



基于CGE的 技术变化模拟及其 在气候政策分析中的应用

王克/著

Technological Change Simulation and
Its Application in Climate Change Policy Analysis
Based on a CGE Model

中国环境科学出版社

本书得到了教育部人文社会科学重大攻关项目“低碳经济若干重大问题研究”
(项目编号: 09JZD0020) 的资助

基于 CGE 的技术变化模拟及其 在气候政策分析中的应用

**Technological Change Simulation and Its Application in
Climate Change Policy Analysis Based on a CGE Model**

王 克 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

基于 CGE 的技术变化模拟及其在气候政策分析中的应用/王克著. —北京: 中国环境科学出版社, 2011.4

ISBN 978-7-5111-0556-1

I. ①基… II. ①王… III. ①环境政策—均衡模型—应用—气候—科技政策—中国 IV. ①P468.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 064741 号

责任编辑 丁 枚
责任校对 尹 芳
封面设计 玄石至上

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2011 年 5 月第 1 版
印 次 2011 年 5 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 12.75
字 数 22.5 千字
定 价 36.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

摘 要

作为温室气体排放的主要国家之一，中国面临着巨大的减排承诺压力。在气候公约第十三次缔约方大会上，中国等发展中国家同意以“可测量、可报告、可核实”的方式采取减排行动，这表明中国的减排行动将提上议事日程。减排的核心问题是减排成本，技术变化是影响减排成本的关键因素。但当前大部分研究将技术变化视作外生因素，技术变化如何产生以及与减排成本之间的相互作用机制并不清楚，从而制约了减排目标和承诺方案的制定。

本研究新建了一个包含内生技术变化的综合描述中国经济-能源-环境系统的动态可计算一般均衡（CGE）模型（TDGE_CHN）。该模型包含了 41 个部门，以 2005 年为基准年，采用递推动态机制，模拟到 2050 年。模型借鉴了内生经济增长理论中知识资本的概念，描述了知识资本在经济系统中完整的产生和分配过程，定量表征了技术变化因素与经济系统中的生产和消费决策以及对应的能源需求、CO₂ 排放量之间的关系。利用上述模型，本书模拟分析了源于研发的技术变化的产生、变化趋势及对经济系统的影响，技术变化因素对减排成本的影响大小以及影响减排成本的主要作用机制等。本书结合当前国际气候谈判进程，分析比较了不同的减排承诺方案对中国的影响以及技术变化因素在制定减排目标和承诺方案时所能起到的作用。

研究结果表明：中国未来存在成本相对较低的相对基准情景排放 20%~30% 的减排空间，在此基础上进一步减排将导致成本急剧上升；减排的社会代价更高，是减排技术成本的 2~4 倍；类似京都模式的碳排放限额会严重制约中国经济的发展空间，在未来气候谈判中需要极力避免；而 2050 年相对 2005 年碳排放强度

下降 80% 的目标对经济的影响较小，具有一定的可行性；金属冶炼、化工和非金属制品部门的减排潜力较大且减排成本相对较低，当考虑部门减排方案时可以优先选择；技术变化通过生产要素间的替代作用，具有促进经济增长、提高能源效率、降低单位产出 CO_2 排放等效应，可以不同程度地降低边际减排成本以及减排造成的 GDP 损失，相应提高减排潜力和增大减排空间。因此制定减排目标时必须考虑技术变化因素的影响。

关键词：可计算一般均衡模型；内生技术变化；气候变化；减排成本；气候政策

Abstract

As one of the largest Greenhouse Gases (GHGs) emitters of the world, China is facing tremendous pressure on the emission reduction commitments. In the 13th meeting of the UNFCCC Conference of the Parties, China and other developing countries have agreed to take appropriate mitigation actions in a measurable, reportable and verifiable manner. This indicates that China's mitigation actions will be put on the agenda. Abatement cost is the main concern of climate change mitigation and technological change is the key factor for mitigation cost. But at present technological change has been treated as an exogenous factor in most of the related studies and the mechanism hasn't been understood clearly that how technological change happens in the economic system and how it affects the mitigation cost. The lack of knowledge about technological change has restricted the formulation of mitigation targets and commitments.

