doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2025.08.003

“碳泡沫”、资产搁浅与碳减排路径①

——基于政策规制的视角

孙浩宁[1]，董 丰[1,2*]，贾彦东[3]

(1. 清华大学经济管理学院，北京 100084；2. 清华大学中国经济研究中心，北京 100084；
3. 中国人民银行研究局，北京 100800)

摘要：本研究基于环保政策背景下能源公司资产搁浅的现状，构建了包含异质性能源生产企业和化石能源资产积累决策机制的多部门动态一般均衡模型，讨论了不同环境政策对应的碳减排路径，以及政策规制下的减排对社会福利的影响. 本研究发现，减排政策将导致能源企业化石能源储备资产价值下降，带来“碳泡沫”破裂以及化石能源资产的逐步搁浅，影响能源部门融资和生产，并最终造成总产出与总消费下降. 相比金融政策和产业政策，采用税收政策进行减排带来的福利损失较小，而在税收政策中能源税能最大化降低扭曲，提升社会福利；在化石能源储备资产搁浅带来的“碳泡沫”方面，采用能源税减排导致的“碳泡沫”最小，而采用化石能源储备积累税带来的“碳泡沫”最大.

关键词：“碳泡沫”；融资约束；减排政策；资产搁浅

中图分类号：F015；X196 **文献标识码**：A **文章编号**：1007－9807(2025)08－0032－17

0 引 言

“碳达峰”和“碳中和”是当今世界各国面临的重要议题. 《巴黎协定》签署后，各主要国家都颁布了各自的减排目标：中国宣布将在 2030 年实现碳达峰，2060 年实现碳中和；美国宣布 2025 年温室气体排放量要较 2005 年下降 25%，在 2050 年达成碳中和. 二十大报告指出，要“完善能源消耗总量和强度调控，重点控制化石能源消费”. 在此背景下，研究不同政策与经济低碳转型的关系，进而讨论政策工具的选择尤为重要.

近年来针对环境政策带来搁浅资产的问题讨论不断增加. 碳泡沫与搁浅资产是一个问题的两个方面. 根据维基百科的定义，碳泡沫是“依赖化石燃料能源生产的公司估值中的假设泡沫，其原因是未来化石燃料储备的价值下降，因为它们无法用于满足碳预算”. 化石能源储备是能源企业重要的资产，会影响企业的估值：2004 年 1 月，壳牌公司削减了 20% 的化石能源储备，一周内股价下跌了 10%. 在存在金融摩擦的环境里，公司股价影响其融资能力[1]，减排政策可能导致能源企业的化石能源储备价值下降，压缩融资空间，带来较大产出和福利损失.

随着全球变暖等问题的日益严重，大量经济学家开始探讨如何在传统的经济模型中考虑环境污染因素，并以此讨论最优的环境监管政策. 一些研究着眼于分析能源作为投入品的情况下的最优政策应对，讨论了财政政策[2,3]以及货币政策[4]如何影响经济运行，以及不同环境政策的效果对比和协同关系[5]. 另外一些研究将排放和污染作

① 收稿日期：2023－12－01；修订日期：2024－04－16.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(72250064；72122011)；清华大学资助自主科研计划项目(2023THZWJC03).
通讯作者：董 丰(1984—)，男，江苏连云港人，博士，副教授，博士生导师. Email：dongfeng@sem.tsinghua.edu.cn

为非期望的产出，将污染引入传统的动态随机一般均衡(DSGE) 模型，构建环境 DSGE 模型. Heutel[6] 为这类模型提供了一个基础框架，即生产带来排放，排放提高污染，污染影响生产. 大量研究讨论了常规财政货币政策[7]、非常规政策[8] 以及绿色金融[9] 如何影响产出、污染等. 周基航等[10] 发现资产泡沫的存在有助于绿色部门扩张，可能提高经济增速. 近年来，学者开始关注碳减排对应的转移路径. 潘冬阳等[11] 基于 Acemoglu 等[12] 构建两部门增长模型，讨论了绿色金融如何影响经济的绿色化转型; 靳伟等[13] 基于增长模型模拟了我国碳中和的转移路径; Fried 等[14] 和 Carattini 等[15] 讨论了经济的低碳化转型对应的政策不确定性风险. 但总体而言，针对我国双碳转型路径的研究仍相对不足.

本研究讨论政策减排带来的“碳泡沫”，即政策规制带来的化石能源储备资产搁浅(stranded asset) 问题. McGlade 和 Ekins[16] 估计为了实现 2050 年前全球升温目标，目前约 1/3 的石油储量、1/2 的天然气储量和超过 80% 的煤储量都不能被使用; Mercure 等[17] 估计落实《巴黎协定》会带来约 9 万亿美元的搁浅资产; Sen 和 Von Schickfus[18] 发现气候政策的公布导致相关企业的估值在 5 天内下降了约 20%; 陈艳莹等[19] 发现被评定为“绿色工厂”后企业的股价有显著提升; 韩立岩等[20] 也发现绿色概念股票相比其他股票具有显著风险溢价; Kalkuhl 等[21] 以及 Comerford 和 Spiganti[22] 讨论了存在搁浅资产的情况下环境政策的宏观转型效应. 在国内，何晓贝和马骏[23] 指出了碳中和路径上资产搁浅可能带来的宏观经济风险，朱民等[24] 强调了碳中和转型对资产所有者的影响. 一系列研究实证分析了减排政策对企业信贷的影响[25, 26]，但理论和定量分析相对较少.

相比文献，本研究的创新点在于引入了包含异质性企业的能源部门[27, 28]，并将化石能源储备作为能源企业的资产储备，在包含金融摩擦的模型中讨论了政策变动在减排转型路径上对资产价格与宏观经济的影响. 理论分析发现，采用金融政策或环境产业政策等非价格型政策实现减排会导致能源部门内部资源错配加剧，带来资产搁浅和生产抑制，而相比之下采用碳税等价格政策对资源错配的影响较小.

在定量研究部分，本研究分析发现，资源投资税和金融政策的减排空间较小，产业政策和能源税的减排空间较大. 从福利效应看，采用金融政策和产业政策减排都会导致福利下降，税收政策的福利效应相对较高. 在税收政策中，能源税相比能源投资税能更好地提升社会福利. 资产价格方面，采用能源税进行减排对应的“碳泡沫”最小，通过金融政策和产业政策减排对应的“碳泡沫”较大，资源投资税直接降低了化石能源市场价格，对应的“碳泡沫”最大.

理论上，本研究将异质性企业和融资约束引入能源部门，并将化石能源储备作为能源企业的重要资产，探讨了不同减排政策如何影响化石能源储备资产价值，并影响能源企业的投融资行为和经济的碳减排路径，进而分析了政策在稳态和动态上的福利效应; 政策上，本研究分析了当前情况下采用不同政策进行碳减排带来的宏观影响，给出了不同单一政策下的减排成本与收益，为“双碳”政策工具选择提供了一定参考.

1　模型设定②

参考 Golosov 等[2]，本研究构建异质性企业的多部门动态一般均衡模型. 模型结构如图 1 所示. 其中，资源勘探开采部门利用劳动力生产化石能源产品并出售给能源生产部门，作为能源生产部门的化石能源储备; 能源生产部门利用劳动力和化石能源储备生产能源产品提供给最终品部门; 最终品部门利用能源产品、资本和劳动力生产最终品.

② 篇幅所限，部分模型细节未在正文中展示，如有需要，请联系作者获取.

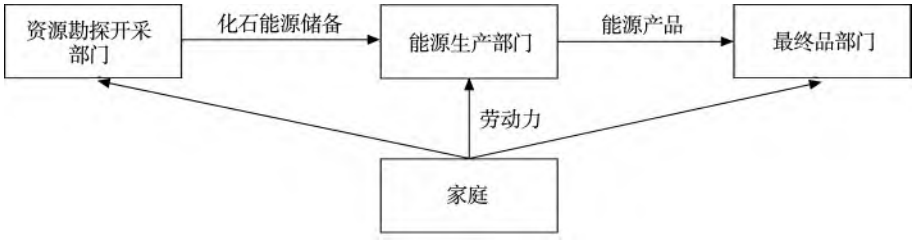

图 1 模型结构

Fig. 1 The model structure

1.1 代表性家庭

经济中存在一个代表性家庭,无弹性地供给 1 单位劳动,持有所有企业的股权,并最优化其终生效用

$$\max_{C_t,s_{t+1}} \ {}_0\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(C_t) \tag{1}$$

代表性家庭的预算约束为

$$C_t + \int_0^1 s_{t+1}(i)\,[V_t(i) - \mathrm{d}_t(i)]\mathrm{d}i = W_t L_t + \Pi_t^M + \int_0^1 s_t(i)\,V_t(i)\,\mathrm{d}i + D_t^F + D_t^K \tag{2}$$

其中 $s_t(i)$ 代表对异质性能源企业的股权持有,Π_t^M 代表资源开采部门的利润,D_t^F 代表最终品部门给家庭的分红,D_t^K 为资本品生产者对家庭的分红. 家庭的一阶条件为

$$\Lambda_t = u'(C_t) \tag{3}$$

$$V_t(i) = d_t(i) + \beta\ {}_t\frac{\Lambda_{t+1}}{\Lambda_t} V_{t+1}(i) \tag{4}$$

1.2 资源勘探开采部门

资源勘探开采部门雇佣劳动,将不可直接使用的自然资源(如煤矿、油井等)勘探并开采为化石能源储备产品(如原煤、原油等). 其生产函数为

$$M_t^n = A_t^M (L_t^M)^{\psi} \tag{5}$$

其中 M_t^n 代表新增的化石能源储备产品流量,L_t^M 代表资源开采部门的劳动力总量. 资源开采部门的最优劳动雇佣条件为

$$\psi A_t^M P_t^M (L_t^M)^{\psi-1} = W_t \tag{6}$$

其中 P_t^M 为化石能源储备的市场价格,W_t 为工资,劳动力可以在部门间自由流动.

