

| 气候变化经济过程的复杂性丛书 |

中国平稳增长路径下 减排控制研究

朱永彬 王 铮 石 莹◎著



科学出版社

气候变化经济过程的复杂性丛书

中国平稳增长路径下减排控制研究

朱永彬 王 铮 石 莹 著

国家重大基础研究计划 (973) (No.2012CB955800)

国家自然科学基金青年基金 (No.41201594)

资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以经济平稳增长为主线,探讨了平稳增长路径下的能源需求和碳排放趋势;并结合当前中国面临的减排形势,利用模型模拟的方法研究了保持经济平稳增长和实现减排目标双重约束下中国未来的发展路径。本书从平稳增长的内涵讲起,介绍了新古典经济增长模型中对平稳增长的定义和建模方法,通过对模型的深入扩展研究,围绕能源效率、技术进步、产业结构与能源结构调整等手段,引入不同的减排机制,对平稳增长框架下的最优减排控制策略进行模拟分析。本书内容全面,深入浅出,涉及模型构建、数据准备、求解算法、软件编程和模拟分析等多个方面。

本书可供经济、能源、气候变化、可持续发展和减排问题的研究人员与大专院校师生参考,抛砖引玉,为深入研究中国的减排路线提供理论支撑。同时本书模拟得到的一些结论可作为政策制定者进行决策的依据,对相关问题感兴趣的社会人士也可通过本书了解经济与减排之间的相互作用关系。

图书在版编目(CIP)数据

中国平稳增长路径下减排控制研究/朱永彬,王铮,石莹著. —北京:科学出版社, 2016.3

(气候变化经济过程的复杂性丛书)

ISBN 978-7-03-047754-5

I. ①中… II. ①朱… ②王… ③石… III. ①二氧化碳-减量化-排气-研究-中国 IV. ①X511

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第053095号

责任编辑:万峰 朱海燕/责任校对:蒋萍

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3月第一版 开本:787×1092 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:295 000

定价:89.00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

序 言

2007年10月我按中科院的布局研究,开展能源、碳排放、气候与经济的复杂耦合系统分析。当时传达了国务院领导同志的指示,他要求我们回答两个问题:第一,中国接受21世纪控制升温不超过 2°C 的经济风险有多大;第二,中国有没有碳排放峰值,如果有会在哪一年达到。向我布置任务的傅伯杰局长就这两个问题的重要性约我谈了话,并且提供了他看到的一些国外类似文献。我接受任务后,起初认为这是一个用统计分析就可以解决的问题,但很快就发现这在理论上行不通,我的助手薛俊波甚至给出了一个计算反例,证明统计方法在这两个问题上不可行。因此,必须从理论上重新认识这个问题。我的想法是,碳排放取决于两个因素,第一是经济增长,人们为了经济增长而使用能源才导致碳排放;第二是技术进步,人们可以使用更少的能源来获得经济增长。换言之,由于人类的技术进步,能源强度在降低,碳排放强度在降低,这两个因素合成了碳排放趋势。这里的技术进步是广义的,包括工艺技术的进步,产品的变化、能源结构的变化和产业结构的变化,对一个区域的碳排放来说,还包括碳汇的增减。

在此背景下,我安排学生吴静、朱永彬作为核心骨干分别对这两个问题进行研究。当时朱永彬还是我在华东师范大学的博士研究生。2008年春,我们得到了按照中国的经济平稳增长趋势和技术进步速度,2040年中国可以实现碳高峰的结论。这个方法的关键是对区域或中国未来经济增长趋势的估计,我们的模型设定中国是努力保持在平稳的最优增长轨道上的,这是一种进化经济学思想。这一研究工作在2009年以朱永彬为第一作者王铮为通讯作者发表于《地理学报》上。与这个工作并行的是,我与学生于洪洋最终从数学上严格证明了在技术进步作用下,一个经济体存在唯一的平稳增长路线使得环境库茨涅兹曲线存在。在经济学意义上,这个模型是一个需求侧模型,它考虑了经济增长对碳排放的需求。

