

2022年3月17日

March 17, 2022

浅谈基于主体的模型在碳中和路径和 金融支持政策研究中的应用

人民银行研究局和清华大学能源环境经济研究所联合课题组¹

摘要：碳中和目标下的经济转型路径和金融支持政策设计，要求在高度不确定性、具有多主体、多目标的复杂系统中优化决策，从能源、环境、经济、金融等多维度开展分析。本文综述碳中和分析的主流模型，指出其普遍存在的金融市场代表性不足，对金融与经济其它部门、能源环境系统互动的刻画较少，未能反映微观主体异质性、有限理性和动态学习能力等。本文针对性地提出应用基于主体的模型，以拓展相关模型和开发金融政策评价工具。

Abstract: Developing a carbon neutrality roadmap and supporting green finance policy is a multi-objective multi-agent decision problem in nature, requiring an integrated analytical framework that accounts for inherent uncertainties in energy, environment, economy, and finance. This paper provides a review of mainstream modeling tools that have been applied in carbon neutrality studies. We show that these models often lack a detailed representation of the financial sector and are inefficient in capturing the complex interactions between the financial sector and other sectors of the economy, energy systems, and the environment. Moreover, these models cannot incorporate heterogeneity, bounded rationality, and learning capabilities of agents. In this respect, we suggest applying agent-based models (ABM) in future modeling studies and developing green finance policy evaluation tools.

关键词：碳中和；金融政策；基于主体的模型(ABM)

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.

¹张丹玮，清华大学能源环境经济研究所，研究方向为气候金融与气候变化经济学。唐黎阳，中国人民银行研究局，研究方向为宏观经济金融建模、货币政策和金融风险，Email: tliyang@pbc.gov.cn。王信，中国人民银行研究局，研究方向为绿色金融和金融体制改革。张达，清华大学能源环境经济研究所，研究方向为能源与环境经济学和政策、能源转型问题的系统建模。张希良，清华大学能源环境经济研究所，研究方向为能源经济学、气候变化经济学与政策。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

2015年12月12日,《联合国气候变化框架公约》第二十六次缔约方大会通过《巴黎协定》,确立了至本世纪末把全球平均升温控制在不超过工业化前水平 2°C 以上,并努力控制在 1.5°C 以内的目标(UNFCCC, 2015)。2020年9月22日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上,正式提出了中国力争二氧化碳排放2030年前达峰、2060年前碳中和的目标(新华网, 2020)。据不完全统计,截至2021年12月1日,不丹、柬埔寨等8个国家各自宣布已实现碳中和/净零排放,另有包括中国在内的128个国家和欧盟正式提出或有意承诺在2050年前后实现碳中和或与之力度相近的气候目标²(Net Zero Tracker, 2021; European Commission, 2021a)。

碳中和目标的提出,为中国社会经济发展带来新的机遇与挑战,也给经济金融研究带来新课题。在绿色低碳发展过程中,金融发挥着资源配置、风险管理和市场定价的重要功能(易纲, 2021; 刘桂平, 2021)。在构建以碳中和为导向的绿色金融体系的背景下³,如何统筹能源、环境、气候和经济发展等多个目标,实现多时空维度下碳中和路径最优化?如何设计相应的政策保障,特别是发挥金融的支撑作用?这些问题对传统的气候变化相关综合评估模型体系提出了更高要求。首先,综合评估模型体系需要对中国这样的发展中国家进行详细刻画,关注发展中国家经济发展和减缓气候变化之间的交互影响;其次,要更加关注区域信息描述,提高区域建模的分辨率;最后,需要更加全面地分析金融政策与经济政策、气候政策和环境政策的相互作用,形成碳中和综合策略。

近年来,基于主体的模型(Agent-based Model, ABM)被引入股票市场、货币政策、金融危机等金融领域研究,并逐渐在碳市场、电力市场、电动车、建筑节能等气候变化相关研究中获得应用(Castro et al, 2020),但面对碳中和这一重大、复杂、特殊的议题,其应用尚很有限。相较于传统模型,ABM更具灵活性,可对微观经济进行更为细致的刻画。比如,ABM可聚合多项自下而上的实证研究,建立更“真实”的气候损失函数,评估气温升高对劳动生产率的影响(Farmer et al, 2015);还可对技术扩散过程进行更贴近现实的非线性拟合(Faber et al, 2010)。此外,ABM还可对地区或部门进行细分,分析不同决策主体在微观层面的互动、学习和适应,以及在宏观层面产生的影响(Epstein, 1999),并更详实地刻画量化宽松货币政策对价格和产出的影响(Cincotti et al, 2010)。本文在归纳总结传统综合评估模型特点和局限性的基础上,提出应用ABM开展碳中和路径及金融支持政策的成本收益研究,拓展现有综合评估模型框架,为开发相关金融政策评价工具提供参考。

本文第二部分简要综述国内外气候变化综合评估模型研究现状,基于建模方法讨论其特点和局限性,第三部分介绍ABM的原理和最新应用情况,并与传统模型进行比较,第四部分总结和提出建议。

²一些国家采用了“净零排放”、“气候中和”或“零碳”的表述。

³见《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《关于促进应对气候变化投融资的指导意见》(环气候〔2020〕57号)。

二、国内外气候变化综合评估模型研究综述

(一) 国外模型综述

长期以来，联合国以及各发达国家利用综合评估模型，为应对气候变化战略和政策的制定提供量化决策依据。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)已应用综合评估模型，完成了五个评估周期的工作，目前正处于第六个评估周期。第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)利用六个综合评估模型，定量分析五个不同的社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)(Van Vuuren et al, 2017; Fricko et al, 2017; Fujimori et al, 2017; Calvin et al, 2017; Kriegler et al, 2017), 为后续全球适应和减缓气候变化决策提供科学支撑(Riahi et al, 2017)。国际能源署(International Energy Agency, IEA)开发的全球能源模型(WEM)和能源技术展望模型(ETP Model), 长期为各国提供清洁能源技术发展、能源系统转型、经济社会转型等方面的政策建议(IEA, 2020)。美国环保署(Environmental Protection Agency, EPA)和能源部(Department of Energy, DOE)等部门的环境保护、能源转型和低碳发展相关决策, 长期参考 2018 年诺贝尔经济学奖获得者威廉·诺德豪斯开发的 DICE 模型(内嵌能量平衡模型 EMB 模拟气候变化)、麻省理工学院(MIT)的 IGSM 模型(包含 EPPA 和 MESM 两个子模型)、美国太平洋西北国家实验室(PNNL)与马里兰大学联合成立的全球变化研究所(Joint Global Change Research Institute, JGCRI)开发的 GCAM 模型、斯坦福大学的 MERGE 模型等提供的分析结果(EPA, 2021; DOE, 2021; Nordhaus, 2018; Hillebrand, 2020; Sokolov et al, 2005; Calvin et al, 2019; Manne et al, 1995)。MIT 斯隆学院开发的基于系统动力学的 En-ROADS 气候变化仿真模型, 近年来也被美国国会、联合国秘书长办公室采用(Climate Interactive, 2021)。欧盟委员会采用一套集成了多个子模型(PRIMES、GEM-E3、GAINS、CAPRI 等)的综合评估模型, 支撑了包括“绿色新政”在内的一系列气候和能源政策框架设计(European Commission, 2021b)。荷兰环境评估署(PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, PBL)的 IMAGE 模型、国际应用系统分析研究所(IIASA)的 MESSAGE 模型、波茨坦气候影响研究所(PIK)的 REMIND 模型以及剑桥大学的 E3ME 模型, 也长期为欧洲决策者提供科学支撑(Stehfest et al, 2014; Klaassen & Riahi, 2007; Hilaire & Bertram, 2020; PBL, 2021; IIASA, 2021a; PIK, 2021; Cambridge Econometrics, 2021)。日本国立环境研究所(NIES)开发的 AIM 模型常被用于评估气候变化对亚太地区自然环境和社会经济的影响, 并向 IPCC 提供全球和区域排放情景模拟分析(NIES, 2021; Kainuma, 1998)。澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)开发的 GTEM-C 模型、维多利亚大学开发的 VURM 模型(前身为 MMRF 模型)、澳大利亚国立大学和美国雪城大学联合开发的 G-Cubed 模型对澳大利亚经济有比较详细的刻画, 被政府和私营部门用于分析气候政策对宏观经济和行业的影响(Cai et al, 2015; Adams et al, 2015; Mckibbin & Wilcoxon, 2013; Fernando et al, 2021)。

