

| 气候变化经济过程的复杂性丛书 |

EMRICES: 气候变化经济学集成评估平台

刘昌新 王 铮 黄 蕊 等◎著

 科学出版社

气候变化经济过程的复杂性丛书

EMRICES: 气候变化经济学集成评估平台

刘昌新 王 铮 黄 蕊 等 著

国家重大研究计划（973）项目 2012CB955800 资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以气候变化经济学集成评估模型 EMRICES 为主线,介绍了该模型的特点、详细的模型体系、方程、最终软件的形成以及相关的实际应用等内容。EMRICES 模型是一个面向国家治理的气候、经济集成评估模型,具有丰富的气候变化经济学政策设计模块。EMRICES 综合了国际上的一些流行的集成评估模型的功能和优点,并克服了它们的一些不足之处,并采用 C#语言自主开发了软件。以此模型为基础,本书详细研究了 3 部分内容,首先是碳税、环境税对我国经济、碳排放以及环境的影响。然后,分析了产业结构调整对碳减排以及经济的影响。最后,讨论了全球碳减排的合作问题。由于 EMRICES 完全自主开发,所以在算法以及应用方面都有很好的扩展性。在全球碳减排合作问题的研究上,我们设计算法,将博弈论方法引入模型中。此外,以此模型为基础的实验经济学平台也已经实现,在本书中也有详细讨论。

图书在版编目 (CIP) 数据

EMRICES: 气候变化经济学集成评估平台/刘昌新等著. —北京: 科学出版社, 2016.4

(气候变化经济过程的复杂性丛书)

ISBN 978-7-03-048016-3

I. ①E… II. ①刘… III. ①气候变化-影响-经济-发展-研究
IV. ①F061.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 069712 号

责任编辑: 万 峰 朱海燕/责任校对: 何艳萍

责任印制: 张 伟/封面设计: 北京图阅盛世文化传媒有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年4月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年4月第一次印刷 印张: 9 3/4

字数: 230 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《气候变化经济过程的复杂性丛书》序

气候变化经济学是近 20 年才被认识的学科，它是自然科学与社会科学结合的产物，旨在评估气候变化和人类应对气候变化行为的经济影响与经济效益，并且涉及经济伦理问题。由于它是一个交叉科学，气候变化经济学面临很多复杂问题。这种复杂问题，许多可以追踪到气候问题、经济问题的复杂性。这是一个艰难的任务，是一个人类面临的科学挑战，鉴于这种情况，科学技术部启动了国家重大基础研究计划（973）项目——气候变化的经济过程复杂性机制、新型集成评估模型簇与政策模拟平台研发（No.2012CB955800），我们很幸运，接受了这一任务。本丛书就是它的序列成果。

在这个项目研究中，我们围绕国际上应对气候变化和气候保护的政策问题，展开气候变化经济学的复杂性研究，气候保护的全球策略与比较研究，气候变化与适应的全球性经济地理演变研究，中国应对气候变化的政策需求与管治模式研究。项目在基础科学层次研究气候变化与保护评估的基础模型，气候变化与保护的基本经济理论、伦理学原则、经济地理学问题，在技术层面完成气候变化应对的治理问题，以及气候变化与保护的集成评估平台研究与开发，试图解决从基础科学到技术开发的一系列气候变化经济学的科学问题。

由于是正在研究的前沿性课题，所以本序列丛书将连续发布，并且注重基础科学问题与中国实际问题的结合，作为本丛书主编，我希望本丛书对气候变化经济学的基础理论和研究方法有明显的科学贡献，而不是一些研究报告汇编。我也盼望着本书在政策模拟的方法论研究、人地关系协调的理论研究方面有所贡献。

我有信心完成这一任务的基础是，我们的项目组包含了一流的有责任心的科学家，还包揽了大量勤奋的、有聪明才智的博士后和研究生。

王 铮

气候变化经济过程的复杂性机制、新型集成评估模型簇
与政策模拟平台研发首席科学家

2014 年 9 月 18 日

前 言

2012年,我的课题组承担了国家重大研究计划“气候变化经济学集成评估模型IAM研发”的任务。这个任务不仅是“软”的研究,而且还包括“硬”的技术,我们必须开发出一个面向全球气候经济学治理的模型和软件系统。针对这个任务,我们研究了国际上的IAM研究状况,发现正如著名气候变化经济学家,杨自力指出的,IAM可以分为三种类型:第一是基于CGE分析模型,第二是跨期优化模型,第三是情景模拟模型。CGE分析可以认识气候治理经济政策的“牵一发而动全身”的作用,从而可以诊断减排政策不当引起经济系统失稳的问题。跨期优化分析是政策性的,减排是个持续的跨期优化过程,这个过程是控制,控制在升温限制下。情景模拟包括气候情景和经济情景,是IAM的基本要求。由此可以看到如何发展一个IAM,使它具有CGE的政策分析功能,又能发现动态控制气候-经济情景的政策路线,优化政策结构,是我们的任务核心。基于这个分析,我确定我们发展的IAM模型一定是同时具有这三者功能的,在这方面,Nordhaus和杨自力开发的DICE和RICE为我们树立了榜样。