1.3 能源生产部门

能源生产部门中存在一系列异质性的能源企业 $i \in [0,1]$,利用化石能源储备与劳动力生产能源,不同企业积累化石能源储备的效率不同,表现为企业的不同投资效率. 企业的生产函数满足 Cobb-Douglas 形式

$$e_t(i) = A_t^E m_t(i)^{\alpha} l_t^E(i)^{1-\alpha} \tag{7}$$

其中 $m_t(i)$ 代表企业 i 在 t 期的化石能源储备存量,$l_t^E(i)$ 代表其雇佣的劳动力总量. 化石能源储备存量 $m_t(i)$ 是企业的状态变量,其积累方程可以表示为

$$m_{t+1}(i) = (1-\delta_m)\ m_t(i) + i_t^M(i)\ \varepsilon_t(i) \tag{8}$$

其中 δ_m 代表资源产品的折旧率,$i_t^M(i)$ 为企业 i 在 t 期对化石能源储备的投资,即购买化石能源产品以增加化石能源储备存量,$\varepsilon_t(i)$ 代表企业对化石能源储备的投资效率,在不同企业和不同时期独立同分布.

求解能源企业的劳动力雇佣最优化问题,可以得到企业的当期营业净收入(收入减去劳动成本)为 $\pi_t = R_t^M m_t$,其中 $R_t^M = \dfrac{\alpha W_t}{(1-\alpha) P_t^E}\left[\dfrac{(1-\alpha) A_t^E P_t^E}{W_t}\right]^{\frac{1}{\alpha}}$,从而其预算约束为

$$d_t(i) = R_t^M m_t(i) + \frac{b_{t+1}(i)}{R_{ft}} - b_t(i) - P_t^M i_t^M(i) \tag{9}$$

其中 $b_t(i)$ 代表企业 i 的借贷总量,R_{ft} 代表利率,$d_t(i)$ 代表企业给家庭的分红. 假设企业的借款受到融资约束

$$\frac{b_{t+1}(i)}{R_{ft}} \leqslant \mu\ {}_t\frac{\Lambda_{t+1}}{\Lambda_t} \bar{V}_{t+1}(m_{t+1}(i), 0) \tag{10}$$

其中 Λ_t 代表随机折现因子,$\bar{V}_{t+1}(m_{t+1}(i), b_{t+1}(i))$ 代表企业在 $t+1$ 期的预期价值. 能源生产企业选择劳动雇佣、借贷以及化石能源储备投资以最大化其分红现金流对家庭的预期价值.

1.4 最终品生产部门

最终品生产部门的竞争厂商利用劳动、资本

以及能源产品生产价格为 1 的最终品. 根据 Carlstrom 和 Fuerst[29]，设定最终品生产函数为 CES 形式

$$Y_t = A_t \left[\gamma E_t^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1-\gamma)\ (K_t^a\ N_t^{1-a})^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}\right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (11)$$

其中 σ 为能源要素 E_t 和其他要素之间的替代弹性，γ 代表能源要素在生产中的重要性，a 为资本 K_t 与劳动 N_t 的加总中资本的比例. 最终品部门进行投资 I_t 积累资本

$$K_{t+1} = (1-\delta_k)\ K_t + I_t \quad (12)$$

最终品部门选择劳动雇佣和资本积累以最大化折现后的利润流. 在竞争均衡中，最终品部门不考虑排放带来的外部性.

1.5　资本生产商

经济中存在代表性的资本生产商，利用最终品生产资本品，并最大化其对于家庭的价值. 容易求解，资本生产者的一阶条件为

$$P_t^K = \left[1 + \frac{\Omega_k}{2}\left(\frac{I_t}{I_{t-1}} - 1\right)^2\right] + \Omega_k\left(\frac{I_t}{I_{t-1}} - 1\right)\frac{I_t}{I_{t-1}} + \beta\,\Omega_k\ {}_t\frac{\Lambda_{t+1}}{\Lambda_t}\left(\frac{I_{t+1}}{I_t} - 1\right)\left(\frac{I_{t+1}}{I_t}\right)^2 \quad (13)$$

其中 Ω_k 代表资本生产商的调整成本.

1.6　碳循环与生产外部性

能源企业使用化石能源储备生产能源时会产生碳排放，而碳排放会增加空气中的总污染 S_t，污染的积累方程为

$$S_t = (1-\delta_s)\ S_{t-1} + \phi\, E_t \quad (14)$$

其中 δ_s 代表自然条件下空气中总碳量的自然消减速度. 空气中的污染会带来负外部性，降低最终品部门的生产效率

$$A_t = A(1 - F(S_t)) \quad (15)$$

参考 Golosov 等[2]，设定 $1 - F(S_t) = \mathrm{e}^{-\nu S_t}$.

1.7　市场出清与均衡

定义加总变量 $I_t^M = \int i_t^M(i)\,\mathrm{d}i$，$L_t^E = \int l_t^E(i)\,\mathrm{d}i$，均衡时各个市场需要出清，包括

最终品市场出清

$$Y_t = C_t + \left[1 + \frac{\Omega_k}{2}\left(\frac{I_t}{I_{t-1}} - 1\right)^2\right] I_t \quad (16)$$

劳动力市场出清

$$L_t^M + L_t^E + N_t = 1 \quad (17)$$

化石能源产品市场出清

$$M_t^n = I_t^M \quad (18)$$

能源市场出清

$$E_t = \int e_t(i)\,\mathrm{d}i \quad (19)$$

债券市场出清

$$\int b_t(i)\,\mathrm{d}i = 0 \quad (20)$$

2　模型求解

首先求解能源企业的资源积累决策，可以证明，能源企业的投资满足一个触发策略.

定理 1　企业的预期价值函数满足

$$ {}_t\frac{\Lambda_{t+1}}{\Lambda_t}\bar{V}_{t+1}(m_{t+1}, b_{t+1}) = Q_t^M\, m_{t+1} - \frac{1}{R_{ft}}\, b_{t+1} \quad (21)$$

能源企业 i 的投资满足一个触发策略.

$$i_t^M(i) = \begin{cases} \dfrac{1}{P_t^M}\left[(R_t^M + \mu\, Q_t^M)\ m_t(i) - b_t(i)\right], \varepsilon_t(i) \geqslant \varepsilon_t^* \\ 0, \varepsilon_t(i) < \varepsilon_t^* \end{cases} \quad (22)$$

其中 $\varepsilon_t^* = P_t^M / Q_t^M$，$Q_t^M$ 为托宾 Q 值，满足欧拉方程

$$Q_t^M = \beta\ {}_t\frac{\Lambda_{t+1}}{\Lambda_t}\left[\begin{matrix} R_{t+1}^M(1+\Gamma_{t+1}) + (1-\delta_m)\ Q_{t+1}^M + \\ \mu\,\Gamma_{t+1}\ Q_{t+1}^M \end{matrix}\right] \quad (23)$$

其中 $\Gamma_t = \int \max\{\varepsilon_t\,\varepsilon_t^* - 1, 0\}\,\mathrm{d}F(\varepsilon_t)$.

经济中的利率 R_{ft} 满足

$$\frac{1}{R_{ft}} = \beta\ {}_t\frac{\Lambda_{t+1}}{\Lambda_t}(1 + \Gamma_{t+1}) \quad (24)$$

相应地，企业的借贷决策满足

$$\frac{b_{t+1}(i)}{R_{ft}} = \begin{cases} \mu\, Q_t^M\, m_t(i), \varepsilon_t(i) \geqslant \varepsilon_t^* \\ \text{不确定}, \varepsilon_t(i) < \varepsilon_t^* \end{cases} \quad (25)$$

定理 1 的证明见附录 A③. 定理 1 表明，能源企业是否投资取决于其投资效率的高低. 一单位投资会带来 $\varepsilon_t(i)/P_t^M$ 单位化石能源储备，而单位化石能源储备的价值为 Q_t^M，因此当且仅当 $Q_t^M\,\varepsilon_t(i)\ P_t^M \geqslant 1$，即 $\varepsilon_t(i) \geqslant \varepsilon_t^*$ 时企业才会选择

③　篇幅所限，附录不在文中展示，如有需要，请联系作者获取.

投资. 一旦企业进行投资则会利用所有资源,并尽可能借贷. Γ_t 代表了经济中的流动性溢价(liquidity premium) ,即单位利润现金流给企业带来的净收益: 如果企业具有较高的投资效率,则会将这一单位现金流用于投资,获得 $Q_t^M \varepsilon_t(i) / P_t^M - 1$ 的净收益; 而如果企业具有较低的投资效率,则不会选择投资,不带来任何净收益.

对个体投资加总可以得到总体投资为

$$I_t^M = \frac{1}{P_t^M}\left[\alpha P_t^E E_t + \mu Q_t^M M_t\right](1 - F(\varepsilon_t^*)) \tag{26}$$

其中 $\alpha P_t^E E_t + \mu Q_t^M M_t$ 代表了企业投资的集约边际: 如果一个企业想要投资,那么其可用资源包括两部分: 运营收益 $\alpha P_t^E E_t$ 和储备抵押融资 $\mu Q_t^M M_t$; $1 - F(\varepsilon_t^*)$ 代表了企业投资的广延边际: 给定状态变量,只有满足 $\varepsilon_t(i) \geqslant \varepsilon_t^*$ 的企业才会进行投资. 因此,融资约束 μ 的变动会从两个方面影响经济中对资源产品的总投资: 广延边际上,融资约束放松会导致资源分配更优,减少投资的企业; 集约边际上,融资约束放松提高了企业的融资能力,使得投资企业可获得的资源更多.

