

# “厚尾”高温灾害造成了多少经济损失： 基于 DSGE 模型的评估研究

吴先华<sup>1</sup>, 曲尧<sup>2</sup>, 杨蕊<sup>1</sup>

(1. 上海海事大学经济管理学院, 上海 201306; 2. 润通航运服务有限公司, 上海 200137)

**摘要:**在气候变化背景下, 高温等气象灾害日益频发, 引发社会各界的高度关注。本文构建动态随机一般均衡 (DSGE) 模型量化气候风险的长期经济影响, 评估具有“厚尾”特征的极端高温灾害导致的经济损失。通过耦合“碳排放模块、温度变化模块、经济损失模块、宏观经济模块”4 个模块, 将灾害发生概率内生于贴现率方程, 并设计不同类型的损失函数, 在多种情景下预测了 2025—2200 年的经济损失。主要结论: (1) “厚尾”高温的经济损失显著高于基准情景, 非线性情景下 2200 年全球损失可达 1 106 万亿美元, 较线性模型高 10.8 倍, 并结合《巴黎协定》温控目标进行 1.5 °C、2 °C、2.3 °C 三个升温阈值模拟, 发现当温度上升超过 2.3 °C 时, 比例损失将大幅度上升; (2) 灾害贴现率显著提升社会碳排放成本, 2100 年非线性增长的社会碳排放成本为 1 091.8 美元/吨, 较传统模型高 5.2%, 揭示现行碳价机制存在严重低估; (3) 温度不确定性与损失方差若提升 10%, 损失将分别增加 30.1% 和 21.0%, 验证了损失结果的不确定性。本文将“厚尾”风险与贴现率动态关联, 提出了“风险溢价确定价”的分析框架, 丰富了气候变化经济学的研究内容。

**关键词:**“厚尾”高温; 动态随机一般均衡; 贴现率; 经济损失

**中图分类号:**F822.1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1005-0566(2026)05-0042-15

## How much economic loss is caused by the “fat-tailed” high-temperature disasters: An evaluation study based on the DSGE model

WU Xianhua<sup>1</sup>, QU Yao<sup>2</sup>, YANG Rui<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. RMS Marine Service Company Ltd., Shanghai 200137, China)

**Abstract:** Against the backdrop of climate change, meteorological disasters such as high temperatures have become increasingly frequent, attracting great attention from all sectors of society. This paper constructs a Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE) model to quantify the long-term economic impacts of climate risks and assess the economic losses caused by extreme high-temperature disasters with “fat-tailed” characteristics. By coupling four modules—“carbon emission module, temperature change module, economic loss module, and macroeconomic module”—the probability of disaster occurrence is endogenized into the discount rate equation, and different types of loss functions are designed to predict economic losses from 2025 to 2200 under various scenarios. The main conclusions are as follows: (1) The economic losses from “fat-tailed” high temperatures are significantly higher than those in the benchmark

**基金项目:**国家自然科学基金项目(72474127)。

**作者简介:**吴先华(1977—), 男, 湖北石首人, 上海海事大学经济管理学院教授, 博士, 研究方向为大数据管理、风险分析、应急管理、航运经济学。

scenario, under the nonlinear scenario, the global loss in 2 200 could reach 11.06 trillion US dollars, which is 10.8 times higher than that in the linear model. Based on the temperature control targets of the Paris Agreement, simulations are conducted for three warming thresholds: 1.5 °C, 2 °C, and 2.3 °C, and it is found that when the temperature rise exceeds 2.3 °C, the proportional loss will increase sharply; (2) The disaster discount rate significantly increases the social cost of carbon emissions, the socially nonlinear growth cost of carbon emissions in 2 100 is 1 091.8 US dollars per ton, which is 5.2% higher than that in the traditional model, revealing that the current carbon pricing mechanism is seriously underestimated; (3) If temperature uncertainty and loss variance increase by 10%, the losses will increase by 30.1% and 21.0% respectively, verifying the uncertainty of the loss results. This study dynamically links “fat-tailed” risks with the discount rate, proposes an analytical framework of “risk premium carbon pricing”, and enriches the research content of climate change economics.

**Key words:** fat-tailed heat events; Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE); discount rate; economic loss

全球气候系统正经历前所未有的剧烈变化。根据世界气象组织(WMO)2023年报告,2022年全球平均温度较工业化前水平(1850—1900年)升高1.15 °C,而2023年6~10月全球平均温度距平值达+1.43 °C,刷新1850年有观测记录以来的最高值。这一升温趋势的加速与碳排放的持续累积密切相关。工业革命以来,人类活动已向大气排放超过2.5亿吨CO<sub>2</sub>,其中近50%产生于1990年后。国际能源署(IEA)数据显示,2022年全球化石能源碳排放量达368亿吨,较1990年增长67%,其中中国占比超30%。在此背景下,极端高温事件正从“百年一遇”演变为“十年一遇”,气候变化具有显著“厚尾”高温现象,即原属于小概率事件的高温灾害性事件日益增多,发生概率显著增加。

2022年6至9月,欧洲因高温天气直接或间接导致6.2万例死亡。中国国家气象中心数据显示,2023年中国高温日数(日最高温度≥35 °C)创下1961年以来最高值,多地日最高温度超过40 °C。2023年6月到10月为1850年以来全球平均同期最暖,2023年可能成为历史记录中最热的一年。2025年延续了全球气温屡创新高的趋势,过去11年为有记录以来最热的11年,且2023—2025年平均气温较工业化前高出1.48 °C,是史上最热的3年<sup>①</sup>。

这些随全球变暖而产生的高温天气的概率正在上升,对人类社会生态系统产生冲击,造成巨大的经济损失,其后果超出传统预估。以中国为例,

2023年夏季持续高温导致华东地区电力负荷峰值增加23%,制造业因限电停工损失超1 200亿元;农业方面,黄淮流域玉米减产12%,直接冲击粮食安全。

然而,现有评估模型多基于线性假设,低估了“厚尾”风险。例如,Nordhaus的DICE模型预测2100年全球升温2.5 °C对应经济损失为GDP的4%~6%,但其二次损害函数未能捕捉临界点触发后的高额损失(如冻土融化释放甲烷的反馈循环)。该理论缺陷导致政策设计滞后:欧盟碳市场当前碳价约80欧元/吨,仅为IPCC要求(2030年需达150~200美元/吨)的40%。主流模型以国家/大区为分析单元,难以识别城市群、产业园区等关键经济节点的脆弱性差异。雄安新区建设监测显示,CBD区域热岛强度较周边农田高2.8 °C,微气候差异导致空调能耗差异达41%。现有气候经济模型的损害函数多采用温度与损失的确定性映射,忽视极端事件的统计“厚尾”性;贴现率设定依赖外生参数(如Ramsey规则),未考虑灾害概率上升对代际偏好的影响。

本文在动态随机一般均衡模型基础上,设计适应性贴现率方程,将灾害概率与风险厌恶系数动态关联,刻画社会学习效应;在DSGE框架中嵌入Weitzman的“悲观定理”,考虑了极端天气事件的影响,量化了多因素不确定性的协同放大效应,是现有灾害经济损失评估研究的有益补充,可为极端气候灾害损失评估提供基础方法支持。

<sup>①</sup> 世界气象组织,欧盟哥白尼气候变化服务局. 2025年全球气候状况报告[R]. 2026. <https://www.wmo.int/>

## 一、文献综述

### (一)“厚尾”高温问题的相关论述

Weitzman<sup>[1]</sup>较早注意到气候变化存在“厚尾”高温问题。他指出 Nordhaus<sup>[2-5]</sup>的分析框架仅符合温和的全球性升温情况,而气候灾害的发生具有“厚尾”的特征:一旦全球温度超过阈值后,高温巨灾发生的概率及其造成的损失迅速上升。《巴黎协定》规定:本世纪全球平均气温升幅与工业革命前水平相比不超过 2℃,尽量将气温升幅控制在 1.5℃之内。但在 Weitzman 看来,相较于平均气温的升高,不确定性的气温上升才是真正需要关注的问题。他通过实证案例研究,讨论了具有“厚尾”特征的温度变化和损失比例<sup>[1,6]</sup>。为了针对性地解决“厚尾”高温问题,Weitzman 沿用 SCC(当期额外一吨碳排放造成的累计未来经济损失的现值)这一指标,刻画了“厚尾”的经济影响,测算出了碳排放社会成本。在此基础上,他提出了“厚尾”高温问题的一个可能解决方案,即“未来气候大会(WCA)”,用于制定令世界碳排放成本最低的全球最优碳价格,激励各国内化外部性来获取利益<sup>[7-10]</sup>。

在 Weitzman 的研究基础上,大量的学者针对高温“厚尾”问题进行了研究。Ackerman 等<sup>[11]</sup>设置了一个高气候敏感性、高损害值和低贴现率的情景,用于模拟气候变化的“厚尾”现象,发现要达到本世纪末全球零净排放的目标,2050 年前每吨二氧化碳减排成本高达 150~500 美元;Bansal 等<sup>[12]</sup>考虑了气温、经济增长和风险之间的相互作用,发现气温对经济增长的长期影响越显著,社会碳排放成本就越显著,应尽快处理不确定性,以降低成本;Kelly 等<sup>[13]</sup>通过贝叶斯学习控制减少的速度以模拟不确定性的减少,发现了“尾部学习”的现象,即规划者以很高的置信度拒绝气候敏感性(气候敏感性不确定性一般定义为碳排放较工业化前提升两倍造成的全球平均升温)的高值,但不确定性仍然存在;Dellink 等<sup>[14]</sup>在博弈论 STACO 模型的基础上加入了随机分析,研究了巨额气候变化损害“厚尾”对达成国际气候治理协议的影响,发现更宽的尾部意味着更有效的国际气候协议。