在进一步的分析中,我们发现,从应对气候变化的全球经济治理角度看,我们需要三个治理水平的IAM,一是面向全球治理的IAM,它能分析全球气候变化情景,找到控制目标下的满足全球经济一般均衡的政策路线;二是由于国家是减排CO₂的行动主体,我们需要满足全球气候应对目标的国家治理IAM;三是需要一个地方参与全球气候治理的IAM。本书叙述的内容,主要是国家治理水平上的IAM,我们把它命名为EMRICES;这个缩写中保留了RICE,表示系统是对Nordhaus和杨自力模型RICE的纪念和发展。EMRICES软件是我们用C#写成的,欢迎学界使用。EMRICES模型集成了国际上许多学者的成果,谨向他们致敬。

本书叙述的EMRICES,第一次原型来自王铮、吴静和张帅开发的MRICES,郑一萍、蒋轶红、崔丽丽、朱永彬和刘扬参加了MRICES早期研究。后来,刘昌新在MRICES基础上将CGE嵌入了MRICES,形成了MRICES-E,朱潜艇在MRICES基础上将agent-based分析嵌入了MRICES,形成了MRICES-T,邵长江在MRICES基础上将海平面损失模型嵌入了MRICES,形成了MRICES-S,黄蕊将CGE计算实现了动态化,最终王铮、刘昌新完成了系统集成,并且设计了治理模块。EMRICES的中文意思是增强的多因子区域级气候变化经济学评估模型系统。与我们开发的另一个IAM模型——CIECIA相比,它不仅具有分析全球气候变化情景分析与应对策略的功能,而且增加了评估一个国家参与全球合作气候治理政策有效性的功能。显然,在EMRICES研究中,刘昌新起了核心骨

干作用。本书主要由刘昌新撰写，黄蕊也完成了部分内容，王铮组织设计了系统开发，完成了全书的策划和定稿。

笔者在此代表本书全体作者感谢丁一汇院士、徐冠华院士在作者研究 IAM 中给予的指导，同时还再次感谢 Nordhaus、杨先生与我们讨论和给予的帮助。作者对于课题组的全体研究同仁长期共同研讨技术难关，在此一并致谢。

王 铮

2015 年 12 月 2 日于中关村

目 录

《气候变化经济过程的复杂性丛书》序

前言

第 1 章 引论	1
1.1 应对气候变化所需的模型	1
1.1.1 自然物理系统	1
1.1.2 气候经济系统	2
1.2 集成评估模型 (IAM) 简述	3
1.2.1 IAM 的发展	3
1.2.2 IAM 的分类	4
1.2.3 IAM 的不足及发展方向	7
1.3 新型集成评估模型	10
1.3.1 MRICES 概况	10
1.3.2 EMRICES 的基本框架	12
参考文献	13
第 2 章 EMRICES 经济模型	17
2.1 EMRICES 经济模型的机理	17
2.1.1 IAM 模型机制中的两个关键问题	17
2.1.2 CGE 模型	18
2.1.3 EMRICES 经济模型框架	20
2.2 EMRICES 的经济模型表述	21
2.2.1 CGE 模型基本结构	21
2.2.2 动态 CGE 机制	25
2.2.3 CGE 与 MRICES 结合的逻辑框架	25
2.2.4 CGE 与 MRICES 的经济总量的关系	26
2.2.5 MRICES 的温度对 CGE 的反馈影响	27
2.2.6 其他国家或地区的经济模型	27
2.2.7 GDP 溢出模块	28
2.3 碳排放量计算	29
2.4 碳税、环境税模块	29
2.5 碳交易模块	30
2.6 数据及参数说明	30
参考文献	34

第 3 章 EMRICES 气候模型	36
3.1 碳循环、辐射强迫即大气温度变化模块	36
3.1.1 碳循环模块	36
3.1.2 辐射强迫模块	38
3.1.3 温度变化模块	38
3.2 碳循环模块的比较	39
3.2.1 模型对比分析	39
3.2.2 参数取值和计算实现	40
3.2.3 模拟结果分析	41
3.2.4 结论	48
3.3 气候变化对经济反馈模块	48
3.4 海平面模块	49
3.5 淹没损失模块	50
参考文献	52
第 4 章 EMRICES 软件系统	54
4.1 系统需求分析	54
4.2 系统逻辑设计	54
4.3 系统详细设计	56
4.3.1 MRICES 系统设计	56
4.3.2 CGE 系统设计	60
4.3.3 系统耦合设计	61
4.3.4 数据库设计	61
4.4 程序实现过程	62
4.4.1 动态 CGE 系统开发	63
4.4.2 EMRICES 的程序实现	64
4.5 开发环境及软件安装	64
4.6 软件使用	65
参考文献	70
第 5 章 税收政策治理模拟	71
5.1 基准情况	71
5.1.1 GDP 对比	71
5.1.2 碳排放量对比	73
5.1.3 人均碳排放量对比	74
5.1.4 累计效用对比	75
5.1.5 全球气候变化分析	75
5.2 碳税情景 (C)	76
5.2.1 国内外碳税研究	76
5.2.2 碳税情景分析	78

