

融资约束对碳定价政策有效性的影响研究

于兴, 范英, 金昊

(1. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学低碳治理与政策智能教育部实验室, 北京 100191)

摘要 在低碳转型过程中, 企业需要大量资金支持相关投资, 因此碳定价政策的有效性依赖于健全的金融市场。然而, 现实中金融市场存在多种阻碍资金流动的金融摩擦, 导致资本和资源无法有效配置, 这些摩擦可能影响企业的投资行为, 从而削弱碳定价政策的实施效果。本文以融资约束问题为代表, 构建了一个包含融资抵押约束机制的环境-动态随机一般均衡 (E-DSGE) 模型, 研究了融资约束问题对碳定价政策有效性的影响, 并探讨了相应的政策应对方案。研究结果表明: 1) 从环境效益角度, 融资约束削弱了碳定价政策带来的“减排效应”, 抑制了企业的低碳投资, 降低了企业的减排强度; 2) 从经济成本角度, 融资约束放大了碳定价对企业的成本影响, 限制了企业的产出增长, 增加了低碳转型的整体经济代价; 3) 将碳资产抵押贷款作为碳定价政策的配套措施, 可以有效缓解融资约束对碳定价政策的负面影响; 4) 通过数值模拟, 我们发现融资约束导致碳定价政策相关成本在企业总生产成本中的占比从年均 15.31% 上升至 19.47%, 同时使年均低碳投资规模减少约 37%。此外, 针对高碳排放企业提供更多碳资产抵押贷款可显著提高政策收益。本文结论对于健全绿色低碳发展机制, 构建系统性的气候政策体系具有重要意义。

关键词 碳定价; 金融摩擦; 绿色金融; 低碳转型

The Impact of Financing Constraints on the Effectiveness of Carbon Pricing Policy

YU Xing, FAN Ying, JIN Hao

(1. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. MOE Laboratory for Low-carbon Intelligent Governance, Beihang University, Beijing 100191, China)

收稿日期: 2024-08-07

基金项目: 国家自然科学基金 (72021001, 72003160)

Supported by National Natural Science Foundation of China (72021001, 72003160)

作者简介: 于兴, 博士研究生, 研究方向: 气候政策建模评估, E-mail: yuxing@buaa.edu.cn; 范英, 博士, 教授, 研究方向: 能源经济, E-mail: yfan1123@buaa.edu.cn; 通信作者: 金昊, 博士, 副教授, 研究方向: 宏观金融, E-mail: haojin.econ@gmail.com.

Abstract In the process of low-carbon transition, enterprises require substantial financial support for related investments. Therefore, the effectiveness of carbon pricing policies depends on a well-functioning financial market. However, in reality, financial markets face various frictions that hinder the flow of capital, leading to inefficient allocation of resources. These frictions may affect corporate investment behavior, thereby weakening the implementation effects of carbon pricing policies. This paper, focusing on the issue of financing constraints, constructs an environmental-dynamic stochastic general equilibrium (E-DSGE) model incorporating a financing collateral constraint mechanism to analyze the impact of financing constraints on the effectiveness of carbon pricing policies and explores corresponding policy responses. The results show that: 1) From the perspective of environmental benefits, financing constraints weaken the “emission reduction effect” of carbon pricing policies, suppress corporate low-carbon investments, and reduce corporate emission intensity; 2) From the perspective of economic costs, financing constraints amplify the cost impact of carbon pricing on enterprises, restrict output growth, and increase the overall economic cost of the low-carbon transition; 3) Introducing carbon asset-backed loans as a complementary measure to carbon pricing policies can effectively mitigate the negative impact of financing constraints on carbon pricing policies; 4) Numerical simulation shows that financing constraints increase the proportion of carbon pricing-related costs in enterprises’ total production costs from an average of 15.31% to 19.47% annually, while reducing the annual average scale of low-carbon investments by approximately 37%. Furthermore, providing more carbon asset-backed loans to high-emission enterprises can significantly enhance policy benefits. The conclusions of this paper are of great significance for improving mechanisms for green and low-carbon development and establishing a systematic climate policy framework.

Keywords carbon pricing; financial friction; green finance; low-carbon transition

1 引言

随着气候变化问题日益严峻, 实现经济低碳转型已经成为各国政府的共同目标. 低碳转型并非自发性的技术变革, 其转型的根本动力是为了解决经济增长与日益恶化的环境问题之间的矛盾, 因此需要政府政策和市场机制发挥激励作用 (范英和衣博文, 2021). 在实践过程中, 尽管各国政府已经广泛推行碳定价政策来促进企业转型, 但是当前的低碳投资仍由政府 and 公共部门主导, 私营企业的参与度尚未达到预期水平 (IMF, 2023).

企业在转型过程中需要大量资金以支持基础设施建设、设备升级和低碳技术研发等活动, 因此, 碳定价政策能否达到预期效果, 在很大程度上取决于金融市场的健全性. 然而, 由于信息不对称和监管成本高等问题, 现实中的金融市场存在诸多金融摩擦, 例如融资抵押约束、逆向选择、道德风险等 (Kiyotaki and Moore, 1997; Stiglitz and Weiss, 1981; Gertler and Karadi, 2011). 这些金融摩擦阻碍了资金的流动, 导致市场资源无法得到有效配置. 有大量实证研究 (例如 Yu et al., 2021; Yao et al., 2021; Bartram et al., 2022; 刘锋等, 2022) 表明, 金融摩擦会造成企业在减污降碳和绿色创新等方面的投资显著减少. 在这种情况下, 即使

碳价格信号激发了企业的低碳投资需求,融资难题仍可能迫使企业延续高碳排放的生产方式,从而削弱碳定价政策的有效性 (Campiglio, 2016). 2024 年 7 月,《中共中央关于进一步全面深化改革,推进中国式现代化的决定》指出,未来要进一步完善支持绿色低碳发展的财税、金融、投资、价格政策和标准体系,积极稳妥推进碳达峰碳中和. 因此,实现低碳转型不仅需要碳定价政策来提高企业的排放成本,还需关注金融市场流动性,并通过配套的金融政策来保障企业获得充足的转型资金. 忽略金融摩擦可能导致过于乐观的政策效果预期,影响政策制定者对于经济成本的评估和转型路径的设计.

金融摩擦具有多种形式,本文以融资约束为代表,旨在分析企业融资约束问题对于碳定价政策有效性的影响,并提出相应的绿色金融改进方案. 理论上,一个有效的碳定价政策应能够反映企业排放所产生的环境外部性成本,以最小的经济代价激励企业减排,推动低碳投资发展,从而实现既定的气候目标 (Gollier, 2024). 因此,本文从环境效益和经济成本两个维度衡量碳定价政策的有效性. 我们重点研究了以下三个关键问题: 首先,从理论角度看,融资约束通过哪些渠道影响碳定价政策的有效性? 其次,从量化角度看,融资约束对碳定价政策效果的实际影响程度有多大? 最后,作为碳定价政策的配套金融工具,碳资产抵押贷款政策能够在多大程度上缓解融资约束的影响?

在研究方法上,本文采用环境-动态随机一般均衡模型 (简称 E-DSGE) 作为分析框架,并在传统 E-DSGE 模型中引入了融资抵押约束机制 (Mendoza, 2010; Jermann and Quadrini, 2012). 已有研究表明,使用融资抵押约束机制刻画金融摩擦问题,更适合描述中国信贷市场的特征,并且有助于解释中国经济数据中的相关现象 (侯成琪和刘颖, 2015; 孟宪春等, 2020; 孟宪春和张屹山, 2021; 林东杰等, 2022). 采用 E-DSGE 模型作为分析框架的优势在于,它能够将传统的宏观经济分析框架与金融摩擦和气候变化等关键问题相结合,构建不同部门与市场之间的动态关联特征,为在金融摩擦背景下设计碳定价政策提供清晰的理论支撑和量化依据. 相比于已有研究,本文的边际贡献主要体现在以下两个方面:

第一,本文首次构建了一个包含融资抵押约束机制和异质性企业特征的 E-DSGE 模型,将理论分析与量化方法相结合,深入探讨了融资约束对碳定价政策效果的影响. 现有文献主要关注碳定价政策的自身机制设计及其他市场因素对政策效果的影响,而基于资金流动性视角的分析尚属空白. 本文通过理论分析揭示了融资约束如何通过“减排效应”和“成本效应”两条渠道影响碳定价政策的有效性. 同时,基于 E-DSGE 模型,本文对净零排放路径下融资约束对碳定价政策的具体影响进行了量化评估.

第二,本文创新性地分析了碳资产抵押贷款政策在缓解企业融资约束中的关键作用,为金融摩擦与绿色金融政策领域的研究提供了新视角. 当前研究多集中于金融部门内部摩擦如何放大碳定价政策的转型风险,并重点讨论央行货币政策和宏观审慎政策在缓解这些风险中的作用. 然而,本文从资金需求侧出发,发现企业内部融资约束问题会显著削弱碳价格信号对企业减排投资的激励效果. 因此,为确保企业实现预期的减排目标,需要进一步提高碳价格,或采用能够激励企业减排的金融工具 (如碳资产抵押贷款政策). 通过对不同政策组合的比较分析,本文发现将倾向于高碳排放企业的碳资产抵押贷款政策与碳定价政策相结合,可以实现最佳的政策收益. 这一发现为优化碳定价政策与绿色金融政策的设计提供了重要的理论依据.

本文余下内容的结构安排如下: 第二节进行相关文献综述; 第三节描述建模思路和模型设定; 第四节进行理论分析; 第五节基于中国的经济、金融和环境数据对模型参数进行校准; 第六节进行数值模拟和政策分析; 第七节总结研究结论并提出政策建议。

2 文献综述

2.1 碳定价政策有效性评估

自欧盟碳市场 (简称 EU ETS) 建立以来, 全球碳定价机制建设蓬勃发展, 国内外学者对碳定价政策的有效性进行了大量探究, 主要可以分为实证研究和理论研究两种类型。

在实证研究中, 文献主要关注已实行的碳市场政策对于环境和企业经济绩效的影响。例如, Löschel et al. (2019) 发现 EU ETS 可以有效促进德国制造业企业的减排, 尽管碳定价政策增加了企业的经济成本, 但同时促进了企业的低碳技术研发和低碳投资, 进而对经济绩效产生了正向影响。Cao et al. (2021) 和 Cao et al. (2020) 研究表明, 中国的试点碳市场政策通过限制电力生产降低了煤炭消费, 有效减少了受监管企业和地区的排放, 但也可能会造成碳排放向不受监管地区的泄露问题。

在理论研究中, 文献主要通过气候经济系统建模的方法来设计不同的碳定价政策形式, 事前评估碳定价政策对环境和经济的影响。例如, Golosov et al. (2014) 和 Baldwin et al. (2020) 基于 DSGE 模型研究了最优碳税政策的形式, 并发现最优碳税应该反映碳排放的社会成本, 通过与社会成本挂钩的碳定价水平可以达到社会福利的最大化。Fan et al. (2016) 基于跨区域 CGE 模型研究了全国性的碳市场政策对区域经济和碳减排效率的影响, 并发现全国碳市场在经济效益方面可以提高生产要素的配置效率, 缩小区域经济差距等。Gollier (2024) 基于两阶段的动态模型分析了碳定价政策应该如何基于未来的技术不确定性, 经济不确定性等未知因素进行调整, 最终实现社会福利最大化的目标。

整体而言, 现有研究通常从环境效益和经济成本两个维度来衡量碳定价政策的有效性。环境效益方面主要关注碳排放量, 企业减排强度、低碳投资等指标, 经济成本则体现在政策对企业生产成本、经济绩效以及整体社会福利的影响。这两个维度相互补充, 共同衡量碳定价政策在实现减排目标和促进经济可持续发展方面的效果。

2.2 碳定价政策有效性的影响因素分析

通过梳理现有研究, 可以将影响碳定价政策有效性的因素归为两类:

第一, 碳定价政策的有效性受到其自身机制设计的影响。例如, Fischer and Springborn (2011) 对比了碳排放总量限制, 碳排放强度限制和碳税三种碳定价政策形式, 发现基于碳排放强度的政策能够带来额外的经济收益。Heutel (2012) 和 Angelopoulos et al. (2013) 则指出, 无论是碳市场还是碳税政策, 通过顺周期调节碳定价水平, 可以有效降低企业的经济成本, 在经济下行期间刺激实体经济发展, 产生更高的社会福利。丁冠群等 (2022) 发现, 基于总量的碳市场可以有效减少覆盖行业的碳排放, 但是未覆盖行业的碳排放会显著增加, 而碳税政策则不会造成明显的环境效益差异。此外, 岳童和童健 (2024) 研究发现协同实施碳市场和碳税政策可以减少经济成本, 提升政策效果。

