

| 气候变化经济过程的复杂性丛书 |

区域能源与碳排放战略 决策分析的模型探索

邓吉祥 于洪洋 石莹 刘晓 王铮◎著



科学出版社

气候变化经济过程的复杂性丛书

区域能源与碳排放战略决策分析的模型探索

邓吉祥 于洪洋 石莹 刘晓 王铮 著

国家重大研究计划（973）项目（No.2012CB955800）资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合我国区域气候经济治理的现实需求,从碳减排经济学出发,运用发展经济增长原理、动态最优化理论、投入产出和目标规划模型、DSGE 模型等理论和方法,开展了区域能源碳排放的基本模型建模,定量评估了中国区域碳排放的未来演化趋势、区域碳排放权的分配效果,提出了区域最优减排路径,讨论了能源结构演化、碳排放权分配、碳税、产业结构优化等气候经济政策的减排有效性。结合计算机技术、采用混合编程等方法,对 IAM 模型进行了建模和模拟,研发了一个基于 GIS 的区域能源与碳排放战略决策支持系统作为 IRAM 的核心探索,基于该系统,完成了不同情景、不同政策的气候影响模拟和评价,得到了中国最优化减排路线等重要结论。本书可以为政策模拟相关领域的研究人员提供参考,也可供经济学、管理学、地理学、大气科学、环境科学等专业的高年级本科生和研究生参考或作为基础教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

区域能源与碳排放战略决策分析的模型探索/邓吉祥等著. —北京:科学出版社, 2016.4

(气候变化经济过程的复杂性丛书)

ISBN 978-7-03-047977-8

I. ①区… II. ①邓… III. ①能源经济—研究—中国②二氧化碳—排气—研究—中国 IV. ①F426.2②X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 062041 号

责任编辑:万 峰 朱海燕/责任校对:张小霞

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 1/4

字数:205 000

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管治问题，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

减排已成为全球共识，作为负责任的大国，中国继 2008 年提出了 2020 年单位 GDP 碳排放量比 2005 年减少 40%~45% 的目标后，又向世界承诺 2030 年后不再增加碳排放。有关气候变化的应对和保护政策必须落实到区域层面才能保障总体目标的实现，因此在该目标约束下，如何在努力控制碳排放前提下，确保地区经济增长的平稳性和经济发展的相对公平性，已成为政府制定区域可持续发展政策的重要问题。因此，根据全球气候经济学集成评估模型（IAM）的科学思想，我们需要面向全球治理的 IAM 系统、面向一个国家的 IAM 系统和面向地方（local 或者狭义的区域）治理的 IAM。发展应对气候变化下区域经济可持续发展决策支持系统，就是发展面向地方治理的 IAM 的工作。

基于这种科学和国家需求，我组织了研发区域能源与碳排放战略决策支持系统[地方气候变化经济学集成评估模型（intergrated regional assessment model, IRAM）]的工作。在我的组织下，先后参加这项工作的主要有我的研究生朱永彬、刘晓、黄蕊、邓吉祥、陈志健、于洪洋、石莹、吴乐英、丁冠群、顾春香，我负责了这个 DSS 的规划和设计，华东师范大学王远飞副教授、乐群副教授参加了系统规划。模型内容是 DSS 的重要部分，我的工作就是领导开展这项模型研究。本书讨论的这些模型主要来自邓吉祥同学的博士学位论文，经济增长的能源需求模型部分，来自朱永彬、黄蕊的最初研究，DSGE 部分，来自于洪洋的学位论文，混合能源消费模型是石莹完成的，碳配额方法研究是刘晓完成的，邓吉祥在这个研究中起到了承上启下的作用，并且完成了本书的初稿。因此，邓吉祥是本书的主要作者，于洪洋是第二作者，石莹是第三作者，刘晓是第四作者，我作为系统的设计者、部分模型的提出者和系统开发的组织者，最后修订了书稿，成为了本书统筹和通信作者，列名以后。其他同志对本书也有贡献，我们是一个研究团体。

在内容方面，本书综合应用经济学原理、动态最优化理论与方法、投入产出模型和目标规划等方法，开展了基本的模型的建模，可以定量评估区域碳排放政策和减排路径，并讨论了能源结构演化、碳排放权分配、碳税等气候经济政策对减排的有效性，分析了不同减排政策对产业结构、区域发展和区域公平性的影响。技术上，本书部分反映了以 C#.NET 为基础，并结合 Arcgis Engine 二次开发，最终开发出了一个基于 GIS 的区域碳排放决策支持系统的工作。

