

环境规制、绿色信贷、技术学习与制氢企业绿色转型

隆双双,丁日佳

(中国矿业大学(北京)管理学院,北京 100083)

摘要:基于演化博弈理论和系统动力学(SD)构建了政府、金融机构和制氢企业的演化博弈模型,探讨了环境规制下有效促进制氢企业绿色转型的措施及各方稳定策略。结果表明:单独调控绿氢单位补贴或碳价格可使制氢企业策略向可再生能源制氢策略转变,但固定资产补贴无法影响制氢企业最终决策,且若超过绿氢单位补贴的上限阈值则会破坏博弈系统的稳定性;只有政府的高奖励或高惩罚利率才能促使金融机构策略向绿色信贷策略收敛,且绿色信贷无法影响制氢企业最终决策;技术学习因素可使制氢企业决策自主转向可再生能源制氢策略,并降低企业对政府补贴的依赖性和碳价格有效性的门槛。

关键词:氢能;环境规制;绿色信贷;技术学习

DOI:10.13956/j.issn.1001-8409.2025.04.15

中图分类号:F832.4;F273.1;F426.2;X196

文献标识码:A

文章编号:1001-8409(2025)04-0109-11

Environmental Regulations, Green Credit, Technological Learning, and Green Transformation of Hydrogen Producer

LONG Shuang-shuang, DING Ri-jia

(School of Management, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083)

Abstract: This article constructs an evolutionary game model involving the government, financial institutions, and hydrogen producers, based on evolutionary game theory and System Dynamics, to explore effective measures for promoting the green transformation of hydrogen producers under environmental regulations and stable strategies from all parties. The results indicate that regulating either the subsidy for unit green hydrogen or the carbon price individually can shift hydrogen producers' strategies towards renewable energy hydrogen production. However, fixed asset subsidy does not influence the final decision-making of hydrogen producers, and exceeding the upper threshold of subsidy for unit green hydrogen destabilizes the game system. Only high incentive or penalty rates from the government can drive financial institutions' strategies towards green credit, but green credit alone does not affect the final decision-making of hydrogen producers. The technological learning factor can enable hydrogen producers to make independent decisions in favor of renewable energy hydrogen production, reducing their dependence on government subsidies and lowering the threshold for carbon price effectiveness.

Key words: hydrogen energy; environmental regulations; green credit; technological learning

1 引言

由于世界能源需求和能源消耗的快速增加,化石能源不可能无限期地作为主要能源^[1]。同时为应对化石能源时代温室气体排放引起的全球变暖,《巴黎协定》对2020年后全球气候变化进程设定了2°C和1.5°C的温控目标^[2]。从能源供应安全到气候变化问题,人们认识到现有能源体系需从化石能源体系转变为可持续能源体系^[3]。可再生能源似乎是解决能源可持续发展最高效、最有效的方案之一^[4],但因其随机波动性强以及地处偏远地区等因素,使得洁净、高效便捷的能源载体研究成

为可再生能源利用的关键^[5,6]。而氢被认为是可再生能源最终最清洁的能源载体^[7]。

氢的来源具有多样性,其中可再生能源电解水制氢具有绿色环保、生产灵活、纯度高等特点,从长期来看其将是氢的主要来源^[8,9]。当前,中国氢气供给结构约77.3%来自化石能源制氢,21.2%来自工业副产氢,仅1.5%由电解水制氢提供^[10,11]。由于化石能源制氢伴随着高碳排放,现有的氢气供给结构显然不利于中国“双碳”目标的实现。氢气来源的绿色低碳不仅是能源系统深度脱碳的关键,也是交通、工业等领域绿色转型的关

收稿日期:2024-06-02

基金项目:国家“十四五”重点研发计划课题(2022YFF0607404)

作者简介:隆双双(1997—),男,重庆丰都人,博士研究生,研究方向为能源经济管理;丁日佳(1963—),男,吉林长春人,教授、博士生导师,研究方向为能源经济管理(通讯作者)。

键。虽然中国颁布了一系列政策促进氢能产业的发展,但重点在于氢能交通领域^[12],有关支持氢能发展的财税金融等政策体系不全面,未能充分利用碳价、碳税等环境规制政策推动绿氢的发展,容易导致由于灰氢长期发展而产生的高碳锁定效应^[13]。如何在“双碳”目标下降低氢气供给结构对化石能源的依赖性,促进氢供应链的绿色低碳发展?如何借助不同财税政策和金融工具推动制氢企业绿色转型,实现可再生能源的大规模制氢?这些都是加快建设绿色低碳能源供应体系急需解决的关键问题。因此,在经济高质量发展、能源低碳转型和资源消耗的新形势下,系统仿真研究政府、金融机构与制氢企业的行为演化机制对氢气供给结构和能源结构绿色转型具有重要的理论意义和实践意义。

氢能的全产业链包括“制、储、运、用”四个环节^[14],氢气生产作为氢能产业链的始端,氢气制备过程的绿色低碳是氢能产业链绿色低碳的前提和基础。不少学者对各项制氢工艺的研究现状和方法原理进行了详细的介绍^[3,15,16],或者通过全生命周期计算并比较各项制氢工艺的成本和碳排放^[17,18],以及通过计量经济模型和统计模型评估制氢工艺的经济性^[19,20]。从经济和环境效益上看,化石能源制氢成本较低,但伴随着高碳排放,环境危害严重;可再生能源电解水制氢受到绿电价格和电解槽成本影响,整体成本较高,但制氢过程没有碳排放。化石能源制氢技术能够与CCUS技术集成耦合,获得低碳氢。从全生命周期角度来看,CCUS技术能够使煤制氢全流程减少约为80.6%的碳排放,但相应的会使制氢成本提高2~3倍^[8]。然而当前市场需求并没有考虑氢源的环境效益,化石能源制氢和可再生能源制氢之间的成本差距使得绿氢在市场竞争中处于劣势,这成为阻碍绿氢发展的主要原因。

碳交易制度作为一种市场型激励环境规制,可以限制和调节企业碳排放。对于制氢行业而言,碳价格并不直接影响氢的生产过程,但碳价格提高可以使灰氢和绿氢之间竞争公平^[21,22]。明确碳价信号不仅可以避免高碳的灰氢产业粗放发展模式,还可以促进企业生产和使用绿氢^[12,23],以及实现灰氢向蓝氢的过渡。然而针对制氢行业,环境规制在微观层面对制氢企业绿色生产策略选择以及碳减排技术应用的影响机制尚不明确。虽然文献^[24]利用演化博弈研究了政府因素、市场因素和技术因素对政府和能源企业在蓝氢和绿氢项目投资策略的影响。但该文中的博弈主体并没考虑金融机构,对企业策略的研究也忽视了灰氢项目,并且未将学习曲线模型纳入博弈模型的构建过程。

环境规制是指政府为应对企业生产活动的负外部性,采取监管措施对企业污染行为进行限制和调节^[25],该政策可以减少污染排放从而改善环境质量,并通过“创新补偿”抵消规制成本^[26]。现有研究将环境规制分为命令控制型、市场激励型和公众参与型,且认为市场

激励型环境规制(如政府补贴、环境税、碳交易等)更能促进企业绿色转型^[27,28]。政府采用不同的环境规制政策对企业绿色低碳技术选择的影响一直是研究的热点。这些研究通过建立中央政府、地方政府、企业等两方或三方参与的演化博弈模型,指出环境税、绿色技术成本补贴、碳价格、动态奖惩等措施能够促进企业绿色技术转型或减排^[29-31]。然而这些研究并未考虑不同技术采纳后企业不同生产成本的差异,也没有考虑技术学习因素对政府环境规制下企业生产决策的影响。

是否考虑技术学习因素会造成政府环境规制下的企业决策差异,进而导致整体绿色生产水平的不同和政府环境规制政策效率上的差别^[32]。学习曲线源于飞机生产成本,是指产品累计产量越大,随着时间的推移,单位产品的成本会以一定的比例下降^[33]。学习曲线是评估新兴能源技术成本降低的一个重要方面,是可再生能源与现有技术竞争所必需的^[34]。当前化石能源制氢技术趋于成熟,未来成本下降潜力有限,而可再生能源制氢成本随着绿电成本和电解槽成本下降以及电解效率提高,在未来仍有较大的下降空间^[35]。

