

气候变化问题经济分析方法的研究进展和发展方向

张莹

摘要 气候变化是一个全球尺度的环境问题，同时也是一个经济问题。作者梳理了气候变化问题经济分析主要采用的模型工具，回顾了不同类型模型的发展历程并总结其结构特点。现有经济分析方法和模型工具无法合理地解决各种不确定性问题，也难以准确刻画技术进步以及极端气候灾害带来的经济损失和损害，因此有可能低估气候变化给全球经济带来的负面影响；不同分析所使用的贴现率水平也存在很大的差异；此外，现有的分析框架无法考虑不同地区和不同个体在面对气候变化问题时存在的异质性。为了解决上述问题，近年来，经济学者开始尝试将分析传统经济问题时使用的动态一般均衡模型和智能体模型等新工具用于分析气候变化问题，评估应对气候变化行动产生的成本和收益。展望未来，中国应积极开发具有自主知识产权的适用于研究气候变化问题的经济分析模型工具，根据中国实际情况校准获得的关键参数和数据，将评估结果与国外模型的模拟结果进行对标，并建立相应的参数数据库。

关键词 气候变化经济学 综合评估模型 动态随机一般均衡模型 智能体模型 损害函数

[中图分类号] F205; F069.9 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X (2017) 02-0082-21

一、引言

气候变化会给人类生活及地球生态系统带来巨大的影响，因而全球性的气候变化

【基金项目】 国家社会科学基金项目“中国西部农村电气化及分布式可再生能源发展的政策分析”（批准号：13CJL055）；国家重大研究计划（973）项目“地球工程的综合影响评价和国际治理研究”（批准号：2015CB953603）。

【作者简介】 张莹（1980-），中国社会科学院城市发展与环境研究所副研究员，邮政编码：100028。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

问题已成为非常重要的科学和国际政治议题。气候变化问题有别于金融、贸易、产业等传统经济学议题，所涉及的范围和领域非常广泛且复杂，包括外部性、公共物品、共享资源等多方面的问题。开展气候变化经济学研究的根本目的是为气候变化提供经济学理论支撑和实证分析支持，并为解决该问题（如减缓和适应气候变化、地球工程手段等）提供规范的政策分析工具和指导性结论。一般认为威廉姆斯·诺德豪斯是最早采用现代经济学分析方法来研究气候变化问题的经济学家（Nordhaus, 1975、1977）。之后，前世界银行首席经济学家尼古拉斯·斯特恩在2006年发布的《斯特恩报告》（Stern Review）则被视为是奠定气候变化经济学基础的著作（Stern, 2006），他力推的气候变化经济学概念和分析方法对全球应对气候变化的研究和国际气候谈判进程都产生了深远的影响。斯特恩曾指出，对气候变化的经济分析不同于其他的经济学问题，其涵盖范围囊括增长和发展、产业经济学、创新和技术进步、制度经济学、国际经济学、人口和移民问题、公共财政、信息经济学和不确定性、环境和公共经济学等，所以他认为对于气候变化的经济分析需要“从全球角度出发，在较长的时间尺度上，重点考虑气候变化带来的经济风险和不确定性，并探究出现重要的非边际（Non-marginal）变化的可能性”（Stern, 2007）。

经过将近半个世纪的发展，气候变化经济学在众多经济学研究者的推动下取得了显著的发展，在实证分析方法、气候—经济学系统的数值模拟以及理论模型构建等方面都取得了长足的进步（Nordhaus, 1992）。例如，经济学家们研究了各种不确定背景下对碳排放的管制（Weitzman, 1974; Hoel and Karp, 2001），对气候变化引起的灾害性结果进行成本收益分析（Weitzman, 2011; Martin and Pindyck, 2014），探讨了气候变化产生的冲突影响（Hsiang et al., 2011; Cane et al., 2014）以及气候变化对农业的影响（Schlenker et al., 2005; Lobell et al., 2014），等等。在这些研究的基础上，世界各地的研究者们陆续构建出一些研究气候变化问题的综合评估模型（Integrated Assessment Model, IAM），将经济系统和气候系统整合在一个模型框架内。这种模型成为政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）分析气候变化政策效果的主要工具（Clarke et al., 2009），也是目前气候政策研究的主流工具。IPCC发布的几次评估报告都介绍了大量用于分析气候经济问题的综合评估模型。一些国家在对其国内气候变化政策进行经济评估时也多采用这类模型。这些IAM的经济系统仍主要采用传统经济学的假设和分析方法，探究气候变化问题中的减排、适应、融资等具体议题对传统经济决策产生的影响。

近年来，中国应对气候变化的态度日趋积极，已经成为全球气候治理的领导者之一。为保证气候政策管理决策的科学性，应高度关注气候变化经济分析领域的研究进展，考虑如何在国际气候谈判和国内气候监管中合理利用气候变化经济评估的研究成果与结论。本文将从经济分析的视角出发，总结目前主流的IAM在经济分析方法应用方面所面临的一些问题，并介绍未来可探索的发展方向。文章的第二部分介绍了气候变化综合评估模型的发展历程并总结其主要特点，侧重于介绍模型中的经济分析方

法和工具；第三部分归纳和总结了气候变化问题经济分析方法存在的主要问题和局限性；第四部分分析了气候变化经济学分析方法在中国的发展和應用；第五部分展望了气候变化经济学分析方法的未来发展方向；第六部分是结论和讨论。

二、气候变化综合评估模型的发展历程及特点简介

Nordhaus (1975) 开创性地将经济系统和气候系统整合在一个模型框架内, 并用来分析气候政策的效果, 此举标志着经典的经济学理论用于分析气候问题的发端。尽管此类模型也包括气候模拟的部分, 但其核心在于利用经济学原理评估和比较不同的减排方案和温升情景面临的收益和成本。IPCC 发布的首次评估报告推动了各类以经济评估为目的的综合评估模型在气候领域的快速发展, 一批经济分析模型相继问世。其中具有代表性的模型包括 Peck 和 Teisberg (1992) 的循环经济技术评价 (Circular Economy Technology Assessment, CETA) 模型、Nordhaus (1994) 的气候变化社会经济影响动态综合 (Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy, DICE) 模型、Manne 等 (1995) 的地区和全球影响估计模型 (Model for Estimating Regional and Global Effects, MERGE)、Nordhaus 和 Yang (1996) 的区域集成气候变化经济影响模型 (Regional Integrated Model of Climate and the Economy, RICE)、Hope (1993) 的温室效应政策分析 (Policy Analysis of the Greenhouse Effect, PAGE) 模型以及 Tol (1997) 的气候问题的不确定性、谈判和分配框架 (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution, FUND) 模型等。这些早期的 IAM 的经济分析模块基本上都是根据经典经济增长文献, 采用传统的概念和分析工具建立起来的。

IAM 同一般经济模型最大的区别在于其需要纳入气候系统, 用模型工具对碳循环、水循环等复杂地球系统模式进行描述和刻画。其中, 排放和全球温升之间的关系是气候模块最为核心的部分。然而, 排放和温升之间的关系存在着很大的不确定性。在研究气候变化的综合评估模型中, 经济分析模块一般都会假定存在一个代表性主体 (即需要进行气候政策决策的地区或全球)。从经济学的角度来分析, 气候问题的决策可以被理解为跨期最优化问题, 因此该主体需要决定各种资源在减排行动 (或发展清洁能源) 以及常规经济发展 (或消费) 之间的分配情况。

IPCC (2001) 发布的第 3 次评估报告将分析气候问题的综合评估模型分为两大类, 分别为政策优化模型 (Policy Optimization Models, POM) 和政策评估模型 (Policy Evaluation Models, PEM)。这两类模型的经济分析方法和思路存在着明显的差异: 政策优化模型主要是对气候变化减缓和最优化气候政策进行完整的成本收益分析, 一般涉及求解最优化问题, 如温室气体减排目标的确定, 温室气体减排路径、温室气体减排义务的分配, 碳税和碳价的确定等; 而政策评估模型主要考察的是某种气候政策在实现一定的减排目标时的成本效率, 这类模型并无法确定哪一种气候政策所带来的社会福利最大或者产生的社会成本最小, 但是可以对未来各种可能排放情景下