近年来，国际研究机构开始关注绿色金融对能源气候目标实现的影响，并开展相关分析研究。IIASA 自 2018 年起参与了奥地利政府绿色融资(GreenFin)项目的研究和建模工作，目前项目开发的基于主体的 EIRIN 模型，已被欧央行用于气候压力测试和欧盟绿色财政政策评估(IIASA, 2021b; Monastero & Raberto, 2018)。

(二) 国内模型综述

借鉴国外的建模技术和经验，我国相关机构已成功开发了多套综合评估模型，将其应用于国内绿色低碳转型策略研究中。清华大学能源环境经济研究所是中国高校中最早开展能源与应对气候变化系统分析的研究单位，何建坤等（1996）于 1990 年代中期开发了用于温室气体减排评价的 INET 能源系统模型，张阿玲等（2002）在 INET 基础上改进形成了经济、能源、环境(3E)模型。该所的不同团队已开发一系列基于经济和工程理论的模型，构建了综合评估模型体系。例如张希良团队不仅开发了中国-全球能源经济模型(C-GEM)、中国分区能源经济模型(C-REM)等能源经济宏观模型和中国可再生能源电力规划及运行模型(REPO)等部门模型，以及集合了以上两类模型的国家绿色低碳转型路径集成模型(Integrated Energy-Environment-Economy Analysis, IEEEA)，还构建了中国分区综合评估模型(REACH)（张鸿宇等，2021）。其中，C-GEM 模型和 C-REM 模型能够表达经济社会环境约束下的能源发展目标，评价不同目标对能源行业、社会经济、能源成本和劳动力就业的影响；REPO 模型能够详细刻画可再生能源的波动性，优化排放约束下的电源发展目标并计算电力系统总成本，估算可再生能源发展规模目标的成本投入。该模型体系的结果已被多次应用于我国宏观战略规划中的能源和气候目标设定、碳市场设计等重大决策。清华大学能源环境经济研究所的陈文颖团队在系统优化模型 MARKAL 的基础上，通过引入宏观经济模型“MACRO”开发的 China MARKAL-MACRO 模型及其后续版本（如 Global TIMES、China TIMES 等），也被广泛应用于大气污染物协同效应、建筑部门电气化等政策和能源转型路径分析(Li et al, 2019; Wang et al, 2018; Zhang & Chen, 2020)。于智为和胡小军的博士论文，基于能源系统微观主体行为的仿真建模方法构建了 WEOD 框架，用于分析西气东输等能源政策（于智为等，2008）。

国家发展改革委能源研究所与国内外机构合作开发了中国能源政策综合评价模型(IPAC)，该模型被应用于中国各部门能源需求和相关排放的情景模拟以及碳定价政策分析（姜克隽等，2008；王金南等，2009）。北京大学能源环境经济与政策研究室建立的 IMED 由宏观经济模型(IMED|CGE)、能源技术优化模型(IMED|TEC)、人群健康模型(IMED|HEL)等模块组成，被广泛用于国家级和省级空气污染控制、人群健康、资源利用效率、能源和气候减缓政策的分析(Ren et al, 2021; 陆潘涛等，2021; Zhang et al, 2021; Jin et al, 2020)。北京理工大学能源与环境政策研究中心开发的 C³IAM 模型体系，实现了地球系统与社会经济系统的双向耦合，被用于评估全球气候变化的直接和间接影响、中国气候变化政策以及各国气候博弈相关研究(Wei et al, 2018)。

综上，我国的综合评估模型对经济发展、绿色转型特征有更加细致的刻画，但相比发达经济体的模型体系，仍有进一步提升空间，需完善对重点区域、行业、各类减碳机制的刻画，拓展有关金融系统及其与能源、气候、环境等其他系统交互的模拟功能。

（三）典型建模方法的评价

目前，气候变化综合评估模型的建模方法，按照建模角度，可分为自上而下的宏观角度，自下而上的工程角度，以及同时包含前两者的混合建模角度。按照建模理论，可分为优化模型、系统动力学模型、一般均衡理论模型、计量经济学模型以及混合模型等（于智为，2010）。随着模型的不断发展，各研究机构构建了不同领域的多模型乃至模型体系，以更详细地刻画能源、环境、经济系统。本节主要从建模理论角度，对前文所述模型进行分类（见表1和图1）并做评价。

表 1：气候变化综合评估模型分类

建模角度	建模原理	国际模型	国内模型	应用领域
自下而上	优化	WEM 、 ETP 、 MESSAGE 、 DICE 、 GCAM、 PRIMES	China MARKAL- MACRO 、 China TIMES 、 REPO 、 IMED TEC	能源系统优化、技术路线选择、技术环境影响分析、政策分析、需求分析
	系统动力学	En-ROADS		
自上而下	一般均衡	GEM-E3、EPPA、 AIM、GTEM-C、 VURM、G-Cubed	C-GEM、C-REM、 IMED CGE	宏观经济分析、政策规划制定
	计量经济学	E3ME、EBM		
混合模型	多种方法	MERGE、IMAGE、 GAINS、IGSM、 REMIND	C ³ IAM、IPAC、 IMED、IEEEA	能源-环境-经济综合研究

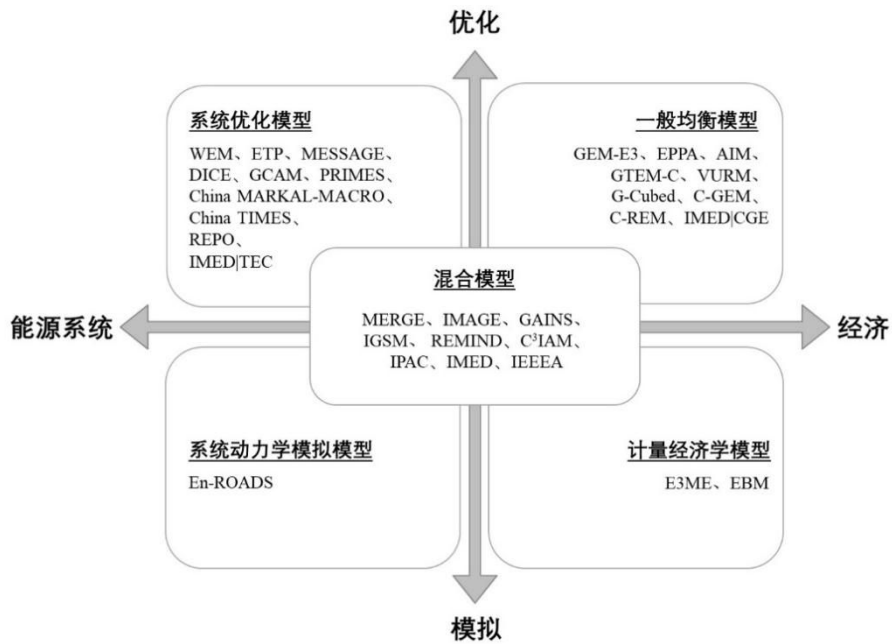


图 1：气候变化综合评估模型分类

图片来源：作者根据模型分类绘制。

1. 优化模型

气候政策多涉及优化问题，很多综合模型采用优化模型作为框架（魏一鸣等，2013）。以能源系统优化模型 TIMES 为例，该类模型一般采用多周期动态线性规划的标准形式，将目标函数设定为规划期内能源系统贴现的总供能成本，以化石燃料的流量平衡、电力和供热基本负荷、技术容量增长、能源资源累积总量以及排放等为约束，通过改变终端用能需求，求解约束条件下成本最小的能源技术和燃料优化组合（何建坤和陈文颖，2015）。能源系统优化模型可详细刻画能源从开采、加工到转换、分配、终端用能等各个环节的现有技术和潜在技术，但往往缺少能源与经济系统的联系（何建坤和陈文颖，2015）。由于参数众多，这类模型在数据获取上面临一定困难。另外，受线性规划自身最小化目标的限制，可能出现不合理的极端结果（于智为，2010）。

