第二十八届中国科协年会学术论文

绿色信贷、碳交易与企业绿色技术创新

——基于政府规制视角的演化博弈研究

李 妍，王健恒

（河北经贸大学金融学院，石家庄 050061）

摘要：以绿色技术创新为导向的绿色低碳转型升级，是支撑“双碳”目标实现的重要路径。但绿色技术创新具有的知识溢出效应和环境公共品属性往往导致企业创新的内在激励不足。在政府规制视角下，构建银行、政府和企业三方演化博弈模型，考查了绿色信贷政策与碳交易政策组合对企业绿色技术创新的影响，以探索促进企业绿色技术创新的外部激励机制。结果表明，绿色信贷政策能为企业提供资金支持，而政府规制能对金融机构绿色信贷行为产生激励作用，提升银行执行绿色信贷概率与演化速度，进而增加企业绿色技术创新概率，提升环境规制政策的整体实施效果。同时，政府对创新补贴标准和碳排放配额标准的合理设定可促进企业创新，但在设定碳排放配额标准时要严格把握在某一区间内，碳排放配额过高会破坏博弈系统稳定性。此外，绿色信贷利率与专项补贴资金存在一定的政策冲突，碳排放配额与专项补贴资金存在替代关系。研究结果为政府规制形成外部激励机制促进企业绿色技术创新活动提供了理论参考和政策启示。

关键词：政府规制；绿色信贷；碳排放权交易；绿色技术创新；演化博弈

中图分类号：F832.4；F273.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)12－0001－14

绿色低碳发展是推进人与自然和谐共生的重要命题，是实现经济社会发展与环境质量兼顾的必由之路[1]。当今人类活动导致的环境恶化与气候变暖等外部因素对经济发展与人类生产生活造成负面影响[2]，绿色低碳发展理念引发各国关注，削减碳排放、应对全球气候变化成为当前国际社会的普遍共识[3]。以绿色技术创新为导向的绿色低碳转型升级，是支撑“双碳”目标实现的重要路径之一[4]，绿色技术创新作为破解环境库兹涅茨曲线的关键变量，通过要素配置优化与生产函数重构，可实现经济增长与环境改善的帕累托改进。但是，绿色技术创新具有显著的知识溢出效应和环境公共品属性，导致市场机制难以实现最优供给。当前企业仍面临研发投入不足[5]、创新周期较长[6]及资本成本较高等问题[7]，亟须多元化政策工具加以引导和支持。

碳排放权交易（简称“碳交易”）和绿色信贷政策是将国家碳减排目标与企业低碳转型相结合的重要市场激励型政策工具。绿色信贷市场作为中国绿色金融体系中起步最早、规模最庞大的市场，在支持绿色创新、实现绿色发展的过程中扮演着至关重要的角色。碳交易市场历经摸索后也已逐渐成为引导企业减排的有效机制，在污染权明确且可交易的条件下，可有效消除排污行为的外部性。那么在“双碳”目标背景下，碳排放权交易与绿色信贷作为主要的市场激励型政策，组合使用会对企业绿色技术创新产生怎样的影响？其影响机理、作用路径和效果如何？政府在运用混合激励政策时应该采取何种监管策略？解决这些问题对推动社会经济和生态环境高质量发展具有重要意义。

1 文献综述

在学术研究范畴内，环境规制对企业创新及其经济绩效的影响一直是备受关注且充满争议的话题。新古典学派的代表人物 Gray[8] 认为随着政府环境规制举措渐趋严厉，企业生产成本会随之攀升，预期投资风险也将增大，对企业生产效率的提升及市场竞争力的增强产生负面影响。与之相对，

收稿日期：2026-02-24

基金项目：河北省社会科学基金项目（HB23YJ005）

作者简介：李妍（1983—），女，河北河间人，博士，教授，硕士研究生导师，研究方向为金融工程、风险管理；王健恒（2001—），男，河北沧州人，硕士研究生，研究方向为绿色金融。

以 Porter 和 Linde[9]提出了著名的“波特假说”。该假说指出,从长期来看,环境规制不仅能够通过激励企业开展绿色技术创新,使企业获得创新收益来补偿因规制产生的成本,还有利于提升企业的市场竞争力。事实上,多数研究结果表明,当政府对环境规制的力度把握适当时,确实能够有效激发企业的绿色技术创新行为[10-13]。

从环境规制工具的角度来看,不同类型的环境规制工具对企业绿色创新行为的影响存在差异。环境规制工具对绿色技术创新的推动作用,主要源于创新补偿效应和遵循成本效应的共同影响[14]。中国特有的环境治理模式呈现行政主导与市场调节相融合的特征,是一种以政府行政命令和绩效考核为主并辅以市场化手段的中国特色环境规制方式[15]。其中,命令控制型工具重在体现强制性,市场激励型工具重在体现经济性。目前,大多数学者认为市场激励型环境规制比命令控制型规制更有利于推动技术进步。杜可等[16]基于双元战略视角,运用双重固定效应模型与逐步回归模型研究发现,各类规制对绿色技术创新的积极影响程度从强到弱依次为市场激励型、自愿参与型和命令控制型。彭星和李斌[17]采用不同区域的动态面板数据,实证分析了不同环境规制类型对绿色技术创新的作用效果,结果表明,市场激励与沟通响应型环境政策对绿色技术创新的促进效果显著,而命令控制型政策的促进作用则较为微弱。范丹和孙晓婷[18]认为,市场激励型环境规制在超过一定阈值时,会呈现从线性向非线性转换的特征,且对绿色技术创新具有显著的促进作用,相比之下,命令控制型环境规制对绿色技术创新的促进作用并不明显,其原因在于命令控制型工具缺乏灵活性与持续激励机制[19]。尽管其在短期内能够通过强约束促使企业增加绿色创新投入,但在达标后,由于缺乏持续激励,企业往往会减弱创新动力。相比之下,市场激励型环境规制(如政府补贴、环境税、碳交易等)能够为企业持续提供经济补偿[20],从而支持其开展长期绿色创新活动。

碳交易作为一种重要的市场激励型环境规制工具受到众多学者的关注[21],部分学者基于“价格信号”和“创新补偿”两条路径对碳交易机制进行研究。从价格信号角度来看,国际货币基金组织(International Monetary Fund,IMF)和经济合作与发展组织(Organisation for Economic Co-operation and Development,OECD)的研究显示,碳交易定价与节能减排的技术创新之间呈正相关关系。当碳价较高时,边际减排成本低的企业可以通过采用绿色低碳技术实现履约,而边际减排成本较高的企业则面临较大的成本压力,此时碳价格信号能够倒逼企业进行转型升级和绿色技术创新,进而实现碳减排目标[22]。从“创新补偿”的角度出发,技术能力较强的企业通过碳交易机制获取创新补偿收益[23]。通过碳排放交易机制,碳排放水平优于行业标准的企业会形成配额结余并通过出售配额获得额外收入,实质上构成了对高碳排放标准企业的经济激励[24],在一定程度上缓解了企业的资金压力。然而,碳交易在实际运行过程中也并非十全十美,从资金约束角度看,企业为满足排放标准而购买碳配额,可能对研发投入产生挤出效应[25]。从碳价不确定性角度看,其波动会影响企业预期,甚至引发流动性约束,从而抑制创新投资[22]。此外,市场覆盖范围有限、活跃度不足及监管体系不完善等问题仍然存在[26]。在融资领域,绿色金融是实现“双碳”目标的重要市场化手段。绿色信贷政策作为绿色金融体系的重要组成部分,通过降低融资约束、增加研发投入及促进银企共同持股,有效推动环保型企业持续进行绿色创新[27]。然而,当前企业绿色发展资金仍存在较大缺口[28]。在金融资源有限的情况下,环境治理投入在短期内可能对生产性投资产生“挤出效应”。从银行视角看,绿色创新项目通常资金需求大、回报周期长,不仅占用信贷资源,还难以带来短期收益[29]。与此同时,绿色信贷政策的激励约束机制仍不完善,导致部分银行在利润最大化动机下出现机会主义行为,使政策执行效果受限。

已有学者将绿色信贷与碳交易机制纳入博弈分析框架,用以考查企业、金融机构及监管主体的行为决策机制。其中,方国昌等[30]基于系统动力学理论,构建了碳排放权交易情境下的政企减排演化博弈模型,发现通过实施动态奖惩机制能够有效消除政企博弈中的周期性行为模式。然而,该研究尚未将绿色信贷对企业减排决策的传导效应纳入考量范围。王淑玲等[31]构建了政府-银行-中小微药厂三方演化博弈模型,系统分析了政府、银行和中小微药厂的策略选择和演化路径,发现银行发放的绿色信贷是促使中小微药厂进行低碳改造、入局碳交易市场的原始动力,但未全面考虑碳交易的影响。丁志刚等[32]在消费者具有低碳偏好和碳交易的环境下,建立企业基本模型和供应链 Stackelberg 博弈模型研究分析了企业在绿色信贷支持下供应链技