绿色金融对于推动氢能产业绿色低碳发展也逐渐得到重视。Farhad等认为银行贷款和绿色金融对中国氢能项目实现融资多样化至关重要,并指出两者对中国氢能项目贷款的最佳权重分别是56%和44%^[36]。绿色金融是一种促进更好的环境发展、提高资源效率和应对气候变化的金融活动^[37],该政策具有监督和防范污染、倒逼企业绿色创新的作用,是推动发展方式绿色转型的重要制度手段^[38]。显然与其他金融政策(如氢能产业发展投资基金、氢能企业投资贷款贴息补贴等)相比,绿色金融更有利于制氢行业绿色低碳技术的应用。考虑到碳价格、绿氢成本学习曲线等因素,Webb等研究表明相较于蓝氢生产附带的高风险,绿色金融使用将侧重于支持扩大绿氢生产^[39]。另外,一些学者利用演化博弈分析了绿色金融对企业绿色创新和减排决策的影响。他们的研究指出绿色金融能够有效促进企业绿色技术创新策略选择^[38],且金融机构实施绿色信贷初始意愿越高,越能使企业参与节能减排^[40],但也有研究发现绿色信贷对寡头企业绿色低碳技术研发仅起到降低成本的有限效果,无法影响企业最终决策^[41]。

综上所述,制氢企业绿色转型是氢供应链绿色低碳发展和能源供应体系脱碳的关键。虽然已有研究分析了环境规制和绿色金融对企业绿色低碳技术决策的影响,但这些研究均是从外部对企业施加压力或激励措施,忽略了技术学习这一内部因素对企业决策的影响,可能导致企业决策过程中的“短视”。同时,大部分研究对企业成本的考虑仅针对绿色技术成本和传统技术成本之间的差别,没有分析不同技术实施后企业不同的生产成本。另外,缺乏文献针对如何促进绿氢发展问题,从微观层面对制氢企业绿色生产决策行为演化机制进

行建模与仿真分析。基于此,本文利用演化博弈理论构建了“双碳”目标下政府、金融机构和制氢企业三方参与的演化博弈模型,探讨了环境规制下有效促进制氢企业绿色转型的措施以及各方稳定策略,通过SD模型仿真分析了关键因素对三方博弈主体行为策略的影响,研究成果可为氢产业绿色低碳发展政策设计和氢供给结构绿色转型提供参考。

本文可能的研究贡献在于:(1)本文利用演化博弈模型首次考虑了政府、金融机构和制氢企业三方行为策略的互动,并建立SD模型仿真分析单一因素及组合因素对博弈主体行为策略的影响,更为直观地揭示单一政策及组合政策的影响效果和作用条件。(2)文中制氢企业不仅考虑了化石能源制氢策略(灰氢)和可再生能源制氢策略(绿氢),还引入了化石能源制氢并结合CCUS技术实现灰氢向蓝氢转变的策略。本文全面体现了制氢企业对传统生产技术、绿色生产技术和低碳减排技术的应用决策,不同于文献^[24]仅考虑了政府和能源企业对蓝氢项目和绿氢项目投资决策,忽视了灰氢项目投资决策。(3)本文将学习曲线模型纳入制氢企业绿色转型演化博弈模型中,从微观层面探讨了外部因素(环境规制和绿色信贷)和内部因素(技术学习)对制氢企业生产决策的影响,从而规避了企业决策的“短视”。而现有关于企业绿色转型决策的研究大多从外部对企业施加压力或激励措施^[29,30,38,42],忽略了技术学习对企业生产决策的影响。

2 问题描述与模型构建

2.1 问题描述

该研究构建了“双碳”目标下政府、金融机构和制氢企业三方参与的演化博弈模型,研究环境规制下能够有效促进制氢企业绿色转型的措施以及各方稳定策略。政府、金融机构和制氢企业均为以自身利益最大化为目标的有限理性决策主体,三方逻辑关系见图1(以下描述中若无特别说明,“政府”均指“地方政府”)。

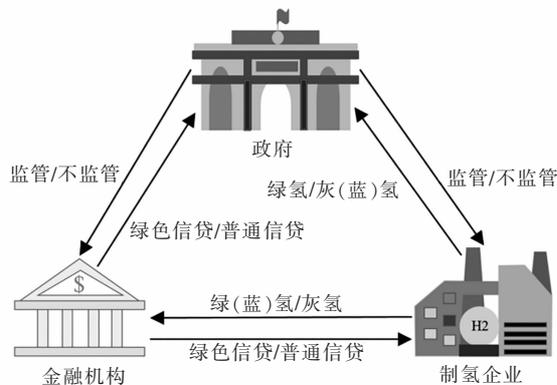


图1 政府、金融机构和制氢企业博弈逻辑关系

对于制氢工艺选择,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》指出“重点研究高效低成本

的化石能源和可再生能源制氢技术”。《中国氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》也指出重点发展可再生能源制氢,严格控制化石能源制氢。由于中国“富煤贫油少气”的特性,制氢原料仍以化石燃料为主。而可再生能源制氢对环境无污染,是革新中国能源布局、助力低碳减排循环经济发展的潜在思路。因此,本文主要考虑制氢企业对于化石能源制氢和可再生能源制氢这两种制氢策略的选择。

金融机构是制氢企业前期获得融资的主要渠道,对制氢企业提供绿色信贷和常规信贷,其中绿色信贷具有严格的审查、监督和管理功能,以此防范信贷风险和合规风险^[38]。金融机构对制氢企业实施绿色信贷可分两种情况,一是可再生能源制氢企业;二是化石能源制氢并结合CCUS技术实现灰氢向蓝氢过渡的制氢企业。其次,金融机构的常规信贷无论制氢企业采取何种制氢工艺均可提供。

政府作为氢能财税金融政策及产业政策的设计者和执行者,为推动绿色金融发展和制氢企业绿色转型,对金融机构和制氢企业进行监管与督促。一方面,政府对实行绿色信贷的金融机构进行奖励,同时对实行常规信贷的金融机构进行处罚。处罚是因为金融机构给高碳排放企业发放信贷以及绿色业绩评价中绿色信贷考核不达标等^[40]。另一方面,政府对制氢企业进行环境规制,即对化石能源制氢企业实行碳定价政策,对可再生能源制氢企业进行补贴。

2.2 基本假设

根据前文对问题的描述,对该研究做出如下假设:

H1:政府会因其监管成本、激励成本及环境效益等因素选择监管策略或不监管策略,概率分别为 x 和 $1-x$ ($0 \leq x \leq 1$);金融机构由于服务成本、贷款利率等因素选择绿色信贷和常规信贷,概率分别为 y 和 $1-y$ ($0 \leq y \leq 1$);制氢企业受成本、环境规制、贷款利率等因素影响选择化石能源制氢或可再生能源制氢,概率分别为 z 和 $1-z$ ($0 \leq z \leq 1$)。

H2:制氢企业固定资产投资向金融机构贷款获得,化石能源制氢和可再生能源制氢的固定资产投入成本分别为 C_1 和 C_2 。若增加CCUS技术,则需支付额外成本 C_3 ,且 $C_1 + C_3 < C_2$ 。

H3:化石能源制氢的生产成本为 P_1Q ,其中 P_1 为化石能源制氢单位成本, Q 为制氢总量。若企业不采取CCUS技术,则需要支付碳排放成本 kP_2Q ,其中, P_2 为碳价格, k 为化石能源制氢单位碳排放量;若采取CCUS技术,则需要支付对应的技术成本 aP_3Q ,其中 P_3 表示CCUS技术单位成本, a 表示碳捕集率。

H4:由于电解槽成本和电力成本对绿氢单位成本下降的贡献率分别为57%和33%^[35],故本文主要考虑电解槽成本对绿氢单位成本的影响。设可再生能源制氢的单位成本变化满足学习曲线模型,即 $P_{H2} = P_4(G/g)^{-\epsilon}$,其中 P_{H2} 为可再生能源制氢单位成本, P_4 为可再生

能源制氢初期单位成本, G 为电解槽装机总容量, g 为电解槽的初期装机容量, e 为学习率, 且 $P_1 < P_4$ 。

H5: 政府实行监管策略时, 监管成本为 C_4 , 一方面, 对化石能源制氢企业实行碳定价政策, 对可再生能源制氢企业进行补贴 ($dB + P_5Q$), 其中 B 为固定资产最大补贴额, $d(0 < d < 1)$ 为补贴力度, P_2 为绿氢单位补贴; 另一方面, 对提供绿色/常规信贷的金融机构实施利率为 r_1/r_2 的贷款奖励/处罚。同时, 政府可获得中央政府的转移支付 L_1 , 以及绿氢项目带动光伏、风电等清洁能源项目发展带来的额外税收 T 。