这些研究强调了“厚尾”高温的损失的重要性,Kelly 等<sup>[13]</sup>和 Dellink 等<sup>[14]</sup>还反映了“厚尾”情景下,人们更加重视气候灾害损失,这给本文提供了思路,即考虑“厚尾”高温情景下,人们的学习效应可能对碳排放造成的灾害损失有不确定影响。

### (二)贴现率对碳排放损失的影响

Weitzman<sup>[15]</sup>认为,在考虑未来的气候灾害造成的损失时,贴现率是不确定的,应使用所有可能存在的贴现率中最小的贴现率。灾害的贴现率衡量我们规避未来的损失的支付意愿。如:为了避免 300 年后因气候变化而发生的损失价值为 100 元的气候灾害,当下人们最多愿意付出多少成本? 1% 年贴现率相当于当前人们愿意付出 5 元,2% 年贴现率相当于意愿的付出成本为 3 角,3% 年的贴现率则会进一步降低到 1 分 4 厘。选用的贴现率越小,意味着我们越重视未来的气候问题,我们越愿意在当下付出更高的代价来避免气候变化的后果<sup>[15]</sup>。当斯特恩报告使用 1.4% 贴现率时,Weitzman<sup>[16]</sup>对其提出了质疑,他指出,该报告忽视了不确定性,认为用于治理全球变暖的成本不代表消费平滑化,而是一种投保行为,用于抵消由不确定性导致的高额灾难损失。通过将不确定性引入模型,Weitzman<sup>[17]</sup>证明了全球温度的分布具有“厚尾”和高方差的特性,当使用仅随时间变化贴现率时,贴现率往往偏高,预期损害将大幅提升。Weitzman<sup>[18]</sup>还使用了贝叶斯学习对结论进行了检验,发现结构性尾部膨胀不确定性(以及高温损害的不确定性)在气候变化政策分析中很容易超过贴现效应的影响。

但在 Weitzman 的研究中,贴现率在每个时间上都表现为不确定,不具有进步和学习的特点,这使得他对气候变化的治理前景持悲观态度。相较之下,Hasselmann<sup>[19]</sup>的态度则更加乐观,他将气候看作一种“资产”,具有自我增值的特性。一方面,他用支付意愿(指人们为了维持个人健康、一定的寿命水平和优质的气候条件所愿意付出的成本)来评估气候变化损失,结合物质生产水平的提高,气候“资产”所产生的收益在未来更加高昂。另一方面,他认为气候减缓措施的成本会随着脱碳技

术进步和工业技术的发展而减少,因此在未来会以更低的成本来实现气候减缓政策。由此,他认为气候损失和气候治理成本应设置不同的贴现率,且该贴现率应涵盖技术进步的效应,随时间按一定的趋势变化。

本文结合了 Hasselmann 和 Weitzman 对于贴现率的观点,重新构建贴现率和灾害发生概率之间的关系方程,进而分析其对社会碳排放成本(SCC)的影响。

### (三)基于 DSGE 的实证研究

DSGE 模型(dynamic stochastic general equilibrium)将气候变化的不确定性加入模型中,用于计算排放的边际外部性损害(用于计算最优碳税),研究发现对经济福利的主要威胁是煤炭,而不是石油,不采取措施的成本受不同能源替代性和技术进步假设的影响较大<sup>[20]</sup>;将风险加入模型中,基于 DSICE (Dynamic Stochastic Integrated Climate-Economy)模型,建立了一个动态随机气候—经济框架,证明了碳排放成本在很大程度上受到经济 and 气候不确定性的影响,是一个变动很大的随机过程<sup>[21]</sup>;引入随机分析方法,建立了 DGE 模型,引入了不同的风险厌恶度和跨期波动,通过使气候敏感性和损害比率的风险分布具有偏度和动态性,研究了经济、损害比率的不确定性和凸性损害对最优碳价格的影响效应的定量结果<sup>[22-23]</sup>;也有研究使用 DICE 模型框架构建经济—气候响应模型,在技术不确定假定下模拟出 2050 年全球大气温度较 2000 年上升约 2℃,并发现一般生产技术与能源相关技术冲击的传导路径和变量响应机制存在显著差异,二者共同作用对气温和工业碳排放的影响方向具有不确定性,同时给出了政府 R&D 资金配置的政策建议<sup>[24]</sup>;有研究聚焦极端天气事件的 GDP 损失评估,通过 DICE 模型及新的广义对数正态分布函数,量化不同碳排放情景下未来 70 年全球 GDP 年损失率的概率分布,发现各情景下损失率均呈现小概率大损失特征,可为巨灾风险损失量化提供依据<sup>[25]</sup>;还有研究立足全球经济一体化背景,以拉姆齐函数发展出 RICE 和 MRICES 模型,建立了适配全球经济一体化结构的 MRICES—2012 气候经

济学集成评估模型,模拟分析了兼顾全球减排与发展中国家利益的减排方案及总量减排方案的国际公平性,发现 2100 年人均累积碳排放相等的减排方案不具备可行性,人均碳排放相等的方案虽可实现但公平性不足,并据此提出了契合哥本哈根共识、保障各国利益的全球总量减排具体方案<sup>[26]</sup>。

气候变化问题具有长期性、全球性等基本特征,气候综合评估研究虽在理论建模与实际应用上取得实质性进展,但仍存在明显研究局限:技术处理上对内生技术的成熟度和 R&D 投资的挤出与溢出效应关注不足;气候损失度量上对非市场化损失和适应性的考察有待加强;不确定性研究上,对影响代际效用分配的时间偏好率、技术学习效应的不确定性探究仍有欠缺<sup>[27]</sup>。对不确定性的处理更是气候经济复杂系统建模的难点与政策研究分歧的重点,相关研究归纳了自然气候、社会经济等多模块的不确定性并分类,指出风险型不确定性可用随机动态规划处理,模型相关不确定性则倾向于决策分析方法;在具体建模中,碳—气候响应集成、随机过程模拟等均为常用方式,气候临界点、代际公平等也逐步纳入模型,负排放等技术或将成为未来研究热点,而模型求解困难仍是主要瓶颈,未来需兼顾多方面因素并纳入决策者异质性及博弈机制<sup>[28]</sup>。

DSGE 模型广泛应用于不确定性的研究和气候政策的评估。De Bruin 等<sup>[29]</sup>研究了气候适应性政策和气候变化减缓性政策之间的取舍,指出适应性政策是对抗气候变化的较好选项,而减缓政策则有一定的滞后性;Gillingham 等<sup>[30]</sup>研究了人口增长不确定性、要素生产率不确定性和气候敏感性模型,发现经济风险的不确定性显著提高了社会碳排放损失;Barnett 等<sup>[31]</sup>改进了政策方案的评价模型,强调量化不确定性的重要性。Van 等<sup>[32]</sup>假设碳排放强度随着碳税的增加而下降,使用德国家庭数据估计了 EASI 需求系统和劳动力供给曲线,评估了转移支付和碳税两种政策的优势和劣势。

在极端气候与宏观金融稳定领域,DSGE 模型

的应用进一步延伸。Li 等<sup>[33]</sup>构建了包含金融部门的 DSGE 模型,分析极端气候冲击对资产价格与金融稳定的影响。研究发现,极端天气会降低产出与资本收益,加剧资产价格波动;金融摩擦会非线性放大冲击,推高风险溢价并加剧系统性风险。Cantelmo 等<sup>[34]</sup>则聚焦自然灾害冲击下的货币政策选择,通过分析 1999—2017 年 16 个灾害高发国家的 34 次灾害年份的 IMF 报告发现,货币当局并未形成应对气候冲击的系统性方案。采用包含灾害冲击的小型开放经济新凯恩斯 DSGE 模型开展研究,结果表明,与经典理论一致,通胀目标制仍是福利最优的政策规则,货币当局应避免对灾害冲击采取适应性宽松的货币政策,专注于维持价格稳定。

结合上述模型的设计思路,在随机分析的基础上,沿碳排放→碳浓度→温度变化→经济损失的分析链条,利用 DSGE 模型对高温“厚尾”情景下的不同贴现率与碳排放损失进行建模,为预测未来可能发生的极端气候灾害的防治成本提供了思路,也为国家有关部门制定碳减排政策、确定碳交易价格等决策提供参考。

本文可能的创新点包括两个方面。一是重新设计贴现率。在研究碳排放的社会经济损失的过程中,学术界对贴现率的设计经历了反复的研究,但这些研究大多数将灾害的贴现率等同于一般的贴现率。部分学者意识到了灾害贴现率的不同,但仅将其做了分类,没有考虑这种贴现率可能的改进情况。本文将贴现率与灾害发生概率相关联,得到改进型的灾害贴现率。二是改进 DSGE 模型,评估“厚尾”高温灾害的经济损失。随着灾难的发生概率提升,人们对于风险的态度会受到影响,本文考虑将  $\eta$  设置为  $\eta(H(T_t - T_0) D_t)$ ,即将风险厌恶系数设置为受灾难发生概率影响的函数,以更加精确地刻画“厚尾”这一现象,从而得到受灾害事件影响的 DSGE 模型。

## 二、碳排放经济损失模型

本部分介绍碳排放经济损失的模型构架思路。首先对碳排放的形成进行模拟,对当期碳排放的趋势进行拟合,进一步计算得出累计碳排放

值。然后建立累计碳排放量和温度之间的关系,设定温度过程的随机微分方程,刻画温度变化的趋势。同时建立宏观经济变化模块,刻画经济增长过程。最后将温度变化过程与经济增长过程结合,建立温度变化对经济增长的影响随机微分方程,从而刻画碳排放造成的经济损失。

