

全球能源经济可计算一般均衡模型研究综述

齐天宇^{1,2} 张希良¹ 何建坤^{1,2}

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 2. 清华大学低碳能源实验室, 北京 100084)

摘要 全球能源经济可计算一般均衡(Computable General Equilibrium Model, CGE)模型是研究低碳政策对能源经济系统影响的主要工具,在国际低碳经济研究领域具有重要作用。全球能源经济 CGE 模型发展起始于 20 世纪 70 年代,经过数十年的拓展已经形成了一批发展成熟且应用广泛的模型平台。我国能源经济 CGE 模型研究开始于 20 世纪 90 年代,研究领域主要聚焦在中国本土与国内区域,而在全球尺度上的模型研究尚处于起步阶段。伴随我国在全球气候治理当中的重要性凸显,中国能源环境问题的研究需要具有国际视野。本文对当前全球能源经济 CGE 模型的研究现状进行分析,对全球 CGE 模型的主要作用与特点做出评价,并对典型模型进行比较,在介绍了模型优缺点的基础上对全球能源经济 CGE 模型的发展趋势与关键问题进行讨论,并对中国未来发展全球模型给出具体建议。全球能源经济 CGE 模型政策评估的主要优点是评估基于坚实的理论基础,可以根据相关理论判断模型结果是否合理并对政策的作用机制与影响结果做出基于经济规律的解释;以及能源与经济系统整体协调一致的相互作用机制。能源经济 CGE 模型主要争议性问题包括结果依赖大量参数且参数取值不稳健,以及模型假设过于理想且技术表达抽象。当前能源经济 CGE 模型研究的关键问题与主要趋向包括:关键参数的实证研究与准确校核、经济系统异质化与细节化描述、技术细节表述与内生变化变革以及非理想与不均衡市场条件建模。建议中国开发全球模型应充分借鉴全球先进模型开发的基础与经验,在当前全球模型主流框架下重点研究发展中国家在非理想与不均衡市场环境下经济行为表述的改进,同时注重模型基础数据的整理与重要参数的校核。

关键词 能源经济;可计算一般均衡(CG);全球模型

中图分类号 F206 文献标识码 A 文章编号 1002-2104(2016)08-0042-07 doi:10.3969/j.issn.1002-2104.2016.08.007

全球能源经济可计算一般均衡(Computable General Equilibrium Model, CGE)模型作为气候评估模型当中重要组成部分在国际减排与区域低碳政策评价中具有广泛应用。当前国际广泛采用的全球能源经济 CGE 模型大多由发达国家创建,我国在相关模型领域的研究大多局限在本国本土尺度内,对全球尺度下的能源经济 CGE 模型研究尚处于起步阶段。同时,伴随中国在全球气候治理当中的重要性日益凸显,中国也迫切需要发展研究全球问题的模型方法学,以在国际谈判与决策中表达中国的正当观点与利益诉求。基于此,本文对当前全球能源经济 CGE 模型的研究现状进行综述,力求能为国内全球模型研究者了解当前国际相关研究进展作出贡献。

1 全球能源经济 CGE 模型研究

1.1 模型发展进程

CGE 模型的建模基础是新古典经济学的一般均衡理

论。现代意义上的一般均衡理论始于瓦尔拉斯(Walras),他在其 1894 年的著作《纯粹经济学要义》中第一次从数学角度对一般均衡概念做出了完整而充分的论述^[1]。CGE 模型是一般均衡理论可操作化的实证分析工具,它是同时考虑多市场间最优行为假设下经济主体与主体、主体与市场之间相互关联的数值模拟模型,在模型框架内描述了现实经济系统中产品与要素之间复杂的交互过程。模型通过对经济生产消费关系的数学化表述,在经济各主体之间搭建起数量联系,从而使研究者可以观测到经济局部扰动所产生的全局影响。CGE 模型广泛应用于各种政策分析,已经成为应用经济学的重要分支,它不仅为研究者提供了一个系统层面的政策评估工具,还为政策制定者提供了一个理解政策运作机制的分析框架。

从全球能源经济 CGE 模型的发展历程来看,上世纪 60 年代 CGE 模型的研究并不活跃,因为当时的研究重点多集中在大规模经济计量模型上^[2]。此后,数据库的改进