必须指出，由于 IRAM 的复杂性，本书的研究作为区域碳排放控制战略 DSS 的原型探索，尚在发展中。而本书的研究工作来自各位作者独立的工作，作为 IRAM 完整系统的研究，还在探索中，这里发表的是模型，只能说是原型性的。目前，作为 IRAM，本书反映它需要四大模块，即平稳增长下碳排放需求计算模块、能源与碳排放结构分析模块、碳排放权分配模块和碳税分析模块。发表出来，希望这些模型的研究有助于满足目前强烈需要的区域（地方）碳减排控制评估和可持续发展决策，供学界同仁讨论，共同发展。

需要说明的是，由于地方性数据获取的困难，本书作为案例研究，是基于以中国为对象的区域。区域是一个地理学词汇，它指作为经济体系和环境体系存在的地球表面的一个空间范围；因此，地方是一个区域，全球也是一个区域，中国当然是一个区域，本书的区域模型，原则上适合于一个国家和一个地方；而对于全球而言，由于其唯一性，则需要具体研究。

特别要说明的是，由于本书主要是理论和方法学探讨，分析基于的数据尚不详尽，模型参数也是实验性的，所以它得到的一些政策性数据，是示意性的，不宜作为政策结论引用。

王 铮

2015 年 11 月于华东师范大学

目 录

《气候变化经济过程的复杂性丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 区域碳减排评估系统研究	2
1.2.1 集成评估模型综述	2
1.2.2 区域集成评估模型	4
1.2.3 区域气候治理的模型要求	5
1.3 系统规划	5
第 2 章 经济可持续增长模型	8
2.1 模型基本结构	9
2.1.1 生产函数	9
2.1.2 生产-能源系统	9
2.1.3 动态最优化理论模型	10
2.2 模型稳态分析	12
2.2.1 平稳增长路径分析	12
2.2.2 黄金增长分析	12
2.2.3 能源强度分析	14
2.2.4 人力资本分析	15
2.2.5 能源替代分析	16
2.3 碳排放计算模型	17
2.4 本章小结	17
第 3 章 最优增长与能源结构演化	19
3.1 混合模型	19
3.1.1 能源消费模块	19
3.1.2 能源供给模块	19
3.2 数据来源及参数估计	24
3.2.1 数据来源	24
3.2.2 参数估计	24
3.3 能源演化及模型结果分析	25
3.3.1 中国历史能源消耗与碳排放	25
3.3.2 无减排约束情景分析	27
3.3.3 有碳排放约束情景	30

3.4	本章小结	33
第 4 章	产业结构优化及碳税影响下的减排效应评估	35
4.1	模糊目标规划模块	35
4.2	碳税模块	36
4.3	数据处理方法及流程	38
4.3.1	数据处理方法	38
4.3.2	模型流程	39
4.4	产业结构优化下的减排效应分析	39
4.4.1	方案设计	39
4.4.2	优化结果	39
4.5	碳税影响下的减排效应分析	45
4.5.1	碳税情景设计	46
4.5.2	碳税情景分析	47
4.6	本章小结	50
第 5 章	DSGE 模型的碳排放财税政策评价	52
5.1	DSGE 模型简介	52
5.1.1	DSGE 基本原理	52
5.1.2	DSGE 基础理论模型	52
5.1.3	DSGE 模型的 Uhlig 解法	53
5.1.4	小结	57
5.2	基于 DSGE 的碳排放的财税政策模拟模型	57
5.2.1	未征收碳税的动态随机一般均衡的理论模型	57
5.2.2	理论模型的建立与推导	58
5.2.3	理论模型方程的线性化	60
5.2.4	征收碳税的动态随机一般均衡的理论模型	61
5.2.5	理论模型的参数估计与校准	64
5.3	本章小结	66
第 6 章	技术进步下不同碳税政策对经济增长的影响模拟	67
6.1	碳排放量响应碳税政策冲击	67
6.2	减排成本响应碳税政策冲击	68
6.3	投资响应碳税政策冲击	70
6.4	资本响应碳税政策冲击	71
6.5	产出响应碳税政策冲击	73
6.6	消费响应碳税政策冲击	74
6.7	就业响应碳税政策冲击	76
6.8	碳税、产出和碳排放量响应碳税政策冲击	77
6.9	本章小结	78
第 7 章	碳排放权配额变化的区域影响	79

