

极端天气冲击下的风险传导与“双支柱”调控策略研究*

郝大鹏^①

摘要：近年来，我国极端天气事件的发生频率和强度明显上升。本文首先构建了我国 2006—2023 年的极端天气风险指数，并利用 SVAR 模型和包含极端天气风险冲击、企业碳排放与金融摩擦的 DSGE 模型，探究了极端天气风险对我国实体经济和金融风险的具体影响及其机理，并讨论了“双支柱”框架下宏观审慎政策调控极端天气风险的效果。研究发现：极端天气风险冲击不仅会带来我国实体经济活动的显著下滑，还会推升金融风险；极端天气风险的上升会带来信用风险溢价和不确定性的上升，进而会加剧极端天气风险对实体经济的紧缩效应；在“双支柱”调控框架下，降低金融摩擦或实施盯住产出的逆周期绿色技术创新支持政策，不仅有利于缓解极端天气风险带来的实体经济下行压力，也可以避免金融风险的过度积累，有利于实现“稳增长”和“防风险”的双重目标。本文的研究对于我国提升应对气候变化的能力、坚持“稳增长”和“防风险”双底线宏观调控具有一定的参考价值。

关键词：极端天气风险；宏观审慎政策；“双支柱”调控；DSGE 模型

中图分类号：F125

文献标识码：A

DOI:10.13490/j.cnki.fjr.2025.07.004

一、引言

近年来，全球气候变化所带来的危害日趋严重，我国极端天气事件出现的概率也持续上升，并给我国经济带来较大冲击。例如，2016年武汉特大洪水、2018年南方低温冰冻灾害、2021年河南特大暴雨等极端天气事件，都给我国经济发展带来不同程度的损失。频繁发生的气候灾害使我国经济平稳发展和金融体系稳定面临重要挑战。在当前充满不确定性的经济形势下，积极评估气候变化对我国实体经济的影响，主动防范气候变化带来的金融风险，对保障我国经济在合理区间运行、防范和化解重大金融风险，具有重要的意义。

目前，气候冲击对实体经济和金融体系的影响已经受到国际社会的广泛关注，各国中央银

^① 郝大鹏，经济学博士，助理研究员，中国社会科学院经济研究所，联系方式：haodp@cass.org.cn。作者感谢匿名审稿人的意见，文责自负。

* 本文受到国家自然科学基金青年项目“金融摩擦异质性与货币政策传导机制：基于投入产出网络结构模型”（项目编号：72403248）、国家自然科学基金面上项目“‘三重压力’下的‘稳增长’和‘防风险’双目标宏观调控体系研究”（项目编号：72373074）、中国社会科学院“青启计划”资助项目（项目编号：2025QQJH48）的资助。

行以及金融监管机构高度重视气候变化对本国金融稳定和宏观政策调控的影响。2021年,美国金融稳定监督委员会发布的《气候相关金融风险报告》,将气候变化确定为“对美国金融稳定的新威胁”。同年7月,欧洲央行宣布将气候变化纳入货币政策框架。近年来,我国也积极推动生态友好、绿色低碳的高质量发展道路,为全球气候治理作出了中国贡献。2024年,中国人民银行联合国家发展改革委、工业和信息化部、财政部、生态环境部、金融监管总局和中国证监会印发《关于进一步强化金融支持绿色低碳发展的指导意见》,明确提出要将气候变化所带来的风险纳入到我国宏观审慎政策框架中,并要求持续研究和完善风险监管指标和评估方法。本文通过测算我国面临的气候风险,评估其对我国经济增长和金融稳定带来的影响,探索应对气候风险的宏观政策调控框架。这不仅对我国当前防范和化解重大风险、推动经济平稳发展,进而实现“稳增长”和“防风险”的双重目标具有重要意义,也有助于我国提升应对气候变化的风险管理能力,统筹实现气候安全和经济高质量发展。

近年来,不少文献开始关注气候风险对经济活动的影响。国内外相关研究发现,高温等极端气候会导致经济产出、生产效率、投资、消费等经济指标出现下降(Dell等,2012;Burke等,2015;Acevedo等,2020;李力等,2023;Kim等,2025),并且会对居民收入和福利产生较大的负面影响(Cantelmo等,2023);同时,气候风险也会对微观企业的固定资产、业绩、劳动力效率等造成负面影响(Cai等,2018;Huang等,2018;Somanathan等,2021),使企业面临气候转型风险(杨子晖等,2024)。此外,气候风险还会影响金融体系的平稳运行,导致金融风险上升(Fabris,2020;潘敏等,2023)。

考虑到气候风险的不利影响,学者开始关注气候风险冲击下宏观调控的问题。鉴于与气候相关的灾难冲击会影响中央银行预测和管理通货膨胀的能力(McKibbin等,2020),政策制定者应将气候风险考虑在货币政策等制度框架内(McKibbin等,2020;陈国进等,2023)。尽管已有文献对气候风险冲击的经济影响进行了探讨,并证明了“双支柱”框架体系在防范风险和稳定金融市场方面的重要作用(方意等,2022;马勇和姚驰,2022;陈伟泽等,2023),但是鲜有文献从极端天气风险角度量化测算我国的气候风险,也鲜有文献探究极端天气风险对于我国当前“稳增长”和“防风险”的双底线目标的影响。鉴于此,本文将利用实证和理论模型探究极端天气风险冲击对我国实体经济和金融风险的影响及其机理,并考察宏观审慎政策工具和绿色技术创新支持政策在应对极端天气风险冲击方面的积极作用。

与以往研究相比,本文主要有如下三点创新:一是构建研究我国极端天气风险冲击及其影响的测度模型。本文使用美国国家环境信息中心(National Centers for Environmental Information,简称NCEI)提供的全球气象站点数据,构建了中国极端天气风险冲击的月度时间序列,并且利用SVAR模型以及包含极端天气风险冲击、企业碳排放行为和金融摩擦的DSGE模型,量化测算了极端天气风险冲击对我国实体经济和金融风险的具体影响。二是丰富

了极端天气风险冲击影响实体经济和金融市场的作用机制。本文证明了金融摩擦、不确定性等因素能够放大极端天气风险冲击对实体经济和金融风险的不利影响。三是拓展了“双支柱”框架如何应对极端天气风险冲击的研究。本文基于“双支柱”调控框架,探究了宏观审慎政策工具以及降低金融摩擦、实施绿色技术创新支持政策等在应对极端天气风险冲击方面的重要作用。这有利于缓解极端天气风险对我国宏观经济的冲击,防范化解极端天气风险带来的金融风险,实现“稳增长”和“防风险”的动态平衡,具有一定的参考价值。

二、关于极端天气风险影响宏观经济的经验事实

(一) 中国极端天气风险指数的构建

参考美国和加拿大精算师协会构建气候指数(Actuaries Climate Index,简称ACI)的方法,本文利用极端天气发生的频率来构造中国的极端天气风险指数(Extreme Weather Risk Index,简称EWRI)。具体来讲,本文使用美国NCEI提供的全球气象站点数据来构建中国极端天气风险指数的月度时间序列(EWRI)。此数据集有我国大陆约840个气象站点的监测数据,具体包括每日的温度、降水量、湿度、日照、气压以及风速等天气指标。本文基于各个站点的温度、降水、风力等五个分项的数据,来构造全国层面的极端天气风险指数^①。

(二) 模型与变量说明

为了进一步探讨极端天气风险冲击对我国宏观经济波动以及不确定性的影响,本文构建了包含极端天气风险指数(EWRI),工业增加值增速(IP),通货膨胀率(CPI),利率(R)、投资(INV)、消费(CON)、信贷价差(CP)和经济政策不确定性(EPU)的月度SVAR模型,考虑如下滞后 p 阶的SVAR模型:

$$B_0 Y_t = a + B_1 Y_{t-1} + B_2 Y_{t-2} + \dots + B_p Y_{t-p} + w_t \quad (1)$$

式中, $Y_t = \{EWRI, IP, CPI, R, INV, CON, CP, EPU\}$ 为观测变量组成的矩阵, a 为常数项, $B_1, B_2, \dots, B_p$ 代表变量的系数矩阵, B_0 代表当期变量的系数矩阵。 w_t 代表对应的结构化冲击^②,且满足 $E(w_t) = 0$, 如果 $t = s$, 则 $E(w_s' w_t) = \Sigma_w$; 如果 $t \neq s$, 则 $E(w_s' w_t) = 0$ 。本文采取的识别方法是乔里斯基分解。由于极端天气往往具有突发性和难以预测的特点,相对于其他经济序列来说比较外生,故本文参考 Ludvigson等(2020)的研究,将极端天气风险指数放到SVAR模型中的第一个位置进行估计^③。

本文选取2006年1月至2023年5月的月度数据,将7天同业拆借利率、固定资产投资和社会商品零售总额的同比增长率分别作为利率(R)、投资(INV)和消费(CON)的代理变量;采