术采纳的决策行为。还有相关研究进一步从非线性效应、空间溢出和政策协同等角度推进了该议题。Xu 和 Lin[33]指出绿色信贷对绿色技术创新存在非线性与空间溢出特征。围绕碳排放权交易,杨志安和张帆[34]发现可以通过绿色技术创新路径促进绿色高质量发展;Chang 和 Zhao[35]从动态组态视角揭示了碳价与市场规模对绿色技术创新数量和质量的差异化影响。进一步地,邢双美和王智新[36]表明,不同政策工具之间存在明显的叠加增效效应。

综上所述,在“双碳”目标背景下,要全面检验绿色信贷、碳交易等政策工具的有效性,需要对企业绿色技术创新这一政策目标进行综合性效果评估。鉴于诸项政策工具在实践中交叉实施,要真正实现经济高质量发展与环境保护的“双赢”目标,应依据政策制定的“丁伯根”准则结合政府的规制政策与绿色信贷支持政策,形成两类政策不同的工具组合。现有研究虽已关注到绿色信贷与环境规制的协同效应,但研究视角多局限于企业污染治理与环保投资领域,对创新活动的影响机制探讨不足。对碳交易政策的研究,主要聚焦于供应链体系内部各主体的生产经营决策优化及减排协同机制设计等议题,虽然已有部分文献探讨了碳交易场景下政企间的互动机制,并从政府规制视角分析了如何通过政策约束激励企业开展绿色创新,但在碳交易政策下较少考虑企业碳配额标准设定问题。此外,综合环境规制工具与绿色信贷政策的执行的效果来看,企业绿色技术创新行为在激励型环境规制工具的调控下效果更佳,而商业银行执行绿色信贷政策的行为则需完善的奖惩机制进行激励约束。政府应从实施激励型环境规制政策、设计绿色信贷执行奖惩机制、加强对市场主体的监管这三个方面,形成环境规制与绿色信贷的合力,以促进企业绿色技术创新。

本文可能的研究贡献在于:①现有研究多从单一政策视角出发,对绿色信贷与碳交易政策组合的协同效应研究不足。首次在政府规制视角下,构建了包含银行、政府和企业三方的演化博弈模型,全面考虑了绿色信贷政策与碳交易政策组合对企业绿色技术创新的影响,揭示了政策组合促进企业创新的外部激励机制,明确了政府规制在提升绿色信贷激励作用、优化政策协同效果中的关键角色,为后续研究提供了新的分析框架。②通过仿真分析,详细探讨了绿色信贷利率、政府奖励、碳排放配额和专项补贴资金等关键政策参数对企业绿色技术创新概率的影响,揭示了政策工具之间的相互作用机理。研究发现,政府规制在促进银行执行绿色信贷政策、提高企业绿色技术创新概率方面发挥着不可或缺的作用,为政策制定者提供了科学依据。③在对参数进行科学量化的前提下,通过数值仿真模拟,发现碳排放配额与专项补贴资金之间具有替代关系、绿色信贷与专项补贴资金存在一定政策冲突等结论。基于这些结论提出的完善银行绿色信贷激励约束体系、建立政策协同效应评估模型和搭建产学研合作平台等建议,具有较强的针对性和可操作性。

2　问题描述与模型构建

2.1　问题描述

目前,企业绿色技术创新面临着诸多瓶颈。从企业自身角度看,绿色技术创新具有高投入、长周期、高风险的特点,使企业在创新过程中面临较大的资金与风险约束,创新动力不足。银行的信贷政策为企业绿色技术创新提供了资金获取渠道。银行提供绿色信贷使企业能够获得相对低成本的资金,从而增强其开展绿色技术创新的意愿。此外,银行只对符合绿色信贷标准的企业提供贷款支持,引导企业优化生产经营结构并向绿色发展转型。企业为了获得银行的绿色信贷,会努力提升自身的绿色技术创新水平和环保绩效。银行则会根据企业的实际情况,调整信贷额度、利率等条件,以实现自身利益最大化。当然,政府希望银行积极执行绿色信贷政策,为企业绿色技术创新提供资金支持,促进绿色产业发展。因此政府通过设立奖惩机制以提高银行绿色信贷的积极性[37]。但银行作为营利性机构,在执行绿色信贷政策时,需要考虑自身成本收益。绿色信贷业务虽能获得政府奖励、提升社会声誉等收益但同时会产生额外服务费用,若不执行绿色信贷政策,虽可免除相关成本,但也会面临行政处罚。银行会在政府的监管和激励下,权衡利弊,决定是否执行绿色信贷政策。此外,企业积极开展绿色技术创新,可以推动经济低碳转型、降低碳排放,实现环境保护与经济发展的双赢。为此,政府采取碳规制政策、成本补贴政策等措施激励企业。当企业选择绿色技术创新时,会获得政府补贴、出售多余碳配额获利等收益,当然也需承担创新成本。若企业不进行绿色技术创新,则面临行政处罚和环境保护税,并需要付出在碳市场购买碳配额的一定成本以实现碳减排目标。企业会根据自身成本收益的考量,在绿色技术创新与传统技术

路线之间进行选择，而政府则通过调整规制政策和补贴力度，引导企业走向绿色创新之路。基于各参与主体间呈现的复杂且相互影响的博弈关系，本文在“双碳”目标背景下构建了银行、企业和政府三方参与的演化博弈模型，三方作为有限理性的决策主体，均以追求自身利益最大化为基本行为准则。

2.2 基本假设

基于前文构建的理论分析框架，提出以下假设。

假设1：在正向激励维度，政府同步实施多种市场激励型环境规制工具，包括“创新补贴”和“碳配额管理”。其中，为有效激励企业投身绿色技术创新领域，政府设立了“专项补贴资金”。在企业开展创新活动前进行拨付，旨在切实解决企业在创新启动阶段面临的资金短缺难题，记为 S。此外，政府通过实施碳配额管理机制激励企业持续开展绿色创新活动，积极创新的企业可通过出售额外碳排放额度缓解绿色创新资金压力。中国现行碳排放权配额管理体系仍处于制度构建初期，为了平稳推进碳减排工作，目前以免费分配方式为主，而碳排放价格由市场决定[38]。因此，设定单位碳配额价格为 P，政府当期免费给予企业的碳配额为 M。在负向约束维度，政府对未履行减排责任的市场主体实施经济处罚以形成对消极创新企业的负向激励，这种处罚记为 F_2。政府规制促使企业选择绿色技术创新，由此产生的环境正外部性可表现为社会福利的帕累托改进，并将其视为政府的规制收益，记为 I。

假设2：银行对满足绿色信贷标准的企业发放利率为 L_g 的绿色信贷，而对未满足绿色信贷标准的企业停止贷款的政策。银行发放绿色信贷会付出多方面的成本（如信息收集与评估成本、制度建设与培训成本、机会成本、监管与合规成本等），但从长远来看，绿色信贷因支持环保项目享有政策优惠，如利率补贴、税收减免等。同时，绿色信贷提升了银行社会声誉和品牌价值，增强了客户信任，提高了市场竞争力。因此，发放绿色信贷会获得额外收益并付出一定的成本分别记为 ω、C_b。当银行发放非绿色信贷时，即按基准利率 L_b（$L_b>L_g$）提供一般贷款，无须承担额外的开发与创新成本，也不产生额外收益，因此其成本和额外收益均设为0。

假设3：政府通过设立奖惩机制以激励银行采取积极策略，对执行绿色信贷的银行给予奖励，记为 R。政府为了确保奖励的发放准确无误，并防止宽松监管状态下被未执行绿色信贷政策的银行骗取奖励的情况出现，规定奖励需由银行主动向政府申请，同时对未执行绿色信贷的银行会进行行政处罚记为 F_1，以此保证奖惩机制的激励约束效果。再有，政府在碳交易市场中扮演重要的角色，通过制定规则、监管交易、提供交易平台等方式来维护市场的稳定运行。在实际碳交易中，企业不只是简单地按照碳市场设定的买卖价格进行交易，还要支付相应的开户费、会员手续费、服务费和佣金等，因此政府会在这个过程中根据交易额获取一定比例的收益，比例的大小根据交易额分配系数 θ 来确定。只有政府积极监管，企业才会获得这部分收益，同时要求超出了碳排放量上限的企业需在碳交易市场上买入碳排放额度来满足碳减排要求。若地方政府宽松监管，未能有效执行碳规制政策，那么碳交易市场的正常运行将会受到影响，则无法从碳交易中获取利润，且企业可自愿选择是否在碳交易市场购买碳配额以达到政府规定的碳减排标准。宽松监管时，企业采取申诉途径获得政府绿色技术创新专项补贴资金，致使政府付出信誉损失和协调成本，记为 D。此外，政府在实施严格监管时需要投入人力与物力资源，因此需承担一定的监管成本，记为 C。