的不同社会成本进行估算和比较。20世纪90年代以来，伴随国际社会对气候问题的日益重视，气候政策的各种经济分析方法和模型也迎来了发展高峰，除了著名的DICE模型、FUND模型和PAGE模型之外，新的经济政策优化模型和政策评估模型也相继被开发出来，例如Bosetti等（2008、2009）的世界诱导技术进步（World Induced Technical Change Hybrid, WITCH）综合模型和Paltsev等（2005）的排放预测和政策分析（Emissions Prediction and Policy Analysis, EPPA）模型。

随着IAM数量不断增多，这些模型之间的区别和联系开始受到关注。有些学者认为应该在相同的假设条件、参数和减排情景下对不同模型的估计结果进行比较。IPCC的第5次评估报告针对气候变化减缓问题，分析了31个政策评估模型经济模块的特点和情景数据库，发现这些模型均未考虑气候系统对经济系统中市场供需变化的反馈效应，并且大多数没有考虑气候损害函数（Krey et al., 2014）。与此不同，政策优化模型一般会设定一个损害函数，用来模拟全球气温的升高对要素生产率造成的不利影响或对经济系统中的资本积累过程产生损害的情况。正确设定损害函数形式是气候变化政策分析的重点任务。很多自下而上的IAM将气候变化产生的各种影响通过不同的损害函数进行刻画，一般将气候变化引起的经济损失视为大气中温室气体浓度上升以及全球温度升高的函数，进而对这些函数的模拟结果进行加总，得到气候变化带来的经济总损失并评估二氧化碳排放的社会成本（Social Cost of Carbon, SCC）。英国和美国政府都曾召集一批气候经济学家应用此类模型来估算SCC，包括不断更新的DICE模型（Nordhaus and Sztorc, 2013）、^①FUND模型（Anthoff and Tol, 2013）和PAGE模型（Hope, 2013），并将其模拟结果作为评估气候变化政策的参考依据（Metcalf and Stock, 2015）。

大多数政策评估模型都会使用复杂的投入—产出数据来构建一般均衡模型或部分均衡模型，将其用于分析不同决策对经济系统产生的影响，因此很多IAM的经济系统会使用可计算一般均衡（Computable General Equilibrium, CGE）模型来进行模拟和分析，例如Eboli等（2010）的跨期可计算均衡系统（Intertemporal Computable Equilibrium System, ICES）、Van（2010）的环境影响和可持续应用一般均衡（Environmental Impact and Sustainability Applied General Equilibrium, ENVISAGE）模型，以及Luderer等（2013）的投资与发展区域模型（Regional Model of Investments and Development, REMIND）。而另外一些模型则建立部分均衡经济模型来进行分析，例如FUND模型和Stehfest等（2014）的全球环境评估综合模型（Integrated Model to Assess the Global Environment, IMAGE）。还有一些模型采用的是宏观经济分析中的递归动态一般均衡分析方法，例如EPPA模型。和很多经典的宏观经济模型一样，气候变化经济模型或者是对跨期最优化进行求解，例如FUND模型；或者通过递归动态方

^① 该模型现已更新到2016年版，最新版本可参见威廉姆斯·诺德豪斯的个人主页（<http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/>）。

法进行求解,例如 IMAGE 模型;或者同时采用这两种求解方法,例如 Messner 和 Strubegger (1995) 的能源供给策略替代及其环境影响模型 (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact, MESSAGE)。

技术进步是影响经济增长的一个重要因素,因此在现代经济增长理论中,对技术进步的处理以及对技术进步与经济增长关系的研究也是一个重要的内容。不同的 IAM 在进行经济分析时对技术进步的处理也存在着差异,有的将技术进步带来的效率提升视为外生给定,有的则认为通过加大投资可以加快技术进步的速度而将技术进步内生。表 1 从类型、地区范围、损害函数形式和技术处理等方面总结了重要 IAM 的主要特点。

表 1 重要的气候变化综合评估模型及其特点总结

模型	模型类型	地区	损害函数形式	技术处理
DICE (DICE - 2013R)	POM	全球模型	线性二次型函数	外生;后备技术
RICE (RICE - 2010)	POM	12	对每个地区设定专门的二次型函数	外生;后备技术
FEEM - RICE	POM	10	对每个地区设定专门的二次型函数	内生,研发诱导和学习诱导
FUND	POM	16	很复杂,对于不同地区或国家采取不同的损害函数形式	内生,学习诱导
MERGE	POM	比较灵活	二次型函数形式,考虑了气候灾难	外生
PAGE09	PEM	8	没有明确考虑	内生,学习诱导
ICAM	PEM	17	没有明确考虑	内生
ENTICE	POM	全球模型	线性二次型	内生
WITCH	POM	12	二次型函数形式	内生,学习诱导和研发诱导

资料来源:作者整理。

三、气候变化问题经济分析方法存在的主要问题和局限性

尽管 IAM 是目前最常用的气候变化问题经济分析工具,但其经济模型部分仍面临着一些尚未解决的问题。这些问题对模拟结果的可靠性产生了重要的影响,也导致近年来对气候变化经济模型的争议和反对意见越来越多。2013 年,当美国发布了基于三个 IAM 得出的 SCC 估计结果后,这些质疑也达到了顶点,几位全球著名的经济学家,如 Stern (2013)、Pindyck (2013) 和 Weitzman (2103) 都撰文剖析了主流 IAM 在核算 SCC 以及其他与应对气候变化有关的成本收益时存在的难以解决的问题和局限性。具体而言,这些模型和分析方法所存在的主要问题和局限性主要包括以下六个方面。

(一) 不确定性

IAM 一般需要同时考虑气候系统和经济系统以及两者之间的反馈关系,但这两

个系统的变化情况都面临着极大的不确定性。这些不确定性主要包括以下几方面：一是气候变化作为一种自然过程具有不可预测的随机性；二是对一些价值度的主观判断，例如对贴现率的选择等；三是技术进步的不确定性，例如新技术的发展和技术产生的负面影响；四是人类行为的差异性，例如消费模式、能源使用方式的不确定性等；五是社会—经济—文化的差异性（魏一鸣等，2013）。

自然科学家 Roe 和 Baker（2007）已经证明了气候的敏感性具有极大的不确定性。^①同时，极端气候灾难出现的概率随着碳排放水平的提高而增加，这一概率虽然仍比较低，但也不可忽视。此外，过去大部分气候变化经济分析所使用的模型工具都是基于传统的经典经济学中的成本收益法，其基础是瘦尾分布。但经济学家 Weitzman（2009）已经证明了参数的不确定性会导致气候敏感性呈现厚尾分布，其经济意义表明减排行动所产生的经济收益在现实中往往是被低估的。如在著名的《斯特恩报告》中，作者所使用的模型工具对于这些极端气候灾害造成的风险和经济损失的估计结果都是低估的（Hepburn and Stern，2008）。

气候变化问题面临的各种不确定性给气候变化经济分析模型带来了巨大的挑战，这也影响了模型中最终成本和收益估算结果的准确性。为了解决这些不确定性，必须更为准确地度量气候变化影响的概率分布、人类对气候变化的风险厌恶程度以及对社会福利的时间偏好。

（二）技术进步

全球应对气候变化的根本目标是降低温室气体排放，而技术进步将对未来的能源需求和碳排放水平产生显著影响。技术进步能够降低清洁能源技术利用的成本，从而降低减排成本。要通过模型合理估计长期减排成本，关于各种新技术的发展情况以及相应的成本就成为需要考虑的关键因素。然而，技术的发展进程同样充满着各种不确定性，在分析气候变化问题对经济所产生的具体影响时，如何准确刻画技术进步也是有待解决的难点之一。