收稿日期:2016-05-02

作者简介:齐天宇,博士,助教,主要研究方向为气候变化与能源经济与政策分析,全球与中国分区域能源经济模型研究。E-mail: qitianyu@tsinghua.edu.cn。



和计算机技术的突破促进了一般均衡分析向可计算化方向发展。**第一个 CGE 模型**为 Johansen 1960 年为挪威所开发^[3],随后实用 CGE 模型得到快速发展,应用领域也拓展到包括财税政策、国际贸易、能源环境与农业经济等诸多领域,成为政策评价与影响分析的重要工具。

20 世纪 80 年代开始,全球气候变暖、臭氧层破坏、生物多样性减少等诸多环境问题日益凸显,促进了 CGE 模型向能源环境领域拓展。经过十余年的快速发展,能源经济 CGE 模型已经成为能源经济模型领域中的重要分支,广泛应用于减缓气候变化的社会经济成本研究及环境政策效果评价的各个层面。从研究尺度上来看,能源经济 CGE 模型表现出**向全球宏观与区域细节两个方向的拓展**。其中,包含全球区域与产业细节的全球能源经济 CGE 模型被广泛应用于国际协定与全球性政策影响分析上,如分析《京都议定书》框架下全球温室气体减排对不同地区与部门的产业经济与贸易影响。具有代表性的模型包括 OECD 秘书处开发的用于全球气候政策影响分析的 GREEN 模型^[4],以及 Mckibbin et al.^[5]开发的 G-cubed 模型。国际上主要相关模型在下文中做出具体介绍。

20 世纪 90 年代,伴随能源经济 CGE 模型在国际社会应用越发广泛以及国内对于环境政策评价研究的日益重视,国内学者也开始着手开发中国能源经济 CGE 模型并取得快速进展。这一时期比较有代表性的研究机构与模型平台包括国务院发展研究中心在 OECD 贸易与环境项目 CGE 模型的基础上构建中国**递归动态环境 DRC-CGE**模型,并将其应用于中国经济增长与产业结构变化的能源环境影响分析之中^[6];社科院数量经济和技术经济研究所与澳大利亚 Monash 大学合作搭建中国**PRCGEM**模型并应用其对中国环境政策做出分析^[7-8];国家发改委能源研究所在日本 AIM 模型的基础上开发中国能源环境综合政策评价模型(**IPAC**)并对中国中长期排放做出情景研究^[9-10]。IPAC 模型虽为综合评价模型,但其经济模块以 CGE 模型为基础;国家信息中心基于**ORANI**模型和**Monash**模型搭建国家信息中心动态可计算一般均衡模型(SIC-GE)并将其应用于减排政策对我国国际贸易及产业竞争力的影响分析^[11]。中国科学院科技政策与管理科学研究所 Monash 模型的基础上构造我国能源经济动态可计算一般均衡模型(**CDECGE**)并对中国 2050 年能源需求做出情景分析^[12]。经过十余年的发展,中国已经具有相对完备的单国动态能源经济 CGE 模型体系,并且在能源环境税收影响与减排政策效果评价等领域取得大量研究成果。相关模型与研究成果的综述性文献较多(如刘亦文^[13]和李丕东^[14]等),本文不再做具体赘述。当前,伴随中国能源经济 CGE 建模能力的提升与发展,我国已经开

始在单国模型的基础上向省域尺度与全球尺度的多区域动态模型拓展。中国科学院虚拟经济与数据科学研究中心建立了中国 8 区域递归动态 CGE 模型,并对中国低碳政策的区域影响做出识别^[15-16]。复旦经济学院在 GTAP 8 数据库的基础上尝试建立了全球 9 区域 57 部门的递归动态 CGE 模型并利用其围绕关税降低对金砖国家的贸易与投资影响做出分析^[17]。清华大学能源环境经济研究所在美国麻省理工学院(MIT)合作的中国能源气候项目(CECP)中分别开发了中国省级多区域(C-REM)与全球多区域(C-GEM)^[18]递归动态 CGE 模型,并用其对中国低碳政策的区域影响^[19-21]与全球影响做出分析^[22-24]。但与发达国家发展了几十年的水平相比,中国的全球能源经济 CGE 模型建模尚处于起步阶段,模型结构与参数取值大多沿袭发达国家的研究成果,缺乏本土化实证分析与校核,尚有许多的基础性工作有待完成。