This research newly established an integrated economic, energy and environmental dynamic computable general equilibrium (CGE) model (TDGE_CHN) representing endogenous technological change for China's climate change policy analysis. TDGE_CHN model consists of 41 sectors and uses the year of 2005 as base year. The simulation period is 2005 to 2050 based on recursive dynamic mechanism. According to the concept of knowledge capital from endogenous growth theory of economics, TDGE_CHN model comprehensively described the production and distribution processes of knowledge capital in economic system and quantitatively explained the relationship between technological change and economic decision-making variables of production and consumption as well as corresponding energy consumption and CO₂ emissions. Using TDGE_CHN model, this research simulated and analyzed the characteristics of technological change induced by R&D and its impact on economic system, as well as the impact degree and mechanism on mitigation cost by technological change. In addition this research analyzed and compared the

economic impact of different mitigation commitment approaches and the potential role of technological change for the formulation of mitigation targets and commitments considering the needs for China's climate policy-making based on the current international climate negotiation process.

The results show that, there exists a relatively low-cost emission reduction space for China in the future which is about 20-30 percent of baseline scenario's emissions and further emission reduction exceeding this scope will lead to a sharp increase in mitigation cost. There is higher social cost for curbing GHGs emissions in China which is about twice to four times of the technical abatement cost. Absolute emission limits similar to Kyoto Protocol will seriously impede the future economic development space of China and should be avoided in the future international climate negotiations. The negative economic impact of 80% declining goal of carbon intensity in 2050 based on 2005 level is relatively small, thus such carbon intensity goal is certain extent feasible. When considering sectoral approaches for mitigation, the priority should be given to metal smelting, chemical and non-metallic products industries which have great emission reduction potentials and relatively lower abatement costs. Through the substitution among production factors, technological change can promote economic growth, improve energy efficiency and reduce carbon intensity per unit of output. Thus technological change can reduce marginal abatement cost and related GDP loss by mitigation, correspondingly increase mitigation potentials and extend the space of emission reduction. Hence it's necessary to consider the impact of technological change when deciding the emission reduction targets.

Key Words: computable general equilibrium; endogenous technological change; climate change; mitigation cost; climate policy

主要缩略词对照表

ABM	基于主体的建模 (Agent-Based Model)
AEEI	自发能源效率改进 (Autonomous Energy Efficiency Improvement)
BAU	基准情景 (Business As Usual)
Bottom-Up	自底向上建模方法
CCS	碳捕捉与封存技术 (Carbon Capture and Storage)
CES	不变替代弹性 (Constant Elasticity of Substitution)
CGE	可计算一般均衡模型 (Computable General Equilibrium)
COP	公约缔约方会议 (Conference Of Parties)
EIA	美国能源信息管理局 (Energy Information Administration)
ETC	内生技术变化 (Endogenous Technological Change)
GAMS	通用数学规划系统 (General Algebraic Modeling System)
GTAP	全球贸易分析模型 (Global Trade Analysis Project)
Hybrid Model	混合模型
IEA	世界能源署 (International Energy Agency)
IPCC	政府间气候变化专业委员会 (Intergovernmental Panel of Climate Change)
KP	京都议定书 (Kyoto Protocol)
LBD	干中学 (Learning By Doing)
LBR	研究中学 (Learning By Researching)
LBU	用中学 (Learning By Using)
MAC	边际减排成本 (Marginal Abatement Cost)
MASC	边际减排社会成本 (Marginal Abatement Social Cost)
MCM	微观一致矩阵 (Micro-Consistent Matrix)
MCP	混合互补问题 (Mixed Complementary Problems)
MPSGE	一般均衡分析的数学规划系统 (Mathematical Programming System for General Equilibrium)

OECD	经济合作与发展组织 (Organisation for Economic Cooperation and Development)
OFLC	单要素学习曲线 (One Factor Learning Curve)
ppm	百万分之一 (Parts Per Million)
R&D	研究与开发 (Research and Development)
SAM	社会核算矩阵 (Social Accounting Matrix)
TDGE_CHN	包含内生技术变化的中国动态 CGE 模型 (Technology Oriented Dynamic Computable General Equilibrium Model for China)
TFLC	双要素学习曲线 (Two Factors Learning Curve)
TFP	全要素生产率 (Total Factor Productivity)
Top-Down	自上向下建模方法
UNFCCC	联合国气候变化框架公约 (United Nations Framework Convention on Climate Change)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 应对气候变化的国际进程	1
1.2 “低碳经济”的挑战	2
1.3 技术变化在应对气候变化中的作用	4
1.4 技术创新战略与技术变化促进政策	7
1.5 中国面临的主要政策问题	12
1.6 研究目的、意义及内容	25
第 2 章 技术变化模拟方法及在气候政策模型中的应用	28
2.1 气候政策模型分类	29
2.2 技术变化分类：外生与内生	30
2.3 技术变化内生方法 1：R&D 投资	32
2.4 技术变化内生方法 2：技术学习	39
2.5 内生技术变化模拟中的相关问题	43
2.6 中国气候政策模型现状	46
2.7 本章小结	47
第 3 章 包含内生技术变化模拟的中国 CGE 模型的构建	49
3.1 CGE 模型的基本原理及应用	49
3.2 TDGE_CHN 模型的结构	52
3.3 TDGE_CHN 模型的方程与变量	65
3.4 本章小结	73
第 4 章 数据来源、参数率定与模型求解	74
4.1 CGE 模型参数校准的基本方法	74
4.2 SAM 在 CGE 模型中的作用	75