假设4：企业进行绿色技术创新活动后，能源利用率和生产效率得到提升，促使自身收益得到提高并带来环境质量改善，这部分收益记为 I_1，付出的绿色技术创新成本记为 C_1。反之，传统技术创新通常较少涉及环保效益、政策支持等能带来额外收益的因素，因而不产生额外收益，但其成本相对较低，记为 C_2（$C_1>C_2$）。研发前企业正常生产产生的碳排放量为 E_2，研发完成后随着新技术的应用企业的碳排放量降低至 E_1（$E_1<E_2$）。假定企业采取创新策略后，碳排放量下降至规定的碳排放标准之下（$E_1<M$），此时，企业通过出售多余的碳配额获取的收益为 $P(M-E_1)$。当企业不采取创新策略时，其碳排放量通常高于排放标准（$E_2>M$），此时需在碳市场购买配额，其成本为 $P(M-E_2)$。

表1梳理了博弈模型中的参数并进行说明。

基于前文所设定的各项假设条件，推导出“银行-企业-政府”三方博弈支付矩阵，具体如表2所示。

3 博弈主体策略选择与演化均衡分析

3.1 银行的策略稳定性分析

设银行采取绿色信贷和常规信贷的期望收益为 U_{11} 和 U_{12}，平均期望收益为 U_1，则

$$U_{11}=yz(R-C_b+\omega+L_gC_1)-y(z-1)(L_gC_1+\omega+R-C_b)-z(y-1)(\omega+R-C_b)+(y-1)(z-1)(\omega+R-C_b) \quad (1)$$

$$U_{12}=z(y-1)F_1-yz(F_1-L_bC_1)-y(z-1)L_bC_1 \quad (2)$$

$$U_1=Rx-F_1z-C_bx+\omega x+L_bC_1y+F_1xz-L_bC_1xy+L_gC_1xy \quad (3)$$

银行策略选择的复制动态方程为

$$F(x)=-x(x-1)(R+\omega-C_b+F_1z-L_bC_1y+L_gC_1y) \quad (4)$$

设 $G(z)=C_b-R-\omega-F_1z+L_bC_1y-L_gC_1y$，则$\frac{dF(x)}{dx}=(2x-1)G(z)$。银行选择绿色信贷需满足演化稳定策略(ESS)要求 $F(x)=0$ 且$\frac{dF(x)}{dx}<0$，才能使自身概率处于稳定状态。

(1) 令 $\frac{dF(x)}{dx}=0$，得到 $x^*=z_0=\frac{(L_bC_1-L_gC_1)y+C_b-R-w}{F_1}$，当 $x=x^*$ 时，$F(x)=0$，$\frac{dF(x)}{dx}=0$，即无论银行选择“绿色信贷”或“非绿色信贷”的初始意愿比例如何，银行策略选择都处于演化稳定状态。

(2)通过计算得到$\frac{G(z)}{z}<0$，即 $G(z)$ 关于 z 递减，当 $x\neq x^*$ 时，可分两种情形讨论。当 $x<x^*$ 时，$G(z)>0$，$\frac{dF(x)}{dx}=(2x-1)G(z)$，因此 $F'(1)>0$，$F'(0)<0$。此时 $x=0$ 为银行演化稳定状态，银行选择积极支持策略。当 $x>x^*$ 时，$G(z)<0$，$\frac{dF(x)}{dx}=(2x-1)G(z)$，因此 $F'(1)<0$，$F'(0)>0$，此时 $x=1$ 为银行演化稳定状态，银行选择消极策略。

推论 1：银行选择“绿色信贷”策略的概率与成本收益差呈负相关，与绿色信贷利率和执行绿色信贷所得政府奖励呈正相关。

证明：$x^*=z_0=\frac{(L_bC_1-L_gC_1)y+C_b-R-w}{F_1}$，$\frac{\partial x^*}{\partial L_g}=\frac{-C_1y}{F_1}<0$，$\frac{\partial x^*}{\partial R}=\frac{-1}{F_1}<0$，$\frac{\partial x^*}{\partial(C_b-w)}=\frac{1}{F_1}>0$，$x^*$ 随着 C_b-w 的减小、L_b 和 R 的增大而减小。因此，当 C_b-w 减小、L_g 和 R 增大时，$x<x^*$，稳定点向 $x=0$ 处收敛。

表 1　模型参数说明

变量	定义
L_g	绿色信贷利率
R	银行执行绿色信贷所得政府奖励
F_1	银行未执行绿色信贷遭受政府处罚
L_b	贷款基准利率
ω	银行开发绿色信贷的收益
C_b	银行开发绿色信贷的成本
C_1	企业进行绿色技术创新的成本
C_2	企业进行传统技术创新的成本
I_1	企业进行绿色技术创新的间接收益
E_1	企业进行绿色技术创新生产产生的碳排放量
E_2	企业进行传统技术创新生产产生的碳排放量
F_2	企业不进行绿色技术创新遭受的政府惩罚
C	政府监管成本
I	政府对企业的环境规制收益
D	政府因企业申诉付出的信誉损失和协调成本
S	政府拨付给企业的绿色技术创新专项补贴资金
M	碳排放配额
P	单位碳配额价格
θ	交易额分配系数

3.2　企业策略稳定性分析

设企业采取积极创新和消极创新的期望收益为 U_{21} 和 U_{22}，平均期望收益为 U_2，则

表 2　银行-企业-政府博弈支付矩阵

策略选择		企业	银行	
			绿色信贷(x)	非绿色信贷($1-x$)
政府	积极监管(z)	绿色技术创新(y)	银行:$L_gC_1+\omega+R-C_b$	银行:$L_bC_1-F_1$
			企业:$I_1+P(M-E_1)+S-(1+L_g)C_1$	企业:$I_1+P(M-E_1)+S-(1+L_b)C_1$
			政府:$I-C-S-R+\theta P(M-E_1)$	政府:$I-C-S+\theta P(M-E_1)+F_1$
		非绿色技术创新($1-y$)	银行:$\omega+R-C_b$	银行:$-F_1$
			企业:$-C_2-P(E_2-M)-F_2$	企业:$-C_2-P(E_2-M)-F_2$
			政府:$I-C-R+\theta P(E_2-M)+F_2$	政府:$I-C+\theta P(E_2-M)+F_1+F_2$
	宽松监管($1-z$)	绿色技术创新(y)	银行:$L_gC_1+\omega+R-C_b$	银行:L_bC_1
			企业:$I_1+P(M-E_1)+S-(1+L_g)C_1$	企业:$I_1+P(M-E_1)+S-(1+L_b)C_1$
			政府:$-S-R-D$	政府:$-S-D$
		非绿色技术创新($1-y$)	银行:$\omega+R-C_b$	银行:0
			企业:$-C_2$	企业:$-C_2$
			政府:$-R$	政府:0

$$U_{21}=(x-1)(z-1)(I_1+P(M-E_1)+S-(1+L_b)C_1)+xz(I_1+P(M-E_1)+S-(1+L_g)C_1)-z(x-1)(I_1+P(M-E_1)+S-(1+L_b)C_1)-x(z-1)\times(I_1+P(M-E_1)+S-(1+L_g)C_1) \quad (5)$$

$$U_{22}=z(x-1)(C_2+P(E_2-M)+F_2)-C_2(x-1)(z-1)-xz(C_2+P(E_2-M)+F_2)+C_2x(z-1) \quad (6)$$

$$U_2=C_2y-C_1y-C_2-F_2z+I_1y+Sy-C_1L_by-E_1Py-E_2Pz+MPy+MPz+F_2yz+C_1L_bxy-C_1L_gxy+E_2Pyz-MPyz \quad (7)$$

企业策略选择的复制动态方程为

$$F(y)=-y(y-1)(C_2-C_1+I_1+S+F_2z-C_1L_b-E_1P+MP+C_1L_bx-C_1L_gx+E_2Pz-MPz) \quad (8)$$

设 $G(x)=C_2-C_1+I_1+S+F_2z-C_1L_b-E_1P+MP+C_1L_bx-C_1L_gx+E_2Pz-MPz$，则 $\frac{dF(y)}{dy}=(2y-1)G(x)$。企业选择绿色技术创新需满足演化稳定策略(ESS)要求 $F(y)=0$ 且 $\frac{dF(y)}{dy}<0$，才能使自身概率处于稳定状态。

(1) 令 $\frac{dF(y)}{dy}=0$，得到 $y^*=x_0=\frac{C_2-C_1+I_1+S-C_1L_b-E_1P+MP+z(F_2+E_2P-MP)}{C_1L_g-C_1L_b}$，当 $y=y^*$ 时，$F(y)=0$，$\frac{dF(y)}{dy}=0$，即无论企业选择“技术创新”或“非技术创新”的初始意愿比例如何，企业策略选择都处于演化稳定状态。

(2)通过计算得到 $\frac{G(x)}{x}>0$，即 $G(x)$ 是关于 x 递增，当 $y\neq y^*$ 时，可分两种情形讨论。当 $y<y^*$ 时，$G(x)<0$，$\frac{dF(y)}{dy}=(2y-1)G(x)$，因此 $F'(1)>0$，$F'(0)<0$，此时 $y=0$ 为企业演化稳定状态，企业选择积极创新策略。当 $y>y^*$ 时，$G(x)>0$，$\frac{dF(y)}{dy}=(2y-1)G(x)$，因此 $F'(1)<0$，$F'(0)>0$，此时 $y=1$ 为企业演化稳定状态，企业选择消极创新策略。