1.2 典型模型比较

经过二十多年的发展,全球能源经济 CGE 模型已经成为国际社会全球应对气候变化影响评估的重要分析工具^[25]。全球能源经济 CGE 模型发展历程中 11 个典型模型及其特点如表 1 所示。

1.3 模型优缺点

CGE 模型是分析某种或多种政策组合对多重市场影响的首要分析工具。这些政策组合既可以是以价格为基准的(如税收和补贴),也可以是以数量为基准的(如总量约束、供给和需求)。初始状态下经济处于无约束下的均衡状态,当政策参数发生变化时,经济体中产品的价格、经济活动量、市场的供给与需求都相应发生变化,从而使经济体在政策冲击下达到新的均衡。通过比较在变化前与变化后的价格水平、活动量、供需规模就可以对政策的影响做出评估。当然需要注意的是,模型分析结果的准确与否还受到模型自身假设的影响。

利用能源经济 CGE 模型对环境政策做出评估主要具有以下优点:

(1) 基于坚实的理论基础。能源经济 CGE 模型与新古典微观经济理论密切关联,这一优势使得建模者更容易根据相关理论判断模型结果是否合理并对政策的作用机制与影响结果做出基于经济规律的解释^[36]。

(2) 能源与经济系统整体协调一致的相互作用机制。能源经济 CGE 模型基于现实生产与消费信息流,将各种经济主体与能源技术纳入到一个系统框架内描述,无论是能源与经济系统的哪个节点发生了变化都会通过经济主体的最优化决策行为,将其影响直接或间接、前向或后向传导到整个能源经济系统。因此能源经济 CGE 模型的政策评估结果更加综合与具体,不但可以观测宏观经济整体



表 1 典型全球能源经济 CGE 模型比较
Tab. 1 Comparison of typical global energy economic CGE models

模型名称	区域	部门	时间 跨度	生产函数与贸易	技术进步与资本	环境与模型特点	数据	开发机构
GREEN 模型 ^[26]	12	11	2050	CES 生产函数, Armington 贸易假设	1. 自动能效进步因子 AEEI; 2. 内生生化技术采用	包含 CO ₂ 排放; 允许资本对能源消费的替代	OECD 数据库	OECD 秘书处
G-CUBED 模型 ^[5]	8	12		Armington 贸易假设	技术进步部分内生; 区分沉资本与流动资本; 投资由跨期优化决定	将 CGE 模型、计量模型以及宏观经济模型相结合; 模型参数基于计量分析而并非“校核”		澳大利亚国立大学
GTAP-E 模型	20	37	2100	采用嵌套的 CES 生产函数; Armington 贸易假设	技术进步外生; 资本与劳动力不能跨国流动	保留了 GTAP 模型及其数据库对全球贸易账户的详细表述	GTAP 数据库	美国普渡大学
MIT-EPPA 模型 ^[27-28]	16	16	2100	采用嵌套的 CES 生产/消费函数; Armington 贸易假设	1. 劳动力与自然资源外生; 2. 采用自动能效进步因子 AEEI; 3. 内生生化技术采用	包含主要的 GHG 排放; 气候影响评估外生表述	GTAP 数据库以及补充的温室气体与污染气体数据库	美国麻省理工学院气候变化科学与政策联合项目
DART 模型 ^[29]	113	57	2030	采用嵌套的 CES 生产/消费函数		环境损害影响外生评价; 模型参数采用减排成本曲线校核	GTAP 数据库	全球经济基尔研究所 (IFW)
ICES 模型	8	17		采用 CES 生产函数; 设立虚拟的世界银行账户对全球投资做出表述	能源投入与资本投入组合描述	包括二氧化碳, 甲烷以及一氧化二氮三种温室气体		马特艾基金会 (FEEM)
AIM/CGE 模型 ^[30-31]	26	24	2100	采用 CES 生产函数	对于制造业部门的节能投资单独考虑	化石燃料燃烧 CO ₂ 内生, 其他排放外生	GTAP 数据库	日本国家环境研究中心 (NIES)
GTEM 模型 ^[32]	灵活的全球区域划分/虚拟公海区域				电力部门新兴技术可以根据“learning by doing”原则降低成本; 自然资源开采部门开采成本随累积开采量增加而降低	包含经济、人口与环境三个模块, 人口与经济模块双向偶联, 经济与环境模块单向偶联	GTAP 数据库	澳大利亚农业与资源经济局 (ABARE)
WorldScan 模型 ^[33]	87	57	2050			三种减排途径: 新型清洁能源替代传统化石能源、外生技术进步提高能源效率、资本替代能源投入		荷兰中央规划局 (CPB)
GEM-E3 模型 ^[34]	全球 37 个区域和 24 个欧盟国家	26	2050		对技术变革的表述有内生与外生化两种途径, 主要取决于研发是由私人投资还是由公共投资	模型对于环境政策的表述具有多种选择; 用减排成本曲线对模型参数进行校核		欧洲经济研究中心/比利时天主教鲁汶大学/希腊雅典国家科技大学
GEMINI-E3 ^[35]	28	18	2050	Armington 贸易假设		用减排曲线校核参数; 允许排放权贸易		法国装备部/法国原子能署/瑞士日内瓦大学