在目前的气候变化经济学分析框架中，主要有外生和内生两种处理技术进步的方式（Gillingham et al.，2008）。在一些较早的气候政策优化模型中（如 DICE 模型、FUND 模型和 PAGE 模型），都是以索洛增长模型为基础，同时假设规模回报递减以及技术进步是外生给定的。这主要是考虑到技术进步的经济模型会导致规模回报递增，这样会产生多重均衡，难以得到唯一的最优化解。这些模型一般并没有关于技术进步的详细设定，仅仅简单地将技术进步处理为外生设定一个自发能源效率改进率（Autonomous Energy Efficiency Improvement, AEEI）。而其他的一些模型对于不同的能源技术（包括煤炭、天然气、核能、各种可再生能源、生物燃料以及碳捕获与封存技术等）都有着详细的描述，但也都同样假定技术进步水平是外生给定的。随着时间的推移，后来发展建立的一些模型工具，如 Popp（2004）的 DICE 模型技术变化内

^① 注：气候的敏感性指大气层中的 CO₂ 浓度提高一倍所引起的全球气温平均升高幅度。

生化版本 (Endogenous Technological Change in the DICE, ENTICE)、技术进步内生化的 RICE 模型版本 FEEM - RICE 模型 (Dietz and Stern, 2015)、PAGE 模型 09 版、WITCH 模型和 REMIND 模型都开始假定技术进步是内生的, 假设技术进步可以通过“干中学” (Learning-by-doing) 诱导 (例如 MESSAGE 模型) 或者是通过价格水平诱导 (例如 EPPA 模型)。在这些气候变化经济模型中, 一般都对能源部门有着详细的刻画 (例如 IMAGE 模型)。但是对于大部分气候变化经济模型, 尤其是对 POM 而言, 其技术部分的设定还存在着很大的改进空间。

技术进步过程具有路径依赖性, 如果技术研发投资投入传统化石能源领域的份额过大, 就较难保证经济转入清洁、低碳的发展路径 (Acemoglu et al., 2012; Smulders and Di Maria, 2012; Aghion et al., 2016)。技术扩散和技术的路径依赖性及互补性目前在气候变化经济模型中也尚未得到较好处理。一般在气候变化经济模型中, 都会简单地使用全球范围的学习曲线来模拟技术进步, 但这背后的假设条件是技术能够在全世界范围内完美扩散和溢出 (Waisman et al., 2012)。这些模型分析工具对于技术进步的处理面临的一个更大问题在于不同的技术有着不同的进步和改进率, 但大部分模型都无法采用实证分析方法来准确预测不同技术的进步情况 (Farmer and Lafound, 2016)。

IPCC 最新发布的第 5 次气候评估报告提出, 大部分主流的气候变化经济评估模型所估计的结果显示清洁能源基础设施的成本 (剔除了成本收益后) 在未来一个世纪内仍然较难降低到低于传统化石能源的水平。但回顾历史, 通信、电力、计算和数据存储等领域的技术发展日新月异, 这些技术的成本在较短时期内就迅速下降到可以支持其被广泛普及的水平。因此也有观点认为当前主流的气候变化经济模型对技术进步的设定可能过度悲观, 需要对分析方法进行进一步的改善以更好地反映实际情况。

(三) 损害函数

要准确度量气候变化造成的社会成本, 就要合理设定损害函数的形式, 并根据损害函数得到气候造成损害的估算结果, 而对于损害函数的处理正是气候变化经济学所面临的又一难题。由于模型所面临的各种不确定性都会被反映到损害函数中, 因此很难设定出各界都认可的合理损害函数。现有气候变化经济分析模型一般都将观测时刻气候变化导致的经济损失处理为关于全球气温升高相对于一些基准提高幅度 (例如, 固定增幅达到 2℃ 或者二氧化碳的浓度增加一倍) 的凸函数形式。这样的设定具有一定的随意性, 然而截至目前, 很少有实证研究采用实际数据去对气候损害函数的形式进行估计。

气候变化造成的损害包括对劳动力、土地生产力、资本存量以及生物多样性等的不利影响。但气候变化导致的这些有形或无形的影响都很难被货币化或量化, 因此对其函数形式的确定和估算就难免具有随意性, 最后得到的估算和预测结果也可能是不可靠的。例如, Burke 等 (2015) 对七个关于气候损害函数的模型和研究进行了探究和讨论, 结果显示这些模型的估计结果差异性非常大。有些模型估计出的气候损害总

规模非常大 (Hope, 2013), 但有些模型 (如 DICE 模型等) 的估算结果则明显被低估 (Bulters et al., 2014)。

(四) 贴现率和公平性问题

气候变化是一个全球性的问题, 应该意识到在探究造成气候变化的责任和分配义务时必须考虑到公平性以及“共同但有区别的责任”原则, 但这些重要的问题在气候变化经济模型中却很难得到妥善处理。在对气候变化问题进行经济影响评估时, 几乎所有的模型都需要采用一定的贴现率来估计社会福利和消费水平随时间的变化情况。可以说, 贴现率在气候政策分析中起着决定性作用, 从本质上来说也体现了对代际公平的考量。但是, 贴现率的取值一直存在着较多争议。

首先, 贴现率的取值对于最后的分析结果有着重要的影响, 但目前对于气候政策分析中贴现率的选取却有兩種截然不同的意见。一些学者从伦理的角度出发, 强调气候的代际公平性, 所假设的纯时间偏好率和边际效用弹性都很低, 从而得出较低的贴现率。这意味着未来的气候灾难损害贴现到现在仍然会具有较高的时间价值, 因此他们主张尽快开始大幅减排以应对气候变化, 其中的代表研究就是《斯特恩报告》。但其他一些研究者更强调效率, 认为应该根据市场中消费者行为和资本的真实回报率来决定贴现率, 由此所确定的贴现水平相对较高, 这就意味着应对气候变化行动的迫切性并不是那么强。美国经济学家 Nordhaus (2007) 正是基于这样的思路提出了“气候政策斜坡”战略。出发点的分歧也导致了各种研究得出的最终结果差距相当大, 难以形成统一的意见。

其次, 对贴现率的处理没有考虑个人行为的异质性, 虽然大部分学者均认为这种异质性对于政策的确定具有重要意义 (Brekke and Johansson-Stenmann, 2008; Gowdy, 2008)。相比于获得同等规模的收益, 人们对遭受损失会更为关切。传统经济学中的贴现率既可以用于度量收益, 也可以用于度量损失。而气候变化经济分析中的贴现率则主要用于度量气候变化所带来的损失, 因此直接采用经济分析中常用的贴现率水平是否合适也值得商榷。

最后, 很多气候变化问题的经济分析并未考虑不确定性对贴现率的影响, 但由于不确定性条件下的贴现率水平同确定性等价消费的贴现率之间存在着明显的差异, 这种处理将导致估计结果存在明显的偏差 (Weitzman, 1998、2001; Hepburn et al., 2009; Farmer and Hepburn, 2014)。因此即使模型中效用函数具体形式的设置非常合理, 关于纯时间偏好率以及边际效用弹性参数的取值也会面临很多争议 (Groom et al., 2005; Atkinson et al., 2009; Pindyck, 2013; Heal and Millner, 2014; Kolstad et al., 2014)。如果贴现水平的取值存在问题, 气候政策分析模型就无法为政策制定提供可靠指导, 甚至可能得出错误结论。

(五) 对经济主体异质性的处理

不同的气候变化经济模型研究的尺度也有所不同, 有的是全球模型, 有的仅关注某一地区或国家。无论是哪类模型都需要处理研究范围内经济主体的异质性问题, 因

为气候变化所产生的经济影响在不同地区之间,乃至在同一个地区内的不同个体之间都存在很大差异。但是目前很多气候变化经济模型却将所有的经济主体进行统一处理,并将这些经济主体因气候变化而遭受的损失简单加总。统一处理的方式将低估发展中国家所遭受的损失,而在同样的气候变化条件下,发展中国家往往更加脆弱;同样地,这一处理方式也忽视了气候变化问题对不同群体所造成影响的差异性。IPCC 评估报告指出,传统的气候问题经济分析方法和工具并没有考虑各种政策对不同收入群体的分配影响,而只关注对宏观经济总成本的影响(Kunreuther et al., 2014)。