推论 2：企业采取“绿色技术创新”策略的概率与 S、M 呈正相关。

证明：$y^*=x^*=\frac{C_2-C_1+I_1+S-C_1L_b-E_1P+MP+z(F_2+E_2P-MP)}{C_1L_g-C_1L_b}$，$\frac{\partial y^*}{\partial S}=\frac{1}{C_1L_g-C_1L_b}<0$，$\frac{\partial y^*}{\partial M}=\frac{(1-z)P}{C_1L_g-C_1L_b}<0$，$y^*$ 随着 S、M 的增大而减小。因此，当 S、M 增大时，$y>y^*$，稳定点向 $y=1$ 处收敛。$\frac{\partial y^*}{\partial L_g}$ 的大小关系将在后续仿真模拟时检验。

3.3　政府策略稳定性分析

设政府严格监管和宽松监管的期望收益为 U_{31} 和 U_{32}，平均期望收益为 U_3，则

$$U_{31}=(x-1)(y-1)[I-C+\theta P(E_2-M)+F_1+F_2]-x(y-1)[I-C-R+\theta P(E_2-M)+F_2]+y(x-1)[C-F_1-I+S+Pe(E_1-M)]-xy[C-I+R+S+Pe(E_1-M)] \quad (9)$$

$$U_{32}=Rx(y-1)-xy(D+R+S)+y(x-1)(D+S) \quad (10)$$

$$U_3=F_1z-Dy-Cz+F_2z+Iz-Rx-Sy+Dyz-F_1xz-F_2yz+E_2Pez-MPez-E_1Peyz-E_2Peyz+2MPeyz \quad (11)$$

企业策略选择的复制动态方程为

$$F(z)=z(z-1)(C-F_1-F_2-I-Dy+F_1x+F_2y-E_2Pe+MPe+E_1Pey+E_2Pey-2MPey) \quad (12)$$

设 $G(x)=C-F_1-F_2-I-Dy+F_1x+F_2y-E_2Pe+MPe+E_1Pey+E_2Pey-2MPey$，则 $\frac{dF(z)}{dz}=(2z-1)G(x)$。政府选择积极监管需满足演化稳定策略(ESS)要求 $F(z)=0$ 且 $\frac{dF(z)}{dz}<0$，才能使自身概率处于稳定状态。

(1)令 $\frac{dF(z)}{dz}=0$，得到 $z^*=x_0=\{[D-F_2+2MPe-(E_1+E_2)Pe]y+F_1+F_2+I+E_2Pe-C-MPe\}/F_1$，当 $z=z^*$ 时，$F(z)=0$，$\frac{dF(z)}{dz}=0$，即无论政府选择“积极监管”或“宽松监管”的初始意愿比例如何，企业策略选择都处于演化稳定状态。

(2)通过计算得到 $\frac{G(x)}{x}>0$，即 $G(x)$ 是关于 x 递增，当 $z\neq z^*$ 时，可分两种情形讨论。当 $z<z^*$ 时，$G(x)<0$，$\frac{dF(z)}{dz}=(2z-1)G(x)$，因此 $F'(0)>0$，$F'(1)<0$，此时 $z=1$ 为政府演化稳定状态，政府选择积极监管策略。当 $z>z^*$ 时，$G(x)>0$，$\frac{dF(z)}{dz}=(2z-1)G(x)$，因此 $F'(0)<0$，$F'(1)>0$，

此时 $z=0$ 为政府演化稳定状态,政府选择宽松策略。

3.4　演化博弈系统均衡点分析

将上述三个主体的复制动态方程进行整合得到绿色技术创新三维动力系统。

$$\begin{cases} F(x)=-x(x-1)(R+\omega-C_b+F_1z-L_bC_1y+L_gC_1y) \\ F(y)=-y(y-1)(C_2-C_1+I_1+S+F_2z-C_1L_b-E_1P+MP+C_1L_bx-C_1L_gx+E_2Pz-MPz) \\ F(z)=z(z-1)(C-F_1-F_2-I-Dy+F_1x+F_2y-E_2Pe+MPe+E_1Pey+E_2Pey-2MPey) \end{cases} \tag{13}$$

为了简化计算为了简化运算:令 $a=R+w-C_b$,$b=F_1$,$c=L_gC_1-L_bC_1$,$d=C_2-C_1+I_1+S-C_1L_b-E_1P+MP$,$e=F_2+E_2P-MP$,$f=C-F_1-F_2-I$,$g=-E_2Pe+MPe$,$h=F_2-D+E_1Pe+E_2Pe-2MPe$,则整理后的复制动态系统为

$$\begin{cases} F(x)=\dfrac{dx}{dt}=-x(x-1)(a+bz+cy) \\ F(y)=\dfrac{dy}{dt}=-y(y-1)(d-cx+ez) \\ F(z)=\dfrac{dz}{dt}=z(z-1)(f+bx+g+hy) \end{cases} \tag{14}$$

令 $F(x)=0$、$F(y)=0$、$F(z)=0$,容易得到 8 个采取纯策略的均衡点(0,0,0)、(0,0,1)、(0,1,0)、(0,1,1)、(1,0,0)、(1,0,1)、(1,1,0)、(1,1,1),但均衡点并不一定是系统的演化稳定策略,需要根据 Jacobian 矩阵进一步判断均衡点的稳定性。由复制动态方程求得 Jacobian 矩阵为

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix} \dfrac{\partial F(x)}{\partial x} & \dfrac{\partial F(x)}{\partial y} & \dfrac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \dfrac{\partial F(y)}{\partial x} & \dfrac{\partial F(y)}{\partial y} & \dfrac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \dfrac{\partial F(z)}{\partial x} & \dfrac{\partial F(z)}{\partial y} & \dfrac{\partial F(z)}{\partial z} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -(2x-1)(a+bz+cy) & -cx(x-1) & -bx(x-1) \\ cy(y-1) & -(2y-1)(d-cx+ez) & -y(y-1)e \\ bz(z-1) & z(z-1)h & (2z-1)f+bx+g+hy \end{bmatrix}。$$

基于 Lyapunov 稳定性理论对系统均衡点进行稳定性判定[39],平衡点的所有特征值均为负值时才满足渐进稳定策略(ESS)条件。各平衡点特征值、稳定性条件如表 3 所示。当特征值满足一定条件时,将经历以下三个阶段。

(1)绿色创新起步阶段:该阶段有两个均衡点 $E_1(0,0,0)$、$E_4(0,0,1)$。此情形下银行不执行绿色信贷,企业不进行绿色技术创新。其主要原因在于起步阶段政策激励机制尚不完善。从银行角度来看,绿色信贷业务需投入额外成本,且短期内难以获得收益,而政府缺乏有效的激励和约束机制,因此银行选择不执行绿色信贷政策。对企业而言,传统技术创新成本相对较低,而初期绿色技术创新成本过高,且创新带来的直接(政府补贴、碳交易获利)与间接收益不足以弥补成本。在 $E_1(0,0,0)$ 时政府选择宽松监管,原因在于监管收益不足以覆盖监管成本,且不监管时政府无需承担监管成本和信誉损失,也无须支付补贴和奖励费用。而在 $E_4(0,0,1)$ 中,政府虽积极监管,但由于政策组合不合理,仍无法有效引导银行和企业参与绿色发展,体现出政策实施初期的探索困境。

(2)绿色发展推进阶段:该阶段有两个均衡点 $E_2(1,0,0)$、$E_6(1,0,1)$。此情形下银行执行绿色信贷,但企业不进行绿色技术创新。银行执行绿色信贷,是因为政府对其奖励足够高,使其执行绿色信贷的收益大于成本。然而,企业未跟进,主要是由

表 3　平衡点的特征值及渐近稳定性条件

均衡点	矩阵($\boldsymbol{J}$)特征值			渐近稳定性条件
	λ_1	λ_2	λ_3	
$E_1(0,0,0)$	a	d	$-f-g$	$a<0,d<0,-f-g<0$
$E_2(1,0,0)$	$-a$	$d-c$	$-f-g-b$	$-a<0,d-c<0,-f-g-b<0$
$E_3(0,1,0)$	$a+c$	$-d$	$-f-h-g$	$a+c<0,-d<0,-f-h-g<0$
$E_4(0,0,1)$	$a+b$	$d+e$	$f+g$	$a+b<0,d+e<0,f+g<0$
$E_5(1,1,0)$	$-a-c$	$-d+c$	$-f-h-g-b$	$-a-c<0,-d+c<0,-f-h-g-b<0$
$E_6(1,0,1)$	$-a-b$	$d+e-c$	$f+g+b$	$-a-b<0,d+e-c<0,f+g+b<0$
$E_7(0,1,1)$	$a+b+c$	$-d-e$	$f+h+g$	$a+b+c<0,-d-e<0,f+h+g<0$
$E_8(1,1,1)$	$-a-b-c$	$-d-e+c$	$f+h+g+b$	$-a-b-c<0,-d-e+c<0,f+h+g+b<0$

