

# 气候金融风险建模与评估综述

姬强<sup>1,2</sup>, 翟向阳<sup>1,2</sup>, 张大永<sup>3</sup>, 翟鹏翔<sup>4</sup>

(1. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190; 2. 中国科学院大学公共政策与管理学院, 北京 100049;  
3. 西南财经大学经济与管理研究院, 成都 611130; 4. 北京化工大学经济管理学院, 北京 100029)

**摘要** 气候变化已经成为影响全球金融体系不稳定的新的风险源, 科学地识别和评估气候风险对金融系统的传导路径是气候金融领域的重大议题。然而, 当前在气候金融风险建模的方法与实践应用方面仍存在诸多挑战。本文从金融市场的气候风险特征、气候金融的风险评估方法及实践、未来重要研究方向等几个方面展开探讨。首先, 本文对金融市场气候风险的三大特征进行阐述。其次, 本文系统梳理了近年来气候金融风险评估的三类主流研究方法, 分析其适用场景与局限性, 总结各国央行及金融监管机构的相关应用实践。最后, 本文指出了气候金融风险评估未来研究的重要方向, 为推动该领域的理论发展和实践应用提供参考。

**关键词** 气候金融建模; 气候风险评估; 系统性金融风险; 金融损失测算

## Overview of Climate-Related Financial Risk Modeling and Assessment

Ji Qiang<sup>1,2</sup>, Zhai Xiangyang<sup>1,2</sup>, Zhang Dayong<sup>3</sup>, Zhai Pengxiang<sup>4</sup>

(1. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Research Institute of Economics and Management, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 611130, China; 4. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract** Climate change has emerged as a new source of instability in the global financial system, making the scientific identification and assessment of its transmission channels to the financial sector a critical issue in the field of climate finance. Currently, climate-related financial risk modeling and practical applications still face numerous

收稿日期: 2025-04-22

基金项目: 国家自然科学基金 (72348003, 72203016); 中央高校基本科研业务费 (buctrc202434)

Supported by National Natural Science Foundation of China (72348003, 72203016); Fundamental Research Funds for the Central Universities (buctrc202434)

作者简介: 姬强, 中国科学院科技战略咨询研究院, 研究员, 博士, 研究方向: 能源战略管理, 能源与气候金融, 能源预测与风险管理, E-mail: jqwxnjq@163.com; 翟向阳, 中国科学院科技战略咨询研究院, 博士研究生, 研究方向: 气候与能源金融, E-mail: zhaixy011@163.com; 张大永, 西南财经大学经济与管理研究院, 博士, 教授, 研究方向: 能源与气候金融, E-mail: dzhang@swufe.edu.cn; 通信作者: 翟鹏翔, 北京化工大学经济管理学院, 博士, 副教授, 研究方向: 气候与能源金融, E-mail: pengxiangzhai@163.com.

obstacles. In this context, this paper reviews several key developments in climate-related financial risk studies, including the characteristics of climate risks in financial markets, the methodologies and practices for assessing climate financial risks, and future research directions. To be specific, this study first elaborates on three crucial features of climate financial risks. Second, it systematically reviews three streams of approaches for climate financial risk assessment developed in recent years, analyzes their applicability and limitations, and examines relevant practices adopted by central banks and financial regulators across different countries. Finally, the paper identifies promising directions for future research to support both theoretical advancement and practical implementation in the field of climate financial risk assessment.

**Keywords** climate finance modeling; climate risk assessment; systemic financial risk; financial loss estimation

## 1 引言

近年来,全球气候变化日益加剧,已成为全球经济与金融体系面临的关键挑战之一 (NGFS, 2019; IPCC, 2023; 张大永等, 2023; Zhai et al., 2024a). 2024 年成为首个相对于工业化前水平升温超过  $1.5^{\circ}\text{C}$  的年份 (Bevacqua et al., 2025), 世界各地极端天气等急性气候风险事件频发, 如撒哈拉沙漠罕见洪灾、亚洲超强台风“摩羯”、波斯湾地区极端高温事件、非洲南部百年一遇的严重干旱等. 在我国, 仅 2022 年长江流域极端干旱事件就造成 5245.2 万人次受灾, 农作物受灾面积 6090.2 千公顷、直接经济损失 512.8 亿元 (应急管理部, 2023). 气候灾害不仅会对农业、基础设施和能源供应造成直接破坏, 还显著提高了金融市场波动性和不确定性 (Ji et al., 2024; Zhai et al., 2024b; Zhao et al., 2024).

随着全球对气候风险认知的提升, 投资者和监管部门逐渐担忧气候变化对金融系统的潜在冲击 (Krueger et al., 2020; Stroebe and Wurgler, 2021; 姬强等, 2022). 国际清算银行在报告《绿天鹅——气候变化时代的中央银行和金融稳定》中明确指出, 气候变化可能引发超出预期、影响广泛且后果极端的“绿天鹅”事件, 进而诱发系统性金融危机 (Bolton et al., 2020). 在此背景下, 气候金融风险作为一种新的系统性风险类型, 逐渐受到全球各国的高度关注. 气候金融风险通常是指气候变化通过对实体经济造成冲击, 沿着物理损害、政策调整、技术更替和市场预期变化等多重路径传导, 进而影响金融体系整体稳定性的过程. 上述传导路径可能在不同层面相互叠加并放大风险, 对金融系统构成持续性、结构性的压力. 自 2020 年以来, 巴塞尔银行监管委员会开始将气候风险纳入监管核心原则, 明确提出金融机构需充分识别气候风险的驱动因素, 并评估气候风险对主要金融风险类型的影响 (BCBS, 2022). 2022 年, 习近平总书记在中央经济工作会议上讲话时提到要“有效防范化解重大经济金融风险”. 同年, 中国人民银行也相应提出, 要“重点提升气候风险管理能力, 科学监测评估气候风险对金融体系的影响, 有力、有序、有效地支持经济社会绿色低碳转型”(刘桂平, 2022). 在此背景下, 如何科学有效地识别与量化气候风险对金融体系的冲击, 已成为全球金融稳定领域的核心议题.

传统金融风险评估方法主要关注经济周期、市场波动和信用风险等因素. 然而, 气候风险具有非线性、内生性、长期性和系统性等特殊特征, 这些特征使得短期且片面的传统金融

风险分析方法难以充分揭示气候变化对金融体系复杂、长期且高度不确定性的影响 (伊莱娜·莫拿斯特若罗和斯泰法诺·巴提斯顿, 2020; Acharya et al., 2023). 因此, 建立综合性的气候金融风险评估框架, 以定量评估不同转型路径下的金融冲击, 已成为近期的研究热点. 目前已有研究在气候金融风险评估方面取得初步进展, 按照建模视角的不同, 方法可分为自底向上 (Bottom-up)、自顶向下 (Top-down)、混合建模 (Hybrid modeling) 三类. 与此同时, 各国央行与金融监管部门也在积极推动气候金融风险评估的实践探索, 已有多国开展宏观审慎气候风险压力测试 (BoE, 2022; ECB, 2023; HKMA, 2025; UNEP FI, 2024a). 当前, 全球金融监管机构和国际组织正致力于构建系统化、标准化的气候金融评估框架, 以提升金融体系应对复杂气候风险的能力 (FSB, 2022, 2025; NGFS, 2020; UNEP FI, 2024b). 但总体而言, 气候金融风险评估的理论发展仍处于初步探索阶段, 许多研究和实践仍依赖于传统金融风险管理工具, 未能充分反映气候风险的独特性与复杂性.