^① 受篇幅限制,正文未展示极端天气风险指数和基于SVAR模型的机制分析,作者留存备案。

^② 结构化冲击的含义是指不同的扰动项之间相互独立,因此可以对其赋予经济学解释。

^③ 本文根据AIC等信息准则将滞后阶数选为2阶,估计上述SVAR模型。

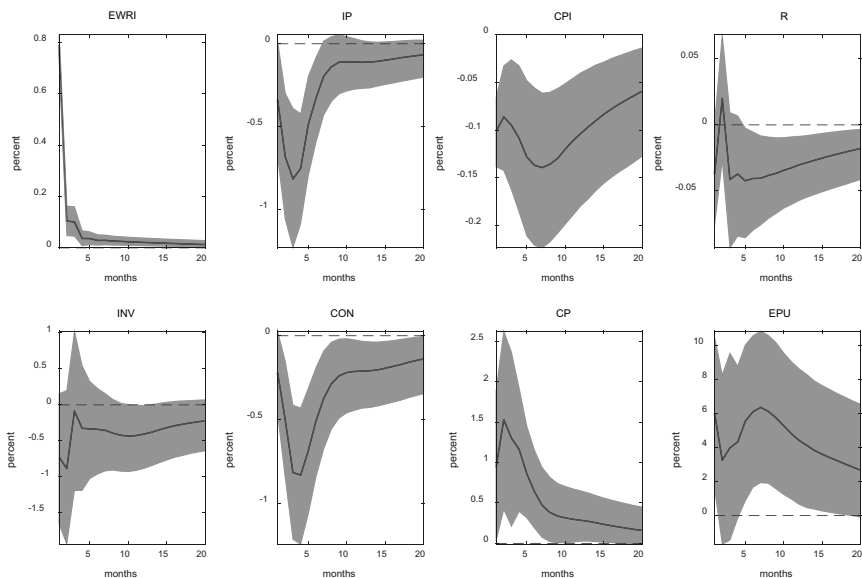
用10年期企业债和国债的收益率差作为信贷价差（*CP*）的代理变量。数据来自Wind数据库。本文将Baker等（2016）构造的中国经济政策不确定性指数作为*EPU*指标。

（三）脉冲响应函数分析

本文基于上述SVAR模型计算出极端天气风险冲击的脉冲响应函数（如下图1所示）。

根据图1的结果，在1个标准差的*EWRI*作用下，*IP*从第2月开始到第6月出现了显著的负向响应。其中，第3个月下降幅度达到最大（约0.8%），随后负向响应逐渐减小，第9个月后逐渐趋于不显著。总体而言，1个单位的*EWRI*冲击大约会使得未来6个月内的*IP*累计下降约3.1%。*CPI*的负向响应持续时间更长，从第1个月开始逐渐下降，未来第7个月负向响应程度最大，下降约0.14%，且负向响应一直持续到未来20个月仍然显著。1个单位的*EWRI*冲击大约会使得未来1年内的*CPI*累计下降约1.4%。这充分说明*EWRI*会给未来1年以内的实体经济活动带来显著的负面冲击。*R*在从第6个月后也开始出现明显的负向响应，说明央行在极端天气风险冲击的负面响应逐步显现时，会通过下调利率来稳定经济活动。与此同时，*CON*在第2期后也出现了显著的负向响应，与*IP*增速类似，负向响应幅度在未来第3个月时达到最大，下降约0.8%。*INV*的脉冲响应函数尽管为负，却不显著。上述结果表明，极端天气风险的上升会导致我国实体经济活动的显著下滑。

图 1：SVAR 模型 1 个标准差的 *EWRI* 冲击的脉冲响应图



注：图中阴影区域为脉冲响应函数 1 个标准差的置信区间。

从图1中还可以看出，在1个标准差的*EWRI*冲击下，*CP*在未来半年内显著上升，第2期的最大上升幅度达到近1.5%，而*EPU*在未来的第5到12个月内也出现了显著的正向响应。总体来

看,图1的实证结果表明,极端天气风险冲击不仅会对实体经济造成显著的负面影响,而且也会导致信用风险溢价和不确定性的上升。

三、包含极端天气风险和金融摩擦的DSGE模型

为了解释实证分析中关于极端天气风险对我国经济影响的经验事实,本文在Gourio (2012)、Cantelmo等(2023)所建理论模型的基础上,构建了一个包含极端天气风险冲击、企业碳排放和金融摩擦的新凯恩斯动态随机一般均衡模型(DSGE)。与现有文献的DSGE模型相比,本文DSGE模型的核心创新点主要包括三方面:一是引入极端天气风险冲击运动方程,并假设极端天气风险概率受到过往极端天气风险概率和经济体中碳排放存量的双重影响,而企业碳排放量会影响到经济体中的碳排放存量;二是将企业碳排放行为和绿色投资内生化,刻画企业如何在碳排放和绿色投资之间进行权衡;三是引入货币政策和宏观审慎政策“双支柱”调控框架,着重分析各类宏观政策应对极端天气风险冲击的效果。

(一) 理论模型

1. 家庭部门

家庭部门的效用函数设定为Epstein-Zin-Weil偏好形式,如下所示:

$$\tilde{V}_t = \left(\left(C_t (1 - L_t)^\eta \right)^{1-\psi} + \beta \left(E_t \tilde{V}_{t+1}^{1-\gamma} \right)^{\frac{1-\psi}{1-\gamma}} \right)^{\frac{1}{1-\psi}} \quad (2)$$

式中, E_t 为期望算子, C_t 为家庭的消费总量, 而 L_t 为家庭向中间品生产商提供的劳动力。 $\eta > 0$ 是劳动供给弹性, β 是跨期贴现因子, γ 是家庭部门的相对风险厌恶系数, $\varphi = 1 - (1 + \eta)(1 - \psi)$ 是家庭部门跨期替代弹性的倒数。

家庭部门所面临的预算约束如下:

$$C_t + \frac{B_t}{P_t} = \frac{W_t}{P_t} L_t + R_{t-1} \frac{B_{t-1}}{P_t} + \Pi_t - T_t \quad (3)$$

式中, W_t 为从中间品生产商获取的名义工资, $w_t^r = W_t / P_t$ 代表实际工资, P_t 为价格水平。 B_t 为家庭购买的本国债券, $R_{t-1} = 1 + i_{t-1}$ 代表本国债券的名义总收益, 其中的 i_{t-1} 代表本国的利率。 Π_t 是企业向家庭转移的利润, T_t 是政府对家庭征收的税。为了便于求导, 本文对效用函数进行重参数化, 定义 $\tilde{V}_t = V_t^{\frac{1}{1-\psi}}$ 且 $\chi = 1 - \frac{1-\gamma}{1-\psi}$, 则家庭部门的效用函数可以转换为:

$$V_t = \left(C_t (1 - L_t)^\eta \right)^{1-\psi} + \beta \left(E_t V_{t+1}^{1-\chi} \right)^{\frac{1}{1-\chi}} \quad (4)$$

在预算约束下, 家庭部门通过选择最优的 C_t , L_t 和 B_t 来最大化(4)式中的期望效用。通过构造拉格朗日函数, 可以得到下述(5)到(7)式中的一阶条件。其中, λ_t 是(3)式对应的拉格朗日乘子。

$$E_t \left(\frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \right) = \beta \left(\frac{C_{t+1}}{C_t} \right)^{-\psi} \left(\frac{1-L_{t+1}}{1-L_t} \right)^{\eta(1-\psi)} \frac{V_{t+1}^{-\chi}}{(E_t V_{t+1}^{1-\chi})^{\frac{-\chi}{1-\chi}}} \quad (5)$$

$$\frac{1-L_t}{C_t} = \frac{\eta}{w_t'} \quad (6)$$

$$E_t \left(\frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \frac{R_t}{1+\pi_{t+1}} \right) = 1 \quad (7)$$

参考Cochrane (2009) 的研究, 将随机折现因子表示为 $Q_{t,t+1} = \frac{\partial V_t / \partial C_{t+1}}{\partial V_t / \partial C_t}$, 即:

$$Q_{t,t+1} = \beta \left(\frac{C_{t+1}}{C_t} \right)^{-\psi} \left(\frac{1-L_{t+1}}{1-L_t} \right)^{\eta(1-\psi)} \frac{V_{t+1}^{-\chi}}{(E_t V_{t+1}^{1-\chi})^{\frac{-\chi}{1-\chi}}} \quad (8)$$

2. 资本品生产商

资本品生产商主要生产两类资本品: 棕色生产资本 K_t^b 和绿色生产资本 K_t^g 。资本品生产商每期从零售商处购买棕色资本品 I_t^b 和绿色资本品 I_t^g , 并从企业家处购买折旧后的资本, 进而生产出下一期的棕色生产资本 K_t^b 和绿色生产资本 K_t^g , 再分别以价格 Q_t^b 和 Q_t^g 卖给企业家。因此, 这两类资本品的演化路径可表示为:

$$K_t^b = \left((1 - \delta_t^b(u_t^b)) K_{t-1}^b + S(I_t^b) \right) e^{x_t \ln(1-\Delta)} \quad (9)$$

$$K_t^g = \left((1 - \delta_t^g(u_t^g)) K_{t-1}^g + S(I_t^g) \right) e^{x_t \ln(1-\Delta)} \quad (10)$$

式中, 参考Sims和Wu (2021), 资本折旧率 $\delta_t^i(u_t^i)$ 假定为资本利用率 u_t^i 的二次函数, 即 $\delta_t^i(u_t^i) = \delta_0^i + \phi_1^i(u_t^i - 1) + \frac{\phi_2^i}{2}(u_t^i - 1)^2$ 。其中的 δ_0^i 是稳态下的资本折旧率, $\phi_1^i > 0$, $\phi_2^i > 0$, $i \in [b, g]$ 。 $S(I_t^b) = I_t^b \left(1 - \frac{\tau^b}{2} \left(\frac{I_t^b}{I_{t-1}^b} - 1 \right)^2 \right)$ 是棕色资本品的投资函数, 其中的 τ^b 是投资调整参数。由于生产绿色资本品需要绿色技术创新, 但是绿色技术创新会面临一定的失败风险, 因而绿色资本品的投资函数可表示为 $S(I_t^g) = I_t^g \left(1 - \frac{\tau^g}{2} \left(\frac{I_t^g}{I_{t-1}^g} - 1 \right)^2 \right) e^{\ln(1-\theta)}$, 其中的 τ^g 是投资调整参数, θ 是绿色技术创新失败概率。参考Gourio (2012) 和Cantelmo等 (2023) 的做法, 本文假设极端天气风险发生时会导致资本品出现物理损失。令 x_{t+1} 是关于极端天气风险冲击的指示变量, 如果极端天气风险发生则 $x_{t+1} = 1$, 此时资本存量中会有 Δ 比例的部分直接受到摧毁; 而如果极端天气风险不发生则 $x_{t+1} = 0$ 。假定极端天气风险发生的概率为 θ_t , 且 θ_t 服从以下动态变化方程:

$$\log \theta_t = (1 - \rho_\theta) \log \bar{\theta} + \rho_\theta \log \theta_{t-1} + \vartheta (\log X_t - \log X_{t-1}) + \varepsilon_{\theta_t} \quad (11)$$