于政府尚未设定合理的碳配额与补贴标准，企业通过绿色技术创新获得的收益（如出售碳配额、政府补贴等）无法弥补创新成本，从而丧失创新动力。在 $E_2(1,0,0)$ 中政府宽松监管，意味着政府主要依赖银行绿色信贷推动绿色发展，而对企业的直接激励不足。而在 $E_6(1,0,1)$ 中政府虽积极监管，但仍未能改变企业决策行为，表明政府在标准设定与激励机制方面仍需进一步优化，以更有效引导企业开展绿色技术创新。

（3）绿色发展成熟阶段：该阶段有两个均衡点 $E_5(1,1,0)$、$E_8(1,1,1)$。此情形下银行执行绿色信贷、企业进行绿色技术创新。银行和企业的积极行动得益于政府合理的政策引导。政府通过有效的奖励政策，使银行开展绿色信贷业务能够获得稳定回报。同时政府补贴、碳价机制等政策共同作用，使企业绿色技术创新的收益超过成本。同时 $E_5(1,1,0)$ 中政府宽松监管表明，在合理的政策框架下，银行和企业能够自发地参与绿色发展，政府只需进行适度监管，该均衡点体现了博弈参与方协同推进绿色技术创新的最优状态[40]。

4　仿真分析

4.1　数据来源

2011 年中国正式宣布开展碳排放交易试点工作。自 2013 年起，全国 8 个城市陆续启动碳交易试点。历经 10 年探索，2021 年全国碳排放权交易市场正式上线运行。以纳入全国碳市场配额管理的 2 257 家发电企业为研究对象，进行相关参数赋值。

在碳排放数据方面，以 2022 年中国电力行业二氧化碳排放总量 47.58 亿 t 作为 E_1 的赋值依据[45]，根据陈庭强等[46]得到 $E_2=(1+10\%)E_1=52.388$ 亿元。在成本与罚款相关参数上，2018 年中国以环境保护税取代排污费征收，将“环境保护税”作为“企业未绿色创新时应征罚款”，根据国家税务总局统计数据，2023 年环境保护税全年入库税收 205 亿元，作为 F_2 的赋值依据。通过各省份 2023 年统计年鉴及 2023 年财政预算执行情况，核算出政府付出的各类人力、执法等监管成本为 1 434.016 4 亿元[43]，以此作为 C 的赋值依据。对于政府规制收益及相关成本，根据方国昌等[30]政府的规制收益为绿色技术创新成本的 3/10，企业通过申诉方式要求获得补贴时，政府为此付出的信誉损失和协调成本 D 为绿色技术创新成本的 1/6。依据《中国环境统计年鉴 2023》，2022 年“完成环保验收项目环保投资额”2 755.8 亿元，作为“企业进行绿色技术创新成本”C_1 的赋值依据。以 2022 年“中央环保专项资金”176.96 亿元，作为“政府拨付企业绿色技术创新补贴资金”S 的赋值依据。在碳交易市场相关参数方面，《全国碳市场发展报告（2024）》显示，2022 年全国碳排放权交易市场配额发放量为 51.04 亿 t，以此作为 M 的赋值依据。中国证券网发布的全国碳市场 2022 年年度成交均价为 55.3 元/t，以此作为 P 的赋值依据。根据湖北碳排放权交易中心及中国碳排放交易网公布的碳交易手续费、会员费等收益的相关情况，设置交易额分配系数 $\theta=0.1$。以中国人民银行贷款市场报价利率（LPR）为基准，赋予绿色信贷利率 $L_g=0.03$，贷款基准利率 $L_b=0.05$。

根据上述数据计算得出 $E_1:E_2:F_1:F_2:C:D:C_1:S:M=1:1.1:4.825:4.3:30.1:9.7:57.9:3.7:1.07$。参考卞晨等[40]、赵昕等[44]得到 $\omega:C_b:I_1=10:6:8$，$R:F_1:F_2:C_b=1:1:10:6$，综合计算最终得出 $R:F_1:F_2:\omega:C_b:I_1=1:1:10:10:6:8$。为便于计算与分析，赋予 $E_1=1$，其他参数依据比例最终确定 $L_g=0.03$，$R=1$，$F_1=1$，$L_b=0.05$，$\omega=10$，$C_b=6$，$C_1=57.9$，$C_2=34.8$，$I_1=8$，$E_1=1$，$E_2=1.1$，$F_2=4.3$，$C=30.1$，$I=17.4$，$D=9.7$，$S=3.7$，$M=1.07$，$P=55$，$\theta=0.1$。

4.2　基准情境系统收敛

进一步通过 MATLAB 进行基准情景仿真，结果如图 1 所示，博弈系统最终演化至均衡点 $E_2(1,0,0)$。此时银行执行绿色信贷，企业不进行绿色技术创新，政府宽松监管。

根据 $E_2(1,0,0)$ 渐近稳定性条件可知，$d-c<0$ 即 $C_2-C_1+I_1+S-C_1L_g+MP-E_1P<0$，表明在当前政策环境下，政府补贴及企业通过出售多余碳配额获得的收益，难以覆盖绿色技术创新成本。企业为避免过高的成本支出，选择“不创新”成为稳定策略。此时，政府规制效果未能有效发挥，且需承担监管成本。然而，银行的渐近稳定性条件 $C_b-\omega-R<0$ 表明，随着绿色信贷的比重持续上升，银行收益不断提高。在现行政府奖励标准的激励下，银行选择“执行绿色信贷”成为最优选择。但仅依靠银行绿色信贷这一单一政策，无法改变企业“不创新”的决策倾向。至于绿色信贷能否影响企业技术创新，后续将通过模拟进行研究分析。

同时，以监管概率模拟政府监管强度的变化趋势，仿真结果如图 2 所示。随着监管强度的不断增强，银行和企业选择积极策略的概率均呈现上升趋势。这表明政府的监管措施在一定程度上是有效

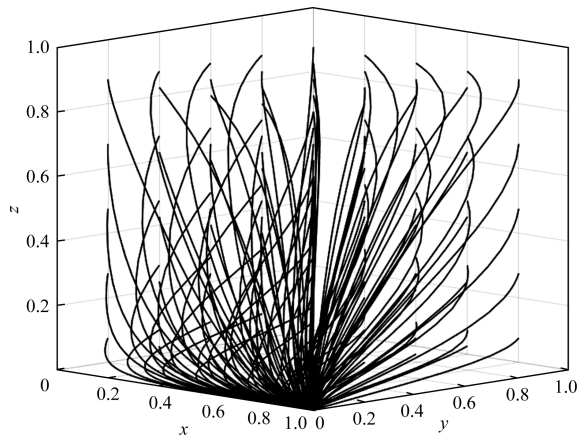


图 1　基准情景仿真结果

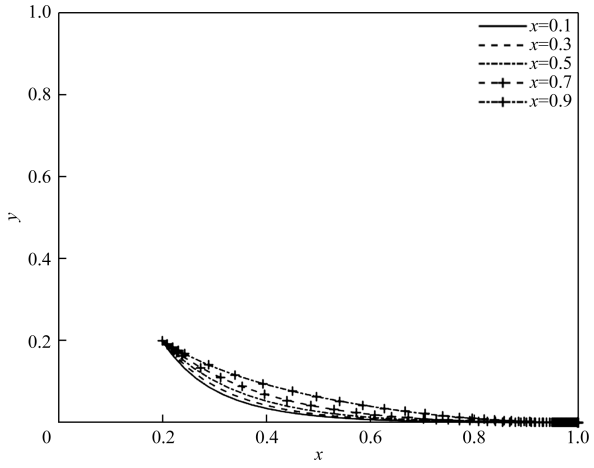


图 2　政府监管强度对银行和企业策略演化过程的影响

的,能够对银行和企业的决策产生积极影响,促使银行更倾向于执行绿色信贷政策,企业更倾向于开展绿色技术创新活动。但结合博弈系统最终演化至 $E_2(1,0,0)$的结果来看,当前政策组合与市场环境仍存在不足,需要进一步调整和完善相关政策,以实现推动企业绿色技术创新的政策目标。

基准情境下系统的收敛态势从某种程度上体现银行绿色信贷已趋于成熟,但企业绿色技术创新仍面临较大困难的现实状况。政府若想实现推动企业绿色技术创新的政策目标,就必须促使环境规制与绿色信贷协同发力。但在当前的环境规制标准及既定的专项补贴资金规模条件下,仅依赖绿色信贷政策,难以有效改变企业"不创新"的决策选择倾向。绿色信贷虽能为企业提供部分资金支持,但在企业综合考量创新风险、成本与收益后,其激励效果有限。因此,要切实推动企业绿色技术创新,政府仍需优化环境规制标准。

4.3　绿色信贷政策的影响

根据基准情景模拟结果,系统均衡点为 $E_2(1,0,0)$,若要使系统进一步演化至理想状态 $E_5(1,1,0)$,需满足银行"执行绿色信贷"策略的渐进稳定性条件,$-a-c<0$ 即 $C_b-\omega-R+C_1L_b-C_1L_g<0$。在此过程中,绿色信贷利率与政府奖励成为影响银行决策的关键因素。

