)(C_1 - W\delta - Q_1 p + Q_2 p + F\delta y + W\delta y) & \delta x(x-1)(F+W) \\ -\delta y(y-1)(F+W) & -\frac{(2y-1)(\delta p - C_2 + \delta^2 p + F\delta x + W\delta x + F\delta^2 x + W\delta^2 x)}{1+\delta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

综上所述,企业的演化稳定策略

$x = \frac{\delta p(1+\delta) - C_2}{F\delta(1+\delta) + W\delta(1+\delta)}$ 是 $y_1 = 0$ 和 $y_2 = 1$ 这两个演化稳定的分界点，所以企业在自愿减排的收益越大，成本 C_2 越小，减排碳量 δ 越高，减排不足时受到的惩罚 $W\delta$ 越小，则企业采取“自愿减排”的动力越大。

在实际减排中这样的博弈可以表现为，当企业履行自愿减排的收益越大，成本越小，减排的碳量 δ 越高，碳排惩罚 $W\delta$ 和碳信用激励收益 $F\delta$ 越大时，企业会在不断地博弈学习中采取“自愿减排”策略。而自愿减排的收益越小，成本越大，碳信用激励收益越低，企业会在不断地博弈学习中采取“维持当前排放水平”策略。

3.2 稳定性策略分析

当 $0 < \frac{\delta p + \delta^2 p - C_2}{F\delta + W\delta + F\delta^2 + W\delta^2} < 1$ ， $0 < \frac{W\delta + (Q_1 - Q_2)p - C_1}{(F+W)\delta} < 1$ ，该博弈的动态复制系统有五个平衡点，分别为 $Z_1(0,0)$ 、 $Z_2(1,0)$ 、 $Z_3(0,1)$ 、 $Z_4(1,1)$ 、 $Z_5(\frac{\delta p + \delta^2 p - C_2}{(F+W)\delta(1+\delta)}, \frac{W\delta + (Q_1 - Q_2)p - C_1}{(F+W)\delta})$ ，其中分母不为 0。

依据以上的博弈动态关系和复制动态方程组，运用雅克比矩阵对演化博弈的渐进稳定性进行分析，雅克比矩阵如下 (13)：

根据矩阵局部分析法，对均衡点进行稳定性分析，其判断依据是看是否满足 $Det J > 0$ 以及 $Tr J < 0$ ，从而判断均衡点是否为局部稳定状态，结果如表 2 和表 3 所示。

由假设可知， $Q_2 - Q_1 > 0$ ， $p\delta(1+\delta) - C_2 > 0$ ， $(Q_1 - Q_2)p + W\delta - C_1 > 0$ 。根据矩阵局部分析法，对五个均衡点进行稳定性分析。根据 $Det J > 0$ ， $Tr J < 0$ 判断，其结果如表 4 所示。

如图 3 可以看到该博弈根据初始状态最后都会向 $Z_4(1,1)$ 演化，即（优化配额分配策略、自愿减排）将成为群体参与者所有人的最终决策。

表 2 演化博弈模型均衡点的 $DetJ$

均衡点	$DetJ$
(0,0)	$\frac{[p\delta(1+\delta)-C_2][(Q_1-Q_2)p+W\delta-C_1]}{1+\delta}$
(1,0)	$\frac{[(Q_1-Q_2)p+W\delta-C_1][\delta(1+\delta)(F+W+p)-C_2]}{1+\delta}$
(0,1)	$\frac{-(p\delta^2+p\delta-C_2)[(Q_1-Q_2)p+W\delta-C_1]}{1+\delta}$
(1,1)	$\frac{[(Q_1-Q_2)p+W\delta-C_1][\delta(1+\delta)(F+W)+\delta(1+\delta)p-C_2]}{1+\delta}$

表 3 演化博弈模型均衡点的 TrJ

均衡点	TrJ
(0,0)	$(Q_1-Q_2)p+W\delta-C_1+p\delta-C_2/(1+\delta)$
(1,0)	$F\delta-(Q_1-Q_2)p+C_1-C_2/1+\delta$
(0,1)	$(Q_1-Q_2)p-F\delta-C_1-p\delta+C_2/(1+\delta)$
(1,1)	$-[W\delta-C_1+(Q_1-Q_2)p+\delta p-C_2/(1+\delta)]$