7.1	公平原则下的中国碳排放权分配	79
7.2	减排框架探讨	79
7.2.1	实验数据来源	79
7.2.2	分配框架构建	80
7.3	碳排放权分配框架下的各省碳排放权盈亏分析	82
7.3.1	历史时期各省份碳排放权	83
7.3.2	中国未来时期各省碳排放权	84
7.3.3	各省总碳排放权分布特征	84
7.3.4	两时期碳排放权的空间格局变化	85
7.3.5	碳排放权的动态演变特征	86
7.4	不同视角下的中国碳排放权分配	88
7.4.1	不同分配方案的基本特点	88
7.4.2	分配模型设定	91
7.4.3	分配模型模拟结果分析	92
7.5	本章小结	99
第 8 章	区碳排放决策支持系统开发探讨	101
8.1	系统分析	101
8.1.1	需求分析	101
8.1.2	可行性分析	104
8.2	系统详细设计	104
8.2.1	人机交互界面设计	104
8.2.2	数据库设计	105
8.3	系统实现	108
8.3.1	系统计算	108
8.3.2	计算结果显示	111
8.3.3	政策模拟的实现	113
8.4	本章小结	115
附录 A	部分参数估计值	117
附录 B	产业结构优化下, 减排效应评估的 Matlab 代码	118
附录 C	碳税情景下, 减排效应评估的 Matlab 代码	121
附录 D	碳排放权动态分配模拟的 Matlab 代码	123
附录 E	C#与 Matlab 混合编程的一般步骤	126
附录 F	C#与 EXCEL 混合编程的一般步骤	127
附录 G	C#与 GAMS 混合编程的一般步骤	130
附录 H	参数对照表	131
参考文献		132

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

近年来的全球气候变化打破了大气层和地球生物圈之间的平衡,并以全球气候变暖、酸雨和臭氧层破坏等方式给地球生物的生存带来了致命的威胁。从人类可持续发展层面上讲,应对全球气候变化已成为人类自我保护和生存繁衍的底线,对可能风险的忽视或不作为都是对人类前途的冒险;从气候变化的经济和社会影响来看,2006 年的斯特恩报告指出,除非各国立即采取有效的减排措施,否则气候变化将对全球经济增长和社会发展带来严重的影响,其每年的损失和风险将达到全球 GDP 的 5%~10%,且损失会一直持续 (Stern,2006)。应对全球气候变化已迫在眉睫。

由于气候变化主要由人类活动大量排放的温室气体所导致 (Ehsan,1997; Vitousek et al.,1997),因此,减少由人类活动引发的温室气体排放,尤其是减少碳排放成为人类可持续发展的必然选择。2008 年我国政府郑重承诺实行碳减排,并将减排的任务提到了国民经济运行的议事日程。作为负责任的大国,中国一方面遵循着各项已达成的国际气候协议,另一方面也提出了适合自己的减排目标,即到 2020 年中国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%。中国已将该决议作为约束性指标纳入了国民经济和社会发展中长期规划,并制定了相应的国内统计、监测、考核办法,体现了中国政府对全球减排行为的决心和责任。与此同时,要达成这一战略目标还需解决一些其他问题,包括中国能否完成这一目标?完成这一目标会对中国经济带来哪些影响?如何进行相关的政策选取以完成这一目标等?这些问题也成为了学者们关注的焦点。

首先,气候变化不仅仅是环境问题,也是发展问题 (刘燕华等,2008),在过去 30 多年里,中国的年均经济增长率超过了 10%,并创造了“中国奇迹”,但中国经济还没有达到早期工业化国家的水平,福利水平也远远落后于发达国家。而从减排与经济增长的相互关系看,单纯的减排行动可能带来经济的衰退,从而使减排得不偿失,这种情况不仅在中国存在,而且在以“金砖五国”为代表的发展中国家中普遍存在,这也就引发了关于减排代价的探讨。

一方面,中国要完成评估减排目标必然要牺牲一定的经济增长速度,另一方面,中国如果不减排,则要承担全球变暖的重要责任,而全球变暖同样会对中国经济带来隐性影响,如 IPCC (intergovernmental panel on climate change) 第四次报告估计,相对于 1980~1999 年全球平均气温,温度上升 1~2.5℃,高达 30% 的物种将灭绝,若按当前工业发展速度,到 2030 年,每排放 1tCO₂ 当量的温室气体,可能增加工业成本 100 美元,同时,受气温变化,热浪、洪水和干旱导致的发病率和死亡率都将上升,也会对农牧业、水资源、海岸线变化等产生不利影响。因此,经济活动与能源环境之间存在相互影响,相互作用的反馈机制,从经济学角度来看,存在两种可能的关系,一种是此消彼长的矛盾关