影响,也可以研究微观经济部门层次变化,从而使其计算结果能较好地解释现象发生的原因^[37]。

能源经济 CGE 模型存在以下主要争议性问题:

(1) 结果依赖大量参数且参数取值不稳健。能源经济 CGE 模型对能源技术与经济主体行为的表述需要设定大量参数,而这些参数主要基于“校准”取值,使得模型结果缺乏统计支持;而另一个关键问题是诸如“弹性”这样的关键参数缺乏“校准”与实证研究,通常是经验性取值,这使得模型结果的可信度大打折扣。

(2) 模型假设过于理想且技术表达抽象。CGE 模型在建模过程中对经济体设定理想性均衡市场假设,认为市场充分竞争且信息对称,生产者和消费者行为理性且政策的实施不存在交易成本与滞后效应,以上假设与现实经济状况差距较大;另一方面,经济模型对于技术的表达比较抽象,无法对具体技术组合与生产细节做出详尽刻画,或者如果要详尽刻画则需要大量的数据支撑,通常很难实现^[38]。这些假设使得模型所描述的世界与现实世界相比过于理想与简化,也使得模型对于政策效果的评价出现较大偏差,解释力受到影响。

2 全球能源经济 CGE 模型研究关键问题与趋向

当前能源经济 CGE 模型研究的关键问题与主要趋向包括:①关键参数的实证研究与准确校核;②经济系统异质化与细节化描述;③技术细节表述与内生技术变革;④非理想与不均衡市场条件建模。外延主要是指 CGE 模型与其他模型系统的对接,建立与完善闭合研究框架。

(1) 关键参数的实证研究与准确校核。CGE 模型结果对参数依赖严重且大量参数缺乏实证校核一直是 CGE 模型广受诟病的地方,同时也是 CGE 模型不确定性的主要来源。理想的参数估计方法应该是在系统约束下进行计量估计,但由于数据大量缺失因而在实际操作中关键参数的取值通常是采用基期数据“校准”或者经验性估值的方法完成^[39]。伴随 CGE 模型向更多部门与区域细节深化,基于基期数据校核以及简单经验取值的方法容易造成较大误差,因此以具体区域具体部门,尤其是基于发展中国家实证研究为基础的关键参数校核一直是全球 CGE 模型建模研究的重要内容。

(2) 经济系统的细致化描述与拓展。加强 CGE 模型对经济系统的细致化描述与拓展主要包括三个方面:①消费账户异质性描述。传统的 CGE 模型专注于对生产环节与技术的描述,而对于消费主体的不同特性描述较为抽象。当前 CGE 模型的一个重要发展方向,同时也是其深化经济系统刻画的一个重要层面,就是加强对消费主体的

异质化描述。对消费主体的异质化分类包括按照年龄、收入、教育以及性别等多个层面,分析不同特征消费主体的行为模式的能源经济影响。相关研究包括 Savard^[40], Boccanfuso^[41], Dalton^[42]。②部门、区域以及技术的更细化发展。尽管当前多区域多部门的 CGE 模型已经发展较多,但是模型还在向包含更多区域、更广部门以及更细技术种类的方向快速拓展,以追求更加细致与特定的政策影响分析。相关文献与进展包括 Laitner^[43], Heyndrickx^[44]等。③拓展经济要素。当前 CGE 模型对经济系统描述的另一个拓展方向是对金融和货币要素的描述。传统的 CGE 模型是对实物经济的一种描述,不包括金融资本市场和货币因素在内。当前一些模型已经尝试在 CGE 模型中对货币要素进行描述以引入对金融市场的刻画。相关文献包括 Li^[45]和 Manzoor^[46]。