2. 系统动力学模型

系统动力学模型基于一般系统理论，可描述一个系统内各种复杂活动和过程，最早被用于分析工业经济复杂性及世界环境和人口问题(Olson, 2003)。该模型可根据需求，将系统分为若干个相互关联的子系统，并将每个子系统的关键参数，以及它们与其他系统之间的关系抽象为非线性方程组进行求解，再通过研究平衡点的稳定性对系统本身进行验证（于智为，2010）。系统动力学模型可很好地模拟各类能源的供给和需求变化，为政府对不同能源的定价提供参考。然而，面对参数、方程众多的复杂系统时，该模型存在数据获取难度大、仿真运算时间长等问题。此外，

由于很难将具体的战略、政策联系抽象化，系统动力学模型在描述微观社会经济环境系统时有一定局限性（于智为，2010）。

3.可计算一般均衡模型和动态随机一般均衡模型

可计算一般均衡(CGE)模型源自新古典经济学的一般均衡理论，能够将经济活动和能源使用通过均衡条件纳入综合一致的研究框架，静态求解时需满足零超额利润、市场出清和收支平衡三个条件，动态演变主要受劳动力增长、资本积累、资源耗竭和技术进步等因素驱动（张达，2014；齐天宇，2014）。由于CGE模型与新古典微观经济理论密切联系，建模者更易判断模型结果的合理性，做出基于经济规律的解释。多数CGE模型涵盖从能源生产到终端用能等多个经济部门，因此经济主体的最优化决策可直接或间接传导到整个能源经济系统，使政策评估结果更加综合；CGE模型还可与对工程技术有详细刻画的自下而上的单个部门模型耦合，评估政策对单个部门的具体影响（齐天宇等，2016；Cao et al, 2021）。然而，CGE模型也存在一些限制。一方面，CGE模型结果依赖大量参数，且诸如弹性等关键参数常根据经验取值，缺乏实证研究校准；另一方面，CGE模型对技术的表达往往较为抽象简单，且由于采用了市场充分竞争、市场参与者完全理性等过于理想化的假设，一定程度上影响了CGE模型模拟结果的可信度（齐天宇等，2016）。

另一类一般均衡理论用于气候评估的模型是动态随机一般均衡(DSGE)模型。相比CGE模型，DSGE模型将代表性主体对未来随机事件的预期纳入当期决策，可以更好地捕捉经济波动的不确定性(Sbordone et al, 2010)。一些DSGE模型将银行的货币扩张内生(Ranger et al, 2021)，对金融部门和宏观政策的处理比CGE模型更全面。然而，DSGE模型并不能完全解决CGE面临的问题，比如DSGE的代表性主体假设未能深入考虑主体之间的差异性，较难对突发事件给出确切把握。由于DSGE模型建立在一般均衡理论上，因此也较难模拟主体在非均衡情景下的适应性变化（王冰雪和王国成，2019）。

4.计量经济学模型

计量经济学模型以研究经济变量之间的数学关系为目标，通过分析样本数据显现的特征，建立变量关系表达式（孙敬水和马淑琴，2014）。计量经济学模型的形式简单清晰，可对历史数据进行较好拟合，给出明确的定性结果，可用于分析经济和能源变量之间的关系，模拟未来趋势（于智为，2010）。然而，应用计量经济模型评估碳中和路径和政策也面临一些挑战：模拟主要基于历史规律，可能存在结果与现实的偏离，现实经济的复杂性也使计量经济学模型的长期模拟精度受到很大影响（刘丽艳，2013）；另外，计量经济学模型结果受样本数据的质和量影响较大，在数据有限的情况下，不能很好地模拟现实经济运行（王敏，2018）。

5.混合模型

由于单一建模很难对能源、经济、环境之间的复杂关系进行整体描述，气候变化评估模型已经从单纯的能源与经济关系的模型(Van der Zwaan et al, 2002)，扩展到包含能源、经济、环境等多元目标的系统模型(Nordhaus, 2011)，甚至进一步拓展到自下而上的技术模型与自上而下的经济模型相耦合的多模型，或包含能源、经济、贸易、气候等多个子模型的体系化模型。从建模角度来看，以上建模方法都可以被归为混合建模，比较典型的混合模型包括 MIT-IGSM 模型体系、IMAGE 模型体系、IPAC 模型体系等（于智为，2010）。虽然混合模型克服了单一模型的部分不足，但仍面临一些难以解决的问题。首先，由于复杂度高，这类模型很难对气候变化影响的概率分布、人类对气候变化风险的厌恶程度，以及社会福利的时间偏好等不确定性进行大规模模拟（魏一鸣等，2013）。其次，大多数模型根据学习曲线模拟技术进步，不能很好地刻画技术进步过程中的路径依赖；采用同质性主体等过于理想的假设，忽视了气候变化对不同群体影响的差异性。此外，很多模型的关键参数常直接采用经验值，未进行回溯检验，可能导致模拟结果产生偏差（张莹，2017）。

在气候-金融综合分析方面，目前大多数主流能源系统优化模型、系统动力学模型以及混合模型没有考虑金融部门，忽略了金融部门与其他经济部门的相互作用。传统 CGE 模型往往假设货币中性，如 Landry et al (2019)运用 EPPA 模型分析了 2°C 目标下的搁浅资产和 GDP 损失，但由于缺少对货币流以及央行和金融中介的刻画，无法全面评估气候相关金融风险。事实上，一方面金融部门的流动性风险和违约风险可能引发金融危机，进而影响经济活动和碳排放，另一方面气候变化相关的物理风险和转型风险通过资产负债表、金融市场流动性、资产价格和投资收益预期等渠道，影响金融稳定、损害经济增长（王信等，2020）。这表明，金融部门的纳入对气候变化综合评估和碳中和全面分析不可或缺。

近年来，一些学者尝试改进拓展传统模型框架，量化评估气候相关金融问题和绿色金融政策效果，如 Annicchiarico & Di Dio (2017)、Economides & Xepapadeas (2018)、Punzi (2018)、王遥等(2019)以及 Diluiso et al (2020)建立了含有环境模块的 DSGE 模型，Fernando et al (2021)开发了多区域多部门跨期 CGE-DSGE 混合模型。鉴于 ABM 不受一般均衡理论限制，对微观主体决策和互动刻画更贴近现实、对技术扩散和技术进步刻画更加精细灵活，一些研究尝试将宏观能源经济模型与 ABM 进行耦合，开发出包含 ABM 模块的计量经济学模型(Mercure et al, 2018; Mercure et al, 2021)和基于 ABM 的存量-流量一致模型(Ranger et al, 2021)。

三、最新模型研究进展与趋向——基于主体的模型

（一）基于主体模型简介——以 Aspen 模型为例

ABM 采用自下而上的建模方式，可模拟具有异质性、自主性和适应性等特征的多个主体的同时行动和相互作用，可再现和模拟分析复杂现象（魏泽洋等，2020；于智为，2010；Castro et al, 2020）。ABM 的起源可追溯到数学博弈论，诺贝尔奖得主托马斯·谢林将这一理论用于分析冲突与合作问题，被视为 ABM 的早期应用

(Castro et al, 2020)。20 世纪 90 年代，随着计算机技术的进步，ABM 建模方法开始在社会科学研究领域流行起来，例如美国桑迪亚国家实验室针对美国经济的微观模拟开发的 Aspen 模型，就是这一时期的典型例子。