式中, X_t 是经济体中碳排放存量, ϑ 是碳排放存量的动态变化对极端天气风险的影响程度, $\varepsilon_{\theta_t} \sim N(0, \sigma_\theta^2)$ 是罕见极端天气风险冲击, ρ_θ 是极端天气风险冲击的自相关系数, $\bar{\theta}$ 则是稳态下极端天气风险发生的概率。

资本品生产商通过选择最优的棕色投资 I_t^b 和绿色投资 I_t^g 来最大化利润, 可表示为:

$$\max_{\{l_t^b, l_t^g\}_{t=0}^{\infty}} E_t \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{\lambda_t}{\lambda_0} \left(Q_t^b \left(K_t^b - (1 - \delta_t^b(u_t^b)) K_{t-1}^b e^{x_t \ln(1-\Delta)} \right) + Q_t^g \left(K_t^g - (1 - \delta_t^g(u_t^g)) K_{t-1}^g e^{x_t \ln(1-\Delta)} \right) - l_t^b - l_t^g \right) \right\} \quad (12)$$

假定资本品生产商通过选择最优投资规模 l_t^b 和 l_t^g 来最大化利润总和, 从最优化的一阶条件可以得到资本品的价格满足:

$$Q_t^b \left(1 - \frac{\tau^b}{2} \left(\frac{l_t^b - l_{t-1}^b}{l_{t-1}^b} \right)^2 - \tau^b \frac{l_t^b}{l_{t-1}^b} \frac{l_t^b - l_{t-1}^b}{l_{t-1}^b} \right) e^{x_t \ln(1-\Delta)} + \tau^b \beta E_t^{\theta} \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} Q_{t+1}^b \left(\frac{l_{t+1}^b}{l_t^b} \right)^2 \frac{l_{t+1}^b - l_t^b}{l_t^b} e^{x_{t+1} \ln(1-\Delta)} = 1 \quad (13)$$

$$Q_t^g \left(1 - \frac{\tau^g}{2} \left(\frac{l_t^g - l_{t-1}^g}{l_{t-1}^g} \right)^2 - \tau^g \frac{l_t^g}{l_{t-1}^g} \frac{l_t^g - l_{t-1}^g}{l_{t-1}^g} \right) e^{x_t \ln(1-\Delta) + \ln(1-\theta)} + \tau^g \beta E_t^{\theta} \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} Q_{t+1}^g \left(\frac{l_{t+1}^g}{l_t^g} \right)^2 \frac{l_{t+1}^g - l_t^g}{l_t^g} e^{x_{t+1} \ln(1-\Delta) + \ln(1-\theta)} = 1 \quad (14)$$

3. 企业家

企业家每期初从资本品生产商处购买棕色生产资本 K_t^b 和绿色生产资本 K_t^g , 在选择这两类生产资本各自的最优使用率后将生产资本出租给中间品生产商获取租金, 在每期生产结束后, 企业家回收折旧后的资本并将其出售给资本品生产商。因此, 企业家持有资产的总价值可表示为 $K_t = Q_t^b K_t^b + Q_t^g K_t^g$ 。

随后, 本文刻画企业家和金融中介之间的贷款合约问题。在第 t 期末, 金融中介根据企业家的需求, 向企业家发放贷款用于购买下一期的棕色生产资本和绿色生产资本。因此, 在第 t 期末, 企业家需要的总资金为 K_t 。假设企业家的净财富用 N_t 来表示, 此时企业家需要从金融中介获得的外部融资金额 B_t^c 可表示为:

$$B_t^c = K_t - N_t \quad (15)$$

企业家持有生产资本的收益率 R_t^k 包括两部分: 一部分是企业家将生产资本租赁给中间品生产商获取的租金 $r_t^b u_t^b$ 和 $r_t^g u_t^g$, 另一部分是将折旧后的资本出售给资本品生产商获得的收入。均衡状态下, 企业家持有的棕色和绿色资产的收益率应该相等, 因而企业家持有生产资本的收益率 R_t^k 可表示为:

$$R_t^k = \frac{r_t^b u_t^b + Q_t^b (1 - \delta_t^b(u_t^b))}{Q_{t-1}^b} = \frac{r_t^g u_t^g + Q_t^g (1 - \delta_t^g(u_t^g))}{Q_{t-1}^g} \quad (16)$$

企业家通过选择两类生产资本最优的使用率 u_t^b 和 u_t^g 来最大化资本收益率, 可得如下—阶条件:

$$r_t^b = Q_t^b (\phi_1^b + \phi_2^b (u_t^b - 1)) \quad (17)$$

$$r_t^g = Q_t^g (\phi_1^g + \phi_2^g (u_t^g - 1)) \quad (18)$$

4. 中间品生产商

假设所有的中间品生产商在区间 $[0,1]$ 上均匀分布,进而形成代表性中间品生产商。中间品生产商每一期利用家庭部门提供的劳动力和企业家提供的棕色、绿色生产资本用于生产中间品,其生产函数设定为以下C-D函数形式:

$$Y_t = A_t \tilde{K}_t^\alpha (e^{x_t \ln(1-\Delta_t)} L_t)^{1-\alpha} \quad (19)$$

式中, A_t 是中间品生产商的全要素生产率, 假定服从如下对数AR(1)过程: $\ln(A_t / \bar{A}) = \rho_A \ln(A_t / \bar{A}) + \varepsilon_{a,t}$, 其中 $\varepsilon_{a,t} \sim N(0, \sigma_A^2)$ 是TFP冲击; Y_t 是总产出; α 代表资本在产出中所占份额; $\tilde{K}_t = \left[\varsigma (\tilde{K}_t^b)^{\frac{\epsilon_k-1}{\epsilon_k}} + (1-\varsigma) (\tilde{K}_t^g)^{\frac{\epsilon_k-1}{\epsilon_k}} \right]^{\frac{\epsilon_k}{\epsilon_k-1}}$ 是中间品生产商持有的有效生产资本, 其中 $\tilde{K}_t^b = u_t^b K_{t-1}^b$ 是有效棕色生产资本, ς 是棕色生产资本的相对权重, $\tilde{K}_t^g = u_t^g K_{t-1}^g$ 是有效绿色生产资本, ϵ_k 是棕色生产资本和绿色生产资本之间的替代弹性参数。现有文献已经证明, 极端天气风险冲击除造成资产损失外, 还能通过降低劳动生产效率对经济造成不利影响。鉴此, 假设 Δ_t 是企业劳动生产率在极端天气风险冲击下的影响程度, $\tilde{L}_t = e^{x_t \ln(1-\Delta_t)} L_t$ 是有效劳动。

中间品生产商在生产中间产品的过程中会产生碳排放。参考Nordhaus (2018) 和陈国进等 (2023) 的设定, 经济体中碳排放存量 X_t 的动态演化方程可表示为 $X_t = \delta_X X_{t-1} + Z_t + Z_t^{row}$ 。其中, Z_t 代表国内碳排放量, Z_t^{row} 代表国外其他国家的碳排放量, δ_X 为排放残余率。参考Heutel (2012)、Nordhaus (2018) 和陈国进等 (2023) 的做法, 假定国内碳排放量 $Z_t = (1-h_t) v Y_t$, 其中 v 为排放系数, $h_t = 1 - \tilde{K}_t^g / (\tilde{K}_t^b + \tilde{K}_t^g)$ 为生产中间产品的减排比例。这说明, 绿色生产资本比例越高, 企业碳排放越少。与此同时, 中间品生产商在减排的过程中还会产生成本。参考陈国进等 (2023) 的做法, 设中间品生产商的减排成本为 $U_t = o_1 h_t^{o_2} Y_t$, 其中, o_1 和 o_2 为成本参数。

中间品生产商的成本最小化问题可以表示为:

$$\min_{\tilde{K}_t^b, \tilde{K}_t^g, \tilde{L}_t} r_t^b \tilde{K}_t^b + r_t^g \tilde{K}_t^g + W_t L_t + U_t \quad (20)$$

最优的资本和劳动需求量由下式给出:

$$W_t = (1-\alpha) \frac{mc_t - o_1 h_t^{o_2}}{e^{x_t \ln(1-\Delta_t)}} \left(\frac{\tilde{K}_t}{\tilde{L}_t} \right)^\alpha \quad (21)$$

$$r_t^b = \alpha \varsigma (mc_t - o_1 h_t^{o_2}) \left(\frac{\tilde{K}_t}{\tilde{L}_t} \right)^{\alpha-1} \left(\frac{\tilde{K}_t}{\tilde{K}_t^b} \right)^{\frac{1}{\epsilon_k}} - o_1 o_2 h_t^{o_2-1} \frac{\tilde{K}_t^g}{(\tilde{K}_t^b + \tilde{K}_t^g)^2} Y_t \quad (22)$$

$$r_t^g = \alpha (1-\varsigma) (mc_t - o_1 h_t^{o_2}) \left(\frac{\tilde{K}_t}{\tilde{L}_t} \right)^{\alpha-1} \left(\frac{\tilde{K}_t}{\tilde{K}_t^g} \right)^{\frac{1}{\epsilon_k}} + o_1 o_2 h_t^{o_2-1} \frac{\tilde{K}_t^b}{(\tilde{K}_t^b + \tilde{K}_t^g)^2} Y_t \quad (23)$$