(3) 函数改进与内生技术变革。CGE 模型对生产与消费行为通常采用常替代弹性函数(CES)进行刻画,对于 CES 函数的缺点与限制性也受到广泛讨论^[47],包括 Stone-Geary(亦称 Linear Expenditure System, LES)函数, Almost Ideal Demand System(AIDS)函数^[48], Continuous density function^[41]等在内的其他形式函数在 CGE 模型中的应用与求解也是当前 CGE 模型的讨论热点。此外,对技术表达的抽象性是 CGE 模型的主要缺陷之一,如何完善 CGE 模型对技术的刻画,尤其是内生技术变革也是当前 CGE 模型发展的重要方向^[49-50]。

(4) 非理想与不均衡市场条件下建模。CGE 模型作为一般均衡理论的数学模型展现其基于新古典经济学的理想市场假设。然而,一方面理想市场假设对于现实经济尤其是对于市场机制尚不完善的发展中国家经济表述具有较大偏差;另一方面,现实经济体也不会像 CGE 模型所描述的那样达到均衡状态,政策效果在实际经济体中由于信息不对称与交易成本的存在具有滞后性,致使 CGE 模型对于现实经济尤其是对发展中国家特有的经济现象解释能力不足,政策评价结果与实际差距较大。伴随能源环境问题焦点向发展中国家转移,如何将寡头垄断、价格管制、信息不对称以及交易成本等非理想与不均衡要素在 CGE 模型框架下进行体现是其向更实用化发展的重要方向^[51-53]。

3 主要结论

基于对当前全球能源经济 CGE 模型的研究现状与发展趋势的综述,本研究认为中国发展全球能源经济模型应重点关注以下几个问题:

首先,应该充分借鉴全球先进模型开发基础与经验。全球能源经济模型经过近二十年的发展,其研究基础与模

型框架已经十分成熟。中国发展全球模型应充分消化并借鉴当前主流全球能源经济模型的开发基础与经验,首先迅速追赶并实现现有先进全球模型的研究水平,具有与国际模型平台对话与合作的能力。应对气候变化作为一个全球命题,国际上一些先进的全球模型平台已经有一些开放渠道,国内研究机构在起步阶段可以尝试通过与国际平台的合作,建立模型开发能力,尽量避免基础研究的重复摸索工作。

其次,应该充分认识当前主流全球模型是基于西方发达经济体构建,对于发展中国家非理想与不平衡市场环境下的经济行为刻画具有较大偏差,这应该是发展中国家开发全球模型的重点关注方向。随着全球排放主体由发达国家向发展中国家转移,如何增强全球模型对发展中国家的准确表述已经成为全球模型发展的重要趋势,也是欧美研究机构愿意与发展中国家研究机构合作的主要原因。中国研究机构应充分利用这一契机,在当前全球模型的研究框架下将研究重点放在努力改进发展中国家的表述上,快速提升国际影响力。

最后,应该充分注重模型基础数据的整理与重要参数的校核。目前全球模型研发平台主要基于 GTAP 全球数据库,模型主要参数沿用发达国家经济体的经验研究,发展中国家在基础数据与重要参数校核上缺乏研究平台,而这又是所有模型研发团队都需要而且需要花大量时间和精力研究的内容。伴随全球模型在中国开发与应用的日益广泛,中国特别需要基础数据与重要参数研发的专业团队,基础数据与主要参数的本土校核也是国际主流模型平台最为关注的核心价值。中国目前对于基础数据与重要参数校核的研究还比较薄弱,未来应该加强。

(编辑:刘呈庆)

参考文献 (References)