在考虑异质性投资效率的情况下,化石能源储备存量积累方程为

$$M_{t+1} = (1 - \delta_m)\ M_t + \omega(\varepsilon_t^*)\ I_t^M \tag{27}$$

其中 $\omega(\varepsilon_t^*) = \dfrac{\int_{\varepsilon > \varepsilon_t^*} \varepsilon \mathrm{d}F}{1 - F(\varepsilon_t^*)}$ 代表平均资源利用效率. 附录 D 中展示了模型的一般均衡系统.

3 定量分析

本部分对模型的定量性质进行讨论,首先展示稳态求解过程,之后对参数进行校准,讨论不同政策下模型稳态与动态的性质.

3.1 稳态求解

本研究模型的稳态求解主要分为三步: 首先求解能源部门内部企业临界投资效率 ε^* ,进而求解价格系统(W, P^M, P^E) ,最后再根据市场出清求解均衡中所有宏观变量的取值. 篇幅所限,稳态求解过程在附录 D 中具体展示,此处只展示核心结论.

首先考虑能源部门内部的资源分配,通过能源部门的投资和生产决策,可以求解临界投资效率 ε^* . 可以证明,临界投资效率 ε^* 只与结构参数有关,而与价格系统无关.

定理 2 稳态的临界投资效率与价格系统无关,满足

$$\frac{1}{\varepsilon^*} = \beta\left[\left(\frac{1}{1 - F(\varepsilon^*)}\frac{\delta_m}{\omega(\varepsilon^*)} - \mu\frac{1}{\varepsilon^*}\right)(1 + \Gamma(\varepsilon^*)) + (1 - \delta_m + \mu\Gamma(\varepsilon^*))\frac{1}{\varepsilon^*}\right] \tag{28}$$

定理 2 的证明见附录 A. 金融政策收紧(μ 下降) 和产业政策收紧(δ_m 上升) 会导致临界投资效率下降和部门内资源分配恶化.

接下来考虑最终品部门. 由于模型中存在污染外部性,最终品部门的生产并非规模收益不变(能源使用 E 增加时,总污染 S 也增加,影响生产率) ,因此给定价格体系可以直接通过最终品部门的一阶条件求解其能源、资本和劳动的使用,进而求解劳动力分配. 注意这里考虑的是竞争均衡,若考虑社会最优均衡,则能源定价方程会发生变动.

定理 3 考虑生产外部性后,对能源的定价降低. 不考虑外部性时,能源价格满足

$$P^E = Y_E \tag{29}$$

而考虑外部性后,能源定价方程为

$$P^E = Y_E - \frac{\phi}{1 - \beta(1 - \delta_s)}\varepsilon \tag{30}$$

其中 Y_E 代表能源的边际产值, ε 代表污染带来的生产外部性.

定理 3 的证明见附录 A. 本研究讨论不同政策干预对碳排放以及化石能源储备 M_t 的市场价值 $P_t^M M_t$ 的影响,从而分析不同政策减排场景下“碳泡沫”的破裂对经济造成的影响,以及如何调整政策组合使得碳泡沫更加平稳地破裂,减少福利损失.

3.2 参数取值与模型校准

本研究研究的是政策条件下经济的绿色化转型,为中长期问题,取一期为 5 年,对应 $\beta = 0.97^5$. 标准化不同部门基准条件下的生产率,取 $A = A^M = A^E = 1$. δ_k 和 δ_m 是两种资产 5 年内的折旧率,取 $\delta_k = \delta_m = 0.3$, 对应两类资产每年折旧

7%，与文献取值相符. a 和 α 代表了能源部门与最终品部门中的劳动占比，根据 Carlstrom 和 Fuerst[29] 的校准，本研究取 $a = \alpha = 0.5$，代表劳动收入占比约为 50%. μ 代表了融资约束强度，本研究取文献中常用取值 $\mu = 0.7$. η 代表能源部门企业投资效率的分布分散程度，参考董丰和许志伟[28]，取 $\eta = 2.5$. σ 代表生产过程中能源与资本－劳动组合之间的替代弹性，根据 Kim 和 Loungani[30]，取 $\sigma = 0.59$.

γ 决定了稳态时能源消费占总 GDP 的比重 $P^E E/Y$. 根据美国能源信息管理局，美国能源消费占总产出的比值约为 6%④，2021 年中国的能源强度约为美国的 1.5 倍（中国 GDP 的能源强度为 2.13 kWh/美元，美国为 1.48 kWh/美元），同时中美的能源价格相近（以工业生产最常使用的电价为例，美国 2021 年平均电价为 0.87 元人民币/ kWh，即 0.11 美元/kWh⑤，中国工业用电按照规定，平均时期 0.725 元/kWh，高峰时段 1.025 元/kWh，与美国接近），因此对应的能源占总产出比重 $P^E E/Y$ 约为美国的 1.5 倍，即约 9%，对应取 $\gamma = 0.04$. 附录 C 展示了更换 γ 取值时的主要结果，结果对参数取值较为稳健.

ψ 决定了稳态时能源开采部门增加值占 GDP 的比重 $P^M M^n/Y$. 化石能源包括石油、天然气和煤炭，根据 2020 年投入产出表，将“煤炭采选部门”和“石油和天然气开采部门”认定为自然资源开采部门，同时，“石油、炼焦产品和核燃料加工品”中也应当有部分属于自然资源开采部门. “煤炭采选部门”和“石油和天然气开采部门”占总产值比重为 1.8%，包含“石油、炼焦产品和核燃料加工品”的总产值占 GDP 比值为 2.8%. 选取 $\psi = 0.9$，使得基准情况下稳态时能源开采部门总产值占 GDP 比重约为 2.4%.

ϕ 和 δ_s 决定了空气中污染的产生以及积累速度. 根据 Golosov 等[2]，取 $\phi = 0.5$，根据 Heutel[6]，二氧化碳的半衰期是 83 年，对应的每年折旧为 0.008，因此 5 年折旧 $\delta_s = 0.04$. 对于外部性参数 ν，根据 Golosov 等[2]，在基准状态下本研究考虑 $\nu = 0.04$. 所有参数的取值以及校准标准如表 1 所示.

表 1　参数取值及校准标准

Table 1 Parameter values and targets

参数	取值	标准
A	1	标准化
A^M	1	标准化
A^E	1	标准化
δ_k	0.3	文献标准值
δ_m	0.3	文献标准值
δ_s	0.04	Heutel[6]
γ	0.04	能源消费比重
σ	0.59	Kim 和 Loungani[30]
a	0.5	Carlstrom 和 Fuerst[29]
β	0.975	文献标准值
ϕ	0.5	Golosov 等[2]
ψ	0.9	开采部门比重
α	0.5	Carlstrom 和 Fuerst[29]
η	2.5	董丰和许志伟[28]
ν	0.04	Golosov 等[2]

3.3　稳态分析

本部分对模型的稳态进行分析，讨论不同政策带来的减排效果以及对应的产出和消费损失. 同时，针对每类政策，本研究计算了化石能源储备的总价值变动，并将其定义为当前价值中的“碳泡沫”：在减排的政策约束背景下，现有的化石能源储备不能发挥其目前的价值，造成资产搁浅. 同时，由于融资约束的存在，能源企业的资产搁浅又会导致其融资能力下降，生产受到抑制，进而影响整体经济的产出与福利，即“碳泡沫”的破裂带来的福利损失.

本研究讨论三类政策：金融政策、产业政策与税收政策. 金融政策即政府对 μ 的变动. 收紧融资约束会使得能源部门企业融资能力下滑，导致化石能源储备的价值缩水. 产业政策指政府对 δ_m 的变动. 在“双碳”背景下，中国加速淘汰落后产能，

④　数据来源：https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec1_19.pdf，美国能源信息管理局.

⑤　数据来源：https://www.eia.gov/electricity/state/，美国能源信息管理局.

可以理解为限制能源部门储备化石能源资本，倒逼最终品部门减少对化石能源的使用⑥. 更高的 δ_m 对应着更低的化石能源储量以及更低的投资效率，进而降低化石能源总价值. 税收政策部分讨论三类政策：对最终品部门购买能源征税、对能源部门的营业收入征税以及对能源部门购买化石能源储备征税. 对每类政策，本研究计算了不同政策强度下的减排效果以及福利效应，并进行比较.

3.3.1　金融政策对稳态的影响

首先讨论金融政策对稳态的影响，结果如图 2 所示. 图 2 中左侧子图展示了不同金融政策下的稳态消费，右图展示了稳态碳排放，其中虚线代表基准情况下的社会最优水平碳排放. 收紧金融政策可以有效降低碳排放量：将 μ 从 0.7 下降到 0.11 可以将碳排放量降低到基准情况下的最优水平. 但是，收紧融资约束带来的减排效果是有限的：在融资约束完全收紧时，总排放下降幅度仅有 14%，对应的排放强度下降约为 12%. 同时，降低 μ 可能会带来消费的下降. 融资约束的收紧在三个方面影响了能源部门的生产与投资：一方面，更小的 μ 在集约边际上限制了企业的可用资金；另一方面，收紧融资约束会导致临界投资效率 ε^* 下降，恶化了部门内部的资源错配，导致整体投资效率下降；同时，ε^* 的下降在广延边际上增加了选择投资的企业总量. 三种效应共同作用，带来了更低的投资与能源生产，进而导致福利损失.

