

主流机构气候变化分析评估工具的探索性应用

气变模型课题组^{*}

摘 要:世界银行、国际货币基金组织等主流机构为分析评估各国碳中和实现路径,开发了专门的气候变化分析评估工具。这类工具通常需要解决若干共性难题,包括模型的适用性、研究对象的多样性和差异性、反馈机制设计的合理性、技术进步和创新机制的准确刻画,以及支撑建模的数据收集、长期预测效果、模型本身和模拟结果的验证和评估等。本文系统总结了主流机构开发的气候变化分析评估工具,重点分析应用最为普遍的 CGE 模型、IAM 模型和 E - DSGE 模型,详细介绍其结构特点、应用场景和优缺点,并讨论其对中国相关问题的适用性。此外,本文还进一步介绍了全球宏观经济金融环境模型在复杂气候变化议题中的应用。

关键词:气候变化;可计算一般均衡模型(CGE);综合评估模型(IAM);环境 - 动态随机一般均衡模型(E - DSGE)

声明:中国人民银行工作论文发表人民银行系统工作人员的研究成果,以利于开展学术交流与研讨。论文内容仅代表作者个人学术观点,不代表人民银行。如需引用,请注明来源为《中国人民银行工作论文》。

Disclaimer: The Working Paper Series of the People's Bank of China (PBC) publishes research reports written by staff members of the PBC, in order to facilitate scholarly exchanges. The views of these reports are those of the authors and do not represent the PBC. For any quotations from these reports, please state that the source is PBC working paper series.

^{*} 于兴,北京航空航天大学经济管理学院。王信,中国人民银行研究局。张达,清华大学能源环境经济研究所。肖伯文,东北大学工商管理学院。唐黎阳(通讯作者),中国人民银行研究局。本文内容为作者个人观点,不代表人民银行,文责自负。

一、引言

随着全球工业化快速推进,温室气体排放快速增加,气候变化影响日益显著,对经济增长和社会福祉造成不利影响。在此背景下,科学有效的综合评估工具有助于制定合理的战略、政策或措施,平衡经济发展和气候变化之间的关系。近年来,国内外众多机构和研究团队开发了多种气候变化分析评估模型,将其应用于低碳转型模拟、气候政策分析评估等领域。

本文旨在回顾和梳理目前主流机构,包括主要国际组织如经济合作与发展组织(OECD)、国际货币基金组织(IMF)和世界银行(World Bank)以及国际著名研究团队等,所采用的气候变化分析评估工具。介绍其结构特征与政策应用场景,评估其在处理复杂气候议题时的优势与不足。同时,本文将简要介绍全球宏观经济金融环境模型(Global Macro – Financial – Environmental Model,简称GMFEM),并探讨其在复杂气候变化研究中的应用潜力,最后提出未来模型开发的方向。

总体而言,目前主流的气候变化分析评估模型可分为两类,一类是长期增长视角下的可计算一般均衡模型(Computable General Equilibrium Model,简称CGE)和综合评估模型(Integrated Assessment Model,简称IAM),另一类是短期波动视角下的环境—动态随机一般均衡模型(Environment – Dynamic Stochastic General Equilibrium Model,简称E – DSGE)。前者通常用于评估长期经济增长、能源转型与气候变化之间的相互关系,后者则更关注气候相关政策或事件对经济的中短期冲击和动态效应。两类模型的共同点在于,都刻画了经济系统、能源系统与气候系统之间的互动关系,并通过数值模拟为政策制定提供量化依据。

在这些模型中,CGE是国际组织应用最为广泛的工具,其建模方式多采用“自上而下”(top – down)思路,即从宏观总体出发,将经济系统分解为若干部门和主体,分析政策冲击对整体经济和各部门的传导效应;同时,部分模型也吸收“自下而上”(bottom – up)因素,即从具体技术、行业层面出发,将局部效应逐步汇总到宏观层面。CGE模型还可与其他类型模型(如宏观计量模型)结合,形成组合分析框架,支持跨领域和多政策情景分析。

IAM模型则更强调经济—能源—气候系统的动态刻画,同样分为“自上而下”和“自下而上”两种类型。“自上而下”的IAM模型侧重于评估宏观战略、政策、措施等对全球和区域经济、能源、环境和气候变化的整体影响,通常用于研究全球碳减排目标、碳定价政策等大规模政策干预的效果。“自下而上”的IAM模型侧重于

分析特定区域、产业、企业或个体对气候变化的贡献及其应对气候变化的行动。两者在具体应用中往往互补使用,以兼顾全球战略和区域实践的双重需求。

E-DSGE 模型是基于“自上而下”的 IAM 框架发展而来,该类模型的优势在于能够更细致地刻画气候变化涉及的多部门微观结构,加入不完全竞争、价格粘性、金融市场摩擦和劳动力市场摩擦等特征的刻画,适用于分析气候政策在相对真实市场环境下的短期动态影响(Annicchiarico et al., 2022)。

由于气候变化涉及多学科领域,各领域对气候变化议题有其独特的理解和刻画,各国气候变化相关政策通常也有差异,导致不同模型对气候变化涉及的参与主体有不同取舍,围绕气候变化的时间、空间也有不同考量,相关建模思路和模型细节也存在差异。本文第二部分简要介绍目前主流机构的气候变化分析评估工具,第三部分介绍这些工具的研究新进展与开发趋势,第四部分介绍全球宏观经济金融环境模型及其在复杂气候变化分析中的探索性应用,第五部分总结当前分析评估工具处理复杂气候变化议题面临的共性挑战,并对未来模型开发提出建议。

二、主流机构气候变化分析评估工具综述

本节将首先介绍国际组织(OECD、IMF、World Bank)开发使用的气候变化分析评估工具,并总结其特征共性以及局限性,最后对比介绍其他国际著名研究团队开发的气候变化分析评估工具。

(一) OECD 工具库

OECD 的主要气候变化分析评估工作依赖于 ENV-Linkages 模型。该模型是一个具有递归动态特点的全球化、多部门 CGE 模型。模型中的每个区域都对应一个投入产出表,这些表格量化了资源在不同经济主体之间的流动,包括所有行业的中间产品和生产要素投入、生产产出,以及家庭和政府的各种收入和支出等。在此基础上,该模型依据全球贸易分析项目团队(GTAP)开发的二氧化碳排放数据库,设定不同燃料的排放系数,将排放量与生产者和消费者的能源使用直接联系,构建了经济活动与环境变化(特别是温室气体排放)的关联网络,描述了经济活动如何在多个宏观经济部门和区域之间相互关联以及产生温室气体排放,可用来分析气候政策对不同经济变量的中长期影响。

在实际应用中,ENV-Linkages 模型通常和大型 IAM 模型相结合,以对气候政

策进行更全面的分析评估。例如,在 OECD 发布的《2050 年环境展望报告》中,ENV – Linkages 模型与大型 IAM 模型——IMAGE 模型 (Integrated Model to Assess the Global Environment) 相结合 (如图 1 所示),通过增加 ENV – Linkages 模型中未包含的人群健康、气候变化细节、水资源、生物多样性等关键模块,拓展其应用范围 (Chateau et al. , 2014)。该报告利用上述模型组合框架分析了碳税、碳排放限额、碳排放权交易、化石燃料补贴改革以及其他能效政策在减缓气候变化过程中所发挥的作用,分析维度不仅包括温室气体排放、温度、降水等气候相关变量,还包含生物多样性、人群健康以及劳动力就业等其他类型变量。此外,ENV – Linkages 模型还被广泛应用于 OECD 各种类型的专题分析报告,例如碳市场政策评估 (Dellink et al. , 2010; Lanzi et al. , 2013)、气候变化减缓政策评估 (Chateau et al. , 2011; Chateau et al. , 2018)、空气质量预测 (Lanzi et al. , 2022) 和能源补贴政策评估 (Durand – Lasserre et al. , 2015) 等。

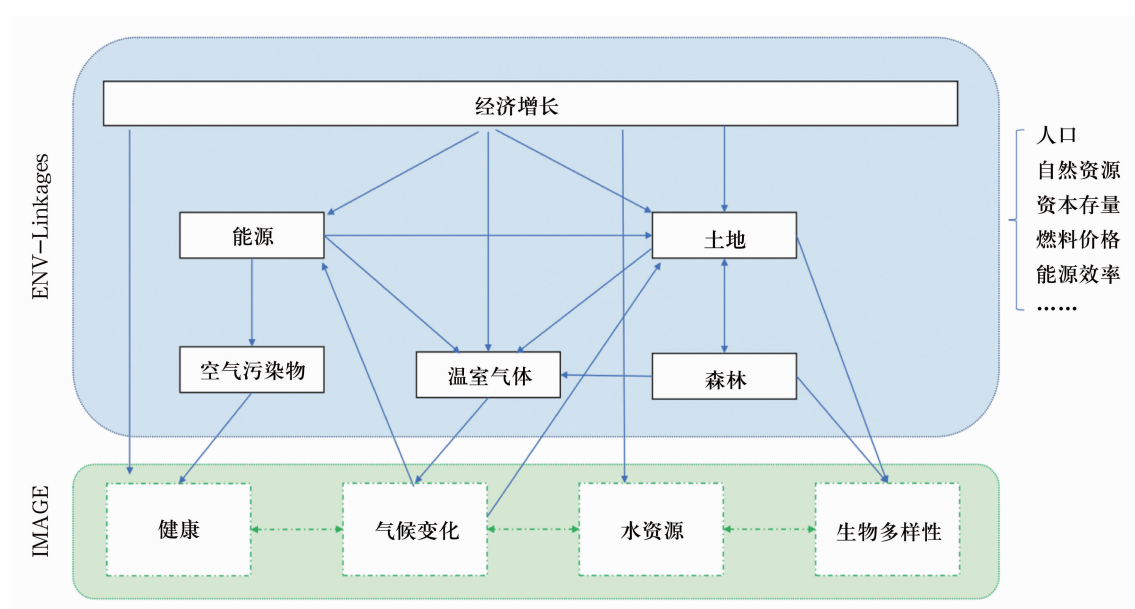


图 1 ENV – Linkages 模型和 IMAGE 模型的组合分析框架

图片来源:Chateau et al. (2014) 和作者总结。

值得注意的是,ENV – Linkages 模型将中国作为其中一个区域模块,并未进行重点讨论。未来该模型有潜力进一步改进,专门针对中国特征进行详细分析。

(二) IMF 工具库

IMF 开发的 IMF – ENV 模型(Chateau et al., 2022)在总体框架上与上述 ENV – Linkages 模型基本一致,均基于 CGE 框架构建,可用于分析评估气候政策对排放、宏观经济表现、部门经济活动和国际贸易的影响。IMF – ENV 模型将全球分为多个区域,更加全面地纳入了与温室气体排放相关的经济活动。例如,模型纳入了五种化石燃料的生产或分销过程(煤炭开采、原油、成品油、天然气开采和天然气分销)、八类发电部门(煤炭、石油、天然气、水力、风能、太阳能、核电和其他电力部门)以及五个能源密集型和贸易暴露型(Emissions – Intensive Trade – Exposed)行业(钢铁、非金属矿、化工、纸浆和造纸以及有色金属)。相较于其他气候政策分析评估模型,IMF – ENV 模型的一个重要贡献是区分了旧资本和新资本,并假设新资本在要素间的替代性高于旧资本,这使模型中的资本调整机制更符合实际。