系,另一种是相互促进的和谐关系(潘家华,1997)。对于人类可持续发展而言,后者是明智的选择,但如何平衡经济增长与减排间的关系具有较大的复杂性,它的政策问题不可能用经验判断就能解决,而采用区域集成评估模型(integrated regional assessment models,IRAM)进行评估和判断是一个较好的方案,应用 IRAM 能评估合理的碳排放评估方案,并可对区域或者地方应对气候变化进行碳减排提供政策分析,因而具有普遍的区域需求。

IRAM 是一个复杂的模型体系,需要专门的研究。但对于区域决策者而言,他们往往不可能关注模型构建的细节,而只能关注不同的政策的治理结果。因此,为了增加 IRA 的应用性,需要开发 IRAM 的软件系统。一方面,对于这样的需要为了满足易用性,通常要结合软件工程思想,对模型进行封装,通过一些简单的接口对模型进行操作,从而形成一个界面友好的人机交互平台和区域碳减排评估系统。另一方面,这个系统将不可避免地需要区域信息支持,这就提出地理信息系统如何支持这一系统的问题。将地理信息科学应用于气候变化研究,国内外已有学者进行了大量的探索,如 Bernardi (2001) 和 Thenkabail (2000) 等以农业气候数据集成为基础,运用 GIS 技术对农业生态与土壤等方面进行了研究,但未真正涉及 GIS 在气候资源分析和区域评价等方面的应用研究;赵杰明等(1997)设计了“陕西省卫星遥感与农业气象信息服务系统”;王荣堂等(1998)采用快速原型法开发了湖北江陵某县的农业气象信息服务系统;刘丽等(2006)针基于 SQL Server C/S 分布式环境,采用二次开发技术,建立了基于 GIS 组件的农业气象信息客户端服务系统和基于网络的农业气象信息 C/S 分布式数据库,提升了农业气象信息服务的内容和形式;苏占胜等(2008)基于 GIS 技术研究了宁夏气候要素的小网格推算方法。遗憾的是,GIS 在社会化方面缺乏大型的示范型工程(闫国年等,2013),在气候变化经济学的研究领域,GIS 技术的应用还比较罕见。本书的一个具体的研究目的就是将气候变化经济学评估系统开发与 GIS 技术进行结合。

总之,本书的研究重点是,试图开发一个结合 GIS 的区域碳减排政策集成评估系统,并基于该系统展开应用。

1.2 区域碳减排评估系统研究

1.2.1 集成评估模型综述

气候变化问题被人类重视的标志性事件是 1972 年在瑞典首都斯德哥尔摩召开的联合国人类环境会议,该会议强调了环境对于人类社会发展的重要性,重申了发展中国家和发达国家应该对环境变化负责。随后,IPCC 报告对碳排放的来源进行了评估,认为大气中新增的碳排放主要来自于人类活动,但如何减排,以及这种减排将引出?又是哪些活动引发的 CO₂ 排放是值得重点关注的?哪些类型的 CO₂ 排放是可以减少的?CO₂ 排放与经济增长之间的关系是怎样的,有没有一些普遍规律存在,如果有,这种规律能否为减排作指导?如此形成了一系列问题需要解决。

针对以上问题,学者们开展了广泛的研究,建立了全球性的集成评估模型(integrated

assessment models, IAM)。这当然是很大的进步,但是流行的 IAM 主要是针对国际问题的,而减排需要落实在区域或地方上,由此研究地方或者区域的碳减排集成评估模型,特别是具有决策支持系统水平的模型与软件 (IRAM) 成为了重要的工作。

关于 IRAM, 目前的研究大部分以数理统计模型和经济计量模型为基础,对系统集成模型涉及不多,而且模型不能综合考虑经济-环境-能源之间的相互关系,未能将系统反馈作为模式内部的可调机制或外部调节机制来模拟,政策制定者和学者之间也缺乏充分的联系,加上从多学科角度解释结果的困难 (Palmer, 1992; Park and Seaton, 1996; Syme et al., 1994), 导致研究结论往往不够全面。事实上,对于减排的气候影响评价是一个综合性的跨学科的问题,涉及区域、国家及全球各种尺度,而且关于温室气体减排影响的研究必须综合社会-气候系统各分量之间的相关关系,不仅包括社会经济各部门内部和部门之间的相互作用和反馈,也包括减轻和适应气候异常影响的各种可能对策和措施。基于此,依据集成评估模型的原理展开研究,是一种可行的方案,这样可对相关模型进行综合,用以分析区域经济在各种气候政策下的动态变化,并模拟减排政策作用下的经济系统的变化过程,并辅助决策。