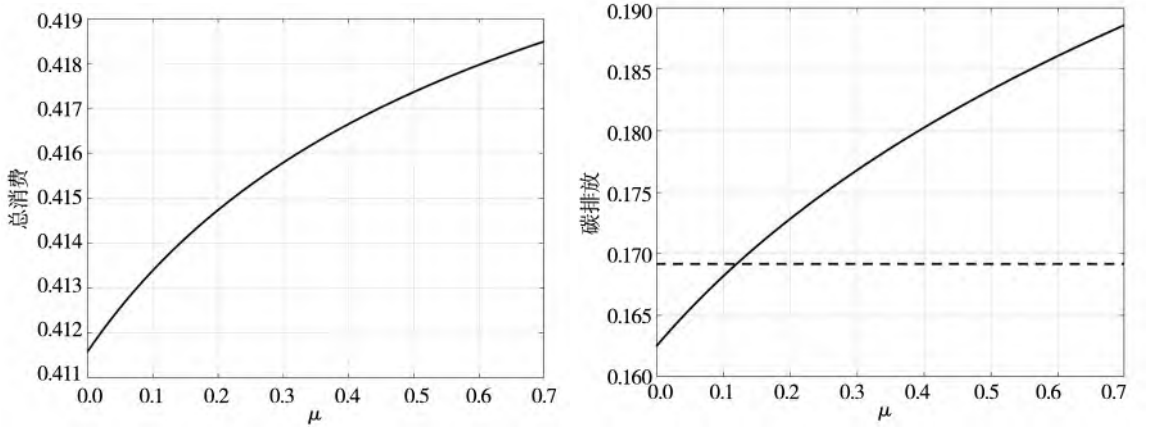

图 2　金融政策对稳态消费（左）和碳排放（右）的影响

Fig. 2 The effect of financial policy on steady-state consumption (left) and carbon emission (right)

同时，收紧融资约束抑制了能源部门企业的融资、投资与生产行为，可能带来化石能源储备价格 P^M 的下降，导致能源企业的资产搁浅. 本研究将 μ 下降后化石能源储备价值 $P^M M$ 相比其原始价值 $P_0^M M_0$ 的减少部分定义为“碳泡沫”，并计算不同 μ 下的“碳泡沫”大小，结果如图 3 所示. 随着减排效果的提升，“碳泡沫”的大小也在不断增大，若要达到最终 14% 的碳减排效果，对应的“碳泡沫”大小为原始资产价值的超过 30%.

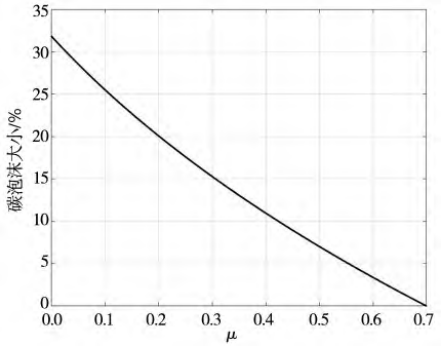

图 3　金融政策与“碳泡沫”大小

Fig. 3 Financial policy and the size of the “carbon bubble”

⑥ “十三五”期间，去产能被列为供给侧结构性改革的首要任务. 国资委 2020 年 12 月 29 日在京举行深化供给侧结构性改革、推动企业高质量发展媒体通气会，指出 2016 年—2020 年，中央企业关闭退出钢铁产能 1 644 万 t，煤炭产能 1.19 亿 t，整合煤炭资源 2.4 亿 t，落后产能有序退出工作稳步推进. 例如，“十三五”期间中煤集团主动引导有序退出煤炭落后产能，关闭 11 座矿井退出产能 2 450 万 t，核减 6 座矿井产能 2 306 万 t，累计化解煤炭过剩产能 4 756 万 t. 在给定能源部门的情况下，有序去产能可理解为加速化石能源储备的折旧，从而降低化石能源对应的能源产品生产.

3.3.2　收紧环境产业政策对稳态的影响

本部分讨论产业政策，即改变 δ_m 对稳态的影响. 政府可以通过行政命令限制能源企业储备化石能源，在模型中表现为对化石能源储备折旧率 δ_m 的规制. 本部分将 δ_m 在 [0.3，0.7] 上变动，对应每年折旧率为 7% ~22%，讨论 δ_m 变动对稳态的影响，结果如图 4. 更高的 δ_m 会抑制能源部门对化石能源储量的积累，从而抑制其对能源的生产，进而降低总碳排放. 根据本研究的模拟，将 δ_m 从 0.30 提升到约 0.41 可以将碳排放降低到基准状态下的社会最优值. 同时，收紧产业政策同样会带来资源错配程度的加剧，造成投资效率损失. 在稳态时，更高的折旧率 δ_m 会带来更低的产出和消费. 相比收紧金融约束，产业政策收紧带来的减排空间更大，将 δ_m 提升到 0.7 可以达到 25% 的减排，对应的排放强度下降约为 19%. 类似地，可以计算不同产业政策强度 δ_m 下化石能源市场价值的变化幅度，计算对应的“碳泡沫”大小，结果如图 5 所示. 与之前结果类似，更强的产业政策和更高的减排对应更大的“碳泡沫”，当 δ_m 上升到 0.7 时，经济中化石能源储备的总价值会缩水 50% 以上，而根据金融加速器理论，化石储备是影响能源企业融资的重要因素，因此其价值的下降会一步限制能源企业的融资、生产、投资行为，进一步抑制能源的使用，带来产出和消费的下降.

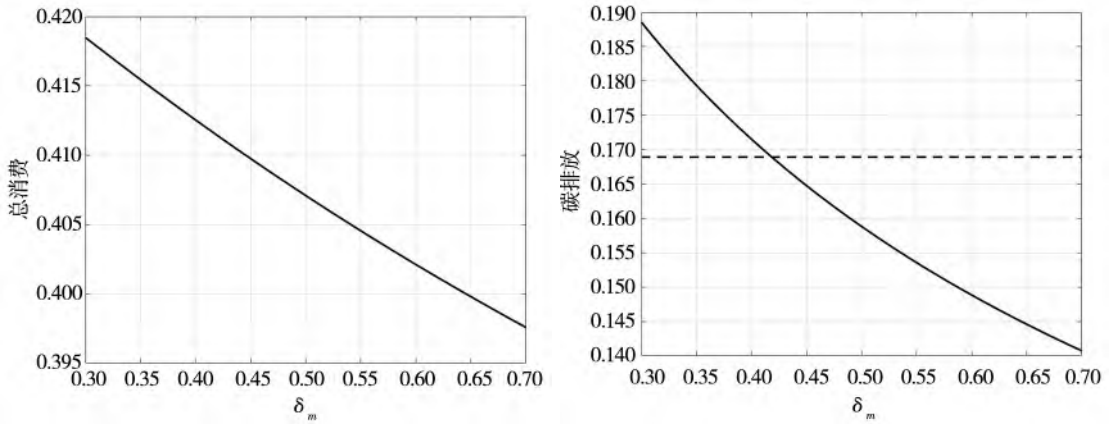

图 4　产业政策对稳态消费(左)和碳排放(右)的影响

Fig. 4 The effect of industrial policy on steady-state consumption (left) and carbon emission (right)

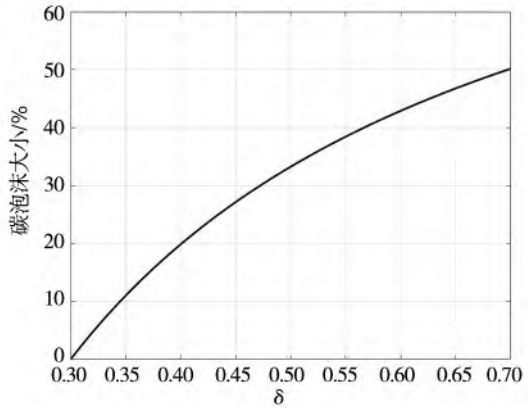

图 5　产业政策与“碳泡沫”大小

Fig. 5 Industrial policy and the size of the “carbon bubble”

3.3.3　税收政策对稳态的影响

本研究主要讨论三类税收政策: 对最终品部门购买能源征税、对能源部门企业收入征税以及对能源部门企业购买化石能源储备征税，并比较不同结构的税收对稳态的不同影响. 与金融政策以及产业政策不同，税收政策不会改变稳态部门内资源分配情况，因而不会加重资源错配.

定理 4　本研究讨论的三类税收政策都不会影响稳态临界投资效率 ε^*.

定理 4 的经济学直觉如下: 税收政策对能源部门中的所有企业均具有相同的效应，不受企业异质性的影响. 而金融政策和产业政策对选择投资和不选择投资的企业具有异质性的影响: 具有较高投资效率的企业会选择投资，其决策受到融资约束与化石能源储备折旧率更大影响. 因此，金融政策和产业政策会更大程度地影响具有较高投资效率的企业，造成更严重的资源错配.

给定其他参数，调整各类税收取值在 [0，0.6] 之间并计算稳态，结果如图 6 所示. 从图中可以看出，随着税收的增加，总消费呈现倒 U 型

趋势,存在最优税率,这是因为税收存在两方面作用: 一方面,税收能在一定程度上抵消生产负外部性,使得能源使用更加接近社会最优水平; 另一方面,税收的存在扭曲了能源部门的生产激励,抑制了能源部门的生产,更高的税收会带来能源部门的萎缩,进而降低产出与消费. 两者共同作用,造成了倒 U 型的消费曲线. 比较不同的税收政策发现,对最终品部门购买能源征税和对能源部门的总收入征税可以达到相同的最大消费,而对能源部门购买化石能源储备征税所能达到的最优消费相对较低. 这是因为对能源部门总收入征税以及对最终品部门征收能源税都不会影响稳态时托宾 Q 值,同时由于税收对买方和卖方征收的等价性,能源部门收入税和最终部门能源税可以达到完全一致的稳态政策效果. 但是在对能源部门企业购买化石能源储备征税时,能源部门临界投资效率满足的方程修正为

$$\varepsilon_t^* \ Q_t^M = (1+\tau)\ P_t^M \tag{31}$$

注意此时勘探开采部门的价格仍为 P_t^M,但能源部门的价格要考虑税收,因此更高的税可能会提升稳态时的托宾 Q 值,带来额外的扭曲,相比其他两种政策,只能带来更小的福利提升. 不同税收政策的减排效果存在差异. 当限定税率不超过 60% 时,能源部门利润税的减排效果最好,对能源部门的收入征税 60% 可以减排 35%,并使得产出的排放强度下降约 28%; 最终部门能源税的减排效果其次,对最终部门购买能源征收 60% 的税可以减排 20%,对应排放强度下降 18%; 化石能源投资税的减排效果最差,对购买化石能源储备征收 60% 的税只能减排 11%,并使得排放强度下降 8%.