基于上述背景, 本文的研究目标包括: 第一, 归纳总结金融市场气候风险的基本特征, 为气候风险评估提供理论基础. 第二, 系统梳理现有气候金融风险评估方法, 阐明其适用场景与局限性, 并介绍各国央行与监管机构的实践经验; 第三, 探讨未来重要研究方向, 为方法创新与监管实践提供支持.

## 2 气候风险在金融市场的表现

### 2.1 系统性

气候风险并非孤立的区域性风险类型, 而是全球共同面临的风险. 其成因具有跨国界、跨部门的特点, 表现出高度的关联性与外溢性. 温室气体排放导致的全球气候变暖、极端天气频发和生态系统退化, 会通过能源供应、粮食生产、跨国供应链和资本流动等多重渠道, 在国家、行业和市场之间相互传导, 最终对全球经济体系构成深远影响. 这种风险不仅影响实体经济, 还通过资产价值重估、信贷违约增加、保险赔付激增等机制传导至金融系统, 可能引发区域乃至全球范围内的系统性金融动荡 (Li et al., 2021; 王宗润等, 2024). 总的来说, 气候风险的系统性不仅体现在其物理表现的广泛性与交叉性, 更在于其对宏观经济稳定性与金融体系韧性的全面威胁, 亟需在政策设计、金融监管和风险建模中予以高度重视.

作为金融风险的重要新兴来源, 气候风险的系统性体现在其复合性特征. 物理风险与转型风险并非相互独立, 而是具有高度交织和动态反馈特征. 短期内加强气候政策可能导致高碳企业融资受限、估值受损, 引发信用和市场风险上升; 但从中长期看, 这一过程有助于降低因气候灾害频发所带来的资产损失, 缓解系统性金融冲击. 因此, 二者应被视作一体两面, 这种风险间的相互作用使得单一建模策略难以全面评估其潜在影响, 可能导致对系统性冲击的低估 (Acharya et al., 2023). 为此, 亟需构建综合性的评估框架, 整合多种风险路径和反馈机制, 以提升风险评估的全面性和准确性.

从金融风险类型角度看, 气候金融风险的系统性体现在气候风险引发的信用风险、市场风险、流动性风险 (Monasterolo, 2020). 在碳中和政策加速推进的背景下, 气候政策敏感性企业可能面临市场需求萎缩、企业绩效不佳的情形, 导致企业偿债能力下降; 市场可能出现资产重定价的剧烈波动, 高碳资产将因此遭遇集中抛售, 引发流动性危机; 与此同时, 绿色资产因资本蜂拥而入可能产生泡沫, 从而带来新的市场失衡风险. 上述风险并非孤立存在, 可能

通过金融机构间的高度互联性发生风险传导和相互放大,从而大幅提升系统性金融风险的冲击强度。

气候风险的系统性还体现在高度的非线性特征。一方面,气候系统存在临界点,一旦被突破,可能引起冰盖崩塌等不可逆的灾难性后果,进而通过物理损害、经济冲击和社会不稳定引起系统性金融危机与政治动荡等连锁反应,导致系统整体出现“突变式”失稳 (Lenton et al., 2008, 2019; Kemp et al., 2022)。另一方面,已有研究表明气候风险的全球年度 GDP 损失呈指数增长,且这一影响可通过供应链中断进一步放大,尤其是对中国和美国等制造业占比较高的国家冲击更为显著 (Burke et al., 2015; Sun et al., 2024)。可以预见,气候风险对经济增长的这种非线性扰动,极有可能在金融体系中诱发非线性响应,如资产价格剧烈波动、信用错配加剧以及市场情绪的突变性转折,从而增加金融系统的不确定性与脆弱性。

## 2.2 前瞻性和不确定性

气候风险是一种新型风险。由于历史数据无法刻画未曾发生过的风险类型,气候金融风险评估难以依赖传统的基于历史数据的统计分析方法,而是需要前瞻性的分析工具 (伊莱娜·莫拿斯特若罗和斯泰法诺·巴提斯顿, 2020)。目前较为主流的方式可分为两种,一是使用基于风险传染模拟的微观分析替代基于历史数据的分析,通过将不同的转型路径构建为情景,可以模拟各种气候条件、政策组合和市场反应下的金融冲击,金融市场参与者可以测算在各转型路径下的潜在损失;二是系统性宏观建模方法,从整体视角出发,构建经济系统、金融系统与气候系统之间的动态交互关系,捕捉宏观层面的潜在损失。

气候风险的前瞻性还导致气候金融风险评估面临高度不确定性。由于地球系统的高度复杂性、较长的建模时间尺度,情景、模型与参数不确定性将极为突出。一方面,未来的转型路径和低碳技术进步速度、社会折现率等关键信息均难以准确预判,不同设定可能导致评估结果的巨大差异;另一方面,不同模型对气候风险的响应机制模拟和风险测度方式存在较大差异,适用范围各有局限。在此背景下,如何合理处理不确定性,成为模型有效性和稳健性的重要因素。

## 2.3 长期性和路径依赖性

气候风险具有明显的长期累积效应,其对金融体系的冲击将在未来数十年内逐步显现,当前多数金融风险评估方法以短周期数据为基础 (Monasterolo, 2020),难以捕捉碳中和等长期政策目标在多个经济周期中可能产生的深远影响。因此,气候金融风险评估需要采用中长期的建模方法,辅以前瞻性指标与动态预测手段,从而更准确地评估各时期其潜在的金融影响。

从微观层面看,历史决策对未来行动具有长远而深刻的影响,因而金融市场参与者对气候风险的应对行为具有路径依赖性。金融机构在每个时期的行为决策不仅受到当下市场环境和气候政策的影响,还深受其过去多个时期的决策轨迹所制约。金融机构在过往投资组合中对高碳产业的长期配置,可限制其短期内向低碳领域转型的能力。即便面对日益严格的碳排放政策和可持续发展要求,金融机构调整其投资组合仍需较长的过渡期。同时,金融机构对绿色融资项目的投资倾向具有路径依赖性,即历史遗留的融资不平等被锁定在各个国家和各个收入群体之间,并由于自我强化的机制而长期持续存在,从而产生了一种“投资锁定”效应,

加剧了减排融资的不平等现象 (Rickman et al., 2023). 此外, 金融机构对气候风险的认知水平、风险偏好与资产配置策略也呈现出渐进式演化的特征. 而从宏观层面看, 整个经济金融体系的演化轨迹也具有路径依赖性. 国家层面长期形成的产业结构、能源结构与政策导向对当前绿色转型战略形成持续性约束, 导致高碳经济体在结构调整中普遍面临更高的转型成本. 同时, 早期政策路径对绿色低碳转型的推进节奏和资源配置效率构成影响, 未能及早系统性实施气候政策的国家往往在制度补齐过程中遭遇更大的摩擦成本与协调难度. 在构建气候金融模型时, 若未充分考虑路径依赖性, 可能低估转型过程中的调整成本与行为惯性, 从而影响评估可靠性.