根据 Rotmans 和 Van Asselt (1996) 1996 年提出的 IAM 定义,“集成评估模型是一个交叉学科的参与过程,它将不同学科的知识进行结合、解释和交流,以更好地理解复杂的现象”。该定义明确了 IAM 的目标是为政策提供信息和辅助决策,其理想状态是调查和建议的反复迭代过程,交流在 IAM 模型中占据重要地位,各方利益团体在 IAM 模型中相互表达诉求,交流不仅包括学者提供给决策者的建议,而且也包括决策者将自己吸取的经验教训反馈给学者,以及利益团体给科学家反映的有关社会设想和观点,最终在 IAM 模型中形成一个完整的反馈系统,以达到最终的平衡态。

集成评估模型的目标并不是探寻事物复杂性的本质 (Waldrop, 1992),而是在集成评估的过程中,对现实问题采用合适的方法来组装整个模型的构成部分和学科部分,简单地说, IAM 的“良好实践”更像是一个从事集成评价的社团构造自己本身 (Ravetz, 1997)。IAM 不以模型为最终产品结束,而是在集成评估过程中采用它,作为探索问题的手段,或者说模型是作为把相关科学知识传递给一个外行者的工具。

Margerum 在关于集成环境管理的讨论中提出,虽然集成化是我们努力的目标,但在实践中从没有真正实现过这个目标, IAM 的理想状态极难实现,而专注于 IAM 过程则能学到重要的经验,对于 IAM 而言,在许多方面最重要的是过程而不是结果 (Margerum, 1995)。

由于集成评估的主题是多部门内生的,具有技术的不确定性和价值的多重性等特点 (Ravetz, 2000),其导致的复杂性是组成学科的复杂性和利益团体对未来的希望、恐惧这类紧急事件的混合物 (科斯坦萨和乔根森, 2004)。尽管集成评估模型有很大的复杂性,而且对其研究还处于起步阶段 (Horgan, 1996),但这一模型在未来的各领域研究中将发挥越来越大的作用。

将 IAM 模型应用到气候影响评估中,其目的是确定、分析和评价气候变化率和气候变化对自然系统、人类活动、人类健康和福利的影响,估算围绕这些影响的不确定性,并且审议可能做出的适应性响应来减少不利影响或开拓新的机会 (戴晓苏, 2001),利用

气候影响评估模型可以达到以下目的：①评价气候变化对经济参数变动的影响；②研究气候变化对某一经济系统的综合影响；③对某一经济系统作定量的风险分析；④作为一种管理工具，与用户对话，向用户提供趋利避害的建议；⑤作为一种组织工具，把一个系统有价值的情报组织到一个有条理的而又有用的框架中，更清楚地揭示出各系统之间的内部联系（戴晓苏,2001）。

综上所述，随着对气候变化的认识更加深刻，人们已意识到气候问题是由自然和人类系统之间复杂的交互关系引起的，对该问题的研究已超越了单一学科所拥有的分析技巧，而 IAM 试图将各种评估方法或模型的要素集成在一个特定区域或部门系统中，因而不但能比单一学科研究提供更有价值的科学结果，而且可以向决策者和社会提供实用的科学信息。在集成评估模型中，将气候学研究的科学方面与政策方面联系起来，可以为采取适应和减缓气候异常的各种可能措施提供理论基础。

1.2.2 区域集成评估模型

当前，对 IAM 的研究尺度不再像气候变化模型那样仅限于全球尺度，由于大尺度的自然资源管理问题必须在地区尺度上解决，而任何尝试阻止和减轻全球变暖影响的政策也必须在地区尺度上执行，因此，IAM 模型开始包括气候问题的区域模型，即 IRAM。

区域集成评估模型提供一种透明和交互式的框架，让利益团体参与到决策过程中。该框架提供了一种方法，在不同尺度上集成不同利益团体的单个模型，并帮助利益团体在理解、价值和关注的问题上进行交流，将利益团体的社团组织起来（科斯坦萨和乔根森,2004）。通过对 IAM 模型的建模，可以有效提高决策者对不同时空尺度范围内环境问题洞察力（Risbey et al., 1996），并提供跨越学科界线的联系框架（Park and Seaton,1996;Born and Sonzogni,1995），促进决策者和科学家之间进一步联系（Rotmans and Asselt,1996）。