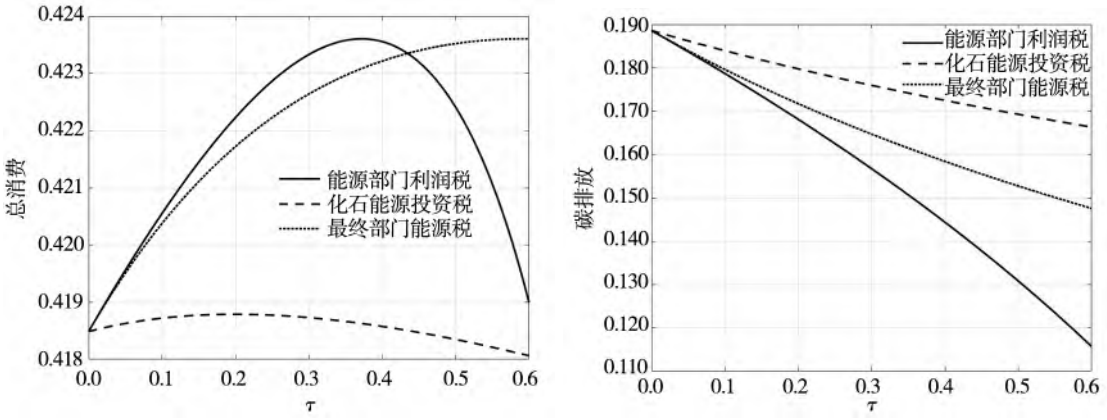

图 6　税收政策对稳态消费(左)和碳排放(右)的影响

Fig. 6 The effect of tax policy on steady-state consumption (left) and emission (right)

进一步地,针对每种税收,计算不同税率下化石能源储量价值相对于其原始稳态值的变动,并计算对应“碳泡沫”的大小,结果如图 7 所示. 可以看出,相同税率下,能源部门利润税在高减排的同时也对应更大的“碳泡沫”,$\tau = 60\%$ 时对应的“碳泡沫”大小接近其原始价值的 50%; 化石能源投资税对应的“碳泡沫”大小其次,60% 的税率对应的“碳泡沫”大约为其原始价值的 35%; 最终部门能源税对应的碳泡沫最小,60% 的能源税情况下碳泡沫只占其原始价值的 25%. 相对而言,对能源部门企业投资于化石能源储备征税在减排效应有限的同时还会带来相对更大的碳泡沫,相比直接矫正外部性的能源税和能源企业税在稳态上是较差的选择.

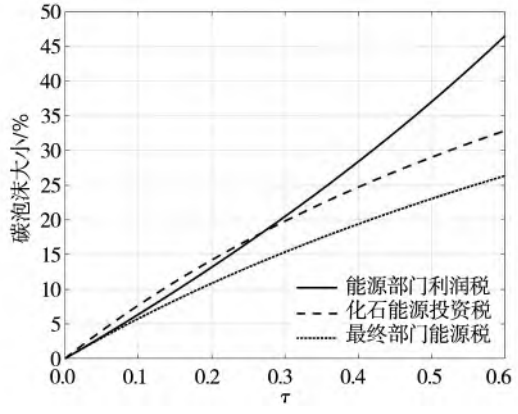

图 7　税收政策与“碳泡沫”大小

Fig. 7 Tax policy and the size of the “carbon bubble”

3.3.4　不同政策稳态效应的比较

本部分对不同政策的稳态效应进行比较,即在控制减排效应相同的情况下,比较各类政策对

消费和“碳泡沫”的影响. 由于前一部分已经说明化石能源投资税效果相比能源部门利润税和最终部门能源税更差,而后两种税在结构上并无差异,本部分在税收政策部分只选择能源部门利润税进行比较. 篇幅所限,结果展示于附录. 在三类政策中,税收政策不会带来部门内的资源额外错配,对经济效率影响最小,对应最高的稳态消费; 另外两种政策相比,由于产业政策直接影响了化石能源储备的积累,因此对经济效率影响更大,带来的消费损失也更大: 为了达到 25% 的减排效果,使用产业政策会带来约 5% 的稳态消费损失. 金融政策相比产业政策对经济效率的影响较小,但其在三类政策中减排效果最为有限,最高只能实现约 14% 的减排; 税收政策的稳态效率更高,但较高的减排要求不合理的高税率: 为了达到 25% 的减排需要在现有基础上增加 40% 左右的税率. 从“碳泡沫”大小角度来看,相比金融政策和产业政策,能源税对经济效率的影响较小,对化石能源储备资产价值的影响有限,对应的“碳泡沫”也较小,而金融政策和产业政策带来的化石能源储备资产价值的下降更多. 相比而言,金融政策对价格的影响更大,在相同的减排效果下可能带来更大的“碳泡沫”. 此外,能源部门投资税会直接降低化石能源储备的市场价格,也会带来较大的“碳泡沫”.

3.4　动态分析

本部分讨论动态层面不同政策的效果比较. 为了保证政策的可比性,本研究计算相同减排效果下不同政策对应的转移路径⑦. 根据之前的分析,对能源部门企业征税和对最终品部门购买能源征税可以达到相同的效果,因此本研究将这两类政策统称为“能源税”,并用 τ_e 表示能源税,用 τ_m 表示对能源部门企业的化石能源投资税. 为了实现 10% 的减排所需的单一政策强度为: $\mu = 0.13$、$\delta_m = 0.41$、$\tau_e = 0.19$、$\tau_m = 0.49$,为了达到相同的减排水平,使用产业政策对现有经济参数结构的变动最小(每年折旧从 6.9% 上升到 10.1%) . 不同政策下的转移路径如图 8 所示.

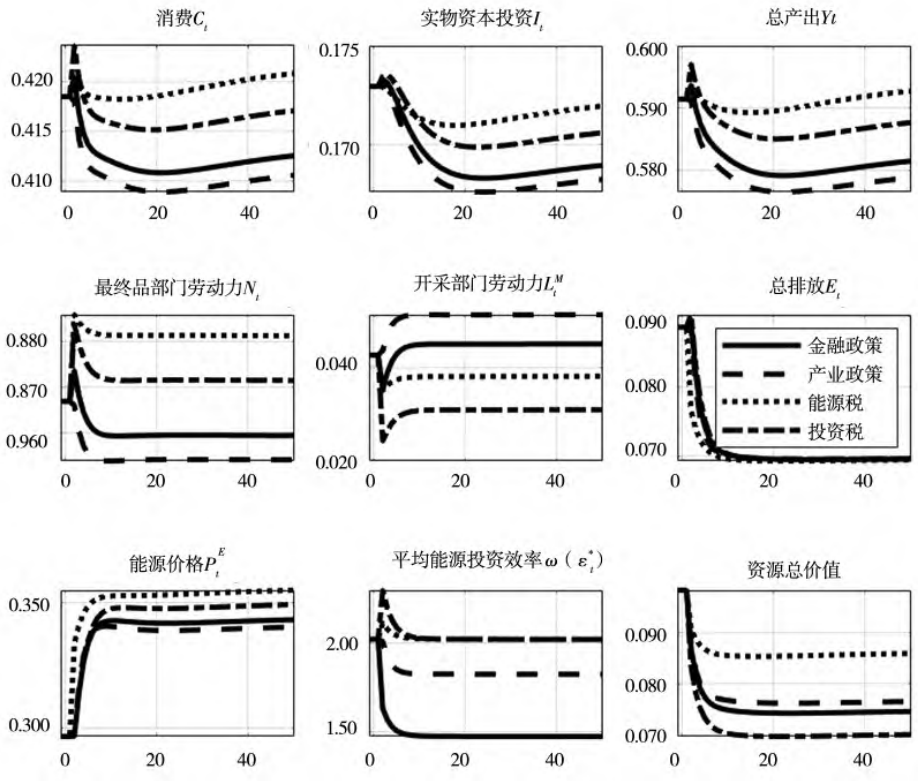

图 8　不同政策对应转移路径

Fig. 8 Transition paths under different policies

⑦　本研究假设经济受到一次未预期到的政策冲击(MIT 冲击) ,并计算理性预期下的转移路径.