表 4 演化博弈的均衡点及稳定性

均衡点	$detJ$	trJ	结果
$Z_1(0,0)$	+	+	不稳定
$Z_2(1,0)$	-	+	不稳定
$Z_3(0,1)$	-	-	不稳定
$Z_4(1,1)$	+	-	ESS

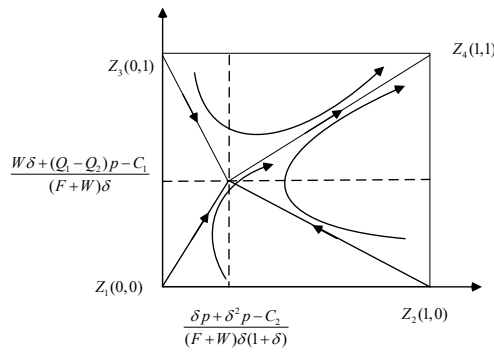


图 3 演化博弈相位图

4 仿真分析

为了验证该模型的有效性，以铁冶炼行业碳排为例，根据文献^[25]知碳排成本为 128.8 元/t，故 C_2 取 1.288。根据文献^[26]政府监管优化成本为 55 元/吨，故设 C_1 为 0.55。根据文献^[27]可知，2023 年底中国的碳价格约为每吨二氧化碳 80 元，故 p 取 0.8。以上是为了确保不同变量之间有效比较和运算，本文取十位进数进行量纲统一。同理，假设政府初始碳配额分配量为 1315610 吨，故 Q_2 取 13156。根据

文献^[28]知，“2030 年碳排放强度比 2005 年下降 65%”的总量控制目标，故排放优化强度 k 取 65%。 $Q_1/Q_2 = 65\%$ 。得 $Q_1 = 8551$ 。激励因子 F 为 0.5，处罚因子 W 为 0.8。

表 5 相关参数的初始假定

Q_1	k	p	W	F	C_1	C_2
8551	0.65	0.8	0.8	0.5	0.55	1.288

数值仿真结果如图 4 所示。其中图 4 (a) 描述的是政府和企业策略演化过程，最终都向 (1, 1) 演化。图 4 (b) 描述的是政府和企业选择初始策略时的均衡策略演化过程。