5.3 混合税情景	82
5.3.1 碳税和硫税情景分析 (CS)	83
5.3.2 硫税和 VOC 税情景分析 (SV)	86
5.3.3 碳税和 VOC 税情景分析 (CV)	89
5.3.4 硫税、碳税和 VOC 税情景分析 (SCV)	92
5.3.5 各情景比较分析	95
第 6 章 产业结构调整政策治理模拟	99
6.1 产业结构演化与碳排放	99
6.1.1 产业结构与碳排放相关理论	99
6.1.2 产业结构变化趋势	100
6.1.3 中国各产业的碳排放强度	101
6.1.4 产业结构变化对碳排放的影响	105
6.2 中国产业结构调整政策的减排效果评估	110
6.2.1 基本情景设置	110
6.2.2 各种情景下的模拟结果	113
6.3 小结	117
参考文献	117
第 7 章 全球碳减排合作博弈分析	119
7.1 模型	120
7.1.1 全球减排形势	120
7.1.2 全球减排合作原则讨论	120
7.1.3 福利	121
7.1.4 全球区域与减排策略	121
7.2 结果讨论	122
7.2.1 纳什均衡求解及结果	122
7.2.2 最终方案的确定	123
7.3 方案的敏感性分析	125
7.3.1 贴现率对纳什均衡的影响	125
7.3.2 贴现率对方案帕累托改进性质的影响	125
7.4 主要结论	127
参考文献	128
第 8 章 基于 IAM 的实验经济学研究	130
8.1 实验准备	130
8.2 实验结果	131
8.2.1 个人社会偏好分析	131
8.2.2 专家组实验分析	133
8.2.3 公众组实验分析	140
8.3 总结	144
参考文献	145

第 1 章 引 论

气候变化问题是最近几十年来全球的重要议题，它给全球的经济、社会、政治带来了巨大的影响。应对气候变化需要全球共同参与，它涉及经济、生态、气候、政治甚至社会公平伦理等问题，是一个非常庞杂的难题。对一个国家而言，它需要均衡考虑气候变化问题和民生问题，既要防止气候变化带来的灾难，也要防止因为 CO₂ 减排力度和措施不当引起国家经济危机。因此，应对气候变化是一个复杂的国家治理问题。

国家在应对气候变化时，需要一些机制来评估和预测未来发展趋势以及相应的影响。这就需要建立相应的模型，通过模拟来明确相应的问题和解决方案。模型的内容是多方面的，包括碳循环系统的物理机制，也包括动态经济系统运行机制等。本书以集成评估模型为主线，结合税收以及产业结构调整等国家经济调控方法来研究气候变化经济学的国家治理问题。

1.1 应对气候变化所需的模型

要进行气候保护的相关研究，需要科学模型来支撑我们的研究，模型不是万能的，但是在研究气候变化的问题上，没有模型是得不到实质性的解决方案的。虽然在研究中考虑全部细节或是完全体现动态复杂性的特征是不可能实现的，但通过模型可以帮助我们更好地理解问题和解决问题。气候变化问题是全球尺度上的复杂的研究课题。这个研究既离不开自然科学，也离不开经济学。研究气候变化的相关模型的类型很多，但总体来看可以分为两类：一类是自然物理系统，另一类侧重经济系统。

1.1.1 自然物理系统

基于大规模计算模型帮助我们建立的一致共识已经在科学界获得声誉。著名的大气环流模式（GCM, general circulation model）显示了很多细节，并且集中描述了气候变化的物理现象。尽管 GCM 模型还有很多（如气候敏感性参数）不确定性，由于它对过去的拟合效果良好，以及通过理论与经验在物理法则上建立的方程体系，使得该模型获得了广泛认可（Ackerman et al., 2009）。

在自然物理系统模型方面，目前有大量研究大气的模型，其中许多模型仍在进行进一步的研究和发展。这些模型包含了从 20 世纪 60 年代非常简单的一维能量模型到当前用于科学研究及政策讨论的更复杂的三维甚至四维的大气一般环流模型（AGCMs, atmospheric general circulation models）。大气一般环流模型（AGCMs）是基于物理的数值公式和决定大气及海洋表层运动的化学规律。这些模型把地球表面分解为一系列区域。计算地表温度通量、水通量和能量通量，并将它们存储在计算机中。每个区块都有一个垂直大气列坐标，它可以包含 2~19 个等级。计算和存储覆盖地球的所有等级交互的风