IMF 的研究常将 IMF – ENV 模型与其气候政策评估工具(Climate Policy Assessment Tool,简称 CPAT)相结合,用于分析气候政策的分配效应。CPAT 是 IMF 和 World Bank 共同开发的气候政策评估工具,主要包含四个模块,分别是减缓模块(Mitigation module)、分配模块(Distribution module)、空气污染模块(Air pollution module)和交通模块(Transport module)。CPAT 不属于优化模型,而是一个政策模拟工具,允许用户通过简单的界面输入待评估的政策(例如碳价格、化石能源补贴政策等),预测未来能源消费结构变化、能源价格变化以及相应的温室气体排放变化、大气污染物排放变化等,并预测出由能源价格变化引起的居民消费结构变化和交通方式变化等(如图 2 所示)。IMF 使用 CPAT 模型,全面分析了碳税或煤炭税、碳排放交易体系、可再生能源激励措施等对碳排放、收入、空气污染导致的家庭和行业以及国家整体经济福利的影响(Parry et al., 2020)。该模型不仅适用于中国气候变化议题,还可用于对比分析 G20 国家和欧洲、美洲等区域的相关议题(Black et al., 2023)。

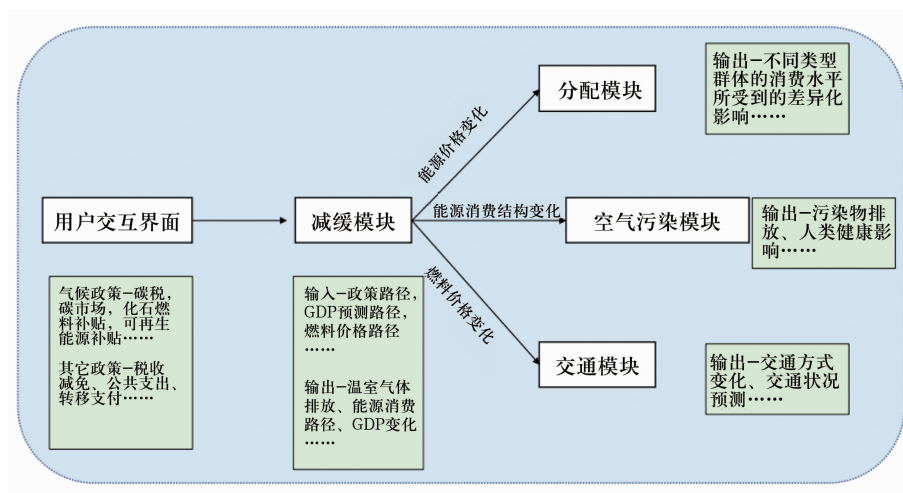


图2 CPAT 模型框架

图片来源:Black et al. (2023) 和作者总结。

(三) World Bank 工具箱

World Bank 在气候政策评估中采用了 CGE 模型和宏观计量模型相结合的“混合结构模型”(Hybrid Structural Models, 简称 HSM), 模型框架如图 3 所示。HSM 的应用主要分为三个步骤: 第一步, 根据气候目标粗略估计电力、运输、建筑、农业等部门的脱碳路径, 这需要考虑能源供需、生产资本、生产技术和投资的变化, 并评估各部门的成本和收益; 第二步, 将脱碳转型路径的初步预测结果作为宏观经济模型 MANAGE (Mitigation, Adaptation, and New Technologies Applied General Equilibrium Model) 的校准依据, 确保校准后的模型能预测相似的转型路径, 保证 MANAGE 模型输出的其他结果的可靠性; 第三步, 利用校准后的 MANAGE 模型, 在更多多样化的情景下探讨气候政策的影响, 并通过联合宏观财政模型 MFmod 来对金融和财政变量进行分析 (Hallegatte et al., 2023)。

在 World Bank 的 HSM 框架中, MANAGE 模型主要基于 CGE 框架建立, MFmod 模型主要基于宏观计量框架建立。其中, MANAGE 模型与 IMF - ENV 和 ENV - Linkages 模型类似, 都具有严谨的微观基础, 能分析气候政策在多样化情景下的影响。MFmod 模型在货币和财政分析上具有独特优势, 可用于分析低碳转型过程中的债务、储蓄以及企业资产负债结构等宏观经济或金融指标的变化。这类宏观计量模型在全球获得越来越广泛的应用, 其他著名模型包括 OECD 的 Interlink 模型

(Richardson, 1988) 和美联储的 FRB/US 模型 (Brayton et al., 2014)。

World Bank 运用 HSM 模型的一个代表性案例是对土耳其 2053 年净零排放目标实现的系统性分析。该研究全面刻画了净零转型对各部门未来发展路径的要求,具体涉及各部门投入产出,以及汇总到全国层面的公共债务和经常账户等经济金融指标 (Hallegatte et al., 2023)。尽管目前尚无针对中国问题的专门应用研究,但 HSM 模型具有较强的灵活性,未来可根据不同地区和研究主题进行调整和扩展。

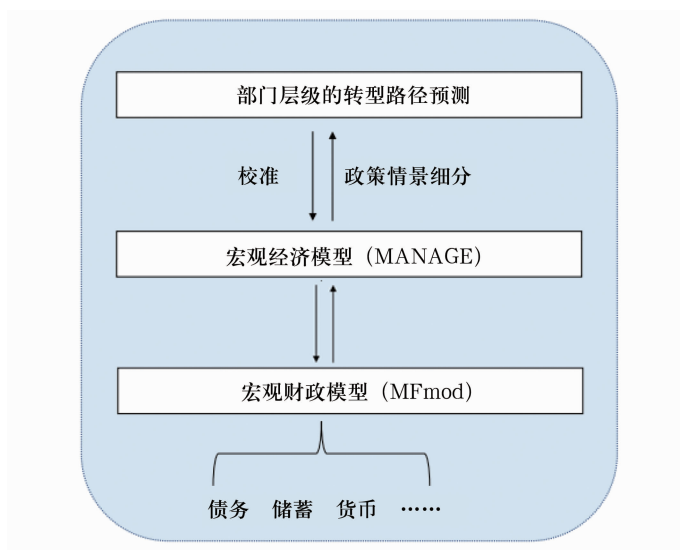


图3 HSM 组合模型框架

图片来源:Hallegatte et al. (2023) 和作者总结。

(四) 国际组织工具库小结

整体而言,CGE 模型 (ENV – Linkages、IMF – ENV 和 MANAGE 等) 是国际组织开展气候政策分析评估时最广泛采用的工具。其优势在于具备覆盖全球的分析能力,并具有严格的微观经济基础,能够系统分析气候变化和气候政策带来的直接和间接影响。但是,这类模型的缺陷也比较明显,主要表现在以下五方面:

一是目前大部分 CGE 模型的分析重点都是价格型气候政策 (包括碳排放权交易、碳税以及节能降碳相关补贴、税费等),这些政策可通过影响碳价格或能源价格,直接影响企业的边际减排成本,或对绿色低碳发展形成激励约束。相较之下,应用这类模型的研究较少讨论非价格型政策,包括各产业节能降碳目标和监管政策,绿色低碳发展相关财税和货币金融政策,信息披露和评估认证相关政策等 (王

信,2023)。

二是大多数 CGE 模型假设无摩擦的完美市场,忽略了真实市场环境中导致市场失灵的一些关键因素(例如金融市场摩擦、劳动力市场摩擦、不完全竞争和价格粘性等),影响了气候政策分析的现实意义。

三是 CGE 模型不易对内生技术变革进行刻画,使其难以捕捉气候政策通过促进技术变革产生的正向影响。

四是 CGE 模型通常不适用于包含经济周期的研究,也不适于评估气候政策对金融体系和货币价值的影响。

五是大部分 CGE 模型假设一切决策行为都发生在确定性环境,而气候政策分析往往需要预测未来数年的影响,其间面临诸多不确定性(例如气候灾害风险的不确定性、相关技术进步和创新的不确定性等),这些因素都可能对气候政策的选择和效果产生影响。如何将上述不确定性因素纳入模型框架,是大部分 CGE 模型面临的重大挑战。

针对上述问题,各国际组织在开展气候政策分析评估时,常采用多模型组合分析的方式,来弥补单一 CGE 模型的局限性,以更好地支持多类型政策的协同设计。

基于 CGE 框架的优势,目前国际组织的气候政策分析评估模型都可灵活划分地理区域和经济部门,相关研究越来越多地对中国的温室气体排放、能源结构变化以及经济增长趋势等转型过程中的关键变量进行分析预测。然而,上述模型更多从全球宏观视角出发研究气候转型问题,对中国经济、政策工具等细节的刻画相对简单,分析深度有限。未来上述主流机构模型可进一步针对中国特征来拓展和改进,提高其对中国绿色转型的分析和预测的适用性。

(五) 其他国际著名研究团队的气候变化分析评估工具

除了上述国际组织外,其他国际著名研究团队也开发了各种类型的气候变化分析评估工具,代表性模型如表 1 所示。

这些分析评估工具在一定程度上弥补了传统 CGE 模型的不足。例如,“自下而上”模型丰富了能源、环境和经济系统的内容刻画,支持进行更多样的技术变革、技术溢出等方面的分析。“自上而下”模型则丰富了长期性、动态性等宏观经济特征,多基于最优增长模型框架建立,支持基于社会福利最大化目标的长期最优政策路径设计,以及分析未来经济和气候不确定性因素对最优政策路径的影响等问题。尽管如此,这些模型仍存在以下局限性:

表 1 主要气候变化分析评估模型及参考文献

类型	模型	模型简介	参考文献
自下而上	MARKAL	市场配置模型	Loulou et al. (2004) Kawai et al. (2022)
	AIM	亚太地区综合评价模型	Kainuma et al. (2002) Fujimori et al. (2017)
	TIMES	MARKAL – EFOM 系统综合模型	Loulou et al. (2005) Tattini et al. (2018)
	LEAP	长期能源可替代规划系统模型	SEI (2021) 曹斌等 (2010)
	MESSAGE	替代能源供给系统和环境影响模型	Messner and Schrattenholzer (2000) Zhao et al. (2020)
	NEMS	美国国家能源建模系统	EIA (2009) Huang and Eckelman (2022)
	IPAC	中国能源政策综合评价模型	姜克隽等 (2021)
自上而下	DICE	包含经济、气候、外生人口增长和技术进步的最优增长模型	Nordhaus (1992)
	RICE	DICE 模型的多区域版本	Nordhaus and Yang (1996)
	PRICE	DICE 模型的不确定性版本	Nordhaus and Popp (1997)
	DSICE	DICE 模型基础上考虑经济增长不确定性和气候临界点,采用随机动态规划方法求解	Cai and Lontzek (2019)
	CETA	采用外生能源技术的模型	Peck and Teisberg (1992)
	MERGE – EITL	纳入多种能源技术,考虑内生技术进步和“干中学”内生演变机制的模型	Kypreos (2005)
	R&DICE	DICE 模型加入诱导创新	Grübler et al. (2002)
	ENTICE	基于 DICE 的内生技术进步模型	Popp (2004)
	ETC/FEEM – RICE	基于 RICE 的内生技术进步模型	Buonanno et al. (2003)
	GRAPE	纳入多种温室气体,详细划分亚洲区域的模型	Kurosawa (2006)

续表			
类型	模型	模型简介	参考文献
	C - DICE	DICE 模型纳入政策合作博弈	Nordhaus (2015)
	C - GEM	模型覆盖全球所有地区,细分能源密集型行业,结合中国详细经济数据做动态校准,考虑中国经济社会结构的新变化	Qi et al. (2014)
	C - REM	与 C - GEM 模型类似,但细分中国大陆 30 个省级行政区	Zhang et al. (2013)
	CE3METL	中国版本的 IAM 模型,最优增长模型与自下而上的能源系统模型相结合	Duan et al. (2014)
	REMIND	多区域模型,最优增长模型与自下而上的能源系统模型相结合,细分 50 种能源转换技术	Leimbach et al. (2010)
	WITCH	最优增长模型与自下而上的能源系统模型相结合	Bosetti et al. (2006a)

注:其中部分模型介绍详见附录。

一是“自下而上”模型需要大量数据作为支撑,这些数据不一定可得。建模所需的高质量数据通常包括能源需求、资源可用性、技术特性和市场条件等。在一些国家和地区,上述数据的可得性和质量可能达不到要求,限制了建模的可行性或模型的适用性。