式中, mc_i 是中间品生产商的边际成本。

假设中间品生产商生产的中间产品会被卖给零售商, 其销售价格为批发价 P_i^w 。零售商利用中间品生产出最终品, 并以零售价格 P_i 卖给家庭部门和资本品生产商。本国商品零售商的加价率可表示为 $X_i = \frac{P_i}{P_i^w}$ 。如果最终品的价格为1, 那么中间品的相对价格可表示为 $\frac{1}{X_i}$ 。

5. 金融中介

参考Bernanke等(1999)和Christiano等(2014)的做法, 假设企业家会受到一个异质生产率 ω_i 的冲击, 此时企业家的收益率可表示为 $\omega_i R_i^k$ 。参考Bernanke等(1999)和Christiano等(2014)的研究, 假设异质生产率 ω_i 相互独立且服从对数正态分布, ω_i 的分布函数、密度函数可以分别为 $F(\omega_i)$ 和 $f(\omega_i)$, ω_i 的均值满足 $E(\omega_i) = 1$ 。金融中介无法完全掌握企业家的信息, 因而会导致信贷市场出现信息不对称的问题, 即企业家能够识别 ω_i , 但是金融中介要想识别 ω_i 则需付出监管成本。本文假设金融中介的监督成本与资本收益成正比, 表示为 $\mu_i \omega_i R_{t+1}^k K_{t+1}$, 其中 μ_i 是监管成本参数。假设企业家的违约门槛值为 ϖ , 并且满足以下条件:

$$\varpi_{t+1} R_{t+1}^k K_{t+1} = R_t^b B_t^c \quad (24)$$

式中, R_t^b 是银行的非违约贷款利率。企业家与金融中介债务契约安排如下: $\omega_i > \varpi_t$ 时, 企业支付利息 $R_t^b B_t^c$; 当 $\omega_i < \varpi_t$ 时, 企业破产, 企业的全部资产 $\omega_{t+1} R_{t+1}^k K_{t+1}$ 归银行所有, 扣除监管成本后, 银行的净收入为 $(1-\mu) \omega_{t+1} R_{t+1}^k K_{t+1}$ 。

参考Carrillo等(2021)的研究, 本文引入宏观审慎政策调节工具 Ω 。假定中央银行要求金融中介吸收存款发放贷款时需要计提比例为 Ω 的风险准备, 即如果吸收的存款为 B_t , 则实际可贷的资金为 $B_t(1-\Omega)$ 。其中, $0 < \Omega < 1$, Ω 越大, 说明宏观审慎监管越严格。在均衡状态下, 金融中介的预期收益会等于资金的机会成本, 可表示为:

$$(1-F(\varpi_{t+1})) R_t^b B_t^c + \int_0^{\varpi_{t+1}} (1-\mu) \omega_{t+1} R_{t+1}^k K_{t+1} dF(\omega_{t+1}) = R_t B_t = \frac{R_t B_t^c}{(1-\Omega)} \quad (25)$$

金融中介所获得的收益比例可以表示为 $\Gamma(\varpi_{t+1}) = \int_0^{\varpi_{t+1}} \omega_{t+1} dF(\omega_{t+1}) + \varpi_{t+1} \int_{\varpi_{t+1}}^{\infty} f(\omega_{t+1}) d\omega_{t+1}$, 设 $\Theta(\varpi_{t+1}) = \int_0^{\varpi_{t+1}} \omega_{t+1} dF(\omega_{t+1})$, 因而金融中介的净利润比例可表示为 $\Gamma(\varpi_{t+1}) - \mu\Theta(\varpi_{t+1})$; 再扣除监督成本后, 剩下的是企业家的利润, 其利润比例可表示为 $1-\Gamma(\varpi_{t+1})$ 。记 $R_t' = R_t / (1-\Omega)$, 因此可以进一步将(25)式改写为:

$$\Gamma(\varpi_{t+1}) - \mu\Theta(\varpi_{t+1}) = \frac{R_t'}{E_t R_{t+1}^k} \left(\frac{K_{t+1} - V_{t+1}^k}{K_{t+1}} \right) = \frac{R_t'}{E_t R_{t+1}^k} \left(\frac{Lev_t - 1}{Lev_t} \right) \quad (26)$$

式中, $Lev_t = \frac{Q_t K_{t+1}}{V_{t+1}^k}$ 反映了企业家的杠杆率。定义金融市场风险溢价 $SP_t = R_{t+1}^k / R_t$, 它代表企业家的借贷成本高低, 也能够反映出金融市场的摩擦程度。

企业家的目标是最大化其利润。假设企业家的利润函数可表示为持有资本的预期收益与机会成本的比值:

$$\max_{\{\varpi_{t+1}, L_t\}} U = \frac{\int_{\varpi_{t+1}}^{\infty} (\omega_{t+1} E_t R_{t+1}^k K_{t+1} - R_t' B_t^c) dF(\omega_{t+1})}{V_t R_t'} \quad (27)$$

对 (27) 式求导, 可得到最优一阶条件, 即:

$$\frac{1 - F(\varpi_{t+1})}{1 - \Gamma(\varpi_{t+1})} = \frac{\frac{E_t R_{t+1}^k}{R_t'} (1 - F(\varpi_{t+1}) - \mu \varpi_{t+1} F'(\varpi_{t+1}))}{1 - \frac{E_t R_{t+1}^k}{R_t'} (\Gamma(\varpi_{t+1}) - \mu \Theta(\varpi_{t+1}))} \quad (28)$$

为了限制企业家净值和借贷规模持续扩张, 假设每期会有一定比例的企业家退出市场, 记企业家的存活概率为 γ , 企业家净值 N_t 的变动方程可表示为:

$$N_t = \gamma (1 - \Gamma(\varpi_{t+1})) R_{t+1}^k K_t \quad (29)$$

当 $\omega_t < \varpi_t$ 时, 企业家的总收益会低于总成本, 此时企业家会选择违约, 即无法偿还金融中介的贷款, 从而会导致金融中介的不良贷款上升。因此, 企业家破产违约比例可表示为:

$$Bankrupt_t = \int_0^{\varpi_{t+1}} dF(\omega_{t+1}) = F(\varpi_{t+1}) \quad (30)$$

$Bankrupt_t$ 越大, 企业家的破产违约率越高, 金融市场的风险也就越大。为了满足 $E(\omega_t) = 1$, 本文假设 $\mu_t = -\sigma_t^2 / 2$, 即 $F(\omega_t) = \log cdf(\omega_t, \mu_t, \sigma_t^2)$ 。此外, 本文假定 σ_t 服从对数AR(1)过程, 即可表示为:

$$\log\left(\frac{\sigma_t}{\sigma}\right) = \rho_z \log\left(\frac{\sigma_{t-1}}{\sigma}\right) + \varepsilon_{z,t} \quad (31)$$

式中, $\varepsilon_{z,t} \sim N(0, \sigma_z^2)$, 其中的 σ_t 越大, 说明 ω_t 的波动率越大, 从而会导致违约破产比例上升。

6. 零售商

假设中间产品生产商 i 在区间 $[0, 1]$ 上均匀分布, 每期间产品生产商生产出差异化的中间商品 $Y_t(i)$, 最终产品是所有中间商品的CES加总:

$$Y_t = \left(\int_0^1 Y_t(i)^{\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p}} di \right)^{\frac{\epsilon_p}{\epsilon_p - 1}} \quad (32)$$

根据新凯恩斯模型中垄断竞争的标准设定, 最终品生产商对每个中间品生产商 i 生产的中间品需求曲线为:

$$Y_t(i) = \left(\frac{P_t(i)}{P_t} \right)^{-\epsilon_p} Y_t \quad (33)$$

$$P_t = \left(\int_0^1 P_t(i)^{\frac{\epsilon_p-1}{\epsilon_p}} di \right)^{\frac{\epsilon_p}{\epsilon_p-1}} \quad (34)$$

式中, $P_t(i)$ 是第 i 种中间商品的价格, 而 P_t 是总体价格。假设所有中间品生产商价格的调整策略遵循 Calvo (1983) 定价策略, 即每期 ϕ_p 比例的中间品生产商的价格不发生变化, $1-\phi_p$ 比例的中间品生产商会调整价格。总体价格 P_t 的变动方程可表示为:

$$P_t = \phi_p P_{t-1}^{1-\epsilon_p} + (1-\phi_p) \bar{P}_{t-1}^{1-\epsilon_p} \quad (35)$$

在此条件下, 零售商通过选择 $\bar{P}_t(i)$ 来最大化其利润, 即:

$$E_t \sum_{k=0}^{\infty} \phi_p^k Q_{t,t+k} \left(\frac{\bar{P}_t(i)}{P_{t+k}} \right) \left(\frac{\bar{P}_t(i)}{P_{t+k}} \right)^{-\epsilon_p} Y_{t+k} - mc_{t+k} \left(\frac{\bar{P}_t(i)}{P_{t+k}} \right)^{-\epsilon_p} Y_{t+k} \quad (36)$$

本文进一步将需求曲线 $Y_{t+k}(i)$ 代入 (36) 式, 通过一阶求导, 最优价格 $\bar{P}_t$ 可表示为:

$$\bar{P}_t = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_p-1} \frac{E_t \sum_{k=0}^{\infty} (\phi_p \beta)^k u'(C_{t+k}) mc_{t+k} P_{t+k}^{\epsilon_p} Y_{t+k}}{E_t \sum_{k=0}^{\infty} (\phi_p \beta)^k u'(C_t) mc_{t+k} P_{t+k}^{\epsilon_p-1} Y_{t+k}} \quad (37)$$