Aspen 模型已能够初步体现 ABM 模型目前所体现出的大部分特征和优势(Basu et al, 1998)（详见下文）。分析其主体设置，可了解 ABM 的大部分建模原理。例如，Aspen 模型基于主体有限理性和涉他偏好等假设，刻画多个具有内部多样性的主体，包括各种异质性家庭、公司、政府、金融机构、能源供给主体、环境主体等，主体类型和多样性胜过同期其它类型经济模型，可对美国整体经济进行更好的分析。针对家庭主体，Aspen 考虑其工作收入、失业保险、社会保障、债券收益等收入来源，以及四类消费品支出、储蓄账户、政府债券或商业债券投资等，微观细节胜过同时代其它类型模型。Aspen 支持跨领域新分析需求的模型灵活更新，例如，模型可纳入恐怖主义行动，分析恐怖主义抑制消费者信心及其经济活动(Sprigg et al, 2004)。Aspen 纳入了汽车制造、房地产开发、非耐用消费品生产以及耐用消费品生产这四大行业的公司主体，每家公司基于遗传算法学习分类器系统(GALCS)来设定其商品价格。Aspen 以其它类型模型不具备的优势，体现企业在定价策略上的动态学习和演化能力。Aspen 可通过引入复杂定价和购买博弈策略，以其它模型通常不具备的能力，支持对家庭复杂购买策略下企业间纳什均衡价格的生成和对比(Slepoy & Pryor, 2002)。Aspen 模型中，政府部门负责征收收入税、销售税和工资税，管理社会保障体系，支付失业救济金，管理整个公共部门的跨期收支平衡，并发行政府债券等，其职能在后续模型更新中能灵活方便地扩展。Aspen 的金融部门纳入各种商业银行主体，这些主体吸收家庭储蓄，发放消费贷款、商业贷款、商业债券等，商业银行主体和家庭主体、公司主体间能进行一对一信息交换和决策行为互动，反映主体的有限理性和有限信息。Aspen 金融部门还反映美联储货币政策，纳入证券公司及其它商业金融机构，以协调政府、银行和家庭之间的债券供求关系。Aspen 模型中金融部门在主体、金融政策、金融产品和金融市场等方面扩展性，都被证明优于同期其它类型模型，例如更新后的模型可在一致框架内，模拟市场和非市场机制政策工具，分析其协同关系。Aspen-EE 模型基于原模型进一步创新，以适用于能源领域分析，充分体现了 ABM 与时俱进、领域交叉、灵活更新的优势。Aspen-EE 通过进一步纳入燃料公司、电力公司等能源供给主体、电力系统运营主体、主管部门主体，以及决定电力需求的环境主体等，其预测的美国电力市场价格变化趋势与现实状况较为一致(Barton et al, 2000)。

总的来说，一个典型的 ABM 具有以下特征：1) 自下而上建模角度；2) 异质性；3) 主体存在于不断演进的复杂系统中；4) 非线性；5) 主体间自发的直接互动；6) 有限理性；7) 主体有学习能力；8) 路径依赖；9) 持续内生的创新，以驱动主体学习和适应；10) 基于选择的市场机制(Fagiolo & Roventini, 2017)。一个典型的 ABM 由一组消费者、企业等主体构成，系统以天、季度或年度的离散时间步长演进。对于任意时期，每个主体面对有限数量（可随时间变化）的微观经济变量和不变的微观经济参数；相应的，整个经济体以某些不变的宏观参数表征。给定初始条件和

宏微观参数，对任意期，一个或多个主体可随机或受系统影响选择更新他们的微观经济变量。选择更新变量的主体将与之直接互动过的其他主体当前和过去的微观经济变量收集起来，连同他们对周边环境的认知，以及他们可以收集的关于整个经济状况的信息，输入到一系列启发式或常规算法（不一定是优化算法）代表的行为规则中。这些行为规则以及交互模式，旨在模仿研究人员从初步研究中收集经验和实验知识以用于指导下一步行动。经过上一轮更新，一组新的微观经济变量被输入到经济体中以进行下一步迭代(Fagiolo & Roventini, 2017)。图 2 展示了典型 ABM 的分析流程。

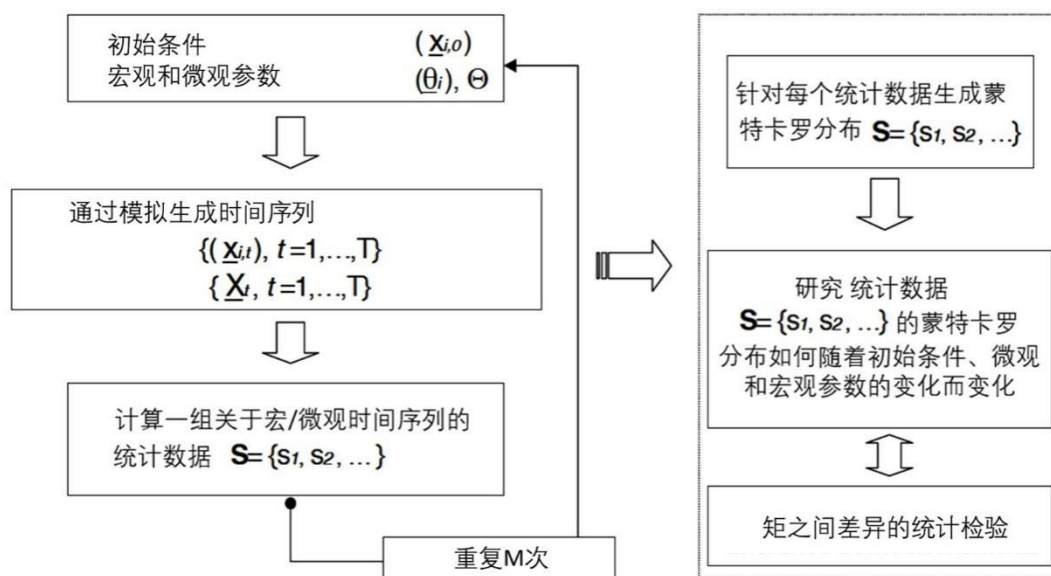


图 2：典型 ABM 的分析流程

图片来源：Fagiolo & Roventini (2017)

（二）ABM 在气候变化评估中的应用

Ranger et al (2021)应用基于主体的 EIRIN 模型，评估了气候变化、经济和疫情复合冲击对经济的影响，发现复合冲击对 GDP 的影响比单个冲击影响之和大 50%，强调在金融、财政和危机风险管理中，考虑复合冲击的紧迫性。此前，Castro et al (2020)对应用 ABM 分析气候-能源政策的 61 份文献进行了综述，发现 ABM 已被用于碳市场、电力市场、建筑节能、电动车和可再生能源推广等 13 类气候-能源研究。Castro et al (2020)发现，与传统模型相比，ABM 通过模拟更符合实际的决策和产品选择，为消费者和生产者提供更大的减排灵活性，这将有助于正确估计个人福利损失和认识气候政策的有效性、可承受性。总体而言，如果设计得当，ABM 可以很好地被用于分析气候政策的有效性、平等性以及政策的成本收益。

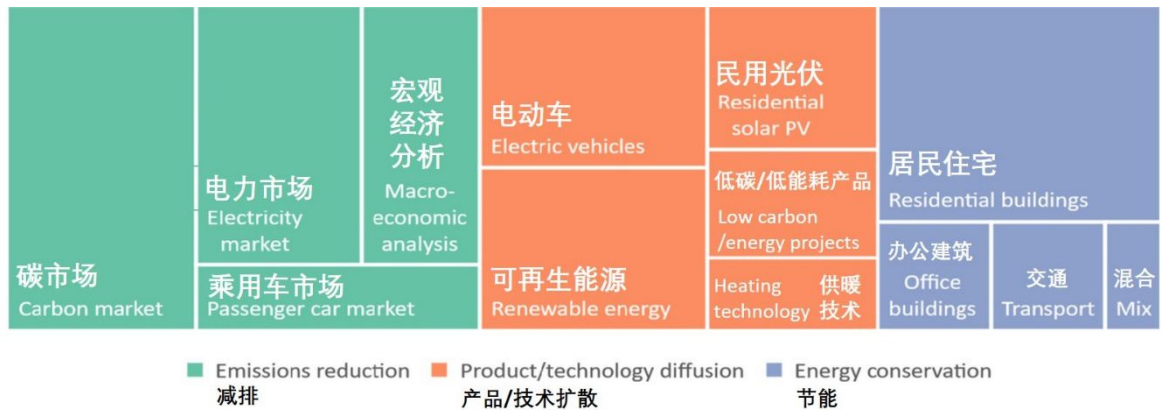


图 3: ABM 在气候-能源政策评估中的应用

图片来源: Castro et al (2020)