矢量、湿度、云量、温度和海拔高度。除了计算前面的数据外，还要计算一组相邻块之间包括水平和垂直的相互作用。通常每区域元素之间的相互作用用非线性微分方程来表示。这些方程以每小时或半小时时长计算解一次，模型可以模拟很长时间（如 400 年），在模拟时间长度内每天每半个小时得到一组方程并计算一次解。现在的 AGCMs 模型能够囊括驱动大气系统的辐射传入太阳能的日变化和季节变化。显然，目前的 AGCMs 模型更为复杂，当前研究进一步将大气系统与大气和海洋环流模型（OGCMs, general circulation models）进行耦合以得到大气海洋环流模型（AOGCMs, atmospheric ocean general circulation models）。更为先进的是研究中等复杂性环境模型（EMIC, environmental model of intermediate complexity），作为大气、生物圈、水圈、冰冻圈与人类相互作用的科学认识的一部分（Claussen, 2005）。

1.1.2 气候经济系统

物理机制的模型对于研究气候变化的作用是不言而喻的。它使人们能更清晰地看到地球将发生什么改变。但是，仅有物理机制的研究是远远不够的。人类社会的问题，尤其是全球人类面临的共同的气候变化问题已经不仅仅是物理模型所能解答的，还需要有社会经济的分析。例如，如何评估减排温室气体对经济的影响，如何协调各国在减少温室气体排放上的争执，全球的温室气体减排方案应该如何确定，应该采取碳交易还是碳税来减少碳排放，应当如何确定穷人与富人、发达国家与发展中国家的碳排放权，各个国家的减排路线应该如何设计，等等。这些问题的分析需要借助于经济学分析的方法。

经济学家也采用计算模型研究气候变化。这些模型被称为集成评估模型（IAM, integrated assessment models），它结合了气候系统与经济模型，用于评估气候政策选择的成本和收益。经济学家采用 IAM 来鉴定最优政策响应，即最大化收益和成本差（也就是净收益）。随着对气候政策争议从科学的不确定性到经济的可行性，IAM 的结果显得更加重要，合理地解释 IAM 对科学家和其他支持前瞻性气候问题的人来说是重要的（Owen and Hanley, 2004）。经济学在评估未来的减排方案中可以发挥重要的作用。例如，评估不同措施的成本效益；估计对经济增长和可持续发展的影响；模型对社会公平的影响等。应对气候变化的模型也一定需要结合经济学模型来分析。Nordhaus 给出了两点理由：一方面，旨在减少温室气体排放的政策措施，必须通过经济系统才可起作用；另一方面，气候变化也会对经济系统的生产过程和最终产出产生影响，如干旱导致粮食歉收（Nordhaus, 1982）。实际上，要开展气候变化相关政策的减排成本效益分析就离不开 IAM，进一步，分析国际合作减排的公平方案也不可能离开 IAM 模型而去讨论。可见，固然自然学科在探索地球生态系统的规律上起着基础性的作用，但是如果涉及遏制气候变暖的政策实践就绕不开经济学。

气候变化问题不同于其他的环境问题，尤其独特。Owen（Owen 和 Hanley, 2004）指出，在环境经济学中，三个重要的特征使得气候变化的研究独特。

（1）气候变化是全球性的。气候变化的全球性源自这个事实，无论在地球上何处排放的温室气体，它们迅速融入到大气中，并在全球蔓延。然而，由此产生全球气候变化的后果预计很不一致，一些国家预计遭受比其他国家更大的不利影响。此外，任何一个

国家的单方面行动都不能显著地改变这种状况。因此，需要在国际层面的共同筹划的补救合作行动去解决问题。

(2) 气候变化的影响是长期性的。气候变化影响的长期性源自这个事实，在空气中，温室气体的含量不断通过新的排放量而累积。这个存量的自然分解率从少则几十年的气体，如甲烷，到几百年的气体，如 CO_2 ，甚至到几千年（如全氟化碳类）不等。因此，这些排放物所导致的影响，如全球平均温度升高和海平面上升，将会长期进行。这么长时间的间隔也会影响补救措施，未来气候变化的危险必须用现在采用的缓解行动的成本来抵消。

(3) 气候变化本身的性质和缓解气候变化政策的影响的理解仍然不足。气候变化最终的物质影响的实际精确度尚待确定。虽然这适用于其他的污染物，气候变化影响的不确定性涉及全球巨大的规模和广度的可能性。因此，与改变天气模式、农业模式以及其他影响相关的损害成本大小有着不确定性。这使得政策选择很难决定，并使决策者推迟他们的回应，直到潜在损害的较强的科学证据可用。Repetto 和 Austin (1997) 认为对全球大气中 CO_2 排放未来预测的 80% 的变动来源于 8 个方面。具体包括可替代的非碳燃料的范围、宏观经济响应的效率、用于经济生产的替代能源、联合实施的程度、碳税收入的利用、空气污染损害的厌恶程度、防止气候变化对未来造成的破坏程度以及最终 CO_2 排放量减少的大小。