7. 政府部门

政府部门的主要职责是实施货币政策和财政政策。本文假定中央银行的货币政策采用泰勒规则, 主要盯住通胀缺口和产出缺口。参考王博等 (2019) 的设定, 本文通过引入利率的随机时变波动率来测度货币政策的不确定性, 即:

$$R_t = (1-\rho_r) R_0 + \rho_r R_{t-1} + \gamma_1 (\pi_t - \pi_t^*) + \gamma_2 (y_t - y_t^*) + e^{\frac{h_t}{2}} \varepsilon_t \quad \varepsilon_t \sim N(0, \sigma_r^2) \quad (38)$$

$$h_t = (1-\rho_\eta) h_0 + \rho_\eta h_{t-1} + \eta_t \quad \eta_t \sim N(0, \sigma_\eta^2) \quad (39)$$

式中, R_t 为名义利率, R_0 为稳态时的名义利率, ρ_r 为货币政策的平滑系数, $(\pi_t - \pi_t^*)$ 和 $(y_t - y_t^*)$ 分别代表通胀和产出缺口, γ_1 和 γ_2 是对应的反应系数, h_t 为利率的随机时变波动率。本文进一步假定 h_t 服从 (39) 式中的对数 AR(1) 过程, h_0 是对数波动率的稳态值。 ε_t 是货币政策的水平冲击, η_t 是货币政策的波动性冲击, 并假设二者相互独立且服从正态分布。

8. 市场出清

最终品被用于家庭部门消费 C_t 、资本品投资 I_t^b 和 I_t^s 以及金融中介的监管成本 $\mu \int_0^{\sigma_t} \omega_t R_t^k Q_t^k K_t dF(\omega_t)$, 因而市场出清条件满足:

$$Y_t = C_t + I_t^b + I_t^s + \mu \int_0^{\sigma_t} \omega_t R_t^k Q_t^k K_t dF(\omega_t) \quad (40)$$

(二) 模型求解和参数校准

参考刘建丰等 (2020) 的做法, 本文将折现率 β 校准为 0.995, 季度折旧率 δ^b 、 δ^s 设为 0.025; 同时, 参考王博等 (2019) 等研究, 将价格粘性系数 ϕ_p 校准为 0.75, 即商品价格的持

续期为1年；将零售商的替代弹性 ε_p 校准为10，即零售商的价格加成比率约为11.11%。同样，本文将棕色和绿色生产资本替代弹性 ε_k 校准为10，进而将棕色生产资本的相对权重参数 ς 校准为0.5266。根据王博等（2019）、陈国进等（2023）的研究，我国资本产出份额通常在0.4~0.6范围内，因而本文将资本产出份额 α 校准为0.5。参考Gourio（2012）的做法，本文将劳动力替代弹性 η 校准为2.5，将相对风险厌恶系数 γ 设为3.8，将跨期替代弹性 φ 的倒数设为2。此外，本文将投资调整成本参数 τ^b 、 τ^s 校准为1。

参考王博等（2019）的做法，将季度资本收益率 R_t^k 的稳态值校准为1.0125，对应的年度贷款利率约为5%；同时将风险准备金计提比例 Ω 校准为0.6%。根据Sims和Wu（2021）的研究，将资本利用率参数 ϕ_2^b 、 ϕ_2^s 校准为0.01，并根据稳态下资本收益率，将资本利用率参数 ϕ_1^b 、 ϕ_1^s 校准为0.04。根据我国2000—2021年间的银行不良贷款率，将季度平均违约率 $F(\varpi)$ 的稳态值设为0.5%，据此将企业家生存概率 γ 校准为0.985。参考马勇（2013）的做法，企业破产清算后，将银行获得的剩余资产比例设为0.7，相应将监管成本系数 μ 校准为0.3。

参考Gourio（2012）的研究，本文将稳态时极端天气风险的概率设为0.1%，极端天气风险发生时资本折损 Δ 的比例设为0.25。参考Gourio（2012）和Gourio（2013）的校准值，将极端天气风险平滑系数设为0.75。Cai等（2018）利用我国的数据发现高温将会导致劳动生产率下降10%，考虑到还有其他极端天气情况，因而将劳动生产率受影响比例 λ 校准为0.15。参考Nordhaus（2018）和陈国进等（2023）的研究，将排放残余率 δ_x 校准为0.997，排放系数 ν 校准为1，减排成本参数 o_1 和 o_2 分别校准为0.0223、2.6。参考陈国进等（2023）的研究，将绿色生产资本占总生产资本的比重校准为0.3，国外其他国家的碳排放量 Z_t^{row} 为国内碳排放 Z_t 的2.5倍。本文利用我国极端天气指数和全球二氧化碳存量进行回归分析，并根据回归结果，将碳排放存量对极端天气风险的影响参数 ϑ 校准为0.94。沿用大部分文献的设定，将平滑系数和冲击运动方程的自回归系数设为0.9。参考马勇（2013）和陈国进等（2023）的做法，将泰勒规则中名义利率对通货膨胀和产出的反应系数 γ_1 、 γ_2 分别设为1.5和0.5^①。

（三）动态模拟

1. 极端天气风险冲击的脉冲响应

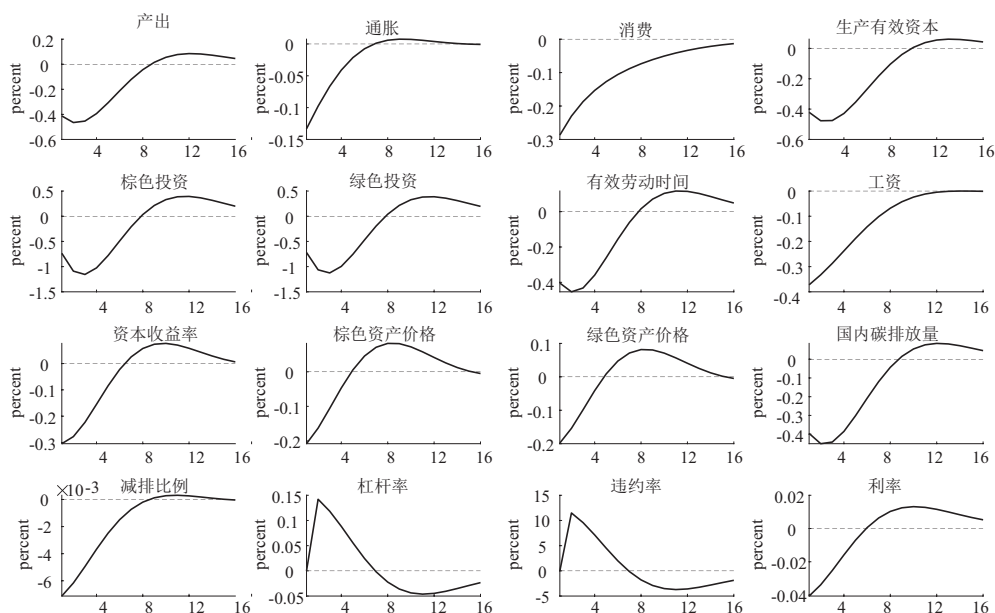
本文在理论模型中施加了1个标准差的极端天气风险冲击，脉冲响应结果如图2所示^②。从图2可以看出，当极端天气风险的发生概率增加时，产出、通胀和消费均出现了持续的负向响应，产出、通胀和消费在第1期或第2期下降幅度最大，分别下降约0.45%、0.13%和0.28%。究其原因：一是极端天气风险冲击会造成企业生产资本大幅度受损和劳动生产效率的下滑，投资

^① 受篇幅限制，正文未展示主要参数校准情况表，作者留存备案。

^② 受篇幅限制，正文未展示资本折损比例、极端天气风险发生概率等核心参数的敏感性分析结果，作者留存备案。

短期出现明显下滑,导致企业产出和工资水平下降,进而对经济造成不利影响。二是极端天气风险冲击使得随机折现因子下降,这不但会使家庭部门增加预防性储蓄,导致消费下滑,还会使无风险利率下降。此时,由于价格名义刚性的存在,企业部门无法自由调整价格,边际成本下降使得企业的价格加成提高,同时劳动力需求下降,因此经济出现衰退。产出的下降也会直接导致国内碳排放量的明显降低,虽然这有助于降低极端天气风险发生的概率,但由于碳存量具有很强的趋势性,因而并不能显著抵消极端天气风险冲击的不利影响。此外,由于绿色生产资本降低减排成本的边际作用下降,企业减排比例出现下滑。这表明,企业有效绿色生产资本占比下降,进而降低绿色生产资本的利用效率。

图 2: 极端天气风险冲击的脉冲响应图



注: 图中给出了模型内生变量对 1 个标准差的正向极端天气风险冲击的脉冲响应, 横轴代表期限, 纵轴代表百分比, 下图同。

与此同时, 金融市场也会受到极端天气风险冲击的显著影响。一方面, 在极端天气风险冲击下, 投资品由于极端天气风险发生概率的增加导致其预期价值下降, 进而造成投资品的资产价格和企业持有资本的预期收益率出现明显下滑, 不利于金融市场的稳定; 另一方面, 由于企业产出下降导致企业净资产下降, 企业杠杆率大幅度上升, 企业违约率也同步上升。由此可知, 极端天气风险的发生不仅会给实体经济活动带来显著的紧缩效应, 而且还会对金融市场造成不利影响。冲击后, 产出和通胀的下降使得央行降低利率水平。在利率下降的刺激下, 伴随着极端天气风险冲击的逐渐消退, 投资、消费和产出将不断恢复, 劳动供给、资产价格和国内碳排放量也会出现正向反弹。这将有利于企业杠杆率和违约率的下降, 表明货币政策能够有效