二是“自下而上”模型相对复杂,模拟结果难以验证和评估。此类模型涵盖内容较为广泛,可给出较为全面的分析评估结果,但模型的求解过程容易成为“黑箱”,使用者难以判定模型是否存在错误设定,其模拟结果是否稳健可靠等。

三是“自上而下”模型效用函数的常规设定存在争议。这类模型基于预期效用理论,分析未来效用变化的影响。这一设定使模型中的福利函数无法捕捉未来气候变化可能造成的大量人员伤亡等影响,可能极大地低估当前推进气候行动的重要性和紧迫性(Stern et al. , 2022)。

在上述常见模型体系之外,近年来出现的一类新工具是纳入气候变化因素的宏观计量模型,其中比较有代表性的是剑桥大学研究团队开发的 E3ME 模型

(Cambridge Econometrics, 2022)。该模型与 MFmod 模型均基于计量经济学理论和计量方程建立,结构如图 4 所示。这类模型与 CGE 模型在基本结构、应用目的和内容覆盖范围方面有诸多相似之处,都考虑了全球经济、能源和环境系统间关系,对于区域和部门的分类也大致相似。这两种建模方法都基于国民经济核算框架,利用类似的国民账户数据。但与此同时,这两类模型的建模细节存在较大差异。CGE 是建立在微观经济关系基础上的优化模型,其分析结果依赖理性代理人在均衡条件下的行为选择。以 E3ME 为例的宏观计量模型是大量计量方程构成的模型,依赖历史数据揭示的计量关系,分析评估气候变化相关问题。这类宏观计量模型的优势在于,可通过对过去数据的简单计量分析来构建模型,不需要复杂的优化模型设计,建模思路更为直观,可分析的议题也更丰富。其局限性一方面是过于依赖高质量历史数据,当数据不准确或不可得时,将极大地限制模型的构建及其可靠性;另一方面是大多只关注宏观数据关系,忽略了微观层面的相互作用机制,许多学者对其宏观经济分析结果的可靠性持怀疑态度。

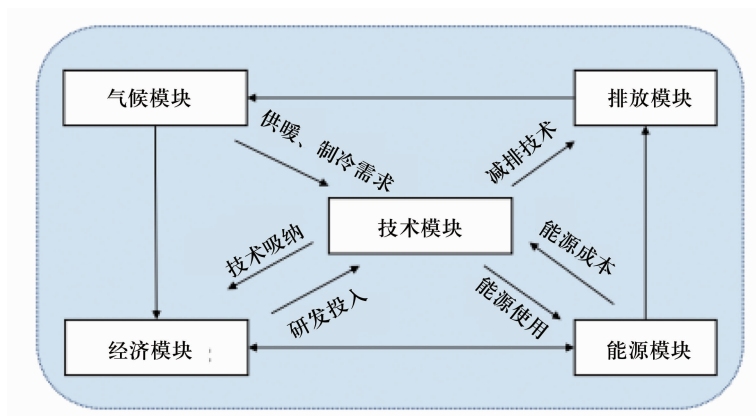


图 4 E3ME 模型框架

图片来源:Cambridge Econometrics (2022) 和作者总结。

三、气候变化分析评估工具的新进展与开发趋向

近年来,气候变化建模的相关研究主要从三个方面进行了拓展:包含不确定性的模型,进一步拓展的 IAM 模型,以及宏观政策评估 E-DSGE 模型。

一是模型包含更多不确定性。这类模型在传统模型中进一步纳入各种不确定性因素,例如气候经济系统中带有不确定性的参数、极端气候风险、经济波动风险等,弥补了过往大部分模型的缺陷。Nordhaus and Popp (1997) 基于随机动态规划

方法分析了参数的不确定性对 DICE 模型模拟结果的影响,估计了不确定性参数的信息价值。随后,越来越多的文献采用随机动态规划方法,围绕模型纳入更复杂的不确定性因素展开了讨论(Jensen and Traeger, 2014; Lemoine and Traeger, 2014, 2016; Traeger, 2014; Lontzek et al., 2015; Cai et al., 2016; Cai and Lontzek, 2019; Barnett et al., 2020; Lemoine, 2021)。这类模型的局限性在于通常只能将全球作为一个统一整体进行分析,在区域和国家层面的建模颗粒度较为粗糙。其原因一方面在于求解此类模型,需要建立已知状态变量和未知控制变量之间的多项式拟合关系,当国家或区域增多时,状态变量的数量也会增多,计算复杂度呈指数级增长,可能引发计算层面的“维度灾难”。另一方面,在得到上述拟合关系后,还需要进行大量数值模拟来得到未来可能的转型路径,这需要计算机拥有强大的并行计算能力,否则计算将耗费海量时间。目前,针对该类模型的另一种尝试是采用蒙特卡洛模拟法来讨论区域的不确定性问题(Nordhaus, 2011; Pycroft et al., 2011; Ackerman and Stanton, 2012; Kopp et al., 2012)。蒙特卡洛模拟法虽然可以避免传统多项式拟合方法面临的困难,但同时也受到一些学者的质疑,认为基于蒙特卡洛模拟法的不确定性分析其实是基于已知参数区间的一种敏感性分析,并没有体现出不确定性预期对决策者行为的影响,会导致模拟结果相对于现实的偏误(Crost and Traeger, 2013)。

二是基于 IAM 模型的进一步拓展。这类模型细化了 IAM 模型的经济-气候框架,进一步完善了对能源、环境和经济等系统的刻画,建立了更多部门内与部门间复杂非线性关系。例如, Golosov et al. (2014) 构建的拓展的 IAM 模型分析了最优减排路径和能源消费结构的变化。Bonnen et al. (2016) 构建了包含适应性政策的 IAM 模型,允许主体通过能源消费结构的转变来适应气候变化。作者基于国家层面数据进行模型校准,随后应用模型分析了公共支出在适应性气候投资和其他公共投资之间的最优分配问题,得出适应性气候投资应占全部公共投资 5% ~ 20% 的结论。其他拓展的 IAM 模型针对资产搁浅风险评估、内生技术进步、适应性政策与碳税政策组合设计等重要问题进行了研究(Acemoglu et al., 2016; van der Ploeg and Rezai, 2017; Atolia et al., 2018; Rozenberg et al., 2020; Semmler et al., 2020; 潘冬阳等, 2021; Bretschger and Soretz, 2022)。这类模型还有很大的拓展潜力,可用以分析评估更多中国气候变化问题。拓展方向包括更准确刻画中国的经济-环境系统结构和气候政策特征,以及实时更新中国能源气候相关技术进展等,这都可以进一步提高模型应用于分析气候变化影响和评估气候相关政策的实时性和可靠性。

三是建立基于动态随机一般均衡(DSGE)框架的宏观政策评估 E-DSGE 模型。该类模型常被用于分析气候政策、货币财政政策以及其他类型政策的组合设计和短期影响等问题。Fischer and Springborn (2011)、Heutel (2012) 和 Angelopoulos et al. (2013) 以 DICE 模型和最优增长理论为基础,通过简化原 DICE 模型中的气候模块设定,更多刻画经济系统中家庭和企业部门之间的资源流动,构建了最初的 E-DSGE 模型理论框架。图 5 以 Xiao et al. (2022a) 开发和应用的世代交叠的“经济-环境-气候”模型(Overlapping-Generational “Economy-Environment-Climate” Model,简称 OE²CM)为例,展示了 E-DSGE 模型目前所能扩展至的综合复杂结构。该类模型与前文中长期增长视角下的 CGE 模型和 IAM 模型相比,较少考虑气候政策实施对经济长期增长趋势的影响,更多关注气候政策实施的短期经济影响,以及短期经济冲击对气候政策效果的干扰等问题。该类模型的进一步开发,通常围绕从封闭经济走向开放经济,从单部门走向多部门,从简单市场走向更符合现实的市场等方面展开(如表 2 所示)。

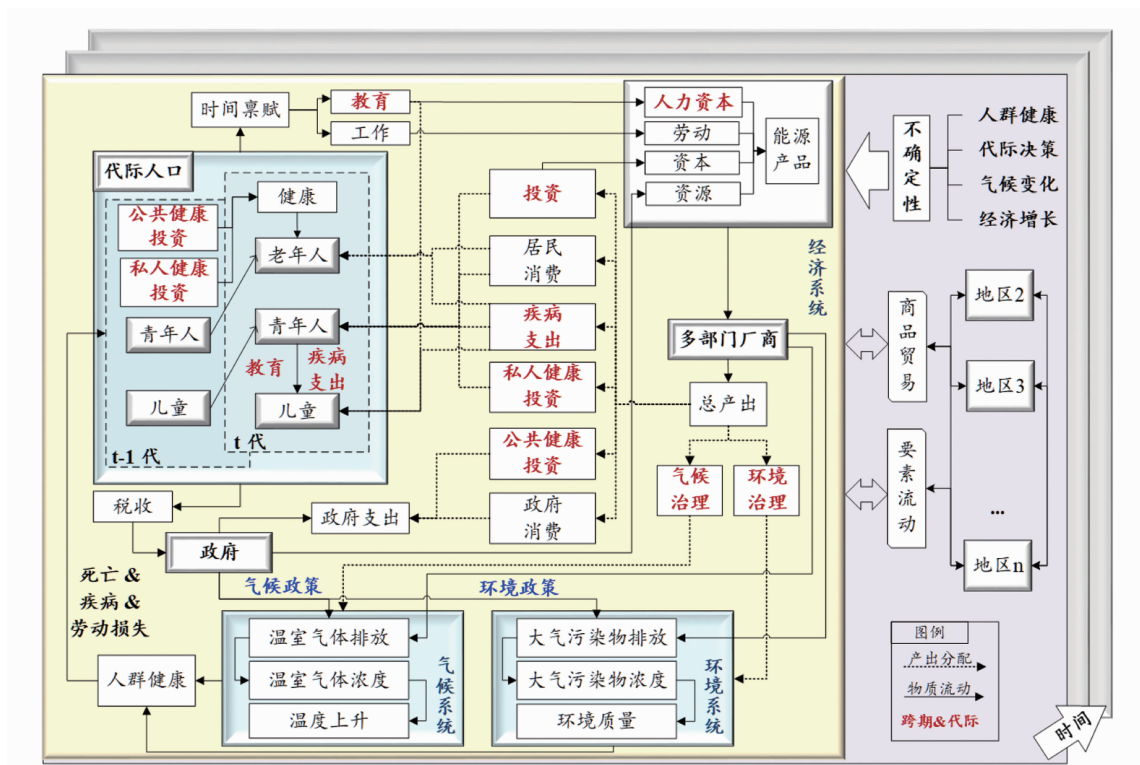


图 5 世代交叠的“经济-环境-气候”模型(OE²CM)作为代表性 E-DSGE 模型的框架示意图

图片来源:作者绘制。

在从封闭经济走向开放经济方面,Ganelli and Tervala (2011) 建立了一个两国开放经济 E – DSGE 模型,考虑了现实经济中的不完全竞争、价格粘性等因素,研究了单方面实施气候政策的跨国溢出效应。Hassler and Krusell (2012) 建立了一个多区域开放经济 E – DSGE 模型,该模型整体以 RICE 模型为基础,假设仅有化石燃料可以跨区交易,细化了每个区域的决策过程。该模型能够在多区域框架下,考虑分散均衡经济问题,更细致地分析气候政策以及气候变化随机冲击因素的影响。开放经济 E – DSGE 模型的重要文献还包括 Holladay et al. (2019)、Xepapadeas and Economides (2019) 和 Xiao et al. (2022b) 等。