### 3 气候金融风险评估的前沿研究与实践

#### 3.1 建模方法研究进展

目前, 气候金融风险评估的研究主要分为自顶向下 (top-down)、自底向上 (bottom-up)、混合建模 (hybrid modeling) 三种方法. 自顶向下建模方法从宏观系统层面模拟气候经济系统的交互反馈, 包括综合评估模型、存量流量一致性模型、宏观金融网络等方法; 自底向上建模方法强调基于微观数据刻画气候风险对个体经济主体的影响, 包括冲击模拟法、资产定价法和主体建模法; 混合建模方法集成了上述两种建模方法的优势, 建立起从宏观经济至微观资产的传导链条, 能够兼顾系统性气候风险的顶层驱动机制与金融系统内部的异质性响应特征.

##### 3.1.1 自顶向下建模方法

自顶向下建模方法是指从宏观层面出发对气候、能源和经济等各个子系统进行耦合式建模, 从而评估气候风险对金融市场的冲击的一类方法. 这类研究多以全球或国家尺度评估气候变化对金融资产和经济活动的潜在冲击, 注重气候系统与经济金融系统之间的交互反馈, 但对微观差异和极端损失的考虑相对有限. 自顶向下建模方法主要包括扩展的综合评估模型、存量流量一致性模型、宏观金融网络模型、DSGE 模型等.

综合评估模型 (integrated assessment models, IAMs) 主要用于量化气候变化对宏观经济的长期影响, 其中最具代表性的模型是由诺德豪斯提出的 DICE 模型 (Nordhaus, 1992). Dietz et al. (2016) 首次提出“气候在险价值” (climate value at risk, climate VaR) 概念, 将 DICE 模型与金融资产估值方法相结合, 构建了一个评估物理风险对金融资产价值冲击的模型框架. 该模型估计了不同气候损害方式下全球金融资产价值的潜在损失, 拓展了传统 IAMs 的应用边界, 为后续研究奠定了基础.

一些研究采用存量流量一致性 (stock-flow consistent, SFC) 方法进行建模. 该方法强调会计恒等关系和经济行为一致性, 特别适用于在涉及多部门主体、多类金融工具以及多种政策干预的复杂情境中, 动态模拟绿色政策冲击对金融稳定性的中长期影响. Monasterolo and Raberto (2018) 开发了 EIRIN 资金流动行为模型, 该模型采用列昂惕夫生产函数结构, 模拟绿色财政政策和绿色主权债券的实施, 评估其对棕色与绿色部门企业投资、失业、信贷供给及债券市场的影响. Dafermos et al. (2018) 构建了包括生态系统模块与宏观经济金融系统模块的 DEFINE (dynamic ecosystem-finance-economy) 模型. 该模型的生态系统模块基于碳

循环机制,模拟温室气体排放、碳浓度演变及全球升温趋势,构建温度变化与经济损失的非线性函数关系;宏观经济金融系统模块则采用 SFC 方法,刻画了气候变化、金融稳定与货币政策之间的交互作用。(王博和宋玉峰,2020) 基于简化四部门国民账户体系建立了 SFC 模型,并使用 ABM 方法引入行为约束,构建了“气候变化-政策响应-经济增长-金融稳定”的影响传导路径,研究碳税和绿色支持因子对经济发展和金融稳定的影响。Dunz et al. (2021) 开发了适用于高收入国家的 SFC 模型,嵌入银行对气候风险情绪的自适应预期行为,分析碳税与绿色支持因素对经济绿色转型与银行稳定性的影响,并揭示信贷市场向实体经济传导风险过程中潜在的强化反馈效应与连锁反应。

部分研究将网络科学与宏观经济金融账户体系相结合,建立宏观金融网络模型,以分析气候政策所引发的金融风险如何在整个经济系统中被放大并传播。Stolbova et al. (2018) 基于经济部门间的金融敞口,构建了一个多层次金融宏观网络模型,系统性地建模了宏观经济部门与金融市场之间的网络关联结构。该模型将四类主要金融工具(股权、债券、贷款、保险与养老金)作为网络的层,节点为部门,边为部门间通过某种金融工具的敞口,通过量化气候政策冲击在金融体系内部及金融体系与实体经济之间形成的反馈回路,评估气候政策可能引发的系统性金融风险及其传染路径。

还有一些学者尝试将包含金融加速器的动态随机一般均衡模型(dynamic stochastic general equilibrium, DSGE)与气候或环境模型结合来评估气候风险的长期影响。Ferrari and Landi (2024) 将 Gertler and Karadi (2011) 的金融加速器模型与 Heutel (2012) 的环境模型相结合,研究绿色量化宽松对宏观经济和环境变量的影响。该模型的经济损害机制是二氧化碳排放会增加大气中的碳存量,从而降低全要素生产率。张涛等(2023)将 DICE 模型的碳循环和气候变化因素与包含金融加速器的 BGG 模型结合,评估了气候风险对资产价格、企业违约率和信贷规模的影响。

### 3.1.2 自底向上建模方法

冲击模拟法是一种将外生给定的气候经济情景转化为冲击来源,在微观层面识别风险并在金融市场中模拟传导风险从而进行评估的方法。该方法强调气候系统和经济系统对金融系统的单向冲击,通常依托于企业层面或资产层面的微观数据。Mandel et al. (2025) 以具有代表性的全球金融资产为研究对象,通过结构化气候信用风险模型(CLIMACRED-PHYS)系统评估了洪水、风暴与野火等极端气候事件对金融市场的潜在冲击。该模型基于灾害强度分布和脆弱性函数来估算资产层面的经济损失,再汇总到公司层面的资产负债表和违约概率影响,最终映射到债券和股票的估值损失。研究发现,金融放大效应(即股权损失与直接资本损失的比率)在 1 至 5 倍之间,远超经济放大效应(即总生产损失与直接损失的比率,约 1 至 2 倍),反映出金融系统对气候风险的高度敏感性。

与冲击模拟法相比,资产定价法不考虑气候风险的识别和传导,而是基于资产定价理论构建气候风险指标,从而评估金融机构的气候风险抵抗能力(Acharya et al., 2023)。Jung et al. (2021) 提出基于边际平均资本缺口的 CRISK 指标,用于衡量银行机构在极端气候情景下的预期资本短缺。该研究首先构建多种代表气候转型路径的气候因子,设定“严重但合理”的气候压力情景,随后借助 Engle (2016) 的动态条件 beta (dynamic conditional beta, DCB)

模型估算银行股票收益对气候因子的敏感性以刻画其气候风险敞口, 最后基于压力情景下的股本损失量化金融机构在气候冲击下的资本缺口 (CRISK), 并进一步分解出由气候因素单独导致的边际资本缺口 (mCRISK), 从而评估气候压力导致的潜在损失. Jung et al. (2023) 进一步利用房地产投资信托基金 (REITs) 组合构建了新的物理风险因子, 应用于保险业资本缺口测算, 分析了保险公司对气候物理风险和转型风险的股票收益敏感性, 并与转型风险因子进行对比. 结果显示, 在物理风险较高地区运营的保险公司, 其股票收益对物理风险因子更敏感; 而持有更多棕色资产的保险公司, 则表现出对转型风险因子的更高敏感度.