H6: 政府不监管时, 将不对制氢企业和金融机构采取任何措施, 但化石能源制氢企业碳排放造成的环境损失成本由政府承担, 且环境损失成本等于碳排放成本, 即 kP_2Q , 若结合 CCUS 技术, 则环境损失成本为 $(1-a)kP_2Q$ 。同时, 政府将受到 L_2 的行政处罚, 且只享受可再生能源制氢带来额外税收的一部分 hT , h 为损失因子。

H7: 金融机构实施绿色信贷和常规信贷的基准收益率分别为 i_1 和 $i_2 (i_1 < i_2)$, 且实施绿色信贷需支付额外成本 C_5 , 包括额外的实施成本、监管成本、培训成本等。

2.3 支付矩阵构建

基于上述假设可得“政府-金融机构-制氢企业”三方博弈支付矩阵, 如表 1。

3 博弈主体策略稳定性分析

3.1 政府策略稳定性分析

设政府采取监管策略和不监管策略的期望收益为 U_{g1} 和 U_{g2} , 平均期望收益为 U_g , 如下:

$$U_{g1} = yz[L_1 - r_1(C_1 + C_3) - C_4] + y(1-z)(T + L_1 - dB - P_5Q - r_1C_2 - C_4) + (1-y)z(L_1 - C_4 + r_2C_1) + (1-y)(1-z)(T + L_1 - dB - P_5Q - C_4 + r_2C_2) \quad (1)$$

$$U_{g2} = yz[-(1-a)kP_2Q - L_2] + y(1-z)(hT - L_2) + (1-y)z(-kP_2Q - L_2) + (1-y)(1-z)(hT - L_2) \quad (2)$$

$$U_g = xU_{g1} + (1-x)U_{g2} \quad (3)$$

表 1 政府、金融机构和制氢企业博弈支付矩阵

政府	金融机构	制氢企业	
		化石能源制氢 z	可再生能源制氢 $(1-z)$
监管 x	绿色信贷 y	$L_1 - r_1(C_1 + C_3) - C_4;$ $(r_1 + i_1)(C_1 + C_3) - C_5;$ $-P_1Q - (1-a)kP_2Q - akP_3Q - (1+i_1)(C_1 + C_3)$	$T + L_1 - dB - P_5Q - r_1C_2 - C_4;$ $(r_1 + i_1)C_2 - C_5;$ $dB + P_5Q - P_4(G/g)^{-e}Q - (1+i_1)C_2$
	常规信贷 $(1-y)$	$L_1 - C_4 + r_2C_1;$ $(i_2 - r_2)C_1;$ $-P_1Q - kP_2Q - (1+i_2)C_1$	$T + L_1 - dB - P_5Q - C_4 + r_2C_2;$ $(i_2 - r_2)C_2;$ $dB + P_5Q - P_4(G/g)^{-e}Q - (1+i_2)C_2$
不监管 $(1-x)$	绿色信贷 y	$-(1-a)kP_2Q - L_2;$ $i_1(C_1 + C_3) - C_5;$ $-P_1Q - akP_3Q - (1+i_1)(C_1 + C_3)$	$hT - L_2;$ $i_1C_2 - C_5;$ $-P_4(G/g)^{-e}Q - (1+i_1)C_2$
	常规信贷 $(1-y)$	$-kP_2Q - L_2;$ $i_2C_1;$ $-P_1Q - (1+i_2)C_1$	$hT - L_2;$ $i_2C_2;$ $-P_4(G/g)^{-e}Q - (1+i_2)C_2$

则政府的复制动态方程为:

$$F(x) = dx/dt = x(U_{g1} - U_g) = x(1-x)\{yz[r_1(C_2 - C_1 - C_3) + r_2(C_2 - C_1) - akP_2Q] - y(r_1 + r_2)C_2 + z[dB + P_5Q + r_2(C_1 - C_2) - (1-h)T + kP_2Q] + (1-h)T + L_1 + L_2 - dB - P_5Q - C_4 + r_2C_2\} \quad (4)$$

$$y = \frac{-z[dB + P_5Q + r_2(C_1 - C_2) - (1-h)T + kP_2Q] - (1-h)T - L_1 - L_2 + dB + P_5Q + C_4 - r_2C_2}{z[r_1(C_2 - C_1 - C_3) + r_2(C_2 - C_1) - akP_2Q] - (r_1 + r_2)C_2} = y^* \quad (6)$$

政府选择监管的概率处于稳定状态须满足: $F(x) = 0$, 且 $dF(x)/dx < 0$ 。由于 $d(f(y))/dy < 0$, 故 $f(y)$ 为减函数。因此, 当 $y = y^*$ 时, $F(x) \equiv 0$, 则所有的水平都是稳定的; 当 $y < y^*$ 时, $f(y) > 0$, $d(F(x))/dx|_{x=0} > 0$, $d(F(x))/dx|_{x=1} < 0$, 则 $x = 1$ 为演化稳定状态; 当 $y > y^*$ 时, $f(y) < 0$, $d(F(x))/dx|_{x=0} < 0$, $d(F(x))/dx|_{x=1} > 0$, 则 $x = 0$ 为演化稳定状态。政府策略演化相位图如图 2。

3.2 金融机构策略稳定性分析

同理金融机构复制动态方程为:

$$F(y) = dy/dt = y(1-y)\{xz[r_1(C_1 + C_3 - C_2) - r_2$$

令:

$$f(y) = yz[r_1(C_2 - C_1 - C_3) + r_2(C_2 - C_1) - akP_2Q] - y(r_1 + r_2)C_2 + z[dB + P_5Q + r_2(C_1 - C_2) - (1-h)T + kP_2Q] + (1-h)T + L_1 + L_2 - dB - P_5Q - C_4 + r_2C_2 \quad (5)$$

$$(C_2 - C_1)] + x(r_1 + r_2)C_2 + z[i_1(C_1 + C_3 - C_2) - i_2(C_1 - C_2)] + (i_1 - i_2)C_2 - C_5 \quad (7)$$

令:

$$f_1(x) = xz[r_1(C_1 + C_3 - C_2) - r_2(C_2 - C_1)] + x(r_1 + r_2)C_2 + z[i_1(C_1 + C_3 - C_2) - i_2(C_1 - C_2)] + (i_1 - i_2)C_2 - C_5 \quad (8)$$

$$x = \frac{-z[i_1(C_1 + C_3 - C_2) - i_2(C_1 - C_2)] - (i_1 - i_2)C_2 + C_5}{z[r_1(C_1 + C_3 - C_2) - r_2(C_2 - C_1)] + (r_1 + r_2)C_2} = x_1^* \quad (9)$$

金融机构选择绿色信贷的概率处于稳定状态须满足: $F(y) = 0$, 且 $d(F(y))/dy < 0$ 。由于 $d(f_1(x))/dx >$

0,故 $f_1(x)$ 为增函数。因此,当 $x = x_1^*$ 时, $F(y) \equiv 0$, 则所有的水平都是稳定的;当 $x < x_1^*$ 时, $f_1(x) < 0$, $d(F(y))/dy|_{y=0} < 0$, $d(F(y))/dy|_{y=1} > 0$, 则 $y = 0$ 为演化稳定状

态;当 $x > x_1^*$ 时, $f_1(x) > 0$, $d(F(y))/dy|_{y=0} > 0$, $d(F(y))/dy|_{y=1} < 0$, 则 $y = 1$ 为演化稳定状态。金融机构策略演化相位图如图3。