在从单部门走向多部门方面,Dissou and Kainizova (2016) 开发的多部门 E – DSGE 模型包含了异质性生产部门,考虑了能源(煤炭、石油、天然气和电力)之间的不完全替代关系,被用于分析气候政策带来的能源消费结构变化,以及其对特定部门生产率(有别于不区分部门的总生产率)的影响。研究表明,与碳税政策相比,碳排放总量限制政策仅在特定部门的能源生产率受冲击背景下,有较为明显的缓解宏观经济波动的作用,同时由于抑制了生产率增加带来的消费增长效应,其整体福利增加效应低于碳税政策。自该研究起,多部门和部门异质性被更广泛纳入 E – DSGE建模,重要文献还包括 Xiao et al. (2018)、Diluiso et al. (2021) 等。

表 2 E – DSGE 模型代表性文献

主题	类型	政策	结构特点	参考文献
碳相关 政策选 择	周期波动	碳强度、碳总量、碳税	单部门	Fischer and Springborn (2011)
	周期波动	碳税	单部门	Heutel (2012)
	周期波动	碳税	单部门	Angelopoulos et al. (2013)
	政策冲击	碳总量	开放经济	Ganelli and Tervala (2011)
	周期波动	碳总量、碳税	多部门	Dissou and Kainizova (2016)
组合政 策选择	政策调整	碳税、就业补贴、 其他税收	劳动力市场进一 步刻画	Gibson and Heutel (2023)
	政策冲击	宏观审慎政策、 碳税	金融市场进一 步刻画	Carattini et al. (2023)
	周期波动	货币政策、碳总量、 碳税、碳强度	价格粘性和不完全 竞争进一步刻画	Annicchiarico and Di Dio (2015)

注:碳强度指基于单位产出排放强度控制的碳政策,碳总量指基于总排放绝对限额控制的碳政策。

在从简单市场走向更符合现实的市场方面,学者们在 E - DSGE 模型中引入更符合现实的市场刻画,并讨论了气候政策、绿色信贷政策、货币政策、宏观审慎政策、就业政策等的组合设计问题。例如,围绕更符合现实的金融市场刻画,金融加速器机制 (Bernanke and Gertler, 1989)、抵押品约束机制 (Kiyotaki and Moore, 1997; Jermann and Quadrini, 2012) 以及银行家道德风险机制 (Gertler and Karadi, 2011) 等金融市场重要机制,被陆续引入 E - DSGE 模型。相关重要研究包括 Benmir and Roman (2020)、王博和徐飘洋(2021)、Diluiso et al. (2021)、Ferrari and Nispi Landi (2021)、陈国进等(2023)、Carattini et al. (2023) 和 Comerford and Spiganti (2023) 等。围绕更符合现实的劳动力市场刻画,Gibson and Heutel (2023) 在其 E - DSGE 模型中,纳入劳动力市场的搜索摩擦因素,该模型可用于分析和评估碳税和就业相关税收与补贴政策的组合方案。Shapiro and Metcalf (2023) 的模型通过对劳动力市场摩擦、企业创建和企业对绿色技术采纳的刻画,发现过往研究得出的气候政策会带来失业率上升的结论不一定成立。

从技术层面来看,近些年快速发展的 E - DSGE 模型具有以下三方面优点:(1) 经济主体进行跨期最优决策,模型结果具有跨期一致性;(2) 模型具有严谨的微观基础,能够较好地回应卢卡斯批判,用于政策分析评估更具有现实意义;(3) 模型可引入更丰富的气候变化、能源、环境、经济、金融和政策冲击,分析不同类型冲击的动态影响。此外,针对单个或少量国家的 E - DSGE 建模框架较为成熟,结构清晰,更适合分析单个国家的短期气候转型问题。例如,Xiao et al. (2018)、王博和徐飘洋(2021) 以及陈国进等(2023) 的研究均以 E - DSGE 模型为分析框架,对中国的碳定价、绿色金融和宏观审慎等政策进行了深入探讨,并全面评估了相关政策的综合效应。

E - DSGE 模型的缺点主要体现在其需要通过线性化近似的形式来处理模型的数值求解问题,该计算方法能保证短期分析的计算准确性,但进行长期分析时可能产生较大的计算误差,因此该类模型对长期气候政策的分析评估能力不足。另外,E - DSGE 模型在部门、行业等层面的区分上相对简化,不易像大型 CGE 模型和 IAM 模型那样纳入和刻画详细的能源技术特征和部门行业结构,这也限制了此类模型的分析范围和应用场景。关于 E - DSGE 的进一步介绍详见附录。

四、全球宏观经济金融环境模型及其在碳中和路径上的探索性应用

本节主要介绍全球宏观经济金融环境模型 (GMFEM 模型),重点阐述其建模思

路和细节创新,以及其用于分析复杂气候变化议题的探索性应用。

(一) 全球宏观经济金融环境模型介绍

GMFEM 模型是针对普遍关注的宏观经济、金融、产业、环境和政策研究话题而特别开发的大规模 E-DSGE 模型。总体而言,GMFEM 模型是一个包含 48 个经济体、11 个部门、45 个行业的 E-DSGE 模型,可针对各经济体、各部门和各行业的经济、金融、环境和政策等问题,进行分析、估计、评估和预测。

整体而言,GMFEM 模型的优势主要体现在以下三个方面:

一是包括多经济体、多部门、多行业,充分考虑经济体、部门和行业之间的相互作用,体现经济体间的差异,可用于研究气候变化相关诸多复杂问题。

二是充分体现了不同国家气候变化相关政策措施的差异,可更好地分析评估不确定性。模型中还预留空间,以便纳入丰富的政策响应方程,更有效地分析复杂多样的气候变化相关政策情景。

三是 GMFEM 模型包含独特的建模设计和细节创新,例如技术扩散机制,气候变化相关政策措施对宏观经济金融变量影响效果的可分解性和可叠加性,以及纳入大量与细分项统计数据可比较的参数等。这些创新设计,支持 GMFEM 模型分析技术进步和创新因素,将中长期碳中和路径预测等高难度议题,有效拆解为简单子问题,以及便于对模型本身可靠性和模拟结果稳健性的验证评估。

如图 6 所示,GMFEM 模型目前纳入了 48 个主要经济体,且可纳入更多经济体。各经济体内部包含 11 个部门和 45 个产业。模型还构建了一个包括全球贸易、国际直接投资以及国际银行间市场、货币市场、债券市场和股票市场在内的全球贸易金融结构。模型充分刻画了跨国跨行业实体经济的投入产出关系,以及金融投资资金的流入流出关系。

GMFEM 模型在每个经济体内部,都构建了家庭部门(包含三类家庭),劳动力供应部门,建筑和房地产部门,生产部门(其下进一步包含 45 个行业),银行部门,外汇部门,出口部门,进口部门,国际收支部门,国民经济核算闭环部门(以实现支出法 GDP 核算的闭环),包括货币、财政和宏观审慎当局在内的政府部门,国内银行间市场、货币市场、债券市场和股票市场,以及进行碳排放和减排、气候风险(转型风险和物理风险)等相关计算的气候变化模块。

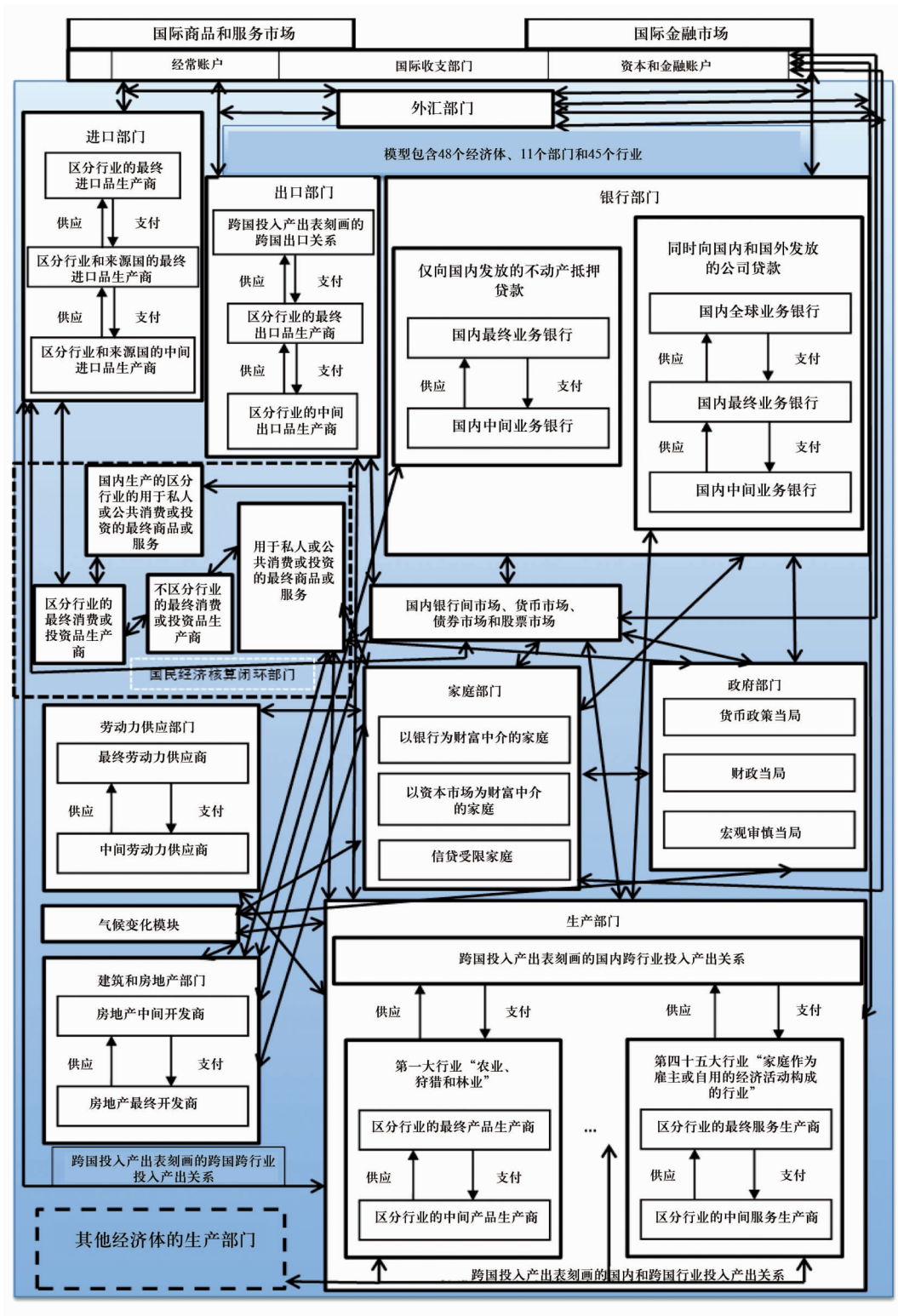


图6 大规模 GMFEM 模型中一个代表性经济体的内部具体结构

图片来源:作者基于 Tang (2022) 进一步绘制。

上述各部门间的相互作用机制包括:一是每个经济体中,除政府部门外的所有部门,均以季度为频率,以理性预期为指导,确定其所有均衡数量和价格。二是货币、财政和宏观审慎当局,每季度做出基于规则的最优政策响应,且这些政策规则充分考虑了不同经济体政策的差异。以中央银行为例,大部分经济体的央行会遵循形式有差异且参数取值也不同的泰勒规则来确定政策利率。三是所有经济体的公共和私人部门,与其他国内部门、其他经济体相关部门存在互动和关联。例如,家庭部门和生产部门通过劳动力供应部门作为中介的充分互动,得到劳动力最优价格,实现劳动力供需平衡的同时,体现失业的动态变化。国内外银行部门通过与家庭部门、银行间市场以及生产部门的互动,得到存贷款最优利率,实现银行资产负债表平衡。值得注意的是,GMFEM 模型考虑了不确定的宏观经济金融环境。