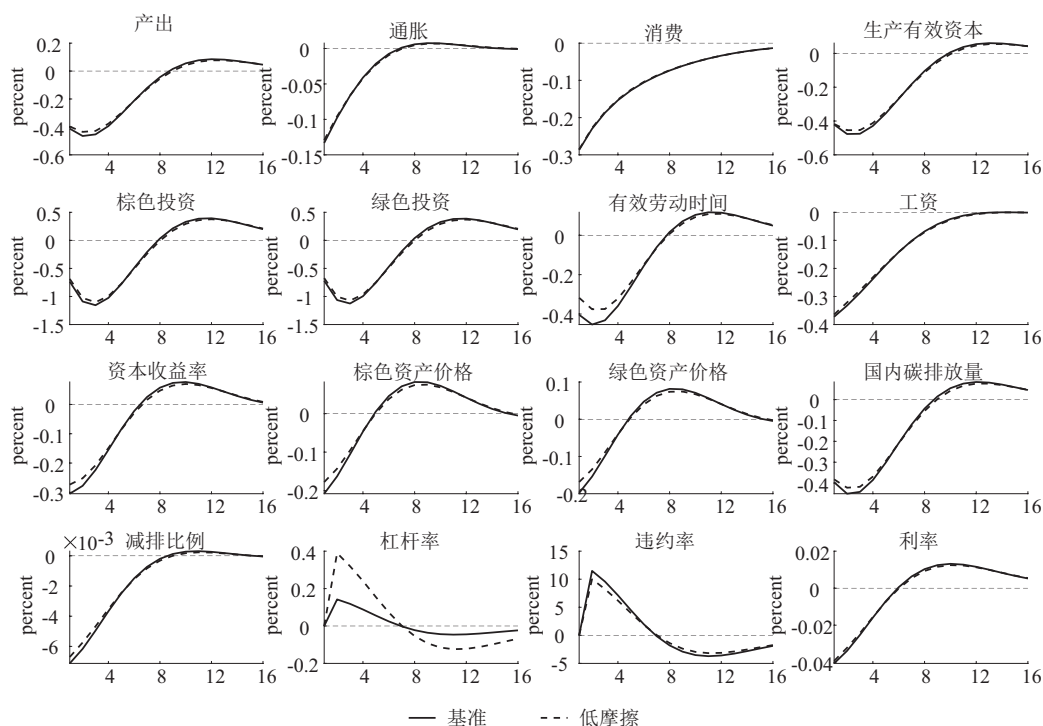
发挥重要的逆周期调节作用。

2. 机制分析

(1) 金融摩擦的影响

现有文献和本文理论模型的模拟结果均表明,气候风险会对金融市场产生负面影响,进而会导致企业融资成本的增加和金融市场风险溢价的上升(Fabris, 2020; 潘敏等, 2023)。金融市场风险溢价越大,说明金融机构借贷意愿越低,借贷双方之间的信息不对称程度越高,金融摩擦程度也越严重。为了考察金融摩擦对极端天气风险冲击的影响,本文将金融监管成本系数 μ 的校准值由0.3调整为0.2。金融监管成本越低,金融摩擦程度越低,企业面临的风险溢价也越低。相关脉冲响应结果如图3所示。从图3可以看出,当金融摩擦程度变小时,极端天气风险冲击对产出、投资、劳动、工资、资产价格和违约率的负面影响降低,并且会减轻这些变量的波动,但也会导致企业杠杆率上升。究其原因,金融摩擦变小和企业违约率的下降会导致企业借贷规模相对增加,从而导致杠杆率上升。

图3: 不同金融摩擦程度下极端天气风险冲击的脉冲响应图



上述理论模拟结果表明,金融摩擦变大会放大极端天气风险对实体经济的紧缩效应,表明金融摩擦渠道在极端天气风险影响实体经济的过程中具有显著的放大作用。这与现有文献中关于金融加速器的理论相一致。究其原因,一方面,极端天气风险会造成信用风险溢价上升;另

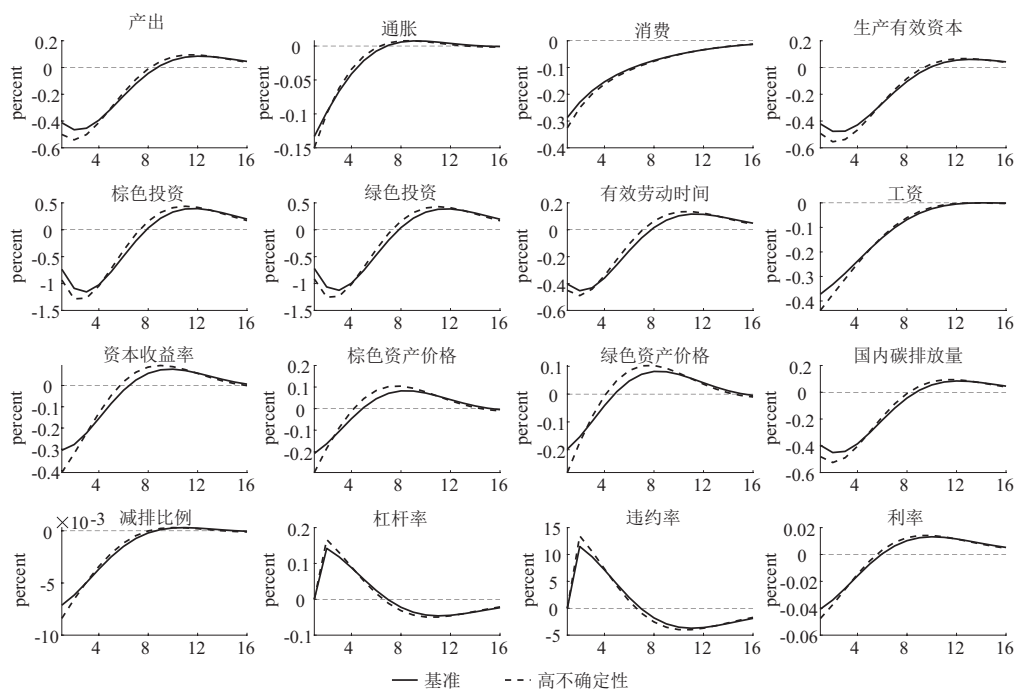
一方面,当信用风险溢价较高时,极端天气风险对实体经济的冲击又会变大,从而形成“螺旋式”下跌风险。对此,需要保持高度警惕。此外,根据国家气候中心专家发出的警示,今后,极端天气引发的复合型气象灾害风险将加大。这表明,气候风险本身极易与其他风险形成叠加效应,也需格外加以警惕,以防止经济因此出现过大的波动。

(2) 不确定性的影响

本文进一步探究了不确定性在极端天气风险冲击影响宏观经济和金融市场的过程中所发挥的作用。货币政策不确定性是经济政策不确定性的典型代表,并且货币政策不确定性同样会对经济产生显著影响(王博等,2019)。据此,本文假设在极端天气风险冲击发生的同时,在利率波动率方程(39)式施加一单位标准差冲击。此时,极端天气风险冲击的脉冲响应结果如图4所示。由图4可以发现,当存在货币政策波动率冲击时,极端天气风险冲击对实体经济和金融市场主要变量的负向影响明显变大,并且变量的波动性也会增大。这表明,货币政策的不确定性会对宏观经济和金融市场的稳定性造成较大的不利影响。

以上的理论模拟结果表明,不确定性同样会放大极端天气风险冲击的负面影响,加大宏观经济的波动。在极端天气风险冲击下,一方面会增加市场主体对宏观经济形势预判的误差,另一方面会加大宏观政策制定的难度,进而可能导致不确定性的上升。对此,基于不确定渠道发挥作用的机制,政府需要强化与市场的政策沟通,以缓解不确定性的不利影响。

图4:不同货币政策不确定性下极端天气风险冲击的脉冲响应图



四、“双支柱”框架下宏观政策的福利效果分析

（一）宏观审慎政策、福利损失函数与绿色技术创新支持政策的规则设定

为进一步探究宏观审慎政策的调控效果和最优目标，本文参考Carrillo等（2021）、Kockerols和Kok（2021）的研究，假定宏观审慎政策主要对宏观经济、金融风险状况进行调控，即 Ω_t 会对产出、违约率、杠杆率和资产价格的波动做出反应，则可将该规则设为：

$$\Omega_t = \bar{\Omega} + \zeta_1 \ln\left(\frac{Y_t}{Y_{t-1}}\right) + \zeta_2 \ln\left(\frac{bankrupt_t}{bankrupt_{t-1}}\right) + \zeta_3 \ln\left(\frac{Lev_t}{Lev_{t-1}}\right) + \zeta_4 \ln\left(\frac{Q_t^b}{Q_{t-1}^b}\right) + \zeta_5 \ln\left(\frac{Q_t^g}{Q_{t-1}^g}\right) \quad (41)$$

式中， ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 、 ζ_4 和 ζ_5 分别为对应的反应系数。假定 $\zeta_1 \geq 0$ 、 $\zeta_2 \geq 0$ 、 $\zeta_3 \geq 0$ 、 $\zeta_4 \geq 0$ 和 $\zeta_5 \geq 0$ ，则宏观审慎政策 Ω_t 实施的是逆周期调控：当经济繁荣或者金融风险增加时，政策制定者将收紧监管并上调 Ω_t ，反之则放松监管并下调 Ω_t 。

本文进一步采用福利分析的方法来比较货币政策与宏观审慎政策协调搭配组合的福利效果。参考范从来和高洁超（2018）、陈伟泽等（2023）的研究，本文将福利损失函数定义为相关变量波动的加权平均值，并将降低产出波动和降低通胀波动作为经济稳定的目标，将降低违约率和杠杆率波动作为金融稳定的目标。据此，本文将福利损失函数设定为：

$$W = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t (\vartheta_y y_t^2 + \vartheta_{\pi} \pi_t^2 + \vartheta_b bankrupt_t^2 + \vartheta_l Lev_t^2) \quad (42)$$