自底向上的另一类评估方法是主体建模法 (agent-based modeling, ABM), 构建若干个具有代表性的异质性主体, 通过规则驱动下的主体间互动来模拟气候政策对金融体系的影响. Safarzyńska and van den Bergh (2017) 基于这一思想建模了银行系统、能源结构、劳动力市场和消费者异质性主体, 模拟了能源政策 (税收、补贴、能效、再分配) 对金融网络连通性和风险的影响. 分析表明, 能源政策会影响银行间的连通性, 从而影响银行破产的可能性, 由于可再生能源发电厂的建设成本仍较高, 过快转向可再生能源会给金融系统带来严重负担. Lamperti et al. (2019) 提出一种使用 DSK (Dystopian Schumpeter meeting Keynes) 的全球气候-经济-金融集成代理人模型, 包含家庭、企业、能源部门、商业银行、中央银行与政府, 模拟异质性主体在气候冲击下的相互作用. 模型通过模拟气候物理风险对劳动生产率和资本存量的冲击, 分析这些微观损害如何通过金融体系传导, 最终导致银行危机和公共救助成本增加.

### 3.1.3 混合建模方法

混合建模方法在气候经济模型的宏观均衡思想基础上, 融合了金融风险管理中对尾部风险与个体异质性的刻画, 能够从多层次、结构性的视角评估气候-经济-金融的联动效应. 近年来, 该方法已广泛应用于各国监管部门与金融机构的气候风险压力测试实践, 逐步发展成为金融监管中的关键技术工具.

混合建模方法主要包括四个步骤, 分别是设置气候情景、识别和量化气候风险的经济冲击、气候风险向金融体系的传导和传染、评价个体性和系统性的金融风险. 其中, 设置气候情景是开展评估的重要环节. 常见气候情景包括基准情景、物理风险情景和转型风险情景. 基准情景通常假设当前政策维持不变, 作为对照基线; 转型情景用于模拟不同转型路径造成的冲击, 物理风险情景通常依赖于气候科学的预测, 根据未来极端气候事件的发生概率与强度模拟生成一系列极端气候事件作为外生冲击; NGFS 提出了“有序转型”和“无序转型”等多种情景 (NGFS, 2021, 2022). 在实际应用中, 气候金融风险评估应至少包括一个基准情景和代表不同转型策略的若干个情景, 将各个气候情景的风险敞口和预期损失进行对比来评估气候风险的潜在影响.

Battiston et al. (2017) 首次提出了基于综合评估模型和银行间网络的气候风险压力测试模型. 该研究首次将 NACE 行业分类标准按与气候风险的相关程度重新映射, 根据综合评估模型得到的化石能源使用量变化来估算相关行业的市场规模损失, 建立了气候政策与行业风险的传导通道. 随后, 根据微观金融数据建立金融风险传导网络, 将单个金融机构的风险累积效应向系统层面延伸, 揭示出风险在系统内部扩散和传染的特征. 这一方法奠定了气候金

融风险评估的基础, 其中的思想随后被广泛应用于银行系统的气候金融风险评估实践中. Xu et al. (2024) 延续并扩展了该方法, 应用于中国银行业的转型风险评估. 上述研究仅考虑了银行业遭受的损失和风险传染, 然而气候变化也可能通过其对保险公司、共同基金和养老基金等非银行机构的影响来威胁金融稳定. Roncoroni et al. (2021) 将基于银行业网络的气候金融风险评估框架拓展至银行和投资基金的网络, 在原有两轮风险传染的基础上增加了资产抛售和风险传导至外部债权人两个步骤, 评估了气候转型风险和市场条件变化对墨西哥金融体系稳定性的影响. 近年来, 模型逐渐发展到对物理风险和转型风险的精细识别. Bressan et al. (2024) 提出了一种资产层面的气候物理风险评估方法, 整合企业资产的地理分布与财务数据, 采用 CLIMADA 模型评估热带气旋等急性物理风险对资产的概率化冲击, 使用 ICES 宏观经济模型量化慢性气候风险对行业层面的产出影响, 在此基础上使用气候股息折现模型 (Climate DDM), 通过调整企业的长期增长预期, 将气候因素对资产层面的影响转化为对企业估值的影响, 并最终聚合至投资者的投资组合层面, 为适应性融资提供了更加精准的微观依据.

3.2 建模方法比较与不足

随着研究的不断深入, 三类建模方法逐步发展并各自形成体系, 表 1 总结了它们在方法特征、优缺点及适用范围等方面的主要差异.

自顶向下建模方法在宏观长期影响评估上具有显著优势. 第一, 该方法能从全局视角捕捉气候风险对宏观经济和金融体系的系统性冲击, 识别跨行业、跨部门、跨市场的风险传导路径; 第二, 模型的政策模拟能力强, 允许嵌入碳税、排放限额、绿色投资等不同的气候政策

表 1 三种建模方式对比

	自顶向下建模	自底向上建模	混合建模
分析视角	宏观视角出发, 进而细化到子系统	微观视角出发, 逐步聚合至系统层面	融合宏观与微观层级, 建立跨尺度风险传导路径
核心目标	评估气候风险对宏观经济金融的总体影响	评估金融机构或资产组合的潜在损失	同时刻画系统性趋势与个体风险
数据要求	国家或行业层面的宏观统计数据	企业层面或资产层面的微观数据	宏观情景数据和微观风险敞口数据
主要方法	综合评估模型、存量流量一致性方法、宏观金融网络模型、动态随机一般均衡模型等	冲击模拟法、资产定价法、主体建模法	宏观经济模型和微观金融模拟相结合
优点	能够体现宏观趋势, 可模拟系统间交互, 允许模型整合	可体现个体异质性, 结果精细化程度高, 可衡量个体损失	可实现跨层级风险耦合, 兼顾系统反馈与个体应对, 支持多尺度协同评估
缺点	对贴现率等参数设定敏感, 忽视微观个体异质性与风险尾部分布, 难以落地到微观个体	依赖模型假设, 难以刻画系统间反馈效应, 受制于数据可得性和计算复杂度	模型构建复杂, 数据需求高, 不确定性高, 计算开销大
适用范围	宏观政策模拟、长期转型路径分析	企业和金融机构的资产风险评估	气候压力测试与系统性风险监管



组合, 评估各种政策路径对经济与金融变量的长期影响, 适用于中央银行和监管机构制定宏观审慎政策; 第三, 该方法允许高自由度的模型整合, 可结合气候变化综合评估模型、动态随机一般均衡模型、存量流量一致性模型及金融网络模型等多种工具, 根据研究目的灵活嵌入和组合不同模型。

自顶向下的方法存在一些局限性。第一, 由于侧重整体层面的分析, 往往忽视微观个体的异质性, 难以提供针对具体金融机构或企业的精细化风险评估; 第二, 方法对函数形式、情景和参数设定高度依赖, 使得模型结果对假设条件的敏感度较大, 导致评估不确定性较高; 第三, 自顶向下方法大多基于一般均衡理论, 难以捕捉非线性、突发性、不可逆的极端气候事件对金融系统的剧烈冲击, 可能低估尾部风险的影响; 第四, 由于模型结构复杂、“黑箱”程度较高, 通常难以对结果展开解释, 从而降低其可操作性和可信性。