设定政府对银行执行绿色信贷的奖励值分别为 1、2、3,仿真结果如图 3 所示。随着 R 的增大,银行选择执行绿色信贷的概率提高,且演化至稳定点的速度加快,这表明政府奖励对银行执行绿色信贷具有激励作用。同时,设定绿色信贷利率分别为 0.01、0.03、0.05 后进行仿真,其对银行策略选择的影响结果如图 4 所示。为进一步研究绿色信贷利率变化对企业行为决策的影响,进行仿真模拟,结果如图 5 所示。仿真结果与推论一相符。一方面,绿色信贷利率降低虽无法直接改变企业是否进行绿色技术创新的决策,但随着利率下降,企业进行技术创新的概率有所增加。这表明银行发放绿色信贷能够为企业提供优惠融资渠道,降低企业绿色技术创新成本,从而在一定程度上提升企业创新意愿,这一结论与魏宁等[41]的结果一致。另一方面,绿色信贷利率提高会增强银行开展绿色信贷业务的积极性,这与推论一一致。值得注意的是,绿色信贷利率降低会使银行决策收敛到执行绿色信贷策略的速度延缓。但利率下降虽减缓收敛速度,并不会改变银行最终选择执行绿色信贷的策略结果。

综合来看,虽然绿色信贷政策难以单独改变企业的策略选择,但它能够发挥杠杆效应,降低企业成本并为企业创新带来积极效益。而政府对银行的规制措施能够提高银行执行绿色信贷的积极性,使绿色信贷在促进企业绿色技术创新方面的激励作用得以有效发挥。进而形成"规制激励-资源配

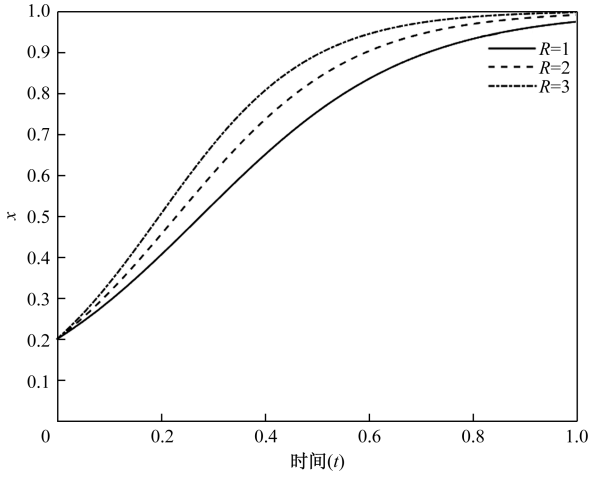


图 3　政府奖励对银行策略演化过程的影响

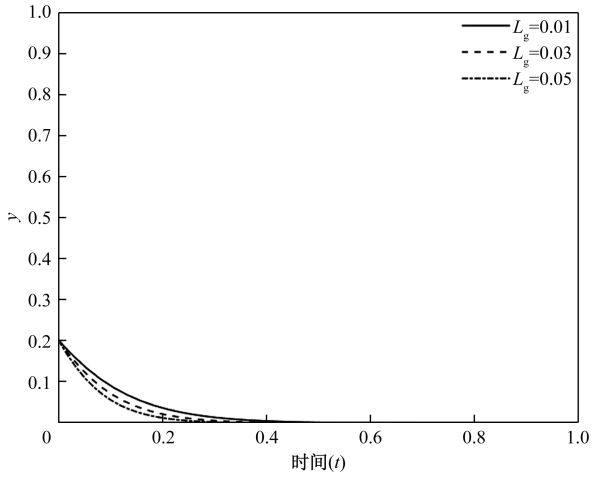


图 4　绿色信贷利率对银行策略演化过程的影响

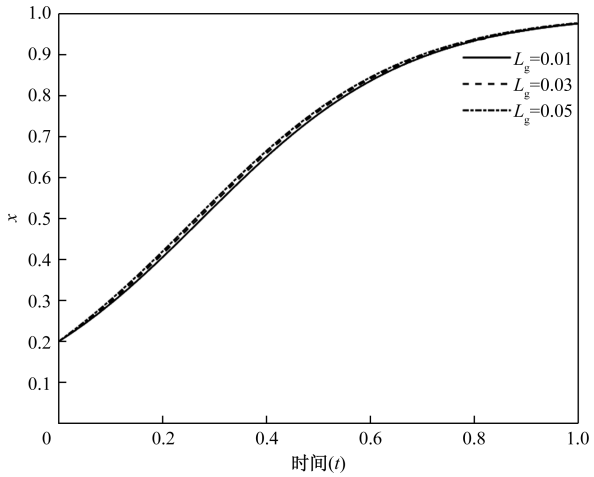


图 5　绿色信贷利率对企业策略演化过程的影响

置-创新响应”的传导机制，这不仅提高了环境规制政策的实施效果，也实现了绿色信贷与环境规制协同作用下的帕累托改进，也充分说明了政府规制行为在推动企业绿色技术创新过程中的必要性。

4.4　环境规制政策的影响

根据基准情景模拟结果，在现行绿色信贷政策的基础上，政府需充分发挥规制作用，适当提高主要参数 M（碳排放配额）和 S（政府拨付给企业的绿色技术创新专项补贴资金），才能使企业选择“技术创新”策略的渐近稳定性条件 $C_2-C_1+I_1+S-C_1L_g+MP-E_1P<0$ 得以满足。经模拟计算，企业选择技术创新策略时 M 的最小值为 1.25，S 的最小值为 1.37。此时企业的演化均衡状态如图 6～图 8 所示。随着 M 和 S 的增大，企业的均衡状态由 0 转变为 1。这一变化表明，发挥环境规制与绿色信贷的政策合力，是促进企业绿色技术创新的重要前提。而实现企业绿色技术创新的政策目标，依赖于

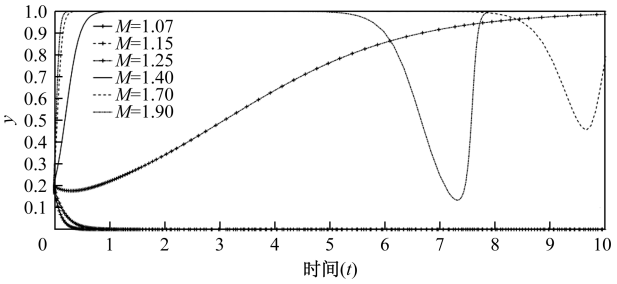


图 6　碳排放配额对企业策略演化过程的影响

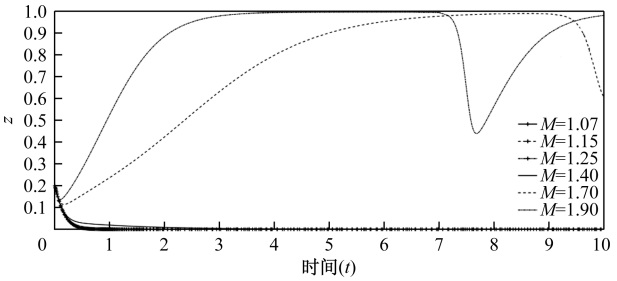


图 7　免费碳排放配额对政府策略演化过程的影响

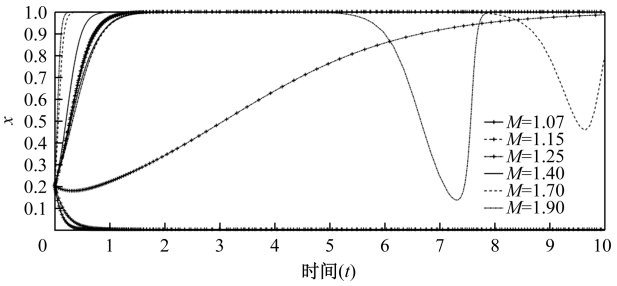


图 8　免费碳排放配额对银行策略演化过程的影响

政府规制下多种政策工具的协同作用，这种政策间的动态调控机制将在后续的政策模拟环节中进一步展现。

在研究过程中发现，当政府逐步提高发放给企业的免费碳配额额度时，企业转变为技术创新策略的速度提前。然而当 M 达到 1.8 时，博弈系统的稳定性将受到破坏。政府监管策略将从严格转向宽松，企业的创新态度也将由积极转为消极，随后陷入重复波动的循环之中。这说明当碳配额额度超过某一阈值时，政府通过收取企业碳交易手续费弥补了自身监管成本，使得政府严格监管收益大于宽松监管收益，进而促使政府选择严格监管策略。在政府监管的情况下，由于碳配额额度较高，企业不进行技术创新时购买碳配额的成本高于因不创新而遭受的处罚成本，因此企业会从技术创新转变为非技术创新。由于政府积极监管时的环境效益提升并且无须承担企业通过申诉时的信誉损失和协调成本，政府又转变为不监管策略，如此循环往复。

由此可见,碳排放配额的设定至关重要。如果配额设定过低,创新企业的相对收益不足,甚至可能出现非技术创新企业利润更高的情形,从而抑制绿色技术发展并削弱政策效果。而当碳排放配额超过某一临界值时,企业更倾向于通过碳交易市场购买配额,而非开展绿色技术创新。因此,政府在设定碳排放配额时,应将其控制在合理区间内并进行动态调整,以形成有效激励机制,实现企业经济效益与环境效益的协同提升。这一结论与方婷[42]一致。