GMFEM 模型纳入了许多体现特定经济体结构和微观基础特征的参数,以充分考虑经济体之间的差异。GMFEM 模型中的参数可分为三类:经济体层面的参数,行业层面的参数,以及非特定于经济体或行业的其他参数(如折现因子、消费习惯持久性和弹性等)。经济体层面政策参数的取值,通常根据国际组织的相关报告、统计或专门开发的工具进行校准或估计,典型例子包括 AMRO 开发的泰勒规则工具,以及 IMF 关于汇率安排的报告(AMRO, 2019; IMF, 2023)。经济体层面的其他经济金融环境类参数,大多是基于通过 CEIC 和 Haver Analytics 等平台获取的国家统计数据,进行校准或估计的。行业层面参数的校准或估计,大多基于 OECD 发布的国家间投入产出表(OECD ICIO Tables),详细介绍见 OECD (2023)。非特定于经济体或行业的其他参数的取值,主要来自 DSGE 模型设计和参数估计的相关文献,例如 Vitek (2018) 和 Tang (2022) 等。更多的参数定义、校准和估计的细节,可参考 Tang (2022)。

GMFEM 模型在广泛和准确模拟各国碳中和实现路径等复杂气候变化议题方面,相比现有主流气候变化分析评估工具有以下进步。

一是 GMFEM 模型适合评估跨经济体、跨部门和跨行业的气候变化溢出效应。支持评估的模型结构包括能源和非能源商品以及服务的全球供应链结构,全球供应链上下游传导机制等。

二是 GMFEM 模型可深入分析 45 个行业,模拟细分行业下气候变化相关的宏观经济金融变量的动态演进路径。

三是 GMFEM 模型具有丰富的扩展潜力,也可与其他气候变化模型协同应用,解决更多交叉领域和更复杂的气候变化议题。该扩展和协同应用潜力来自模型中的气候变化模块以及各部门和各行业预留的丰富位置或接口,支持进一步扩展模

型内容,或与其他模型的输入输出对接。

GMFEM 模型在初始建模阶段,就系统性考虑中国宏观经济、产业、金融、环境系统及其政策体系,因此可用于模拟中国各系统之间的互动,以及能源气候政策等对经济增长、产业转型、金融稳定等的影响。预计未来经过进一步扩展和改进,该模型可被广泛用于支持中国经济全面绿色转型和高质量发展的复杂决策,以及气候变化相关问题的国际比较分析。

(二) 在碳中和实现路径等议题的探索性应用

应用 GMFEM 模型于各经济体碳中和实现路径议题,还涉及的相关准备工作包括:

一是根据央行与监管机构绿色金融网络(Central Banks and Supervisors Network for Greening the Financial System,简称 NGFS)的统计指标和数据,为各经济体分别引入转型风险(Transition risk)和物理风险(Physical risk)冲击。这些指标和数据主要包括:各主要发达和新兴经济体截至 2022 年末,在气候变化转型风险方面所采取的政策措施(包括取消能源补贴,加征或提高环境税或碳税),以及气候变化物理风险影响各经济体经济活动的程度。

二是纳入 Statista 提供的截至 2022 年底碳减排、捕捉和封存的世界平均价格,以模拟将取消能源补贴和加征碳税等减少的政府支出和增加的政府收入,全部用于碳减排、捕捉和封存,对该经济体推动实现碳中和目标的影响。

从模型模拟的主要发达和新兴经济体未来实现碳中和目标的预期进展路径偏离结果,我们发现:

一是欧元区和新加坡等经济体,完成碳中和目标的进度最快,前提是政府将取消能源补贴和加征碳税等减少的政府支出和增加的政府收入全部用于该国碳减排、捕捉和封存。

二是中日韩三国在推动实现碳中和目标上都取得了显著进展。其中韩国的进展主要来自气候变化转型风险方面的政策措施。

三是东盟五国(印度尼西亚、马来西亚、菲律宾、新加坡和泰国)中,新加坡如果将取消能源补贴和加征碳税等减少的政府支出和增加的政府收入全部用于碳减排、捕捉和封存,几乎已经接近完成碳中和目标。其余四国中,印度尼西亚和泰国的进展更快。

四是其他五个东盟国家(文莱、柬埔寨、老挝、缅甸和越南)中除了文莱,其余四

国推进碳中和的速度都有待加快。文莱作为典型的资源型国家,其推进碳中和的进度在所有东盟国家中名列前茅。

GMFEM 模型在框架建立时,已充分考虑未来模型扩展,留出足够空间以便详细描述中国宏观经济、产业、金融、环境系统及其政策体系的细节,因此具有巨大潜力用于分析复杂交叉议题,例如,气候环境、产业能源、货币财政等政策的协同设计。

五、分析评估工具处理复杂气候变化议题的挑战和未来开发建议

总体而言,当前主流机构开发和应用的 CGE 模型、IAM 模型、E-DSGE 模型和宏观计量模型等,在分析、模拟、预测或评估各国碳中和实现路径等复杂气候变化议题时,几乎都面临以下八个方面的共性难题。

一是模型能否充分刻画复杂系统。碳中和实现路径涉及能源、工业、交通、农业等多个部门,需考虑各部门碳排放特征、适用减排技术和减排成本等诸多细节。构建一个能系统全面反映这些细节的模型,通常十分困难。

二是建模如何充分考虑研究对象的多样性和差异性。各国在能源结构、经济社会发展水平和人口结构上存在显著差异,不同部门的能源消费、碳排放规模、适用减排技术和减排成本等也各不相同,因此碳中和实现路径具有明显的国别特征差异。构建一个既考虑全球共同减排愿景,又兼顾各经济体和各部门差异化减排路径的模型,难度非同一般。

三是模型内反馈机制如何合理设计。碳排放、气候变化与经济发展之间存在复杂的反馈机制,对于这些反馈机制的建模不仅依赖于对气候物理过程与经济运行规律的深入理解,还依赖于高质量数据与合理的参数设定。但相关反馈机制的作用路径大多高度非线性,且往往伴随较强的不确定性,通常难以准确刻画。

四是如何合理纳入技术进步和创新机制。碳中和涉及众多新技术的研发和推广,如清洁能源和可再生能源技术,碳减排、捕捉和封存技术等。模型需要考虑上述技术进步对未来碳减排的影响,但新技术从开发到推广各环节都存在较大不确定性。

五是现实数据可能不足以支撑建模细节。在许多关键领域,碳排放数据仍存在缺失或精度不足,部分减排技术的参数也难以获得或准确估计,从而对模型构建形成制约。此外,由于缺乏具有说服力的现实数据,模型中对于贴现率的设定长期存在争议(Stern, 2006),不同的贴现率取值会导致模型模拟结果出现显著差异,削弱了模型结论的稳定性与可比性。

六是政策和参数不确定性。一些气候政策需进行相机抉择,其效果也具有不可预测性和不确定性,现有的模型框架难以捕捉政策的动态调整和潜在偏移。另外,争议性气候变化问题需进行不同政策情景的比较模拟,以评估不同政策组合对碳中和目标的贡献差异。这要求模型能够引入多样化、可灵活调整的政策路径,进一步增加建模复杂性。此外,模型中各种动态参数的真实概率(分布)也难以确定,进一步放大了结果的不确定性。

七是应用模型做长期预测的准确性不足。应用模型对未来碳排放和减排路径进行长期预测时,其准确性往往受到诸多不确定因素的干扰。例如,未来技术发展路径可能出现重大突破或停滞,政策路径可能因国际谈判、国内政治或经济压力而发生调整,经济与社会发展水平也可能与既有假设出现偏离。这些不确定性因素的影响会在长期预测中被不断放大,使模型结果的稳健性和可信性受到影响。

八是模型本身和模拟结果难以验证和评估。能否有效验证和评估气候变化模型及其模拟结果,对模型纠错和优化至关重要。但目前尚缺乏跨模型或跨分析评估工具的有效交叉验证方法和公认评估指标体系来解决上述问题。

目前大部分主流机构气候变化分析评估工具在建模中,越来越多将中国划为单独的区域模块,对其能源结构变化、温室气体排放、经济社会转型等进行(专门)分析、预测或评估。但由于大部分模型对中国的经济特征刻画相对简单,导致分析的广度和深度有限。展望未来,若要提升这些模型在中国气候政策研究中的适用性,需要在以下方面做进一步改进:

一是发挥 CGE 模型、IAM 模型处理气候变化议题的优势,包括:从多经济体、多部门和多行业等角度提升建模质量,如纳入更丰富的经济特征,并对不同主体的特征进行更充分刻画。

二是发挥 E-DSGE 模型的优势,更细致地刻画经济体、部门、行业和主体间的丰富互动机制,以提升模型对于复杂政策效应的分析能力。开发者可充分借鉴已开发的大量同类模型,为新开发模型合理设计经济、金融、能源、环境和气候等模块相互间反馈机制,以及设定各种动态参数取值,从而提升建模的科学性与可行性。

三是继续完善 GMFEM 模型:(1)在气候变化情景模拟中,加入对技术进步和创新的进一步考量;(2)更充分体现不同国家气候变化相关政策措施的差异,未来政策实施效果的不确定性;(3)保持气候变化相关政策措施对宏观经济金融影响效果的可分解性和可叠加性,使中长期碳中和路径等复杂议题可被分解为一系列子问题,便于简单分析;(4)确保模型中大部分参数与细分项统计数据可比,方便直接采用现实统计数据对模型可靠性和模拟结果的稳健性进行直观比较验证和评估。

附 录

1. IAM 模型补充介绍

DICE 模型(Nordhaus, 1992)是基于新古典经济增长理论建立的气候变化模型。该模型以整体社会福利最大化为目标,以技术进步、人口增长等作为模型中经济增长的外生驱动因素,选择消费、投资和排放等作为关键内生变量,通过“自上而下”的动态机制,将经济活动与气候变化联系起来,简洁地刻画了经济与气候系统之间的动态交互关联特征。模型的求解以最优动态决策理论为基础。模型适用于分析最优低碳转型路径、减碳的经济社会成本等一系列宏观层面的气候经济问题。DICE 模型奠定了气候政策分析评估模型的基石,以此为基础发展而来的各种模型在气候变化各研究领域(尤其是气候变化过程中的成本收益分析)得到越来越广泛的应用。

RICE 模型是 DICE 模型的多区域版本(Nordhaus and Yang, 1996)。其中每个区域被赋予不同的初始资本存量、人口和技术进步特征,并具有独立的排放函数,各区域被赋予不同的效用权重,在此基础上最大化整体社会福利。相比 DICE 模型,RICE 用于政策分析的空间颗粒度更细,适用于讨论区域层面的政策效果与合作博弈问题。

C - DICE 模型(Nordhaus, 2015)代表了在 DICE 模型中引入气候政策博弈的另一种拓展思路。该模型在 DICE 的基础上,通过刻画国际上不同经济体的气候政策博弈与“搭便车”行为,讨论国际间气候政策合作议题。例如,该模型帮助研究者发现减排目标的实现,不仅需要碳定价相关政策,还需要加入适当的贸易惩罚措施,以确保部分成员国不会采用“搭便车”行为。另外,Cai et al. (2023)利用该类模型,发现区域间合作博弈会影响减碳的社会成本,指出应用 IAM 模型进行减碳的成本收益分析时,有必要谨慎考虑不同经济主体间的博弈。

出于对不同气候变化模型给出的结果差异较大的担忧,Manne et al. (1995)开发了多区域 MERGE 模型。初始版本模型包括多经济主体模块、气候模块和损害评估模块三大部分,其主要创新是对气候变化相关技术进行了细分,例如模型包含了 18 种能源技术(9 种电力技术和 9 种非电力技术)。该模型适用于比较和评估不同气候政策组合的效果。此后,IAM 模型越来越重视刻画技术进步因素,因为技术