自底向上建模方法易于纳入具体的情景分析框架, 适合监管部门对金融系统开展金融系统气候风险的识别与量化评估, 为日常监管和应急预案制定提供重要依据。其中, 冲击模拟法依托于资产层面和企业层面的数据, 能捕捉精确的风险暴露状况, 广泛应用于宏观审慎气候风险压力测试。此类模型可识别不同资产与部门对气候风险的敏感程度与反应差异, 能够为风险管理提供精准的信息, 避免了宏观模型粗放式估算的弊端。金融机构间的网络结构分析能清晰揭示风险的具体传导路径, 使监管者明确哪些资产或机构是潜在风险传播的关键节点, 有利于针对性制定金融监管措施。同时, 气候风险往往具有高度异质性与地区差异性, 通过底层资产和微观机构视角, 监管部门可以设计针对性的应对措施, 更有效地进行风险预警和管理。而资产定价法适合在微观数据不充足的情形下开展, 在金融市场定价效率较高的情形下, 该方法能够依靠市场信息评估金融机构或投资组合的潜在损失。

自底向上建模方法也存在明显的局限性。第一, 该方法高度依赖模型假设, 包括风险传导机制、冲击参数等。这些假设通常带有一定的主观性, 容易引入结构性不确定性。第二, 资产层面或企业层面的风险评估普遍面临建模复杂度和计算成本较高的问题, 尤其是随着分析范围扩大、资产数量增加时, 模型运行效率将显著下降, 制约其实际应用。第三, 数据可获得性仍然是该方法的核心瓶颈。有效建模依赖详尽的微观数据, 包括资产空间分布、企业运营与财务信息、金融机构资产持仓结构等。在许多发展中地区或中小型金融机构中, 数据获取受限、质量参差不齐, 加之全球范围内缺乏统一的数据标准, 导致横向比较与跨市场评估难度较大, 难以全面覆盖全球市场。第四, 多数模型侧重气候变化对金融市场的单向影响, 而对反馈机制的整合有限, 未能充分考虑政策调整、市场行为和金融体系之间的动态互动, 导致模型的适应性不足 (Campiglio et al., 2018)。第五, 自底向上方法更关注微观传导机制, 可能忽视某些外生宏观因素对风险的放大作用, 导致低估了金融体系遭受的冲击。

相较于单一尺度的建模方法, 混合建模通过整合宏观层面的系统性机制与微观主体的行为异质性, 构建了跨尺度的风险传导通路。这一方法能够同时刻画气候冲击下的总体趋势演化与个体反应差异, 在捕捉系统性风险的同时揭示关键微观路径与反馈效应。其核心优势在于提供了一种结构化、多层次的评估框架, 适用于识别“由下至上”与“由上至下”联动机制, 支持对气候-经济-金融复杂系统中传导链条的动态追踪与情景分析。近年来, 该方法已广泛应用于气候金融压力测试、碳资产定价、绿色转型脆弱性分析等领域, 逐步成为监管机构和金融机构应对气候风险的重要量化工具。

然而,混合建模的广泛应用也面临诸多挑战.第一,由于模型同时覆盖多个层级,其建模逻辑往往高度复杂,依赖于模块间的有效耦合与合理的风险传导机制.第二,此类方法对数据可得性和数据质量提出了较高要求,数据收集与清洗成本显著.第三,混合建模方法通常面向中长期模拟,还将面临跨时间尺度的不确定性放大效应以及大规模模拟所带来的计算资源瓶颈,当风险评估范围逐步扩大时这一问题将愈发突出.如何在模型精度、计算效率与现实适用性之间取得权衡,已成为制约混合建模方法进一步推广和落地的关键问题.

3.3 气候风险管理实践

近年来,全球主要央行和金融监管部门围绕气候金融风险评估展开了多元化的实践探索,表 2 对各国实践的时间、涵盖的风险类型、情景设置等进行了梳理总结.

欧洲央行于 2021 年首次对欧元区银行进行自上而下的全经济范围气候风险压力测试,同时考虑物理风险和转型风险,测试了气候变化对各国企业和 1600 家欧元区银行的影响 (Alogoskoufis et al., 2021). 测试采用 NGFS 情景为基础的三种 30 年长期情景,包括“有序转型”(orderly transition)、“无序转型”(disorderly transition)和“温室世界”(hot house world). 结果表明,面临气候风险最大的银行和企业遭受的影响将十分巨大,尤其是不采取行动的情形下.就贷款来说,在“温室世界”情景下,最易受到气候风险影响的贷款组合在 2050 年的违约率比 2020 年高 30%,是同情景下违约率平均增幅的五倍. 2022 年,欧洲央行进行了第二次气候风险压力测试 (ECB, 2021, 2022). 本次模拟了 30 年长期转型风险情景、3 年

表 2 气候金融风险评估实践

监管机构	实施 时间	风险类型	时间 跨度	情景设置	评估对象
欧洲中央银行	2021 年	物理风险、 转型风险	2020 至 2050 年	有序转型、无序转型、温室世界	欧元区银行和 非金融企业
欧洲中央银行	2022 年	物理风险、 转型风险	最长到 2050 年	短期转型风险情景 (基准、压力)、长 期转型风险情景 (参考 NGFS)、短 期物理风险情景 (干旱高温、洪水)	41 家欧元区 银行
澳大利亚审慎 监管局	2021 年	物理风险、 转型风险	2020 至 2050 年	延迟转型情景、现行政策情景	银行业
英格兰银行	2021 年	物理风险、 转型风险	2020 至 2050 年	有序转型、无序转型、温室世界	英国银行业和 保险业
香港金融 监管局	2021 年	物理风险、 转型风险	最长到 2050 年	有序转型、无序转型、温室世界	27 家大型银 行
香港金融 监管局	2023 至 2024 年	物理风险、 转型风险	最长到 2050 年	有序转型、无序转型、温室世界、极 端灾害	46 家大型银 行
中国人民银行	2021 年	转型风险	2020 至 2030 年	低、中、高 3 种碳价情景 (覆盖火 电、钢铁、水泥行业年碳排放量高于 2.6 万吨二氧化碳企业)	23 家大型银 行
中国人民银行	2022 年	转型风险	2020 至 2030 年	低、中、高 3 种碳价情景 (覆盖 8 个 重点排放行业)	19 家系统重 要性银行

短期转型风险情景和 1 年短期物理风险情景, 短期转型风险情景采用一组基准情景和一组压力情景, 长期转型风险情景沿用 NGFS 的三种情景, 短期物理风险情景包含一组干旱高温情景和一组洪水情景. 与第一次不同的是, 本次压力测试采用自下而上的方式, 依靠银行对其气候变化风险敞口及其应对准备情况的自我评估, 分析了企业、家庭和银行对三种转型情景的适应能力.

澳大利亚审慎监管局对本国 5 家主要银行进行了气候脆弱性评估 (CVA), 测试主要银行在两种 NGFS 情景下的风险敞口和应对能力 (APRA, 2021, 2022). 结果表明, 气候风险预计不会对银行系统造成严重冲击, 但可导致银行业易受到经济衰退的影响.