### (一)碳排放模块

首先,假设碳排放成因主要来自于传统化石能源的消耗,参考 Van 等<sup>[22]</sup>的假设,将产生碳排放的能源设置为:

$$F_t e^{-\varphi T e c_t} \quad (1)$$

其中,  $F_t$  为传统化石能源的真实消耗量(2022 年前)/拟合消耗量(2025 年后);  $e^{-\varphi T e c_t}$  刻画了随技术水平发展逐渐提高的能源使用效率;  $\varphi_t$  为技术对能源消耗的影响;  $T e c_t$  为技术进步周期,设定为 5 年(Acemoglu 等<sup>[12]</sup>)。

考虑到当期碳排放量一部分被自然界吸收,将  $k$  时刻碳排放对  $t$  时刻的影响定义为  $C_t$ :

$$C_t = [\varphi_L + \varphi_0(1 - \varphi_L)(1 - \varphi)^{t-k+1}] \mu_1 F_k e^{-\varphi^k} \quad (2)$$

式中,  $\varphi_L$  为  $k$  时刻碳排放固定在自然界中的比重;  $\varphi_0(1 - \varphi_L)(1 - \varphi)^{t-k+1}$  刻画了自然界随时间逐步吸收的碳排放比重;  $\varphi_0$  表示  $t$  时刻碳排放的吸收比例;  $(1 - \varphi)^{t-k+1}$  表示随  $k$  时刻与  $t$  时刻之间的时间差增加而逐步降低的  $k$  时刻碳排放的吸收效率;  $\mu_1$  为能源消耗转化为碳排放的比例。

因此,  $t$  时刻的累计碳排放值可表示为  $AC_t$ :

$$AC_t = \mu_2 \{ AC_0 + \sum_k^t [\varphi_L + \varphi_0(1 - \varphi_L)(1 - \varphi)^{t-k+1}] \mu_1 F_k e^{-\varphi^k} \}, k \leq t \quad (3)$$

式中,  $AC_0$  为初始碳排放量;  $AC_t$  由初始碳排放量和累计  $k$  时刻到  $t$  时刻的当期碳排放组成。考虑到跨时期的不确定因素的影响,设定  $\mu_2$  为累计碳排放量转化累计“净”排放量的比例。由此得到了碳排放模块。

### (二)温度变化模块

温度的变化受累计碳排放量、温度自反馈因素和不确定性的影响。参考 Van 等<sup>[22]</sup>,将温度过程设定为:

$$dT_t = \left( \varepsilon \frac{AC_t}{AC_0} + m \frac{T_t}{T_0} \right) dt + \sigma_T T_t dW_t \quad (4)$$

该式表示  $t$  时刻的温度变化  $dT_t$  由累计碳排放量因素  $\varepsilon \frac{AC_t}{AC_0} dt$ 、温度自反馈因素  $m \frac{T_t}{T_0} dt$  和不确定性因素  $\sigma_T T_t dW_t$  组成。初始时刻温度为  $T_0$ ,  $t$  时刻的温度为  $T_t$ ,  $\frac{AC_t}{AC_0}$  和  $\frac{T_t}{T_0}$  表示相对于初始时刻累计碳排放量和温度的变化比,  $\varepsilon$  和  $m$  分别是累计碳排放量因素和温度自反馈因素的影响系数。 $\sigma_T$  为温度不确定性的波动率,  $W_t$  是标准维纳过程。

由积分因子法和伊藤积分求得积分因子  $f_t = f_0 \exp\left(\left(\frac{1}{2} \sigma_T^2 - \frac{m}{T_0}\right)t - \sigma_T w_t\right)$ , 进一步结合式(4), 解得温度过程为:

$$T_t = T_0 \exp\left(\sigma_T W_t - \left(\frac{\sigma_T^2}{2} - \frac{m}{T_0}\right)t\right) + \varepsilon \frac{AC_t}{AC_0} \int_0^t \exp\left[\sigma_T (W_t - W_s) - \left(\frac{\sigma_T^2}{2} - \frac{m}{T_0}\right)(t-s)\right] ds \quad (5)$$

为方便计算温度过程的统计性质, 引入矩母函数, 即  $M_{T_t}(s) = E(e^{sT_t})$ , 解得:

$$M_{T_t}(s) \approx \exp\left[s \left[ T_0 \left(1 - \left(\frac{\sigma_T^2}{2} - \frac{m}{T_0}\right)t\right) + \varepsilon \frac{AC_t}{AC_0} \left(t - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_T^2}{2} - \frac{m}{T_0}\right)t^2\right) + \frac{T_0^2 \sigma_T^2}{2} s^2 \right] \left(1 + \frac{\sigma_T^2}{6} \left(\varepsilon \frac{AC_t}{AC_0}\right)^2 t^3 s^2\right)\right] \quad (6)$$

则温度过程的期望与方差  $E(T_t) = M'_{T_t}(0)$ ,  $Var(T_t) = M''_{T_t}(0) - [M'_{T_t}(0)]^2$ :

$$E(T_t) = T_0 \left(1 - \left(\frac{\sigma_T^2}{2} - \frac{m}{T_0}\right)t\right) + \varepsilon \frac{AC_t}{AC_0} \left(t - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_T^2}{2} - \frac{m}{T_0}\right)t^2\right) \quad (7)$$

$$Var(T_t) = T_0^2 \sigma_T^2 + \frac{\sigma_T^2}{3} \left(\varepsilon \frac{AC_t}{AC_0}\right)^2 t^3 \quad (8)$$

同时, 定义一个损失比例函数, 建立损失比例与温度水平之间的关系。本文灾害损失函数纳入损失比例函数, 用于刻画低概率、高损失的“黑天鹅”事件频发的情景。模型将全球灾害损失比例函数设置为  $D_t$ :

$$D_t = \mu_T (T_t - T_0)^{1+\theta_T} W_{D_t}^{1+\theta_w} + H(T_t - T_0) D_t \quad (9)$$

式中, 损失比例  $D_t$  由温度变化影响、不确定性影响和“厚尾”灾害影响三部分组成。 $\mu_T$  表示温度异常值与损失比例之间的转化比,  $\theta_T$  的取值为 0 或 1, 分别表示温度与损失之间的转化关系是线性增长和非线性增长。 $W_{D_t}$  是一个均值回归过程<sup>[22]</sup>, 表示温度变化的不确定性对损失比例的影响。 $H(T_t - T_0)$  是灾害发生概率函数, 用于刻画随温度增加而逐渐升高的“厚尾”高温灾害的损失, 参考 Cai 等<sup>[21]</sup> 设置为:  $1 - \exp(- (1 + \lambda \max\{0, E(T_t) - T_0\}))$ 。式中,  $\lambda$  为温度转化灾害的比例。化简为:

$$D_t = \exp(1 + \lambda \max\{0, E(T_t) - T_0\}) \mu_T (T_t - T_0)^{1+\theta_T} W_{D_t}^{1+\theta_w} \quad (10)$$

当损失比例随温度线性增长 ( $\theta_T = 0$ ) 时, 比例损失  $D_t$  的期望和方差分别为:

$$E(D_t) = \exp(1 + \lambda \max\{0, E(T_t) - T_0\}) \mu_T E(T_t - T_0) E(W_{D_t}^{1+\theta_w}) \quad (11)$$

$$Var(D_t) = [\exp(1 + \lambda \max\{0, E(T_t) - T_0\}) \mu_T]^2 [Var(T_t - T_0) Var(W_{D_t}^{1+\theta_w}) + Var(T_t - T_0) E(W_{D_t}^{1+\theta_w})^2 + Var(W_{D_t}^{1+\theta_w}) E(T_t - T_0)^2] \quad (12)$$

当损失比例随温度非线性增长 ( $\theta_T = 1$ ) 时, 比例损失  $D_t$  的期望和方差分别为:

$$E(D_t) = \exp(1 + \lambda \max\{0, E(T_t) - T_0\}) \mu_T (E(T_t)^2 - 2 T_0 E(T_t) + T_0^2) E(W_{D_t}^{1+\theta_w}) \quad (13)$$

$$Var(D_t) = [\exp(1 + \lambda \max\{0, E(T_t) - T_0\}) \mu_T]^2 [(1 + \theta_T)^2 Var(T_t) Var(W_{D_t}^{1+\theta_w}) + (1 + \theta_T)^2 Var(T_t) E(W_{D_t}^{1+\theta_w})^2 + Var(W_{D_t}^{1+\theta_w}) (E(T_t)^2 - 2 T_0 E(T_t) + T_0^2)^2] \quad (14)$$

### (三) 经济损失模块

经济损失模块的表达式  $EL_t$  可以表示为:

$$EL_t = D_t Y_t + D_t \ln(Y_t) \quad (15)$$

式中,  $D_t Y_t$  是温度变化导致的经济产出的损失值,  $D_t \ln(Y_t)$  是温度变化导致的消费者效用的损失值, 两者加和构成了温度变化的经济系统损失值, 计算式为:

$$EL_t = [D_t Y_t + D_t \ln(Y_t)] = [\omega_Y' Y_0 + \frac{1 - \omega_Y'}{1 - \omega_Y} (\chi_t +$$

$$\zeta_Y W_{Y_t}) + \ln(\omega_Y^t Y_0 + \frac{1 - \omega_Y^t}{1 - \omega_Y} (\chi_t + \zeta_Y W_{Y_t})) ] [ \exp(1 + \lambda \max\{0, E(T_t) - T_0\}) \mu_T (T_t - T_0)^{1+\theta_T} W_{D_t}^{1+\theta_D} ] \quad (16)$$