第二, 碳定价政策的有效性受到其它市场形式和外部性问题的影响。例如, Annicchiarico and Di Dio (2015) 发现, 货币价格粘性会显著影响碳定价政策的效果: 当价格粘性较高时, 基于总量的碳市场政策带来的社会福利更高, 当粘性较低时碳税政策的福利收益更高。Anouliès (2017) 指出, 碳定价政策会影响到企业的进入和退出市场决策, 进而改变市场结构, 因此在设计碳定价机制时需要考虑其对经济生产效率的影响。Gibson and Heutel (2023) 和 Shapiro and Metcalf (2023) 两篇研究表明, 碳定价政策会增加摩擦性劳动力市场中的失业率, 产生额外的转型经济成本, 但同时也能够促进绿色技术进步和绿色企业创建, 产生额外的经济收益。Cui et al. (2023) 发现电力市场的不同形式也会影响碳定价政策的环境和经济影响, 结果表明区域一体化的电力市场可以减少高达 60% 的减排成本, 但同时可能引发潜在的公平问题。

2.3 金融摩擦与绿色金融政策

近年来, 金融摩擦问题对碳定价政策效果的影响逐渐受到关注。例如, Carattini et al. (2023) 构建了一个包含资金供给侧金融摩擦机制的 E-DSGE 模型, 发现金融摩擦会增加企业融资溢价, 放大碳定价政策对于实体经济的冲击, 并破坏金融系统的稳定性。基于同样的金融摩擦机制模型, Diluiso et al. (2021) 发现逐步有序地推进碳定价政策不会产生较大的转型风险。而推迟实行碳定价政策则会对金融系统造成较大的冲击。此外, 王博和徐飘洋 (2021); 陈国进等 (2023) 也发现资金供给侧的金融摩擦问题会加剧碳定价政策带来的转型风险。

针对上述问题, 相关研究提出了不同类型的政策解决方案以缓解金融摩擦的影响。例如, Carattini et al. (2023) 建议通过宏观审慎政策 (向银行资产征税) 和碳定价政策相结合的方式改善金融机构的资产负债表状况, 减少转型风险。Diluiso et al. (2021) 则提出央行货币政策也可以有效缓解金融摩擦影响。陈国进等 (2023) 研究结果表明碳定价政策和绿色再贷款政策结合实施既可以促进绿色企业增长, 又可以减少系统性的金融风险, 这两种政策工具配合宏观审慎政策可以产生更佳的政策效果。王博和徐飘洋 (2021) 同样发现碳定价政策需要和双支柱政策协同实施以减少转型风险。此外, 王明喜等 (2023); 刘翼和魏云捷 (2023) 等实证研究也表明绿色金融政策能够与碳定价政策形成协同效应, 实现更好的政策效果。

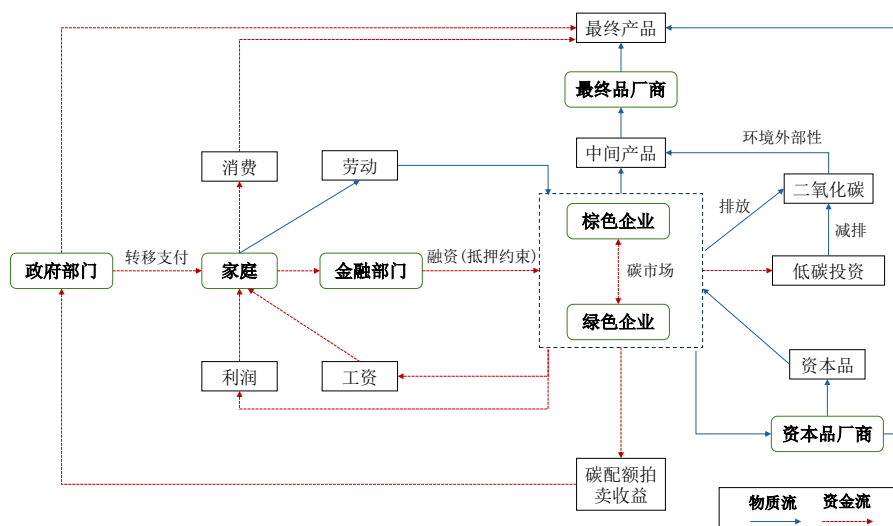
通过梳理现有文献, 我们发现当前研究主要聚焦于碳定价的机制设计, 或探讨货币价格粘性、劳动力市场摩擦、电力市场一体化等其他市场因素对碳定价政策的影响, 而基于资金流动性视角的分析相对有限。尽管部分文献已探讨了金融摩擦与碳定价政策的关系, 但这些研究的重点多集中于金融部门内部摩擦, 侧重于分析此类金融摩擦如何放大碳定价政策的经济冲击和金融转型风险, 未关注到企业内部的融资约束问题影响, 并且其研究方法以数值模拟为主, 缺乏深层次的理论支撑。

在绿色金融政策相关文献中, 现有研究多关注央行货币政策和宏观审慎政策的作用, 这些政策的主要目标是降低金融转型风险和促进绿色企业增长。然而, 对如何有效推动高碳排放企业实现转型的分析仍显不足。实际上, 高碳排放企业在转型过程中面临巨大的投资需求, 因此, 利用金融工具解决企业融资约束问题, 激励高碳排放企业减排, 对于确保气候目标的顺利实现具有重要意义。

3 理论模型

本文的模型框架如图 1 所示. 模型中的经济主体包括代表性家庭, 异质性企业 (中间品厂商), 金融部门, 最终品厂商, 资本品厂商和政府. 家庭向企业提供劳动力, 资本品厂商向企业提供生产资本, 金融部门负责实现家庭和企业之间的资金融通, 政府部门设定碳排放目标并实现税收转移支付功能.

根据碳排放强度的异质性, 中间品厂商被分为高碳排放的棕色企业和低碳排放的绿色企业. 企业生产过程中排放的二氧化碳会在环境中逐渐累积, 并对企业的生产率产生负面影响, 造成环境外部性损失. 在基于总量的碳市场定价政策下, 企业可以选择购买碳配额以满足排放总量要求, 或者通过自主减排来减少碳配额的需求量. 与大多数综合评估模型中的假设一样, 本文模型中的自主减排是一个广义的概念, 涵盖了企业为减少碳排放而进行的基础设施建设、设备改造、能源替代和节能低碳技术研发等一系列活动, 本文将企业为自主减排而付出的成本定义为低碳投资. 接下来, 本文将详细介绍模型中不同经济主体的决策目标和约束条件, 以刻画整个经济-环境系统的动态一般均衡关系.



注: 图中虚线箭头表示资金的流动, 实线箭头表示物质的流动, 圆角矩形框代表不同的部门, 直角矩形框代表不同的流动要素.

图 1 环境-动态一般均衡模型框架

3.1 最终品厂商

最终品厂商以利润最大化为目标, 根据产品价格来选择中间品的投入数量, 其目标函数可以表示为:

$$\max_{Y_t^i} p_t Y_t - \sum_{i \in \{B, G\}} p_t^i Y_t^i, \quad (1)$$

其中, $i = \{B, G\}$ 分别表示棕色企业和绿色企业 (下同), p_t^i 表示中间品产品 Y_t^i 的价格, 最终产品 Y_t 由两种中间品按照 CES 函数形式加总得到.

3.2 中间品厂商

中间品企业的目标是实现企业全生命周期利润 V^i 的最大化, 企业需要决策的变量包括劳动力需求 n_t^i , 资本需求 k_{t+1}^i , 债券融资 b_{t+1}^i 和减排强度 a_t^i , 目标函数可以表示成如下形式:

$$V^i(k_t^i, b_t^i) = \max_{n_t^i, k_{t+1}^i, b_{t+1}^i, a_t^i} d_t^i + \beta' E \frac{U_{c,t+1}}{U_{c,t}} V^i(k_{t+1}^i, b_{t+1}^i), \quad (2)$$

其中, $\beta' > 0$ 表示企业家的时间偏好. 与此同时, 企业 i 在决策过程中面临如下预算约束:

$$(1 - \delta_k^i) q_t^i k_t^i + p_t^i Y_t^i + \frac{b_{t+1}^i}{1 + r_t} = q_t^i k_{t+1}^i + w_t^i n_t^i + b_t^i + d_t^i + p_{e,t}(E_t^i - A_t^i \text{Cap}_t) + Z_t^i. \quad (3)$$

式 (3) 左侧表示企业收入, 右侧表示企业支出. 其中, δ_k^i 表示资本折旧率, q_t^i 表示资产价格, r_t 表示债券利率, w_t^i 表示工资率, d_t^i 表示企业的利润.

预算约束右侧的最后两项与环境相关, 其中, $p_{e,t}$ 表示碳配额的价格, E_t^i 表示企业生产过程中所产生的碳排放, Cap_t 表示碳市场规定的排放总量限额, A_t^i 表示企业每期可以获得的免费碳配额比例, $p_{e,t}(E_t^i - A_t^i \text{Cap}_t)$ 表示企业需要额外购买的碳配额成本. 此外, Z_t^i 表示企业的低碳投资总量, 又称为自主减排成本, 其表达式为:

$$Z_t^i = f(a_t^i) Y_t^i, \quad (4)$$

其中, a_t^i 表示企业 i 的碳减排强度, $f(a_t^i) = \theta_1 (a_t^i)^{\theta_2}$ 表示企业单位产出的减排成本. 单位减排成本的一阶导数 $f'(a_t^i) > 0$ 代表企业的减排成本随减排强度递增, 同时二阶导数 $f''(a_t^i) > 0$ 代表企业的边际减排成本也随减排强度递增. 由此可以看出, 企业低碳投资总量一方面与减排强度密切相关, 另一方面也受到整体经济规模的影响, 这是因为减排通常需要大量的资源投入, 这些资源的可获得性以及经济成本与经济发展规模密切相关 (Nordhaus, 2018).

3.3 资本品厂商

经济体中存在两种独立的资本品厂商, 分别对应于两种不同类型的资本 (棕色资本和绿色资本). 资本品厂商 i 通过决策投资量来最大化自己的总收益:

$$\max_{I_t^i} E_0 \sum_{t=0}^{\infty} M_{0,t} [q_t^i I_t^i - O_t^i I_t^i], \quad (5)$$

其中, $M_{0,t}$ 表示资本品厂商的随机贴现因子, $I_t^i = k_{t+1}^i - (1 - \delta_k^i) k_t^i$ 为资本累积方程. 厂商在投资过程中存在一个二次形式的边际调整成本 O_t^i , 其表达式为 $O_t^i = 1 + \frac{\phi^i}{2} (\frac{I_t^i}{I_{t-1}^i} - 1)^2$, 其中 $\phi^i \geq 0$ 控制调整成本的大小.

3.4 代表性家庭

经济中存在一个代表性家庭, 在 t 期通过选择消费 C_t , 提供劳动 n_t^i , 购买企业债券 b_{t+1} 和储蓄 s_t 来最大化家庭的终身效用 $U(C_t, n_t^i)$:

$$\max_{C_t, n_t^i, b_{t+1}, s_t} E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{1}{1 - \eta} \left(C_t - \bar{\omega} [(n_t^B)^{1+\rho_L} + (n_t^G)^{1+\rho_L}]^{\frac{1+\gamma}{1+\rho_L}} / (1 + \gamma) \right)^{1-\eta}, \quad (6)$$

其中, $\beta > 0$ 表示消费者的时间偏好, η 为风险厌恶系数, ρ_L 为跨部门的劳动替代率, γ 为劳动的跨期替代弹性. 代表性家庭的效用函数与当期消费呈正相关, 与其提供的劳动负相关. 同时, 消费者面临着如下形式的预算约束:

$$C_t + \frac{b_{t+1}}{1+r_t} + s_t = w_t^B n_t^B + w_t^G n_t^G + b_t + d_t + R_t^s s_t + T_t, \quad (7)$$

其中, R_t^s 表示储蓄利率, d_t 表示两类企业总利润的转移支付, T_t 表示政府部门的转移支付. 从预算约束可以看出, 家庭通过向企业提供劳动获取工资报酬, 通过投资债券和储蓄获取利息, 并且能够获得企业和政府部门的转移支付, 这些收益将用来进行消费和下一期投资.

3.5 金融部门

金融部门作为专业的资金融通中介, 通过吸收家庭存款和向企业放贷实现资金的流转. 根据 Mendoza (2010) 和 Jermann and Quadrini (2012), 我们假设企业在获得产出收益之前需要通过向银行贷款来支撑其期内的各类支出, 在本文中, 企业在获得产出收益之前的支出主要包括提前支付的工资和低碳减排投资两类, 而购买碳配额的支出则需要在期末核定生产排放量之后发生. 因此, 企业所需要的贷款为:

$$\text{loan}_t^i = w_t^i n_t^i + Z_t^i. \quad (8)$$

由于金融机构的执行能力有限, 当企业发生债务违约时, 金融机构只有一定的概率能够收回贷款, 我们设定其收回实物资本价值的概率为 ξ , 只有当金融机构预期能够收回的实物资本价值等于或高于贷款金额时, 才会向企业发放贷款, 由此, 贷款需要遵循如下的抵押约束机制:

$$\xi(q_t^i k_{t+1}^i - b_{t+1}^i / (1+r_t)) \geq \text{loan}_t^i, \quad (9)$$

其中, 方程左侧括号内的两项表示企业的净资产价值, 即企业的实物资本价值减去企业需要偿还的其他债务, 右侧则表示企业能够从金融机构获得的贷款数量. 该抵押约束方程表明, 金融机构向企业提供的贷款价值不能超过企业净资产的期望回收价值. 抵押约束机制类似于一种带有保证金条款的合同, 该条款要求借款人在签订合同时交出对抵押资产的控制权, 并赋予债权人在其市场价值低于合同价值时出售抵押资产的权力, 从而确保金融机构能够规避企业的债务违约风险. 然而, 该约束方程同时限制了企业能够获得的信贷供给数量, 使企业难以达到最优的生产和投资水平.