英格兰银行于 2021 年 6 月启动气候双年度探索性情景测试 (CBES), 采用 NGFS 的三种 30 年长期情景, 测试对象包括银行与保险公司 (BoE, 2021, 2022). 此次测试采用机构自评机制, 要求参与机构根据设定的气候情景, 分析其资产负债表的敞口和潜在损失. 结果表明, 气候风险可能会拖累英国银行和保险公司的盈利能力, 且最初由银行和保险公司承担的部分气候成本最终会转嫁给客户.

香港金融监管局于 2021 年开展气候风险压力测试试验计划 (CRST), 20 家大型零售银行和 7 家国际银行集团分支机构参与了该研究, 共占香港银行业贷款总额的 80% (HKMA, 2021). 结果表明, 模拟中假设的极端气候情景将导致参与银行的盈利能力大幅下降, 这是因为直接受气候变化影响的风险敞口的预期信贷损失将大幅增加. 由于银行拥有充足的资本缓冲, 香港银行业仍然能够抵御与气候相关的冲击. 随后, 香港金融监管局于 2023 至 2024 年再次开展气候风险压力测试 (CRST 2.0), 设置 5 年短期情景和 30 年长期情景, 参与的 46 家银行自行对自身投资组合在多种气候情景下的表现进行评估 (HKMA, 2025). 结果表明, 香港银行体系表现出强劲的韧性, 即使在模拟的严重气候冲击与经济衰退叠加的情境下, 银行系统的资本充足率仍远高于国际最低监管要求 (8%).

中国人民银行于 2021 年围绕 23 家主要银行 (2 家政策性银行、6 家大型商业银行、12 家股份制商业银行和 3 家城市商业银行) 首次实施气候风险敏感性压力测试, 针对火电、钢铁和水泥行业年排放量在 2.6 万吨以上二氧化碳当量的企业, 设置低、中、高三种碳价情景, 评估碳排放成本上升对企业偿债能力的影响. 该压力测试假设企业将面临逐年稳步上升的碳价, 且对上下游的碳价不具备议价能力. 结果显示, 由于火电、钢铁和水泥行业贷款占参试银行全部贷款比重不高, 因此参试银行整体资本充足率在三种压力情景下均能满足监管要求. 2022 年中国人民银行再次组织 19 家系统重要性银行开展新一轮气候风险敏感性压力测试, 针对电力、钢铁、建材、有色金属、航空、石化、化工、造纸等八个重点排碳行业, 分析引入碳排放付费机制情况下, 从当前至 2030 年, 相关企业因成本上升导致贷款违约概率上升, 进而对银行资本充足水平的影响.

## 4 未来研究方向

### 4.1 气候金融风险的本土化评估

目前, 气候金融风险评估已逐步纳入各国金融监管框架, 但全球建模标准尚未统一. 各国金融体系情况各异, 导致不同国家在建模方法、数据要求与评估口径上存在较大差异. 中国金融体系具有国有银行占比较高、绿色信贷集中、资本市场起步晚等结构性特征, 导致国

外建模方法难以直接适用,亟需构建契合中国金融体系特征的本土化气候金融风险评估框架。开展相关研究既有助于提升我国金融系统韧性,也可在全球气候金融治理中提供具有代表性的中国经验。

#### 4.2 物理风险与转型风险的耦合建模

当前的研究主要集中在物理风险或转型风险的单独建模,而较少关注二者的相互作用。事实上,物理风险的加剧将提高公众与政府对气候行动的关注,进而加速气候政策出台;转型风险的变化反过来也会影响实体资产对物理风险的暴露程度。物理风险与转型风险存在相互作用的特征,形成“风险复合体”,现有研究尚未充分反映这种动态交互关系。

#### 4.3 多种建模方法相结合

目前的建模工具各有侧重,各类方法在时间尺度、政策模拟与评估精度方面存在差异,单一模型难以全面覆盖风险评估需求。自底向上建模方法虽可评估微观个体面临的潜在损失,但模型极度依赖对传导机制的假设,且无法模拟金融系统对经济系统和气候系统的反馈。自顶向下建模方法能够模拟政策变动对气候-经济-金融耦合系统的长期影响,但难以刻画短期市场波动和资产价格极端波动。混合建模方法虽可同时刻画宏观和微观层面,但面临模型结构过于复杂、计算开销大等问题。因此,如何在不同方法框架之间建立统一且通用的分析体系,以更全面地评估气候风险对金融体系的影响,仍然是当前研究亟待解决的关键问题。

#### 4.4 气候-经济-金融系统间反馈机制

金融系统对气候系统和经济系统的反馈机制建模不足。现有研究多聚焦气候变化对经济发展和金融市场的影响,但金融市场对气候系统和经济系统的反向作用的建模尚不充分。一方面,资本市场的投资方向决定了低碳技术研发和绿色产业融资能力;另一方面,金融机构的信贷政策影响高碳产业的生存空间(翟鹏翔等, 2024; 李兴申等, 2024)。这些金融行为如何影响气候政策执行、产业转型进程,以及最终的碳排放路径,仍缺乏系统建模。

#### 4.5 基于深度学习的气候金融风险评估

深度学习在处理非线性关系、长周期依赖以及高维输入数据方面具有显著优势,十分适合捕捉复杂气候系统与经济金融变量之间的非线性耦合关系。近年来,已有一些研究使用深度学习方法评估和预测气候风险的经济影响和社会影响(Chavez et al., 2015; Ge et al., 2022; Yu et al., 2022)。然而,基于深度学习技术的金融风险评估仍处于起步阶段,相关研究较为稀缺。可以预见,未来的探索方向是将气候风险数据、金融市场响应变量及高碳企业微观数据纳入深度学习模型,以校正 IAMs、DSGE 等结构模型的模拟结果,甚至最终构建具备复杂结构学习能力、“端到端”的气候-经济-金融系统模型。

### 5 结语

气候变化正深刻影响着全球经济和金融体系,有效识别并量化气候相关风险已成为金融风险管理领域的重要课题。对气候风险进行评估需要气候科学、经济学、金融风险管理等多学科的交叉融合。本文系统梳理了金融市场的气候风险特征、气候金融的评估方法及实践进展,总结对比了当前三类评估方法的优缺点,给出了未来的研究方向。总体来看,气候金融风

险评估研究仍处于初步探索阶段。一方面, 风险类型间和系统间的相互作用尚未得到充分关注, 物理风险和转型风险的动态复合效应仍然是当前建模方法的薄弱环节, 金融系统对气候系统和经济系统的反馈目前建模不足; 另一方面, 现有模型框架之间缺乏整合, 难以从宏观、微观及市场层面全方位评估气候风险对金融体系的综合影响。未来应加强跨学科方法整合, 提升模型动态适应性与政策模拟能力, 推动适应中国金融体系的本土化研究, 构建具备国际可比性的统一建模标准, 为增强金融体系的风险识别能力与管理韧性、支撑绿色低碳转型、提升全球金融体系的可持续性提供坚实支撑。