- [1] WALRAS L. Elements of pure economics; or the theory of social wealth [M]. Routledge, 2003.
- [2] COMPLEX. State of the art review of climate-energy-economic modeling approaches [R]. COMPLEX, 2013.
- [3] JOHANSEN L. A multi-sectoral study of economic growth [M]. North-Holland Amsterdam, 1964.
- [4] BURNIAUX J M, Martin J P, OLIVEIRA-MARTINS J, et al. The costs of reducing CO₂ emissions: evidence from GREEN [M]. OECD Economic Department, 1992.
- [5] MCKIBBIN W J, WILCOXEN P J. The theoretical and empirical structure of the G-cubed model[J]. Economic modelling, 1999, 16 (1): 123 - 148.
- [6] 翟凡, 李善同, 冯珊. 一个中国经济的可计算一般均衡模型[J]. 数量经济技术经济研究, 1997 (3): 38 - 44. [ZHAI Fan, LI Shantong, FENG Shan. A China computable general equilibrium model[J]. The journal of quantitative & technical economics, 1997 (3): 38 - 44.]
- [7] 樊明太, 郑玉歆. 中国 CGE 模型: 基本结构及有关应用问题 (下)[J]. 数量经济技术经济研究, 1999 (4): 24 - 30. [FAN Mingtai, ZHENG Yuxin. China CGE model: basic framework and relative application issues (Part 2) [J]. The journal of quantitative & technical economics, 1999 (4): 24 - 30.]
- [8] 樊明太, 郑玉歆. 中国 CGE 模型: 基本结构及有关应用问题 (上)[J]. 数量经济技术经济研究, 1998, 15 (12): 39 - 47. [FAN Mingtai, ZHENG Yuxin. China CGE model: basic framework and relative application issues (Part 1) [J]. The journal of quantitative & technical economics, 1998, 15 (12): 39 - 47.]
- [9] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 等. 中国 2050 年低碳情景和低碳发展之路[J]. 中外能源, 2009, 14 (6): 1 - 7. [JIANG Kejun, HU Xiulian, ZHUANG Xing, et al. China 2050 low carbon scenario and low carbon development approach[J]. Sino-global energy, 2009, 14 (6): 1 - 7.]
- [10] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 等. 中国 2050 年的能源需求与 CO₂ 排放情景[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4 (5): 296 - 302. [JIANG Kejun, HU Xiulian, ZHUANG Xing, et al. China's energy demand and greenhouse gas emission scenarios in 2050[J]. Advances in climate change research, 2008, 4 (5): 296 - 302.]
- [11] 李继峰, 张亚雄. 基于 CGE 模型定量分析国际贸易绿色壁垒对我国经济的影响——以发达国家对我国出口品征收碳关税为例[J]. 国际贸易问题, 2012 (5): 105 - 118. [LI Jifeng, ZHANG Yaxiong. A quantitative analysis on economic impact of potential green barrier of international trade for China: case study of carbon tariff with SIC-GE model[J]. Journal of international trade, 2012 (5): 105 - 118.]
- [12] 毕清华, 范英, 蔡圣华, 等. 基于 CDECGE 模型的中国能源需求情景分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23 (1): 41 - 48. [BI Qinghua, FAN Ying, CAI Shenghua, et al. Analysis of China's primary energy demand scenarios based on the CDECGE model[J]. China population, resources and environment, 2013, 23 (1): 41 - 48.]
- [13] 刘亦文. 能源消费, 碳排放与经济增长的可计算一般均衡分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013. [LIU Yiwen. The simulation research and policy choice of energy consumption, carbon emissions and economic growth: a dynamic CGE approach [D]. Changsha: Hunan University, 2013.]
- [14] 李丕东. 中国能源环境政策的一般均衡分析 [D]. 厦门: 厦门大学, 2008. [LI Pidong. The general equilibrium analysis of China's energy and environmental policies [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.]
- [15] 李娜, 石敏俊, 王飞. 区域差异和区域联系对中国区域政策效果的作用: 基于中国八区域 CGE 模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009 (10): 35 - 44. [LI Na, SHI Minjun, WANG Fei. Roles of regional differences and linkages on Chinese regional policy effect: based on an eight-region CGE model for China[J]. Systems engineering: theory & practice, 2009 (10): 35 - 44.]