中国气候变化影响评价的研究和业务工作起步较晚，和世界发达国家水平还有一定差距，尽快研发并建立一套适合中国区域特色的区域减排评估系统是非常必要的。

中国区域减排评估的代表性模型应用在 20 世纪 90 年代以来有了很好的发展。张阿玲等（2002）将经济-能源-环境模型用于温室气体减排技术选择和减排对经济影响的分析中；郑玉歆和樊明太（1999）引进 PRCGEM 模型，采用比较静态分析方法，分析了不同碳税对中国 CO₂ 排放以及宏观经济的长短期影响；贺菊煌等采用 CGE 模型研究了碳税的作用（贺菊煌等,2001）；蒋金荷（2010）、蒋金荷等（2002）应用系统动力学理论和 IO 方法，研制了中国宏观经济系统动力学模型，分析了 CO₂ 减排对中国国民经济的和主要耗能部门的影响；陈文颖等应用能源-环境-经济耦合的中国 MARKAL-MACRO 模型进行了模拟分析（陈文颖等,2004）；姜克隽（2004）结合 SGM 模型，重点从能源效率角度分析了中国减排潜力情况；王灿等（2005）采用 CGE 模型分析了减排对中国经济的影响。王铮课题组从 1999 年起开始研究气候保护政策问题，建立了局部的均衡宏观经济模型和包括内生技术进步的 CO₂ 减排可计算模型体系（王铮等,2002；王铮等,2006），并在人地关系协调思想指导下，增加了碳汇的经济成本模型，实现了对包括增汇型、能源替代型和生产型 CO₂ 排放控制政策对中国宏观经济安全的影响分析（王铮等,2004）。

崔丽丽以连贯状态模型(Pizer,1999)和 LEAN-TCM(Welsch and Hoster,1995)为基础,实现了控制 CO₂ 减排率和能源-资本-劳动力替代温室气体的中国气候-经济的模拟(崔丽丽等,2002)。

为了更好地满足社会经济活动的需要,获得更大的社会经济效率,不仅需要定性评价气候影响,还需要确定气候变量与社会经济参数之间的数量关系,建立气候变量和社会经济参数间的数学模式。因此,本书基于目前气候变化、能源演化、减排模型、减排政策等气候治理的研究现状,将最优化理论、CGE 方法、DSGE 方法相结合,研发区域碳减排政策经济学集成评估系统,各模型之间的联系通过模型参数、输入输出参数进行连接,用于评估区域碳排放的治理。

1.2.3 区域气候治理的模型要求

国际上已形成一系列成熟的减排框架或减排政策(Cramton and Kerr,2002; Janssen and Rotmans,1995; Kverndokk,1995),作为全球气候治理的基础。但由于区域存在差异,减排政策的制定也相应地需要这种差异性,目前两种流行的气候治理方式——碳排放权控制和征收碳税,需要在面向区域气候治理的 IRAM 中体现了出来。这种治理方式,需要两方面的认识,这就构成了它的模型要求。

区域治理首先要关心气候治理或者说碳减排对区域经济增长的影响,这就意味着 IRAM 能够对未来经济增长下的碳排放需求做出估计,寻找在经济目标下的减排对策。这样,IRAM 需要两个模型:一个是经济增长预测模型,这个模型包含有政策控制和经济增长特别是平稳增长的碳排放需求预测,以及能源结构演化模型,因为能源结构影响碳排放,调整能源结构是气候治理的主要内容。在这方面王铮等(2010)年发展了一系列的模型来探索,可供参考。

另一个模型是关于治理的重要手段,即碳税的经济影响和排放影响模型。征收碳税将使温室气体排放量出现大幅下降,此时能源将成为昂贵的生产要素,因此企业会进行能源替代、采取技术进步或减少产量等措施来应对,从而有利于减排(周凤起和周大地,1999),而且碳税在执行方面比全球性的治理手段碳排放权交易简单易行(Bruvoll and Larsen,2004)。但是开征碳税会违背公平原则,拉大分配差距(魏涛远和格罗姆斯洛德,2002),由此 IRAM 需要包含碳税征收的分析模块。