(三) ABM 模型的优势

ABM 可广泛覆盖微观细节, 随现实变化灵活进行系统更新, 充分考虑主体的差异性、有限理性、动态学习和演化能力及主体间互动, 适合围绕碳中和路径、绿色金融政策进行成本收益分析, 为决策提供参考。其优势主要包括以下六个方面。

一是充分刻画经济金融、能源供求、气候环境生态等系统的运行细节。这些细节包括能源供给与需求间的响应和反馈、经济金融系统对能源的响应、气候环境生态系统关于能源的响应, 还可包括能源气候政策的影响。以德国弗劳恩霍夫系统与 创新研究所(Fraunhofer ISI)开发的 ENERTILE 模型体系为例, 其专门针对电力部门碳中和分析, 模型体系的完整结构如图 4 所示。该模型体系聚焦回答德国能源转型最关键的问题, 即为了实现碳中和, 电力系统应选择可再生能源还是核能。为此, 该模型体系进行了非常精细化的设计。首先, 以 10km×10km 分辨率将整个欧洲划分为海量网格, 进行分地块建模, 开展精细化分析。再以小时为精度, 计算每个地块的电力需求、集中供热需求、可再生能源发电量、氢气需求等, 可针对“白天高, 夜晚低”的电力需求巨大波动, 确定成本更低、供需匹配效率更高的可再生能源或核能解决方案。该模型还充分考虑电力、供热、氢气的输配网络对不同地块能源供求的影响, 并优化了德国 2050 年碳中和目标下的最小成本路径, 该路径精细化到考虑了每小时发电、供热、制氢量, 每年新增装机量以及电力输配网络扩张等细节。

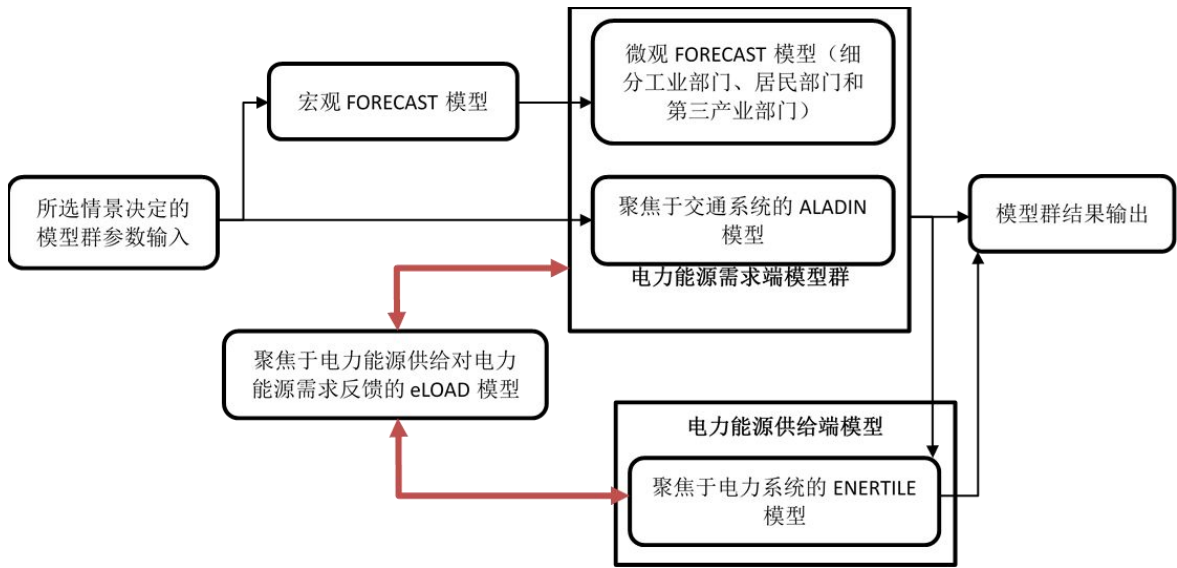


图 4：仅用于电力部门碳中和分析的基于主体模型体系

二是方便进行更新，及时满足绿色金融等全新交叉领域的分析需求。例如，为了纳入绿色金融等新主题和满足新的政策分析需求，德国弗劳恩霍夫系统与创新研究所针对 FORECAST-Buildings-Appliances-Industry 模型体系，通过建模专家团队与该所新成立的绿色金融项目组紧密合作，回答德国向绿色经济转型的两个关键问题：一是准确评估德国绿色经济行动下不同领域的投融资需求；二是调查哪些新的绿色金融工具适合大规模私人资本投入。针对第一个问题，模型结果建议：德国绿色经济行动下三个领域的总投资需求介于德国 2020 年 GDP 的 1.2% 至 2050 年 GDP 的 1.8% 之间。其中，可再生能源以及高能效、气候友好型交通领域的项目，应当匹配最高的投融资优先级。针对第二个问题，合作团队对国际上现有的绿色金融融资概念和工具进行筛选，基于模型结果给出政策建议。

三是更有能力满足绿色金融等全新交叉领域较为困难的建模需求。国际应用系统分析研究所(IIASA)在其绿色金融项目中，以奥地利扩大绿色金融规模并尽量避免影响宏观经济表现、金融稳定和经济不平等为例，通过五个步骤逐步更新已有模型体系。第一步，全面考察当前全球可持续金融工具和机制；第二步，采用计量经济学模型估计奥地利投资者对《巴黎协定》的反应，以及绿色金融投资组合优于棕色资产投资组合的条件；第三步，对奥地利引入绿色财政政策、金融监管进行宏观金融评估；第四步，在上述步骤基础上，更新已有模型或构建新模型，分析奥地利扩大绿色金融规模对本国和其它国经济金融的影响；第五步，进一步开发配套子模型、子模块、工具包等，针对绿色金融规模的扩大，进行更精细的事前评估。

四是充分纳入不同能源供需主体的异质性，更精准地服务差异化政策制定和实施。图 5 是 IIASA 开发的针对所有部门碳中和分析的超大规模基于主体模型体系（以下简称 IIASA 模型体系）。以位于下方的家庭耗能需求的燃料选择模型与其交通系统模型为例，不同能源需求主体改变能源消费结构的难度千差万别，燃料选择