我们在政策讨论部分分析了碳资产抵押贷款政策的效果. 当企业能够通过抵押碳资产获得相应贷款时, 其面临的抵押约束将改写成如下形式:

$$p_{e,t} \vartheta_t^i (A_t^i \text{Cap}_t + \text{Abatement}_t^i) + \xi(q_t^i k_{t+1}^i - b_{t+1}^i / (1+r_t)) \geq \text{loan}_t^i. \quad (10)$$

式 (10) 中第一项表示企业的碳资产价值, 包括免费配额和自愿减排量两部分, 其中, ϑ_t^i 表示碳资产的抵押比率, $A_t^i \text{Cap}_t$ 表示企业获得的免费配额, $\text{Abatement}_t^i = a_t^i e^i Y_t^i$ 表示企业的自愿减排量. 通过式 (10) 可以看出, 当企业能够获得一定数量的碳抵押贷款时, 将使得融资约束方程的左侧增大, 不等式约束放松, 融资约束会有所放宽.

3.6 环境模块

本文参照 Nordhaus (2018) 在 DICE 模型中的建模思路, 刻画环境与经济的动态循环反馈机制. 首先, 企业在生产过程中产生的碳排放 E_t^i 与产出水平和排放强度直接相关, 其表达式为:

$$E_t^i = (1 - a_t^i)e^i Y_t^i, \quad (11)$$

其中, e^i 表示单位产出的碳排放因子. 产生的碳排放将储存于大气当中, 碳排放累积的动态变化由以下方程表示:

$$X_{t+1} = \delta_x X_t + E_t^B + E_t^G + e^{\text{row}}, \quad (12)$$

其中, X_t 表示 t 时刻空气中的 CO_2 存量, δ_x 表示 CO_2 在大气中的衰减速率, e^{row} 表示其他国家的碳排放, 我们假设其他国家与中国采取同等力度的减排措施, 即 e^{row} 始终与国内排放保持相同的比例关系. 碳排放的累积会形成温室效应, 引发气候灾害, 对经济活动产生负面影响. 为刻画这一环境外部性, 我们假设中间品的全要素生产率受到碳排放影响, 其生产函数为:

$$Y_t^i = [1 - D(X_t)](k_t^i)^{\alpha^i}(n_t^i)^{1-\alpha^i}, \quad (13)$$

其中, $D(X_t)$ 是与碳存量相关的效率损失函数, 参照 Carattini et al. (2023) 的设定, 效率损失函数的具体表达形式为 $D(X_t) = d_0 + d_1 X_t + d_2 X_t^2$.

3.7 政府部门

政府根据气候目标来设定碳排放总量的上限 Cap_t , 并进行配额拍卖以及配额拍卖收益的转移支付. 具体而言, 企业的碳排放需要满足如下形式的数量约束:

$$E_t^B + E_t^G \leq \text{Cap}_t. \quad (14)$$

假设碳配额的上限总是小于企业在正常经营生产状态下的排放总量, 这意味着基于总量限制的碳定价政策会对企业排放产生约束, 因此式 (14) 的约束条件总是处于收紧状态. 在这种情况下, 碳排放的累积方程可以改写成 $X_t = \delta_x X_{t-1} + \text{Cap}_t + e^{\text{row}}$, 从而使碳配额总量与损失函数 $D(X_t)$ 呈正相关关系. 在给定排放上限后, 企业根据自身排放情况进行碳配额的交易, 形成内生的碳市场价格 $p_{e,t}$. 我们假设政府将免费配额以外的配额进行拍卖, 并把所获得的收入转移给家庭部门, 其转移支付公式为:

$$T_t = \text{Cap}_t(1 - A_t^G - A_t^B)p_{e,t}. \quad (15)$$

最终, 模型中的产品市场, 金融市场和碳市场均达到出清的条件, 不同部门在供求决策过程中形成了内生的市场价格, 构成竞争性均衡关系. 模型总共由 36 个方程构成, 需要求解的变量包括: $\{w_t^i, n_t^i, k_{t+1}^i, b_{t+1}^i, d_t^i, a_t^i, q_t^i, I_t^i, p_t^i, Y_t^i, \mu_t^i, \text{loan}_t^i, E_t^i, Y_t, p_{e,t}, s_t, r_t, R_t^s, b_{t+1}, C_t, X_t, D_t, T_t\}$, 其中 $i = \{B, G\}$. 各部门的一阶条件和完整模型结构详见附录 A.

4 理论分析

根据企业决策的一阶条件来看, 碳定价政策的影响体现在两个方面: 1) 碳定价政策能够通过碳价格信号激励企业自主减排, 产生环境改善收益 (“减排效应”); 2) 碳定价政策会增加企业的减排成本和配额购买成本, 从而影响企业生产决策, 产生经济代价 (“成本效应”).

下面我们将求解 “减排效应” 和 “成本效应” 的表达式, 并对比分析融资约束问题对于这两种效应的影响. 假设模型中的其它价格变量 (工资 w_t^i , 资产价格 q_t^i 和利率 r_t) 不受碳价格的影响 (Lessmann and Kalkuhl, 2024), 根据企业决策的一阶条件, 可以得到 “减排效应” 的具体形式:

引理 1 在没有融资约束时, 碳定价政策对企业的 “减排效应” 表达式如下所示, 当 $e^i, \theta_1 > 0$ 并且 $\theta_2 > 1$ 时, “减排效应” 为正, 即 $da_t^i/dp_{e,t} > 0$.

$$da_t^i/dp_{e,t} = \frac{1}{\theta_2 - 1} \left(\frac{e^i}{\theta_1 \theta_2} \right)^{\frac{1}{\theta_2 - 1}} (p_{e,t})^{\frac{2 - \theta_2}{\theta_2 - 1}}. \quad (16)$$

证明: 见附录 B. □

在式 (16) 中, e^i 表示企业排放因子, θ_1 和 θ_2 是减排成本函数中的参数, 三个参数的取值在一般情况下均满足引理 1 中的要求. 其中, $e^i > 0$ 表示产出和排放呈正相关关系, $\theta_1 > 0$ 表示减排成本与减排比例呈正相关关系, θ_2 通常选取大于 2 的数值, 表示边际减排成本随减排比例增加而递增 (Nordhaus, 2018).

引理 1 表明, 在不受到融资约束限制时, 企业的减排强度 $a_t^i(p_{e,t})$ 仅与碳价格 $p_{e,t}$ 相关, 并且随碳价格上升而增加. 类似地, 可以得到碳定价政策对于企业边际生产成本 cost_t^i 的影响:

引理 2 在没有融资约束时, 碳定价政策对企业的 “成本效应” 表达式如下所示, 当 $e^i > 0$ 时, “成本效应” 为正, 即 $d(\text{cost}_t^i)/dp_{e,t} > 0$.

$$d(\text{cost}_t^i)/dp_{e,t} = e^i \left(1 - \left(\frac{e^i p_{e,t}}{\theta_1 \theta_2} \right)^{\frac{1}{\theta_2 - 1}} \right). \quad (17)$$

证明: 见附录 B. □

引理 2 表明, 碳价格信号会增加企业的边际生产成本. 结合引理 1 和引理 2 可知, 碳定价政策一方面会通过 “减排效应” 来实现环境改善, 另一方面会通过 “成本效应” 造成低碳转型的经济代价.

当企业面临融资约束时, 其减排强度 $a_t^i(p_{e,t}, \mu_t^i)$ 同时受到碳价格 $p_{e,t}$ 和乘子 μ_t^i 两个变量的影响. 其中, μ_t^i 是企业融资约束方程对应的拉格朗日乘子 (简称 “金融摩擦乘子”), 表示企业融资约束放松所带来的边际效用, 乘子的大小与融资约束的松紧程度成正比, 代表企业的融资需求强度. 通过对比 “减排效应” 在有无融资约束情况下的变化, 可以得到以下结论:

命题 1 当金融摩擦乘子 $\mu_t^i \neq 0$, 碳定价政策对企业的 “减排效应” 如式 (18) 所示, 当 $e^i, \theta_1 > 0$ 并且 $\theta_2 > 1$ 时, “减排效应” 随着金融摩擦乘子 μ_t^i 的增大而减弱.

$$da_t^i/dp_{e,t} = \frac{1}{\theta_2 - 1} \left(\frac{e^i}{(1 + \mu_t^i) \theta_1 \theta_2} \right)^{\frac{1}{\theta_2 - 1}} (p_{e,t})^{\frac{2 - \theta_2}{\theta_2 - 1}}. \quad (18)$$

证明: 见附录 B. □

命题 1 表明, 在固定的碳价格政策下 (例如碳税), 融资约束限制了企业的减排潜力, 导致减排强度低于无融资约束的情形. 而在固定的碳强度约束政策下 (例如基于强度的碳市场) 或者净零排放目标约束下, 如果企业面临融资约束, 则需要以更高的碳价格来激励企业减排, 才可以保证减排强度达到预定目标. 类似地, 通过分析“成本效应”的变化, 可以得到如下结论:

命题 2 当金融摩擦乘子 $\mu_t^i \neq 0$, 碳定价政策对企业的“成本效应”如式 (19) 所示, 当 $e^i > 0$ 时, “成本效应”随着金融摩擦乘子 μ_t^i 的增大而增强.

$$d(\text{cost}_t^i)/dp_{e,t} = e^i(1 + \mu_t^i)^{\frac{\theta_2}{\theta_2-1}} \left(1 - \left(\frac{e^i p_{e,t}}{\theta_1 \theta_2} \right)^{\frac{1}{\theta_2-1}} \right). \quad (19)$$

证明: 见附录 B. □

命题 2 表明, 融资约束放大了碳价格的“成本效应”, 增加了企业的融资成本. 结合命题 1 和命题 2, 可以进一步推导出融资约束对于企业低碳投资的影响. 根据生产厂商的一阶条件 ($Y_t^i = \pi^i Y_t / (p_t^i)^{\rho_Y}$) 以及产品价格 p_t^i 等于边际生产成本 cost_t^i 的前提条件, 可以将企业低碳投资占 GDP 比重 $I_{a,t}^i$ 表示为:

$$I_{a,t}^i = f(a_t^i) \frac{Y_t^i}{Y_t} = f(a_t^i) \frac{\pi^i}{(\text{cost}_t^i)^{\rho_Y}}. \quad (20)$$

由于融资约束降低了碳定价政策的“减排效应” (命题 1), 并且增加了碳定价政策的“成本效应” (命题 2), 可以推测得到碳价格增加一单位后, 式 (20) 中分子的增加幅度变小, 分母的增加幅度变大, 所以整体的增加幅度会变小. 由此可以看出, 融资约束问题一方面通过限制融资能力来直接影响企业的减排潜力, 另一方面通过增加生产成本来影响企业的经济规模, 两种渠道相结合后降低了企业低碳投资占 GDP 的比重.

最后, 通过企业决策的完整一阶条件还可以看出, 当融资约束存在并且已经实施碳抵押贷款政策时, 与碳抵押贷款相关的部分会起到与融资约束效果相反的作用, 由此可以得到下列结论:

命题 3 当金融摩擦乘子 $\mu_t^i \neq 0$, 碳抵押贷款政策可以增加碳价格上升带来的“减排效应”, 并且减弱碳价格上升带来的“成本效应”. 且抵押率 (ϑ_t^i) 越高, 融资约束 (μ_t^i) 越紧以及碳价格 ($p_{e,t}$) 越高时, 碳抵押贷款政策的影响越大.

证明: 见附录 B. □

命题 3 表明, 碳抵押贷款政策和碳定价政策的协同设计具有重要意义. 当融资约束问题限制了企业的低碳活动时, 碳抵押贷款政策可以根据企业的自主减排贡献提供额外的融资, 缓解融资约束并降低融资成本, 从而促进低碳投资.

5 参数校准

本文根据中国的经济、金融和环境数据以及相关经典文献对模型参数进行了校准. 模型中的参数分为三类: 环境参数, 经济参数和金融参数. 鉴于 2020 年开始的疫情对经济造成的

冲击扭曲了正常的增长曲线, 本文主要选取 2019 年前的数据来校准相关参数. 全部参数的取值详见表 1.

表 1 参数说明与取值

参数	值	描述	参数	值	描述
β	0.995	消费者时间偏好系数	$\bar{\omega}$	8.5	劳动系数
η	2	风险厌恶系数	e^B	1.97	棕色排放因子
δ_k^i	0.025	资本折旧率	e^G	0.03	绿色排放因子
γ	1	劳动的 Frisch 弹性系数	δ_x	0.9965	脱碳率
ρ_L	1	跨部门劳动替代率	$\bar{\text{cap}}$	2.5	碳配额总量
ρ_Y	2	生产替代弹性	θ_1	0.25	减排成本系数
α^B	0.5	棕色生产资本份额	θ_2	2.6	减排成本系数
α^G	0.46	绿色生产资本份额	d_0	-7.6×10^{-3}	损失函数系数
π^B	0.39	棕色产品比例	d_1	8.1×10^{-6}	损失函数系数
β'	0.95	企业家时间偏好系数	d_2	1.05×10^{-8}	损失函数系数
ϑ^i	0.8	碳资产抵押比例	A^i	0.5	免费配额比例
ϕ^i	10	投资调整系数	ξ	0.12	抵押比例系数

5.1 环境模块相关参数

首先, 本文基于 2019 年中国分部门核算碳排放清单 (数据来源: CEADs 数据库), 将排放因子较高的第二产业以及第三产业中的运输、仓储、邮政和电信服务归类于高碳部门, 将其它部门归类于低碳部门. 同时, 利用 2019 年的分部门排放数据和 GDP 数据 (数据来源: 国家统计局网站) 来校准排放因子, 经计算可得到高碳部门排放因子为 1.97 吨 CO₂/万元, 低碳部门的排放因子为 0.03 吨 CO₂/万元¹.