在接下来的工作中,我和研究生刘昌新提出了一个算法模型,估计了能源替代趋势和产业结构演化趋势,我又和研究生马晓哲发展了一个估计森林碳汇的可计算模型。综合考虑产业结构、能源结构演变趋势以及将水泥排放和森林碳汇纳入后的净排放,同时考虑我国在技术进步方面的努力正在加大,计算得到中国大约可以将碳排放峰值提前到2033年,而能源消费产生的碳排放高峰出现在2031年。2008年春,我在香山会议上报告了这一结果,当时的提法是2030年左右可以实现碳高峰。加上“左右”一词是因为中国不一定始终能在最优增长轨道上,误差会有的。其中,较原来认识的2040年,产业结构和能源结构变化可能导致峰值提前4~5年,增加碳汇又可以提前两年。这一研究以我和朱永彬、刘昌新、马晓哲为作者发表在2010年的《地理学报》,丰富了排放核算因素,并更新了研究结论,即到2034年达到碳高峰。针对国务院领导同志之间的研究结论,我和吴静于2009年给院领导做了汇报,并且通报了华东师大,因为朱永彬、马晓哲是华东师大学生,主要的计算工作是在华东师大的教育部重点实验室完成的,我不在华东师大

期间,王远飞副教授、乐群副教授指导了他们的工作。

在这个研究的基础上,中科院为我布置了新的任务,国家重大研究计划也布置我们新的任务,朱永彬同学再次作为骨干,研究中国碳排放控制问题,在我指导下朱永彬在博士学位论文中发展了一个控制论模型来研究减排最优控制,研究生刘晓在朱永彬研究基础上进一步发展了最优控制率的模型,朱永彬、史雅娟探讨了消费偏好改变驱动产业结构调整机制……我想这些都是有创新的工作。在后来的研究中,我组织石莹、朱艳硕、邓吉祥从供应侧研究了2030年左右实现峰值的路线问题,其中主要由石莹、朱艳硕完成的2030年峰值的供应侧分析,采用的也是最优控制方法,朱永彬协助我指导了这两个研究生的工作。在其他方面,吴静研究了中国不同年份实现峰值的风险问题,这个风险计算如果中国把碳排放峰值提前,比如说2028年,意味着中国为全球治理承担更多经济风险,进而也拉了全球经济的后腿。另一方面,乐群、马晓哲进一步探讨了中国分省增加森林碳汇问题。

总之,关于中国碳减排可行性路线的研究,朱永彬起到了重要的作用,特别是他将原来计划的研究内容与他的自然科学基金项目结合起来,突出地研究了能源效率、能源结构和产业结构对中国碳排放的影响,所以项目组推荐朱永彬负责编撰此书。本书的出版,是对中国碳排放问题的进一步探讨,书中的一些研究结论有些已经在SCI期刊上发表了;有海外朋友劝我,其余工作为什么不细水长流,在SCI期刊上慢慢的全部发表出来。有苦难言啊,因为语言问题,我们的英文文章往往需要反复的文字修改,文章慢慢出来,可能不能及时满足国家碳排放治理的需要了。好在我们中国人发展应用科学首先是满足中国发展的需要,因此某些重要可应用结论用中文发表是必要的。

在学术上,本书的分析模型,基本上是解析的可计算的动力学模型而非统计模型,我的经验是,动力学分析才能很好指导政策制定。希望本书发展的一些模型对研究同行和青年学生可能有参考作用,得到的政策结论有助于我国应对气候变化的经济治理。

王 铮

2016年1月15日

目 录

《气候变化经济过程的复杂性丛书》序

序言

第 1 章 绪论	1
1.1 经济平稳增长	1
1.1.1 什么是平稳增长	1
1.1.2 平稳增长的重要性	2
1.2 气候变化	3
1.2.1 气候变化起因	4
1.2.2 温室气体减排	5
1.3 中国碳排放驱动因素	7
1.4 平稳增长与减排的联系	7
第 2 章 平稳增长模型框架	9
2.1 基础模型	10
2.1.1 Moon-Sonn 模型	10
2.1.2 模型改进	11
2.1.3 平稳增长机制	13
2.2 模型求解	13
2.3 数据来源及参数估计	14
2.3.1 生产函数参数	14
2.3.2 总人口及劳动力	14
2.3.3 效用函数参数	15
2.3.4 折旧与能源进口综合成本	15
2.4 平稳增长路径	16
2.4.1 能源强度预测	16
2.4.2 经济增长路径	17
2.5 能源与排放趋势	18
2.6 小结	20