进一步将温度水平  $T_t$  改写为累计碳排放量新增一吨时的温度  $\tilde{T}_t$ , 比例损失  $D_t$  改写为对应的损失比例  $\tilde{D}_t$ , 将  $K$  时刻排放的每吨碳在后续第 1、2、3、...、100 年产生的气候损失进行折现加总, 得到的当期新增一吨碳排放的未来总损失折现值, 即为社会碳成本 (social cost of carbon, SCC), 也是基于成本定价原则确定碳价的核心依据, 其表达式为:

$$SCC_t \equiv \sum_{i=t}^n (1 + r_t)^{-i} [ \tilde{D}_i Y_i + \tilde{D}_i \ln(Y_i) ] \quad (17)$$

可以看出,  $SCC_t$  作为碳价定价的重要参考, 主要由折现率  $r_t$ ;  $W_{Y_t}$  经济增长不确定性;  $\chi_t$  经济趋势不确定性;  $W_{D_t}$  损失不确定性和损失比例随温度变化的性质  $\theta_T$  等因素决定。其中折现率  $r_t$  将在后续章节讨论。

#### (四) 宏观经济模块

为预测经济增长过程, 将经济增长设置为一个马尔可夫链, 第  $n$  期的经济产出只与第  $(n - 1)$  期有关, 将经济增长的风险拆分为经济增长趋势的不确定性和经济增长的不确定性<sup>[21]</sup>:

$$Y_{t+1} = \omega_Y Y_t + \zeta_Y W_{Y_t} + \chi_t \quad (18)$$

式中,  $Y_t$  表示  $t$  期的经济产出;  $\omega_Y$  表示  $t$  期经济产出对  $t+1$  期的影响;  $\zeta_Y$  为经济不确定性  $W_{Y_t}$  对  $t+1$  期经济产出的影响;  $W_{Y_t}$  设定为标准维纳过程。经济趋势设定为:  $\chi_{t+1} = \omega_\chi \chi_t + \zeta_\chi W_{\chi_t}$ ,  $\chi_t$  为  $t$  期经济增长的趋势, 设定 0 期时  $\chi_0 = 0$ 。  $\zeta_\chi$  为经济不确定性  $W_{\chi_t}$  对  $t+1$  期经济产出的影响,  $W_{\chi_t}$  也设定为标准维纳过程, 且假设与  $W_{Y_t}$  相互独立。递推求得经济产出的期望和方差分别为:

$$E(Y_t) = \omega_Y^t Y_0 \quad (19)$$

$$Var(Y_t) = [ \zeta_\chi^2 \frac{1 - \omega_\chi^{2t}}{1 - \omega_\chi^2} + \zeta_Y^2 ] \left[ \frac{1 - \omega_Y^t}{1 - \omega_Y} \right]^2 \quad (20)$$

为了简化模型推导, 将居民效用函数设定为对数函数:

$$U(C_t) = \ln(C_t) \quad (21)$$

式中,  $C_t$  表示  $t$  期居民的消费。当市场出清时, 居民将所有收入用于消费:  $C_t = Y_t$ 。该模块主要用于刻画高温灾害对居民效用的损失值。

### 三、碳排放经济损失模型的校准

本部分首先介绍数据来源, 并按照最小二乘法对 DSGE 模型中的待定系数参考真实数据进行校准拟合, 对未来的气候变化趋势及其可能造成的损失进行预测。通过情景分析法, 将经济系统面对的气候变化冲击分为基准情景、不确定性上升情景和“厚尾”高温情景, 将温度变化对经济损失的影响分成线性影响和非线性影响两大类加以讨论, 对比分析指出气候变化导致的经济损失可能要高于传统情景下的预测值。

#### (一) 模型数据来源

能源数据  $F_t$  来源于 BP 世界能源统计年鉴统计数据 (1965—2022 年); 累计碳排放数据及当期碳排放数据量来自 IPCC 数据和 BP 世界能源统计年鉴; 全球温度数据来自 NASA 数据库 GES DISC; 预测经济增长率数据来自 Burke 等<sup>[35]</sup> 的 SSPs 情景数据; 经济产出数据来自世界银行数据库; 折现率数据来自前瞻数据库。模型基于以上数据对各参数进行了校准, 用于对未来情况进行分析。

#### (二) 模型参数校准

对能源消耗量进行拟合, 设定能源消费随时间变化的函数为  $F_t = c_1 t^{c_2}$ , 使用最小二乘法校准  $c_1, c_2 = \operatorname{argmin} \sum_{1965}^{2022} [F_t - F_t^*]^2$ , 求得  $c_1 = 0.6609$  和  $c_2 = 0.526$ 。

接着对当期碳排放量和累计碳排放量模型参数进行设置, 参数  $\varphi_t$  为 0.9012%, 根据 Golosov 等<sup>[20]</sup> 和 Van 等<sup>[23]</sup> 的研究, 设定当期碳排放的半衰期为 30 年, 因此参数  $\varphi_L$  设置为 0.2, 参数  $\varphi$  取值为 0.002316, 参数  $\varphi_0$  取值为 0.401077。参数  $\mu_1$  使用最小二乘法进行校准:  $\mu_1^* = \operatorname{argmin} \sum_{1965}^{2022} [C_t - C_t^*]^2$ , 得到  $\mu_1 = 1.5187$ 。

同上, 对  $\mu_2$  进行校准, 得到  $\mu_2 = 0.99$ 。因此可以得到累计碳排放量。

温度过程的参数设置参考了 Cai 等<sup>[21]</sup> 的研究, 令温度自反馈因子  $m = 0.009$ , 该参数表示无累计碳

排放情景下的热辐射、热传递对温度变化的影响。温度不确定性波动率参数  $\sigma_T = 0.027$  [22]。对剩下的参数  $\varepsilon$  进行校准 ( $\varepsilon^* = \operatorname{argmin} \sum_{1965}^{2022} [E(T_t) - T_t^*]^2$ ), 得到  $\varepsilon = 0.0087$ 。

宏观经济模块的模型参数设定参考 Cai 等 [21], 将经济增长趋势参数  $\omega_\chi$  和  $\zeta_\chi$  分别设定为 0.775 和 0.008; 将经济增长不确定性参数  $\zeta_Y$  设定为 0.035。经济增长参数  $\omega_Y$  参考 SSPs 中预测的未来经济增长率数据进行校准, 得到  $\omega_Y = 1.0233$ 。图 1 是 Burke 等 [35] 预测的经济增长率。

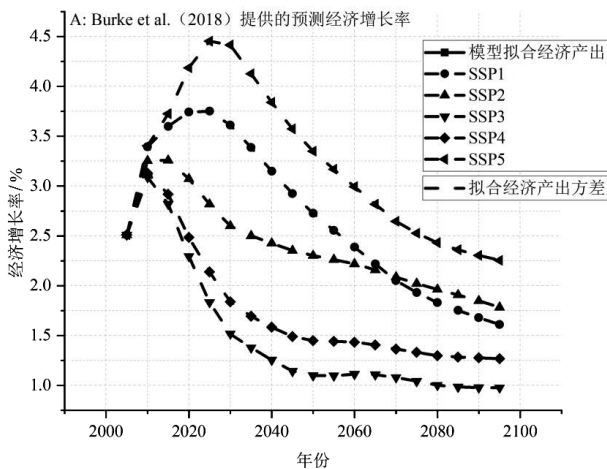


图 1 预测的经济增长率(SSPs1 ~ SSPs5)

如图 1 所示, 2050—2060 年时经济增长率稳定下来, 其中情景 SSPs5 表示经济的高增长率部分以环境为代价, 气候风险显著上升, 本文参考该情景校准经济增长模型的参数。

最后校准比例损失函数的参数  $\mu_T$  的校准需要使用其他学者设计的比例损失预测函数。

损失比例与温度异常值之间的关系为二次型函数  $D_t^1$  [36];

$$D_t^1 = 0.0018 T_t^2 \quad (22)$$

DICE 框架下的损失比例函数  $D_t^2$ ;

$$D_t^2 = 1 - \frac{1}{1 + 0.0028388 T_t^2} \quad (23)$$

Weitzman 设定的可以反应高温“厚尾”灾害的比例损失函数  $D_t^3$ ;

$$D_t^3 = 1 - \frac{1}{1 + (T_t/20.46)^2 + (T_t/6.081)^{6.754}} \quad (24)$$

$$\mu_T^* = \operatorname{argmin} \sum_{1965}^{2022} \{ [E(D_t | \theta_T=0) - D_t^1]^2 + [E(D_t | \theta_T=0) - D_t^2]^2 + [E(D_t | \theta_T=0) - D_t^3]^2 + [E(D_t | \theta_T=1) - D_t^1]^2 + [E(D_t | \theta_T=1) - D_t^2]^2 + [E(D_t | \theta_T=1) - D_t^3]^2 \} \quad (25)$$

校准  $\theta_T = 0$  (损失比例随温度线性增长情景) 和  $\theta_T = 1$  (损失比例随温度非线性增长情景), 校准结果为  $\mu_T = 0.0011$ 。结合上述用于矫正的比例损失函数模型, 可发现当温度上升超过 2.3 °C 时, 比例损失将大幅度上升。上述模型参数汇总为表 1。