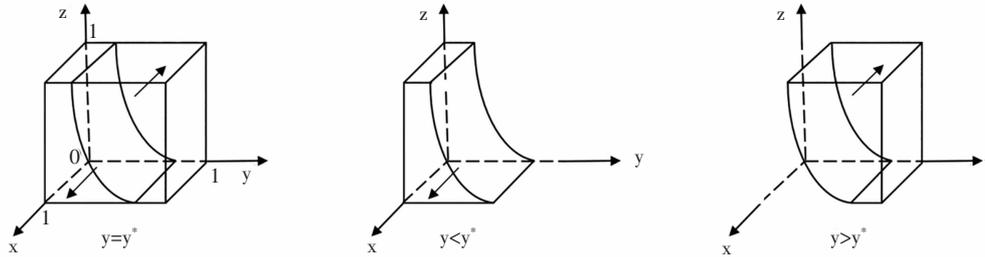


图2 政府策略演化相位图

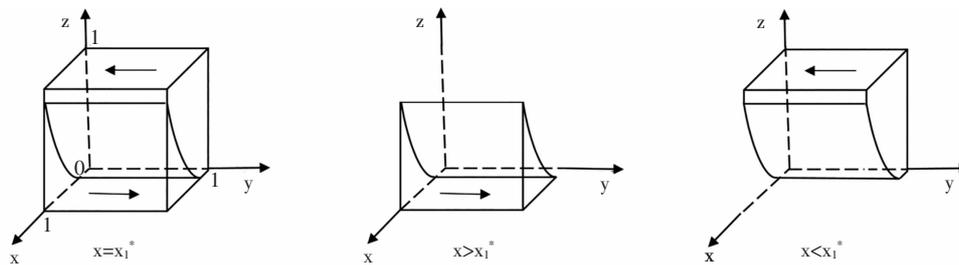


图3 金融机构策略演化相位图

3.3 制氢企业策略稳定性分析

同理制氢企业复制动态方程为:

$$F(z) = dz/dt = z(1-z) \{ xyakP_2Q - x(kP_2Q + dB + P_5Q) + y[(i_2 - i_1)(C_1 - C_2) + (1 + i_1)C_3 - akP_3Q] + P_4(G/g)^{-\epsilon}Q - P_1Q + (1 + i_2)(C_2 - C_1) \} \quad (10)$$

$$x = \frac{-y[(i_2 - i_1)(C_1 - C_2) - (1 + i_1)C_3 - akP_3Q] - P_4(G/g)^{-\epsilon}Q + P_1Q - (1 + i_2)(C_2 - C_1)}{yakP_2Q - (kP_2Q + dB + P_5Q)} = x_2^* \quad (12)$$

制氢企业选择化石能源制氢的概率处于稳定状态须满足: $F(z) = 0$, 且 $d(F(z))/dz < 0$ 。由于 $d(f_2(x))/dx < 0$, 故 $f_2(x)$ 为减函数。因此,当 $x = x_2^*$ 时, $F(z) \equiv 0$, 则所有的水平都是稳定的;当 $x < x_2^*$ 时, $f_2(x) > 0$, $d(F(z))/dz|_{z=0} > 0$, $d(F(z))/dz|_{z=1} < 0$, 则 $z = 1$ 为演化稳定状态;当 $x > x_2^*$ 时, $f_2(x) < 0$, $d(F(z))/dz|_{z=0} < 0$, $d(F(z))/dz|_{z=1} > 0$, 则 $z = 0$ 为演化稳定状态。制氢企业策略演化相位图如图4。

令:

$$f_2(x) = xyakP_2Q - x(kP_2Q + dB + P_5Q) + y[(i_2 - i_1)(C_1 - C_2) - (1 + i_1)C_3 - akP_3Q] + P_4(G/g)^{-\epsilon}Q - P_1Q + (1 + i_2)(C_2 - C_1) \quad (11)$$

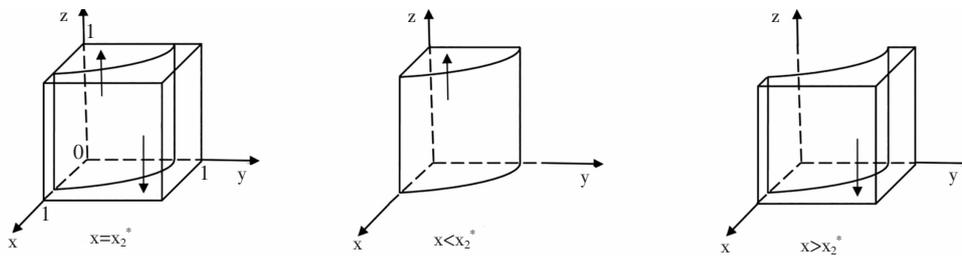


图4 制氢企业策略演化相位图

3.4 三方博弈系统均衡点分析

该博弈系统必然存在三个主体采纳纯策略的8个均衡点($E_1 \sim E_8$)和1个混合策略的均衡点 E_9 。只有当均衡点是纯策略纳什均衡时,它才能成为渐进稳定的均衡点,而 E_9 是混合策略纳什均衡,故 E_9 不是渐进稳定的均衡点^[38,43]。依次将 $E_1 \sim E_8$ 带入雅可比矩阵(篇幅原因,省略)可得对应特征值,如表2。

由表2可知,当特征值满足一定条件时,制氢企业

绿色转型将经历三个阶段。

(1) 灰氢主导阶段:处于均衡点 $E_6(1,0,1)$ 时,政府不监管导致的环境损失和被处罚成本大于监管时的成本,政府执行监管策略;由于政府对绿色信贷的奖励利率和常规信贷的惩罚利率均较低,且常规信贷利率高于绿色信贷利率,导致常规信贷收益大于绿色信贷收益,即 $(i_1 + r_1)(C_1 + C_3) - C_5 < (i_2 - r_2)C_1$, 金融机构选择常规信贷策略;由于补贴力度、碳价格和技术成熟度均较

表2 三方博弈系统特征值

均衡点	特征值			符号
	λ_1	λ_2	λ_3	
$E_1(0,0,0)$	$(i_1 - i_2)C_2 - C_5$	$L_1 + L_2 - C_4 - Bd - P_5Q + r_2C_2 + (1-h)T$	$(1+i_2)(C_2 - C_1) - P_1Q + P_4(G/g)^{-e}Q$	$(-,s,+)$
$E_2(1,0,0)$	$C_4 + Bd + P_5Q - L_1 - L_2 - r_2C_2 - (1-h)T$	$(i_1 - i_2 + r_1 + r_2)C_2 - C_5$	$(1+i_2)(C_2 - C_1) - P_1Q - Bd - P_5Q + P_4(G/g)^{-e}Q - kP_2Q$	(s,s,s)
$E_3(0,1,0)$	$C_5 + (i_2 - i_1)C_2$	$L_1 + L_2 - C_4 - Bd - P_5Q - r_1C_2 + (1-h)T$	$(1+i_1)(C_2 - C_1 - C_3) - P_1Q - akP_3Q + P_4(G/g)^{-e}Q$	$(+,s,s)$
$E_4(0,0,1)$	$L_1 + L_2 - C_4 + r_2C_1 + kP_2Q$	$(i_1 - i_2)C_1 - C_5 + i_1C_3$	$(1+i_2)(C_1 - C_2) + P_1Q - P_4(G/g)^{-e}Q$	$(+,-,-)$
$E_5(1,1,0)$	$C_4 + Bd + P_5Q + r_1C_2 - L_1 - L_2 - (1-h)T$	$C_5 + (i_2 - i_1 - r_1 - r_2)C_2$	$(1+i_1)(C_2 - C_1 - C_3) - P_1Q - Bd - P_5Q + P_4(G/g)^{-e}Q - (1-a)kP_2Q - akP_3Q$	(s,s,s)
$E_6(1,0,1)$	$C_4 - L_1 - L_2 - r_2C_1 - kP_2Q$	$(i_1 - i_2 + r_1 + r_2)C_1 + (i_1 + r_1)C_3 - C_5$	$(1+i_2)(C_1 - C_2) + P_1Q + Bd + P_5Q - P_4(G/g)^{-e}Q + kP_2Q$	$(-,s,s)$
$E_7(0,1,1)$	$L_1 + L_2 - C_4 - r_1(C_1 + C_3) + (1-a)kP_2Q$	$C_5 + (i_2 - i_1)C_1 - i_1C_3$	$(1+i_1)(C_1 - C_2 + C_3) + P_1Q + akP_3Q - P_4(G/g)^{-e}Q$	$(s,s,-)$
$E_8(1,1,1)$	$C_4 + r_1(C_1 + C_3) - L_1 - L_2 - (1-a)kP_2Q$	$C_5 + (i_2 - i_1 - r_1 - r_2)C_1 - (i_1 + r_1)C_3$	$(1+i_1)(C_1 - C_2 + C_3) + P_1Q + Bd + P_5Q - P_4(G/g)^{-e}Q + (1-a)P_2Qk + akP_3Q$	(s,s,s)