进步可以改变能源使用效率、影响温室气体排放并最终影响气候政策的成本收益,这些都会对特定 IAM 模型的结果产生重要影响。采用与 MERGE 类似的外生能源技术假设的著名模型还包括 CETA 模型 (Peck and Teisberg, 1992)。后续研究还将初始版本的外生技术进步 MERGE 模型改进为内生技术进步 MERGE 模型 (MERGE - ETL),改进模型认为技术进步受到研发支出的影响,而能源成本受到能源技术进步的影响,技术进步过程存在“干中学”(Learning - by - doing)等内生演变特点 (Manne and Richels, 2004; Kypreos, 2005)。

类似 MERGE - ETL 考虑内生技术进步的 IAM 模型还包括 R&DICE (Grübler et al., 2002)、ENTICE (Popp, 2004)、ETC/FEEM - RICE (Buonanno et al., 2003; Carraro and Galeotti, 2004; Bosetti et al., 2006b)、WITCH (Bosetti et al., 2006a)、REMIND (Leimbach et al., 2010) 和 CE3METL (Duan et al., 2014) 等。这些模型的共同特点在于,均以 DICE 或者 RICE 模型作为基础框架,通过纳入不同的内生技术变化特征,发现在考虑技术进步之后,气候政策的福利效应会产生明显变化。其中,CE3METL 模型是专门用于评估中国相关气候政策影响的 IAM 模型。该模型采用了“自上而下”的宏观经济建模框架,结合“自下而上”的能源系统模块,该模块拥有详尽的能源技术部门和技术演变特征,纳入了 7 种内生的无碳排放发电技术和 3 种外生的有碳排放发电技术,并考虑了技术进步的“干中学”内生演变特点。该模型适用于研究中国的最优碳税、国家自主贡献以及气候变化最优适应性政策等一系列关键议题。上述模型中,WITCH 模型和 REMIND 模型都是著名的多区域 IAM 模型。其中 WITCH 模型的优势是在研发投资和知识溢出等方面的建模更加精细。REMIND 模型的优势是能源领域技术分辨率更高,区分了各种化石能源、生物能源、核能和可再生能源,纳入了超过 50 种能源转化技术。

GRAPE 模型 (Kurosawa, 2006) 融合了宏观经济模型、能源系统模型和气候模型,并对亚洲区域进行了更细致的划分。该模型将能源系统模型的成本结果作为宏观经济模型的输入,宏观经济模型通过动态优化决策产生相应的能源需求,并将需求反馈给能源系统模型;能源系统模型中的能源使用将对气候模块产生影响,气候变化结果最终输入宏观经济模型,构成一个均衡动态闭环。由于该模型纳入了多种温室气体,可用于讨论不同温室气体的减排策略。

由清华大学能源环境经济研究所开发的 C - REM 和 C - GEM 模型,更加详细地刻画了中国的经济和能源部门,基于中国实际数据进行了模型动态校准,是分析中国气候政策及国际气候政策合作的代表性工具。其中,C - REM 模型的优势是能够有效分析省级气候政策 (Zhang et al., 2013)。C - GEM 的优势在于,对中国经

济社会结构的新变化进行了更详细刻画,并更详尽地划分了国际区域和国内外各行业(Qi et al., 2014)。C-GEM常与简化气候模式 Hector 模型进行连接,以形成更全面的综合评估框架,其中 C-GEM 将不同时期、地区的温室气体排放量传递给 Hector 模型,Hector 模型模拟得到温度、降水、海平面等关键气候相关变量,再将其传递给气候变化影响评估模块,用以估计气候变化对不同地区、行业的冲击,再反馈给 C-GEM,从而形成模型间双向动态耦合机制。通过若干次迭代,C-GEM 模型和 Hector 模型的输入输出最终收敛稳定(Wang et al., 2020)。类似的框架也被用于耦合复杂地球系统模型,实现气候损失的格点化模拟(Teng et al., 2021)。

2. E-DSGE 模型补充介绍

在开放经济 E-DSGE 模型方面,Holladay et al. (2019) 建立了一个贸易自由但资本流动不自由的小型开放经济 E-DSGE 模型,研究了碳相关税收、总量限制和强度限制政策的不同效果。模型结果表明,总量限制政策可以更好地缓解经济波动带来的贸易不平衡问题,当进口价格下跌时,通过控制碳排放总量,可以限制进口需求的扩大,以应对外国商品价格冲击。Annicchiarico and Diluiso (2019) 采用两经济体 E-DSGE 模型,分析了经济周期下生产率冲击、利率冲击和资本质量冲击的国际传导如何受到气候政策的影响。研究结果表明,生产率冲击、利率冲击和资本质量冲击从一个经济体向另一个经济体的传导,会受到不同国家气候环境制度的影响,碳税政策会显著放大冲击的溢出效应,而碳配额总量限制政策可以有效缓解冲击的溢出效应。Xepapadeas and Economides (2019) 利用开放经济 E-DSGE 模型,研究了汇率制度如何影响气候变化造成的经济社会损害。此外,Xiao et al. (2022b) 采用结合了国际贸易、不对称经济和异质性生产部门的 E-DSGE 模型,研究了中国与欧盟碳市场的互联设计对于宏观经济波动的影响。

在多部门 E-DSGE 模型方面,Rezai and van der Ploeg (2017) 对 Golosov et al. (2014) 开发的 DSGE 模型进行了扩展,更详细刻画了能源部门,并在建模中考虑了全球变暖对效用和生产率增长的额外负面影响,以及气候损害、劳动力增强型技术进步和人口增长。模型采用年度对数折旧法,允许更精细的时间分辨率。该扩展模型常被用于详细讨论不同情景下的最优碳定价问题。相关研究表明,社会碳成本会受到决策者的耐心程度、全球变暖对效用的影响、全球变暖对全要素生产率的影响及其持续性、温度对排放的敏感性以及人口增长率等的影响。

在改进市场刻画的 E-DSGE 模型方面,Comerford and Spiganti (2023) 构建的

模型进一步纳入企业家面临的抵押约束。研究结果表明,严格的气候政策会导致高碳资产泡沫破裂,引发大面积资产抛售,企业的抵押品价值也会下降,企业能够获得的信贷显著减少,最终造成经济的显著下行。其中,气候政策因引入抵押约束而对经济造成更大影响。该研究还指出,政府可通过代替企业进行债务清偿、提供借款担保以及投资补贴等,使经济更快走出下行困境。王任和蒋竺均(2021)采用包含抵押约束机制的 E - DSGE 模型,研究了抵押约束对于燃油税政策效果的影响,发现燃油税政策在减少碳排放的同时,对经济产生的负面影响会被抵押约束机制放大。此外,Benmir and Roman (2020)、Diluiso et al. (2021) 和 Ferrari and Nispi Landi (2021) 都采用包含金融市场的 E - DSGE 模型,分析了存在摩擦的金融市场环境下货币政策与气候政策的协同设计。陈国进等(2023)在其 E - DSGE 模型中更好地刻画中国市场特征,并应用其分析了央行绿色再贷款政策、气候政策和宏观审慎政策的协调配合问题。王博和徐飘洋(2021)在其 E - DSGE 模型中,引入金融加速器机制和银行家道德风险机制,详细分析了不同类型的碳定价政策以及货币和宏观审慎“双支柱”政策的福利改善效果。

在 E - DSGE 模型支持不同类型政策的协同设计方面,Annicchiarico and Di Dio (2015) 发现价格调整和货币政策能够显著影响经济周期波动过程中预期最优气候政策的变化趋势,而碳排放总量上限政策能够缓解宏观经济波动。Annicchiarico and Di Dio (2017) 研究了应对生产率冲击的次优环境政策和货币政策的组合设计问题。Economides and Xepapadeas (2018) 发现气候变化会显著影响货币政策的设计规则,具体表现在气候变化对经济系统产生了类似于生产率冲击带来的影响,加剧了宏观经济波动,货币政策需要更大幅度的调整。Chan (2020) 发现尽管增加所得税、稳定物价水平和增加企业排放成本都可以控制碳排放,但税收政策是唯一能够在生产率波动的背景下,控制碳排放水平并提高社会福利的政策工具。

参 考 文 献

- [1] 曹斌、林剑艺、崔胜辉、唐立娜,基于 LEAP 的厦门市节能与温室气体减排潜力情景分析,生态学报,2010,30(12):3358 - 3367。
- [2] 陈国进、陈凌凌、金昊、赵向琴,气候转型风险与宏观经济政策调控,经济研究,2023,58(5):60 - 78。
- [3] 姜克隽、向翩翩、贺晨旻、冯升波、刘昌义、谭新、陈莎、代春艳、邓良辰,零碳电力对中国工业部门布局影响分析,全球能源互联网,2021,4(1):5 - 11。

- [4] 潘冬阳、陈川祺、Michael Grubb, 金融政策与经济低碳转型——基于增长视角的研究, 金融研究, 2021, 498(12): 1 – 19。
- [5] 王博、徐飘洋, 碳定价, 双重金融摩擦与“双支柱”调控, 金融研究, 2021, 498(12): 57 – 74。
- [6] 王任、蒋竺均, 燃油税, 融资约束与企业行为——基于 DSGE 模型的分析, 中国管理科学, 2021, 29(4): 36 – 45。
- [7] 王信, 促进绿色低碳发展的价格型和非价格型工具, 比较, 2023, (4): 8。
- [8] Acemoglu, D., U. Akcigit, D. Hanley, and W. Kerr, “Transition to clean technology”, *The Journal of Political Economy*, 2016, 124(1): 52 – 104.
- [9] Ackerman, F. and E. A. Stanton, “Climate risks and carbon prices: Revising the social cost of carbon”, *Economics*, 2012, 6(1): 20120010.
- [10] Angelopoulos, K., G. Economides, and A. Philippopoulos, “First – and second – best allocations under economic and environmental uncertainty”, *International Tax and Public Finance*, 2013, 20: 360 – 380.
- [11] Annicchiarico, B. and F. Di Dio, “Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new Keynesian model”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2015, 69: 1 – 21.
- [12] Annicchiarico, B. and F. Di Dio, “GHG emissions control and monetary policy”, *Environmental and Resource Economics*, 2017, 67: 823 – 851.
- [13] Annicchiarico, B. and F. Diluiso, “International transmission of the business cycle and environmental policy”, *Resource and Energy Economics*, 2019, 58: 101112.
- [14] Annicchiarico, B., S. Carattini, C. Fischer, and G. Heutel, “Business cycles and environmental policy: A primer”, *Environmental and Energy Policy and the Economy*, 2022, 3(1): 221 – 253.
- [15] ASEAN + 3 Macroeconomic Research Office (AMRO), “Box 1.6: Taylor rule estimates for the ASEAN – 4”, *ASEAN + 3 regional economic outlook 2019: Building capacity and connectivity for the new economy*, Singapore, 2019, <https://www.amro-asia.org/asean3-regional-economic-outlook-areo-2019/>.
- [16] Atolia, M., P. Loungani, H. Maurer, and W. Semmler, “Optimal control of a global model of climate change with adaptation and mitigation”, *IMF Working Paper*, Washington, DC, 2018, <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2018/12/10/Optimal-Control-of-a-Global-Model-of-Climate-Change-with-Adaptation-and-Mitigation-46426>.
- [17] Barnett, M., W. Brock, and L. P. Hansen, “Pricing uncertainty induced by climate change”, *The Review of Financial Studies*, 2020, 33(3): 1024 – 1066.
- [18] Benmir, G. and J. Roman, “Policy interactions and the transition to clean technology”, *Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper*, London,