表 1 参数设定汇总表

含义	参数校准值
碳循环模块	
碳排放的累计和消减作用参数	$\varphi_L = 0.2; \varphi_0 = 0.401; \varphi = 0.0023$
能源消耗与碳排放间的转换参数	$\mu_1^* = 1.519; \mu_2^* = 0.99; \varphi_T = 0.9012\%$
温度模块	
累计碳排放与温度变化间的转换参数	$m = 0.009; \sigma_T = 0.027; \varepsilon^* = 0.0087$
损失比例模块	
温度变化和损失比例间的转换参数	$\mu_T^* = 0.0011; \lambda = 0.185; \theta_{w_{Dt}} = 2.7$
比例损失和凸性损失	$\theta_T = 0; \theta_T = 1$
经济模块	
经济增长不确定性和经济趋势不确定性参数	$\omega_Y = 1.023; \omega_\chi = 0.775; \zeta_Y = 0.008; \zeta_\chi = 0.035$

#### 四、多种情景下的碳排放损失分析

本部分通过对比了不同情景模型, 系统评估不同气候风险路径下的社会经济损失的差异。研究聚焦三类典型情景的对比分析: ①基准情景, 延续现有气候政策与技术演进路径, 气候变化的不确定性与当前状态基本相同; ②气候变化不确定性上升情景, 通过上调气候变化中的不确定性参数, 计算经济损失值; ③“厚尾”高温情景, 基于极端值理论模拟高温热浪频率与强度呈现“厚尾”分布的气候冲击。通过量化比较不同情景下的经济损失规模、增速与结构差异, 为气候政策的动态调整提供科学依据。

##### (一) 基准情景

基准情景的模拟结果表明, 气候损失对温度变化函数形态显著相关。基准情景下, 2025 年温

度比例转化系数  $\theta_T = 0$  时(线性响应机制),气候变化引致的经济损失规模约为 6 910 亿美元;当  $\theta_T = 1$  时(非线性加速机制),经济损失增至 7 320 亿美元,初始阶段差异率仅为 5.9%。随着时间尺度延伸,两者的损失差距扩大速度加快:至 2100 年,线性响应路径下的累计损失达 5.699 万亿美元,而非线性路径损失规模已攀升至 21.314 万亿美元,差异率扩大至 273.8%。在 2200 年的超长周期模拟中,线性增长损失值达到 102.244 万亿美元(较 2100 年增长约 18 倍),而非线性路径下的损失规模突破 1 106.218 万亿美元,形成高达 50.8 倍的跨世纪放大效应。这一差距源于温度响应的非线性特征与累积碳排放的协同效应。当全球升温超过 2.3 °C 阈值时,损失函数中的二次项主导损害进程,导致农业减产、能源系统效率下降等效应加速叠加。此外,温度自反馈机制(如极地冰盖反照率降低)进一步加剧升温速率,形成“升温—损失—碳排放”的正反馈循环。

为对接《巴黎协定》温控目标,表 2 进一步量化了 1.5 °C、2 °C 升温阈值对应的经济损失。

表 2 不同升温阈值经济损失

升温阈值	损失类型	2025 年 单年损失	2100 年 单年损失	2200 年 单年损失	2025—2200 年 单年损失增速 (年均)/%
1.5 °C	线性损失 ( $\theta_T = 0$ )	0.15	0.68	3.12	2.27
	非线性损失 ( $\theta_T = 1$ )	0.58	3.87	41.26	4.05
2 °C	线性损失 ( $\theta_T = 0$ )	0.29	1.23	5.71	2.33
	非线性损失 ( $\theta_T = 1$ )	0.98	10.23	138.65	4.42
2.3 °C	线性损失 ( $\theta_T = 0$ )	0.39	1.89	8.97	2.38
	非线性损失 ( $\theta_T = 1$ )	1.41	21.31	489.72	4.78

结果显示,《巴黎协定》设定的 1.5 °C、2 °C 温控目标对规避气候经济损失具有关键意义。在 1.5 °C 升温阈值下,2100 年全球单年线性经济损失仅为 0.68 万亿美元,非线性损失为 3.87 万亿美元,至 2200 年非线性损失控制在 41.26 万亿美元,较更高升温阈值形成显著损失缓冲;当升温突破 2 °C 阈值,2100 年非线性单年损失增至 10.23 万亿美元,较 1.5 °C 情景增长 164.3%,2200 年进一步攀升至 138.65 万亿美元,损失规模扩大 3.3 倍,凸显了“将升温控制在 1.5 °C 以内”的核心价值。而一旦升温超过 2.3 °C,2200 年非线性单年损失将飙升至 489.72 万亿美元,较 2 °C 情景再增 253.2%,且损失增速(年均 4.78%)较 1.5 °C 情景(4.05%)提

升 18.0%,验证了《巴黎协定》“尽力避免升温突破 2 °C”的科学性与紧迫性。从损失增长逻辑来看,非线性损失的加速效应介于 2 °C ~ 2.3 °C 尤为显著,这意味着全球气候治理需守住 2 °C 的安全底线,全力追求 1.5 °C 的最优目标,才能有效规避“厚尾”高温引发的系统性经济风险。进一步测算显示,线性响应机制的年均损失增长率为 2.9%,而非线性路径下 4.28% 的年均增速显著高于线性条件下的年均增速。这种现象表明:传统线性假设可能低估长周期气候风险的经济冲击。

### (二)不确定性上升情景

在基础情景上通过参数敏感性分析量化了不确定性因素对经济损失的放大效应:当经济增长不确定性参数  $\zeta_Y$  提升 10% 时,经济损失变动比例显著上升,气候变化冲击将加剧了经济波动的幅度,对比基准情景,线性响应经济损失与非线性响应经济损失增加 [1.63%, 1.69%]<sup>[37]</sup>。当经济增长趋势不确定性参数  $\zeta_X$  提升 10% 时,经济损失增加了 [0.43%, 0.44%]。这表明宏观经济周期波动对气候损失的传导效应较弱,主要因气候损害具有长期累积性,与短期经济波动相关性较低。进一步分析损失不确定性对经济损失的影响。当损失不确定性的均值  $\mu_w$  提升 10% 时,气候变化引发的经济损失将显著增加 [17.63%, 17.63%];当损失不确定性的方差  $\sum_w^2$  提升 10% 时,经济损失增加 [20.97%, 20.97%],可以发现在损失不确定性变化的情况下,线性响应经济损失与非线性响应经济损失增长的幅度基本一致。这一结果验证了 Weitzman 的“结构性尾部膨胀”理论——损失分布右偏将推高风险溢价,迫使社会以更高当期成本规避未来潜在灾难。

而当灾害比例参数  $\lambda$  提升 10% 时,经济损失将相应增加 [21.24%, 21.86%]。灾害比例上升意味着经济系统中的灾害风险水平和损失比例显著增加,同时经济系统暴露于尾部高损失灾害的概率上升,这进一步加剧了经济损失风险。

温度变化不确定性(参数  $\varepsilon$ ) 的增加会提升温度过程的方差,加重温度过程的“厚尾”特征,当参数  $\varepsilon$  增加 10% 时,经济损失将增加 [30.06%,

42.65%],成为关键的风险驱动因子。

当上述所有因素同时增长 10% 时,线性响应经济损失与非线性响应经济损失增长的幅度分别为[133.46%, 157.45%]。结果表明,经济系统中的不确定性因素,无论是经济增长不确定性、经济趋势不确定性,还是损失不确定性以及温度变化不确定性,均会对气候变化冲击下的经济损失产生显著影响,凸显了气候经济系统的脆弱性——多维度不确定性的非线性叠加可能引发系统性风险,高于各独立因素的简单加总。表 3 为基准情景和不确定风险上升情景下的经济损失值。

表 3 各种情景下气候变化造成的经济损失

年份	2025 年	2100 年	2200 年	年增长率/%	经济损失变动比例/%
Panel A: 气候变化造成的总经济损失(万亿美元)					
$EL_t(\theta_T = 0)$	0.691	5.699	102.244	2.90	100
$EL_t(\theta_T = 1)$	0.723	21.314	1 106.218	4.29	100
Panel B: 增加经济不确定性(万亿美元)					
$1.1 \times \zeta_Y$					
$EL_t(\theta_T = 0)$	0.691	5.715	103.997	2.91	101.63
$EL_t(\theta_T = 1)$	0.723	21.376	1 125.178	4.29	101.69
$1.1 \times \zeta_W$					
$EL_t(\theta_T = 0)$	0.691	5.701	102.704	2.90	100.43
$EL_t(\theta_T = 1)$	0.723	21.324	1 111.188	4.28	100.44
Panel C: 增加损失不确定性(万亿美元)					
$1.1 \times \mu_w$					
$EL_t(\theta_T = 0)$	0.813	6.703	120.270	2.90	117.63
$EL_t(\theta_T = 1)$	0.851	25.072	1 301.248	4.28	117.63
$1.1 \times \sum_w^2$					
$EL_t(\theta_T = 0)$	0.836	6.893	123.680	2.90	120.97
$EL_t(\theta_T = 1)$	0.875	25.783	1 338.136	4.28	120.97
$1.1 \times \lambda$					
$EL_t(\theta_T = 0)$	0.705	6.107	124.901	3.00	121.24
$EL_t(\theta_T = 1)$	0.737	22.841	1 351.351	4.39	121.86
Panel D: 增加温度变化不确定性(万亿美元)					
$1.1 \times \varepsilon$					
$EL_t(\theta_T = 0)$	0.756	6.564	133.974	3.00	130.06
$EL_t(\theta_T = 1)$	0.851	26.652	1 581.932	4.40	142.65
Panel E: 所有上述风险因素均提升 10% (万亿美元)					
$EL_t(\theta_T = 0)$	1.098	10.101	242.419	3.13	233.46
$EL_t(\theta_T = 1)$	1.237	41.106	2 862.436	4.53	257.45