注：+、-和s分别表示符号为正、负和不确定

低,导致可再生能源制氢成本大于化石能源制氢成本,即 $(1+i_2)C_1 + P_1Q + kP_2Q < P_4(G/g)^{-e}Q - Bd - P_5Q + (1+i_2)C_2$,制氢企业选择化石能源制氢策略。

(2)灰氢向蓝氢过渡阶段:该阶段有2个均衡点 $E_7(0,1,1)$ 和 $E_8(1,1,1)$ 。位于 E_7 时,转移支付不能弥补政府监管时的成本,导致其监管成本大于不监管成本,即 $L_2 + (1-a)kP_2Q < C_4 + r_1(C_1 + C_3) - L_1$,政府采取不监管策略;政府提供的奖惩利率以及绿色信贷要求化石能源制氢企业增加CCUS投资,使得绿色信贷收益大于常规信贷收益,即 $i_2C_1 < i_1(C_1 + C_3) - C_5$,金融机构采取绿色信贷策略;虽然化石能源制氢企业增加了CCUS技术,但其总成本仍小于可再生能源制氢总成本,制氢企业选择化石能源制氢并结合CCUS技术,生产蓝氢。 $E_8(1,1,1)$ 与 $E_7(0,1,1)$ 的区别是:政府得到的转移支付能够弥补监管时的成本,使得政府监管成本小于不监管成本,政府选择监管策略。

(3)绿氢主导阶段:该阶段有2个均衡点 $E_2(1,0,0)$ 和 $E_5(1,1,0)$ 。处于 $E_2(1,0,0)$ 时,政府监管收益(转移支付、额外税收和常规信贷的处罚)减去对可再生

能源制氢企业的补贴和监管成本后,仍大于不监管收益,即 $hT - L_2 < L_1 + T + r_2C_2 - C_4 - Bd - P_5Q$,政府采取监管策略;实施常规信贷虽然会被处罚,但常规信贷的高利率收益能够弥补处罚成本,即 $(i_1 + r_1)C_2 - C_5 < (i_2 - r_2)C_2$,金融机构实施常规信贷策略;在政府补贴、碳价格和技术进步影响下,可再生能源制氢成本小于化石能源制氢成本,即 $(1+i_2)C_2 + P_4(G/g)^{-e}Q - Bd - P_5Q < (1+i_2)C_1 + P_1Q + kP_2Q$,制氢企业选择可再生能源制氢策略。 $E_5(1,1,0)$ 和 $E_2(1,0,0)$ 的区别是政府提供的奖惩利率能够使得金融机构提供绿色信贷的收益大于提供常规信贷的收益,金融机构选择提供绿色信贷策略。

4 系统动力学仿真

4.1 系统动力学模型

基于复制动态方程,利用AnyLogic仿真软件构建政府、金融机构和制氢企业演化博弈的SD模型,如图5。模型参数设置主要参考碳排放交易网、中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)、制氢示范项目报告、地方氢能政策和参考文献^[15,16,31,34,35,38],如表3。

表3 相关参数取值

符号	数值	单位	符号	数值	单位	符号	数值	单位
T	3	亿元	C_4	0.6	亿元	g	0.5	GW
h	0.8	-	C_5	0.1	亿元	G	1	GW
L_1	6	亿元	i_1	0.03	-	B	8	亿元
L_2	3	亿元	i_2	0.05	-	Q	0.7	亿kg
r_1	0	-	P_1	10	元/kg	k	22	kgCO ₂ /kgH ₂
r_2	0	-	P_2	0.06813	元/kg	e	0.18	-
C_1	3.05	亿元	P_3	0.73	元/kg	d	0.1	-
C_2	8	亿元	P_4	38	元/kg	a	0.806	-
C_3	1.52	亿元	P_5	10	元/kg			

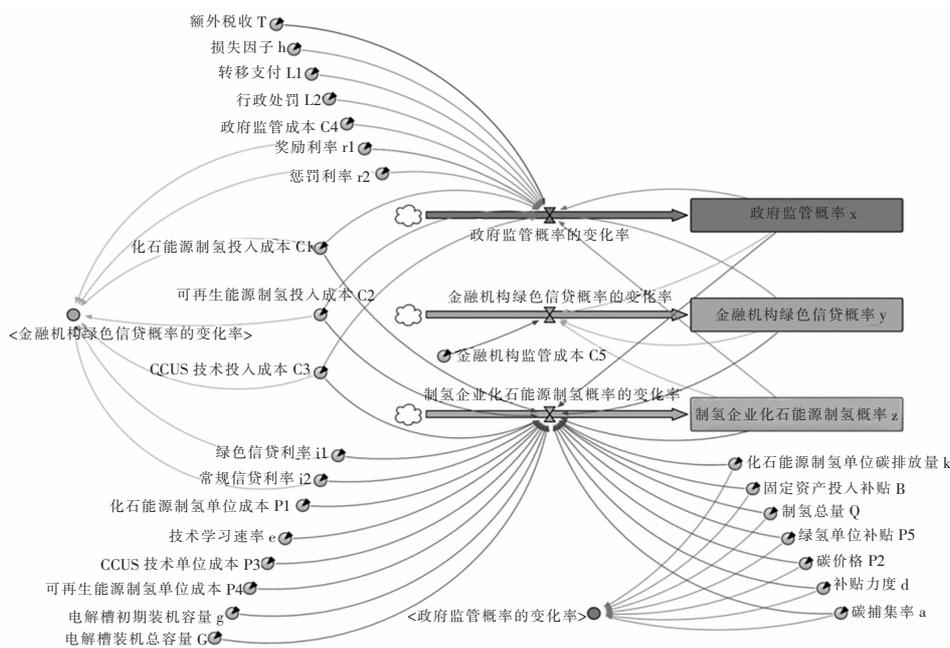


图5 政府-金融机构-制氢企业演化博弈的SD模型

4.2 基准情景仿真

基准情景仿真结果如图6, 博弈系统最终演化至均衡点 $E_6(1,0,1)$ 。具体来说, 当前情况下政府监管收益大于不监管的收益, 政府选择监管策略; 在绿色信贷和常规信贷的奖惩利率为0的情况下, 常规信贷的高收益率使得绿色信贷收益小于常规信贷收益, 金融机构选择常规信贷策略; 虽然在政府环境规制下, 化石能源制氢企业需承担碳排放成本, 但由于当前碳价格较低, 且可再生能源制氢技术成熟度偏低和政府补贴力度不足, 导致化石能源制氢总成本小于可再生能源制氢总成本, 制氢企业选择化石能源制氢策略。

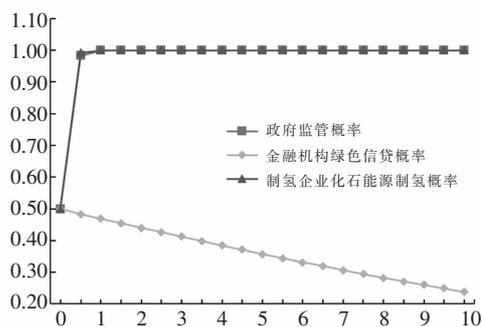


图6 基准情景仿真结果

4.3 绿色信贷政策的影响

博弈系统从均衡点 $E_6(1,0,1)$ 演化至 $E_8(1,1,1)$, 则需满足金融机构提供绿色信贷的渐进稳定条件: $(i_2 - r_2)C_1 < (i_1 + r_1)(C_1 + C_3) - C_5$, 奖惩利率和贷款利率成为调控金融机构策略从常规信贷收敛至绿色信贷的政策工具。

取1%和3%对应政府对金融机构提供绿色信贷的

低利率和高利率奖励以及对提供常规信贷的低利率和高利率处罚, 仿真结果如图7。“低-低”奖惩利率组合只能延缓金融机构决策收敛至常规信贷策略, 并不能改变其最终策略, “高-低”“低-高”和“高-高”奖惩利率组合能使得金融机构绿色信贷收益大于常规信贷收益, 金融机构决策收敛至绿色信贷策略。同时还发现当政府提高对绿色信贷的奖励利率和对常规信贷的惩罚利率相同时, 奖励措施更能促进金融机构策略向绿色信贷策略收敛。该部分结论与文献^[40]的研究一致, 当常规项目收益与绿色项目收益差距较大时, 需加大奖惩力度才能促使更多银行实施绿色信贷。