模型和交通系统模型可充分刻画能源消费主体的异质性，帮助决策者分析这一因素对能源转型升级影响、碳中和路径设计以及政策公平性等问题。

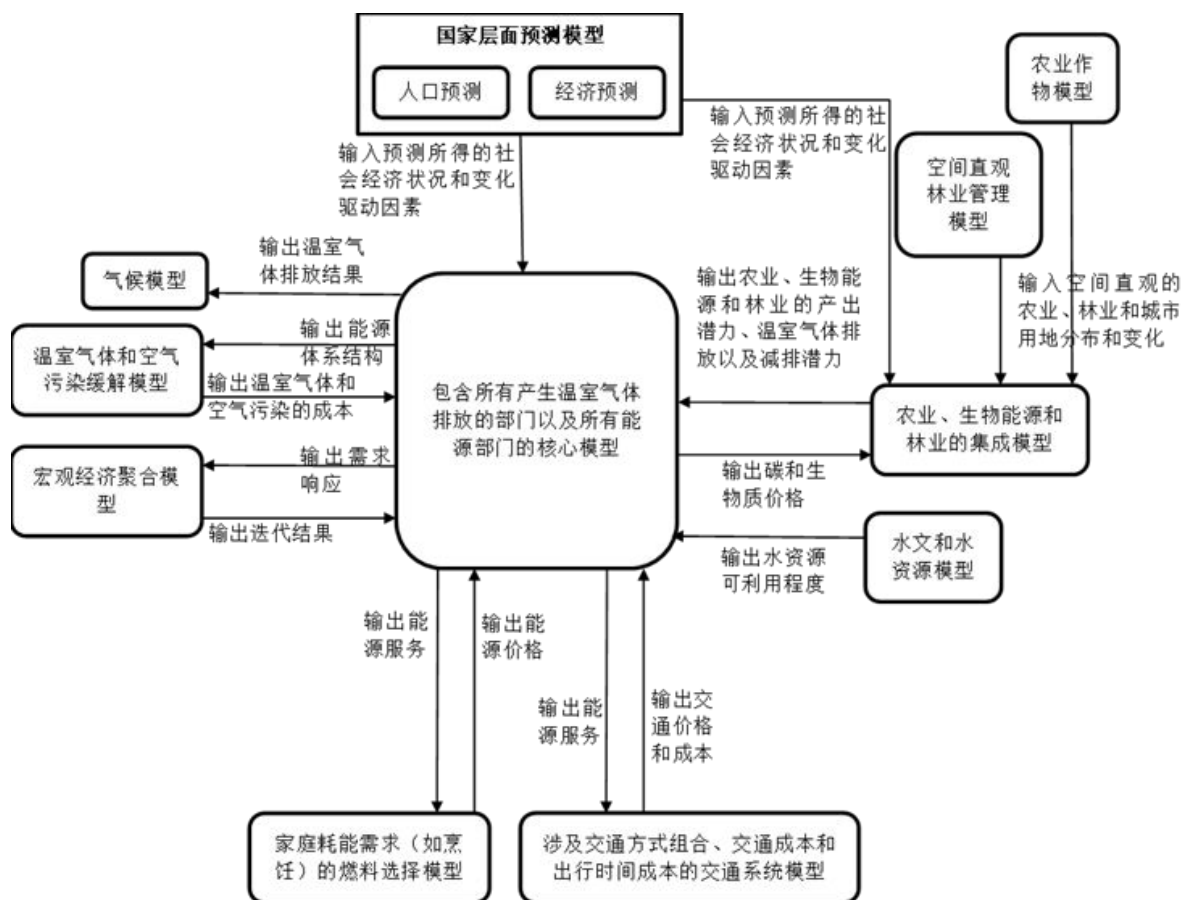


图 5：针对所有部门碳中和分析的基于主体模型体系⁴

五是更现实地假设主体仅具有有限理性和有限信息，提高政府差异化引导、精准化监管的能力。以位于图 5 左侧的宏观经济聚合模型为例，在参与碳排放权交易的主体中，既有相关认识不足、理性程度较低、市场信息掌握不充分的主体，也存在对碳排放权交易机制认识深刻、理性程度高、市场信息获取及时充分的主体。宏观经济聚合模型考虑主体的理性和信息差异性，可支持决策部门“因人施策”，有效提升对碳排放权交易主体的差异化引导和精准化监管能力。

六是合理体现主体的动态学习和演化能力，有利于加速推动碳中和实践。以位于图 5 正中的核心模型（上述 IIASA 模型体系的开发基于的最初版本单一模型）为例，能源需求主体能够学习外界环境恶化程度以及减排成本的变化，据此改变行为；能源供给主体能进一步了解国家能源战略变化，更好地围绕能源转型进行商业决策；能源政策决策者可基于碳中和政策目标和实践效果，提高政策制定水平。IIASA 模型体系中的核心模型通过充分考虑不同主体的动态学习和演化能力，更好地体现碳减排目标的实现。

本图由作者根据 IIASA 网站关于其模型、工具、数据库的介绍，以及期刊论文、项目论文、工作论文等整理而来。

虽然 ABM 有很多传统模型不具备的优势，但也存在一些不足，例如 ABM 的所有参数基本都需要通过实证研究估计，数据收集、整理和运算工作更为繁重（张莹，2017）。另外，由于模型基于演化且高度复杂，往往需要较长的求解时间，一些模拟结果可能不易被充分解释。

四、结论与建议

面向碳中和转型过程中的政策、技术以及市场等风险可被金融市场复杂的交互关系放大，最终可能对整个金融体系构成系统性影响。目前，我国的综合评估模型大多由能源、环境领域专家开发，主要刻画经济系统与能源、环境系统密切关联的部分，缺乏对金融体系的细致表达，无法很好的模拟气候变化引起的系统性金融风险，不便于灵活增加绿色金融等新主题，满足相关政策分析需求。为支持精细化碳中和、绿色金融政策分析，有必要借鉴国际国内已有建模经验，系统建立和完善我国的基于主体模型，探索碳中和成本最小化路径，保证相关能源和金融政策合理可靠。基于此，本文提出以下七点具体模型开发建议。

一是模型至少应包含经济金融系统模型、能源需求模型、能源供给模型、气候环境生态系统模型四个子模块。经济金融子模块包括对人口、资本、技术、投融资等主要方面的趋势判断，展望未来 GDP 增长路径，进一步把 GDP 的总量分解为各部门的经济金融活动。能源需求子模块用于进一步完整刻画经济金融系统中的生产、消费、投资过程涉及的能源服务需求。能源供给子模块主要针对各类能源需求，计算匹配供给方案。气候环境生态系统子模块主要用来计算生产、消费、投资带来的温室气体和其它污染物排放，科学评估其在自然系统中扩散及其对所有主体的影响，折算出不同主体的经济代价，作为各主体的环境成本约束。

二是组织来自经济金融、能源、环境等领域的专家团队。选拔专家的标准包括：能把握相关领域的主要矛盾，划出专业子模型的边界，判断建模的大致方向；能基于专业经验，在建模技术路线选择上扬长避短；熟悉模型与现实之间的一致与不匹配之处，使模型更符合现实。

三是定期开展大规模针对性调查统计，以此校准和更新模型，提高模型结果的合理性。需要对模型中的敏感型参数，例如碳交易的需求价格弹性、各行业的绿色信贷需求缺口、绿色债券收益率和违约率等，设计专门调查统计项目，定期保质保量收集数据。对其它结果不敏感型参数，可更自由地基于专家经验、计量估计、模型模拟、文献参考等方式来取值。

四是建立决策层与建模专家团队的持续反馈改进机制。决策层需要在三个层面帮助把关模型质量：第一，在模型体系整体输出结果层面，判断相关结果是否合理；第二，帮助判断经济金融系统子模型、能源系统子模型以及气候环境生态系统子模型的输出结果及其相互关系是否合理；第三，帮助把关各子模型内部对相应系统动力机制的刻画是否逻辑自洽，关键参数的校准或估计是否严谨可靠。

五是围绕模型输出结果进行可靠性评估。现实中气候变化及其风险和经济成本都具有不确定性，模型所选碳减排情景也可能与现实不尽契合，这些都会影响模型

输出的可靠性，应对此进行可靠性评估。通常，模型 20 年以上长期模拟分析结果比中短期结果可靠，全球或以洲为区域单位的平均结果远比更小区域单位的平均结果可靠，五年以上的模拟分析比一年以内的事件模拟分析更可靠，大量主体平均结果远比个体结果可靠(Wu et al, 2021)。

六是推进算法创新，降低模型求解复杂性。ABM 模型是一个基于演化的模型，如何较为有效快速的获得模型解集的分布是该类模型普遍存在的一个挑战。建模者对复杂系统理论和计算机编程的驾驭，是 ABM 成功的重要保障。建模专家团队可聘请计算机科学专家参与 ABM 模型的开发，协助气候和金融专家改进算法，提升模型计算效率。

七是充分发挥 ABM 的优势，并将其与传统综合评估模型有机结合。ABM 优势在于刻画微观主体决策和互动产生的宏观效应。目前综合评估模型仍是碳中和研究的主流模型，近期可根据 ABM 的优势，有针对性地选择上述子模型中，可被现实世界高质量大数据较好支持的复杂系统问题，例如能源供求市场、碳交易市场、绿色金融产品市场等问题，开始构建模型。通过将其与传统综合评估模型耦合校准，实现一个模型体系下宏、中、微观层面的模拟刻画，提高综合评估模型模拟的准确性。