## 参 考 文 献

- 姬强, 赵万里, 张大永, 郭琨, (2022). 气候风险感知对金融市场的影响——基于中国企业层面的微观证据 [J]. 计量经济学报, 2(3): 666–680.
- Ji Q, Zhao W L, Zhang D Y, Guo K, (2022). Climate Risk Perception and Its Impacts on Financial Markets: Micro-evidence from Listed Firms in China[J]. China Journal of Econometrics, 2(3): 666–680.
- 李兴申, 谭小芬, 刘子雨, (2024). 气候变化脆弱性与跨境银行贷款: 来自辛迪加贷款的证据 [J]. 世界经济, 47(9): 62–87.
- Li X S, Tan X F, Liu Z Y, (2024). Climate Change Vulnerability and Cross-Border Bank Loans: Evidence from Syndicate Loans[J]. The Journal of World Economy, 47(9): 62–87.
- 刘桂平, (2022). 努力提高金融体系气候风险管理能力 [J]. 中国金融, (5): 9–11.
- Liu G P, (2022). Striving to Improve the Ability of Financial System on Climate Risk Management[J]. China Finance, (5): 9–11.
- 王博, 宋玉峰, (2020). 气候变化的转型风险对宏观经济和金融稳定的影响——基于存量流量一致性模型视角 [J]. 经济学动态, (11): 84–99.
- Wang B, Song Y F, (2020). Impact of Transition Risks of Climate Change on Macroeconomic and Financial Stability — From the Perspective of Stock Flow Consistent Models[J]. Economic Perspectives, (11): 84–99.
- 王宗润, 牛娅鑫, 任晓航, (2024). 气候变化如何影响金融系统性风险——来自极端气候事件和绿色 (棕色) 资产的双重证据 [J]. 计量经济学报, 4(4): 1009–1030.
- Wang Z R, Niu Y X, Ren X H, (2024). How Climate Change Affects Systemic Financial Risk: Evidence from Extreme Climate Events and Green (Brown) Assets[J]. China Journal of Econometrics, 4(4): 1009–1030.
- 伊莱娜·莫拿斯特若罗, 斯泰法诺·巴提斯顿, (2020). 前瞻性气候风险评估工具 CLIMAFIN 的方法学和应用 [J]. 清华金融评论, (9): 39–42.
- Monasterolo I, Battiston S, (2020). Methodology and Application of CLIMAFIN: A Prospective Climate Risk Assessment Tool[J]. Tsinghua Financial Review, (9): 39–42.
- 应急管理部, (2023). 应急管理部发布 2022 年全国自然灾害基本情况 [EB/OL]. [2025-04-21]. [https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202301/t20230113\\_440478.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202301/t20230113_440478.shtml).
- Ministry of Emergency Management, (2023). The Ministry of Emergency Management Releases the Basic Situation of Natural Disasters in China in 2022[EB/OL]. [2025-04-21]. [https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202301/t20230113\\_440478.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202301/t20230113_440478.shtml).
- 翟鹏翔, 雷雷, 范英, 郭琨, 张大永, 等, (2024). 气候政策不确定性与企业债券融资成本 [J]. 系统工程理论与

- 实践, 44(11): 3520–3536.
- Zhai P X, Lei L, Fan Y, Guo K, Zhang D Y, et al., (2024). Climate Policy Uncertainty and the Cost of Corporate Bond[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 44(11): 3520–3536.
- 张大永, 张跃军, 王玉东, 王群伟, 姬强, (2023). 气候金融的学科内涵、中国实践与热点前沿研究 [J]. *管理科学学报*, 26(8): 1–15.
- Zhang D Y, Zhang Y J, Wang Y D, Wang Q W, Ji Q, (2023). Climate Finance: Theoretical Advancements, Chinese Practice, and Cutting-Edge Research[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 26(8): 1–15.
- 张涛, 侯宇恒, 曲晓溪, 张卓群, (2023). 碳循环、气候变化与金融风险——基于 dsge 模型 [J]. *中国人口·资源与环境*, 33(8): 1–12.
- Zhang T, Hou Y H, Qu X X, Zhang Z Q, (2023). Carbon Cycle, Climate Change, and Financial Risks: Based on the DSGE Model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 33(8): 1–12.
- APRA, (2021). Climate Vulnerability Assessment[R]. Australia: Australian Prudential Regulation Authority.
- APRA, (2022). Climate Vulnerability Assessment Results[R]. Australia: Australian Prudential Regulation Authority.
- Acharya V V, Berner R, Engle R, Jung H, Stroebel J, et al., (2023). Climate Stress Testing[J]. *Annual Review of Financial Economics*, 15: 291–326.
- Alogoskoufis S, Dunz N, Emambakhsh T, Hennig T, Kaijser M, et al., (2021). ECB Economy-Wide Climate Stress Test: Methodology and Results[R]. ECB Occasional Paper.
- BCBS, (2022). Principles for the Effective Management and Supervision of Climate-Related Financial Risks[R]. Basel Committee on Banking Supervision.
- Battiston S, Mandel A, Monasterolo I, Schütze F, Visentin G, et al., (2017). A Climate Stress-Test of the Financial System[J]. *Nature Climate Change*, 7(4): 283–288.
- Bevacqua E, Schleussner C F, Zscheischler J, (2025). A Year Above 1.5°C Signals that Earth is Most Probably Within the 20-Year Period That Will Reach the Paris Agreement Limit[J]. *Nature Climate Change*, 15(3): 262–265.
- BoE, (2021). Key Elements of the 2021 Biennial Exploratory Scenario: Financial Risks from Climate Change[R]. England: Bank of England.
- BoE, (2022). Results of the 2021 Climate Biennial Exploratory Scenario (CBES)[R]. England: Bank of England.
- Bolton P, Despres M, Pereira Da Silva L A, Samama F, Svartzman R, (2020). The Green Swan: Central Banking and Financial Stability in the Age of Climate Change[N]. Amsterdam: BIS Publishers, 2020.
- Bressan G, Đuranović A, Monasterolo I, Battiston S, (2024). Asset-Level Assessment of Climate Physical Risk Matters for Adaptation Finance[J]. *Nature Communications*, 15(1): 2024.
- Burke M, Hsiang S M, Miguel E, (2015). Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production[J]. *Nature*, 527(7577): 235–239.
- Campiglio E, Dafermos Y, Monnin P, Ryan-Collins J, Schotten G, et al., (2018). Climate Change Challenges for Central Banks and Financial Regulators[J]. *Nature Climate Change*, 8(6): 462–468.
- Chavez E, Conway G, Ghil M, Sadler M, (2015). An End-to-end Assessment of Extreme Weather Impacts on Food Security[J]. *Nature Climate Change*, 5(11): 997–1001.
- Dafermos Y, Nikolaidi M, Galanis G, (2018). Climate Change, Financial Stability and Monetary Policy[J]. *Ecological Economics*, 152: 219–234.