(六) 气候变化经济分析方法面临的其他问题

气候变化问题的经济分析采用了很多经典的经济学分析方法和基本假设,但是由于气候问题的特殊性,一些处理方法仍亟待改善。大部分气候政策优化模型的建立都是基于经济学中的经济均衡分析,很多模型的经济模块都采用了CGE模型,但是CGE模型的一个重要假设就是资本和劳动力市场都是出清的,因此经济体系一定会出现唯一的长期均衡。但是实证研究的结果并不能支撑该假设,因为在现实中,经济活动总会面临各种难以预计的冲击,可能会导致未预料到的经济衰退,而且由于滞后作用还可能导致长期失业(Blanchard and Summers, 1987)和“长期经济性停滞”(Hansen, 1939)现象的出现。各国政治体系和经济体制的不健全还可能导致资本分配不当(Harberger, 1959)。经济萧条和衰退并不满足均衡模型的基本假设,表明在现实中可能存在很多均衡状态,也可能并无法实现均衡。例如模型中关于技术的处理,如果假设规模报酬递增就可能多重均衡(Diamond, 1982; Cooper, 1999)。因此,气候变化经济分析模型不能简单地照搬经济学中基本的均衡分析框架而忽视现实情况。IPCC第5次报告也指出这些分析所使用的CGE模型可能会低估极端气候事件产生的影响(Krey et al., 2014)。

此外,大多数气候变化经济分析模型没有考虑货币、金融和银行等部门。^①但2007年爆发的全球性金融危机已经昭示了金融部门对经济活动周期以及排放和减缓的政策均非常重要。金融部门可能产生泡沫行为以及相应的违约风险(Allen and Gale, 2000),金融杠杆和信贷的扩张可能引致深度金融危机(Schularick and Taylor, 2012)。可以预计在气候变化综合评估模型的未来发展中,对金融部门的处理和改善的优先度仍比较低,但更好地理解金融部门对于减缓气候变化的作用将有助于这些分析工具得出更加准确的估计结果。气候政策有可能导致经济体系中出现“搁置资本”(Carbon Tracker Initiative, 2013),这会影响到公司和银行的资产负债情况;而很多绿色金融也需要完善的金融体系作为其坚实的支撑。

经济模型应该根据观察数据对一些关键参数进行严格的检验和校准。然而,很多气候变化经济模型的关键参数都直接采用其他经济分析中确定的值,如技术进步率、贴现率等,而没有将其放入气候模型重新进行“回溯检验”,以考察这些参数值是否

^① 只有少数学者考虑了不完整的金融体系,例如 Krussel 和 Smith (2009) 的研究。

适合于气候问题的分析。Weyant (2009) 认为这是由于部分社会经济时间序列数据无法获取；同时，世界经济不断发生结构变化，导致用同样的数据来估计结构参数和预测时可能会出现偏差。

四、气候变化经济学分析方法在中国的发展和应用

目前，中国在发展气候变化经济学模型分析方法方面明显落后于欧美发达国家。大多数发达国家都采用本国数据建立了自己的气候综合评估模型，并用于指导制定国家气候政策和应对气候变化的国际谈判。中国对于气候变化问题的自然科学研究已经具备了一定的科学积累，但是在经济分析和影响评估方面的研究却相对薄弱。

早在 2002 年，王灿等 (2002) 就按照成本分析和综合分析两个层次，分别介绍了投入产出模型、可计算一般均衡模型、宏观计量经济模型、工程经济模型、动态能源优化模型、能源系统模拟模型、综合评估模型等不同模型方法的特点及其在气候政策分析中的应用。Yang 等 (2016) 也对国际上主要的 IAM 团队及模型做了详细的介绍。目前，国内只有少数单位在自主研发此类模型，包括清华大学、中国科学院、中国社会科学院、国家发展和改革委员会能源研究所、中国人民大学、北京理工大学等。这些研究团队针对气候变化问题先后建立了一些经济分析模型用于指导和分析国家的气候政策制定。但是原创的气候政策评估分析模型极为有限，大部分模型都是沿用国外主流模型的框架，只是根据中国的实际情况调整了个别参数和方程。

近年来，一些国内学者也开始尝试对现有气候变化经济分析模型加以修正和延伸，例如王铮等 (2015) 从全球经济一般均衡和技术进步的角度出发，构建了一个新的气候变化经济学综合评估模型——资本—产业演化和气候变化集成评估 (Capital, Industrial Evolution and Climate Change Integrated Assessment, CIECIA) 模型，引入了分部门的内生过程技术进步机制。米志付 (2015) 将碳配额交易机制引入 RICE 模型框架，构建了气候与经济综合评估模型 (Integrated Model of Economy and Climate, IMEC)，并在同一个平台下比较了支付能力、平等主义、祖父原则及历史责任四种气候政策公平性原则对社会经济系统的影响。但应认识到，在气候变化经济学分析领域，中国扮演的仍是一个追赶者的角色。中国需要从本国国情出发，建立气候变化经济分析和综合评估模型，为中国评估应对气候变化的经济成本和收益提供技术支撑。

五、气候变化经济学分析方法的未来发展方向

在 2007 年全球性金融危机出现之后，经济学家开始反思传统的量化分析模型对于经济体系中的各种不确定性、极端事件、路径依赖、技术进步和创新以及异质性等问题的处理是否合理。在金融学分析方法和模型构建领域，各种新的研究思路和新的建模技术得到快速发展，其中有些问题同气候变化经济学所面临的挑战非常相似，因

此气候变化经济学也可以借鉴这些新的思路和发展 (Farmer and Hepburn, 2014), 甚至可以借鉴一些新的分析技术。本节将展望气候变化经济学分析方法未来可能的发展方向。

(一) 对现有气候变化经济分析工具的改善和发展

过去几十年内, 气候变化经济和政策分析最常用的工具是 IAM。这类模型用简洁的方式描述了气候系统和经济系统之间的关系, 尽管面临较多挑战和质疑, 但可以预计 IAM 仍是未来气候政策分析的主流工具。因此, 气候变化经济学分析方法的未来发展方向之一就是针对前文提及的问题去更新和修正各种气候经济模型和分析工具。例如, Dietz 和 Stern (2015) 在 DICE 模型的基础上将经济增长内生, 并在新的模型版本中考虑了灾难性气候损害; 还有一些学者试图将不可逆的气候临界点纳入随机 DICE 模型的框架内 (Lemoine and Traeger, 2014; Cai et al., 2015; Lontzek et al., 2015)。

另外, 从对不确定性的处理来看, 由于很多模型核心参数的不确定性外生于模型本身, 假定决策主体在模型中进行的是确定性决策, 不确定性就体现在这些核心参数的取值是以概率分布的形式反映到模型的估计结果上, 这也导致求解这类模型运算量非常大。因此, 对这类模型计算方法的探索也是目前较为活跃的发展方向之一。

(二) 动态随机一般均衡模型

最近, 有一批学者开始提出可以将宏观经济学中常用于分析货币政策的动态随机一般均衡 (Dynamic Stochastic General Equilibrium, DSGE) 模型用来分析气候问题 (Hassler and Krusell, 2012)。DSGE 模型具有“新凯恩斯主义”的特点, 例如模型中的主要假设包括名义刚性、短期货币非中性以及垄断竞争 (Galí, 2009)。相比较于 IAM 中常用的 CGE 模型, DSGE 模型对不确定性的处理更加复杂和细致。而 DSGE 模型在气候变化经济学领域的一大优势在于可以发展过去的气候变化经济模型。例如, 在 Kelly 和 Kolstad (1999、2001) 的研究基础上, Traeger (2014) 通过在模型框架内引入随机持久的冲击和贝叶斯学习过程对 DICE 模型进行了修正。