最后一个是治理中面临的碳排放权分配问题,关于这个问题需要与碳交易结合,朱潜艇(2015)研究了这方面的模型,刘晓(2012)对碳排放权的原则做了较多的研究,成为了我们建立 IRAM 的基础。

1.3 系 统 规 划

综合以上研究,碳排放问题的研究热点主要集中在碳排放估计及预测、能源结构演化、碳税研究,以及碳排放权分配和等方面。学者们对各问题均进行了较为深入的研究,但从整体上看,对各问题仍缺乏统一的研究框架,导致各研究模型分散,对同一问题的研究结论不一致等问题,另外,由于当前解决碳排放相关问题的模型均为大型复杂模型,

采用传统计算方法往往导致模型调整困难、计算速度慢、情景分析困难等问题，特别是决策者和模型构建者之间无法建立简单有效的沟通平台，不能满足经济分析和减排决策的需要，因此，有必要运用软件工程思想，结合计算机技术，将各模型统一，形成统一的区域碳排放政策模拟系统，以提高减排政策模拟的效率和可靠性。系统解决的问题主要包括以下几方面：①继承前人的成果，扩展模型，实现研究的一致性；②寻找避免区域实现减排而不对经济增长导致巨大冲击的决策分析模型；③探讨区域在碳排放约束下的能源结构演化规律分析；④评估不同的碳税情景对中国产业结构调整带来的影响；⑤评估不同的碳排放权分配原则组合对区域产生的影响。基于此，设计系统框架如图 1.1 所示。

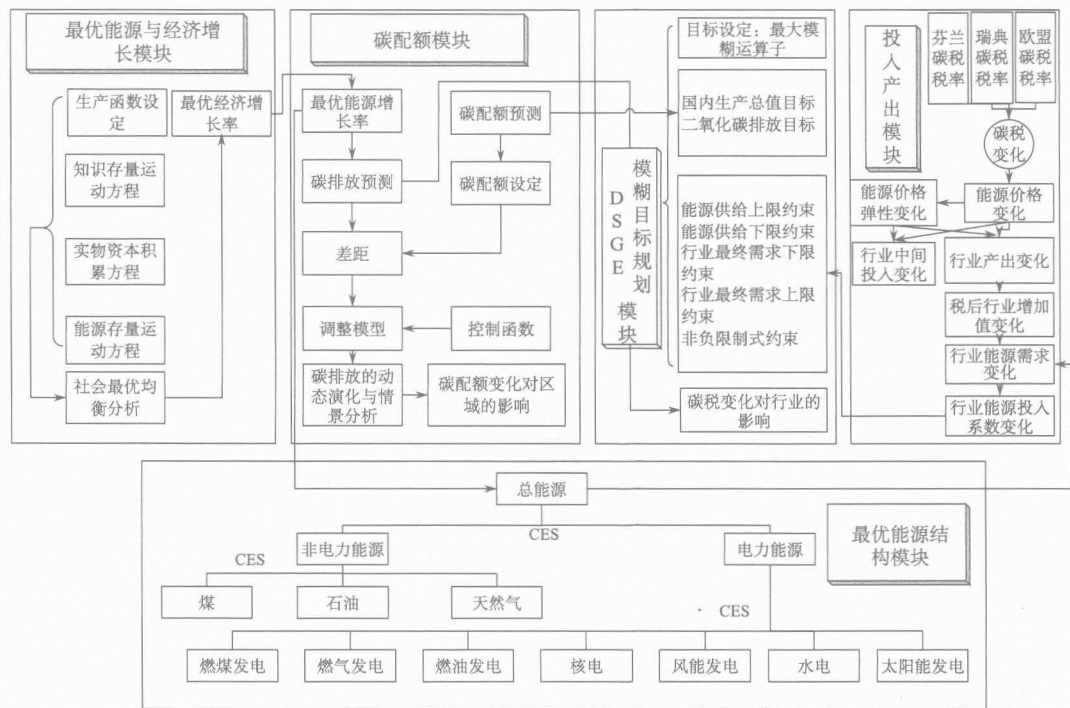


图 1.1 区域经济增长与能源碳排放的 IAM 模块结构设计

针对以上问题，本书规划区域碳排放政策集成评估系统将包括四大模块。

(1) 最优能源与经济增长模块：这一模块的相应模型对应本书的第 2 章，主要解决问题①和问题②。朱永彬（2011）、刘晓（2012）等的博士学位论文已对中国各省份的经济最优经济增长路径进行了研究，并给出了中国平衡经济增长路径下各省份的碳排放路径，本书继承并整合其模型，引入最优控制理论建模，形成本书的分析基础，系统将生产函数各参数设为外生变量以模拟不同的情景。