此外,随着政府逐渐提高发放给企业的技术补贴,当 S 达到阈值 1.37 时,便达到了企业技术创新的"窗口期"。随着 S 进一步提高,企业转变为技术创新策略的速度提前,政府也会更早收敛于宽松监管,博弈系统更早演化至均衡点 $E_5(1,1,0)$。如图 9～图 11 所示。

4.5　绿色信贷和政府规制政策组合模拟

根据前文可知,企业选择绿色技术创新策略时,$C_2-C_1+I_1+S-C_1L_g+MP-E_1P<0$ 的渐近稳定性条件是系统趋向理想演化稳定均衡 $E_5(1,1,0)$的前提,此时银行会执行绿色信贷政策,政府则采取"宽松监管"策略。从模型所设计的政策工具角度来看,绿色信贷利率 L_g、专项补贴资金 S 和碳排放配额 M 共同构成了调控系统收敛于 $E_5(1,1,0)$的政策组合。

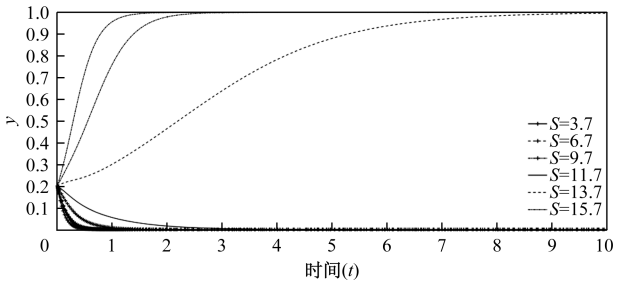


图 9　政府补贴对企业策略演化过程的影响

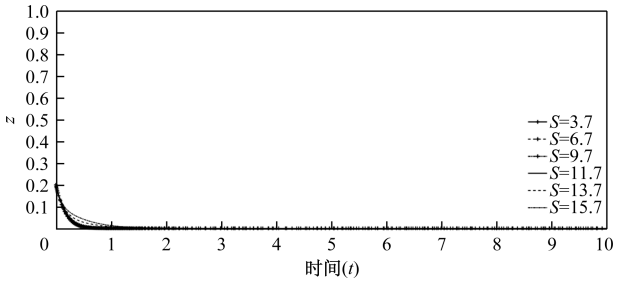


图 10　政府补贴对政府策略演化过程的影响

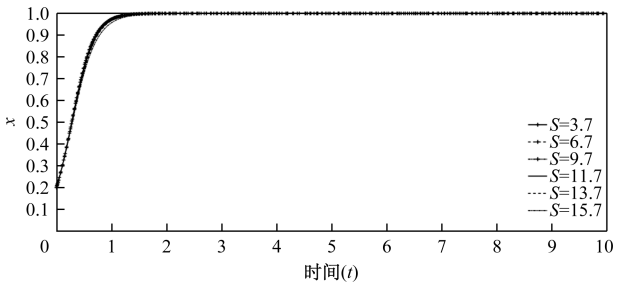


图 11　政府补贴对银行策略演化过程的影响

随着利率形成机制市场化改革的深入推进,信贷资金定价的核心决定要素已逐步转向市场供需均衡机制,此时贷款利息率由资金借贷双方的供求关系决定。银行在设定贷款利率时,会考虑市场上的资金供需情况,以及自身的信贷成本等因素,同时资金借贷市场通常呈现卖方市场特征,即银行作为资金提供方在市场上占据主导地位,因此银行往往会基于信贷成本进行贷款定价,这意味着在实际操作中,利率并非固定不变。鉴于此,为了更贴近现实情况,放宽基准情境中绿色信贷利率 $L_g=0.03$ 这一假设,而保持其他参数不变,模拟环境规制强度 M 和专项补贴资金 S 的变化对系统收敛于 $E_5(1,1,0)$的影响。具体结果如表 3 所示。

系统在收敛至 $E_5(1,1,0)$演化稳定均衡的过程中,L_g、M 和 S 这一政策组合的交互作用呈现一定规律性。一方面,当政府发放的碳配额额度固定时,随着绿色信贷利率 L_g 的升高,系统收敛于 $E_5(1,1,0)$所需的专项补贴资金 S 呈递增趋势。这种 L_g 与 S 的同向递增关系表明,在实施绿色信贷与环境规制两项政策推动企业绿色技术创新的过程中,可能会出现一定程度的政策冲突损失。具体而言,L_g 的持续上升会使企业利息负担加重,进而导致技术创新成本增加,这在一定程度上削弱了绿色信贷政策对企业创新的激励作用。为弥补绿色信贷政策激励效果的不足,政府需要增加专项补贴资金的投入,以满足企业在"成本遵循"原则下的理性决策需求。

表 3　系统收敛于 $E_5(1,1,0)$的 S、M 和 L_g 值

S	$M=1.07$	$M=1.15$	$M=1.25$
$L_g=0.01$	12.0	7.5	2.1
$L_g=0.02$	12.5	8.1	2.7
$L_g=0.03$	13.1	8.7	3.3
$L_g=0.04$	13.6	9.3	3.9
$L_g=0.05$	14.2	9.9	4.5
$L_g=0.06$	14.8	10.5	5.1
$L_g=0.07$	15.4	11.1	5.7
$L_g=0.08$	15.9	11.7	6.3
$L_g=0.09$	16.5	12.3	6.9

反之，在绿色信贷利率 L_g 固定的情况下，若政府逐步提高免费发放的碳配额额度，系统收敛到 E_5(1,1,0)所要求的专项补贴资金 S 会逐渐递减。这是因为适当放宽碳配额标准，能给予减排企业更强的激励，积极开展技术创新的企业可以通过出售多余的碳配额获得额外收入，从而延长技术创新的“窗口期”。S 与 M 呈现的反向变动态势，意味着环境规制政策工具之间存在一定的替代关系。基于这一结果，政府在制定政策时需灵活调整碳规制强度与专项补贴资金的组合方式，进而实现企业绿色技术创新活动的政策目标。

5 结论与建议

为了更好地服务“双碳”目标落实，本文聚焦于政府规制视角下中国绿色信贷政策与碳排放权交易组合如何促进企业绿色技术创新，通过构建银行-企业-政府三方的演化博弈模型，分析了促进企业绿色技术创新外部激励机制的理想演化稳定均衡态。在此基础上，通过科学赋值，运用计算仿真模拟方法，全面且深入地探究了碳交易与绿色信贷这两种政策工具在协同实施过程中的成效。研究结果表明：首先，政府规制是推动政策协同发挥作用的关键变量。政府通过奖惩机制强化银行执行绿色信贷的激励约束，可显著提高绿色信贷供给水平，并通过融资渠道间接提升企业绿色技术创新概率，表明政府规制是实现政策工具协同发力的重要前提。其次，绿色信贷对企业创新具有间接促进作用但存在作用边界。绿色信贷通过降低融资约束改善企业创新条件，但难以单独改变企业策略选择，其效果依赖于环境规制强度与财政补贴等政策工具的配合。再次，环境规制工具存在区间效应。适度提高创新补贴与碳排放配额有助于激发企业创新动力，但碳配额超过一定阈值将削弱激励效果并影响系统稳定性，说明政策强度需控制在合理区间内。最后，政策工具之间存在互动关系。绿色信贷利率与专项补贴资金在促进企业创新时存在一定的政策冲突，绿色信贷利率上升会增加企业利息负担，在一定程度上削弱了绿色信贷对企业创新的激励作用，此时需要政府加大专项补贴资金的投入力度来抵消这一负面影响。而碳排放配额与专项补贴资金之间存在替代关系，政府可以充分利用这一特性，根据不同行业、不同企业的特点，合理调整二者的组合，保障企业绿色技术创新的收益，推动中国绿色发展目标的顺利实现。

基于以上结论，本文提出以下建议。

(1)完善银行绿色信贷激励约束体系，对积极践行绿色信贷的银行实施税收优惠或财政奖励，对未有效执行绿色信贷政策的银行实施罚款或限制业务范围等惩罚措施，形成“激励-约束”双向调节机制。精准制定碳排放配额的初始分配方案，分行业设定差异化的碳排放基准值，允许企业跨期存储和交易结余配额，并建立“碳配额缓冲池”，当企业创新投入强度超过行业均值时，允许按比例申请临时配额上浮，避免创新投入受硬性配额制约。

(2)深入研究碳排放配额与专项补贴资金之间的替代关系，开发“绿色信贷-碳配额-财政补贴”政策协同效应评估模型，以便科学制定合理的组合策略。同时建立季度政策效果监测机制，全面、准确地评估绿色信贷政策、碳排放权交易以及相关补贴政策的实施效果，根据政策实施效果评估结果，及时发现政策执行环节中潜藏的问题与缺陷，随即对政策参数予以调整、优化执行方式，并对政策组合进行合理配置。

参考文献

[1] 辜胜阻. 绿色转型是实现经济社会发展与环境质量兼顾的重要途径[J]. 宏观经济管理，2016(4)：6.