将绿色信贷利率和常规信贷利率上下波动1个百分点带入模型仿真, 探讨贷款利率变化对博弈系统稳定性的影响, 结果如图8所示。一方面, 绿色信贷利率降低和常规信贷利率的提高均不能影响制氢企业绿色转型决策, 反而会使得金融机构决策加速收敛到常规信贷策略; 另一方面, 绿色信贷利率提高和常规信贷利率降低, 虽然能够减缓金融机构选择常规信贷的速率, 但却无法影响金融机构最终策略。该部分关于绿色信贷无法影响制氢企业最终决策的结论与文献^[38,40]结论不同, 他们的研究认为绿色信贷能够影响企业最终绿色技术创新决策。原因是他们的成本仅考虑了绿色技术与传统技术的投入成本, 没有考虑不同技术应用后不同的生产成本, 而本文考虑了生产成本, 且信贷政策仅针对企业前期固定资产投入。但本文的结论与文献^[41]结论类似, 即绿色信贷政策对企业绿色低碳技术研发具有一定的激励作用, 但无法影响到企业最终的绿色低碳技术研发策略抉择。

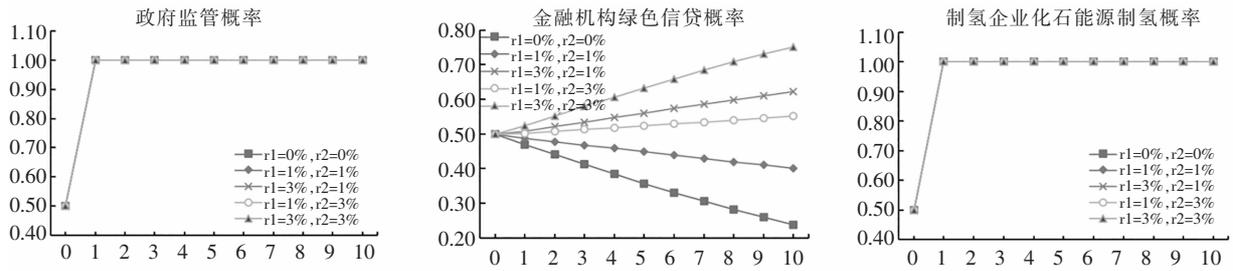


图7 奖惩利率对博弈系统稳定性的影响

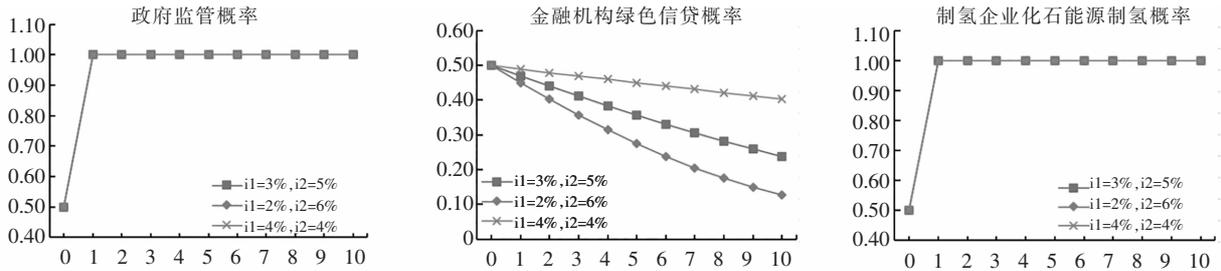


图8 贷款利率对博弈系统稳定性的影响

4.4 环境规制政策的影响

博弈系统从均衡点 $E_8(1,1,1)$ 演化至 $E_5(1,1,0)$ ，制氢企业选择可再生能源制氢策略需满足渐进稳定条件： $(1+i_1)C_2 + P_4(G/g)^{-\alpha}Q - Bd - P_5Q < (1+i_1)(C_1 + C_3) + (1-a)kP_2Q + akP_3Q$ ，以保证可再生能源制氢总成本小于化石能源制氢总成本。从模型设计的政策工具看，固定资产投资补贴、绿氢单位补贴和碳价格成为调控博弈系统演化至均衡点 E_5 的政策组合。在上节分析的基础上，为了保证金融机构始终提供绿色信贷，

以下仿真时 r_1 和 r_2 均取 3%。

4.4.1 固定资产补贴力度仿真

逐渐提高政府对可再生能源制氢固定资产投资的补贴力度，仿真结果见图9。随着固定资产投资补贴力度的增大，制氢企业趋向于化石能源制氢的速度轻微变缓，但制氢企业始终选择化石能源制氢策略。原因是固定资产投资补贴力度的增加仅起到降低可再生能源制氢的总成本的效果，不能使得可再生能源制氢的总成本小于化石能源制氢的总成本，博弈系统保持稳定。

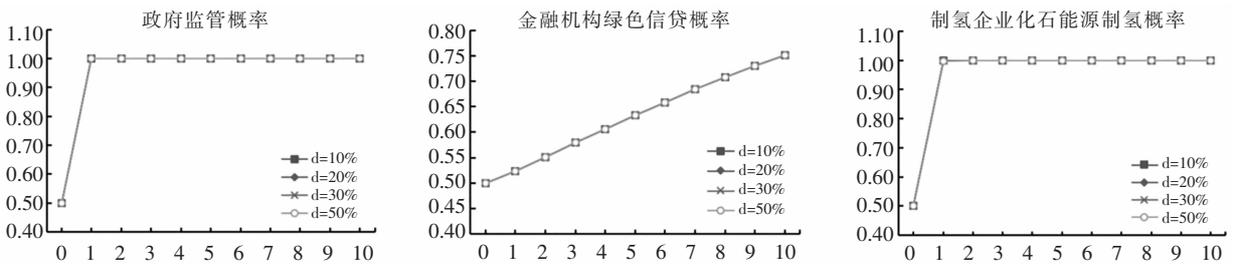


图9 补贴力度对博弈系统稳定性的影响

4.4.2 绿氢单位补贴仿真

保持其他参数不变，政府逐渐提高绿氢单位补贴，结果如图10。当绿氢单位补贴达到16元/kg时，制氢企业从化石能源制氢转变为可再生能源制氢（在仿真时长45年左右开始转变），且随着绿氢单位补贴的继续提高，制氢企业转变为可再生能源制氢时间提前。然而当绿氢单位补贴达到21元/kg时，博弈系统将不再稳定，政府将从监管转为不监管，制氢企业从可再生能源制氢转变为化石能源制氢，然后重复波动。原因是当绿氢单位补贴超过某一阈值时，中央政府的转移支付和额外税收不能弥补政府对可再生能源制氢的补贴成本，导致

政府监管收益小于不监管收益，政府选择不监管策略。政府不监管时，可再生能源制氢不能享受补贴，由于技术成熟度和碳价格均较低，导致可再生能源制氢成本大于化石能源制氢，制氢企业从而又转变为化石能源制氢。由于政府不监管时需要承担化石能源制氢碳排放造成的环境损失成本和被行政处罚，导致政府不监管成本大于监管成本，政府又转变为监管策略，如此循环往复。