参考 DICE 模型 (Barrage and Nordhaus, 2024), 本文将减排成本函数设定为 $f(a_t^i) = \theta_1 a_t^{i\theta_2}$, 并将参数 θ_2 校准为 2.6, 表示企业的边际减排成本随其减排比例递增. 在 DICE 中, 作者将 θ_1 校准为 0.11, 以确保企业充分减排 ($a_t^i = 1$) 时减排成本占产出的比值约为 11%. 本文以此为依据, 在考虑两种异质型企业的前提下对参数进行了调整, 最终将 θ_1 校准为 0.25, 以使两种企业充分减排时的减排成本也占到总产出的约 11%.

由于本文的碳存量变量是无量纲的, 不能根据 DICE 模型的参数直接校准损失函数. 因此, 参考 Carattini et al. (2023) 的校准方法, 本文的损失函数参数取值为 $d_0 = -7.6 \times 10^{-3}$, $d_1 = 8.1 \times 10^{-6}$, $d_2 = 1.05 \times 10^{-8}$. 同样地, 根据 Carattini et al. (2023), 二氧化碳存量累积函数中的碳衰减速率设定为 $\delta_x = 0.9965$. 此外, 根据 IEA 数据, 2019 年中国的碳排放比例约占到全球的 30%, 因此本文将 e^{row} 校准为中国二氧化碳排放量的 2.3 倍.

对于碳排放总量上限 ($\bar{\text{cap}}$) 的设置, 本文参考 Carattini et al. (2023) 的处理方式, 通过碳价格来反推得到模型中的排放上限. 具体而言, 我们首先依据张希良等 (2022) 和项目综合报告编写组 (2020) 的研究结果得到中国 2030 年的碳排放峰值约为 103 亿吨, 对应碳市场预

¹为了验证数据的可靠性, 我们按照同样的分类方法计算了 2015 年到 2018 年的排放因子, 得到低碳部门的排放因子区间为 0.03~0.05 吨 CO₂/万元, 高碳部门的排放因子为 1.97~2.5 吨 CO₂/万元, 整体呈现出逐年下降的趋势, 但基本维持在较为稳定的区间, 所以我们假设 2019 年后的排放因子不发生变化.

测价格为 104~126 元/吨 CO₂, 本文选取 126 元/吨 CO₂ 作为碳价格初始值, 然后通过变换计算可以得到本研究模型中的碳价格稳态值应为 $p = 0.015$. 基于此碳价格, 通过不断调整政策碳配额总量上限参数来使得模型中的碳价格达到这一数值, 则可以得到 $\bar{cap} = 2.5$. 对于企业在碳市场中的免费配额比例参数, 我们假设 $A^B = A^G = 0.5$, 即两类企业能够获得的免费配额数量相同, 各占总配额数量的 50%.

5.2 宏观经济模块相关参数

与大多数经典文献中的设定一致, 我们将消费者的时间偏好系数 β 设定为 0.995, 对应 2% 的年化无风险利率; 风险厌恶系数 $\eta = 2$; 投资调整成本系数 $\phi^B = \phi^G = 10$; 两类资产的资本折旧率 $\delta_k^B = \delta_k^G = 0.025$, 对应 10% 的年度资本折旧率 (王文甫, 2010; 王国静和田国强, 2014); 企业的时间偏好系数 β' 设定为 0.95, 对应于企业投资者的高风险回报率要求 (Iacoviello, 2015; 孟宪春等, 2020). 对于企业的结构性参数, 参考王博和徐飘洋 (2021) 基于中国情景构建的 E-DSGE 模型进行校准: 棕色企业产出的资本份额 α^B 校准为 0.5, 绿色企业产出的资本份额 α^G 校准为 0.46, 表明污染企业多属于资本密集型行业 (Fullerton and Heutel, 2007); 棕色产品与绿色产品的替代弹性 $\rho_Y = 2$; 跨部门的劳动替代弹性 $\rho_L = 1$; 劳动供给的 Frisch 弹性倒数 $\gamma = 1$. 此外, 基于本文对于两类企业的分类标准, 可以计算得到棕色产出和绿色产出的比值为 0.43, 因此我们将棕色产品份额 π^B 校准为 0.39, 以确保模型稳态中棕色-绿色产出的比例约为 0.43. 最后, 将 $\bar{\omega}$ 校准为 8.5 以确保基准情形下的劳动时间稳态约等于 1/3.

5.3 金融部门相关参数

融资约束中的折价系数 ξ 需要通过企业的净资产, 低碳投资和工资支出的数据来进行校准, 由于数据可得性限制, 本文使用国家统计局数据库中的中国 2019 年中大型工业企业中的管理费用来代表工资支出, 并结合资产数据和负债数据来求得相应的净资产. 进一步地, 我们用 Bloomberg 计算的中国 2019 年可再生能源相关投资总量 (834 亿美元) 来表示低碳投资数据, 最终将 ξ 的值校准为 0.12. 在碳抵押贷款部分, 本文以绍兴市出台的《绍兴市碳排放权抵押贷款业务操作指引 (试行)》文件为标准, 将基准情形下的碳抵押贷款质押比率定为 80%.

6 数值模拟

基于校准后的参数和模型, 本节通过数值模拟分析融资约束对碳定价政策有效性的影响. 在模拟中, 企业面临的融资状况分为“基准情形”和“金融摩擦”两种情景. “基准情形”下, 企业的融资方程为 $k_{t+1}^i q_t^i - b_{t+1}^i / (1 + r_t) \geq 0$, 此时企业的低碳投资不受到融资抵押约束的影响; 而“金融摩擦”情景下企业面临融资抵押约束, 其融资方程如前文中式 (9) 所示, 低碳投资受到融资渠道的限制.

在气候政策方面, 本文以基于总量控制的碳市场定价机制为代表性政策. 该机制计划于 2025 至 2030 年逐步在全国碳市场中实施, 是控制碳排放整体规模的有效方式 (张希良等, 2021). 政策模拟的时间跨度为 2030 至 2060 年, 根据张希良等 (2022) 预测, 我们假设碳排放上限在 2030 年为 103 亿吨, 并在此后逐年收紧至 0.

6.1 融资约束对环境效益的影响

在基于总量的碳市场政策下, 碳排放规模可以得到有效的控制, 不同金融摩擦情景下的排放总量没有差异. 因此, 我们通过企业的低碳投资规模来反映碳定价政策的环境效益. 在碳市场总量要求不变的前提下, 企业低碳投资规模越低, 表明减排强度越弱, 此时企业需要牺牲一定的经济规模才能达到碳市场排放总量的要求, 说明碳市场对于环境效益的改善是低效的.

图 2 展示了不同情景下的碳价格路径和低碳投资规模情况. 首先, 通过图 2(a) 中虚线可知, 随着转型阶段的深入, 碳价格呈现逐年上升的趋势, 并且在转型末期增速加快. 数值结果显示, 在没有金融摩擦的“基准情形”下, 2050 年的碳定价水平需要达到约 1355 元/吨 CO₂, 2050–2060 年碳价格将增加约一倍, 最终在 2060 年末上升至约 2785 元/吨 CO₂.

经过对比发现, 本文在“基准情形”下得到的碳价格路径与其它相关研究的预测路径基本一致. 例如, 项目综合报告编写组 (2020) 研究表明, 到 2050 年, 中国碳定价水平应达到 1364 元/吨 CO₂; 江深哲等 (2024) 认为 2050 年的碳价应达到 1232 元/吨 CO₂, 这两项研究均将分析范围限定于 2050 年之前, 且其结论基本一致. 张希良等 (2022) 则指出, 在 2050–2060 年碳价格需要快速提升, 以推进成本较高的空气直接捕集技术的应用, 届时碳价格要达到 2700 元/吨 CO₂ 以上的水平. 以上研究均未考虑金融市场有效性的问题, 本文在“基准情形”下得到的结果进一步验证了上述结论.

然而, 我们发现当考虑融资约束的影响时, 碳价格水平需要大幅度提升. 如图 2(a) 中实线所示, 在“金融摩擦”情形下, 2050 年的碳价格需要达到约 1631 元/吨 CO₂ 的水平, 2060 年则需要上升至约 3941 元/吨 CO₂ 的水平, 远超过本文“基准情形”以及其它未考虑金融摩擦的相关研究结果. 这种现象印证了命题 1 中的结论: 当企业受到融资约束时, 碳价格对于企业减排强度的刺激效果减弱 (即“减排效应”下降), 在这种情况下为了实现相同的减排目标, 需要更高的碳价格来增加企业的排放成本, 确保企业在融资状况不佳的情况下仍能够完成减排.

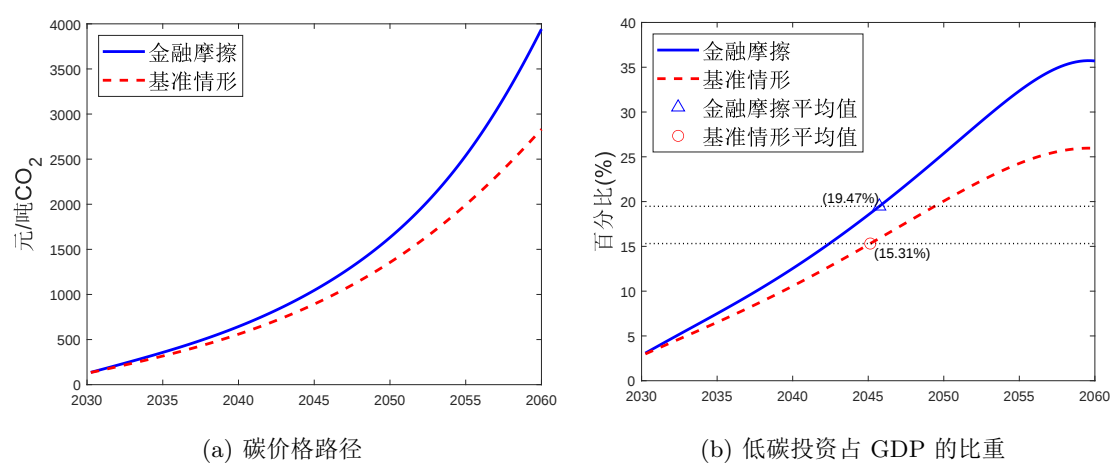


图 2 融资约束对碳价格和低碳投资规模的影响 (“减排效应”)

虽然“金融摩擦”情景下的碳价格更高,但是这并未促进低碳投资水平的增加。如图 2(b)所示,在“基准情形”下,企业低碳投资占 GDP 的平均比重为 2.79%,对应年均低碳投资规模约为 2.75 万亿元(根据 2019 年 GDP 总量计算得到,下同)。该结果处于《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》报告的估计结果(约 4.2 万亿元)和世界银行在《中国国别与发展气候报告》中的估计结果(约 2.4 万亿元)之间,表明投资较为充分。相较之下,当融资约束存在时,企业低碳投资占 GDP 的平均比重仅能达到 1.75%,年均低碳投资规模约为 1.73 万亿元,相较于“基准情形”下降约 37%,低于相关研究对我国低碳投资缺口的估计区间。这一结果表明,融资约束问题限制了企业的减排能力,更高的碳价格仅能维持接近于“基准情形”的减排强度,而难以促进减排强度进一步增加。同时,高昂的碳成本增加了企业的总生产成本,造成企业经济规模下降,最终导致了低碳投资总量的减少。

上述结论表明融资约束在转型过程中对碳定价政策的环境效益将产生显著影响,现有研究中基于完美金融市场假设得到的碳价格路径可能高估了碳定价政策在实际市场环境中的减排激励作用,难以使企业达到预期的减排强度目标。

6.2 融资约束对经济成本的影响

图 3 展示了融资约束对于碳定价政策“成本效应”的影响。在“基准情形”下,碳定价政策给企业带来成本可以分为两部分:一方面,企业需要为碳排放购买配额,产生配额购买成本;另一方面,企业通过自主减排以减少配额需求,从而产生减排成本。据本文估计,当企业不受到融资约束影响时,碳定价政策带来的相关成本平均占到总生产成本的 15.31%。相较之下,在“金融摩擦”情景下,企业因融资约束需额外承担融资成本。图 3 显示,在考虑融资成本以后,碳定价政策相关成本的平均占比将上升至 19.47%。这一结果验证了前文命题 2 的结论:当融资约束存在时,碳定价政策给企业带来的“成本效应”增加,且碳价格越高,企业需付出的额外融资成本越多,导致“金融摩擦”和“基准情形”下的成本占比差距逐渐增大。