第一篇 能源效率篇

第 3 章 引入能源效率的平稳增长控制模型	23
3.1 排放强度目标约束模型	24
3.1.1 能源强度下降机制	24
3.1.2 平稳增长模型扩展	25

3.1.3	数据与参数估计	27
3.2	排放总量目标约束模型	29
3.2.1	能源效率改进机制	29
3.2.2	平稳增长模型扩展	29
3.2.3	数据与参数估计	31
3.3	小结	31
第4章	排放强度目标下平稳增长路径模拟	32
4.1	情景设定	32
4.2	基准情景	33
4.2.1	平稳增长路径	34
4.2.2	最优研发投资路径	35
4.2.3	能源效率改进路径	35
4.2.4	能源消费与碳排放路径	36
4.3	政策情景	37
4.3.1	平稳增长路径	37
4.3.2	最优研发投资路径	38
4.3.3	能源效率改进路径	39
4.3.4	能源消费与碳排放路径	40
4.4	不确定性分析	41
4.5	小结	43
第5章	排放总量约束下平稳增长路径模拟	50
5.1	情景设定	50
5.2	基准情景	51
5.2.1	平稳增长路径	52
5.2.2	最优研发投资路径	52
5.2.3	能源消费与碳排放路径	53
5.2.4	排放强度路径	53
5.3	减排情景	54
5.3.1	平稳增长路径	54
5.3.2	最优研发投资路径	55
5.3.3	能源消费与碳排放路径	56
5.3.4	排放强度路径	57
5.4	不确定性分析	59
5.5	小结	60

第二篇 产业结构篇

第6章	引入产业结构的平稳增长控制模型	71
6.1	产业结构减排潜力分析	72

6.2	多部门跨期动态优化模型	75
6.3	数据与参数估计	78
6.3.1	参数估计	79
6.3.2	情景设置	83
第7章	基准情景平稳增长与产业结构优化模拟	86
7.1	消费偏好模式	86
7.2	能源效率提高	88
7.3	基于发展阶段的未来发展路径	90
7.3.1	经济增长路径	90
7.3.2	产业结构演化	91
7.3.3	能源消费与碳排放	93
7.4	基于增长方式的未来增长路径	102
7.4.1	经济增长路径	102
7.4.2	产业结构演化	103
7.4.3	能源消费与碳排放	105
7.5	小结	108
第8章	减排情景平稳增长与产业结构优化模拟	109
8.1	减排目标设定	109
8.2	经济增长与产业结构演变趋势	109
8.2.1	中国偏好情景下的减排约束	109
8.2.2	欧盟偏好情景下的减排约束	110
8.2.3	日本偏好情景下的减排约束	113
8.2.4	美国偏好情景下的减排约束	115
8.2.5	情景对比	116
8.3	能源消费与碳排放	117
8.3.1	中国偏好情景下的减排约束	117
8.3.2	欧盟偏好情景下的减排约束	119
8.3.3	日本偏好情景下的减排约束	120
8.3.4	美国偏好情景下的减排约束	122
8.3.5	情景对比	123
8.4	小结	124

第三篇 能源结构篇

第9章	成本最优的能源组合模型	131
9.1	模型回顾	132
9.1.1	自顶向下模型	132
9.1.2	自底向上模型	135
9.1.3	模型特征分析	137

9.2 能源最优组合模型	138
9.2.1 能源供给结构	139
9.2.2 能源供给成本	141
9.2.3 碳排放模块	142
9.2.4 目标与约束	142
9.3 数据与参数估计	142
9.3.1 能源复合参数	143
9.3.2 电力能源技术参数	145
9.3.3 化石能源价格参数	146
9.4 情景设定	146
第 10 章 减排目标情景能源结构演化模拟	149
10.1 基准情景	149
10.1.1 化石能源结构	149
10.1.2 电力能源结构	150
10.1.3 能源成本变化	151
10.1.4 碳排放趋势	153
10.2 终期减排目标情景	153
10.2.1 化石能源结构	154
10.2.2 电力能源结构	155
10.2.3 能源成本变化	157
10.2.4 碳排放趋势	160
10.3 总量减排目标情景	161
10.3.1 化石能源结构	161
10.3.2 电力能源结构	163
10.3.3 能源成本变化	164
10.3.4 碳排放趋势	166
10.4 不同减排目标比较	167
第 11 章 减排政策情景能源结构演化模拟	179
11.1 单阶段碳税情景的模拟分析	180
11.2 两阶段碳税情景的模拟分析	184
11.3 碳税补贴政策下的模拟分析	188
11.4 不同减排政策比较	194
参考文献	197

第 1 章 绪 论

1.1 经济平稳增长

经济增长本质是人类创造财富的过程，表现为经济总量不断增多，社会产品的种类和数量越来越丰富，居民收入或消费水平不断提高等，最终带来人类社会生活水平的提高和幸福感的提升，即经济学中常说的社会福利提高。基于过去几个世纪以来关于经济增长的一些基本事实，经济增长理论试图给出其背后的合理解释，如各国经济为什么会增长；为什么一些国家富有，而另一些国家贫穷；为什么亚洲四小龙在 20 世纪末创造了增长奇迹，而次撒哈拉非洲国家却陷入增长灾难；随着越来越多经济模型的不断涌现，经济增长理论得到了极大发展，对经济增长各个方面的解释能力也在逐渐加强。