### (三)“厚尾”高温情景下的经济损失

首先对温度过程中的“厚尾”高温现象进行一个刻画,温度过程的方差  $Var(T_t)$  可以代表温度过程的“厚尾”现象。 $Var(T_t)$  随时间逐步上升,温度过程的期望  $E(T_t)$  附近的概率密度下降,两端的

小概率事件(偏离平均温度)发生概率上升,温度过程表现出“厚尾”的倾向。进一步使用切比雪夫不等式来计算偏离期望温度的概率变化情况,对“厚尾”进行验证。结果如表 4 所示。

表 4 验证温度过程的“厚尾”现象

年份	1965	2020	1965—2000	2001—2020
温度过程方差 ( $Var(T_t)$ )				
Under $AC_t$	0.139	0.146	0.139	0.149
Under $1.5 AC_t$	0.139	0.154	0.140	0.154
Under $0.5 AC_t$	0.139	0.141	0.139	0.146
切比雪夫不等式 ( $P[ T_t - E(T_t)  \geq T_B]$ )				
$T_B = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	0.557	0.584	0.558	0.573
$T_B = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$	0.139	0.146	0.140	0.143
$T_B = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	0.035	0.037	0.035	0.036
温度非负的概率				
$P[T_t \geq 0]$	0.999	0.999	0.999	0.999

从表 4 可以看出,2020 年的温度过程的方差显著高于 1965 年温度过程的方差,且随着累计碳排放量的上升,温度过程的方差也显著上升。1965—2000 年的平均方差也显著低于 2001—2020 年的平均方差。2020 年气温偏离期望温度  $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$  的概率约为 0.584,相较于 1965 年的 0.557 增加了约 2.7 个百分点,至 2200 年,温度方差进一步扩大至 0.154,极端高温事件(如偏离均值 2.58 个标准差)的发生频率较工业革命前提高 3.2 倍,这证实了随着时间推移和累计碳排放量的上升,温度过程“厚尾”现象加剧,“黑天鹅”型灾害愈发频繁,并将逐步演变成“灰犀牛”灾害,这将给经济系统带来灾难性后果。

在理解高温“厚尾”现象频发的趋势后,根据 Weitzman<sup>[38]</sup> 的研究,将“厚尾”高温设定为:  $T_t = E(T_t) + 2.58 \times Var(T_t)^{0.5}$ ,即向右偏离期望温度 2.58 个标准误。将该温度代替掉上述拟合的期望温度,计算得到气候变化导致的经济损失值上升(见图 2)。

在线性增长时,2100 年“厚尾”情景下,因气候变化造成的损失值为 8.563 万亿美元,相较于基准情况下的 5.699 万亿美元增加了约 50%;非线性增长情景下,因气候变化造成的损失值为 40.276 万亿美元,相较于基准情况下的 21.314 万亿美元接近翻了一番。到 2200 年,“厚尾”情景下的损失

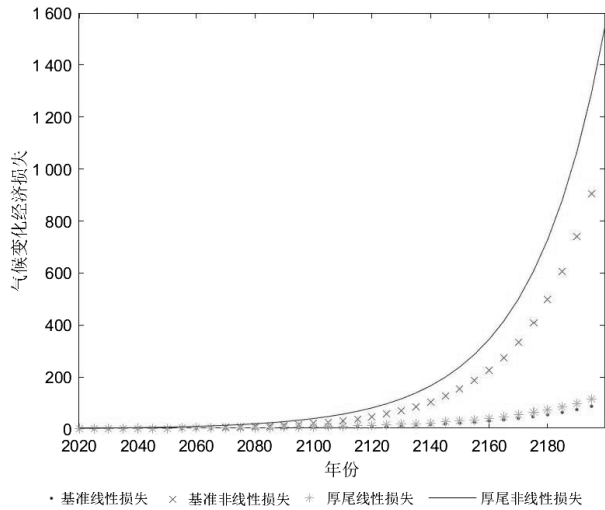


图 2 “厚尾”情景下的经济损失变化趋势对比

与基准情景下的损失差距依然显著,线性增长条件下,“厚尾”经济损失为 133.223 万亿美元;在非线性增长条件下,“厚尾”经济损失高达 1 570.294 万亿美元。远超基准环境下的气候变化经济损失,这一结果与 Dellink 研究结论一致——气候损失的“厚尾”特征将加剧国际气候合作的紧迫性,单边减排的边际收益难以抵消系统性风险。若进一步叠加各类不确定性的上升风险,该损失值将超出传统预测中使用的线性变化的基准情景下的经济损失,“厚尾”高温灾害叠加不确定性因素,极有可能造成超过经济系统承受能力的灾害。“厚尾”高温灾害需要引起足够的重视,需要持续有效的推行气候政策。

### 五、贴现率对社会碳排放成本的影响

除了前述的各类不确定性影响外,社会碳排放成本还与贴现率紧密相关。计算社会碳排放成本 (SSC) 的表达式为:  $SSC_t = \sum_{i=k}^n (1+r_t)^{-i} [\widehat{D}_i Y_i + \widehat{D}_i \ln(Y_i)]$ 。式中的贴现率  $r_t$  的设置将在本部分进行讨论,进而对社会碳排放成本进行预测。在气候变化经济学情景下,贴现率可以看作当前社会对未来的重视程度,一般受时间偏好、经济发展、对未来的预期等因素影响,低贴现率代表对气候风险的重视。

#### (一) 贴现率模块

贴现率、气候经济损失与碳价之间存在紧密

的逻辑传导关系,贴现率作为连接当期与未来经济价值的核心系数,直接决定了未来气候灾害引发的经济损失到当期的折现值,而这一折现值正是社会碳排放成本 (SCC) 的核心核算依据,也是碳价定价的重要基准。贴现率的高低与碳排放成本、碳价呈反向关联:若贴现率设定偏高,会低估未来气候损失的当期价值,进而导致碳价制定偏低,无法充分覆盖碳排放的长期外部性;若贴现率充分考量气候风险的长期影响而适度调低,则会拉高未来损失的当期折算值,推动碳价向能反映真实碳排放社会成本的水平靠拢。

为了使贴现率贴合时间偏好影响和经济发展影响,Weitzman<sup>[39]</sup>使用了拉姆齐年折现率  $r_t$  :

$$r_t = \rho + \eta g_{yt} - 0.5 \eta^2 \text{Var}(g_{yt}) \quad (26)$$

式中,  $\rho$  为时间偏好系数,表示人们因当期消费等因素对当期经济的重视程度。参考 Burke 等<sup>[35]</sup>,将  $\rho$  值设置为 0.1;风险厌恶系数  $\eta$  设定为 1,  $g_{yt}$  为预测的经济增长率,  $\eta g_{yt} - 0.5 \eta^2 \text{Var}(g_{yt})$  表示人们对未来经济的预测,当人们对未来经济风险厌恶情绪提升或预期未来经济发展提升时,人们会倾向于在当期进行消费和生产。当预测的经济增长不确定性为 0 时,  $\text{Var}(g_{yt})$  变为 0,该贴现率就简化为:

$$r_t = \rho + \eta g_{yt} \quad (27)$$

但是,拉姆齐年折现率不能反映社会对高温“厚尾”灾害态度,随着高温巨灾发生概率的上升,社会应越来越重视气候变化造成的损失,进而愿意在当期承担更高的治理成本,以规避未来可能发生的高额损失。因此,本文改进贴现率  $r_t$  为:

$$r_t = \rho + \eta g_{yt} - \tau H(T_t - T_0) \quad (28)$$

式中,  $\rho + \eta g_{yt}$  沿用简化的拉姆齐年折现率设定,用于捕捉时间偏好因素和预期经济因素的影响;  $H(T_t - T_0)$  表示“厚尾”灾害发生概率,  $\tau$  表示“厚尾”灾害发生概率对贴现率的影响程度。结合前瞻数据库历史贴现率数据,对参数  $\tau$  进行校准,  $\tau^* = \text{argmin} \sum_{1975}^{2015} [r_t - r_t^*]^2$ , 设定为  $\tau = 0.1178$ 。将两种贴现率对比结果放在图 3。

从图 3 得到,灾害折现率与拉姆齐年折现率走势基本相同,说明人们对于经济的预期在贴现率

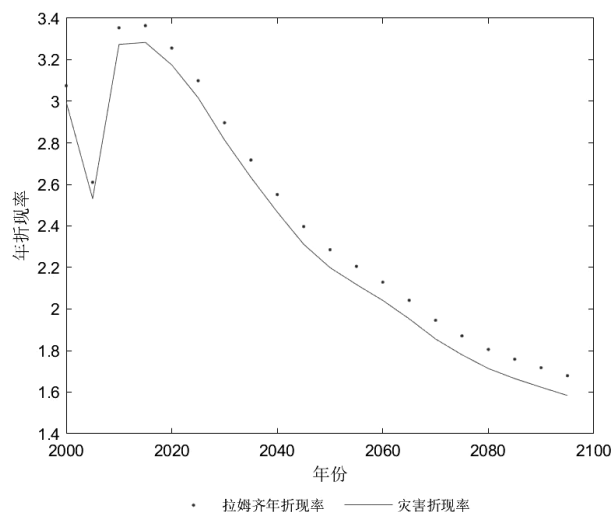


图3 灾害贴现率与拉姆齐年折现率对比

中起主导作用。相较于拉姆齐年折现率,考虑“厚尾”高温灾害损失的贴现率更为乐观,因为若社会对高温巨灾损失发生概率更加敏感,社会将积极应对气候变化。

## (二) 社会碳排放成本

在定义灾害贴现率后,进一步计算社会碳排放成本(SSC):  $SCC_t \equiv \sum_{i=k}^n (1+r_t)^{-i} [\widetilde{D}_i Y_t + \widetilde{D}_i \ln(Y_t)]$ 。式中  $\widetilde{D}_i$  表示当期碳排放增加一吨时增加的边际比例损失值。将碳排放逐期进行折现求和后,可以得到当期碳排放产生的  $t$  期的损失折现值,可参考该成本值设置当期的碳排放价格或碳排放税。表5是多情景下的社会碳排放成本(SCC)计算结果。