从图 4 可知，运营企业和社会公众采取不同策略的初始比例由 0→1 依次演化，在不同初始比例状态下，演化系统均能演化至稳定状态，达至 (1,1) 位置。

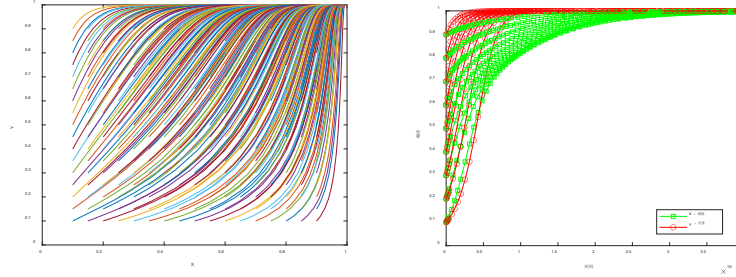


图 4 政府和企业当选择不同初始策略对演化博弈模型的影响

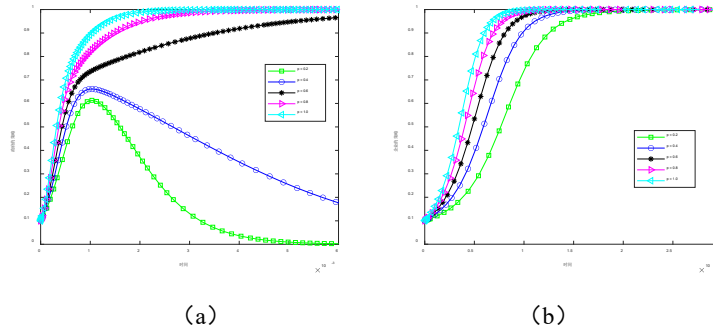


图 5 碳价格对策略演化的影响

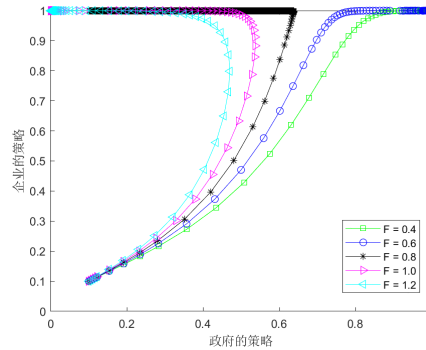


图 6 碳信用激励因子对策略演化的影响

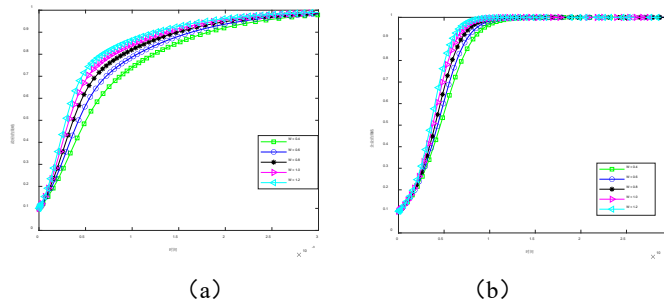


图 7 碳信用惩罚因子对策略演化的影响

4.1 碳价格 p 对策略演化的影响

在保证其他初始参数不变条件下, 碳价格 p , 即 p 取 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1.0。其中图 5 (a) 表示政府的策略演化, 由图可知, 当碳价格 $p \leq 0.4$ 时, 政府的策略朝着 0 方向演化, 说明碳交易市场中的价格偏低时, 政府更愿意维持当前的碳配额, 原因在于碳价格过低可能意味着市场对碳排放的需求不足, 此时, 政府可能会选择不调整配额, 以避免在短期内对市场产生过大的波动, 以起到维护市场稳定的作用; 当碳价格 $p \geq 0.6$ 时, 随着碳交易价格的上升, 政府往往会更加关注碳配额的优化分配, 原因在于政府可能会向高碳排放的企业和行业减少配额, 同时鼓励那些绿色低碳技术和可再生能源行业获得更多配额, 从而引导产业朝着低碳、绿色方向转型。图 5 (b) 表示企业的策略演化。从中可知, 碳交易价格越高, 企业通常越愿意自愿减排。原因在于随着碳价格的上升, 可卖出未使用的配额能够带来较大的经济效益, 因此企业更有动力自愿减排。

4.2 碳信用激励因子 F 对策略演化的影响

在保证其他初始参数不变条件下, 碳信用激励因子 F , 即 F 取 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 和 1.2。由图 6 可以看出, 当碳信用激励因子 $F \geq 0.8$ 时, 政府的策略朝着 0 方向演化, 原因可能在于优化碳配额分配策略的碳信用激励会加大行政管理成本, 若政府认为当前的配额分配已经满足了市场需求, 额外的优化激励反而增加行政负担, 进而选择维持现有碳配额量。对于企业而言, 碳信用激励因子 F 越大, 企业的自愿减排意愿越强, 他们的策略选择都往 1 方向演化。当碳信用激励因子 $F \leq 0.6$ 时, 政府能够承担激励费用成本, 政府的策略朝着 1 方向演化, 政府通过碳信用激励优化碳配额, 提高企业自愿减排意愿。

4.3 碳信用惩罚因子 W 对策略演化的影响

在保证其他初始参数不变条件下, 碳信用惩罚因子 W , 即 W 取 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 和 1.2。由图 7 可以看出, 随着碳信用惩罚因子 W 越大, 政府越愿意优化减排配额。原因在于当惩罚因子较大时, 政府有更强的激励来确保减排目标的实现, 并优化碳配额分配。同样, 碳信用惩罚因子 W 越大, 企业越愿意自愿减排。原因在于企业在面对较大的惩罚因子时, 通常会采取预防性的措施, 积极参与减排, 以