4.4.3 碳价格仿真

保持其他参数不变，仿真分析碳价格逐渐提高对博弈系统的影响，仿真结果见图11。当碳价格从0.06813

元/kg 增加到 1 元/kg 左右时,碳价格达到阈值使得由于碳排放成本增加,导致环境规制下化石能源制氢成本大于可再生能源制氢成本,制氢企业转变为可再生能源制

氢。随着碳价格不断提高,不仅制氢企业转变为可再生能源制氢速率越来越快,而且金融机构也会更早收敛于绿色信贷策略,博弈系统更早演化至均衡点 E_5 。

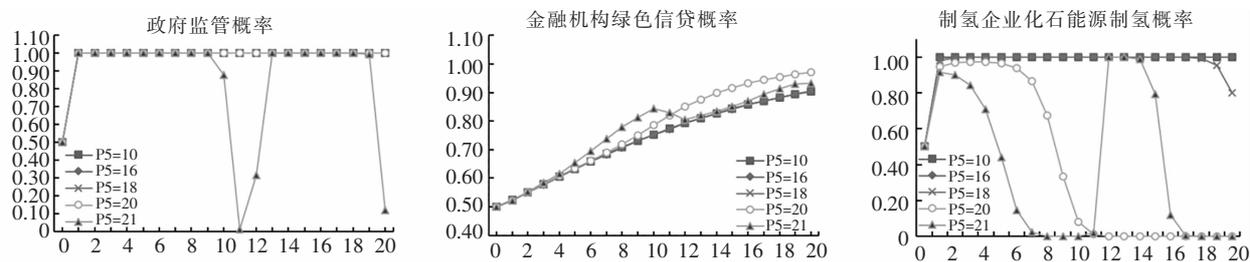


图 10 绿氢单位补贴对博弈系统稳定性的影响

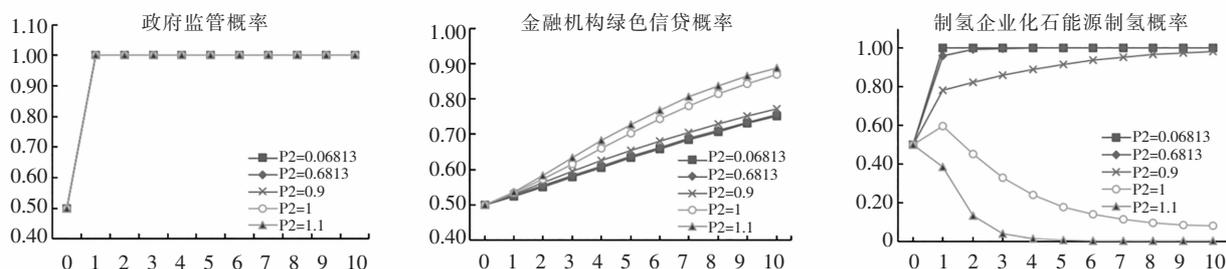


图 11 碳价格对博弈系统稳定性的影响

本文环境规制政策仿真结果与文献^[30,41]既有相似之处,也有不同的地方。相同的是他们指出绿色技术成本补贴、碳税/环境税可以实现企业绿色技术转型决策,这与本文中调控绿氢单位补贴或碳价格可以实现制氢企业绿色生产一致。不同的是政府补贴中的固定资产补贴无法影响制氢企业最终决策,且绿氢单位补贴存在上限阈值,超过该阈值则会破坏博弈系统的稳定性。

4.5 技术学习因素的影响

中国质子交换膜电解槽装机容量趋势是 2025 年为

3GW,2030 年为 10GW,2040 年为 50GW,2050 年为 180GW,2060 年为 300GW^[35]。将这几个节点的电解槽装机容量依次带入模型,探讨技术学习因素对博弈系统稳定性的影响,结果如图 12。当电解槽装机总容量为 10GW 时,制氢企业从化石能源制氢转变为可再生能源制氢。随着装机容量的增加,可再生能源制氢成本进一步降低,化石能源制氢不再具有成本优势,制氢企业收敛至可再生能源制氢的速度加快。同时,政府趋向于监管的速率减缓,金融机构趋向于绿色信贷的速率加快。

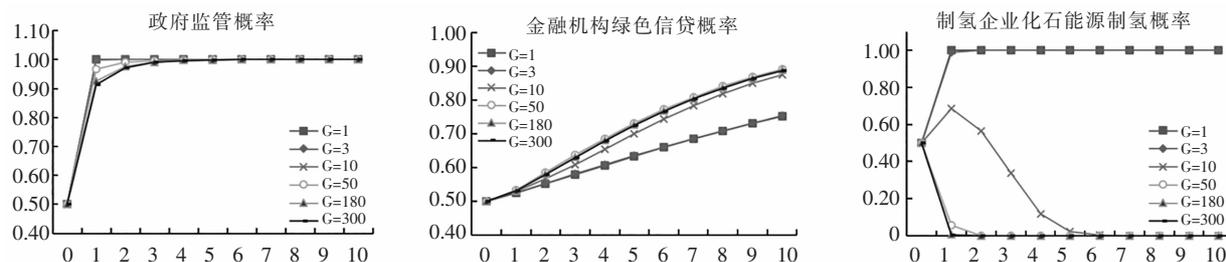


图 12 技术学习因素对博弈系统稳定性的影响

4.6 政策和技术学习组合的影响

本节探讨绿氢单位补贴、碳价格和技术学习因素三者组合对博弈系统稳定性的影响,结果如图 13。当电解槽装机总容量较低为 1GW 时,若要制氢企业从化石能源制氢转变为可再生能源制氢,则碳价格需要提高到 0.635 元/kg,且绿氢单位补贴需要同步提高到 14 元/kg。当电解槽装机容量较高为 10GW 时,若保持碳价格在 0.635 元/kg 水平,政府降低绿氢单位补贴仍能制氢企业从化石能源制氢向可再生能源制氢转变。这表

明随着可再生能源制氢技术趋于成熟,可再生能源制氢企业对政府补贴的依赖性变低,同时碳价格对促进制氢企业从化石能源制氢转向可再生能源制氢的阈值也逐渐下降。在这种情况下,即使政府补贴较少和碳价格处于较低水平,可再生能源制氢成本小于化石能源制氢成本,制氢企业选择可再生能源制氢,完成绿色转型。该部分结论表明只有在可再生能源制氢技术较为成熟或碳价格处于较高水平时,才能对绿氢生产项目实施补贴退坡政策。

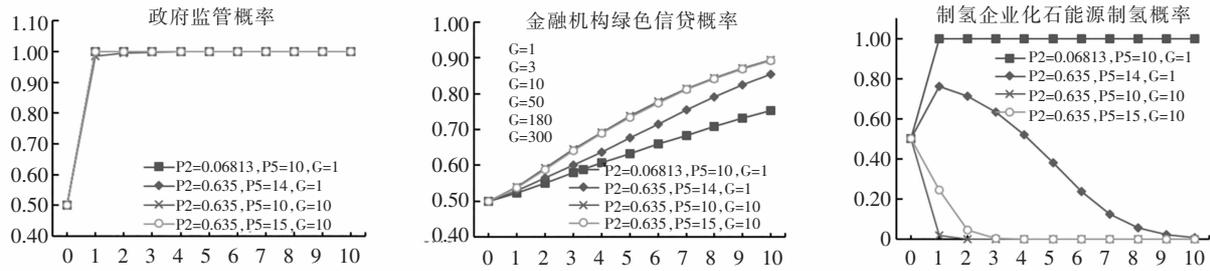


图13 政策和技术学习因素共同作用对博弈系统稳定性的影响

5 结论与建议

为了降低氢气供给结构对化石能源的依赖性和促进制氢行业绿色转型,本文基于演化博弈理论和SD方法分析了“双碳”目标下政府、金融机构和制氢企业的行为演化机制。研究表明:(1)环境规制政策中单独调控绿氢单位补贴或碳价格可以使制氢企业策略向可再生能源制氢策略转变,但绿氢单位补贴存在上限阈值,超过该阈值则会破坏博弈系统的稳定性,且固定资产投资补贴无法影响制氢企业最终决策;(2)绿色信贷无法影响制氢企业最终决策,仅能起到降低可再生能源制氢企业总成本的有限效果,且需要政府的高奖励或高惩罚利率才能促使金融机构策略向绿色信贷策略收敛;(3)技术学习因素能够使得可再生能源制氢成本小于化石能源制氢成本,从而实现制氢企业决策自主向可再生能源制氢决策转变,并在高奖励利率情况下加速金融机构决策向绿色信贷转变;(4)多因素组合仿真表明技术学习因素能够降低制氢企业对政府补贴的依赖性和碳价格有效性的门槛,且在技术水平和碳价格水平较低时不宜实施绿氢补贴退坡政策。本文可为政府对制氢行业绿色低碳发展相关政策设计和制氢企业绿色生产决策提供参考,从而促进可再生能源制氢的大规模应用。

基于以上结论提出以下建议:

(1)政府应建立符合制氢行业的碳排放核算体系与信息披露制度,并通过搭建绿氢交易平台从市场层面区分不同氢源的环境效益。同时,当前政府仍需加大绿氢生产项目的扶持力度,前期可通过成立绿氢发展专项资金、场地租金减免等方式缓解企业成本压力,后期可通过绿氢单位补贴、电费补贴等方式持续推动绿氢项目发展。