因此，研究气候变化的经济学模型（一般称为 IAM）首先应该是在全球尺度上研究问题。狭小空间尺度上的气候模型对于整个气候保护的研究意义并不突出。由于碳循环以及气候系统的特点，IAM 模型必须要有长期运行机制。这也要求经济系统必须能反映经济发展趋势。

在应对气候变化经济学问题上，给定减排目标，只是解决了气候系统中碳浓度和温度的控制问题，但如何去实现这个目标，则涉及了诸如产业结构、能源结构调整、低碳技术应用以及由此引发的地缘政治等很多问题。对一个国家而言，它需要根据减排目标考虑多方面的因素，并制定减排路径，这属于国家治理的范畴。

1.2 集成评估模型（IAM）简述

1.2.1 IAM 的发展

尽管集成评估模型（IAM, integrated assessment model of climate change）已经得到了广泛的认可，但是对于什么是 IAM 却没有一个明确的定义（Parker et al., 2002）。Yang (2008) 指出许多关于气候变化的经济学研究已经与气候学、生态学、区域科学以及工程学联系起来，并逐渐形成一种特殊的研究领域，称为气候变化的集成评估模型，即 IAM。尽管 IAM 并没有明确的定义，但是对于什么样的模型属于 IAM 还是有比较明确的答案的。实际上只要是结合经济模型来研究气候变化问题的模型都可以称为集成评估模型（IAM）。

IAM 具有集成多个学科的特点，国际上比较知名的 IAM 模型都是由包括经济学家

在内的众多领域的专家一起开发的。具体的单位有美国的麻省理工大学 (MIT); 卡内基-梅隆大学 (Carnegie-Mellon University); 西北太平洋实验室 (Pacific Northwest National Laboratory); 奥地利的应用系统分析国际研究所 (International Institute for Applied Systems Analysis); 日本的亚太集成模型小组 (Asian-Pacific Integrated Model group); 荷兰的公共健康国家研究所 (National Institute for Public Health) 等。

IPCC 在 2001 年发布的第三次气候变化评估报告中, 承认了 IAM 模型的优势, 将 IAM 模型纳入评估报告的相关分析中。至 2007 年的第四次评估报告中, 则使用了 6 个评估气候变化与保护的经济影响的 IAM, 出现在排放情景专门报告中 (SRES, special report on emissions scenarios)。用于分析 40 个排放情景。著名的《Stern 报告》的基础性技术工作也是基于 IAM 之一——PAGE 模型的结果来讨论的。到了 2001 年, 形势的发展还催生出了一个名为 *Integrated Assessment Journal* 的新期刊。由此可见, IAM 在气候变化的研究中占有十分重要的位置。

早期处理气候变化问题的 IAM 模型是 20 世纪 70 年代, 如 (Nordhaus, 1979) 和 (Häfele and Anderer, 1981) 等。这些模型只是将大气 CO₂ 浓度以及温度变化作为环境变量。但是随后 IAM 模型得到了极大的关注, IAM 本身得到了很大的扩展, 很多物理机制的细节被添加了 (Mintzer, 1987; Lashof, 1989; Rotmans et al., 1990)。自此, 已发展出了大量的模型 (Schneider, 1997)。之后一些 IAM 已经增加了土地利用和陆地碳循环、非 CO₂ 气体以及空气污染, 以研究气候变化的特殊影响。

现在, IAM 已经变成评估处理气候变化的常用工具。它们主要用来描述决定气候变化的环境、社会和经济因素以及气候政策的有效性, 从而取得好的政策建议 (Weyant et al., 1996; Schneider, 1997; Harremoës and Turner, 2001; Hope, 2005)。IAM 能够提供的政策问题包括: 确定减少温室气体排放的成本以及效益, 识别为达到某个减排目标的有效的减排路径, 研究不同减排方法对经济的影响等。为了回答这些问题, IAM 通常描述了从经济活动和排放到气候的变化以及相关的影响, 如生态、人类健康和农业之间的因果联系以及气候变化对经济活动影响的反馈。

1.2.2 IAM 的分类

IAM 可以被划分为不同的类别。不同的学者对分类的出发点是不尽相同的。这些分类可以帮助我们更好地理解与比较 IAM 模型的差异, 并识别它们的功能。van Vuuren 认为一些 IAM 更关注经济, 如多部门的可计算一般均衡模型与气候模块的集成, 这些模型主要关注成本效益分析; 另一些 IAM 主要关注自然系统与经济的物理过程 (集成的结构模型或生物物理影响模型) (van Vuuren et al., 2011)。这种分类办法是根据 IAM 的碳循环以及温度变化的描述的细致程度来区分的。