[2] 王遥，任玉洁. “双碳”目标下的中国绿色金融体系构建[J]. 当代经济科学，2022，44(5)：1-13.

[3] PARMESAN C，YOHE G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. Nature，2003，421：37-42.

[4] 谭显春，郭雯，樊杰等. 碳达峰、碳中和政策框架与技术创新政策研究[J]. 中国科学院院刊，2022，37(4)：435-443.

[5] 朱承亮，王珺. 中国企业研发经费投入现状及国际比较[J]. 技术经济，2022，41(1)：24-32.

[6] 王营，冯佳浩. 绿色债券促进企业绿色创新研究[J]. 金融研究，2022(6)：171-188.

[7] SONG S，DONG Y，KULL T，et al. Supply chain leakage of greenhouse gas emissions and supplier innovation [J]. Journal of Production and Operations Management，2023，32(3)：882-903.

[8] GRAY L D. Economic variables and law development：a case of western mineral property[J]. 1978，38：338-362.

[9] PORTER M E，LINDE C D. Toward a new conception of the firm[J]. 1995，9(4)：97-118.

[10] 范宸瑄，曲波. 环境规制、绿色技术创新与制造业绿色转型[J]. 科技和产业，2026，26(3)：106-112.

[11] 鄢哲明，高一丹，祝丹枫. 环境保护税与绿色技术创新：基于供应链非对称性溢出视角[J]. 环境经济研究，2025，10(4)：26-58.

[12] 颜剩勇，谭嘉皓，张淑霞. 绿色信贷贴息政策与重污染企业漂绿行为治理[J]. 财经科学，2025(12)：31-45.
[13] 范如国，樊唯. 市场多层驱动下企业风险偏好异质性对绿色技术创新决策的影响[J]. 运筹与管理，2023，32(12)：57-63.
[14] 华淑名，李京泽. 数字经济条件下环境规制工具能否实现企业绿色技术创新的“提质增量”[J]. 科技进步与对策，2023，40(8)：141-150.
[15] 余泳泽，尹立平. 中国式环境规制政策演进及其经济效应：综述与展望[J]. 改革，2022(3)：114-130.
[16] 杜可，陈关聚，梁锦凯. 异质性环境规制、环境双元战略与绿色技术创新[J]. 科技进步与对策，2023，40(8)：130-140.
[17] 彭星，李斌. 不同类型环境规制下中国工业绿色转型问题研究[J]. 财经研究，2016，42(7)：134-144.
[18] 范丹，孙晓婷. 环境规制、绿色技术创新与绿色经济增长[J]. 中国人口·资源与环境，2020，30(6)：105-115.
[19] 岳晓峰，张文卿，刘蓝天，陈宇科. 环境规制工具选择对长江经济带工业绿色技术创新的影响[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版)，2021，38(4)：129-140.
[20] 袁嘉琪，卜伟，唐雨妮. 环境规制、要素配置对工业绿色全要素生产率的影响——产出补偿还是创新补偿[J]. 管理评论，2023，35(10)：45-62.
[21] 何彦妮. 碳交易市场对企业创新策略的影响及作用机制[J]. 中国人口·资源与环境，2022，32(7)：37-48.
[22] 李露茜，吴施，田原. 碳排放权交易与企业绿色技术创新[J]. 统计与信息论坛，2024，39(6)：89-99.
[23] 肖丁丁，田文华. 复合型碳减排机制下企业低碳技术创新战略的博弈分析[J]. 中国科技论坛，2017(9)：105-113.
[24] 崔学刚，毕煜晗，姜鑫，孙依愿. 碳排放权交易制度的“微观双赢效应”及其机制分析[J]. 南开管理评论，2026，29(1)：4-14.
[25] CLARKSON P M，LI Y. The value relevance of greenhouse gas emissions under the European Union carbon emissions trading scheme[J]. European Accounting Review，2015，24(3)：551-558.
[26] 冯伶莉. “双碳”目标下我国碳排放权交易市场建设存在的问题与建议[J]. 环境保护，2024，52(13)：74-75.
[27] 朱子轩. 绿色信贷能促进企业持续绿色创新吗？——基于双重机器学习的因果推断[J]. 科技和产业，2025，25(8)：8-15.
[28] 郑嘉榆，胡毅. 绿色信贷能带动金融系统“绿色化”和企业减排吗？——基于演化博弈分析[J]. 中国管理科学，2024，32(12)：288-299.
[29] 丁宁，任亦依，左颖. 绿色信贷政策得不偿失还是得偿所愿？——基于资源配置视角的 PSM-DID1 成本效率分析[J]. 金融研究，2020(4)：112-130.
[30] 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(5)：196-206.
[31] 王淑玲，徐佳琳，段晓祥，等. 碳交易和绿色金融驱动中小微药厂转型演化博弈[J]. 应用化学，2024，41(6)：912-916.
[32] 丁志刚，许惠玮，徐琪. 绿色信贷支持下供应链低碳技术采纳决策研究[J]. 软科学，2020，34(12)：74-80.
[33] XU B，LIN B. Green credit and green technology innovation：Impact mechanism and nonlinear effect test[J]. Environmental Impact Assessment Review，2025，110：107652.
[34] 杨志安，张帆. 碳排放权交易驱动城市绿色高质量发展的影响研究[J]. 西南民族大学学报(人文社会科学版)，2024，45(5)：116-124.
[35] CHANG H，ZHAO Y. The impact of carbon trading on the “quantity” and “quality” of green technology innovation：a dynamic QCA analysis based on carbon trading pilot areas[J]. Heliyon，2024，10(3)：25668.
[36] 邢双美，王智新. 促进企业绿色创新质量提升的政策叠加效应研究——来自创新型城市试点与绿色信贷政策的证据[J]. 西部论坛，2025，35(5)：76-93.
[37] 李善民. 奖惩机制下绿色信贷的演化博弈分析[J]. 金融监管研究，2019(5)：83-98.
[38] 蒋金荷. 碳定价机制最新进展及对中国碳市场发展建议[J]. 价格理论与实践，2022(2)：26-30.
[39] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics[J]. Econometrica，1991，59(3)：637-666.
[40] 卞晨，初钊鹏，孙正林. 环境规制、绿色信贷与企业绿色技术创新的政策仿真——基于政府干预的演化博弈视角[J]. 管理评论，2022，34(10)：122-133.
[41] 魏宁，刘胜男，李桂菊，等. CCUS 对中国粗钢生产的碳减排潜力评估[J]. 中国环境科学，2021，41(12)：5866-5874.
[42] 方婷. 燃煤电厂环境成本确认及计量研究[D]. 保定：华北电力大学，2021.
[43] 杨霞，何刚，张世玉，蒋怀印. 碳减排政策组合使用对企业碳减排的影响及效能提升策略[J]. 中国环境科学，2025，45(3)：1699-1712.
[44] 赵昕，朱连磊，丁黎黎. 碳金融市场发展的演化博弈均衡及其影响因素分析[J]. 中央财经大学学报，2018(3)：76-86.
[45] 周肖肖，贾梦雨，赵鑫. 绿色金融助推企业绿色技术创新的演化博弈动态分析和实证研究[J]. 中国工业经济，2023(6)：43-61.
[46] 陈庭强，林文娟，王磊等. 基于碳交易与绿色信贷的化工企业低碳行为决策研究[J]. 中国管理科学，2025，33(6)：322-334.

Green Credit, Carbon Trading and Corporate Green Technological Innovation: An Evolutionary Game Study from the Perspective of Government Regulation

LI Yan, WANG Jianheng

(School of Finance, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Green and low-carbon transformation and upgrading oriented toward green technological innovation constitute an important pathway for supporting the achievement of the "dual carbon" goals. However, the knowledge spillover effects and environmental public-good attributes of green technological innovation often lead to insufficient intrinsic incentives for enterprises to innovate. From the perspective of government regulation, a tripartite evolutionary game model involving banks, government and enterprises was constructed. The impact of the policy combination of green credit and carbon emissions trading on enterprises' green technological innovation, with the aim of exploring external incentive mechanisms that promote such innovation was examined. The results show that green credit policies can provide financial support for enterprises, while government regulation can incentivize financial institutions' green credit behavior, thereby increasing the probability and evolutionary speed of banks' implementation of green credit, and in turn, raising the probability of enterprises engaging in green technological innovation and improving the overall effectiveness of environmental regulation policies. Meanwhile, the reasonable setting of innovation subsidy standards and carbon emission quota standards by the government can promote enterprise innovation. However, carbon emission quota standards must be strictly controlled within a certain range, as excessively high carbon emission quotas may undermine the stability of the game system. In addition, there is a certain policy conflict between green credit interest rates and special subsidy funds, while carbon emission quotas and special subsidy funds exhibit a substitution relationship. Theoretical reference and policy implications are provided for the formation of external incentive mechanisms through government regulation to promote enterprises' green technological innovation activities.

Keywords: government regulation; green credit; carbon emissions trading; green technological innovation; evolutionary game