4.3	本模型所用 SAM 的编制	76
4.4	模型参数取值	84
4.5	模型求解	89
4.6	模型检验	91
4.7	本章小结	91
第 5 章	R&D 补贴政策模拟与分析	92
5.1	基准情景模拟结果	93
5.2	R&D 补贴政策模拟与分析	101
5.3	本章小结	117
第 6 章	考虑技术变化的中国气候政策模拟与分析	119
6.1	减排成本分析	119
6.2	碳税政策的经济影响分析	129
6.3	不同减排目标和承诺方案的比较	141
6.4	模型参数灵敏度分析	153
6.5	本章小结	159
第 7 章	结论与建议	161
7.1	结论	161
7.2	进一步工作建议	163
参考文献		166
附录 A	资本累积方程推导	180
附录 B	本研究所构建的 SAM 表	182

第1章 绪论

1.1 应对气候变化的国际进程

气候变化是当今国际社会普遍关注的全球性问题，是当前国际环境、政治、经济、贸易与科技各领域的关注热点。近百年来，许多观测资料表明地球气候正在经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化^[1]。政府间气候变化专业委员会（Intergovernmental Panel of Climate Change, IPCC）最新发布的第四次评估报告表明，地球表面平均气温在过去 100 年里上升了 0.74℃，预计到 2100 年全球平均气温“最可能的升高幅度”是 1.8~4℃。在过去 50 年影响全球平均气温上升的诸多因素中，超过 90%的可能性与人类使用化石燃料产生的温室气体增加有关^[2]。气候变化已经对全球社会经济的可持续发展带来了严峻的挑战，其广度触及了农业和粮食安全、水资源安全、能源安全、生态安全和公共卫生安全等多个领域^[3]。

应对气候变化的策略可以分为减缓对策与适应对策两大类。减缓是指实施减少温室气体排放及增加碳汇的各项政策，适应是指针对实际的或预计的气候变化影响，降低自然系统和人类系统的脆弱性^[4]。由于对气候变化影响的评估仍然存在较大不确定性，减缓对策受到更广泛的重视。面对气候变化的严峻性和紧迫性，国际社会已经积极开展了应对行动，启动了国际气候谈判进程并开展了众多的双边和多边合作。

1992 年 6 月，153 个国家和地区一体化组织在联合国环境与发展大会上正式签署了《联合国气候变化框架公约》（以下简称《公约》），其目标是^[5]“将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上。这一水平应当在足以使生态系统能够自然的适应气候变化、确保粮食安全免受威胁并使经济发展能够可持续地进行的时间范围内实现。”

公约缔约方会议（COP）是《公约》的最高机构，从 1995 年到 2007 年共举行了 13 次缔约方会议。在历次缔约方大会中，有三次被公认为“里程碑”：第一

个里程碑是 1995 年在德国柏林的第一次缔约方大会,标志着国际气候进程在法律意义上正式启动,产生了《柏林授权》,正式启动了公约的履约谈判进程并确定要制定《京都议定书》;第二个里程碑是 1997 年在日本京都的第三次缔约方大会,诞生了《京都议定书》;第三个里程碑是 2001 年在摩洛哥马拉喀什的第七次缔约方大会,制定了《京都议定书》的具体实施细则,使其从一个宽泛、抽象的议定书成为一个可操作、可执行的议定书^[6]。

随着《京都议定书》第一承诺期(2008—2012 年)即将到期,“后京都”机制,即如何构建更加公平和有效的国际气候政策框架成为国际社会争论的焦点,各国政府、研究机构及专家提出了大量国际气候制度方案供国际社会讨论^[7-10]。