为全面评估融资约束对碳定价政策有效性的影响,我们进一步模拟了其他宏观金融变量的转型路径,结果如图 4 所示。模拟结果显示,严格的碳定价政策对棕色企业和绿色企业产

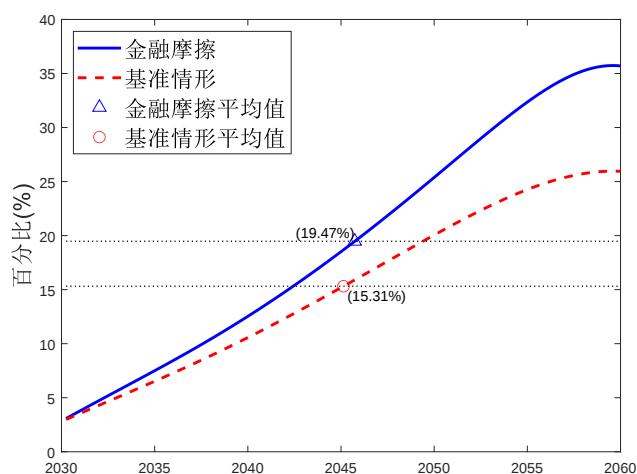
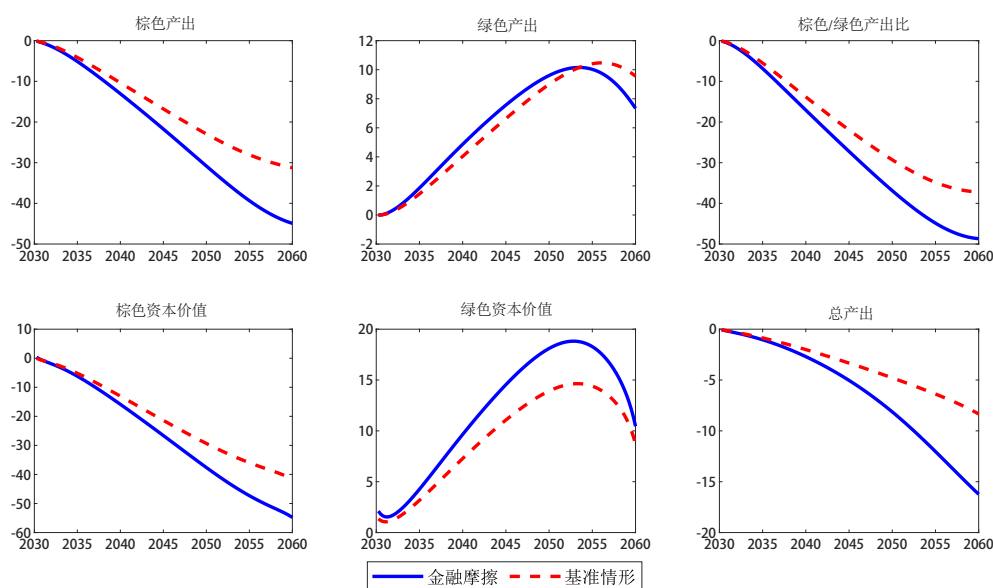


图 3 碳相关成本在企业生产成本中的占比 (“成本效应”)



注: 图中各变量的纵坐标均表示该变量与自身均值相比之下的变动比例, 单位为 (%).

图 4 不同情景下的动态转型路径

生了显著差异化影响: 棕色企业因承担较高的碳成本, 产出下降, 资产贬值; 而绿色企业的市场竞争力提升, 产出占比和资产价值呈上升趋势. 在“金融摩擦”情景下, 由于面临更大的成本压力且减排强度较低, 棕色企业只能通过进一步牺牲产出的方式来满足排放目标的要求. 因此, 融资约束的存在使得棕色企业的产出和资产价值下降幅度显著加大.

对于绿色企业而言, 由于棕色产品和绿色产品之间存在一定的替代效应, 在“金融摩擦”情景下, 绿色企业的产出和资产价值在转型的前中期上升幅度有所增加. 然而, 尽管棕色/绿色产出比在“金融摩擦”情景下进一步下降, 产业结构转型更快, 但其根本原因在于棕色企业的低碳投资受到融资约束问题的限制, 导致减排不足, 进而过度减少产出. 这种现象偏离了碳市场引导企业转型的最优路径, 表明融资约束问题可能对碳定价政策的整体有效性产生不利影响.

在宏观经济效应方面, 本文发现即使在“基准情形”下, 实现净零排放仍会对总产出造成损失, 损失比例在 2050 年为 4.8%, 并在 2060 年达到 8.3%. 产出下降的原因在于碳定价政策对于棕色企业的负面影响大于其对于绿色企业的正向激励, 导致经济整体面临下行压力, 这一结论在其它模型中也得到了验证. (Duan et al., 2021) 基于多个权威的气候综合评估模型 (包括 GCAM, WITCH, REMIND, CE3METL 等) 发现, 中国通过碳定价政策实现 1.5 摄氏度目标将导致 GDP 损失在 2050 年介于 2.3% 到 10.9% 之间, 与本文结果基本一致. 然而, 我们发现在“金融摩擦”情景下, 碳定价政策对于宏观经济的冲击将进一步加剧, 总产出在 2060 年的损失比例将超过 15%, 该结果显著高于其它模型的损失预测区间.

尽管严格的气候政策可能对经济增长造成负面冲击, 但仍具有必要性. 原因在于本文以及 Duan et al. (2021) 所讨论的模型主要考虑了温度变化对于经济产出的影响 (Nordhaus,

2017),在一定程度上低估了减缓气候变化带来的收益。如果全面考虑温度变化对于生命健康(张鸿宇等, 2021; Barrage and Nordhaus, 2024)和气候不可逆灾害(Dietz et al., 2021)的影响时,实施严格的气候政策会带来正向的经济和社会收益。然而,无论考虑何种影响,融资约束问题的影响机理是一致的,其会通过增加碳定价政策的“成本效应”,抑制企业生产规模增长,放大政策对于宏观经济的整体影响,从而显著增加低碳转型的经济成本。

基于上述结果可以看出,本文所分析的融资约束与其他研究聚焦的资金供给侧金融摩擦在影响碳定价政策效果的机制上存在显著差异。Carattini et al. (2023)的研究表明,当碳定价政策冲击棕色资产价格时,银行资产头寸下降,信贷违约风险上升,这种摩擦进一步推高了企业的融资溢价,并带来了金融转型风险,但对于企业减排和转型成本影响较小。相比之下,资金需求侧的融资约束主要通过“减排效应”限制碳价格信号对企业低碳投资的激励作用,通过“成本效应”增加企业的成本压力,当企业低碳投资减少且生产经营成本增加时,实现预期减排目标将付出更高的经济代价。

针对企业在低碳转型过程中面临的融资约束问题,解决方案关键在于使企业(尤其是棕色企业)获得充分的外部融资支持,以缓解其成本压力,从而提升碳定价政策的有效性。接下来,本文将进一步探讨碳资产抵押贷款政策在缓解企业融资约束时的具体作用及其政策效果。

6.3 碳定价政策与碳抵押贷款政策的协同效果分析

在中国现有的绿色金融政策当中,碳资产抵押贷款政策是与碳市场联系最为紧密的金融工具之一。该政策的核心是允许企业将碳资产作为抵押品,按照其价值的一定比率向金融机构申请贷款。现阶段,中国人民银行发布的《环境权益融资工具》和证监会发布的《碳金融工具》标准指引文件为碳抵押贷款的实施提供了政策支持。同时,上海,浙江和江苏等地已制定了关于碳资产抵押的具体操作指引文件,并试行发放了多笔抵押贷款。这一融资形式在理论上能够充分发挥碳市场的金融属性,缓解碳市场对企业带来的成本压力,同时引导金融资源流入低碳领域,对完善我国碳市场建设以及推动气候投融资发展具有重要意义。

因此,本文以碳资产抵押贷款政策为代表,探讨了该政策如何缓解转型过程中面临的融资约束问题,并改善碳定价政策的效果。在进行分析时,我们将政策细分为四种情形:第1种情形中碳定价是唯一的政策工具,与上一小节中的“金融摩擦”情景一致;第2种情形为无差异化政策情形(简称“无差异”情形),在该情形中同时存在碳定价政策和碳抵押贷款政策,且棕色和绿色企业的碳资产抵押比率相同,均为80%;第3种情形为倾向于棕色企业的政策情形(简称“棕色倾向”情形),此时棕色企业获得的抵押比率为100%,绿色企业的抵押比率为60%;第4种情形为倾向于绿色企业的金融政策情形(简称“绿色倾向”情形),此时棕色企业获得的抵押比率为60%,绿色企业的抵押比率为100%。

图5展示了碳抵押贷款政策实施前后的转型动态差异。为了便于比较,我们将所有结果整合到一张图中,其中第一行从左到右分别对应于前文中的图2(a),图2(b)和图3,涵盖碳价格,“环境效应”和“成本效应”的相关变量变化,其余两行对应于前文中的图4,涵盖其他关键宏观金融变量的表现。

首先,从碳价格的变化路径可以看出,实施任意一种碳抵押贷款政策后,碳价格均出现明显下降,这表明当企业能够获取低成本融资来支持减排时,以相对较低的碳价格即可达到同

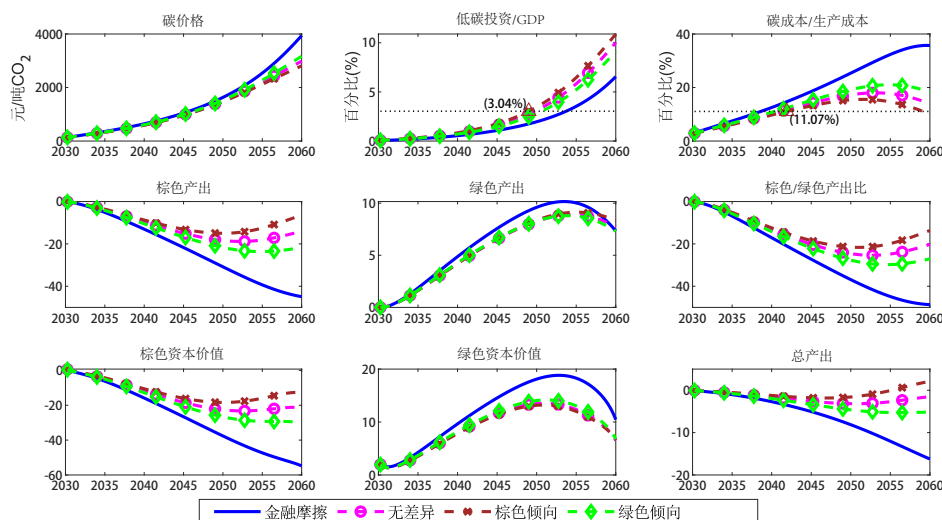


图5 碳抵押贷款政策与碳定价政策的协同实施效果

样的减排目标。同时, 由于融资成本降低, 企业的低碳投资规模也出现显著的增长。并且, 碳定价政策给企业带来的“成本效应”也相应减弱, 碳相关成本占总生产成本的比重明显下降。上述数值模拟结果与前文中命题3的结论一致。从动态转型路径来看, 棕色企业产出的下降幅度明显减缓, 资产贬值风险也随之降低。

其次, 通过对比不同的政策情形可以发现, 在“棕色倾向”情形下, 碳抵押贷款政策的效果最为显著。如图所示, 在“棕色倾向”情形下的低碳投资平均占比将达到3.04%, 相当于约3万亿元的低碳投资规模, 同时碳相关成本在企业生产成本中的占比减少到11.07%。相比之下, “绿色倾向”情形下的政策效果最弱。由此可见, 由于棕色企业是碳市场的主要规制对象, 高昂的转型成本使其面临的资金压力更大, 融资约束更紧。当更多的低成本融资能够流入棕色企业以支持其进行减排时, 不仅能够显著提高整体低碳投资水平, 还能更加有效地控制排放强度, 从而以更低的经济成本实现转型目标。

进一步地, 我们对比了不同政策情景下的变量稳态值变化以及社会福利差异, 结果如表2所示。从表中结果可以看出, 各变量的长期稳态变化趋势与前文的动态变化趋势基本相同。当融资约束存在时, 通过实施无差异化的碳抵押贷款政策(“无差异”情形)可以较大幅度地促进企业进行低碳投资, 使低碳投资的稳态值增加约101.7%。在碳排放强度降低的同时, 企业有条件继续扩大生产, 增加居民部门工资收入, 促进消费水平增长, 进而使社会总福利增加了12.0%。相比之下, 倾向于绿色企业的碳抵押贷款(“绿色倾向”情形)带来的福利收益要小于前一种情形。在此情景下, 棕色企业能够获得的外部融资较少, 导致其低碳投资的稳态值仅增加约74.7%, 最终社会福利仅增加9.8%。而当贷款政策更加倾向于棕色企业时(“棕色倾向”情形), 社会福利增长约13.8%, 要高于其它2种情形。整体上, 以上静态和动态视角下的政策分析都得到了一致性的结论。最后, 为验证本文结论可靠性, 我们进一步将金融摩擦分为多种情形并进行了敏感性分析, 详见附录C。