目前, 大部分 DSGE 模型的求解都需要较大的计算量, 而气候变化经济问题涉及多部门, 需要考虑多种不同的能源类型, 考察的时间维度也较长, 因此给 DSGE 模型的运用和普及带来了很大的困难。但随着计算能力和数值算法的进步, 求解这类复杂的 DSGE 模型成为可能 (Cai et al., 2012、2015)。与此同时, 一些新的算法, 如近似动态规划方法 (Powell, 2007) 也能帮助降低模型求解的复杂性。

DSGE 模型可以在一定程度上解决 IAM 在进行经济模拟时所面临的一些问题。经典的 DSGE 模型会通过一系列方程描述一个完全理性的代表性主体将会如何对未来的随机事件或结果形成期望。Traeger (2015) 尝试对 Golosov 等 (2014) 建立的 DSGE 模型进行扩展, 其气候模块更为完整 (包括标准的碳循环、辐射强迫和温度动态变化过程), 并考虑了 Epstein-Zin 偏好。新的模型框架对于贴现率水平、“遗漏的碳汇”以及气候敏感性等关键问题的不确定性都进行了相应的处理, 也得出一些新的政策建

议。DGSE 模型中的每个实体单位都可以被视为是一个典型的“主体”，因此可以允许模型在地区层面或经济部门层面进行分解。DSGE 模型可以采用内生技术进步、技术进步路径依赖和锁定效应的假设，但是当技术进步被内生化处理之后，DSGE 模型可能会面临和 CGE 模型一样的规模报酬递增和均衡状态不唯一的问题。而在对损害函数的处理上，DSGE 模型也并没有办法完全解决 CGE 模型所面临的问题，过于复杂的假设和处理可能会导致无法获得均衡解。但无论如何，DSGE 模型对于金融部门和宏观政策的考量和处理要比 CGE 模型更加全面。

尽管 DSGE 模型可以解决气候变化经济分析和模拟过程中所面临的一些问题，但应该认识到 DSGE 模型本质上属于一般均衡模型的范畴，仍具有一定的局限性，例如市场出清、最优性以及经济主体代表性等假设的合理性问题。这也决定了 DSGE 模型在气候变化经济分析中的应用只能被视为改进传统模型和分析方法的一个可行方向，并无法完全解决所有问题。

（三）智能体模型

另外一种可行的研究方向是建立智能体模型（Agent - Based Model, ABM）来分析气候变化问题。ABM 可以在预先给定影响机制下，分析和模拟决策者（主体）之间相互作用的过程（Bonabeau, 2002; Farmer and Foley, 2009; Miller and Page, 2007; Macal and North, 2010）。ABM 虚拟出一套社会经济体系，保证了该体系具有灵活和现实性等特征。然而，其所要求的计算量更大，因为和传统 IAM 中大部分参数都采用外生赋值的方法不同，ABM 的所有参数都基本需要通过实证研究进行估计。ABM 目前已经被广泛运用于各个领域，既包括冲突动态分析（Lim et al., 2007）和城市规划（Brown and Robinson, 2006; Batty, 2009）等非经济问题，也包括电力市场（Weidlich and Veit, 2008）、排放交易市场（Zhang et al., 2011）、住房市场（Geanakoplos et al., 2012）、金融市场（Aymanns and Farmer, 2015）以及技术使用、锁定效应和技术转移（Frenken et al., 2012）等经济问题。

ABM 的灵活性意味着在气候变化经济学领域的研究中可以考虑不同的决策主体，形成不同的决策制定进程（Teshfatsion, 2002）。模型还可以用不同的技术和计算法则去模拟主体学习和适应的过程。而这种灵活性能有效解决传统气候评估模型面临的问题和质疑。例如对于气候变化问题中的各种不确定性，ABM 可以通过采用不同的参数值反复模拟来检验这些假设条件下模拟结果（经济产出或者社会福利等）的敏感性，研究者就能够直观地观察到哪个参数的不确定性对于最后模拟结果的影响最为显著（Law, 2009）。ABM 对于技术的处理也比过去的气候变化经济模型更加合理，而且更加适合模拟非线性和相互关联的技术进步和扩散过程（Maréchal, 2007; Faber et al., 2010; Shafiei et al., 2012）。ABM 同样可以进行地区或部门分解，然后比较不同的决策主体如何在微观层面上与其他决策主体发生联系以及会产生怎样的宏观影响（Epstein, 1999）。此外，ABM 还可以纳入不同的气候损害影响模块，如气温的提高对劳动生产率的影响等。ABM 不用求取均衡条件下的最优解，而是根据实证数据估

算损害函数的参数,因此其对于气候变化造成的经济损害的描述要比其他分析框架更为可信。

尽管21世纪初就有人提出可以将ABM用于综合评估模型(Moss et al., 2001),但直到最近才有学者开始尝试将其用于分析气候变化经济问题,并开发出用于分析气候政策的ABM,例如Lagom RegiO模型(Wolf et al., 2013)。应该认识到,基于主体建模的分析方法在经济学中的应用仍然较少,建模实例也还在发展过程中,尽管目前已经提出了一些指导原则和标准,但是这些原则和标准尚未被严格遵守和接受(Richiardi et al., 2006; Grimm and Railsback, 2012)。而且,虽然ABM相较于CGE模型能更好地通过实证检验,校准和效果检验的结果也更加合理,但是ABM的数据收集、整理和运算工作更为繁重。此外,ABM具有灵活性等优点,其运行和模拟过程更加符合客观现实,但在识别和解释模型结果等方面往往需要面对更多困难。只有妥善解决这些问题,才不会限制ABM在能源和气候变化领域的广泛应用(Gerst et al., 2013)。

六、结论和讨论

气候变化经济学是较新的经济学研究领域,其诞生至今不到半个世纪。气候变化问题涉及全世界人民的共同福祉,需要制定出针对性的政策来应对。在过去几十年里,一批经济学家在传统经济学分析方法的基础上,针对气候变化问题独有的特点开发出了一系列模型工具,从经济学的角度对各种政策选项进行成本收益分析以供决策者参考。但大部分模型无法合理地刻画气候变化问题中的不确定性、技术进步状况、可能面临的极端灾害事件以及不同地区和经济系统中不同个体间的异质性问题。一些反对者也不时对模型的分析框架和结论提出质疑,有经济学家指出应该在气候政策制定过程中摒弃复杂的IAM,转而求诸于一些简单的模型工具以及专家意见来支撑决策(Pindyck, 2015)。然而,鉴于气候变化问题的重要性,各国在进行重要的气候政策决策时,仍然需要客观、科学的经济评估结果作为参考依据。事实上,如果缺乏合理的定量评估模型工具作为基础,相应的气候政策可能会受到更为强烈的反对和批评。气候变化可能会严重损害人类的生存环境,因此研究者和政策制定者必须找到一个可行的综合性分析框架来认识、理解和评估这一问题。

从目前来看,气候变化问题的经济学分析方法有三种不同的发展方向:一是针对提出的各种批评不断改善现有的气候变化经济分析框架,例如更好地处理气候损害、在模型中纳入不可逆的气候临界点、改进模型计算方法等;二是引入DSGE模型用于分析气候政策,例如在传统DICE模型的基础上考虑随机持久的冲击和贝叶斯学习过程等;三是建立智能体模型来分析气候问题,用于模拟非线性和相互关联的技术扩散,分析气候决策和其他决策问题之间的相互关系以及对宏观经济的影响等。对两类新工具而言,DSGE模型本质上属于均衡分析工具,无法彻底解决市场出清、最优性

以及经济主体代表性等假设的合理性困境；而要构建适用于分析气候政策的智能体模型，必须要从主流经济学思想中纳入有用的元素。应该说，无论是 DSGE 模型还是智能体模型都有潜力去解决主流的气候变化经济学模型面临的问题和困境，但是目前这两类工具在气候变化经济学中的应用实例仍较为少见。这两类工具均具有一定的发展潜力，可以预期会涌现一批应用成果用于指导气候变化政策。