2007 年一系列国际气候高端会议,如八国首脑峰会(G8+5)、亚太经济合作组织(APEC)会议、联大气候变化高级别会议、主要经济体气候变化会议、东亚峰会等都将气候变化问题列为主要议题。而 2007 年 12 月在印尼巴厘岛召开的第 13 次缔约方大会则是在一个特殊、敏感和重要的历史时期召开的大会。大会的主要任务是为 2012 年之后,即《京都议定书》第一承诺期到期后的国际气候体制的谈判做出规划,以及确定后续谈判的主要议题、时间表、框架和方向,并最终经过各缔约方的相互妥协通过了“巴厘路线图”。

“巴厘路线图”在政治上坚持了公约和议定书的精神,仍然坚持“共同的但有区别的责任”,平衡了气候谈判中的四个要点,即减缓、适应、技术和资金。在减缓问题上,“巴厘路线图”指出《公约》的所有发达国家缔约方都要履行“可测量、可报告、可核实”的温室气体减排责任,从而将美国纳入谈判进程;同时强调了另外三个在以前国际气候谈判中曾不同程度地受到忽视的问题即适应气候变化问题、技术开发和转让问题以及资金问题^[11]。与此同时,中国等发展中国家也做出了让步,虽然并未承诺承担“可测量、可报告、可核实”的减排责任,但是同意以“三可”的方式采取减缓和适应行动。这表明中国的减排行动也将要提上议事日程,在今后的谈判中将讨论中国的减排何时启动,到什么程度,以何种方式,在多大范围等诸多更为实质性的问题。

1.2 “低碳经济”的挑战

气候变化问题之所以引起国际社会的广泛关注,是因为其对当今世界高度依赖自然资源和化石能源发展物质文明的社会经济发展模式和消费模式提出了挑战。讨论气候变化对策时,通常的逻辑是:气候变化主要是由人类经济活动中化石燃料消耗所排放的温室气体引起;气候变化会对经济系统带来整体上的负面影

响,从而降低福利水平;通过提高能源效率、改变能源结构进而减少温室气体排放可以减缓气候变化,但是减排行动需要投入各种社会经济资源,会带来减排成本,从而降低经济产出和社会福利水平。因此温室气体减排决策实质上是基于对气候变化影响和减排方案的经济分析,按照费用效益原则确定减排目标和制订减排方案。由于化石能源的丰富储量以及低成本的利用方式,现有经济体系中仍然以高温室气体排放的化石能源为主。在缺乏成熟的可大规模应用的低成本替代能源技术的前提下,生产和消费部门对化石能源的替代能力有限^[12]。因此减排行动会带来能源成本的上升,并相应增加生产成本,进而影响经济的总产出水平。

由于能源成本的相对刚性,随着气候变化国际进程的推进,碳排放空间逐渐成为一种稀缺资源,并在国际上形成一种新的“要素”交易市场——碳排放交易市场。与此同时,由于能源在经济系统中的基础性地位,逐渐稀缺的碳排放空间在一定程度上决定了经济发展的空间。因此,气候变化不仅仅是环境问题,也是发展问题,是在发展过程中与生产、消费等经济行为相交织的综合性问题。基于此,各国的气候变化行动方案也不仅仅是简单的节能减排行动方案,而是在一定程度上演变为国家的中长期可持续发展战略^[13]。

因此,伴随着气候变化问题而来的是“低碳经济”作为一种新的经济形态初露端倪,成为国际经济新趋势。汇丰银行认为^[14]，“低碳经济”指的是每一单位的经济活动所产生的温室气体排放量大大低于目前的水平。目前尚无立即奏效的解决方案,大部分策略都集中于以技术研发为基础的清洁和可再生能源的开发、化石燃料的脱碳处理以及碳汇管理上。“低碳经济”可能带来国际贸易条件和国际竞争格局的变化,促使各国重新定义国家核心竞争力,并影响到国家技术战略、经济发展战略和国际关系战略等的制定。

图 1.1 参考了波特提出的“国家竞争优势模型”^[15],分别从生产要素、需求条件、相关及支持产业、企业战略以及政府五个方面考察气候变化背景下的新型国际竞争力的内涵。在气候变化背景下,基本生产要素(如化石能源等自然资源)的可获取性和比较优势会改变,譬如煤炭作为一种高排放强度的能源在发电等领域的成本优势会降低;高级生产要素(如现代化的基础设施、技术水平等)的内涵也会改变,譬如欧盟与美国在不同能源技术领域的竞争态势的变化。需求条件的改变是指气候问题逐渐与国际贸易挂钩,碳强度较高产品的出口可能会受到限制,从而形成新的贸易壁垒,与此相对应,企业的发展战略也需要转变。在应对气候变化和发展“低碳经济”过程中政府可以起到重要的促进作用,例如政府可以通过补贴、对资本市场干预、实施公众教育等影响上述与气候相关的生产要素;通过制定气候相关的法律、法规和标准等影响市场买方的需求;政府还可以通过