而实际上对于碳循环系统与气候系统的简化程度要看建模的目的是什么 (Goodess et al., 2003)。对于关注成本效益分析的 IAM (如 DICE, FUND 以及 MERGE) 来说, 碳循环和气候系统相对于 GCM 系统被大大地简化了。大气 CO₂ 的量是碳排放量的函数, 而其他温室气体的排放量则是一个固定不变量。浓度被直接用来计算辐射压力。均衡温度的变化随着辐射压力的变化而变化。而关注物理过程的模型对气候以及碳循环的表述

要更加详细点。很多 IAM 采用自下而上的能源平衡模型与一个全球碳循环模型结合来描述温室气体以及全球尺度的气候变化,如 MAGICC。此外,也有采用网格规模的参数,来驱动网格级别的农业增长模型。还有一些 IAM 把陆地碳汇、碳源在网格尺度上表述出来,从而引入了气候与碳循环、土地覆盖以及土地利用之间的更加复杂的关系,如 IMAGE (Bouwman et al., 2006)。

Goodess 等(2003)则将 IAM 划分为三类:基于成本效益分析的 IAM;基于生物物理的 IAM;基于政策导向的 IAM。

(1) 基于成本效益分析的 IAM (Cost-Benefit Analysis IAM for Policy Optimisation)。例如, CETA、DICE、FUND、ICAM-3、MERGE 以及 MiniCAM 等都是此类 IAM 模型。这些模型首要关心的是气候变化带来的经济损失。例如,对比减排适应的成本以及气候恶化带来的成本,从而评估可能的备选政策。在这些模型中,气候模块都是二维以下的,有的甚至是零维的。这些模型的计算耗时较短,最多不超过几个小时。因此,他们可以用于迅速评估诸如《京都议定书》之类的减排协议。

(2) 基于生物物理的 IAM (Biophysical-Impact Based IAM for Policy Evaluation)。例如, CLIMACTS、ESCAPE、IMAGE 以及 IGSM 等。这些模型更加关注生物物理的定量评估而非经济类的政策评估。它们倾向于在区域层面上分析,有的也可以集成到全球层面上分析。这些模型的优势是可以在较高的空间分辨率上分析气候变化的影响。但这些模型的缺点是经济模块显得相对单薄。模型无法在相对应的空间分辨率上建立经济关系。经济模块方面往往只包含 GDP、人口以及能源使用情况。

(3) 基于政策导向的 IAM (Policy Guidance IAM)。例如, ICLIPS。它将经济损失(植物、农业、水资源)模块通过气候冲击响应函数转化为可容忍窗口(tolerable windows)。可容忍的窗口一般由温度的上升量、降水量以及海平面的上升水平表示(Füssel et al., 2003)。这些限制再被输入温室气体排放——气候变化模块,用于计算保持与可容忍窗口一致的碳排放路径(Bruckner et al., 2003)。这种模型可用于推算气候变化的阈值。

Yang (2008) 根据模型的方法学可以将气候变化的 IAM 模型划分为三类:可计算一般均衡模型(CGE, computable general equilibrium)、跨期优化模型、情景模拟模型。

(1) 可计算一般均衡模型,如 MIT 的 EPPA 模型以及西北太平洋实验室的 SGM 模型。CGE 模型通常是以社会核算矩阵(social accounting matrix, SAM)为基础数据库建立的模型。它可以实现部门与区域的详细划分,并研究部门之间以及区域之间的相互关联的经济关系。在研究未来温室气体排放以及评估温室气体减排的战略时,CGE 能提供很有用的信息。建模者可以在 CGE 中建立特定的结构或者模块来分析特殊的经济问题。CGE 的一个缺点是,由于受到数据的限制,其动态性受到较大的限制。通常都是静态或者递归动态的。目前,还没有出现一个“有远见”的 CGE 模型(Yang, 2008)。

(2) 跨期优化模型,如 Yale 的 RICE 模型与 MERGE 模型。跨期的或者动态的优化模型目前并没有细化到部门水平。但是相比于 CGE 模型,在刻画对未来事件的经济个体的决策与响应方面,它有更好的灵活性。在跨期优化问题上比 CGE 的机制要更为合理。此外,它的动态结构也比 CGE 更具有透明性。

(3) 情景模拟模型, 如卡内基-梅隆大学的 ICAM 模型以及荷兰公共健康国家研究所的 IMAGE 模型。情景模拟模型并不需要花时间来寻求最优解。整个模型是不带有任何决策制定或者经济个体的最优化行为。建模结构上也往往采取自下而上的模式。而且, 模型中部门经济之间往往缺乏联系。经济模块中一般不存在一般均衡的框架。

Van Vuuren 等 (2006) 将 IAM 模型分为划分为三类: 多部门一般均衡模型、集成一般均衡模型、集成结构模型 (van Vuuren et al., 2006)。他们的分类与 Yang 的有些类似。