(2)金融机构一方面应主动参与制氢项目融资活动中碳排放核算与信息披露制度的建立,从而降低绿色信贷实施过程中的管理成本;另一方面,应强化气候风险意识,通过调节贷款份额、贷款利率等措施限制灰氢生产项目,促进绿氢生产项目发展。

(3)制氢企业应通过与高校、研究院等机构合作构建氢能产学研协作新模式,共同开展电解水制氢前沿技术研究,从而加速绿氢制备技术相关成果转化和应用。另外,制氢企业应与环境部门、氢溯源技术公司等机构共同编制绿氢溯源管理标准,完善绿氢及相关产品认证

标准。

本文的局限性:技术学习因素没有考虑风电装机容量增加对绿电价格影响以及CCUS技术部署规模增加导致其成本下降。其次,中央政府是氢能顶层战略及环境规制政策设计者,未来应将中央政府纳入博弈主体当中,形成四方博弈。

参考文献:

- [1] Midilli A, Ay M, Dincer I, et al. On Hydrogen and Hydrogen Energy Strategies I: Current Status and Needs [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2005, 9(3): 255 - 271.
- [2] Rissman J, Bataille C, Masanet E, et al. Technologies and Policies to Decarbonize Global Industry: Review and Assessment of Mitigation Drivers through 2070 [J]. *Applied Energy*, 2020, 266.
- [3] Balat M. Possible Methods for Hydrogen Production [J]. *Energy Sources. Part a, Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2009, 31(1): 39 - 50.
- [4] Dincer I. Renewable Energy and Sustainable Development: A Crucial Review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2000, 4(2): 157 - 175.
- [5] 何钰江, 刘会灯, 王皓宇, 等. “双碳”目标下氢能发展体系构建和产业创新布局展望 [J]. *电工电能新技术*, 2023, 42(9): 65 - 76.
- [6] Hermesmann M, Tsikliris C, Mueller T E. The Environmental Impact of Renewable Hydrogen Supply Chains: Local Vs. Remote Production and Long - Distance Hydrogen Transport [J]. *Applied Energy*, 2023, 351.
- [7] Guo L J, Zhao L, Jing D W, et al. Solar Hydrogen Production and its Development in China [J]. *Energy*, 2009, 34(9): 1073 - 1090.
- [8] 张贤, 许毛, 徐冬, 等. 中国煤制氢CCUS技术改造的碳足迹评估 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(12): 1 - 11.
- [9] Terlouw T, Bauer C, McKenna R, et al. Large - Scale Hydrogen Production Via Water Electrolysis: A Techno - Economic and Environmental Assessment [J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(9): 3583 - 3602.
- [10] 徐硕, 余碧莹. 中国氢能技术发展现状与未来展望 [J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 23(6): 1 - 12.
- [11] Zhang Q, Chen W, Ling W. Policy Optimization of Hydrogen Energy Industry Considering Government Policy Preference in China [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 33: 890 - 902.
- [12] 孟翔宇, 顾阿伦, 邬新国, 等. 中国氢能产业高质量发展前景 [J]. *科技导报*, 2020, 38(14): 77 - 93.
- [13] 孟翔宇, 陈铭韵, 顾阿伦, 等. “双碳”目标下中国氢能发展战

- 略[J]. 天然气工业, 2022,42(4):156-179.
- [14] Yang Y, Tong L, Yin S, et al. Status and Challenges of Applications and Industry Chain Technologies of Hydrogen in the Context of Carbon Neutrality[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376.
- [15] 张智, 赵苑瑾, 蔡楠. 中国氢能产业技术发展现状及未来展望[J]. 天然气工业, 2022,42(5):156-165.
- [16] 曹军文, 张文强, 李一帆, 等. 中国制氢技术的发展现状[J]. 化学进展, 2021,33(12):2215-2244.
- [17] Yates J, Daiyan R, Patterson R, et al. Techno-Economic Analysis of Hydrogen Electrolysis From Off-Grid Stand-Alone Photovoltaics Incorporating Uncertainty Analysis[J]. Cell Reports Physical Science, 2020,1(10).
- [18] Hermesmann M, Müller T E. Green, Turquoise, Blue, Or Grey? Environmentally Friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2022,90:100996.
- [19] Mueller-Langer F, Tzimas E, Kaltschmitt M, et al. Techno-Economic Assessment of Hydrogen Production Processes for the Hydrogen Economy for the Short and Medium Term[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007,32(16):3797-3810.
- [20] Zhang Q, Chen W, Ling W. Tech-Eco Efficiency Evaluation of Hydrogen Production Industry Under Carbon Dioxide Emissions Regulation in China[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,47(97):41183-41194.
- [21] Ringsgwandl L M, Schaffert J, Bruecken N, et al. Current Legislative Framework for Green Hydrogen Production by Electrolysis Plants in Germany[J]. Energies, 2022,15(5).
- [22] Droessler M, Leach A. Green with Envy? Hydrogen Production in a Carbon-Constrained World[J]. Energy Policy, 2024,186:113982.
- [23] Meng X, Gu A, Wu X, et al. Status Quo of China Hydrogen Strategy in the Field of Transportation and International Comparisons[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021,46(57):28887-28899.
- [24] Cheng C, An R, Dong K, et al. Can the Future be Bright? Evolutionary Game Analysis of Multi-Stakeholders in the Blue and Green Hydrogen Development[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024,67:294-311.
- [25] 郭凌军, 刘嫣然, 刘光富. 环境规制、绿色创新与环境污染关系实证研究[J]. 管理学报, 2022,19(6):892-900.
- [26] Michael E. Porter, Van Der Linde C. Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship[J]. Journal of Economic Perspectives, 1995,(4)(9):97-118.
- [27] 游达明, 蒋瑞琛. 我国环境规制工具对技术创新的作用——基于2005—2015年面板数据的实证研究[J]. 科技管理研究, 2018,38(15):39-45.
- [28] Wang Z, Wang N, Hu X, et al. Threshold Effects of Environmental Regulation Types On Green Investment by Heavily Polluting Enterprises[J]. Environmental Sciences Europe, 2022,34(1).
- [29] Wu Y, Hu J, Irfan M, et al. Vertical Decentralization, Environmental Regulation, and Enterprise Pollution: An Evolutionary Game Analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 349.
- [30] 陈晓红, 王钰, 李喜华. 环境规制下区域间企业绿色技术转型策略演化稳定性研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021,41(7):1732-1749.
- [31] 潘峰, 刘月, 王琳. 公众参与视角下的中央-地方-企业环境规制演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2023,32(6):104-110.
- [32] 李娅楠, 林军, 钱艳俊. 环境规制下企业绿色生产决策及技术学习因素影响研究[J]. 管理学报, 2019,16(5):721-727.
- [33] Wright T P. Factors Affecting the Cost of Airplanes[J]. J Aeronaut Sci, 1936,3:122-128.
- [34] Boehm H, Goers S, Zauner A. Estimating Future Costs of Power-to-Gas - A Component-Based Approach for Technological Learning[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019,44(59):30789-30805.
- [35] 王彦哲, 欧训民, 周胜. 基于学习曲线的中国未来制氢成本趋势研究[J]. 气候变化研究进展, 2022,18(3):283-293.
- [36] Taghizadeh-Hesary F, Li Y, Rasoulinezhad E, et al. Green Finance and the Economic Feasibility of Hydrogen Projects[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,47(58):24511-24522.
- [37] Xing L, Li J, Yu Z. Green Finance Strategies for the Zero-Carbon Mechanism: Public Spending as New Determinants of Sustainable Development[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10.
- [38] 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.
- [39] Webb J, Longden T, Boulaire F, et al. The Application of Green Finance to the Production of Blue and Green Hydrogen: A Comparative Study[J]. Renewable Energy, 2023,219.
- [40] 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:1-12.
- [41] 卞晨, 初钊鹏, 王晗. “双碳”目标下政府支持企业绿色低碳技术研发政策模拟研究[J]. 软科学, 2023,37(8):94-102.
- [42] Wu Z, Yang C, Zheng R. An Analytical Model for Enterprise Energy Behaviors Considering Carbon Trading Based On Evolutionary Game[J]. Journal of Cleaner Production, 2024,434.
- [43] Su Y, Si H, Chen J, et al. Promoting the Sustainable Development of the Recycling Market of Construction and Demolition Waste: A Stakeholder Game Perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,277.

(责任编辑:何敏)