各种方式影响和调控宏观经济环境以决定特定产业和其支撑产业的发展，从而促使企业改变竞争战略^[16]。

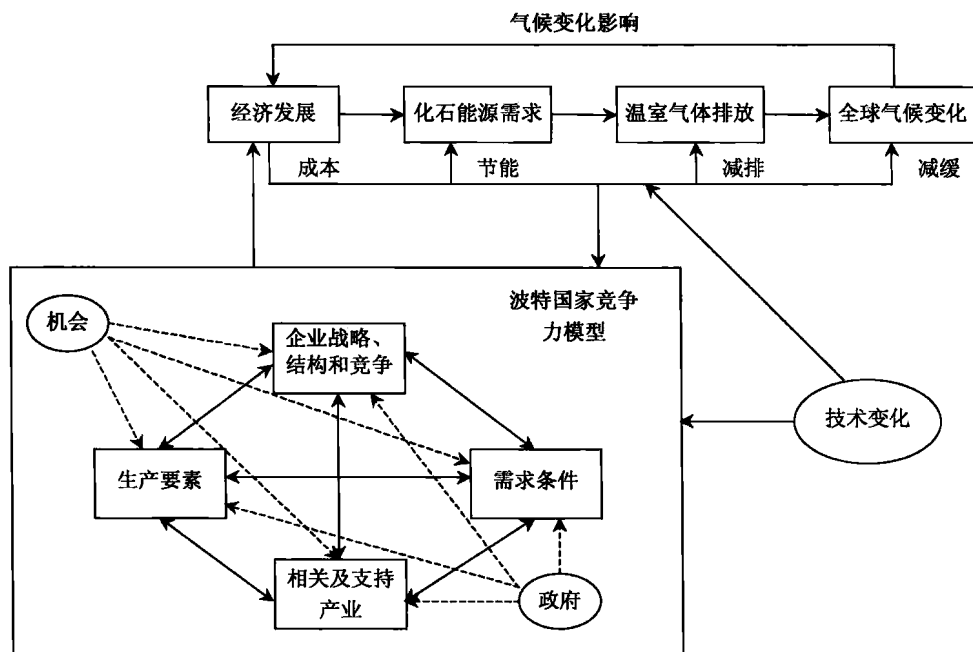


图 1.1 “低碳经济”下国家竞争力的重新定义

当然，变革也意味着机遇。在“低碳经济”形态下能否获得更大的发展空间取决于能否跨越技术难关，发挥后发优势，实现跨越式发展，取决于能否建立相应的市场体系、经济政策以及技术政策体系，更重要的是，取决于“低碳技术”的研发与推广。因此，技术战略与政策是应对气候变化和发展“低碳经济”的关键因素以及核心内容。

1.3 技术变化在应对气候变化中的作用

式 (1-1) 是著名的 Kaya^[17]恒等式，该式表明影响未来二氧化碳 (CO₂) 排放的主要因素^[18]包括人口、人均 GDP、单位 GDP 能源消耗量以及单位能源 CO₂ 排放量。

$$\text{CO}_2\text{排放量} = \frac{\text{CO}_2\text{排放量}}{\text{能源消费量}} \times \frac{\text{能源消费量}}{\text{GDP}} \times \frac{\text{GDP}}{\text{人口}} \times \text{人口} \quad (1-1)$$

在经济发展过程中,人口总量还要增加,人均 GDP 还要增长,可以下降的只有单位 GDP 能源强度和单位能源 CO₂ 排放量,即单位 GDP CO₂ 排放强度,可以采取的措施包括转变经济结构,提高能源效率以及调整能源结构等。这些措施无论是能源效率的提高还是新一代低碳能源技术的启用等都取决于技术是否成熟,技术成本是否可以接受,所以从根本上讲,只能从技术创新上找出路。

IPCC 第三次评估报告^[19]特别强调了技术变化 (Technological Change) 对于实现温室气体浓度控制目标的重要性。众多气候政策评估模型的研究结果也表明,中长期减排措施的成本和预期效益与模型中关于技术变化的假设密切相关^[20-22]。在 Weyant 所总结的造成气候政策评估模型结果差异的五个关键因素中,对技术变化的不同描述和假设是最重要的影响因素之一^[23]。