参考文献

- [1] 何建坤、陈文颖, 应对气候变化研究方法学, 北京: 科学出版社, 2015年, 101-172。
- [2] 何建坤、张阿玲等, 应用于减排温室气体评价的 INET 能源系统模型, 清华大学学报: 自然科学版, 1996, 36: 68-73。
- [3] 姜克隽、胡秀莲、庄幸、刘强、朱松丽, 中国 2050 年的能源需求与 CO₂ 排放情景, 气候变化研究进展, 2008, 4 (005): 296-302。
- [4] 刘桂平, 央行副行长刘桂平: 强化绿色金融“三大功能” 做实做强“五大支柱”, 经济参考报, 2021-10-27 (A07)。
- [5] 刘丽艳, 计量经济学局限性研究, 财经问题研究, 2013 (3): 3-14。
- [6] 陆潘涛、韩亚龙、戴瀚程, 1.5°C 和 2°C 目标下中国交通部门 2050 年的节能减排协同效益, 北京大学学报 (自然科学版), 2021, 57, 517-528。
- [7] 齐天宇, 全球多区域动态能源经济模型 C-GEM 开发与应用, 清华大学博士论文, 2014 年。
- [8] 齐天宇、张希良、何建坤, 全球能源经济可计算一般均衡模型研究综述, 中国人口·资源与环境, 2016, 26 (8): 42-48。
- [9] 孙敬水、马淑琴, 计量经济学, 北京: 清华大学出版社, 2014。
- [10] 王冰雪、王国成, 微观行为视角下宏观经济模型研究新进展, 经济学动态, 2019, 11:126-139。
- [11] 王金南、严刚、姜克隽、刘兰翠、杨金田、葛察忠, 应对气候变化的中国碳税政策研究, 中国环境科学, 2009, 29 (01): 101-105。
- [12] 王敏, 计量经济学应用的一般方法和局限性研究, 时代金融, 2018 (35): 355-360。
- [13] 王信、匡小红、雷曜、姜晶晶、杨娉、李宏瑾、张晓艳, 气候相关金融风险——基于央行职能的分析, 中国人民银行工作论文 No. 2020/3。
- [14] 王遥、潘冬阳、彭俞超、梁希, 基于 DSGE 模型的绿色信贷激励政策研究, 金融研究, 2019, 473 (11): 1-18。
- [15] 魏一鸣、米志付、张皓, 气候变化综合评估模型研究新进展, 系统工程理论与实践, 2013, 33 (8): 1905-1915。
- [16] 魏泽洋、刘毅、宫曼莉、陈迪, 基于主体的建模方法在环境学科中的研究进展, 中国环境管理, 2020, 12 (01): 130-138。
- [17] 新华网, 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话, 2020 年 9 月 22 日, http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527647.htm。
- [18] 易纲, 货币政策要“稳”字当头 持续激发市场主体活力——中国人民银行行长易纲谈 2021 年金融热点问题, 新华网, 2021 年 1 月 8 日, http://www.xinhuanet.com/fortune/2021-01/08/c_1126962087.htm
- [19] 于智为, 能源系统复杂性与建模方法研究, 清华大学博士论文, 2010 年。
- [20] 于智为、胡小军、张希良、何建坤, 能源系统复杂性管理建模方法研究, 管理学报, 2008 (05): 670-673。
- [21] 张阿玲、郑淮、何建坤, 适合中国国情的经济、能源、环境(3E)模型, 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42 (12): 1616-1620。
- [22] 张达, 中国分区能源经济模型(C-REM)的开发与应用, 清华大学博士论文, 2014 年。
- [23] 张鸿宇、黄晓丹、张达、张希良, 加速能源转型的经济社会效益评估, 中国科学院院刊, 2021, 36 (09): 1039-1048。
- [24] 张莹, 气候变化问题经济分析方法的研究进展和发展方向, 城市与环境研究, 2017 (2): 82-102。
- [25] Adams, P., J. Dixon, and M. Horridge. “The Victoria University Regional Model (VURM): Technical Documentation, Version 1.0”, Working Paper, Centre of Policy Studies (CoPS), Victoria University, 2015.
- [26] Annicchiarico, B. and Di Dio, F. “GHG emissions control and monetary policy”, Environmental and Resource Economics, 2017, 67(4):823-851.
- [27] Barton, D. C., E.D. Eidson, D.A. Schoenwald, K.L. Stamber, and R. Reinert. “Aspen-EE: An Agent-based Model of Infrastructure Interdependency”, Sandia Report, Sandia National Laboratories, December 2000.
- [28] Basu, N., R. Pryor, and T. Quint. “ASPEN: A Microsimulation Model of the Economy”, Computational Economics, 1998, 12(3): 223-241.
- [29] Cai, Y., D. Newth, J. Finnigan, and D. Gunasekera. “A Hybrid Energy-Economy Model for Global Integrated Assessment of Climate Change, Carbon Mitigation and Energy Transformation”, Applied Energy, 2015, 148:381-395.
- [30] Calvin, K., B. L. Lamberty, L. Clarke, et al. “The SSP4: A World of Deepening Inequality”, Global Environmental Change, 2017, 42: 284-296.
- [31] Calvin, K., P. Patel, L. Clarke, et al. “GCAM V5.1: Representing the Linkages between Energy, Water, Land, Climate, and Economic Systems”, Geoscientific Model Development, 2019, 12(2): 677-698.
- [32] Cambridge Econometrics. E3ME projects, 2021-12-16, <https://www.e3me.com/how/projects/>
- [33] Cao, J., H. Dai, S. Li, et al. “The general equilibrium impacts of carbon tax policy in China: A multi-model comparison”, Energy Economics, 2021, 99:105284.
- [34] Castro, J., S. Drews, F. Exadaktylos, J. Foramitti, F. Klein, T. Konc, I. Savin, and J.V.D. Bergh. “A Review of Agent-based Modelling of Climate-Energy Policy”, WIREs Climate Change, 2020, 11: e647.
- [35] Cincotti, S., M. Raberto, and A. Teglioni. “Credit Money and Macroeconomic Instability in the Agent-Based Model