- [16] 李娜, 石敏俊, 袁永娜. 低碳经济政策对区域发展格局演进的影响——基于动态多区域 CGE 模型的模拟分析[J]. 地理学报, 2010 (12): 1569 – 1580. [LI Na, SHI Minjun, YUAN Yongna. Impacts of carbon tax policy on regional development in China: a dynamic simulation based on a multi-regional CGE model [J]. ACTA geographica Sinica, 2010 (12): 1569 – 1580.]
- [17] WU L, YIN X, LI C, et al. Trade and investment among BRICS: analysis of impact of tariff reduction and trade facilitation based on dynamic global CGE model[C]. 16th Annual Conference on Global Economic Analysis, 2013.
- [18] QI T, WINCHESTER N, KARPLUS V J, et al. An analysis of China's climate policy using the China-in-Global Energy Model [J]. Economic modelling, 2016, 52: 650 – 660.
- [19] ZHANG D, KARPLUS V, RAUSCH S, et al. Analyzing the regional impact of a fossil energy cap in China[R]. Cambridge, Massachusetts: MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2013.
- [20] ZHANG D, RAUSCH S, KARPLUS V, et al. Quantifying regional economical impacts of the CO₂ intensity reduction target allocation in China[R]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [21] KISHIMOTO P N, ZHANG D, ZHANG X, et al. Modeling regional transportation demand in China and the impacts of a national carbon constraint[R]. Cambridge, Massachusetts: MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2013.
- [22] QI T, WINCHESTER N, KARPLUS V, et al. The Energy and economic impacts of expanding international emissions trading[R]. Cambridge, Massachusetts: MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2013.
- [23] QI T, WINCHESTER N, KARPLUS V, et al. The China-in-Global Energy Model[R]. Cambridge, Massachusetts: MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2014.
- [24] QI T, ZHANG X, KARPLUS V. The energy and CO₂ emissions impact of renewable energy development in China [J]. Energy policy, 2014, 68: 60 – 69.
- [25] BURNIAUX J M, NICOLETTI G, OLIVEIRA-Martins J. Green: a global model for quantifying the costs of policies to curb CO₂ emissions[R]. OECD Economic Studies, 1992: 49 – 91.
- [26] BURNIAUX J M, MARTIN J P, NICOLETTI G, et al. GREEN a multi-sector, multi-region general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO₂ emissions: a technical manual[R]. OECD Publishing, 1992.
- [27] BABIKER H M, REILLY J M, MAYER M, et al. The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: revisions, sensitivities, and comparisons of results[R]. Cambridge, Massachusetts: MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2001.
- [28] PALTSEV S, REILLY J M, JACOBY H D, et al. The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: version 4 [R]. Cambridge, MA: MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2005.
- [29] KLEPPER G, PETERSON S, SPRINGER K. DART97: a description of the multi-regional, multi-sectoral trade model for the analysis of climate policies[R]. Kieler Arbeitspapiere, 2003.
- [30] FUJIMORI S, MASUI T, MATSUOKA Y. AIM/CGE [basic] manual[R]. Center for Social and Environmental Systems, 2012: 430.
- [31] FUJINO J, NAIR R, KAINUMA M, et al. Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model [J]. Energy journal, 2006, 27.
- [32] TULPUL V, BROWN S, LIM J, et al. The Kyoto Protocol: an economic analysis using GTEM[J]. The energy journal, 1999, 20 (Special Issue): 257 – 285.
- [33] LEJOUR A, VEENENDAAL P, VERWEIJ G, et al. WorldScan: a model for international economic policy analysis [R]. CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis, 2006.
- [34] CAPROS P, VAN REGEMORTER D, PAROISSOS L, et al. GEM-E3 model documentation [R]. Institute for Prospective and Technological Studies, Joint Research Centre, 2013.
- [35] BERNARD A, VIELLE M. GEMINI-E3, a general equilibrium model of international-national interactions between economy, energy and the environment [J]. Computational management science, 2008, 5(3): 173 – 206.
- [36] BORGES A M. Applied general equilibrium models: an assessment of their usefulness for policy analysis[J]. OECD economic studies, 1986(7): 7 – 43.
- [37] SHOVER J B. Applying general equilibrium [M]. Cambridge University Press, 1992.
- [38] 柴麒麟. 全球气候变化综合评估模型 (IAMC) 及不确定型决策研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. [CHAI Qimin. Global Change Integrated Assessment Model for China (IAMC) and sequential decision making under uncertainty [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.]
- [39] 赵永, 王劲峰. 经济分析 CGE 模型与应用[M]. 北京: 中国经济出版社, 2008. [ZHAO Yong, WANG Jinfeng. Economic analysis CGE model and its application [M]. Beijing: Economic Press of China, 2008.]
- [40] SAVARD L. Poverty and income distribution in a CGE-household sequential model[C]. Helsinki: WIDER Conference on Poverty, Inequality and Welfare, 2003.
- [41] BOCCANFUSO D, DECALUWE B, SAVARD L. Poverty, income distribution and CGE micro-simulation modeling: does the functional form of distribution matter? [J]. The journal of economic inequality, 2008, 6(2): 149 – 184.
- [42] DALTON M, ONEILL B, Prskawetz A, et al. Population aging and future carbon emissions in the United States[J]. Energy economics, 2008, 30(2): 642 – 675.
- [43] LAITNER J A, HANSON D A. Modeling detailed energy-efficiency technologies and technology policies within a CGE framework[J].