技术变化,通常意义上被视为技术进步,指给定生产要素水平下能够提供更多或更好的商品或服务。经济理论认为技术变化来源于研究与开发 (R&D) 或技术的学习效应^[24]。其中 R&D 作为技术变化的一个重要来源是不言而喻的,R&D 除了政府资助的基础性研究,更重要的是产业部门基于优化行为决策的应用研究和技术开发。R&D 是社会经济的有机组成部分,其主要输出是知识,进而引发新技术创新以及技术变化。技术学习是指随着组织和个人从实践中获得经验,譬如设备连续运转和扩大规模等努力的连续性、经验的累积性以及技能的维持性等^[25],技术的性能和生产效率会大幅度上升。大量实证研究表明,技术变化是经济增长的持续动力^[26]。在应对气候变化进程中,技术变化可以通过产品创新和工艺创新提高能源效率,减少经济系统对化石燃料的依赖,减少温室气体排放,从而降低减排措施的成本和减排对经济系统的不利影响。

1.3.1 技术变化对减排成本的影响

减排目标的确定与减排成本密切相关,技术变化对减排成本的影响是众多决策者关注的重要问题。斯坦福大学的能源模型论坛 (EMF19) 开展了一项针对九个全球气候政策模型的比较研究,分析比较了这些模型对技术变化的不同假设是如何影响模型所估算的 550 ppm CO₂ 浓度目标下的全球总成本。上述九个模型的建模者在模型框架内重点分析了一项或几项特定技术,例如碳捕获与封存 (CCS)、核能、可再生能源以及终端能源效率技术等,并利用实现 CO₂ 浓度目标所需要的碳税税率来间接表征经济成本。Weyant^[20]对这些模型的结果进行了概括和比较,分析结果表明,技术变化显著降低了碳税税率。这些模型输出的 2030

年的碳税都低于 14 美元/吨 CO_2 ，而 2050 年的碳税税率，九个模型中有六个低于 27 美元/吨 CO_2 。与之相对应的是，欧盟排放权价格在 2005 年 8 月就已经达到了 35 美元/吨 CO_2 ^[22]。在模型比较的基础上，Weyant 总结了三点：技术变化是决定减排政策长期成本的关键因素；技术存在多样性，技术投资需要因地制宜；碳捕获与封存、先进核能、氢能等技术可以通过技术学习逐渐降低成本，但是时间跨度较长，在 21 世纪后半段才能发挥重要作用，而终端能效技术则在近期可以发挥重要作用。

另外一项重要的模型比较研究是创新模型比较项目（IMCP）^[27]。IMCP 项目同样邀请了九个全球气候政策模型，分别比较了 450 和 550 ppm CO_2 浓度目标下存在和不存在内生技术变化时的碳价格、 CO_2 排放量和 GDP 变化，模拟的时间尺度为 2000—2100 年。这些模型结果的一个共同点是，减排成本会由于内生技术变化而降低。但是成本下降的范围差别很大，从最高的 90% 到最低的微小差别。Edenhofer 对此做了进一步分析，他总结了模型中影响内生技术变化的几个关键设定：基准情景中关于技术变化的假设、基准情景中关于资源市场竞争状况的假设、资源利用效率的假设、动态投资行为的模拟方式（递推动态或优化预期）以及备用技术的假设等。

Barker 在 IMCP 项目提供的数据库基础上，采用统计方法对影响减排成本的各种因素做了进一步的统合分析（Meta Analysis）^[21]，其结果如表 1.1 所示。结果表明，与基准情景相比，内生技术变化可以增加全球总产出 1.1%~2.7%。

表 1.1 内生技术变化对全球总产出的影响（2030 年相对基准情景的变化）

CO ₂ 浓度目标	IMCP 平均 CO ₂ 削减率/%	全球总产出 相对基准情景 的变化/% (模型结果 简单平均)	统合分析 (IMCP 数据) 相对基准情景的全球 总产出的变化比例/%		统合分析 (更完整的模型数据库) 相对基准情景的全球 总产出的变化比例/%	
			回归方程 B1	回归方程 B2	回归方程 B3	回归方程 B4
550 ppm	-8.8	1.1	0.3	0.2	0.6	0.4
500 ppm	-14.7	1.7	0.6	0.4	0.9	0.6
450 ppm	-32.2	2.7	1.4	1.0	2.0	1.3

资料来源：文献[21]。

1.3.2 技术变化对减排时间路径选择的影响

制定减排措施时，除了考虑减排成本，还要考虑采取减排行动的时间点。