(1) 多部门一般均衡模型 (multi-sector general equilibrium)。例如, AMIGA、EU-PACE、EPPA、SGM 和 WIAGEM 等模型。

(2) 集成一般均衡模型 (aggregate general equilibrium)。例如, MERGE 和 GRAPE 等模型。

(3) 集成结构模型 (integrated structural model)。例如, IMAGE、MESSAGE、AIM 和 MiniCAM 等模型。

Bahn 从经济模块与气候模块的连接紧密程度角度认为 IAM 可以分为两类: 一类是经济、气候以及损失模块高度融合的模型, 如 RICE、DICE 和 MERGE 模型。这类模型通常是在一个较长时间里寻找最优的减排政策。另一类模型为 IGSM 模型。经济系统采用多区域一般均衡模型, 气候系统采用了高分辨率的通用气候系统。但系统在经济和气候子系统之间的连接显得过于简单。经济系统只对温度上升做损失评估, 但是经济系统自身的发展却不受影响 (Bahn et al., 2006)。

如果将 Bahn 的意思继续深入一下, 可以发现目前这些分类都忽略了极其重要的一点、气候变化对经济发展路径的影响。

在经济增长理论中, 经济增长路径备受关注, 尤其是对于何种因素会影响到经济增长。Lucas (2002) 指出, 资本、劳动力和技术是影响经济增长的根本原因, 而劳动力增长、技术进步是给经济带来持续增长的源泉。气候变化给经济带来的负面影响, 实际上已经影响到了经济的发展路径。全球气候变化带来了当期的经济损失, 这种损失也必定会引起下一期的投资资金的影响, 进而影响作为生产要素的资本的量。Nordhuas (2008) 甚至将 CO₂ 视为一种新的生产要素, 同资本一样, 是一种存量的投入要素, 只不过这种要素对经济的增长是负面的影响。因此, 是否将气候变化带来的损失反映到经济增长的过程中, 决定了一个模型是否认可气候变化将改变经济的发展轨迹。实际上, 几乎所有的模型都考虑到了温度上升带来的经济损失, 但并不是所有的模型都将经济的损失反映到未来经济的发展轨迹上。如果按照 IAM 模型是否考虑气候变化对经济增长路径的影响, 可以将模型大致分为两类。考虑气候变化对经济增长路径影响的模型是以 RICE、DICE、MERGE 和 WITCH 为代表的最优化模型, 它们在模型的机制上比较简单, 物理模块不如 IMAGE, 经济模块不如 CGE 模型的 FUND 与 WIAGEM。但是它们却将气候变化的影响内置到经济发展模块上, 这也许就是 RICE 模型族能不断得到发展与关注的魅力所在。

表 1.1 给出了国际上部分主要 IAM 的统计情况。温度对经济系统的反馈是一个重要的指标, 它反映了模型是否有能力将气候变化的影响内化到经济的发展路径上。在气候变化问题上, CGE 的最大优势是可以将减排措施设置在部门水平上, 并能反映出各个部

门受到的减排影响。GREEN 以及 G-CUBED 模型作为早期的能源环境类的 CGE 模型融入了碳排放量的核算。但是没有将气候模块纳入进来,可用作计算碳税、碳关税对减排的影响。之后的 CGE 模型,如 FUND、Wiagem 加入了温度上升的损失函数,可惜没有在生产函数中引入温度要素(Kemfert, 2002)。FUND 模型虽然将损失分为了 15 种类型,但是仅仅给出了温度上升带来的损失,而没有给定温度对生产的影响(Tol, 2002; Ackerman and Munitz, 2012)。RICE 模型的缺点是大家有目共睹的,许多其他模型虽然从经济模块以及气候模块都做了扩展,却往往丢掉了其最本质的东西,即气候变化对经济增长的影响。这种温度与经济的紧密结合关系的缺失实在是一种遗憾。

表 1.1 主要的 IAM 模型

模型名称	全球/区域	国家经济水平/部门经济水平	区域间 经济联系	部门间联系	优化/模拟	温度上升的 损失评估	温度对经济 系统的反馈
AIM	亚太地区	国家经济水平, 考虑能源供需均衡	—	无	模拟	有	无
IMAGE	全球	5 部门	无	无	模拟	有	无
MESSAGE	全球	国家经济水平	无	—	优化	有	无
MARIA	全球	国家经济水平, 考虑能源供需平衡	有	无	优化	有	有
MiniCAM	全球	考虑能源供需平衡以及农业供需平衡	无	无	模拟	有	有
RICE	全球	国家经济水平	无	—	优化	有	有
MRICES	全球	国家经济水平	有	—	兼有	有	有
MERGE	全球	国家经济水平	无	—	优化	有	有
WITCH	全球	国家经济水平	无	—	优化	有	有
FUND	全球	部门水平	有	有	模拟	有	无
GREEN	全球	部门水平	有	有	模拟	无	无
G-CUBED	全球	部门水平	有	有	优化	无	无
WIAGEM	全球	部门水平	有	有	模拟	有	无