- Energy journal, 2006, 27.
- [44] HEYNDRICKX C, KOOPS O, IVANOVA O. The TIGER Model: application of detailed passenger and freight transport in a regional CGE setting[C]// ERSA Conference Papers. 2011.
- [45] LI M, YANG L. Rigid wage-setting and the effect of a supply shock, fiscal and monetary policies on Chinese economy by a CGE analysis[J]. Economic modelling, 2012, 29(5): 1858 – 1869.
- [46] MANZOOR D, ABED M. Impacts of rising interest rate on household welfare, saving and investment; a financial CGE analysis [J]. World applied sciences journal, 2013, 26(12): 1617 – 1627.
- [47] MCKITTRICK R R. The econometric critique of computable general equilibrium modeling: the role of functional forms[J]. Economic modelling, 1998, 15(4): 543 – 573.
- [48] ANNABI N, COCKBURN J, DECALUWE B. Functional forms and parametrization of CGE models [R]// Trade liberalization and poverty: a CGE analysis of the 1990s experience in Africa and Asia. 2008: 119.
- [49] ANNABI N, COCKBURN J, DECALUWE B. Functional forms and parametrization of CGE models[J/OL]. SSRN electronic journal, 2006(4). <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.897758>.
- [50] HUBLER M. Technology diffusion under contraction and convergence: a CGE analysis of China [J]. Energy economics, 2011, 33(1): 131 – 142.
- [51] MATSUMOTO K I. Economic implications of CO₂ emission reduction in Japan applying a dynamic CGE model with endogenous technological change; use of emission permit revenue[J]. Journal of environmental science and engineering B, 2012, 1(8): 945 – 956.
- [52] ROSON R. Introducing imperfect competition in CGE models: technical aspects and implications[J]. Computational economics, 2006, 28(1): 29 – 49.
- [53] ISHIKURA T, KOIKE A, SATO K. An analysis on differences in spatial computable general equilibrium models by market structure assumption: a comparison of perfect competition modeling and monopolistic competition modeling[C]// ERSA conference papers. 2012.

Review of research on global energy-economic computable general equilibrium models

QI Tian-yu^{1,2} ZHANG Xi-liang¹ HE Jian-kun^{1,2}

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Laboratory of Low Carbon Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Global energy-economic computable general equilibrium (CGE) model is the main tool in the assessment of low-carbon policies effects on the energy and economy systems, and plays an important role in low-carbon economy research. The development of global energy economic CGE models started in the 1970s, and after decades several model platforms have been established and widely applied. In China, the research of energy economic CGE models has conducted since 1990s, mainly based on national and regional perspectives, and the research of the global models is still in the early stage. With increasingly important China's global climate governance, research on energy and environmental issues in China needs to have an international outlook. This paper first summarized the present situation of global energy economic CGE models, evaluated the main functions and features of these models, and compared the features of several typical energy economic computable general equilibrium models. Beyond that, it discussed the trend and key issues of global energy economic CGE models, and put forward suggestions for the global model development in China. The main advantages of global energy economic CGE models are that their assessment based on solid theoretical foundation allows the people to judge and explain the model results from economic theories and interactive mechanism works to realize the coordination between energy and economic systems. Major critics on CGE models are their results sensitive to parameter assumptions which is hard to calibrate, their ideal market assumption, and the lack of technology details. The key issues and research trend of global energy economic models includes: the empirical analysis and detail calibration of key parameters, more detail description on economic heterogeneity, technology description and endogenous evolution, and models under imperfect and disequilibrium situation. We suggest that the modellers in China should develop their global model based on the existing framework of advanced global models and focus on the improvement of description of characters of developing economy, such as imperfect and disequilibrium market, in the model. The collection of basic data and the local calibration of key parameters should also be emphasized.

Key words energy economics; computable general equilibrium (CGE); global model