展望未来，中国应该积极开发和建立气候变化经济分析方法和模型，根据中国的实际情况校准获得关键的参数和数据，评估减缓气候变化所带来的经济成本和收益，并与国外的模型模拟结果进行对标。除了直接应用国外的模型之外，中国学者还应积极开发具有自主知识产权的气候变化经济模型，并建立相应的数据库系统。例如，对于各种能源之间的替代弹性，目前国内的研究一般都是照搬国外的参数，应当做好基础性的经济学实证研究，估计出符合中国实情的各种技术和替代弹性参数。针对气候变化经济模型面临的各种问题，中国学者更应发挥主动性，积极拓展新的分析方法和分析思路，针对发展中国家有别于发达国家的特点，对模型分析和模拟给予更加具体而准确的假设条件，务求使气候经济模型的分析模拟结果更具有实践指导意义。

参考文献

- 米志付 (2015): 《气候变化综合评估建模方法及其应用研究》，北京：北京理工大学博士学位论文。
- 王灿、陈吉宁、邹骥 (2002): 《气候政策研究中的数学模型评述》，《上海环境科学》第 7 期，第 435 ~ 439、454 ~ 458 页。
- 王铮、吴静、刘昌新等 (2015): 《气候变化经济学集成评估模型》，北京：科学出版社。
- 魏一鸣、米志付、张皓等 (2013): 《气候变化综合评估模型研究新进展》，《系统工程理论与实践》第 8 期，第 1905 ~ 1915 页。
- Acemoglu, D., P. Aghion and L. Bursztyn, et al. (2012), “The Environment and Directed Technical Change”, *American Economic Review*, 102 (1), pp. 131 – 166.
- Aghion, P., A. Dechezleprêtre and D. Hemous, et al. (2016), “Carbon Taxes, Path Dependency and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry”, *Journal of Political Economy*, 124 (1), pp. 1 – 51.
- Allen, F. and D. Gale (2000), “Financial Contagion”, *Journal of Political Economy*, 108 (1), pp. 1 – 33.
- Anthoff, D. and R. S. J. Tol (2013), “The Uncertainty About the Social Cost of Carbon: A Decomposition Analysis Using Fund”, *Climate Change*, 117 (3), pp. 515 – 530.
- Atkinson, G., S. Dietz and J. Helgeson, et al. (2009), “Siblings, Not Triplets: Social Preferences for Risk, Inequality and Time in Discounting Climate Change”, *Economics Discussion Papers*, 2009 (14), pp. 1 – 28.
- Aymanns, C. and J. D. Farmer (2015), “The Dynamics of the Leverage Cycle”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 50, pp. 155 – 179.
- Batty, M. (2009), “Urban Modeling”, *International Encyclopedia of Human Geography*, 2009,

pp. 51 – 58.

Blanchard, O. J. and L. H. Summers (1987), “Hysteresis in Unemployment”, *European Economic Review*, 31 (1 – 2), pp. 288 – 295.

Bonabeau, E. (2002), “Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems”, *National Academy of Sciences*, 3 (10), pp. 7280 – 7287.

Brekke, K. A. and O. Johansson-Stenman (2008), “The Behavioural Economics of Climate Change”, *Oxford Review of Economic Policy*, 24 (2), pp. 280 – 297.

Brown, D. G. and D. T. Robinson (2006), “Effects of Heterogeneity in Residential Preferences on an Agent-Based Model of Urban Sprawl”, *Ecology and Society*, 11 (1), pp. 709 – 723.

Bosetti, V., C. Carraro and E. Massetti, et al. (2008), “International Energy R&D Spillovers and the Economics of Greenhouse Gas Atmospheric Stabilization”, *Energy Economics*, 30 (6), pp. 2912 – 2929.

Bosetti, V., C. Carraro and E. Massetti, et al. (2009), “Optimal Energy Investment and R&D Strategies to Stabilize Atmospheric Greenhouse Gas Concentrations”, *Resource Energy Economics*, 31 (2), pp. 123 – 137.

Burke, M., J. Dykema and D. B. Lobell, et al. (2015), “Incorporating Climate Uncertainty into Estimates of Climate Change Impacts”, *Review of Economics and Statistics*, 97 (2), pp. 461 – 471.

Cai, Y., K. L. Judd and T. S. Lontzek (2012), “DSICE: A Dynamic Stochastic Integrated Model of Climate and Economy”, http://ice.uchicago.edu/2012_presentations/Faculty/Cai/dsice_computation_paper_DiscTime.pdf[2017 – 05 – 04].

Cai, Y., K. L. Judd and T. M. Lenton, et al. (2015), “Environmental Tipping Points Significantly Affect the Cost – Benefit Assessment of Climate Policies”, *National Academy of Sciences*, 112 (15), pp. 4606 – 4611.

Cane, M. A., E. Miguel and M. Burke, et al. (2014), “Temperature and Violence”, *Nature Climate Change*, 4 (4), pp. 234 – 235.

Carbon Tracker Initiative (2013), “Unburnable Carbon 2013: Wasted Capital and Stranded Assets”, *Report in Collaboration with the Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment*, <http://carbontracker.live.kiln.it/Unburnable-Carbon-2-Web-Version.pdf>[2017 – 05 – 04].

Clarke, L., J. Edmonds and V. Krey, et al. (2009), “International Climate Policy Architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios”, *Energy Economics*, 31 (2), pp. S64 – S81.

Cooper, R. (1999), *Coordination Games: Complementarities and Macroeconomics*, Cambridge: Cambridge University Press.

Diamond, P. A. (1982), “Aggregate Demand Management in Search Equilibrium”, *Journal of Political Economy*, 90 (5), pp. 881 – 894.

Dietz, S. and N. Stern (2015), “Endogenous Growth, Convexity of Damages and Climate Risk: How Nordhaus’ Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions?”, *Economic Journal*, 125 (583), pp. 574 – 620.

Eboli, F., R. Parrado and R. Roson (2010), “Climate-Change Feedback on Economic Growth: Explorations with A Dynamic General Equilibrium Model”, *Environment and Development Economics*, 15 (5), pp. 515 – 533.

- Epstein, J. M. (1999), “Agent – based Computational Models and Generative Social Science”, *Complexity*, 4 (5), pp. 41 – 60.
- Faber, A., M. Valente and P. Janssen (2010), “Exploring Domestic Micro-Cogeneration in the Netherlands; An Agent Based Demand Model for Technology Diffusion”, *Energy Policy*, 38 (6), pp. 2763 – 2775.
- Farmer, J. D. and D. Foley (2009), “The Economy Needs Agent-Based Modelling”, *Nature*, 460 (7256), pp. 685 – 686.
- Farmer, J. D. and F. Lafond (2016), “How Predictable is Technological Progress”, *Research Policy*, 45 (3), pp. 647 – 665.
- Farmer, J. D. and C. Hepburn (2014), “Less Precision, More Truth: Uncertainty in Climate Economics and Macroprudential Policy”, *Paper Prepared for Bank of England Interdisciplinary Workshop on 2 April 2014 on “The Role of Uncertainty in Central Bank Policy”*, http://www.bankofengland.co.uk/research/Documents/pdf/hepburn_0414.pdf [2017 – 05 – 04].
- Frenken, K., L. Izquierdo and P. Zeppini (2012), “Branching Innovation, Recombinant Innovation, and Endogenous Technological Transitions”, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 4, pp. 25 – 35.
- Galí, J. (2009), *Monetary Policy, Inflation and the Business Cycle: An Introduction to the New Keynesian Framework*, Princeton: Princeton University Press.
- Geanakoplos, J., R. Axtell and J. D. Farmer, et al. (2012), “Getting at Systemic Risk Via an Agent-Based Model of the Housing Market”, *American Economic Review*, 102 (3), pp. 53 – 58.
- Gerst, M., P. Wang and M. Borsuk (2013), “Discovering Plausible Energy and Economic Futures Under Global Change Using Multidimensional Scenario Discovery”, *Environmental Modelling and Software*, 44, pp. 76 – 86.
- Gillingham, K., R. G. Newell and W. A. Pizer (2008), “Modeling Endogenous Technological Change for Climate Policy Analysis”, *Energy Economics*, 30 (6), pp. 2734 – 2753.
- Golosov M., J. Hassler and P. Krusell, et al. (2014), “Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium”, *Econometrica*, 82 (1), pp. 41 – 88.
- Gowdy, J. M. (2008), “Behavioral Economics and Climate Change Policy”, *Journal of Economic Behavior & Organization*, 68 (3), pp. 632 – 644.
- Grimm, V. and S. F. Railsback (2012), “Designing, Formulating and Communicating Agent – Based Models”, in Heppenstall, A. J., A. T. Crooks and L. M. See, et al. (eds.) *Agent – based Models of Geographical Systems*, Netherlands: Springer Press, pp. 361 – 377.
- Groom, B., C. Hepburn and P. Koundouri, et al. (2005), “Declining Discount Rates: The Long and the Short of It”, *Environmental and Resource Economics*, 32 (4), pp. 445 – 493.
- Hansen, A. H. (1939), “Economic Progress and Declining Population Growth”, *American Economic Review*, 29 (1), pp. 1 – 15.
- Harberger, A. C. (1959), “Using the Resources at Hand More Effectively”, *American Economic Review*, 49 (2), pp. 134 – 146.
- Hassler, J. and P. Krusell (2012), “Economics and Climate Change: Integrated Assessment in a