1.2.3 IAM 的不足及发展方向

对于 IAM 的批评也是存在的。由于 IAM 的类别很多,各有各的特点,因此,不能一概而论。可能某个 IAM 类型存在的缺陷在另一类型 IAM 中就不复存在(很多 IAM 模型在功能上可以说是互补的,不能简单地某个模型比另一个模型好)。此外,一个明显的特点是模型机制越透明,越容易遭受到批判,如 RICE 和 MERGE 等。但是,批评是有利的,它总是为模型的可能发展方向提供思想。

Goodess 指出,由于 IAM 需要集成不同的学科内容,因此,有可能会导模型的复杂化。为了简化处理,很多 IAM 采用了相对简单的方程来刻画相应的机制。这种简化通

常在气候系统以及碳循环系统中比较明显,有的 IAM 模型就用很少的几个方程来描述气候系统 (Goodess et al., 2003)。实际上,他批判性描述的这些 IAM 主要是关注成本效益分析的最优化模型以及部分 CGE 模型,如 RICE、DICE、MERGE、FUND 和 Wiagem 等。受算法的影响,对于 CGE 而言,其气候模块简单,辐射强迫与温度的关系均为线性方程。这主要也受制于 CGE 的计算方程为线性的特征。由于无法将庞大的动力学气候模型都采用线性函数表示,CGE 的气候模块也不可能过于复杂。对于最优化模型来说,当气候模块过于复杂时,将会耗费大量的计算时间,甚至不可解。不过,现在也有一些尝试试图改变这种情况,一种新的算法 OBOT (oracle based optimization technique) 已经取得了一些突破,它首先将 IAM 分解为两个子模块:气候模块与经济模块,然后在两个子模块中采用数据库交互搜索技术完成最优减排路径的搜索 (Bahn et al., 2006)。这种技术可以实现将 RICE 模型中的气候模块扩展得更加详细,同时又保持 RICE 原有的经济与气候模块紧密结合的重要特征。一种可能的预见是,该技术能将 RICE 的经济模块扩展为更加详细的 CGE 模块。但目前面临着两种困难:一是由于 CGE 目前尚未将气候变化因素融入到生产函数中;二是在部门层面上寻找最优策略将会增加巨大的计算量。

另一种批判是认为经济机制相对太简单。Ackerman 认为 RICE 和 DICE 有两个重要的缺陷,首先是没有考虑市场的均衡,即没有在一般均衡框架下分析经济影响。一般均衡分析对于保障经济平稳发展具有重要的意义。举例来说,气候变化带来海平面上升,从而会使一些小岛国家淹没,如马尔代夫。颇具讽刺意味的是,去马尔代夫的游客基本都是乘坐飞机过去的,而飞机又是一个十分耗能的交通工具。显然取消马尔代夫的旅游景点可以为节能减排作出贡献,但是这样一来,岛上居民的收入来源将面临巨大挑战。以小见大,这个事情说明在气候保护问题上,需要采用市场均衡的视角去看待问题。如果只看到减少飞机油耗带来的减排效果,而忽略了岛国居民的收入来源,那么所得的结论是有很大的问题的。气候变化问题需要得到解决,经济也需要得到发展。经济不仅需要发展,而且是平稳的发展。不能因为减排而导致国家出现经济危机。简而言之,我们需要研究在平稳经济发展条件下的减排路径和办法,而采用一般均衡模型分析是一个有效的方法。

其次,DICE 的技术进步没有内生化,需要考虑干中学机制 (Ackerman et al., 2009)。王铮等 (2006) 已经将干中学机制引入到 RICE 中。但是,对于如何将 RICE 的经济模块扩展为市场均衡的模型,乃至多部门多区域的一般均衡模型,尚需要进一步研究。但在 IAM 发展得如火如荼的情形下,IAM 不仅需要回答气候将如何变化,经济将受到怎样的影响,其最终的目的将是引导人们如何平衡气候变化与经济增长的关系。

从现有的 IAM 模型看,基于最优化的模型 RICE、MERGE 等虽然将气候变化作为影响经济发展的因素引入到了生产函数。但其在经济细化、技术进步以及区域经济的相互联系等问题上仍有不足。而大型的集成评估模型包括 CGE 类型的模型,如 ICAM、IMAGE、FUND 和 WIAGEM 等,它们又不能将气候变化因素纳入到经济增长模块。因此,建立一种新的 IAM 迫在眉睫。这种新的 IAM 将从经济增长理论出发,充分考虑气候变化模式下的经济增长模式。具体来说,在气候变化的背景下,影响经济增长的因素有资本、劳动力、技术、气候变化、产业结构、能源结构等。气候变化因素是指 Nordhaus