如表5所示,2050年的基准情景下,线性响应的损失值按照拉姆齐年贴现率这算的社会碳排放成本为68.940美元/吨,按照灾害贴现率社会碳排放成本为69.960美元/吨,两者之间相差仅1美元/吨。这反映近期气候风险尚未突破社会认知阈值,政策调整空间有限。但当损失值非线性响应时,按拉姆齐年贴现率折算的社会碳排放成本为171.622美元/吨,按灾害贴现率计算的社会碳排放成本则变成了174.360美元/吨,相较于线性响应的碳排放成本,两者间的差距拉大到了2.7美元/吨。当各类不确定性风险上升时,社会碳排放成本和两种贴现率之间差距都在增加,当所有不确定性因素都上升10%时,这一差距约为5美元/吨。

表5 多情景下的社会碳排放成本

年份	2050年 (拉姆齐 贴现率)	2050年 (灾害 贴现率)	2100年 (拉姆齐 贴现率)	2100年 (灾害 贴现率)
Panel A: 基准情景的 SCC(美元/吨)				
$SCC_t (\theta_r = 0)$	68.940	69.960	251.253	262.532
$SCC_t (\theta_r = 1)$	171.622	174.360	1 037.936	1 091.755
Panel B: 提升经济不确定性(美元/吨)				
$1.1 \times \zeta_y$				
$SCC_t (\theta_r = 0)$	68.955	69.976	251.588	262.887
$SCC_t (\theta_r = 1)$	171.663	174.402	1 039.612	1 093.538
$1.1 \times \zeta_w$				
$SCC_t (\theta_r = 0)$	68.941	69.962	251.301	262.583
$SCC_t (\theta_r = 1)$	171.627	174.365	1 038.176	1 092.011
Panel C: 提升损失不确定性(美元/吨)				
$1.1 \times \mu_w$				
$SCC_t (\theta_r = 0)$	81.094	82.294	295.550	308.817
$SCC_t (\theta_r = 1)$	201.879	205.100	1 220.927	1 284.235
$1.1 \times \sum_w^2$				
$SCC_t (\theta_r = 0)$	83.392	84.627	303.929	317.572
$SCC_t (\theta_r = 1)$	207.602	210.914	1 255.540	1 320.642
$1.1 \times \lambda$				
$SCC_t (\theta_r = 0)$	72.176	73.248	271.148	283.462
$SCC_t (\theta_r = 1)$	178.261	181.113	1 113.700	1 171.899
Panel D: 提升温度变化不确定性(美元/吨)				
$1.1 \times \varepsilon$				
$SCC_t (\theta_r = 0)$	78.631	79.799	294.477	307.835
$SCC_t (\theta_r = 1)$	209.844	213.201	1 311.959	1 380.523
Panel E: 所有上述风险因素均提升10%(美元/吨)				
$SCC_t (\theta_r = 0)$	117.546	119.299	455.594	476.528
$SCC_t (\theta_r = 1)$	311.117	316.110	2 018.691	2 125.107

当进一步计算更长期的社会碳排放成本,可以看到2100年的社会碳排放成本在线性增长假设下高达[251.253, 262.532]美元/吨。对于未来“厚尾”灾害的敏感程度显著增加了社会碳排放成本。而非线性增长假设下叠加多种不确定性风险上升则会使得社会碳排放成本突破2000美元/吨,随着预期损失值的提升,灾害贴现率对当期社会治理碳排放的要求也逐步提高,前述差值扩大到了近100美元/吨,差值主要来自高温概率分布右偏导致的折现因子衰减减缓。

此外,还可以观察到,相较于经济相关的不确定性,损失不确定性和温度变化的不确定性的提高对当期社会碳排放成本的影响更大。这是因为损失不确定性和温度变化不确定性风险上升时,损失及温度过程的方差会受到影响,期望附近的概率密度下降,极端高温现象出现的概率大幅上升,高温巨灾显著增加了社会碳排放成本。当损失不确定性

提升 10% 时,2100 年 SCC 增加 20.97%,其损失分布的“厚尾”特征被放大,使得贴现率向下修正以补偿风险溢价;而当经济波动提升 10% 时,SCC 增长仅 1.63%,这反映了宏观经济周期波动与气候风险的弱相关性。当所有参数同时提升 10% 时,SCC 增幅达 257.45%,进一步凸显了气候经济系统脆弱性的非线性叠加特征。

### 六、中国的碳排放损失分析

分析气候变化对中国造成的经济损失,需要同时考虑中国与全球的经济和能源关联深度,其中经济关联深度可以用中国 GDP 的占比来表示,能源关联深度可以用化石能源消耗占比来表示。因此得到将全球气候变化损失分解为中国气候变化损失的关系式:  $h_t^c = (Y_t^c F_t^c) / (Y_t F_t)$ 。根据 BP 能源统计年鉴和世界银行公布的当期数据,将当前全球经济损失分解到中国,分解结果为表 6。

表 6 不同情景下的中国受到的气候冲击

年份	2025 年	2100 年	2200 年	2025—2100 年 增速	2100—2200 年 增速
Panel A: 基准情景(单位:万亿美元)					
线性损失	0.013	0.106	1.893	2.85%	2.93%
非线性损失	0.013	0.395	20.481	4.61%	4.03%
Panel B: 尾部高温情景(单位:万亿美元)					
线性损失	0.029	0.159	2.467	2.27%	2.78%
非线性损失	0.059	0.746	29.074	3.44%	3.73%
Panel C: 尾部高温情景/基准情景					
线性损失	2.295	1.503	1.303	—	—
非线性损失	4.407	1.890	1.420	—	—

模型预测的 2025 年中国遭受的气候变化冲击为[0.013, 0.013]万亿美元,在“厚尾”情景下中国遭受的气候变化冲击显著提高[0.029, 0.059]万亿美元。随着时间推移到 2100 年,中国预计将遭受[0.106, 0.395]万亿美元的经济损失,在高温巨灾情景下,该损失值进一步升高至[0.159, 0.746]万亿美元。到 2200 年气候变化冲击的损失将难以承受,基准情景下中国遭受的经济损失高达[1.893, 20.481]万亿美元,已经超出了当前经济产出水平;“厚尾”高温情景下,该损失值高攀至[2.467, 29.074]万亿美元。“厚尾”高温情景下的气候冲击显著高于基准情景,对比 2025—2100 年和 2100—2200 年气候冲击的增速,发现该损失加速度为正,呈加速上升态势。

### 七、研究结论与对策建议

#### (一) 研究结论

(1)“厚尾”高温灾害的长期经济冲击远超传统

模型预测,且《巴黎协定》温控目标具有显著经济避免价值。本文通过动态随机一般均衡(DSGE)模型揭示了“厚尾”高温灾害对经济系统的非线性放大效应,与传统线性模型相比,非线性损失情景下( $\theta_T = 1$ )长期经济损失呈现指数级增长;2100 年全球经济损失达 21.3 万亿美元,2200 年攀升至 1 106 万亿美元,分别为线性情景的 3.7 倍和 10.8 倍。这一差距源于温度分布的“厚尾”特征,随着累计碳排放量增加,温度方差从 1965 年的 0.139 2 升至 2020 年的 0.146 0,极端高温事件(如偏离均值 2.58 个标准差)的发生概率显著上升。结合 1.5℃、2℃、2.3℃ 三类升温阈值模拟,进一步验证了温控目标的经济意义:1.5℃ 升温阈值下 2200 年全球非线性单年损失 41.26 万亿美元,突破 2℃ 后增至 138.65 万亿美元(扩大 3.3 倍),超过 2.3℃ 临界点后更飙升至 489.72 万亿美元(较 2℃ 再增 253.2%),且升温幅度每扩大 0.5℃,非线性损失年均增速从 4.05% 逐步提升至 4.78%。以 2200 年为例,“厚尾”情景下全球经济损失较基准情景扩大 50.8 倍,且损失增速(年均 4.29%)高于线性模型预测(年均 2.90%),这一结果既与 Weitzman<sup>[6]</sup>的“悲观定理”一致,验证了传统成本—效益分析对尾部风险的低估,也为《巴黎协定》温控目标的科学性提供了量化支撑。

(2) 贴现率设计显著影响社会碳排放成本(SCC)评估。本研究改进了拉姆齐贴现率模型,将灾害发生概率( $H(T_t - T_0)$ )纳入贴现率方程( $r_t = \rho + \eta g_{Y_t} - \tau H(T_t - T_0)$ )。结果显示,考虑“厚尾”风险的适应性贴现率使社会碳排放成本显著上升。例如,2100 年非线性损失情景下,灾害贴现率对应的 SCC(1 091.8 美元/吨)较传统贴现率(1 037.9 美元/吨)提高 5.2%。长期来看,温度不确定性和损失方差对 SCC 的影响尤为突出,提升 10% 可分别导致 SCC 增长 30.1% 和 21.0%。