表 2 稳态分析及福利对比

	单一碳定价	碳定价 + 碳抵押贷款		
	金融摩擦	无差异	棕色倾向	绿色倾向
棕色抵押率	0	80%	100%	60%
绿色抵押率	0	80%	60%	100%
碳价格 (%)	—	−24.8	−29.1	−19.9
总产出 (%)	—	53.2	66.0	40.1
低碳投资 (%)	—	101.7	129.0	74.7
棕色产出 (%)	—	108.9	138.3	80.0
绿色产出 (%)	—	28.7	34.9	22.1
棕色资本价值 (%)	—	167.1	218.3	119.0
绿色资本价值 (%)	—	41.3	50.7	31.5
社会福利 (%)	—	12.0	13.8	9.8

注：表中前两行“棕色抵押率”和“绿色抵押率”对应的值为实际参数，其余变量对应的值表示该变量与“金融摩擦”情景下的差异，单位为（%）。表中计算结果仅保留一位小数。

在现有研究中，政策分析的重点多集中于通过绿色金融工具激励绿色企业发展。例如，王遥等 (2019) 对比分析了绿色信贷贴息，绿色再贷款政策和定向降准政策的效果，发现这些政策均可以降低绿色企业融资成本，从而加速经济结构向绿色转型。潘冬阳等 (2021) 认为针对绿色企业的金融政策比部分财政政策更具有成本效益优势。然而，本文结果表明，仅关注绿色企业发展可能并非最佳的政策选择。这是因为棕色企业在低碳转型期间需要大量资金支持，以实现技术升级和生产方式的改造。当棕色企业在转型期间的融资环境不佳时，会产生显著的转型经济成本，金融部门的转型风险也可能增加。因此，在低碳转型过程中，设计并推广能够激励棕色企业减排的金融工具显得尤为重要。

7 结论与启示

本文构建了一个包含融资抵押约束机制的 E-DSGE 模型，从理论上揭示了融资约束问题对碳定价政策有效性的影响，并根据中国数据进行了模型参数校准。通过数值模拟，我们量化分析了融资约束对企业低碳投资的抑制程度及其对关键宏观经济变量的影响，同时探讨了碳定价和碳资产抵押贷款政策协调优化的效果。本研究得出的主要结论如下：

首先，碳定价政策产生的影响可以区分为“减排效应”和“成本效应”两个渠道。“减排效应”促进企业的低碳投资，降低企业排放强度，产生环境改善收益；“成本效应”增加企业的边际生产成本，限制企业生产规模增长，产生经济代价。当不受融资约束影响时，实现净零排放约需要年均 2.75 万亿元的低碳投资规模，转型过程中与碳定价政策相关的成本占到总生产成本的 15.31%。

其次，我们发现企业融资约束问题会削弱碳定价政策的“减排效应”并加剧“成本效应”。从理论上看，当融资约束存在时，企业减排能力受到融资渠道的限制，碳定价政策的“减排效应”随摩擦程度的增加而降低；同时，由于减排需要付出额外的融资成本，碳定价政策的“成本效应”随摩擦程度的增加而增加。从数量上看，当融资约束存在时，由于碳定价政策的“减

排效应”下降, 完成净零排放需要一个更高的碳定价水平。同时, 由于“成本效应”的增加, 转型过程中碳定价政策成本占生产成本的平均比重从 15.31% 增加至 19.47%, 并且年均低碳投资规模从 2.75 万亿元减少至 1.73 万亿元。我们的结果解释了融资约束问题和供给侧金融摩擦问题 (例如道德风险、代理成本等) 的区别: 供给侧的金融摩擦会通过降低银行资产头寸, 提高信贷违约风险等渠道来形成“金融加速器”, 放大碳定价政策对于宏观经济和金融系统的冲击; 融资约束问题则是通过限制企业融资来抑制企业的减排能力, 增加碳定价政策给企业带来的相关成本, 导致企业需要通过减少产出规模的方式来控制排放, 最终产生较高的经济代价。

最后, 我们发现碳资产抵押贷款政策是有效的绿色转型支持性金融工具。该政策可以通过降低企业减排融资成本来缓解融资约束问题, 增强碳定价政策的有效性。模拟结果显示, 倾向于棕色企业的贷款政策效果最为显著。由于棕色企业的低碳转型投资需求较大, 资金压力更大, 向其提供有针对性的融资支持, 不仅能够降低碳定价政策的整体经济成本, 还能显著提升低碳投资规模并增加社会福利。

基于以上分析结果, 我们提出如下的政策建议:

第一, 构建系统性的碳定价效果评估体系。本文的结论指出, 运行良好的碳市场并不能保证碳价格信号有效地促进企业的低碳投资, 企业面临的融资约束问题可能极大地削弱碳市场定价机制的有效性。因此对碳定价政策的效果评估除了关注碳市场中的价格, 流动性和交易量等指标外, 还需要从促进低碳投资, 产业结构转型和经济增长等宏观经济维度来进行综合评价。建议相关部门制订出台全面系统的碳定价效果评估体系, 并开展定期评估来发现金融资源供给中存在的问题, 保障碳市场价格信号传导的有效性。

第二, 完善金融体系来减小企业低碳投资的融资约束。本文结果表明, 融资约束问题会影响碳定价机制的作用效果, 并增加低碳转型过程中的经济下行压力。因此, 建议健全金融体系的法律法规, 尤其是需要增强企业的环境信息披露覆盖范围和信息披露质量, 减少金融机构和企业之间的信息不对称性。同时, 应鼓励发展多元化的低碳投资融资渠道, 吸引社会资金, 通过债务融资和股权融资等形式相结合的方式来进一步丰富企业的融资来源, 实现融资渠道之间的优势互补, 从而改善企业面临的融资约束问题。

第三, 构建与碳定价机制配套的绿色金融支持体系。本文结果表明, 在单一的碳定价机制下, 高碳排放类型的企业面临较高的成本压力和资产搁浅风险。因此, 在实行碳定价机制时需要考虑企业所面临的发展困境, 建议以碳定价机制作为基础, 完善绿色金融支持体系的配套建设工作, 根据不同类型的金融摩擦问题实施有针对性的金融解决方案。同时, 构建绿色金融支持体系将使相关企业与金融系统联系更加紧密, 在发展过程中应谨慎防范企业信用风险, 金融市场波动风险等不确定性因素, 建立完善的风险控制机制, 最大化发挥绿色金融工具的积极作用。

参 考 文 献

陈国进, 陈凌凌, 金昊, 赵向琴, (2023). 气候转型风险与宏观经济政策调控 [J]. 经济研究, 58(5): 60–78.

Chen G J, Chen L L, Jin H, Zhao X Q, (2023). Climate Transition Risk and Macroeconomic Policy

- Regulation[J]. *Economic Research Journal*, 58(5): 60–78.
- 丁冠群, 王铮, 孙翊, (2022). 基于多行业 DSGE 模型的中国碳减排政策效应 [J]. *中国人口·资源与环境*, 32(1): 19–30.
- Ding G Q, Wang Z, Sun Y, (2022). Effects of China's Carbon Emission Reduction Policies Based on the Multi-sector DSGE Model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 32(1): 19–30.
- 范英, 衣博文, (2021). 能源转型的规律, 驱动机制与中国路径 [J]. *管理世界*, 37(8): 95–105.
- Fan Y, Yi B W, (2021). Evolution, Driving Mechanism, and Pathway of China's Energy Transition[J]. *Management World*, 37(8): 95–105.
- 侯成琪, 刘颖, (2015). 外部融资溢价机制与抵押约束机制——基于 DSGE 模型的比较研究 [J]. *经济评论*, (4): 134–147.
- Hou C Q, Liu Y, (2015). External Finance Premium and Collateral Constraint: A Comparison Based on DSGE Models[J]. *Economic Review*, (4): 134–147.
- 江深哲, 杜浩锋, 徐铭栎, (2024). “双碳”目标下能源与产业双重结构转型 [J]. *数量经济技术经济研究*, 41(2): 109–130.
- Jiang S Z, Du H F, Xu M Z, (2024). Dual Transition of Energy and Industrial Structure under the Carbon Peaking and Neutrality Goals[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 41(2): 109–130.
- 林东杰, 崔小勇, 龚六堂, (2022). 金融摩擦异质性, 资源错配与全要素生产率损失 [J]. *经济研究*, 57(1): 89–106.
- Lin D J, Cui X Y, Gong L T, (2022). Financial Friction Heterogeneity, Resources Misallocation and TFP Loss[J]. *Economic Research Journal*, 57(1): 89–106.
- 刘锋, 黄苹, 唐丹, (2022). 绿色金融的碳减排效应及影响渠道研究 [J]. *金融经济研究*, 37(6): 144–158.
- Liu F, Huang P, Tang D, (2022). The Carbon Emission Reduction Effect of Green Finance Development and Its Impact Pathways[J]. *Financial Economics Research*, 37(6): 144–158.
- 刘翼, 魏云捷, (2023). 绿色信贷政策对高碳企业的异质影响——基于研发投入与信贷配置视角 [J]. *计量经济学报*, 3(4): 1176–1199.
- Liu Y, Wei Y J, (2023). Heterogeneous Impact of Green Credit Policy on High-carbon Enterprises: Based on the Perspective of R&D Investment and Credit Allocation[J]. *China Journal of Econometrics*, 3(4): 1176–1199.
- 孟宪春, 张屹山, (2021). 家庭债务, 房地产价格渠道与中国经济波动 [J]. *经济研究*, 56(5): 75–90.
- Meng X C, Zhang Y S, (2021). Household Debt, Housing Price Channel and Business Cycle in China[J]. *Economic Research Journal*, 56(5): 75–90.
- 孟宪春, 张屹山, 张鹤, 冯叶, (2020). 预算软约束, 宏观杠杆率与全要素生产率 [J]. *管理世界*, 36(8): 50–65.
- Meng X C, Zhang Y S, Zhang H, Feng Y, (2020). Soft Budget Constraint, Macro Leverage and Total Factor Productivity[J]. *Management World*, 36(8): 50–65.
- 潘冬阳, 陈川祺, Michael Grubb, (2021). 金融政策与经济低碳转型——基于增长视角的研究 [J]. *金融研究*, (12): 1–19.
- Pan D Y, Chen C Q, Grubb M, (2021). Financial Policy and Low-Carbon Transition of the Economy: A Growth Perspective[J]. *Journal of Financial Research*, (12): 1–19.
- 项目综合报告编写组, (2020). 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告 [J]. *中国人口·资源与环境*, 30(11): 1–25.
- Project Synthesis Report Writing Team, (2020). Towards Carbon Neutrality: A Study on China's Long-term Low-carbon Transition Pathways and Strategies[J]. *China Population, Resources and En-*

- vironment, 30(11): 1–25.
- 王博, 徐飘洋, (2021). 碳定价, 双重金融摩擦与“双支柱”调控 [J]. 金融研究, (12): 57–74.
- Wang B, Xu P Y, (2021). Carbon Pricing, Dual Financial Friction and Dual Pillar Regulation[J]. Journal of Financial Research, (12): 57–74.
- 王国静, 田国强, (2014). 金融冲击和中国经济波动 [J]. 经济研究, 49(3): 20–34.
- Wang G J, Tian G Q, (2014). Financial Shocks and Chinese Business Cycles[J]. Economic Research Journal, 49(3): 20–34.
- 王明喜, 罗昊, 姚建峤, (2023). 碳规制与绿色金融: 基于市场互补理论的实证研究 [J]. 计量经济学报, 3(4): 1200–1224.
- Wang M X, Luo H, Yao J Q, (2023). Carbon Trading and Green Finance: A Complementary Theory and Empirical Analysis[J]. China Journal of Econometrics, 3(4): 1200–1224.
- 王文甫, (2010). 价格粘性, 流动性约束与中国财政政策的宏观效应——动态新凯恩斯主义视角 [J]. 管理世界, (9): 11–25.
- Wang W F, (2010). Between the Price Stickiness, the Liquidity Restriction and the Macroeconomic Effects of China's Fiscal Policies[J]. Management World, (9): 11–25.
- 王遥, 潘冬阳, 彭俞超, 梁希, (2019). 基于 DSGE 模型的绿色信贷激励政策研究 [J]. 金融研究, (11): 1–18.
- Wang Y, Pan D Y, Peng Y C, Liang X, (2019). China's Incentive Policies for Green Loans: A DSGE Approach[J]. Journal of Financial Research, (11): 1–18.
- 岳童, 童健, (2024). 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, 41(7): 48–63.
- Yue T, Tong J, (2024). Carbon Pricing Mechanisms and China's High-quality Economic Development under “Dual Carbon” Targets: Collaborative Targets and Mechanism Analysis[J]. Statistical Research, 41(7): 48–63.
- 张鸿宇, 黄晓丹, 张达, 张希良, (2021). 加速能源转型的经济社会效益评估 [J]. 中国科学院院刊, 36(9): 1039–1048.
- Zhang H Y, Huang X D, Zhang D, Zhang X L, (2021). Evaluating Economic and Social Benefits of Accelerated Energy Transition[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 36(9): 1039–1048.
- 张希良, 张达, 余润心, (2021). 中国特色全国碳市场设计理论与实践 [J]. 管理世界, 37(8): 80–95.
- Zhang X L, Zhang D, Yu R X, (2021). Theory and Practice of China's National Carbon Emissions Trading System[J]. Management World, 37(8): 80–95.
- 张希良, 黄晓丹, 张达, 耿涌, 田立新, 等, (2022). 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究 [J]. 管理世界, 38(1): 35–66.
- Zhang X L, Huang X D, Zhang D, Geng Y, Tian L X, et al. (2022). Research on the Pathway and Policies for China's Energy and Economy Transformation toward Carbon Neutrality[J]. Management World, 38(1): 35–66.
- Angelopoulos K, Economides G, Philippopoulos A, (2013). First-and Second-best Allocations Under Economic and Environmental Uncertainty[J]. International Tax and Public Finance, 20: 360–380.
- Annicchiarico B, Di Dio F, (2015). Environmental Policy and Macroeconomic Dynamics in a New Keynesian Model[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 69: 1–21.
- Anouliès L, (2017). Heterogeneous Firms and the Environment: A Cap-and-trade Program[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 84: 84–101.
- Baldwin E, Cai Y, Kuralbayeva K, (2020). To Build or Not to Build? Capital Stocks and Climate Policy[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 100: 102235.