- 2020, [https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/policy – interactions – and – the – transition – to – clean – technology/](https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/policy-interactions-and-the-transition-to-clean-technology/).
- [19] Bernanke, B. and M. Gertler, “Agency costs, net worth and business fluctuations”, *The American Economic Review*, 1989, 79(1): 14 – 31.
- [20] Black, S., I. Parry, V. Mylonas, N. Vernon, and K. Zhunussova, “The IMF – World Bank climate policy assessment tool (CPAT): A model to help countries mitigate climate change”, IMF Working Paper, Washington, DC, 2023, [https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2023/06/22/The – IMF – World – Bank – Climate – Policy – Assessment – Tool – CPAT – A – Model – to – Help – Countries – Mitigate – 535096? cid = em – COM – 123 – 46802](https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2023/06/22/The-IMF-World-Bank-Climate-Policy-Assessment-Tool-CPAT-A-Model-to-Help-Countries-Mitigate-535096?cid=em-COM-123-46802).
- [21] Bonen, T., P. Loungani, W. Semmler, and S. Koch, “Investing to mitigate and adapt to climate change: A framework model”, IMF Working Paper, Washington, DC, 2016, [https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2016/12/31/Investing – to – Mitigate – and – Adapt – to – Climate – Change – A – Framework – Model – 44172](https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2016/12/31/Investing-to-Mitigate-and-Adapt-to-Climate-Change-A-Framework-Model-44172).
- [22] Bosetti, V., C. Carraro, M. Galeotti, E. Massetti, and M. Tavoni, “A world induced technical change hybrid model”, *The Energy Journal*, 2006a, 27(Special Issue 2): 13 – 37.
- [23] Bosetti, V., M. Galeotti, and A. Lanza, “How consistent are alternative short – term climate policies with long – term goals?”, *Climate Policy*, 2006b, 6(3): 295 – 312.
- [24] Brayton, F., T. Laubach, and D.L. Reifschneider, “The FRB/US model: A tool for macroeconomic policy analysis”, FEDS Notes, Board of Governors of the Federal Reserve System, Washington, DC, 2014, [https://www.federalreserve.gov/econresdata/notes/feds – notes/2014/a – tool – for – macroeconomic – policy – analysis.html](https://www.federalreserve.gov/econresdata/notes/feds-notes/2014/a-tool-for-macroeconomic-policy-analysis.html).
- [25] Bretschger, L. and S. Soretz, “Stranded assets: How policy uncertainty affects capital, growth, and the environment”, *Environmental and Resource Economics*, 2022, 83(2): 261 – 288.
- [26] Buonanno, P., C. Carraro, and M. Galeotti, “Endogenous induced technical change and the costs of Kyoto”, *Resource and Energy Economics*, 2003, 25(1): 11 – 34.
- [27] Cai, Y. and T.S. Lontzek, “The social cost of carbon with economic and climate risks”, *Journal of Political Economy*, 2019, 127(6): 2684 – 2734.
- [28] Cai, Y., T.M. Lenton, and T.S. Lontzek, “Risk of multiple interacting tipping points should encourage rapid CO₂ emission reduction”, *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 520 – 525.
- [29] Cai, Y., W. Brock, and A. Xepapadeas, “Climate change impact on economic growth: Regional climate policy under cooperation and noncooperation”, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2023, 10(3): 569 – 605.
- [30] Cambridge Econometrics, “E3ME model manual”, Cambridge Econometrics Technical Manual, Cambridge, 2022, <https://www.e3me.com/features/>.

- [31] Carattini, S. , G. Heutel, and G. Melkadze, “Climate policy, financial frictions, and transition risk”, *Review of Economic Dynamics*, 2023, 51 : 778 – 794.
- [32] Carraro, C. and M. Galeotti, “Does endogenous technical change make a difference in climate change policy analysis? A robustness exercise with the FEEM – RICE model”, *Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM) Working Paper*, Milano, 2004, <https://www.econstor.eu/handle/10419/739770>.
- [33] Chan, Y. T. , “Are macroeconomic policies better in curbing air pollution than environmental policies? A DSGE approach with carbon – dependent fiscal and monetary policies”, *Energy Policy*, 2020, 141 : 111454.
- [34] Chateau, J. , A. Saint – Martin, and T. Manfredi, “Employment impacts of climate change mitigation policies in OECD: A general – equilibrium perspective”, *OECD Environment Working Paper*, Paris, 2011, [https://www.oecd-ilibrary.org/environment/employment – impacts – of – climate – change – mitigation – policies – in – oecd_5kg0ps847h8q – en](https://www.oecd-ilibrary.org/environment/employment-impacts-of-climate-change-mitigation-policies-in-oecd_5kg0ps847h8q-en).
- [35] Chateau, J. , F. Jaumotte, and G. Schwerhoff, “Climate policy options: A comparison of economic performance”, *IMF Working Paper*, Washington, DC, 2022, [https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2022/12/09/Climate – Policy – Options – A – Comparison – of – Economic – Performance – 526813](https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2022/12/09/Climate-Policy-Options-A-Comparison-of-Economic-Performance-526813).
- [36] Chateau, J. , R. Bibas, and E. Lanzi, “Impacts of green growth policies on labour markets and wage income distribution: A general equilibrium application to climate and energy policies”, *OECD Environment Working Paper*, Paris, 2018, [https://www.oecd-ilibrary.org/environment/impacts – of – green – growth – policies – on – labour – markets – and – wage – income – distribution_ea3696f4 – en](https://www.oecd-ilibrary.org/environment/impacts-of-green-growth-policies-on-labour-markets-and-wage-income-distribution_ea3696f4-en).
- [37] Chateau, J. , R. Dellink, and E. Lanzi, “An overview of the OECD ENV – linkages model: Version 3”, *OECD Environment Working Paper*, Paris, 2014, [https://www.oecd-ilibrary.org/environment – and – sustainable – development/an – overview – of – the – oecd – env – linkages – model_5jz2qck2b2vd – en](https://www.oecd-ilibrary.org/environment-and-sustainable-development/an-overview-of-the-oecd-env-linkages-model_5jz2qck2b2vd-en).
- [38] Comerford, D. and A. Spiganti, “The carbon bubble: Climate policy in a fire – sale model of deleveraging”, *The Scandinavian Journal of Economics*, 2023, 125(3) : 655 – 687.
- [39] Crost, B. and C. P. Traeger, “Optimal climate policy: Uncertainty versus Monte Carlo”, *Economics Letters*, 2013, 120(3) : 552 – 558.
- [40] Dellink, R. , S. Jamet, J. Chateau, and R. Duval, “Towards global carbon pricing: Direct and indirect linking of carbon markets”, *OECD Environment Working Paper*, Paris, 2010, [https://www.oecd-ilibrary.org/environment/towards – global – carbon – pricing _5km975t0cfr8 – en](https://www.oecd-ilibrary.org/environment/towards-global-carbon-pricing_5km975t0cfr8-en).

- [41] Diluiso, F. , B. Annicchiarico, M. Kalkuhl, and J. C. Minx, “Climate actions and macro – financial stability: The role of central banks”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2021, 110: 102548.
- [42] Dissou, Y. and L. Karnizova, “Emissions cap or emissions tax? A multi – sector business cycle analysis”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2016, 79: 169 – 188.
- [43] Duan, H. B. , L. Zhu, and Y. Fan, “Optimal carbon taxes in carbon – constrained China: A logistic – induced energy economic hybrid model”, *Energy*, 2014, 69: 345 – 356.
- [44] Durand – Lasserre, O. , L. Campagnolo, J. Chateau, and R. Dellink, “Modelling of distributional impacts of energy subsidy reforms: An illustration with Indonesia”, *OECD Environment Working Paper*, Paris, 2015, https://www.oecd-ilibrary.org/environment/modelling-of-distributional-impacts-of-energy-subsidy-reforms_5js4k0scrq5-en.
- [45] Economides, G. and A. Xepapadeas, “Monetary policy under climate change”, *Center for Economic Studies and ifo Institute (CESifo) Working Paper*, Munich, 2018, <https://www.econstor.eu/handle/10419/180283>.
- [46] Energy Information Administration (EIA), “The national energy modeling system: An overview 2009”, *EIA Report*, Washington, DC, 2009, <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/index.html#:~:text=NEMS%20can%20be%20used%20to,impact%20of%20increased%20use%20of>.
- [47] Ferrari, A. and V. Nispi Landi, “Whatever it takes to save the planet? Central banks and unconventional green policy”, *Bank of Italy Temi di Discussione (Working Paper)*, Rome, 2021, <https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/temi-discussione/2021/2021-1320/index.html?com.dotmarketing.htmlpage.language=1&dotcache=refresh>.
- [48] Fischer, C. and M. Springborn, “Emissions targets and the real business cycle: Intensity targets versus caps or taxes”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2011, 62 (3): 352 – 366.
- [49] Fujimori, S. , T. Hasegawa, T. Masui, K. Takahashi, D. S. Herran, H. Dai, Y. Hijioka, and M. Kainuma, “SSP3: AIM implementation of shared socioeconomic pathways”, *Global Environmental Change*, 2017, 42: 268 – 283.
- [50] Ganelli, G. and J. Tervala, “International transmission of environmental policy: A New Keynesian perspective”, *Ecological Economics*, 2011, 70(11): 2070 – 2082.
- [51] Gertler, M. and P. Karadi, “A model of unconventional monetary policy”, *Journal of Monetary Economics*, 2011, 58(1): 17 – 34.
- [52] Gibson, J. and G. Heutel, “Pollution and labor market search externalities over the business cycle”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2023, 151: 104665.

-
- [53] Golosov, M. , J. Hassler, P. Krusell, and A. Tsyvinski, “Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium”, *Econometrica*, 2014, 82(1) : 41 – 88.
- [54] Grübler, A. , N. Nakićenović, and W.D. Nordhaus, “Technological change and the environment”, *Resources for the Future*, Washington, DC, 2002.
- [55] Hallegatte, S. , F. McIsaac, H. Dudu, C. Jooste, C. Knudsen, and H. Beck, “The macroeconomic implications of a transition to zero net emissions: A modeling framework”, *The World Bank Open Knowledge Repository Policy Research Working Paper*, Washington, DC, 2023, <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/659cc0e8-38a4-4657-b8bd-6aa4373a9dc2>.
- [56] Hassler, J. and P. Krusell, “Economics and climate change: Integrated assessment in a multi – region world”, *Journal of the European Economic Association*, 2012, 10(5) : 974 – 1000.
- [57] Heutel, G. , “How should environmental policy respond to business cycles? Optimal policy under persistent productivity shocks”, *Review of Economic Dynamics*, 2012, 15(2) : 244 – 264.
- [58] Holladay, J. S. , M. Mohsin, and S. Pradhan, “Environmental policy instrument choice and international trade”, *Environmental and Resource Economics*, 2019, 74(4) : 1585 – 1617.
- [59] Huang, K. and M.J. Eckelman, “Appending material flows to the national energy modeling system (NEMS) for projecting the physical economy of the United States”, *Journal of Industrial Ecology*, 2022, 26(1) : 294 – 308.
- [60] International Monetary Fund (IMF), “Annual report on exchange arrangements and exchange restrictions 2022”, Washington, DC, 2023, <https://www.imf.org/en/Publications/Annual-Report-on-Exchange-Arrangements-and-Exchange-Restrictions>.
- [61] Jensen, S. and C.P. Traeger, “Optimal climate change mitigation under long – term growth uncertainty: Stochastic integrated assessment and analytic findings”, *European Economic Review*, 2014, 69 : 104 – 125.
- [62] Jermann, U. and V. Quadrini, “Macroeconomic effects of financial shocks”, *The American Economic Review*, 2012, 102(1) : 238 – 271.
- [63] Kainuma, M. , Y. Matsuoka, and T. Morita, “AIM modeling: Overview and major findings”, *Climate Policy Assessment: Asia – Pacific Integrated Modeling*, Springer Tokyo, Tokyo, 2002, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-4-431-53985-8_1.
- [64] Kawai, E. , A. Ozawa, and B.D. Leibowicz, “Role of carbon capture and utilization (CCU) for decarbonization of industrial sector: A case study of Japan”, *Applied Energy*, 2022, 328 : 120183.
- [65] Kiyotaki, N. and J. Moore, “Credit cycles”, *Journal of Political Economy*, 1997, 105(2) :

211 – 248.