避免未来的罚款和合规风险。

4.4 排放优化强度 k 对策略演化的影响

在保证其他初始参数不变条件下, 排放优化强度 k , 即 k 取 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 和 0.95。由图 8 可以看出, 排放优化强度 k 越大, 政府优化配额的难度增加, 进而使政府的优化配额策略向 1 方向的演化速率变慢, 同时, 企业面临的减排任务变得更加艰巨。所以企业的自愿减排策略向 1 方向的演化速率变慢。其主要原因可能在于如果碳配额较少, 企业可能觉得自身已经承担了足够的减排责任, 而自愿减排将意味着更高的成本。特别是如果自愿减排未能带来直接的经济回报或补偿, 企业可能会觉得进一步的减排没有足够的经济激励, 因此选择维持现有排放水平。

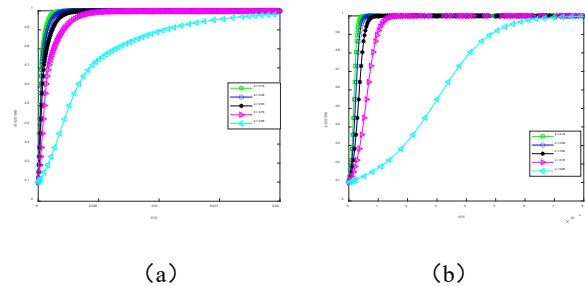


图 8 排放优化强度对策略演化的影响

5 总结

本文从碳信用视角研究了企业自愿减排与碳交易行为的演化规律, 得出以下结论: (1) 碳价格过低时, 政府可能选择维持配额不变, 以避免短期市场波动, 确保市场稳定; 碳价上升时, 政府则更加关注配额优化。(2) 碳信用激励和惩罚的力度越大, 企业的减排意愿越强。(3) 排放优化强度增加, 政府的配额优化难度增大, 企业减排任务也变得更加艰巨。

基于此, 为防止碳价格过低导致市场供需波动, 政府应设定价格地板, 当市场价格低于地板价时, 可以通过减少碳配额的拍卖数量或暂停配额分配来维持市场价格稳定。同时, 政府应根据碳市场的发展状况逐步提高碳价格, 设定一个长期的价格增长轨迹, 确保企业对未来减排具有预期, 并激励其进行长期减排投资。

此外, 政府应设计合理的碳信用激励机制, 例如通过碳信用积分、财政奖励、绿色认证等措施来

激励企业自愿减排；同时，设计与减排表现相挂钩的惩罚机制，确保对不达标企业的惩罚足够具有威慑力，但不至于过于苛刻，避免企业过度负担。通过平衡激励与惩罚，增强政策的公平性与执行力，推动企业积极减排并确保市场规则遵守，维护碳市场的长期稳定性。

然而，目前的政策多侧重于短期激励与处罚，对长期效果的评估不足。因此，未来的研究应聚焦于长期政策效果的跟踪与评估，特别是分析碳市场逐步成熟后，减排政策对企业自愿减排与碳交易行为的持续影响，以为碳市场的改革与完善提供理论支持。