- Barrage L, (2020). Optimal Dynamic Carbon Taxes in a ClimateEconomy Model with Distortionary Fiscal Policy[J]. *The Review of Economic Studies*, 87(1): 1–39.
- Barrage L, Nordhaus W, (2024). Policies, Projections, and the Social Cost of Carbon: Results from the DICE-2023 Model[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(13): e2312030121.
- Bartram S, Hou K, Kim S, (2022). Real Effects of Climate Policy: Financial Constraints and Spillovers[J]. *Journal of Financial Economics*, 143(2): 668–696.
- Campiglio E, (2016). Beyond Carbon Pricing: The Role of Banking and Monetary Policy in Financing the Transition to a Low-carbon Economy[J]. *Ecological Economics*, 121: 220–230.
- Cao J, Ho M S, Ma R, Teng F, (2021). When Carbon Emission Trading Meets a Regulated Industry: Evidence from the Electricity Sector of China[J]. *Journal of Public Economics*, 200: 104470.
- Carattini S, Heutel G, Melkadz G, (2023). Climate Policy, Financial Frictions, and Transition Risk[J]. *Review of Economic Dynamics*, 51: 778–794.
- Cui J, Song F, Jiang Z, (2023). Efficiency vs. Equity as China’s National Carbon Market Meets Provincial Electricity Markets[J]. *China Economic Review*, 78: 101915.
- Dietz S, Rising J, Stoerk T, Wagner G, (2021). Economic Impacts of Tipping Points in the Climate System[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(34): e2103081118.
- Diluiso F, Annicchiarico B, Kalkuhl M, Minx J, (2021). Climate Actions and Macro-financial Stability: The Role of Central Banks[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 110: 102548.
- Duan H, Zhou S, Jiang K, Bertram C, Harmsen M, et al. (2021). Assessing China’s Efforts to Pursue the 1.5°C Warming Limit[J]. *Science*, 372(6540): 378–385.
- Fan Y, Wu J, Xia Y, Liu J Y, (2016). How Will a Nationwide Carbon Market Affect Regional Economies and the Efficiency of CO₂ Emission Reduction in China?[J]. *China Economic Review*, 38: 151–166.
- Fischer C, Springborn M, (2011). Emissions Targets and the Real Business Cycle: Intensity Targets versus Caps or Taxes[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62(3): 352–366.
- Fullerton D, Heutel G, (2007). Who Bears the Burden of a Tax on Carbon Emissions in Japan?[J]. *Environmental Economics and Policy Studies*, 8(4): 255–270.
- Gao Y, Li M, Xue J, Liu Y, (2020). Evaluation of Effectiveness of China’s Carbon Emissions Trading Scheme in Carbon Mitigation[J]. *Energy Economics*, 90: 104872.
- Gertler M, Karadi P, (2011). A Model of Unconventional Monetary Policy[J]. *Journal of Monetary Economics*, 58(1): 17–34.
- Gibson J, Heutel G, (2023). Pollution and Labor Market Search Externalities over the Business Cycle[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 151(2023): 104665.
- Gollier C, (2024). The Cost-Efficiency Carbon Pricing Puzzle[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 128: 103062.
- Golosov M, Hassler J, Krusell P, Tsyvinski A, (2014). Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium[J]. *Econometrica*, 82(1): 41–88.
- Heutel G, (2012). How Should Environmental Policy Respond to Business Cycles? Optimal Policy under Persistent Productivity Shocks[J]. *Review of Economic Dynamics*, 15(2): 244–264.
- Iacoviello M, (2015). Financial Business Cycles[J]. *Review of Economic Dynamics*, 18(1): 140–163.
- International Monetary Fund, (2023). Global Financial Stability Report: Financial and Climate Policies for a High-Interest-Rate Era[R]. Washington, DC, October.
- Jermann U, Quadrini V, (2012). Macroeconomic Effects of Financial Shocks[J]. *American Economic Review*, 102(1): 238–271.

- Kiyotaki N, Moore J, (1997). Credit Cycles[J]. *Journal of Political Economy*, 105(2): 211–248.
- Lemoine D, Traeger C, (2016). Economics of Tipping the Climate Dominoes[J]. *Nature Climate Change*, 6(5): 514–519.
- Lessmann K, Kalkuhl M, (2024). Climate Finance Intermediation: Interest Spread Effects in a Climate Policy Model[J]. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 11(1): 213–251.
- Löschel A, Lutz B J, Managi S, (2019). The Impacts of the EU ETS on Efficiency and Economic Performance: An Empirical Analysis for German Manufacturing Firms[J]. *Resource and Energy Economics*, 56: 71–95.
- Mendoza E G, (2010). Sudden Stops, Financial Crises, and Leverage[J]. *American Economic Review*, 100(5): 1941–1966.
- Nordhaus W, (2017). Revisiting the Social Cost of Carbon[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7): 1518–1523.
- Nordhaus W, (2018). Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE Model, 1992–2017[J]. *Climatic Change*, 148(4): 623–640.
- Shapiro A F, Metcalf G E, (2023). The Macroeconomic Effects of a Carbon Tax to Meet the US Paris Agreement Target: The Role of Firm Creation and Technology Adoption[J]. *Journal of Public Economics*, 218: 104800.
- Stiglitz J E, Weiss A, (1981). Credit Rationing in Markets With Imperfect Information[J]. *The American Economic Review*, 71(3): 393–410.
- Yao S, Pan Y, Sensoy A, Uddin G S, Cheng F, (2021). Green Credit Policy and Firm Performance: What We Learn from China[J]. *Energy Economics*, 101: 105415.
- Yu C H, Wu X Q, Zhang D Y, Chen S, Zhao J S, (2021). Demand for Green Finance: Resolving Financing Constraints on Green Innovation in China[J]. *Energy Policy*, 153: 112255.

附录 A 模型动态系统

通过求解代表性家庭的最优决策问题, 我们可以得到如下的一阶条件:

$$EM_{t,t+1} = \frac{1}{1+r_t}, \quad (\text{A.1})$$

$$w_t^i = \bar{\omega} L_t^{\gamma-\rho_L} (n_t^i)^{\rho_L}, \quad (\text{A.2})$$

$$R_t^s = 1, \quad (\text{A.3})$$

其中, $M_{t,t+1} = \beta U_{c,t+1}/U_{c,t}$ 表示贴现因子, $L_t = [(n_t^B)^{1+\rho_L} + (n_t^G)^{1+\rho_L}]^{\frac{1}{1+\rho_L}}$ 表示 t 期的总劳动供给. 式 (A.1) 为代表性家庭的跨期消费欧拉方程, 表示消费者当期进行边际消费或者储蓄到下一期进行消费所带来的效用相同. 式 (A.2) 表示家庭的边际劳动报酬等于工资率.

在求解最终品厂商优化问题时, 将最终商品的名义价格标准化为 1, 可以得到两种中间产品的需求量分别为:

$$Y_t^B = \pi^B \frac{Y_t}{(p_t^B)^{\rho_Y}}, \quad (\text{A.4})$$

$$Y_t^G = (1 - \pi^B) \frac{Y_t}{(p_t^G)^{\rho_Y}}, \quad (\text{A.5})$$

其中, p_t^i 表示企业 i 生产的中间品价格. 进一步地, 通过求解中间品企业 i 的最优决策问题, 我们可以得到:

$$p_{e,t} e^i = f'(a_t^i)(1 + \mu_t^i) - \vartheta_t^i \mu_t^i p_{e,t} e^i, \quad (\text{A.6})$$

$$R_t EM'_{t,t+1} = 1 - \mu_t^i \xi, \quad (\text{A.7})$$

$$[p_t^i - (1 - a_t^i) p_{e,t} e^i - f(a_t^i)(1 + \mu_t^i) + \vartheta_t^i \mu_t^i a_t^i p_{e,t} e^i] Y_{n,t}^i = w_t^i (1 + \mu_t^i), \quad (\text{A.8})$$

$$EM'_{t,t+1} \{ [p_{t+1}^i - (1 - a_{t+1}^i) p_{e,t+1} e^i - f(a_{t+1}^i)(1 + \mu_{t+1}^i) + \vartheta_{t+1}^i \mu_{t+1}^i a_{t+1}^i p_{e,t+1} e^i] Y_{k,t+1}^i + (1 - \delta_k^i) q_{t+1}^i \} = q_t^i (1 - \mu_t^i \xi) \quad (\text{A.9})$$

最后, 通过求解资本品厂商的优化问题, 我们可以得到资产价格的表达式为:

$$q_t^i = 1 + \frac{\phi^i}{2} \left(\frac{I_t^i}{I_{t-1}^i} - 1 \right)^2 + \phi^i \left(\frac{I_t^i}{I_{t-1}^i} - 1 \right) \frac{I_t^i}{I_{t-1}^i} - E_t M_{t,t+1} \phi^i \left(\frac{I_{t+1}^i}{I_t^i} - 1 \right) \left(\frac{I_{t+1}^i}{I_t^i} \right)^2. \quad (\text{A.10})$$

债券市场的出清条件为:

$$b_t = b_t^B + b_t^G. \quad (\text{A.11})$$

短期贷款市场的出清条件为:

$$s_t = \text{Loan}_t^B + \text{Loan}_t^G. \quad (\text{A.12})$$

碳市场的出清条件为:

$$\text{Cap}_t = E_t^B + E_t^G. \quad (\text{A.13})$$

模型中其他方程包括:

$$(1 - \delta_k^i)q_t^i k_t^i + p_t^i Y_t^i + \frac{b_{t+1}^i}{1 + r_t} = q_t^i k_{t+1}^i + w_t^i n_t^i + b_t^i + d_t^i + p_{e,t}(E_t^i - A_t^i \text{Cap}_t) + Z_t^i, \quad (\text{A.14})$$

$$I_t^i = k_{t+1}^i - (1 - \delta_k^i)k_t^i, \quad (\text{A.15})$$

$$p_{e,t} \vartheta_t^i (A_t^i \text{Cap}_t + \text{Abatement}_t^i) + \xi(q_t^i k_{t+1}^i - b_{t+1}^i / (1 + r_t)) \geq \text{loan}_t^i, \quad (\text{A.16})$$

$$\text{loan}_t^i = w_t^i n_t^i + Z_t^i, \quad (\text{A.17})$$

$$E_t^i = (1 - a_t^i) e^i Y_t^i, \quad (\text{A.18})$$

$$Y_t^i = [1 - D(X_t)](k_t^i)^{\alpha^i} (n_t^i)^{1-\alpha^i}, \quad (\text{A.19})$$

$$Y_t = [(\pi^B)^{\frac{1}{\rho_Y}} (Y_t^B)^{\frac{\rho_Y-1}{\rho_Y}} + (1 - \pi^B)^{\frac{1}{\rho_Y}} (Y_t^G)^{\frac{\rho_Y-1}{\rho_Y}}]^{\frac{\rho_Y}{\rho_Y-1}}, \quad (\text{A.20})$$

$$X_{t+1} = \delta_x X_t + E_t^B + E_t^G + e^{\text{row}}, \quad (\text{A.21})$$

$$D(X_t) = d_0 + d_1 X_t + d_2 X_t^2, \quad (\text{A.22})$$

$$T_t = \text{Cap}_t(1 - A_t^G - A_t^B)p_{e,t}, \quad (\text{A.23})$$

$$C_t + \frac{b_{t+1}}{1 + r_t} + s_t = w_t^B n_t^B + w_t^G n_t^G + b_t + d_t + R_t^s s_t + T_t, \quad (\text{A.24})$$

其中, 式 (A.2), 式 (A.6)~(A.10) 和式 (A.14)~(A.19) 中均包含两个方程.