(3) 不确定性因素放大经济损失风险。参数敏感性分析显示,经济增长波动( $\zeta_X$  和  $\zeta_Y$ )、损失方差( $\sum_w^2$ )和温度敏感性( $\varepsilon$ )的上升均加剧损失。若所有不确定性参数提升 10%,线性与非线性损失分别增长 133.5% 和 157.5%。其中,损失不确定性对经济系统的冲击最为显著,其均值

( $\mu_w$ )提升 10% 可导致经济损失增加 17.6%。

从以上研究来看,现行碳市场与碳税设计普遍基于确定性损害假设,未能充分反映“厚尾”风险的溢价属性。以欧盟碳市场为例,其价格形成机制依赖边际减排成本曲线,但未将气候敏感性分布的非对称性纳入定价模型。这种缺陷导致碳价长期低于社会最优水平,形成“政策折现”现象——即当前碳价仅覆盖预期平均损失,而忽视极端情景下的尾部风险补偿。

## (二) 对策建设

DSGE 模型测算表明,考虑“厚尾”效应后的社会碳成本较传统模型高 5.2%,这一差值构成了气候风险的隐性债务,最终将由未来世代承担。结合现实情景,给出以下对策建议。

(1) 重构碳定价机制,纳入“厚尾”风险溢价。现行碳价(如欧盟碳市场约 80 美元/吨)远低于研究测算的 2100 年社会碳排放成本。建议将“厚尾”灾害概率和灾害贴现率纳入碳税设计,动态调整碳价以反映长期风险。政府可通过碳交易市场溢价、气候债券等工具,引导企业内化碳排放外部性。

(2) 推动低碳技术创新与能源结构转型。模型显示,技术提升可降低能源消耗的碳排放转化率。需加大光伏、氢能等清洁技术研发投入,设定行业脱碳时间表。例如,对化工、冶金等高耗能行业实施强制性能效标准,并通过补贴激励碳捕获与封存(CCUS)技术应用。

(3) 强化国际合作与气候风险对冲。“厚尾”高温的全球性特征要求跨国协同治理。建议借鉴“未来气候大会(WCA)”框架,推动碳关税协调与气候赔偿基金设立。此外,探索气候衍生品市场,开发高温巨灾保险、碳排放期权等金融工具,分散系统性风险。

(4) 优化气候模型与数据治理体系。当前 DSGE 模型参数依赖历史数据(如 1965—2022 年能源数据),未来需融合 AI 预测技术,提高温度模块和损失函数的预测精度。建立国家级气候经济损失数据库,并纳入 GDP 核算体系,为政策评估提供动态支撑。

本文研究仍存在局限:一是未充分考虑区域气候异质性,二是技术进步的随机性刻画不足。

未来可结合多区域 CGE 模型,细分地理与经济单元;同时引入机器学习算法,优化技术进步( $Tec_t$ )与灾害适应效应( $\tau$ )的动态路径,进一步提升政策模拟的精细化水平。

## 参考文献:

- [1] WEITZMAN M L. Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change[J]. Review of environmental economics and policy, 2011, 5(2): 275-292.
- [2] NORDHAUS W D. To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect[J]. The economic journal, 1991, 101(407): 920-937.
- [3] NORDHAUS W D. After Kyoto: alternative mechanisms to control global warming[J]. American economic review, 2006, 96(2): 31-34.
- [4] NORDHAUS W D. Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2010, 107(26): 11721-11726.
- [5] NORDHAUS W. Evolution of modeling of the economics of global warming: changes in the DICE model, 1992-2017[J]. Climatic change, 2018, 148(4): 623-640.
- [6] WEITZMAN M L. A precautionary tale of uncertain tail fattening[J]. Environmental and resource economics, 2013, 55(2): 159-173.
- [7] WEITZMAN M L. On a world climate assembly and the social cost of carbon[J]. Economica, 2017, 84(336): 559-586.
- [8] WEITZMAN M L. A voting architecture for the governance of free-driver externalities, with application to geoengineering[J]. The scandinavian journal of economics, 2015, 117(4): 1049-1068.
- [9] WEITZMAN M L. Internalizing the climate externality: can a uniform price commitment help? [J]. Economics of energy & environmental policy, 2015, 4(2): 37-50.
- [10] WEITZMAN M L. Voting on prices vs. voting on quantities in a world climate assembly [J]. Research in economics, 2017, 71(2): 199-211.
- [11] ACKERMAN F, STANTON E A. Climate risks and carbon prices: revising the social cost of carbon[J]. Economics: the open-access, open-assessment E-journal, 2012, 6(2012-10): 1-25.
- [12] BANSAL R, OCHOA M, KIKU D. Climate change and growth risks[R]. Cambridge, MA: National bureau of economic research, 2017.
- [13] KELLY D L, TAN Z. Learning and climate feedbacks: optimal climate insurance and fat tails [J]. Journal of

- environmental economics and management, 2015, 72: 98-122.
- [14] DELLINK R, DEKKER T, KETTERER J. The fatter the tail, the fatter the climate agreement: simulating the influence of fat tails in climate change damages on the success of international climate negotiations [J]. Environmental and resource economics, 2013, 56(2): 277-305.
- [15] WEITZMAN M L. Why the far-distant future should be discounted at its lowest possible rate [J]. Journal of environmental economics and management, 1998, 36(3): 201-208.
- [16] WEITZMAN M L. A review of the Stern Review on the economics of climate change [J]. Journal of economic literature, 2007, 45(3): 703-724.
- [17] WEITZMAN M. Additive damages, fat-tailed climate dynamics, and uncertain discounting [J]. Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal, 2009, 3(39): 1-11. DOI: 10.5018/economics-ejournal. ja. 2009-39.
- [18] WEITZMAN M L. On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change [J]. The review of economics and statistics, 2009, 91(1): 1-19.
- [19] HASSELMANN K. Intertemporal accounting of climate change-harmonizing economic efficiency and climate stewardship [J]. Climatic change, 1999, 41(3): 333-350.
- [20] GOLOSOV M, HASSLER J, KRUSELL P, et al. Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium [J]. Econometrica, 2014, 82(1): 41-88.
- [21] CAI Y, LONTZEK T S. The social cost of carbon with economic and climate risks [J]. Journal of political economy, 2019, 127(6): 2684-2734.
- [22] VAN DEN BREMER T S, VAN DER PLOEG F. The risk-adjusted carbon price [J]. American economic review, 2021, 111(9): 2782-2810.
- [23] REZAI A, VAN DER PLOEG F. Intergenerational inequality aversion, growth, and the role of damages: occam's rule for the global carbon tax [J]. Journal of the association of environmental and resource economists, 2016, 3(2): 493-522.
- [24] 龚瑶, 严婷. 技术冲击, 碳排放与气候环境: 基于 DICE 模型框架的模拟 [J]. 中国管理科学, 2014 (增刊 1): 801-809.
- [25] 梁荣, 陈秉正. 气候变化背景下全球极端天气事件 GDP 损失率评估 [J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(3): 557-568.
- [26] 王铮, 张帅, 吴静. 一个新的 RICE 簇模型及其对全球减排方案的分析 [J]. 科学通报, 2012, 57(26): 2507-2515.
- [27] 段宏波, 朱磊, 范英. 能源—环境—经济气候变化综合评估模型研究综述 [J]. 系统工程学报, 2014, 29(6): 852-868.
- [28] 廖华, 郑国梁. 气候经济复杂系统中的不确定性及其建模研究进展 [J]. 中国管理科学, 2025, 33(1): 273-286.
- [29] DE BRUIN K C, DELLINK R B, TOL R S J. AD-DICE: an implementation of adaptation in the DICE model [J]. Climatic change, 2009, 95(1): 63-81.
- [30] GILLINGHAM K, NORDHAUS W, ANTHOFF D, et al. Modeling uncertainty in integrated assessment of climate change: a multimodel comparison [J]. Journal of the association of environmental and resource economists, 2018, 5(4): 791-826.
- [31] BARNETT M, BROCK W, HANSEN L P. Climate change uncertainty spillover in the macroeconomy [J]. NBER macroeconomics annual, 2022, 36(1): 253-320.
- [32] VAN DER PLOEG F, REZAI A, REANOS M T. Gathering support for green tax reform: evidence from German household surveys [J]. European economic review, 2022, 141: 103966.
- [33] LI Y, ZHOU B. Research on the impact of extreme climate on financial asset price: based on the DSGE model [J]. International review of economics & finance, 2026, 105104817-104817. DOI: 10.1016/J. IREF. 2025. 104817.
- [34] CANTELMO A, FATOUROS N, MELINA G, et al. Monetary policy under natural disaster shocks [J]. International economic review, 2024, 65(3): 1441-1497.
- [35] BURKE K D, WILLIAMS J W, CHANDLER M A, et al. Pliocene and eocene provide best analogs for near-future climates [J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2018, 115(52): 13288-13293.
- [36] NORDHAUS W D, MOFFAT A. A survey of global impacts of climate change: replication [R]. Survey methods, and a statistical analysis, Cambridge, MA: National bureau of economic re-search working paper, 2017:23646.
- [37] BRETSCHGER L, VINOGRADOVA A. Best policy response to environmental shocks: applying a stochastic framework [J]. Journal of environmental economics and management, 2019, 97: 23-41.
- [38] WEITZMAN M L. GHG targets as insurance against catastrophic climate damages [J]. Journal of public economic theory, 2012, 14(2): 221-244.
- [39] WEITZMAN M L. Rare disasters, tail-hedged investments, and risk-adjusted discount rates [R]. Cambridge, MA: National bureau of economic research, 2012.