参考文献

- [1] 唐天伟,吴素婷,江晓婧.中国城市绿色低碳发展效率的组态分析——基于有为政府与有效市场协同视角[J].改革,2024,(10):146-162.
- [2] Awewomom J, Dzeble F, Takyi Y D, et al. Addressing global environmental pollution using environmental control techniques: a focus on environmental policy and preventive environmental management[J]. Discover Environment, 2024, 2(1): 8.
- [3] Ding X, Ma G, Cao J. The Emission-Reduction Effect of Green Demand Preference in Carbon Market and Macro-Environmental Policy: A DSGE Approach[J]. Sustainability, 2024, 16(16): 6741.
- [4] 柴强飞,孙明耀,陈信同.碳交易政策下考虑碳规制差异的供应链协调研究[J/OL].工业工程与管理,1-18[2024-12-07].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1738.T.20241128.1053.010.html>.
- [5] 刘名武,任威,宋慧玲,等.碳交易制度下嵌入区块链的供应链决策研究[J/OL].价格理论与实践,1-5[2024-12-07].
<https://doi.org/10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2024.11.293>.
- [6] 张宏,罗兰英.碳交易政策增进企业意义导向技术创新机制研究[J].科学学与科学技术管理,2023,44(08):31-49.
- [7] 张丽娜,刘雨宵.论中国蓝碳立法与国际蓝碳法律机制之协调[J].中国海商法研究,2024,35(03):32-42.
- [8] 丁军飞,陈伟达,付帅帅.碳价波动下考虑风险规避的工
程机械再制造企业生产决策优化[J].系统工程理论与实践,2022,42(03):637-650.
- [9] 康文梅.我国碳市场发展分析与建议[J].对外经贸,2024,(03):21-24.
- [10] 林雨洁,张笑演,熊厚博,等.计及复合碳泄漏效应的电力系统双层规划[J].电力系统自动化,2024,48(12):1-13.
- [11] 林静.协同减排视角下我国碳税制度研究[J].重庆科技学院学报(社会科学版),2024,(02):28-36.
- [12] 韦铁,马赐铃,谢品,等.引入自愿减排交易机制下供应链减排策略研究[J/OL].中国管理科学,1-15[2024-12-07].
<https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.1047>.
- [13] 刘迪一,刘俊腾,张国兴,等.个体激励型自愿减排机制能否提升地区碳排放绩效? [J].中国人口·资源与环境, 2024, 34(06):33-44.
- [14] Li R, Fang D, Xu J. Does China's carbon inclusion policy promote household carbon emissions reduction? Theoretical mechanisms and empirical evidence[J]. Energy Economics, 2024, 132: 107462.
- [15] 魏琦,郭艳.双向机制下企业自愿碳减排的三方博弈模拟[J].华南师范大学学报(自然科学版),2024,56(02):42-54.
- [16] 钟芳芳,危俊.高质量碳信用的评价与应用研究[J].金融纵横,2024,(08):88-95.
- [17] 徐方明,张梓太.《中华人民共和国黄河保护法》实施背景下流域碳汇价值实现的法治困境与对策[J].水利经济,2024,42(06):76-83.
- [18] 李艺轩,于歆,梁月虹,等.完善中国碳信用交易机制的政策建议[J].新金融,2024,(03):59-64. [11]刘平.引导社会资本参与宁波智慧城市建设的研
究[J].时代金融,2014(23): 216-217.
- [19] Salma A, Fryda L, Djelal H. Biochar: A Key Player in Carbon Credits and Climate Mitigation[J]. Resources, 2024, 13(2): 31.
- [20] Zhang Y, Yang R, Shi X, et al. Operational strategies in a low-carbon supply chain considering the impact of carbon credit[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 442: 141080.
- [21] Kalaiselvan S A, Venkatesh J S P, Kumar A M V, et al. Blockchain Powered Carbon Credit Marketplace[C]//2024 10th International Conference on Communication and

- Signal Processing (ICCSP). IEEE, 2024: 582-585.
- [22] Pande R. Can the market in voluntary carbon credits help reduce global emissions in line with Paris Agreement targets?[J]. Science, 2024: eadp5223.
- [23] Delacote P, L'horty T, Kontoleon A, et al. Strong transparency required for carbon credit mechanisms[J]. Nature Sustainability, 2024: 1-8.
- [24] 朱帮助,黄丽清,江民星,等.配额分配对跨期碳市场有效性的影响研究[J].管理科学学报,2022,25(09):52-65.
- [25] 李海峰,郭铖乾,王新东,等.高炉低碳炼铁技术路径分析及发展建议[J].钢铁,2024,59(09):56-70+101.
- [26] 方国昌,何宇,田立新.碳交易驱动下的政企碳减排演化博弈分析[J].中国管理科学,2024,32(05):196-206.
- [27] 岳童,童健.碳定价机制与“双碳”约束下我国经济高质量发展——目标协同与作用机理[J].统计研究,2024,41(07):48-63.
- [28] 令狐大智,彭源源,武新丽,等.新发展理念视域下省际初始碳配额分配研究[J/OL].中国管理科学,1-10[2024-12-09].
<https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.1570>.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