附录 B 理论结果证明

引理 1 和命题 1 的证明过程: 当碳抵押贷款政策不存在时, 根据式 (A.6), 可以得到:

$$p_{e,t} e^i = (1 + \mu_t^i) \theta_1 \theta_2 (a_t^i)^{\theta_2-1}. \quad (\text{B.1})$$

经过化简后, 可以得到碳价格的“减排效应” ($da_t^i / dp_{e,t}$) 为:

$$da_t^i / dp_{e,t} = \frac{1}{\theta_2 - 1} \left(\frac{e^i}{(1 + \mu_t^i) \theta_1 \theta_2} \right)^{\frac{1}{\theta_2-1}} (p_{e,t})^{\frac{2-\theta_2}{\theta_2-1}}, \quad (\text{B.2})$$

式 (B.2) 与命题 1 中表达式一致, 由于模型中的变量均大于 0, 所以当 $e^i, \theta_1 > 0$ 并且 $\theta_2 > 1$ 时, 式 (B.2) 大于 0 并且随 μ_t^i 的增加而变小. 当金融摩擦乘子 $\mu_t^i = 0$, 式 (B.2) 与引理 1 中形式一致. 证明完毕.

引理 2 和命题 2 的证明过程: 根据 Lessmann et al. (2024) 可知, 对于一个一般化的 CES 生产函数 ($Y_t = (\alpha k_t^{1-1/\sigma} + (1 - \alpha) n_t^{1-1/\sigma})^{\sigma/(\sigma-1)}$), 生产一单位产品付出的成本可以表示为:

$$\text{MC}_t = (\alpha^\sigma p_{k,t}^{1-\sigma} + (1 - \alpha)^\sigma p_{n,t}^{1-\sigma})^{1/(1-\sigma)}, \quad (\text{B.3})$$

其中 σ 表示替代弹性. $p_{n,t}$ 表示雇佣劳动的成本, $p_{k,t}$ 表示购买资本的成本. 根据式 (A.8) 和式 (A.9), 在本文中可以得到对应的表达式为:

$$p_{k,t}^i = (q_{t-1}^i (1 - \mu_{t-1}^i \xi) - M'_{t-1,t} (1 - \delta_k^i) q_t^i) / M'_{t-1,t}, \quad (\text{B.4})$$

$$p_{n,t}^i = w_t^i(1 + \mu_t^i). \quad (\text{B.5})$$

已知在考虑碳定价政策后,生产一单位产品的净收益为 $(p_t^i - (1 - a_t^i)p_{e,t}e^i - f(a_t^i)(1 + \mu_t^i))$, 在利润最大化条件下,企业净收益等于付出的成本,由此可以得到下面的表达式:

$$p_t^i - (1 - a_t^i)p_{e,t}e^i - f(a_t^i)(1 + \mu_t^i) = (\alpha^\sigma p_{k,t}^{1-\sigma} + (1 - \alpha)^\sigma p_{n,t}^{1-\sigma})^{1/(1-\sigma)}. \quad (\text{B.6})$$

在均衡条件下,企业的边际生产成本 cost_t^i 等于边际产品价格 p_t^i , 因此可以通过式 (B.6) 求得企业生产的边际成本. 根据 Lessmann et al. (2024), 假设局部均衡条件下其它价格变量 (工资 w_t^i , 资产价格 q_t^i 和利率 r_t) 不受到碳价格的影响, 则可以得到:

$$d(\text{cost}_t^i)/dp_{e,t} = d(p_t^i)/dp_{e,t} = d((1 - a_t^i)p_{e,t}e^i + f(a_t^i)(1 + \mu_t^i))/dp_{e,t}. \quad (\text{B.7})$$

通过进一步整理, 可以得到:

$$d(\text{cost}_t^i)/dp_{e,t} = e^i(1 + \mu_t^i)^{\frac{\theta_2}{\theta_2-1}} \left(1 - \left(\frac{e^i p_{e,t}}{\theta_1 \theta_2} \right)^{\frac{1}{\theta_2-1}} \right). \quad (\text{B.8})$$

式 (B.8) 与命题 2 中形式一致. 由于企业减排强度 $a_t^i < 1$, 所以式 (B.8) 中 $(1 - (\frac{e^i p_{e,t}}{\theta_1 \theta_2})^{\frac{1}{\theta_2-1}}) > 0$, 因此, 当 $e^i > 0$ 时, $d(\text{cost}_t^i)/dp_{e,t}$ 随着金融摩擦乘子 μ_t^i 的增大而增大. 当金融摩擦乘子 $\mu_t^i = 0$, 式 (B.8) 与引理 2 中形式一致. 证明完毕.

命题 3 的证明过程: 根据附录 A 中的式 (A.6), (A.8), (A.9), 可以整理得到如下形式:

$$\underbrace{p_{e,t}e^i}_{\text{碳配额成本}} = \underbrace{f'(a_t^i)}_{\text{减排成本}} + \underbrace{f'(a_t^i)\mu_t^i}_{\text{减排成本} \times \text{金融摩擦成本}} - \underbrace{\vartheta_t^i \mu_t^i p_{e,t}e^i}_{\text{碳抵押贷款}}, \quad (\text{B.9})$$

$$Y_{n,t}^i = \frac{\underbrace{w_t^i(1 + \mu_t^i)}_{\text{金融摩擦}}}{\underbrace{p_t^i - (1 - a_t^i)p_{e,t}e^i}_{\text{碳配额成本}} - \underbrace{f(a_t^i)}_{\text{减排成本}} - \underbrace{f(a_t^i)\mu_t^i}_{\text{减排成本} \times \text{金融摩擦}} + \underbrace{\vartheta_t^i \mu_t^i a_t^i p_{e,t}e^i}_{\text{碳抵押贷款}}}, \quad (\text{B.10})$$

$$Y_{k,t+1}^i = \frac{\underbrace{q_t^i(1 - \mu_t^i \xi)}_{\text{资本的抵押价值}} - \underbrace{EM'_{t,t+1}(1 - \delta_k^i)q_{t+1}^i}_{\text{资本折旧后的价值}}}{EM'_{t,t+1} \left(\underbrace{p_{t+1}^i - (1 - a_{t+1}^i)p_{e,t+1}e^i}_{\text{碳配额成本}} - \underbrace{f(a_{t+1}^i)}_{\text{减排成本}} - \underbrace{f(a_{t+1}^i)\mu_{t+1}^i}_{\text{减排成本} \times \text{金融摩擦}} + \underbrace{\vartheta_{t+1}^i \mu_{t+1}^i a_{t+1}^i p_{e,t+1}e^i}_{\text{碳抵押贷款}} \right)}. \quad (\text{B.11})$$

在式 (B.9) 中, “碳抵押贷款” 项与 “减排成本 $\times$ 金融摩擦成本” 项符号相反, 说明碳抵押贷款政策通过缓解企业融资约束, 从而起到与金融摩擦相反的作用, 可以提高碳价格的 “减排效应”. 同理, 式 (B.10) 和 (B.11) 中 “碳抵押贷款” 项也与 “减排成本 $\times$ 金融摩擦成本” 项符号相反, 表明抵押贷款政策可以减少金融摩擦带来的额外的 “成本效应”. 证明完毕.

附录 C 敏感性分析

为了验证本文结果的可靠性并控制内生性问题, 我们通过外生设定参数的方式改变金融摩擦的程度, 将金融摩擦细分为三种不同的情景, 进行进一步的敏感性分析. 其中, “金融摩

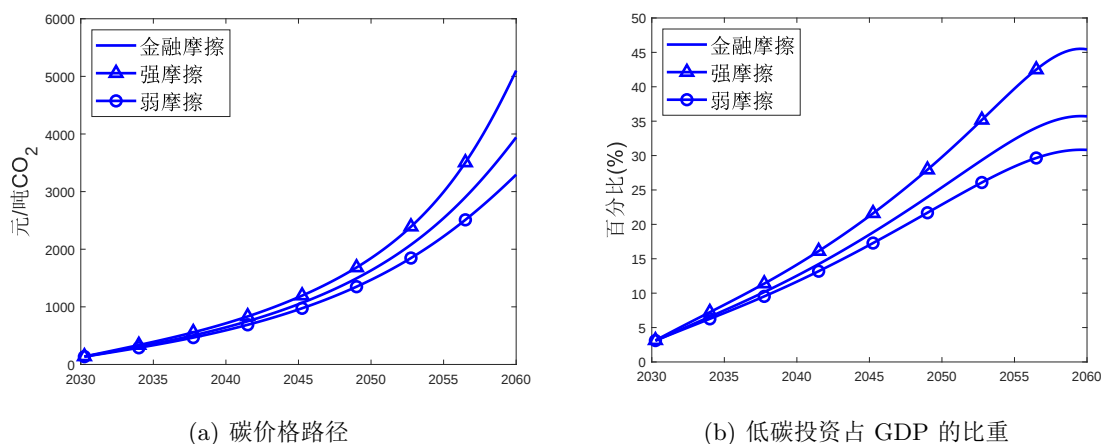
擦”情景对应于前文中基于数据校准的真实情景;“强摩擦”情景下融资方程中的抵押比例系数 ξ 是“金融摩擦”情景下的 $1/2$, 表示融资约束更紧的情形;“弱摩擦”情景下融资方程中的抵押比例系数 ξ 是“金融摩擦”情景下的 2 倍, 表示融资约束更松的情形。

附图 C1 展示了不同金融摩擦情景下的碳价格和低碳投资规模。通过对比可以发现, 在碳排放总量不变的前提下, 融资约束程度越高, 碳定价政策的“减排效应”越弱, 导致企业的低碳投资规模越低。尽管在“强摩擦”情景下面临更高的碳价格路径, 但仍无法促进企业的低碳投资达到预期规模, 这说明外生的融资约束变化显著影响了碳定价政策的效果, 进一步验证了正文中关于“减排效应”的结论。

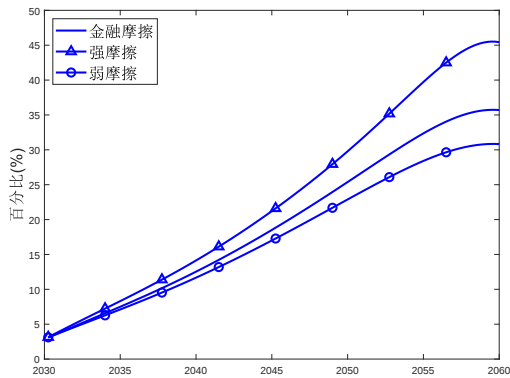
附图 C2 展示了不同金融摩擦情景下的碳相关成本在企业生产成本中的占比。通过对比可以看出融资约束程度越大, 碳相关成本的占比越高, 这是由于碳定价政策给企业带来的额外融资成本会随融资约束程度的增加而增加, 这进一步验证了正文中关于“成本效应”的结论。

附图 C3 展示了部分宏观变量在不同金融摩擦情景下的转型路径。整体上, 融资约束程度越高, 棕色企业产出和棕色资产价值的下降幅度越大, 表明棕色企业在融资约束收紧时面临更高的转型成本压力。与正文中的结论一致。

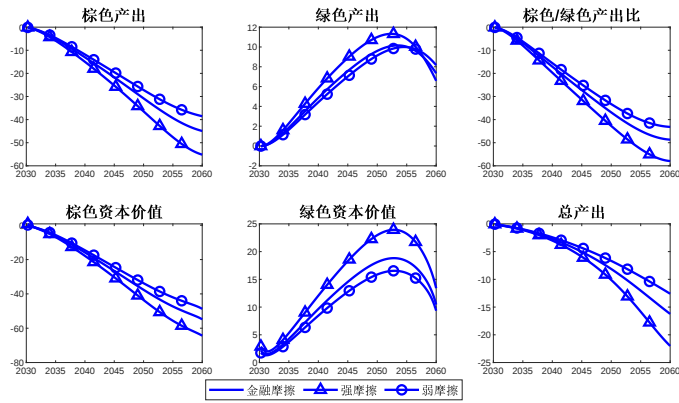
附图 C4 对比了不同金融摩擦情景下的社会福利变化。根据图中结果可知, 在任意一种金融摩擦情形下, 碳资产抵押贷款 + 碳定价政策组合都可以获得比单一碳定价政策更高的社会福利收益, 并且“棕色倾向”政策下的收益最大。同时, 通过对比不同金融摩擦情形可知, 企业融资约束越紧, 碳资产抵押贷款政策带来的社会福利收益越高。以上结果进一步验证了正文中关于碳资产抵押贷款政策能够缓解企业融资约束的结论。



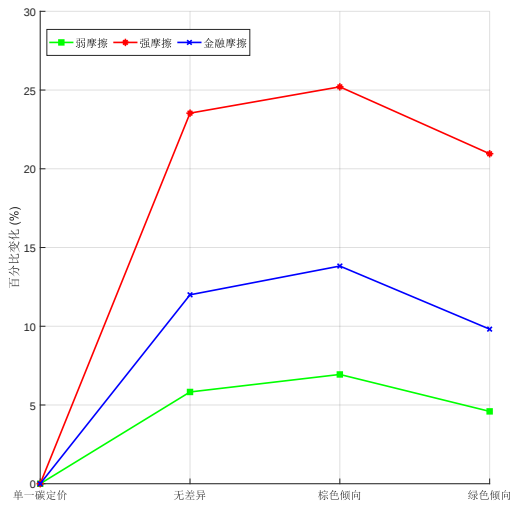
附图 C1 不同金融摩擦情景下的碳价格和低碳投资规模



附图 C2 不同金融摩擦情景下的碳相关成本在企业生产成本中的占比



附图 C3 不同金融摩擦情景下的动态转型路径



附图 C4 不同金融摩擦情景下的社会福利对比