式中， ϑ_y 、 ϑ_{π} 、 ϑ_b 、 ϑ_l 分别代表产出、通胀、违约率和杠杆率在福利损失函数的权重。与此同时，本文将福利损失函数拆分为四项，即 $W_y = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t y_t^2$ 、 $W_{\pi} = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \pi_t^2$ 、 $W_b = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t bankrupt_t^2$ 、 $W_l = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t Lev_t^2$ ，分别代表产出、通胀、违约率和杠杆率的福利损失状况。通过对比分析不同政策框架下福利损失大小，可以识别出相对于基准情形的福利改进效果。

从上文的分析可以看出，极端天气风险冲击将会降低绿色生产资本的投资和利用效率，不利于企业利用绿色生产资本进行节能减排活动。因此，本文假定政府部门利用税收对绿色资本品进行补贴，补贴比例 sub_t 可表示为：

$$sub_t = \varrho_1 \ln\left(\frac{Y_t}{Y_{t-1}}\right) + \varrho_2 \ln\left(\frac{bankrupt_t}{bankrupt_{t-1}}\right) + \varrho_3 \ln\left(\frac{Lev_t}{Lev_{t-1}}\right) + \varrho_4 \ln\left(\frac{Q_t^b}{Q_{t-1}^b}\right) + \varrho_5 \ln\left(\frac{Q_t^g}{Q_{t-1}^g}\right) \quad (43)$$

此时，绿色资本品的投资函数可表示为 $S(I_t^g) = I_t^g \left(1 - \frac{\tau^g}{2} \left(\frac{I_t^g}{I_{t-1}^g} - 1\right)^2\right) e^{\ln(1-\Theta+sub_t)}$ 。假定 $\varrho_1 \leq 0$ 、 $\varrho_2 \geq 0$ 、 $\varrho_3 \geq 0$ 、 $\varrho_4 \leq 0$ 和 $\varrho_5 \leq 0$ ，则意味着当经济衰退、金融风险增加或者资产价格下跌时，政策制定者会提高补贴比例，反之会下调补贴比例。

（二）宏观政策调控效果分析

本节将利用上文构建的宏观审慎政策、福利损失函数与绿色技术创新支持政策的规则，以包含货币政策的单支柱情形作为基准模型，对各类宏观政策组合进行福利分析。

1. “双支柱”调控政策

本文构建的“双支柱”调控政策主要包括：宏观审慎政策只盯住产出（反应系数 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 、 ζ_4 和 ζ_5 分别为1、0、0、0、0）、宏观审慎政策只盯住违约率（反应系数 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 、 ζ_4 和 ζ_5 分别为0、1、0、0、0）、宏观审慎政策只盯住杠杆率（反应系数 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 、 ζ_4 和 ζ_5 分别为0、0、1、0、0）、宏观审慎政策只盯住资产价格（反应系数 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 、 ζ_4 和 ζ_5 分别为0、0、0、1、1）、宏观审慎政策总体（反应系数 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 、 ζ_4 和 ζ_5 均为1）。

2. “双支柱”调控政策+降低金融摩擦

前文已经证明金融摩擦会放大极端天气风险的负面影响，本节将进一步考察“双支柱”调控政策与降低金融摩擦相配合的效果。具体做法是，在实施“双支柱”调控政策条件下，进一步降低风险溢价，即将金融监管成本系数 μ 的校准值由0.3降为0.15。

3. “双支柱”调控政策+绿色技术创新支持政策

本文还进一步分析了“双支柱”调控政策与绿色技术创新支持政策相配合的效果，即在实施“双支柱”调控政策条件下，政府部门通过宏观政策对绿色资本品的投资提供补贴，进而降低绿色技术创新失败的成本。与宏观审慎政策分析类似，本文考虑的情形包括：绿色技术创新支持政策只盯住产出（反应系数 ϱ_1 、 ϱ_2 、 ϱ_3 、 ϱ_4 和 ϱ_5 分别为1、0、0、0、0）、绿色技术创新支持政策只盯住违约率（反应系数 ϱ_1 、 ϱ_2 、 ϱ_3 、 ϱ_4 和 ϱ_5 分别为0、1、0、0、0）、绿色技术创新支持政策只盯住杠杆率（反应系数 ϱ_1 、 ϱ_2 、 ϱ_3 、 ϱ_4 和 ϱ_5 分别为0、0、1、0、0）、绿色技术创新支持政策只盯住资产价格（反应系数 ϱ_1 、 ϱ_2 、 ϱ_3 、 ϱ_4 和 ϱ_5 分别为0、0、0、1、1）、绿色技术创新支持政策总体（反应系数 ϱ_1 、 ϱ_2 、 ϱ_3 、 ϱ_4 和 ϱ_5 均为1）。

基于此，本文分别计算出在极端天气风险冲击下不同政策框架下的产出、通胀、违约率、杠杆率的福利损失情况及其总福利损失情况^①，并计算了各个政策组合相对于基准模型的福利改善程度，进而分析各个政策组合的政策效果。相关福利分析结果如表1所示。

在“双支柱”调控体系下面对极端天气风险冲击的模拟结果（详见表1）表明：（1）宏观审慎政策只盯住产出虽然可以降低产出及通胀的波动，但会导致违约率和杠杆率的波动性显著上升，不利于金融市场的稳定；（2）如果宏观审慎政策只盯住违约率，虽然产出、通胀的波动性会略微增加，但违约率和杠杆率的波动性会大幅度降低，有利于实现“防风险”目标；（3）当宏观审慎政策只盯住杠杆率时，其效果与宏观审慎政策只盯住违约率类似，但降低违约率和杠杆率波动性的作用明显弱于只盯住违约率的情形；（4）在宏观审慎政策只盯住资产价格的情形下，产出、通胀、违约率和杠杆率的波动性均未改善，说明宏观审慎政策只盯住资产价格可能会加大宏观经济和金融市场的波动；（5）当宏观审慎政策同时盯住产出、违约率、杠杆率和

^① 本文将产出、通胀、违约率和杠杆率在福利损失函数的权重均设为1，即等权重。当然，权重的设定依赖于政策制定者对各个指标的看重程度。

资产价格时,产出和通胀的福利损失与基准情形比较接近,并且违约率和杠杆率的福利损失明显下降,总体上能实现“稳增长”和“防风险”的双目标。根据上述模拟结果,采用货币政策与宏观审慎政策“双支柱”调控,明显优于单独使用货币政策工具的情形,表明宏观审慎政策在稳定宏观经济和降低金融风险方面能够发挥比较大的作用。本文的这一理论模拟结果还表明,将气候风险纳入到宏观审慎政策框架中,可以显著降低实体经济和金融市场的波动。

表 1: 极端天气风险冲击下不同政策组合的福利效果

情形设定	产出福利损失	通胀福利损失	违约率福利损失	杠杆率福利损失	总福利损失
单支柱 基准模型	9.2380	0.3383	37.2651	0.5714	47.4128
宏观审慎政策只盯住产出	8.6890	0.3305	1415.6101	20.6982	1445.3278 (-29.4839)
宏观审慎政策只盯住违约率	9.4937	0.3412	0.0104	0.0002	9.8455 (0.7923)
宏观审慎政策只盯住杠杆率	9.3846	0.3407	12.7257	0.1958	22.6468 (0.5223)
宏观审慎政策只盯住资产价格	9.5515	0.3434	1723.61	24.6854	1758.1903 (-36.0826)
宏观审慎政策总体	9.4571	0.3409	0.6311	0.0097	10.4388 (0.7798)
双支柱 “双支柱”调控政策总体+降低金融摩擦	9.2203	0.3368	0.2112	0.0989	9.8672 (0.7919)
“双支柱”调控政策总体+绿色技术创新支持政策只盯住产出	1.4732	0.1319	0.0230	0.0004	1.6285 (0.9657)
“双支柱”调控政策总体+绿色技术创新支持政策只盯住违约率	2.3802	0.1585	0.0291	0.0004	2.5682 (0.9458)
“双支柱”调控政策总体+绿色技术创新支持政策只盯住杠杆率	8.0173	0.3058	0.1903	0.0029	8.5163 (0.8204)
“双支柱”调控政策总体+绿色技术创新支持政策只盯住资产价格	4.3230	0.2109	0.0692	0.0011	4.6042 (0.9029)
“双支柱”调控政策总体+绿色技术创新支持政策总体	2.4316	0.1602	0.0300	0.0005	2.6223 (0.9447)

注: 括号内数字为各情形相对于基准模型的福利改善程度, 即等于(基准模型的福利损失 - 某个政策下模型的福利损失) / 基准模型的福利损失。如果数值为正数, 则说明福利出现改善; 如果数值为负数, 则说明福利出现损失。

在“双支柱”调控政策总体+降低金融摩擦的情形下, 将金融监管成本系数 μ 的校准值由0.3降为0.15后的模拟结果显示, 与货币政策+宏观审慎政策情形相比, 降低金融市场风险溢价能够显著降低违约率的波动性, 并且产出和通胀的波动性也低于基准模型, 只有杠杆率的波动性出现显著上涨。就降低违约率的波动性而言, 可能是由于金融市场风险溢价的下降有效降低了企业的融资成本, 因而有利于降低违约率; 而就显著提升杠杆率的波动性而言, 则可能是因为金融风险溢价的下降使金融中介降低了贷款利率的门槛, 导致生产率较低的企业同样可以获得贷款, 从而造成杠杆率的上升。

在“双支柱”调控体系总体+绿色技术创新支持政策情形下, 对宏观经济和金融市场影响

的模拟结果表明：在绿色技术创新支持政策只盯住产出时，明显优于其他绿色技术创新支持政策，不仅能够大幅降低产出、通胀的波动，还能降低违约率和杠杆率的波动，表明它可以大幅度改善福利。这一模拟结果也说明，逆周期的绿色技术创新支持政策能显著降低极端天气风险冲击对实体经济和金融市场的不良影响。总体来看，在“双支柱”调控体系下实施绿色技术创新支持政策能够在实现“稳增长”的同时，较好地兼顾“防风险”的目标，有利于宏观经济和金融市场的稳定。