Multi-Region World”, *Journal of the European Economic Association*, 10 (5), pp. 974 – 1000.

Heal, G. and A. Millner (2014), “Uncertainty and Decision Making in Climate Change Economics”, *Review of Environmental Economics and Policy*, 8 (1), pp. 120 – 137.

Hepburn, C. and N. Stern (2008), “A New Global Deal on Climate Change”, *Oxford Review of Economic Policy*, 24 (2), pp. 259 – 279.

Hepburn, C., P. Koundouri and E. Panopoulou, et al. (2009), “Social Discounting under Uncertainty: A Crosscountry Comparison”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 57 (2), pp. 140 – 150.

Hoel, M. and L. Karp (2001), “Taxes and Quotas for a Stock Pollutant with Multiplicative Uncertainty”, *Journal of Public Economics*, 82 (1), pp. 91 – 114.

Hope, C., J. Anderson and P. Wenman (1993), “Policy Analysis of the Greenhouse Effect: An Application of the PAGE Model”, *Energy Policy*, 21 (3), pp. 327 – 338.

Hope, C. (2013), “Critical Issues for the Calculation of the Social Cost of CO₂: Why the Estimates from PAGE09 Are Higher than Those from PAGE 2002”, *Climate Change*, 117 (3), pp. 531 – 543.

Hsiang, S. M., K. C. Meng and M. A. Cane (2011), “Civil Conflicts Are Associated with the Global Climate”, *Nature*, 476, pp. 438 – 441.

IPCC (2001), *Climate Change 2001: Working Group III: Mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (2014), Summary for Policymakers. In: Edenhofer, O., R. Pichs – Madruga and Y. Sokona, et al. (eds.) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Kelly, D. L. and C. D. Kolstad (1999), “Bayesian Learning, Growth and Pollution”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 23 (4), pp. 491 – 518.

Kelly, D. L., and C. D. Kolstad (2001), *Solving Infinite Horizon Growth Models with an Environment Sector*, Nederland: Kluwer Academic Publishers.

Krey V., O. Masera and G. Blanford, et al. (2014), “Annex II: Metrics & Methodology”, in Edenhofer, O., R. Pichs – Madruga and E. Sokona, et al. (eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press.

Kolstad, C., K. Urama and J. Broome, et al (2014), “Social, Economic and Ethical Concepts and Methods”, in Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga and Y. Sokona, et al (eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press.

Krussel, P. and A. A. Smith (2009), “Macroeconomics and Global Climate Change: Transition for a Many-Region Economy”, <http://docplayer.net/34475570-Macroeconomics-and-global-climate-change-transition-for-a-many-region-economy.html> [2017 – 05 – 10].

Kunreuther, H., S. Gupta and V. Bosetti, et al. (2014), “Integrated Risk and Uncertainty Assessment of Climate Change Response Policies”, in Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga and Y. Sokona, et al. (eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group iii to the*

Fifth Assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge: Cambridge University Press.

Law, A. M. (2009), “How to Build Valid and Credible Simulation Models”, *Proceedings of the 2009 Winter Simulation conference (WSC)*, pp.24 – 33, <http://www.informs-sim.org/wsc09papers/003.pdf>[2017-05-05].

Lemoine, D. and C. Traeger (2014), “Watch Your Step: Optimal Policy In a Tipping Climate”, *American Economic Journal Economic Policy*, 6 (1), pp.137 – 166.

Lim, M., R. Metzler and Y. Bar-Yam (2007), “Global Pattern Formation and Ethnic/Cultural Violence”, *Science*, 317 (5844), pp.1540 – 1544.

Lobell, D. B., M. J. Roberts and W. Schlenker, et al. (2014), “Greater Sensitivity to Drought Accompanies Maize Yield Increase in the US Midwest”, *Science*, 344 (6183), pp.516 – 519.

Lontzek, T. S., Y. Cai and K. L. Judd, et al. (2015), “Stochastic Integrated Assessment of Climate Tipping Points Indicates the Need for Strict Climate Policy”, *Nature Climate Change*, 5 (5), pp.441 – 444.

Luderer, G., R. C. Pietzcker and C. Bertram, et al. (2013), “Economic Mitigation Challenges: How Further Delay Closes the Door for Achieving Climate Targets”, *Environmental Research Letters*, 8 (3), pp.1345 – 1346.

Macal, C. M. and M. J. North (2010), “Tutorial on Agent – Based Modelling and Simulation”, *Journal of Simulation*, 4 (3), pp.151 – 162.

Maréchal, K. (2007), “The Economics of Climate Change and the Change of Climate in Economics”, *Energy Policy*, 35 (10), pp.5181 – 5194.

Manne, A., R. Mendelsohn and R. Richels (1995), “MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies”, *Energy Policy*, 23 (1), pp.17 – 34.

Martin, I. W. R. and R. S. Pindyck (2014), “Averting Catastrophes: The Strange Economics of Scylla and Charybdis”, *National Bureau of Economic Research (NBER) Working Paper 20215*, <http://web.mit.edu/rpindyck/www/Papers/AvoidCatastrophesMay2014.pdf>[2017-05-05].

Messner, S. and M. Strubegger (1995), “User’s Guide for MESSAGE III”, <http://pure.iiasa.ac.at/4527/1/WP-95-069.pdf>[2017-05-05].

Metcalf, F. G. E. and J. Stock (2015), “The Role of Integrated Assessment Models in Climate Policy: A User’s Guide and Assessment”, <http://scholar.harvard.edu/stock/publications/role-integrated-assessment-models-climate-policy-users-guide-and-assessment>[2017-05-05].

Miller, J. H. and S. E. Page (2007), *Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life*, New Jersey: Princeton University Press.

Moss, S., C. Pahl-Wostl and T. Downing (2001), “Agent-Based Integrated Assessment Modelling: The Example of Climate Change”, *Integrated Assessment*, 2 (1), pp.17 – 30.

Nordhaus, W. D. (1975), “Can We Control Carbon Dioxide”, <http://pure.iiasa.ac.at/365/1/WP-75-063.pdf>[2017-05-05].

Nordhaus, W. D. (1977), “Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem”, *American Economic Review*, 67 (1), pp.341 – 346.

Nordhaus, W. D. (1992), “An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases”, *Science*,

258, pp. 131 – 519.

Nordhaus, W. D. (1994), *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, Cambridge: MIT Press.

Nordhaus, W. D. (2007), “A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change”, *Journal of Economic Literature*, 45 (3), pp. 686 – 702.

Nordhaus, W. D. and Z. Yang (1996), “A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies”, *American Economic Review*, 86 (4), pp. 741 – 765.

Nordhaus, W. and P. Satorc (2013), “DICE2013R: Introduction and User’s Manual”, http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/documents/DICE_Manual_103113r2.pdf[2017 – 05 – 05].