- [66] Kopp, R. E. , A. Golub, N. O. Keohane, and C. Onda, “The influence of the specification of climate change damages on the social cost of carbon”, *Economics*, 2012, 6(1): 20120013.
- [67] Kurosawa, A. , “Multigas mitigation: An economic analysis using GRAPE model”, *The Energy Journal*, 2006, 27(Special Issue 3): 275 – 288.
- [68] Kypreos, S. , “Modeling experience curves in MERGE (model for evaluating regional and global effects)”, *Energy*, 2005, 30(14): 2721 – 2737.
- [69] Lanzi, E. , D. Mullaly, J. Château, and R. Dellink, “Addressing competitiveness and carbon leakage impacts arising from multiple carbon markets: A modelling assessment”, *OECD Environment Working Paper*, Paris, 2013, https://www.oecd-ilibrary.org/environment-and-sustainable-development/addressing-competitiveness-and-carbon-leakage-impacts-arising-from-multiple-carbon-markets_5k40ggjj7z8v-en.
- [70] Lanzi, E. , E. Botta, G. Alexander, D. O. Valriberas, Z. Klimont, G. Kiesewetter, C. Heyes, and R. van Dingenen, “The economic benefits of international co-operation to improve air quality in Northeast Asia: A focus on Japan, Korea and China”, *OECD Environment Working Paper*, Paris, 2022, https://www.oecd-ilibrary.org/environment/the-economic-benefits-of-international-co-operation-to-improve-air-quality-in-northeast-asia_5c5ee1a3-en.
- [71] Leimbach, M. , N. Bauer, L. Baumstark, M. Luken, and O. Edenhofer, “Technological change and international trade – insights from REMIND – R”, *The Energy Journal*, 2010, 31 (Special Issue 1): 109 – 136.
- [72] Lemoine, D. and C. Traeger, “Watch your step: Optimal policy in a tipping climate”, *American Economic Journal: Economic Policy*, 2014, 6(1): 137 – 166.
- [73] Lemoine, D. and C. P. Traeger, “Economics of tipping the climate dominoes”, *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 514 – 519.
- [74] Lemoine, D. , “The climate risk premium: How uncertainty affects the social cost of carbon”, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2021, 8(1): 27 – 57.
- [75] Lontzek, T. S. , Y. Cai, K. L. Judd, and T. M. Lenton, “Stochastic integrated assessment of climate tipping points indicates the need for strict climate policy”, *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 441 – 444.
- [76] Loulou, R. , G. Goldstein, and K. Noble, “Documentation for the MARKAL family of models”, *International Energy Agency Energy Technology Systems Analysis Programme (IEA – ETSAP)*, Paris, 2004, <http://www.iea-etsap.org>.
- [77] Loulou, R. , U. Remne, A. Kanudia, A. Lehtila, and G. Goldstein, “Documentation for the

- TIMES Model, PART I”, International Energy Agency Energy Technology Systems Analysis Programme (IEA – ETSAP), Paris, 2005, <http://www.iea-etsap.org>.
- [78] Manne, A. and R. Richels, “The impact of learning – by – doing on the timing and costs of CO₂ abatement”, *Energy Economics*, 2004, 26(4) : 603 – 619.
- [79] Manne, A. , R. Mendelsohn, and R. Richels, “MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies”, *Energy Policy*, 1995, 23(1) : 17 – 34.
- [80] Messner, S. and L. Schrattenholzer, “MESSAGE – MACRO: Linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively”, *Energy*, 2000, 25(3) : 267 – 282.
- [81] Nordhaus, W. D. and D. Popp, “What is the value of scientific knowledge? An application to global warming using the PRICE model”, *The Energy Journal*, 1997, 18(1) : 1 – 45.
- [82] Nordhaus, W. D. and Z. Yang, “A regional dynamic general – equilibrium model of alternative climate – change strategies”, *The American Economic Review*, 1996, 86(4) : 741 – 765.
- [83] Nordhaus, W. D. , “An optimal transition path for controlling greenhouse gases”, *Science*, 1992, 258(5086) : 1315 – 1319.
- [84] Nordhaus, W. D. , “Climate clubs: Overcoming free – riding in international climate policy”, *The American Economic Review*, 2015, 105(4) : 1339 – 1370.
- [85] Nordhaus, W. D. , “Estimates of the social cost of carbon: Background and results from the RICE – 2011 model”, National Bureau of Economic Research (NBER) Working Paper, Cambridge, Massachusetts, 2011, <https://www.nber.org/papers/w17540>.
- [86] Organization for Economic Co – operation and Development (OECD), “OECD inter – country input – output (ICIO) tables and database”, Paris, 2023, <http://oe.cd/icio>.
- [87] Parry, I. , B. Shang, N. Vernon, P. Wingender, and T. Narasimhan, “Evaluating policies to implement the Paris Agreement: A toolkit with application to China”, *Handbook on the Economics of Climate Change*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, 2020, <https://www.elgaronline.com/edcollchap/edcoll/9780857939050/9780857939050.00008.xml>.
- [88] Peck, S. C. and T. J. Teisberg, “CETA: A model for carbon emissions trajectory assessment”, *The Energy Journal*, 1992, 13(1) : 55 – 77.
- [89] Popp, D. , “ENTICE: Endogenous technological change in the DICE model of global warming”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2004, 48(1) : 742 – 768.
- [90] Pycroft, J. , L. Vergano, C. Hope, D. Paci, and J. C. Ciscar, “A tale of tails: Uncertainty and the social cost of carbon dioxide”, *Economics*, 2011, 5(1) : 20110022.
- [91] Qi, T. , N. Winchester, D. Zhang, X. Zhang, and V. J. Karplus, “The China – in – global energy model”, MIT Joint Program Report Series, Cambridge, Massachusetts, 2014, <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/88606>.

- [92] Rezai, A. and F. van der Ploeg, “Abandoning fossil fuel: How fast and how much”, The Manchester School, 2017, 85: 16 – 44.
- [93] Richardson, P. , “The structure and simulation properties of OECD’s INTERLINK model”, OECD Economic Studies, 1988, 10(Spring) : 57 – 122.
- [94] Rozenberg, J. , A. Vogt – Schilb, and S. Hallegatte, “Instrument choice and stranded assets in the transition to clean capital”, Journal of Environmental Economics and Management, 2020, 100: 102183.
- [95] Semmler, W. , K. Lessmann, and I. Tahri, “Energy transition, asset price fluctuations, and dynamic portfolio decisions”, SSRN Working Paper, Rochester, 2020, <https://ssrn.com/abstract=3688293>.
- [96] Shapiro, A. F. and G. E. Metcalf, “The macroeconomic effects of a carbon tax to meet the US Paris agreement target: The role of firm creation and technology adoption”, Journal of Public Economics, 2023, 218: 104800.
- [97] Stern, N. , “Stern review: The economics of climate change”, Cambridge University Press, Cambridge, 2006, <https://www.cambridge.org/core/books/economics-of-climate-change/A1E0BBF2F0ED8E2E4142A9C878052204>.
- [98] Stern, N. , J. Stiglitz, and C. Taylor, “The economics of immense risk, urgent action and radical change: Towards new approaches to the economics of climate change”, Journal of Economic Methodology, 2022, 29(3) : 181 – 216.
- [99] Stockholm Environment Institute (SEI), “LEAP: Applications”, Stockholm, 2021, <https://leap.sei.org/default.asp?action=applications>.
- [100] Tang, A. L. , “Introduction to the large – scale AMRO global macro – financial (DSGE) model”, AMRO Working Paper, ASEAN + 3 Macroeconomic Research Office (AMRO), Singapore, 2022, <https://www.amro-asia.org/introduction-to-the-large-scale-amro-global-macro-financial-dsge-model/>.
- [101] Tattini, J. , M. Gargiulo, and K. Karlsson, “Reaching carbon neutral transport sector in Denmark – Evidence from the incorporation of modal shift into the TIMES energy system modeling framework”, Energy Policy, 2018, 113: 571 – 583.
- [102] Teng, F. , T. Wang, and J. Guo, “Carbon neutrality targets and climate risk: An assessment of economic damage from climate change”, China – UK Climate Risk Project Phase III Reports, Beijing, 2021, <http://www.3e.tsinghua.edu.cn/en/article/244>.
- [103] Traeger, C. P. , “A 4 – stated DICE: Quantitatively addressing uncertainty effects in climate change”, Environmental and Resource Economics, 2014, 59: 1 – 37.
- [104] van der Ploeg, F. and A. Rezai, “Cumulative emissions, unburnable fossil fuel, and the

- optimal carbon tax”, *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 116: 216 – 222.
- [105] Vitek, F. , “The global macrofinancial model”, IMF Working Paper, Washington, DC, 2018, [https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2018/04/09/The - Global - Macrofinancial - Model - 45790](https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2018/04/09/The-Global-Macrofinancial-Model-45790)
- [106] Wang, T. , F. Teng, and X. Zhang, “Assessing global and national economic losses from climate change: A study based on CGEM – IAM in China”, *Climate Change Economics*, 2020, 11(03): 2041003.
- [107] Xepapadeas, A. and G. Economides, “The effects of climate change on a small open economy”, SSRN Working Paper, Rochester, 2019, [https://papers.ssrn.com/abstract = 4197856](https://papers.ssrn.com/abstract=4197856).
- [108] Xiao, B. , Y. Fan, and X. Guo, “Exploring the macroeconomic fluctuations under different environmental policies in China: A DSGE approach”, *Energy Economics*, 2018, 76: 439 – 456.
- [109] Xiao, B. , Y. Fan, X. Guo and L. Xiang, “Re – evaluating environmental tax: An intergenerational perspective on health, education and retirement”, *Energy Economics*, 2022a, 110: 105999.
- [110] Xiao, B. , Y. Fan, X. Guo, S. Voigt, and L. Cui, “Effects of linking national carbon markets on international macroeconomics: An open – economy E – DSGE model”, *Computers and Industrial Engineering*, 2022b, 169: 108166.
- [111] Zhang, D. , S. Rausch, V.J. Karplus, and X. Zhang, “Quantifying regional economic impacts of CO₂ intensity targets in China”, *Energy Economics*, 2013, 40: 687 – 701.
- [112] Zhao, F. , Y. Fan, and S. Zhang, “Assessment of efficiency improvement and emission mitigation potentials in China’s petroleum refining industry”, *Journal of Cleaner Production*, 2020, 280: 124482.

Exploratory Application of Climate Analysis Tools from Major Institutions

Abstract: Various mainstream institutions such as World Bank and IMF have developed specialized climate change analysis and assessment tools for the analysis and evaluation of complex climate change issues, such as the pathways to achieve carbon neutrality. The development of such tools typically needs to address some common challenges, including the complexity of modeling to match the issues discussed, the diversity and heterogeneity of research objects, the rational design of feedback mechanisms, the expression of technological progress and innovation mechanisms, the collection of real – world data to support modeling details, accuracy in long – term predictions, and the validation and assessment of the model itself and simulation results. This paper systematically summarizes climate change analysis and assessment tools developed by mainstream institutions, with a focus on analyzing the most widely used CGE models, IAM models, and E – DSGE models. It provides detailed descriptions of their structural characteristics, application scenarios, advantages, disadvantages, and applicability for analyzing issues related to China. Furthermore, this paper explores the Global Macro – Financial – Environmental Model, and its exploratory application in discussing complex climate change issues.

Keywords: Climate Change; Computable General Equilibrium (CGE) Models; Integrated Assessment Models (IAMs); Environment – Dynamic Stochastic General Equilibrium (E – DSGE) Models