- and Simulator Eurace”, *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 2010, 4(2010-26):1-32.
- [36] Climate Interactive. EN-ROADS Climate Change Solution Simulator, 2021-12-16, <https://www.climateinteractive.org/tools/en-roads/>
- [37] Dai, H., X. Xie, Y. Xie, J. Liu, and T. Masui. “Green Growth: The Economic Impacts of Large-Scale Renewable Energy Development in China”, *Applied Energy*, 2016, 162: 435-449.
- [38] Diluiso, F., B. Annicchiarico, M. Kalkuhl, and J. Minx. “Climate Actions and Stranded Assets: The Role of Financial Regulation and Monetary Policy”, CESifo Working Paper (2020) No. 8486.
- [39] DOE. Current Projects|Earth and Environmental System Modeling, 2021-12-16, <https://climatemodeling.science.energy.gov/projects>
- [40] Dong, H., H. Dai, L. Dong, et al. “Pursuing Air Pollutant Co-Benefits of CO₂ Mitigation in China: A Provincial Levelled Analysis”, *Applied Energy*, 2015, 144: 165-174.
- [41] Economides, G. and Xepapadeas, A. “Monetary policy under climate change”, CESifo Working Paper Series, 2018, No. 7021.
- [42] EPA. Science Inventory, 2021-12-16, <https://cfpub.epa.gov/si/>
- [43] Epstein, J.M. “Agent-based Computational Models and Generative Social Science”, *Complexity*, 1999, 4: 41-60.
- [44] European Commission. “Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (‘European Climate Law’), 2021-07-09a, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>
- [45] European Commission. Modelling Tools For EU Analysis, 2021-12-16b, https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/economic-analysis/modelling-tools-eu-analysis_en
- [46] Faber, A., V. Marco, and P. Janssen. “Exploring Domestic Micro-Cogeneration in the Netherlands: An Agent-based Demand Model for Technology Diffusion”, *Energy Policy*, 2015, 38(6): 2763-2775.
- [47] Fagiolo, G. and Roventini, A. “Macroeconomic Policy in DSGE and Agent-Based Models Redux: New Developments and Challenges Ahead”, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2017, 20, issue 1.
- [48] Farmer, J.D., C. Hepburn, P. Mealy, and A. Teytelboym. “A Third Wave in the Economics of Climate Change”, *Environmental and Resource Economics*, 2015, 62:329-357.
- [49] Fernando, R., W. Liu, and W.J. Mckibbin. “Global economic impacts of climate shocks, climate policy and changes in climate risk assessment”, *SSRN Electronic Journal*, 2021, 10.2139/ssrn.3817111.
- [50] Fricko, O., P. Havlik, J. Rogelj, et al. “The Marker Quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A Middle-of-the-road Scenario for the 21st Century”, *Global Environmental Change*, 2017, 42: 251-267.
- [51] Fujimori, S., T. Hasegawa, T. Masui, et al. “SSP3: AIM Implementation of Shared Socioeconomic Pathways”, *Global Environmental Change*, 2017, 42: 268-283.
- [52] Hilaire, J. and Bertram, C. “The Remind-Magpie Model and Scenarios for Transition Risk Analysis”, A report prepared by PIK for the UNEP-FI Banking Pilot project (Phase 2), 2020-11-02.
- [53] Hillebrand, E., F. Pretis, and T. Proietti. “Econometric Models of Climate Change: Introduction by the guest editors”, *Journal of Econometrics*, 2020, 214(1):1-5.
- [54] IEA. Energy Technology Perspectives 2020, 2020-09, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- [55] IIASA. Science into Policy, 2021-12-16a, https://iiasa.ac.at/web/home/research/sciencepolicy/Science_into_Policy.html.
- [56] IIASA. Scaling-up green finance to achieve the climate and energy targets (GreenFin), 2021-02-11b, <https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/AdvancedSystemsAnalysis/GREENFIN.html>
- [57] Jin, Y., X. Liu, X. Chen, H. Dai. “Allowance allocation matters in China's carbon emissions trading system”, *Energy Economics*, 2020, 92: 105012.
- [58] Kainuma, M., Y. Matsuoka, and T. Morita. “Analysis of post-Kyoto scenarios: the AIM model. In *Economic Modeling of Climate Change: OECD Workshop Report*”, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1998.
- [59] Klaassen, G. and Riahi, K. “Internalizing Externalities of Electricity Generation: An Analysis with Message-Macro”, *Energy Policy*, 2007, 35(2): 815-827.
- [60] Kriegler, E., N. Bauer, A. Popp, et al. “Fossil-Fueled Development (SSP5): An Energy and Resource Intensive Scenario for the 21st Century”, *Global Environmental Change*, 2017, 42: 297-315.
- [61] Landry, E., C.A. Schlosser, Y.-H.H. Chen, J. Reilly, and A. Sokolov. “MIT Scenarios for Assessing Climate-Related Financial Risk”, *Joint Program Report (2019) No. 339*, 72 p.
- [62] Li, N., W. Chen, P. Rafaj, et al. “Air Quality Improvement Co-benefits of Low-Carbon Pathways toward Well Below the 2°C Climate Target in China”, *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(10): 5576-5584.
- [63] 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.
- [64] Mercure, JF., H. Pollitt, N. Edwards, et al. “Environmental impact assessment for climate change policy with the simulation-based integrated assessment model E3ME-FTT-GENIE”, *Energy Strategy Reviews*, 2018, 20: 195-208.
- [65] Mercure, JF., P. Salas, P. Vercoulen, et al. “Reframing incentives for climate policy action”, *Nature Energy*, 2021, 6:1133-1143.
- [66] Monasterolo, I. and Raberto, M. “The EIRIN Flow-of-funds Behavioural Model of Green Fiscal Policies and Green Sovereign Bonds”, *Ecological Economics*, 2018, 144: 228-243.
- [67] Net Zero Tracker. Net Zero Data, 2021-12-01, <https://www.zerotracker.net/>
- [68] NIES. About AIM, 2022-1-13, http://www-iam.nies.go.jp/aim/about_us/index.html

- [69] Nordhaus, W. “Estimates of the Social Cost of Carbon: Background and Results from the RICE-2011 Model”, NBER Working Papers, 2011, No. 17540.
- [70] Nordhaus, W. “Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE Model, 1992-2017”, *Climate Change*, 2018, 148(4): 623-640.
- [71] Olson, D. L. “Software Process Simulation”, *Encyclopedia of Information Systems*, 2003: 143-153.
- [72] PBL. IMAGE Applications, 2021-12-16, <https://models.pbl.nl/image/index.php/Applications>.
- [73] PIK. Introduction of REMIND Model, 2021-12-16, <https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/transformation-pathways/models/remind>
- [74] Punzi, M. T. “Role of bank lending in financing green projects: A dynamic stochastic general equilibrium approach”, ADBI Working Paper, 2018, No.881.
- [75] Ranger, N., O. Mahul, and I. Monasterolo. “Managing the Financial Risks of Climate Change and Pandemics: What We Know (and Don't Know)”, *One Earth*, 2021, 4(10):1375-1385.
- [76] Ren, M., P. Lu, X. Liu, et al. “Decarbonizing China's Iron and Steel Industry from the Supply and Demand Sides for Carbon Neutrality”, *Applied Energy*, 2021, 298: 117209.
- [77] Riahi, K., D. Van Vuuren, E. Kriegler, et al. “The Shared Socioeconomic Pathways and Their Energy, Land Use, and Greenhouse Gas Emissions Implications: An Overview”, *Global Environmental Change*, 2017, 42: 153-168.
- [78] Sbordone, A.M., A. Tambalotti, K. Rao, and K.J. Walsh. “Policy Analysis Using DSGE Models: An Introduction” *Economic Policy Review*, 2010, 16(2), 21 pages.
- [79] Slepoy, N.A. and Pryor, R.J. “Analysis of Price Equilibriums in the Aspen Economic Model under Various Purchasing Methods”, Sandia Report, Sandia National Laboratories, November 2002.
- [80] Sokolov, A.P., C.A. Schlosser, S. Dutkiewicz, et al. “The MIT Integrated Global System Model (IGSM) Version 2: Model Description and Baseline Evaluation”, Joint Program Report Series Report 124, 2005-07.
- [81] Sprigg, J.A. and Ehlen, M.A. “Full Employment and Competition in the Aspen Economic Model: Implications for Modeling Acts of Terrorism”, Sandia report, Sandia National Laboratories, November 2004.
- [82] Stehfest, E., D. Van Vuuren, T. Kram, et al. “Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0: Model description and policy applications”, Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), 2014, https://dSPACE.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/308545/PBL_2014_Integrated_Assessment_of_Global_Environmental_Change_with_IMAGE_30_735.pdf?sequence=1
- [83] UNFCCC. “The Paris Agreement”, 2015, https://unfccc.int/sites/default/files/chinese_paris_agreement.pdf
- [84] Van der Zwaan, B.C.C., R. Gerlagh, G. Klaassen, and L. Schrattenholze. “Endogenous Technological Change in Climate Change Modelling”, *Energy Economics*, 2002, 24(1): 1-19.
- [85] Van Vuuren, D., E. Stehfest, D.E.H.J. Gernaat, et al. “Energy, Land-Use and Greenhouse Gas Emissions Trajectories under a Green Growth Paradigm”, *Global Environmental Change*, 2017, 42: 237-250.
- [86] Wang, H., W. Chen, and J. Shi. “Low Carbon Transition of Global Building Sector Under 2- and 1.5-Degree Targets”, *Applied Energy*, 2018, 222(April): 148-157.
- [87] Wei, Y., R. Han, O. Liang, et al. “An Integrated Assessment of INDCs under Shared Socioeconomic Pathways: An Implementation of C³IAM”, *Nat Hazards*, 2018, 92: 585-618.
- [88] Wu, R., J. Hudson, K. Liu, et al. “Climate change investing: an ‘impact mechanism’ framework”, UBS Global Research, 18 August 2021.
- [89] Xie, Y., H. Dai, H. Dong, T. Hanaoka, and T. Masui. “Economic Impacts from PM_{2.5} Pollution-Related Health Effects in China: A Provincial-Level Analysis”, *Environmental Science and Technology*, 2016, 50(9): 4836-4843.
- [90] Zhang, S. and W. Chen. “China's energy transition pathway in a carbon neutral vision”, *Engineering*, available online 27 October 2021.
- [91] Zhang, S., Y. Wu, X. Liu, J. Qian, J. Chen, L. Han, H. Dai. “Co-benefits of deep carbon reduction on air quality and health improvement in Sichuan Province of China”, *Environmental Research Letters*, 2021, 16(9), 095011.