Paltsev, S., J. M. Reilly and H. D. Jacoby, et al. (2005), “MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change (EPPA) Model: Version 4”, *Policy Analysis Report No. 125*, pp. 78, http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt125.pdf[2017 – 05 – 05].

Peck, S. C. and T. J. Teisberg (1992), “CETA: A Model for Carbon Emissions Trajectory Assessment”, *Energy Journal*, 13 (1), pp. 55 – 77.

Pindyck, R. S. (2013), “Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?”, *Journal of Economic Literature*, 51 (3), pp. 860 – 872.

Pindyck, R. S. (2015), “The Use and Misuse of Models for Climate Policy”, <http://web.mit.edu/rpindyck/www/Papers/PindyckClimateModels2015.pdf>[2017 – 05 – 05].

Popp, D. (2004), “Entice: Endogenous Technological Change in the DICE Model of Global Warming”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 48 (1), pp. 742 – 768.

Powell, W. (2007), *Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of dimensionality*, New York: Wiley Press.

Richiardi, M., R. Leombruni and N. Saam, et al. (2006), “A Common Protocol for Agent-Based Social Simulation”, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9 (1), pp. 15 – 37.

Roe, G. H. and M. B. Baker (2007), “Why Is Climate Sensitivity So Unpredictable”, *Science*, 318 (5850), pp. 629 – 632.

Schlenker, W., W. M. Hanemann and A. C. Fisher (2005), “Will US Agriculture Really Benefit from Global Warming? Accounting for Irrigation in the Hedonic Approach”, *American Economic Review*, 95 (1), pp. 395 – 406.

Schularick, M. and M. A. Taylor (2012), “Credit Booms Gone Bust: Monetary Policy, Leverage Cycles and Financial Crises”, *American Economic Review*, 102 (2), pp. 1029 – 1061.

Shafiei, E., H. Thorkelsson and E. úsgeirsson, et al. (2012), “An Agent-Based Modeling Approach to Predict the Evolution of Market Share of Electric Vehicles: A Case Study from Iceland”, *Technological Forecasting and Social Change*, 79 (9), pp. 1638 – 1653.

Smulders, S., C. D. Maria (2012), “The Cost of Environmental Policy Under Induced Technical Change”, https://www.cesifogroup.de/DocDL/cesifo1_wp3886.pdf[2017 – 05 – 10].

Stehfest, E., D. P. V. Vuuren and T. Kram, et al. (2014), “Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0. Model Description and Policy Applications”, <http://www.pbl.nl/en/publications/integrated-assessment-of-global-environmental-change-with-IMAGE-3.0>[2017 – 05 – 05].

- Stern, N. (2006), "Stern Review: The Economics of Climate Change", *World Economics*, 98 (2), pp. 1 – 10.
- Stern, N. (2007), "The Economics of Climate Change-the Stern Review: Summary of Conclusions", *South African Journal of Economics*, 75 (2), pp. 369 – 372.
- Stern, N. (2013), "The Structure of Economic Modeling of the Potential Impacts of Climate Change: Grafting Gross Underestimation of Risk onto Already Narrow Science Models", *Journal of Economic Literature*, 51 (3), pp. 838 – 859.
- Tesfatsion, L. (2002), "Hysteresis in an Evolutionary Labor Market with Adaptive Search", in Chen, S. H. (eds.), *Evolutionary Computation in Economics and Finance*, New York: Physica-Verlag Heidelberg Press.
- Traeger, C. P. (2014), "A 4-stated DICE: Quantitatively Addressing Uncertainty Effects in Climate Change", *Environmental and Resource Economics*, 59 (1), pp. 1 – 37.
- Traeger, C. P. (2015), "Analytic Integrated Assessment and Uncertainty", http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2015/04/Traeger_AnalyticIAM.pdf[2017-05-10].
- Tol, R. S. J. (1997), "On the Optimal Control of Carbon Dioxide Emissions: An Application of Fund", *Environmental Modeling and Assessment*, 2 (3), pp. 151 – 163.
- Van, D. M. D. (2010), "The Environmental Impact and Sustainability Applied General Equilibrium (ENVISAGE) Model", http://siteresources.worldbank.org/INTPROSPECTS/Resources/334934-1314986341738/Env7_1Jan10b.pdf[2017-05-10].
- Waisman, H., C. Guivarch and Grazi, et al. (2012), "The Imaclim-R Model: Infrastructures, Technical Inertia and the Costs of Low Carbon Futures under Imperfect Foresight", *Climatic Change*, 114 (1), pp. 101 – 120.
- Weidlich, A. and D. Veit (2008), "A Critical Survey of Agent – Based Wholesale Electricity Market Models", *Energy Economics*, 30 (4), pp. 1728 – 1759.
- Weitzman, M. L. (1974), "Prices Versus Quantities", *Review of Economic Studies*, 41 (4), pp. 477 – 491.
- Weitzman, M. L. (1998), "Why the Far-Distant Future Should Be Discounted at Its Lowest Possible Rate", *Journal of Environmental Economics and Management*, 36 (3), pp. 201 – 208.
- Weitzman, M. L. (2001), "Gamma Discounting", *American Economic Review*, 91 (1), pp. 261 – 271.
- Weitzman, M. L. (2009), "On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change", *Review of Economics and Statistics*, 91 (1), pp. 1 – 19.
- Weitzman, M. L. (2011), "Fat-Tailed Uncertainty in the Economics of Climate Change", *Review of Environmental Economics and Policy*, 5 (2), pp. 275 – 292.
- Weitzman, M. L. (2013), "Tail-Hedge Discounting and the Social Cost of Carbon", *Journal of Economic Literature*, 51 (3), pp. 873 – 882.
- Weyant, J. P. (2009), "A Perspective on Integrated Assessment: An Editorial Comment", *Climatic Change*, 95 (3-4), pp. 317 – 323.
- Wolf, S., S. Fürst and A. Mandel, et al. (2013), "A Multi-Agent Model of Several Economic Regions", *Environmental Modelling and Software*, 44 (44), pp. 25 – 43.

Zhang, B. , Y. Zhang and J. Bi (2011), “ An Adaptive Agent – Based Modeling Approach for Analyzing the Influence of Transaction Costs on Emissions Trading Markets”, *Environmental Modelling and Software*, 26 (4), pp. 482 – 491.

Yang, Z. , Y. M. Wei and Z. Mi (2016), “ Integrated Assessment Models (IAMs) for Climate Change”, [http://www.oxfordbibliographies.com/view/document/ obo-9780199363445/obo-9780199363445-0043.xml](http://www.oxfordbibliographies.com/view/document/obo-9780199363445/obo-9780199363445-0043.xml)[2017 – 05 – 10].

Research Progress of Analytic and Modelling Methodologies in Climate Change Economics

ZHANG Ying

(Institute for Urban and Environmental Studies, Chinese Academy of Social Science, Beijing 100028, China)

Abstract: Climate change is an important global environment issue and it is an economic issue as well. In this paper, the author summarizes the major models and analytic methodologies in climate change economics and reviews the development history, category and structure characteristics of some economic blocks in IAMs. However, some key aspects of these models couldn't be addressed adequately by current climate economic methodologies, including uncertainties, technological change, the damages and losses created by extreme climate disasters etc. Thus, the results may possibly underestimate the economic impacts of global climate change. Meanwhile, different models tend to use distinct discount rates. These models could not treat the heterogeneities of different regions and agents in facing climate change. To solve all these problems, some economists try to use DSGE and ABM models to analyze climate change issues and estimate the benefits and costs for different measures or actions to deal with climate change in recent years. Looking into the future, China needs actively develop its own economic analytic models for climate change issues, calibrate the key parameters based on China's real situation, estimate the benefits and costs from the models and compare the results with other international models. Based on these works, China could establish the basic database for future studies.

Key Words: Climate Change Economics; Integrated Assessment Model; Dynamic Stochastic General Model; Agent-based Model; damage function

责任编辑: 庄立