(2) 最优能源结构模块：这一模块的相应模型对应本书的第 3 章，主要解决问题③。该模块引入 WITCH 模型，将能源品种划分为电力能源和非电力能源，并对两种能源进行进一步细分，讨论不同能源在不同情景下的演化趋势。系统将相关参数外生，以适应

不同的情景分析。

(3) 税收影响模块：这一模块的相应模型包括投入产出模型、模糊目标规划模型、DSGE 模型，相应的内容包含在本书第 4~第 6 章中。本模块主要解决问题④。由于中国还没有实施碳税，我们的研究借助了发达国家的经验或者政策案例。

(4) 碳配额模块模块：这一模块的相应模型对应本书的第 7 章，主要解决问题⑤。刘晓（2012）探讨了修改模型，在其基础上实现分配原则的动态化，以讨论不同参数变化对碳排放权分配的影响。

第 2 章 经济可持续增长模型

“可持续增长”是 20 世纪后期人类认识到的关键科学问题。首先能源面临着耗竭的危险，其次环境因为资源开发而被破坏。人类由此提出可持续发展的概念，而这首先是经济学家对自然资源的态度开始变得谨慎。他们认为，人类假设人力资本可以取代自然资本是荒谬的，因为：①资源是有限的；②地球承载力是有限的；③经济增长不是资源环境的灵丹妙药（余江,2008）。为此，对于经济增长过程，将能源作为生产要素引入经济增长模型是必要的。Jorgenson（1987）将生产函数设定为产出= f （资本、劳动力、原材料、电力、非电力能源）。这就为研究经济增长下的碳排放开拓了道路。对此王铮等发展了一个黄金增长下的碳排放模型（王铮等,2010）。

本章通过延续了王铮、朱永彬等最优平稳增长（王铮等,2010）的模型思想，结合了 Nguyen 等人的增长模型框架（Nguyen,2008），并结合尤卓雅等的模型（尤卓雅,2011），试图发展一个资源环境约束条件下的经济保持平稳增长路线的可计算模型。这里的平稳增长是经济增长的基本要求，没有增长，社会就不会接受，特别是发展中国家要求是这样的。没有平稳，积极意义上的减排就会停止，因此，如何保证区域既完成其减排目标，又保持经济稳定增长的稳定性变得非常重要，模型的主要思想如下。

（1）Dixit、Stiglitz 和尤卓雅等的模型考虑了中间产品的差异性，提出最终产品的生产由 n 种差异化中间投入组合而成（Dixit and Stiglitz,1977），这一假设增加了模型的复杂性而对模型的基本结论影响不大，为此，本书对此不加考虑以简化模型。

（2）前人的模型中（Gastaldo and Ragot,1996; Grimaud and Rouge,2008; Smulders, 1995; 尤卓雅,2011），最终产品产出采用 CES 型生产函数， $Y = \left(\int_0^n y_i^\eta di \right)^{\frac{1}{\eta}}$ ， $[i \in (0, n)]$ 表示中间产品 y_i 对生产最终产品 Y 的贡献，最终产品看成研发投入和中间产品投入的函数，而中间产品由于具有差异性，因而增加了计算的复杂性。而本书的目的在于分析经济增长与能源需求之间的平衡关系，仿效王铮等（2010）的方法，采取 $C-D$ 生产函数以便剔除干扰，分析问题的本质。

（3）Gastaldo、Grimaud、Smulder 和尤卓雅（Gastaldo 和 Ragot,1996; Grimaud and Rouge,2008; Smulders,1995; 尤卓雅,2011）等的模型中，将生产函数看成技术进步、资本、劳动力、可再生能源和不可再生能源的函数， $Y = F(A, K, L_Y, E_X, E_Z)$ ，且各要素之间采用 $C-D$ 函数形式复合，该假设的不合理之处在于，当生产中全部采用不可再生能源时，总产出为 0。因此，本书在生产函数中不区分可再生能源和不可再生能源，但在能源替代分析时将能源看成 CES 生产函数。

（4）Grimaud 等在研究能源对经济产出的影响时，将总人口标准化为 1，即 $L_Y + L_A = 1$ ， L_Y, L_A 分别表示普通生产工人和技术工人的数量，该假设没有考虑人口规