- Dietz S, Bowen A, Dixon C, Gradwell P, (2016). ‘Climate Value at Risk’ of Global Financial Assets[J]. *Nature Climate Change*, 6(7): 676–679.
- Dunz N, Naqvi A, Monasterolo I, (2021). Climate Sentiments, Transition Risk, and Financial Stability in a Stock-Flow Consistent Model[J]. *Journal of Financial Stability*, 54: 100872.
- ECB, (2021). SSM Stress Test 2022[R]. European Central Bank.
- ECB, (2022). 2022 Climate Risk Stress Test[R]. European Central Bank.
- ECB, (2023). Faster Green Transition Would Benefit Firms, Households and Banks: ECB Economy-Wide Climate Stress Test Finds[R]. European Central Bank.
- Engle R F, (2016). Dynamic Conditional Beta[J]. *Journal of Financial Econometrics*, 14(4): 643–667.
- FSB, (2022). Supervisory and Regulatory Approaches to Climate-Related Risks: Final Report[R]. Financial Stability Board.
- FSB, (2025). Assessment of Climate-Related Vulnerabilities: Analytical Framework and Toolkit[R]. Financial Stability Board.
- Ferrari A, Landi V N, (2024). Whatever It Takes to Save the Planet? Central Banks and Unconventional Green Policy[J]. *Macroeconomic Dynamics*, 28(2): 299–324.
- Ge Q, Hao M, Ding F, Jiang D, Scheffran J, et al., (2022). Modelling Armed Conflict Risk Under Climate Change with Machine Learning and Time-Series Data[J]. *Nature Communications*, 13(1): 2022.
- Gertler M, Karadi P, (2011). A Model of Unconventional Monetary Policy[J]. *Journal of Monetary Economics*, 58(1): 17–34.
- HKMA, (2021). Pilot Banking Sector Climate Risk Stress Test[R]. Hong Kong Monetary Authority.
- HKMA, (2025). 2023 – 2024 Banking Sector Climate Risk Stress Test[R]. Hong Kong Monetary Authority.
- Heutel G, (2012). How Should Environmental Policy Respond to Business Cycles? Optimal Policy Under Persistent Productivity Shocks[J]. *Review of Economic Dynamics*, 15(2): 244–264.
- IPCC, 2023. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023[R]. Geneva: IPCC.
- Ji Q, Ma D, Zhai P, Fan Y, Zhang D, (2024). Global Climate Policy Uncertainty and Financial Markets[J]. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 95: 102047.
- Jung H, Engle R F, Berner R, (2021). CRISK: Measuring the Climate Risk Exposure of the Financial System[J]. Available at SSRN: 3931516.
- Jung H, Engle R F, Ge S, Zeng X, (2023). Physical Climate Risk Factors and an Application to Measuring Insurers’ Climate Risk Exposure[J]. Available at SSRN: 4510592.
- Kemp L, Xu C, Depledge J, Ebi K, Gibbins G, et al., (2022). Climate Endgame: Exploring Catastrophic Climate Change Scenarios[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(34): e2108146119.
- Krueger P, Sautner Z, Starks L, (2020). The Importance of Climate Risks for Institutional Investors[J]. *The Review of Financial Studies*, 33(3): 1067–1111.
- Lamperti F, Bosetti V, Roventini A, Tavoni M, (2019). The Public Costs of Climate-Induced Financial Instability[J]. *Nature Climate Change*, 9(11): 829–833.
- Lenton T M, Held H, Kriegler E, Hall J, Lucht W, et al., (2008). Tipping Elements in the Earth’s Climate System[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6): 1786–1793.
- Lenton T M, Rockström J, Gaffney O, Rahmstorf S, Richardson K, et al., (2019). Climate Tipping Points — Too Risky to Bet Against[J]. *Nature*, 575(7784): 592–595.
- Li H M, Wang X C, Zhao X F, Qi Y, (2021). Understanding Systemic Risk Induced by Climate Change[J]. *Advances in Climate Change Research*, 12(3): 384–394.

- Mandel A, Battiston S, Monasterolo I, (2025). Mapping Global Financial Risks Under Climate Change[J]. *Nature Climate Change*, 15(3): 329–334.
- Monasterolo I, (2020). Climate Change and the Financial System[J]. *Annual Review of Resource Economics*, 12: 299–320.
- Monasterolo I, Raberto M, (2018). The EIRIN Flow-of-Funds Behavioural Model of Green Fiscal Policies and Green Sovereign Bonds[J]. *Ecological Economics*, 144: 228–243.
- NGFS, (2019). A Call for Action: Climate Change as a Source of Financial Risk[R]. Paris: NGFS.
- NGFS, (2020). Guide to Climate Scenario Analysis for Central Banks and Supervisors[R]. Paris: NGFS.
- NGFS, (2021). NGFS Climate Scenarios for Central Banks and Supervisors[R]. Paris: NGFS.
- NGFS, (2022). Running the NGFS Scenarios in G-Cubed: A Tale of Two Modelling Frameworks[R]. Paris: NGFS.
- Nordhaus W D, (1992). An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases[J]. *Science*, 258(5086): 1315–1319.
- Rickman J, Kothari S, Larosa F, Ameli N, (2023). Investment Suitability and Path Dependency Perpetuate Inequity in International Mitigation Finance Toward Developing Countries[J]. *One Earth*, 6(10): 1304–1314.
- Roncoroni A, Battiston S, Escobar-Farfán L O L, Martinez-Jaramillo S, (2021). Climate Risk and Financial Stability in the Network of Banks and Investment Funds[J]. *Journal of Financial Stability*, 54: 100870.
- Safarzyńska K, van den Bergh J C J M, (2017). Financial Stability at Risk Due to Investing Rapidly in Renewable Energy[J]. *Energy Policy*, 108: 12–20.
- Stolbova V, Monasterolo I, Battiston S, (2018). A Financial Macro-Network Approach to Climate Policy Evaluation[J]. *Ecological Economics*, 149: 239–253.
- Stroebe J, Wurgler J, (2021). What Do You Think About Climate Finance?[J]. *Journal of Financial Economics*, 142(2): 487–498.
- Sun Y, Zhu S, Wang D, Duan J, Lu H, et al., (2024). Global Supply Chains Amplify Economic Costs of Future Extreme Heat Risk[J]. *Nature*, 627(8005): 797–804.
- UNEP FI, (2024a). A Comprehensive Review of Global Supervisory Climate Stress Tests[R]. UNEP FI.
- UNEP FI, (2024b). Navigating Data Challenges: A Guide to Data Collection for Climate Stress Testing[R]. UNEP FI.
- Xu H C, Li T M, Dai P F, Nguyen D, Zhou W, (2024). Stress Testing Climate Risk: A Network-Based Analysis of the Chinese Banking System[J]. *Journal of International Money and Finance*, 149: 103207.
- Yu Y, Mao J, Wullschleger S D, Chen A, Shi X, et al., (2022). Machine Learning-Based Observation-Constrained Projections Reveal Elevated Global Socioeconomic Risks from Wildfire[J]. *Nature Communications*, 13(1): 2022.
- Zhai P, Fan Y, Ji Q, Ma Y, (2024a). Climate Risks and Financial Markets: A Review of the Literature[J]. *Climate Change Economics (CCE)*, 15(4): 1–25.
- Zhai X, Ji Q, Wu F, (2024b). Measuring Climate Risks and Impacts[M]// Wu F, Zhang D, Ji Q. *Climate Finance*. Singapore: Springer Nature Singapore: 137–188.
- Zhao W, Zhai X, Ji Q, Liu Z, (2024). Measuring Crisis from Climate Risk Spillovers in European Electricity Markets[J]. *Energy Economics*, 134: 107586.