从转移路径可以看出，当采用金融政策和税收政策时，政策出现后价格体系的变化会导致劳动力出现短期内由其他部门向最终部门的转移，从而带来短期内产出、消费和实物资本投资的快速增加. 在初期劳动力流动带来的消费增加后，能源价格的上升、工资的下降以及能源使用的下降使得产出和消费缓慢下降到新的稳态水平，对应的部门劳动力重新分配到新的稳态水平. 比较不同的税收政策，征收投资税会导致短期化石能源投资需求下降更多，从而带来更为剧烈的劳动力市场流动，即劳动力从勘探开采部门流出，带来更大的产出和消费增加. 采用产业政策的情况下，δ_m 的增加使得能源部门短期内被迫增加对化石能源储备的需求，勘探开采部门劳动力在施加政策后缓慢上升，对应的最终品部门劳动力缓慢下降，不会出现另两种政策情况下短期劳动力市场的快速流动，对应的产出、消费和实物资本投资缓慢下降到新的稳态水平. 当采用税收政策时，短期内投资效率相对更高的企业可以积累更多的资源，因此短期内平均投资效率会有所上升，之后缓慢下降到正常稳态值；采用金融政策时，μ 的下降会立刻驱动临界投资效率和平均投资效率的下降；而采用产业政策时，平均投资效率则是在短期的较小程度下降后缓慢转移到最终的稳态水平. 在转移路径上，使用金融政策时第一期可能出现短暂的能源使用上升，这是因为劳动力流入最终品部门后最终品部门的产出增加，对能源的需求增加，而在第一期后能源部门的供给下降效应占主导，能源使用和排放逐渐下降到新的稳态值. 根据模型模拟，采用税收政策的减排效果最快，在 1 期(5 年) 内即可减排约 6.2%，之后经过 8 期(40 年) 达到新的稳态水平. 相比之下，采用金融政策或产业政策在政策执行初期只能实现约 4% 的减排，之后经过 10 期(50 年) 才能达到新的稳态水平. 在转移路径上，化石能源储备的总价值会逐渐下降，使用能源使用税收政策时化石能源储量总价值的下降最少，使用能源投资税收政策时下降最多.

根据模型转移动态，可以计算减排路径的福利效应. 定义不同政策条件下的福利为

$$W = \sum_{t=1}^{\infty} \beta^t \ln(C_t) \tag{32}$$

本研究使用消费等价(consumption equivalent) 来衡量政策带来的减排转移路径的福利效应，即原有稳态上的消费需要变动多少才能使得总福利与转移路径上总福利相同

$$\sum_{t=1}^{\infty} \beta^t \ln((1+ce)\ C_{ss}) = W \tag{33}$$

式中 ce 代表转移路径的福利效应.

针对不同政策，将政策收益定义为减排程度，政策成本定义为转移路径上的福利损失，可以得到图 9 的结果. 从福利来看，采用税收政策减排优于采用金融政策和产业政策. 采用税收政策减排的情况下，由于部门内企业间资源分配不被恶化，减排可以带来相当于 0.2% 消费提升的福利增加. 在税收政策中，采用能源税相比采用投资税带来的福利效应更高，且减排空间更大. 采用金融政策或产业政策进行减排可能在长期造成一定的福利损失，金融政策在减排空间有限的同时，造成的福利损失相对较小，而使用产业政策抑制能源部门积累化石能源储量虽然可以有效降低碳排放量，但是会带来较大的福利损失：如果只采用产业政策进行减排，为了达到 25% 的减排造成的福利损失相当于消费永久下降约 4%.

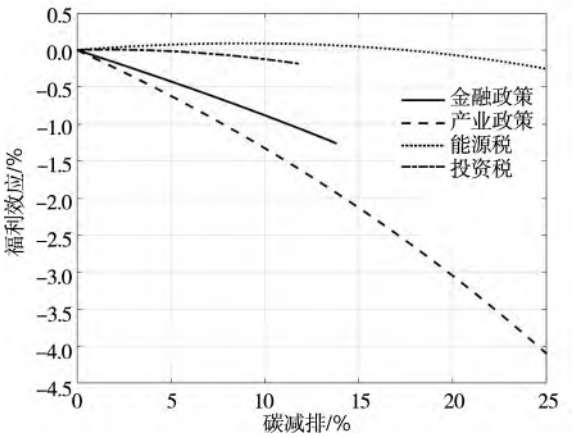

图 9 不同政策的动态福利效应

Fig. 9 Dynamic welfare effect of different policies

3.5 有关政策协同的进一步讨论

之前的分析中只考虑了单一政策的效果，但现实中可能存在不同政策的协同效应，本部分简

要讨论不同政策协同对经济的影响，在非税收政策中主要讨论金融政策，而在税收政策中集中讨论能源税和投资税. 篇幅所限，此处主要展示政策协同的稳态福利和减排效应，附录中展示了不同政策协同背景下减排路径的动态福利效应，结果与稳态福利效应类似，这里不再赘述.

首先考虑金融政策和税收政策之间的协同效应. 根据前文分析，能源税在福利效应上优于投资税，因此本部分主要讨论金融政策和能源税之间的协同. 调整金融约束和能源税的取值，可以计算不同政策组合下的稳态福利效应，结果如图 10 所示.

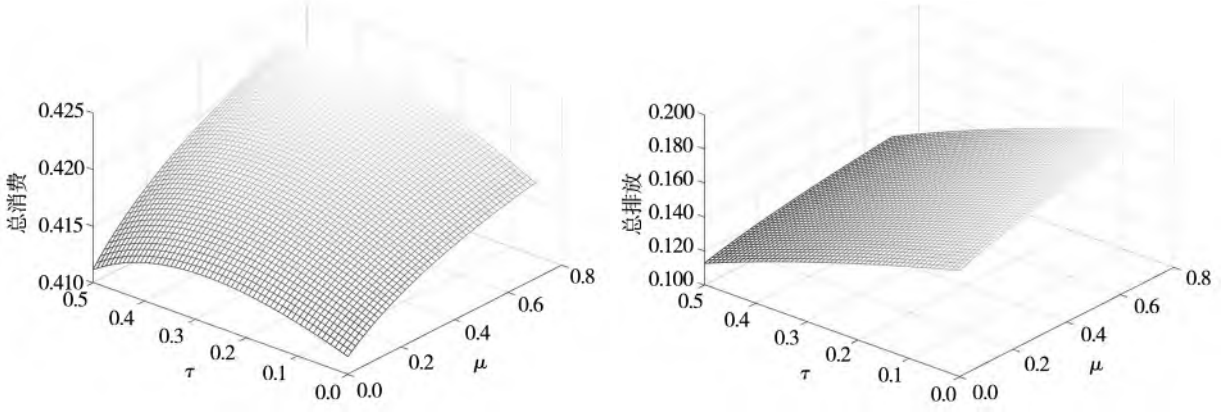

图 10　金融政策与税收政策协同效果

Fig. 10 The effect of combination of financial policy and tax policy

图 10 左侧子图展示了不同政策组合下稳态福利的变化. 给定税收的情况下，稳态福利随金融约束的放松而提升；而给定金融约束 的情况下，稳态福利与税收呈现倒 U 型关系. 同时，金融政策与税收政策之间存在一定替代性：当金融政策较为宽松时，最优的税收政策要求更高的税率；而税收较高时，放松融资约束对稳态消费的提升作用更加明显. 右侧子图展示了不同政策组合下的碳排放高低. 提升税收和紧缩融资都可以降低碳排放量，其中紧缩税收的减排效果更为明显. 两种政策在减排上并不存在显著的相互影响. 当税率为 0 时，金融约束由 $\mu = 0.7$ 下降到 $\mu = 0$ 带来的减排效应为 14.85%；而当税率为 $\tau = 0.5$ 时，减排效应为 14.76%. 当融资约束为 $\mu = 0$ 时，税收由 0 增加到 $\tau = 0.5$ 带来的减排效应为 31.54%；而当融资约束为 $\mu = 0.7$ 时，减排效应为 31.61%.

进一步地，讨论税收政策之间的协同效应. 结果如图 11 所示. 其中左侧子图展示了不同税收强度组合下稳态消费的变化，而右侧子图展示了不同政策强度下稳态排放的变化. 无论能源投资税 τ_m 强度，稳态消费与能源税 τ 之间均呈现倒 U 型关系，即存在最优能源税率. 同时，两类政策之间存在一定替代性，当能源投资税较高时，由于能源投资税已经一定程度上矫正了负外部性的影响，最优的能源税率会有所下降. 但由于能源投资税会带来新的扭曲，最优能源税下的稳态福利可能下滑. 当能源税较低时，稳态消费与能源投资税之间存在倒 U 型关系，但随着能源税的提升，能源投资税矫正外部性的作用逐渐下滑，反而会导致扭曲作用过大，消费下降. 图 11 右侧子图展示了不同税收政策组合的减排效果. 在存在不同税收政策的情况下，能源税的提升相比能源投资税的提升会带来更大的减排效应. 当能源税为 0 的情况下，能源投资税由 0 提升到 50% 带来的减排效应为 11.19%；而当能源税为 50% 的情况下，对应的减排效应为 11.63%. 当能源投资税为 0 时，能源税从 0 提升到 50% 带来的减排效应为 31.61%；而当能源投资税为 50% 时，这个减排效应为 31.95%. 能源税和能源投资税在减排上存在一定互补性，但在数值上较小.