五、结论和政策建议

本文使用美国NCEI提供的全球气象站点数据，构建了中国极端天气风险指数的月度时间序列，并运用SVAR模型探究了极端天气风险冲击对我国实体经济和金融风险的具体影响及其机理。在此基础上，本文构建了包含极端天气风险冲击、企业碳排放和金融摩擦的DSGE模型，从理论上模拟分析极端天气风险冲击的具体影响及其机理；同时还考察了“双支柱”框架下宏观审慎政策工具在应对极端天气风险冲击方面的积极作用。

本文的研究得出如下结论：（1）极端天气风险冲击会给我国实体经济活动带来显著的紧缩效应，并明显增加我国金融市场的风险，不利于我国实现“稳增长”和“防风险”的目标。（2）在影响机制方面，极端天气风险的上升会带来信用风险溢价和不确定性的上升，而金融摩擦和不确定性会放大极端天气风险冲击对实体经济的负面影响，进而会加剧极端天气风险对实体部门的紧缩效应。（3）在“双支柱”框架下，实施宏观审慎政策整体上有利于稳定宏观经济和降低金融风险。当“双支柱”调控政策与降低金融摩擦相配合或与盯住产出的逆周期绿色技术创新支持政策相配合时，不仅有利于缓解极端天气风险带来的实体经济下行压力，降低实体经济波动，还可以避免金融风险的过度累积，助力我国实现“稳增长”和“防风险”的双重目标。

根据本文的研究结论提出以下建议：第一，随着气候变化带来的风险挑战和极端气候事件的增多，我国应进一步加强对气候风险的防范，完善对极端气候事件的监测和预警。特别是要警惕极端天气引发的复合型气象灾害风险，避免气候风险对实体经济造成持续的负面冲击，防止气候风险溢出推升我国的金融风险。第二，我国应该高度关注金融摩擦、不确定性等放大气候风险冲击不利影响的因素，在极端气候事件爆发时，坚守“稳增长”和“防风险”双底线思维，及时采取有力措施稳定金融市场，加强与市场主体的沟通，着力降低金融市场摩擦，尽量避免企业融资溢价和不确定性的攀升，以减缓气候风险向实体经济部门的传导。第三，我国央行和金融监管部门应该及时识别、评估和应对气候变化，在货币政策和宏观审慎政策“双支柱”调控框架中全面考虑气候变化因素的影响，建立健全绿色技术创新支持政策，不断完善应对气候风险挑战的政策工具箱，守住不发生系统性金融风险的底线，维护金融市场稳定运行，推动实体经济平稳增长。

参考文献

1. 陈国进、陈凌凌、金昊和赵向琴, 气候转型风险与宏观经济政策调控, 经济研究, 2023 年第 5 期, 60-78。
2. 陈伟泽、陈小亮、王兆瑞和陈彦斌, 长期 TFP 增速变化对双支柱调控框架的影响研究——兼论双稳定目标的实现策略, 中国工业经济, 2023 年第 1 期, 19-37。
3. 范从来和高洁超, 银行资本监管与货币政策的最优配合: 基于异质性金融冲击视角, 管理世界, 2018 年第 1 期, 53-65、191。
4. 方意、张瀚文和荆中博, “双支柱”框架下中国式宏观审慎政策有效性评估, 经济学(季刊), 2022 年第 5 期, 1489-1510。
5. 李力、吴施美和陈贞竹, 极端天气风险与宏观经济波动——基于网络关联与空间溢出双重视角, 金融研究, 2023 年第 9 期, 58-75。
6. 刘建丰、于雪、彭俞超和许志伟, 房产税对宏观经济的影响效应研究, 金融研究, 2020 年第 8 期, 34-53。
7. 马勇, 植入金融因素的 DSGE 模型与宏观审慎货币政策规则, 世界经济, 2013 年第 7 期, 68-92。
8. 马勇和姚驰, 外生冲击下双支柱调控框架的稳定效应——理论建模及基于全球样本的实证检验, 中国工业经济, 2022 年第 12 期, 14-32。
9. 潘敏、刘红艳和程子帅, 极端气候对商业银行风险承担的影响——来自中国地方性商业银行的经验证据, 金融研究, 2022 年第 10 期, 39-57。
10. 王博、李力和郝大鹏, 货币政策不确定性、违约风险与宏观经济波动, 经济研究, 2019 年第 3 期, 119-134。
11. 杨子晖、李东承和陈雨恬, 金融市场的“绿天鹅”风险研究——基于物理风险与转型风险的双重视角, 管理世界, 2024 年第 2 期, 47-67。
12. Acevedo, S., M. Mrkaic, N. Novta, E. Pugacheva and P. Topalova, The Effects of Weather Shocks on Economic Activity: What Are the Channels of Impact? Journal of Macroeconomics, 2020, Vol.65, 103207.
13. Bernanke B. S., M. Gertler and S. Gilchrist, The Financial Accelerator in a Quantitative Business Cycle Framework, Handbook of Macroeconomics, 1999, Vol.1, 1341-1393.
14. Burke, M., S. M. Hsiang and E. Miguel, Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production, Nature, 2015, Vol.527(7577), 235-239.
15. Cai, X., Y. Lu and J. Wang, The Impact of Temperature on Manufacturing Worker Productivity: Evidence from Personnel Data, Journal of Comparative Economics, 2018, Vol.46(4), 889-905.
16. Calvo, G. A. Staggered Prices in a Utility-Maximizing Framework, Journal of Monetary Economics, 1983, Vol.12(3), 383-398.
17. Cantelmo, A., G. Melina and C. Papageorgiou, Macroeconomic Outcomes in Disaster-prone Countries, Journal of Development Economics, 2023, Vol.161, 103037.
18. Carrillo, J. A., E. G. Mendoza, V. Nuguer, et al., Tight Money-Tight Credit: Coordination Failure in the Conduct of Monetary and Financial Policies, American Economic Journal: Macroeconomics, 2021, Vol.13(3), 37-73.
19. Christiano, L. J., R. Motto and M. Rostagno, Risk Shocks, American Economic Review, 2014, Vol.104(1), 27-65.
20. Dell, M., B. F. Jones and B. A. Olken, Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last

Half Century, American Economic Journal: Macroeconomics, 2012, Vol.4(3), 66-95.

21.Fabris, N., Financial Stability and Climate Change, Journal of Central Banking Theory and Practice, 2020, Vol.9(3), 27-43.

22.Gourio F., Disaster Risk and Business Cycles, American Economic Review, 2012, Vol.102(6): 2734-2766.

23.Gourio F., Credit Risk and Disaster Risk, American Economic Journal: Macroeconomics, 2013, Vol.5(3), 1-34.

24.Heutel G., How Should Environmental Policy Respond to Business Cycles? Optimal Policy under Persistent Productivity Shocks, Review of Economic Dynamics, 2012, Vol.15(2), 244-264.

25.Huang, H. H., J. Kerstein and C. Wang, The Impact of Climate Risk on Firm Performance and Financing Choices: An International Comparison, Journal of International Business Studies, 2018, Vol.49(5), 633-656.

26.Kim, H. S., C. Matthes and T. Phan, Severe Weather and the Macroeconomy, American Economic Journal: Macroeconomics, 2025, Vol.17(2), 315-341.

27.Kockerols T., C. and Kok, Leaning Against the Wind: Macroprudential Policy and the Financial Cycle, International Journal of Central Banking, 2021, Vol.17(5), 177-235.

28.Ludvigson, S. C., S. Ma and S. Ng, COVID-19 and the Macroeconomic Effects of Costly Disasters, NBER Working paper, 2020, No.26987.

29.McKibbin, W. J., A. C. Morris, P. J. Wilcoxon, et al., Climate Change and Monetary Policy: Issues for Policy Design and Modelling, Oxford Review of Economic Policy, 2020, Vol.36(3), 579-603.

30.Nordhaus W., Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE Model, 1992-2017, Climatic change, 2018, Vol.148(4), 623-640.

31.Sims E., and J. C. Wu, Evaluating Central Banks' Tool Kit: Past, Present, and Future, Journal of Monetary Economics, 2021, Vol.118, 135-160.

32.Somanathan, E., R. Somanathan, A. Sudarshan, et al., The Impact of Temperature on Productivity and Labor Supply: Evidence from Indian Manufacturing, Journal of Political Economy, 2021, Vol.129(6), 1797-1827.

Abstract: In recent years, the frequency and intensity of extreme weather events in China have increased significantly. This paper uses China's extreme weather risk index constructed from 2006 to 2023, SVAR model and DSGE model including extreme weather risk shocks, corporate carbon emission and financial frictions to explore the specific impact and mechanism of extreme weather risks on China's real economy and financial risks. The paper further discusses the effectiveness of macro-prudential policies in regulating extreme weather risks under the "dual-pillar" framework. The research finds that extreme weather risks can not only bring about a significant decline in China's real economic activities, but also increase China's financial risks. The rise in extreme weather risks can lead to an increase in credit risk premiums and uncertainty, which will in turn intensify the tightening effect of extreme weather risks on the real economy. Under the "dual-pillar" regulatory framework, reducing financial frictions or implementing countercyclical green technology innovation support policies that target output can not only help alleviate the downward pressure on the real economy caused by extreme weather risks, but also avoid excessive accumulation of financial risks, which is conducive to achieving the dual goals of "stabilizing growth" and "preventing risks". The paper has certain reference value for China to improve its ability to cope with climate change and adhere to the double bottom line macro-control of "stabilizing growth" and "preventing risks".

Key Words: Extreme Weather Risks; Macro-Prudential Policy; “Dual-Pillar” Regulation; DSGE Model

(编辑: 张蓐严; 校对: 刘 飞)