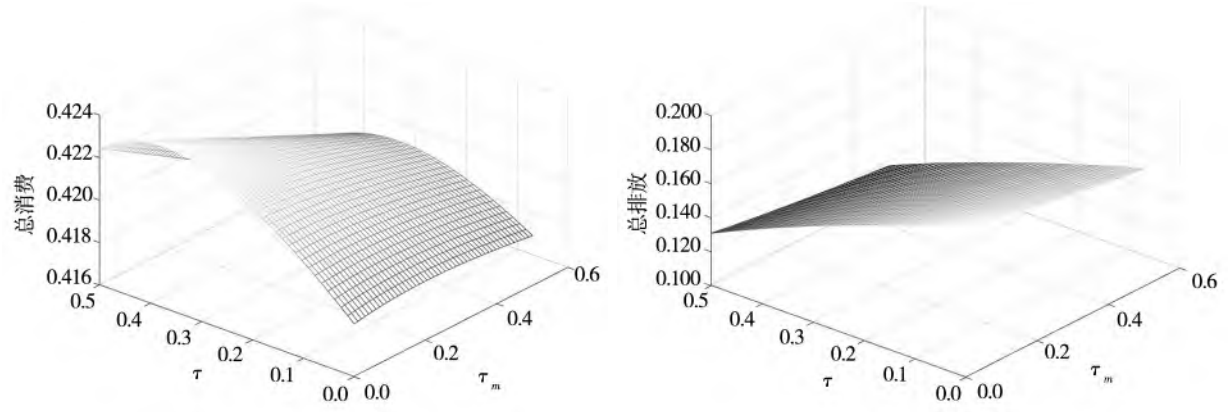

图 11　不同税收政策协同效果

Fig. 11 The effect of combination of different tax policies

3.6　有关最优政策的进一步讨论

之前的分析讨论了政策强度恒定情况下不同政策种类和强度对稳态和动态福利的影响，本部分进一步讨论政策对经济波动的最优动态响应. 由于之前的分析表明对能源使用征税是福利角度来看较优的政策，本部分集中于讨论能源税 τ 的最优动态规则. 引入对最终部门基准生产率的冲击 z_t，此时最终部门的实际生产率为

$$\widetilde{A}_t = z_t \, \mathrm{e}^{-\nu S_t} \tag{34}$$

其中 z_t 满足均值为 1，自回归参数为 ρ_Z 的 log-AR(1) 过程 $\ln(z_t) = \rho_Z \ln(z_{t-1}) + \varepsilon_{z,t}$，$\varepsilon_{z,t} \sim N(0, \sigma_Z^2)$. 本研究假设 $\rho_Z = 0.9$，$\sigma_z = 0.02$[⑧]. 这种最终部门的实际生产率冲击可以解释为能源部门的需求冲击. 正向的能源需求冲击会导致能源价格提升、能源部门生产促进、污染加剧. 在不能准确监测能源部门生产和污染总量的情况下，政府可以根据能源价格调整税率来应对这种波动带来的福利损失. 假设政府采取泰勒规则形式的动态税收政策，根据能源价格对税率进行调整

$$\ln\left(\frac{\tau_t}{\tau^*}\right) = \rho \ln\left(\frac{\tau_{t-1}}{\tau^*}\right) + (1-\rho)\zeta \ln\left(\frac{P_t^E}{P^{E*}}\right) \tag{35}$$

式中 ρ 代表税率的自回归系数，本研究中假设 $\rho = 0.9$，核心结果对 ρ 取值较为稳健，ζ 代表税收对能源价格的反应系数. $\zeta > 0$ 代表政府需要对能源市场进行逆周期调控，即在能源价格上升时提高税率. τ^* 和 P^{E*} 分别代表稳态时的税率和能源价格. 假设政府的目标函数与家庭的福利函数一致，首先计算稳态政府福利最大时对应的税率作为 τ^* 的取值，再在稳态基准上引入生产率冲击，计算不同响应参数 ζ 下的福利效应，结果如图 12 所示.

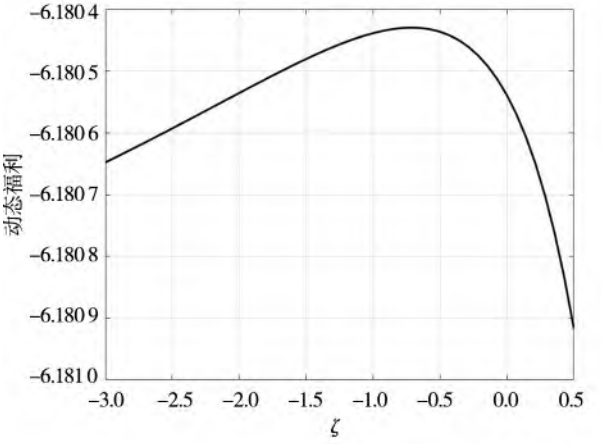

图 12　需求冲击下动态税收政策的福利效应

Fig. 12 Welfare effect of dynamic taxation under cost shock

在基准情况下，最优的动态政策要求对能源部门进行轻微的顺周期调控：当能源价格提高时，应当略微降低税率，促进能源部门的生产. 这是因为在基准模型中政府和消费者均只考虑消费带来的福利，污染只会通过最终品部门的生产外部性作用于经济. 当经济面临正向生产率冲击时，虽然对能源的短期需求提升会使得能源生产增加，污染积累，但这种污染积累的负外部性会部分被正向的生产率冲击所抵消. 为了最大化消费，政府反而应当适当减税，最大化正向生产率冲击带来的消费效应. 相对应的，当波动是由成本冲击带来时，结果可能有所不同. 为了讨论成本冲击的影

⑧ 核心分析结果对冲击过程参数变化较为稳健.

响,假设能源部门的生产率 A_t^E 满足均值为 1 的 log-AR(1) 过程,其他参数取值与上述需求冲击情况下 z_t 的过程一致. 假设经济受到正向能源部门生产率冲击,讨论不同政策响应参数 ζ 对应的福利效应,结果如图 13 所示. 可以看出,当能源市场波动由成本端冲击驱动时,最优响应政策的顺周期程度低于需求端冲击驱动的情况,甚至可能需要适当的逆周期调控. 这是因为当冲击来自能源部门成本端时,能源价格下降反而可能对应能源生产的提升,这时如果进一步减税,反而可能导致污染过多,超过社会合意水平,因此需要更轻微的顺周期调控,甚至逆周期加税抑制能源部门过热,以最大化动态社会福利.

3.7　小结

综上所述,将各类政策的减排效果、福利效应总结如表 2. 为了增加结果的可比性,这里列出了为了达到 10% 减排所需要的政策强度变化、稳态福利效应、转移路径的动态福利效应以及对应的“碳泡沫”大小.

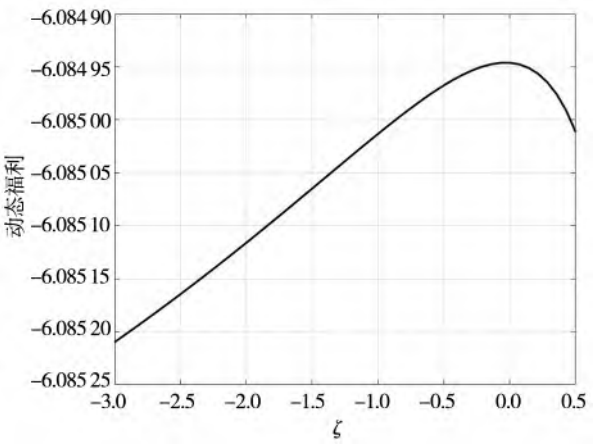

图 13　成本冲击下动态税收政策的福利效应

Fig. 13 Welfare effect of dynamic taxation under cost shock

表 2　各类政策的效果比较(以减排 10% 为例)

Table 2 Comparison of different policies (emission reduction 10%)

政策种类	政策强度	稳态福利	动态福利	碳泡沫大小
金融政策	0.7→0.130 2	-1.11%	-0.88%	23.81%
产业政策	0.3→0.412 6	-1.59%	-1.33%	21.81%
税收政策	—	—	—	—
能源税	0→0.229 1	+0.85%	+0.09%	12.24%
能源企业税	0→0.186 9	+0.85%	+0.09%	12.24%
资源投资税	0→0.485 4	-0.01%	-0.12%	28.54%

在政策空间方面,资源投资税和金融政策的空间均较小,产业政策的减排空间最大,只需要将 δ_m 从 0.3 增加到 0.7 即可降低超过 25% 的碳排放量. 能源企业税的减排空间介于前述两者之间,通过加税也可以达到超过 25% 的减排,但根据模型模拟,需要在现有基础上再增加超过 40% 的税率. 从福利效应来看,采用金融政策和产业政策减排都会导致福利损失,其中采用产业政策的福利损失更大;采用税收政策减排相比其他政策会带来更高的福利,其中采用能源税的福利效应更大. 在“碳泡沫”大小方面,采用能源税或能源企业税进行减排对应的“碳泡沫”最小,采用金融政策和产业政策减排对应的“碳泡沫”较大,采用资源投资税进行减排对应的“碳泡沫”最大,这是因为资源投资税的存在直接降低了化石能源价格. 在政策协同方面,以金融政策为代表的非税收政策和以能源税为代表的税收政策之间在社会福利上存在一定替代性,在减排方面存在较为微弱的替代性;而不同税收政策之间在社会福利上相互替代,在减排方面存在较为微弱的互补性. 在动态政策方面,当经济周期由能源需求端冲击驱动时,最优的动态政策是在能源价格上涨时适当减税以最大化高生产率带来的消费提升;而当经济周期由能源供给端冲击驱动时,最优的动态政策是在能源价格上涨时略微加税以避免能源部门出现过热带来过大的污染.

4　结束语

本研究构建了包含金融摩擦以及异质性能源企业的模型,讨论了不同政策的减排效果及宏观影响. 政策减排目标的实施会导致化石能源储备价值下降,进而影响能源公司的融资能力,并最终影响宏观经济的运行. 本研究将减排政策带来的

化石能源储备价值下降定义为“碳泡沫”的破裂，并分析不同政策对应的“碳泡沫”大小及带来的福利损失. 理论上，本研究发现采用金融政策与产业政策会导致部门内资源错配加剧，整体投资效率下降；而采用税收等价格政策不会加剧资源错配，效率损失较小. 在定量分析部分，本研究对金融政策、产业政策和税收政策等场景下的减排效果、转移路径以及福利效应进行了分析. 模拟表明，资源投资税和金融政策的减排空间均较小，产业政策和能源税的减排空间相对较大. 从福利效应看，采用金融政策和产业政策减排都会导致福利损失，其中采用产业政策的福利损失更大；相比而言，采用税收减排带来的福利损失更小，甚至可能提升福利. 资产价格方面，采用能源税进行减排对应的“碳泡沫”最小，采用金融政策和产业政策减排对应的“碳泡沫”较大，采用资源投资税进行减排对应的“碳泡沫”最大，因为资源投资税的存在直接降低了化石能源价格.

本研究基于包含异质性企业的动态一般均衡模型，讨论了能源部门存在异质性的情况下政策减排对资产价值的影响及其福利效应，为分析中国实现减排目标的政策选择以及减排路径提供了一定参考：当企业存在异质性时，采用金融约束或者产业政策规制进行减排可能会恶化部门内资源错配情况，带来不必要的效率和福利损失；相比之下采用税收等价格政策不会恶化资源错配情况，效率损失相对较小. 但要注意的是，为了方便分析本研究简化了经济中一些重要的特征，例如绿色技术与非绿色技术的发展，外生给定的政策减排目标等. 如果要分析技术发展背景下经济内生的减排路径，则需要引入不同技术，并分析政策引导不同技术的情况下经济的转移路径.

参 考 文 献：

[1] Miao J, Wang P. Asset bubbles and credit constraints [J]. American Economic Review, 2018, 108(9): 2590 – 2628.

[2] Golosov M, Hassler J, Krusell P, et al. Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium [J]. Econometrica, 2014, 82(1): 41 – 88.

[3] Barrage L. Optimal dynamic carbon taxes in a climate-economy model with distortionary fiscal policy [J]. The Review of Economic Studies, 2020, 87(1): 1 – 39.

[4] Diluiso F, Annicchiarico B, Kalkuhl M, et al. Climate actions and macro-financial stability: The role of central banks [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2021, 110: 102548.

[5] Fischer C, Springborn M. Emissions targets and the real business cycle: Intensity targets versus caps or taxes [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2011, 62(3): 352 – 366.

[6] Heutel G. How should environmental policy respond to business cycles? Optimal policy under persistent productivity shocks [J]. Review of Economic Dynamics, 2012, 15(2): 244 – 264.

[7] Annicchiarico B, Di Dio F. Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new Keynesian model [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2015, 69: 1 – 21.

[8] Ferrari A, Landi V N. Whatever it takes to save the planet? Central banks and unconventional green policy [J]. Macroeconomic Dynamics, 2024, 28(2): 299 – 324.

[9] 王 遥，潘冬阳，彭俞超，等. 基于 DSGE 模型的绿色信贷激励政策研究 [J]. 金融研究，2019，(11)：1 – 18.
Wang Yao, Pan Dongyang, Peng Yuchao, et al. China's incentive policies for green loans: A DSGE approach [J]. Journal of Financial Research, 2019, (11): 1 – 18. (in Chinese)

[10] 周基航，董 丰，贾 珅. 绿色经济、资产泡沫与最优政策：基于带有多部门资产泡沫的动态一般均衡视角 [J]. 经济学报，2023，10(1)：47 – 84.
Zhou Jihang, Dong Feng, Jia Shen. Green economy, asset bubbles and optimal policy: A dynamic general equilibrium perspective with multi-sector asset bubbles [J]. China Journal of Economics, 2023, 10(1): 47 – 84. (in Chinese)

[11] 潘冬阳，陈川祺，Michael Grubb. 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，2021，(12)：1 – 19.
Pan Dongyang, Chen Chuanqi, Michael Grubb. Financial policy and low-carbon transition of the economy: A growth per-

spective[J]. Journal of Financial Research, 2021, (12): 1 – 19. (in Chinese)

[12] Acemoglu D, Aghion P, Bursztyn L, et al. The environment and directed technical change[J]. American Economic Review, 2012, 102(1): 131 – 166.

[13] 靳　玮, 王弟海, 张　林. 碳中和背景下的中国经济低碳转型: 特征事实与机制分析[J]. 经济研究, 2022, 57(12): 87 – 103.
Jin Wei, Wang Dihai, Zhang Lin. China's low-carbon economic transitions towards carbon neutrality: Characteristics and mechanisms[J]. Economic Research Journal, 2022, 57(12): 87 – 103. (in Chinese)

[14] Fried S, Novan K, Peterman W B. Climate policy transition risk and the macroeconomy[J]. European Economic Review, 2022, 147: 104174.

[15] Carattini S, Heutel G, Melkadze G. Climate policy, financial frictions, and transition risk[J]. Review of Economic Dynamics, 2023, 51: 778 – 794.

[16] McGlade C, Ekins P. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 ℃[J]. Nature, 2015, 517(7533): 187 – 190.

[17] Mercure J F, Pollitt H, Viñuales J E, et al. Macroeconomic impact of stranded fossil fuel assets[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(7): 588 – 593.

[18] Sen S, Von Schickfus M T. Climate policy, stranded assets, and investors' expectations[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2020, 100: 102277.

[19] 韩立岩, 蔡立新, 尹力博. 中国证券市场的绿色激励: 一个四因素模型[J]. 金融研究, 2017, (1): 145 – 161.
Han Liyan, Cai Lixin, Yin Libo. Green incentive in Chinese securities market: Four factor model[J]. Journal of Financial Research, 2017, (1): 145 – 161. (in Chinese)

[20] 陈艳莹, 于千惠, 刘经珂. 绿色产业政策能与资本市场有效“联动”吗——来自绿色工厂评定的证据[J]. 中国工业经济, 2022, (12): 89 – 107.
Chen Yanying, Yu Qianhui, Liu Jingke. Can green industrial policy form effective linkage with the capital market: Evidence from green factory identification[J]. China Industrial Economics, 2022, (12): 89 – 107. (in Chinese)

[21] Kalkuhl M, Steckel J C, Edenhofer O. All or nothing: Climate policy when assets can become stranded[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2020, 100: 102214.

[22] Comerford D, Spiganti A. The carbon bubble: Climate policy in a fire-sale model of deleveraging[J]. The Scandinavian Journal of Economics, 2023, 125(3): 655 – 687.

[23] 何晓贝, 马　骏. 碳中和对宏观经济的影响[J]. 金融论坛, 2022, 27(5): 3 – 7.
He Xiaobei, Ma Jun. Impact of carbon neutrality on macro economy[J]. Finance Forum, 2022, 27(5): 3 – 7. (in Chinese)

[24] 朱　民, Stern N, Stiglitz J, 等. 拥抱绿色发展新范式: 中国碳中和政策框架研究[J]. 世界经济, 2023, 46(3): 3 – 30.
Zhu Min, Stern N, Stiglitz J, et al. Embracing the new paradigm of green development: A study of China carbon neutrality policy framework[J]. The Journal of World Economy, 2023, 46(3): 3 – 30. (in Chinese)

[25] 苏冬蔚, 连莉莉. 绿色信贷是否影响重污染企业的投融资行为?[J]. 金融研究, 2018, (12): 123 – 137.
Su Dongwei, Lian Lili. Does green credit policy affect corporate financing and investment? Evidence from publicly listed firms in pollution-intensive industries[J]. Journal of Financial Research, 2018, (12): 123 – 137. (in Chinese)

[26] 陈国进, 丁赛杰, 赵向琴, 等. 中国绿色金融政策、融资成本与企业绿色转型——基于央行担保品政策视角[J]. 金融研究, 2021, (12): 75 – 95.
Chen Guojin, Ding Saijie, Zhao Xiangqin, et al. China's green finance policy, financing costs and firms' green transition: A central bank collateral framework perspective[J]. Journal of Financial Research, 2021, (12): 75 – 95. (in Chinese)

[27] Wang P, Wen Y. Speculative bubbles and financial crises[J]. American Economic Journal: Macroeconomics, 2012, 4(3): 184 – 221.

[28] 董　丰, 许志伟. 刚性泡沫: 基于金融风险与刚性兑付的动态一般均衡分析[J]. 经济研究, 2020, 55(10): 72 – 88.

Dong Feng, Xu Zhiwei. Guaranteed bubbles: A dynamic general equilibrium analysis of financial risks and rigid redemption [J]. Economic Research Journal, 2020, 55(10): 72 – 88. (in Chinese)

[29] Carlstrom C T, Fuerst T S. Oil prices, monetary policy, and counter factual experiments [J]. Journal of Money, Credit and Banking, 2006: 1945 – 1958.

[30] Kim I M, Loungani P. The role of energy in real business cycle models [J]. Journal of Monetary Economics, 1992, 29(2): 173 – 189.

"Carbon bubble", stranded assets, and emission reduction path: A policy regulation perspective

SUN Hao-ning[1], *DONG Feng*[1,2*], *JIA Yan-dong*[3]

1. School of Economics and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. National Center for Economic Research, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Research Bureau, The People's Bank of China, Beijing 100800, China

Abstract: Based on the current situation of stranded assets faced by energy companies under the background of environmental protection policies, this paper constructs a multi-sector dynamic general equilibrium model including heterogeneous energy production firms and fossil fuel asset accumulation decisions. It discusses the carbon emission reduction paths corresponding to different environmental policies and the impact of emission reduction on social welfare under policy regulation. It is found that emission reduction policies lead to a decline in the value of fossil fuel reserves held by energy companies, resulting in the bursting of the "carbon bubble" and the gradual stranding of fossil fuel assets. This affects the financing and production of the energy sector, ultimately causing a decline in total output and consumption. Compared with financial policies and industrial policies, tax policies for emission reduction result in smaller welfare losses. Among different tax policies, energy taxes are the most effective in reducing distortions and improving social welfare. In terms of the "carbon bubble" caused by the stranding of fossil energy reserve assets, the "carbon bubble" caused by an energy tax is the smallest, while the "carbon bubble" caused by a fossil fuel reserve investment tax is the largest.

Key words "carbon bubble"; credit constraint; emission reduction policy; stranded assets