除了关注经济增长的动力来源和分析影响增长速度存在国别与代际差异的因素以外，经济增长理论还一直对经济的“平稳增长”保持极大的兴趣。由于人类历史上曾发生过多次经济危机事件，如最近一次发生在 2008 年由美国次贷危机引发的全球经济危机，给经济系统和人类社会带来了巨大冲击，一些国家的经济在此后很长一段时间都未能得以复苏。这些负面事件带来的沉痛回忆，促使经济学家在分析经济为何增长的同时，也试图寻找经济平稳增长的条件是什么，甚至对经济危机发生前的蛛丝马迹进行追踪，提出预警和应对政策。

1.1.1 什么是平稳增长

平稳增长，也称为平衡增长或均衡增长，指的是经济产出与劳动力、资本、消费量等经济变量保持同步增长的状态。Solow (1956) 提出了代表古典增长理论的索洛模型，该模型通过分析资本的动态变化，认为无论经济的起点在何处，最后终将收敛于平稳增长路径。在这一平稳增长路径上，模型的每个变量均以不变的速率增长。根据假设，劳动力和技术进步分别以 n 和 g 的速率增长条件下，资本存量 and 有效劳动力将以 $n+g$ 的速率增长，由规模不变假设可知，经济产出也将以该速率增长。因此，每单位有效劳动力的资本和产出是不变的。若从人均尺度来衡量的话，每个工人的平均资本和平均产出均以速率 g 增长。由此，在索洛模型构建的平稳增长路径上，每个工人的平均产出增长率只由技术进步率唯一决定。

巧合的是，在 19 世纪及更早时期，美国经济和许多其他主要工业经济均表现为：劳动、资本与产出的增长率大致不变，产出与资本的增长率大致相等（即资本-产出比大体不变）。这与索洛模型描述的平稳增长路径非常一致，被认为是对该模型的现实佐证。

随后，Cass (1965) 和 Koopmans (1965) 基于 Ramsey (1928) 的研究框架发展出一个新的模型——拉姆塞-卡斯-库普曼模型（简称 Ramsey 模型）。该模型与索洛模型相似，但储蓄率不再是外生固定不变的，而是由微观层次的决策决定：家庭在各期对收入

进行分配, 决定每期的消费和储蓄, 家庭与厂商的交互作用引出资本存量的演化趋势。最终, 微观决策决定了消费路径、产出路径, 以使社会福利得到最大化。Ramsey 模型中, 平稳增长路径的特性为: 每单位有效劳动的资本、产出与消费是不变的, 总资本存量、总产出与总消费均以 $n+g$ 的速率增长, 每个工人的平均资本、平均产出和消费以速率 g 增长。

与索洛模型相比, Ramsey 模型的平稳增长内涵增加了对于消费均衡增长的关注。一个理想的均衡情况是, 闭合经济体的经济产出与消费需求保持同步增长, 由此意味着产品市场的需求与供给保持一致, 达到市场出清的均衡条件。当消费增长速率快于产出增长率时, 若长期积累将发生“过度消费 (overconsumption)”问题。美国经济以“高消费率、低储蓄率”为显著特征, 美国民众超前消费现象普遍, 各种金融衍生品种类繁多, 当风险超出可控范围时必然导致金融危机和经济危机。2008 年席卷全球的经济危机便是由美国次贷危机一手导演的。另外, 如果消费增长速率低于产出增长率, 长期积累也会导致另一个问题, 即“消费不足 (underconsumption)”。对于开放经济体而言, 可以通过出口将国内过剩产能转移到国外, 一定程度上缓解国内需求不足的问题。以投资和出口拉动的中国经济增长模式就是一个现实例子, 尽管这一问题可以得到部分缓解, 但从长期趋势来看, 消费不足现象也是不可持续的。

相对来说, 由于索洛模型和 Ramsey 模型仅考虑了资本和劳动力要素, 其中劳动力还是外生引入的, 因此, 其所给出的平稳增长条件可以实现产出与要素, 如资本之间的同步增长。但是, 随着更多生产要素的引入, 如考虑知识资本、能源资源等要素后, 保持各要素的增长速率与产出的增速一致将成为一个非常强的假设。如前所述, 只要消费与产出增长保持同步, 就能保证产品市场的均衡, 也就意味着长期来看, 经济是平稳的。因此, 放弃要素与产出增速趋同的假设, 并不影响经济的平稳增长; 同时, 在市场经济中, 资源将得到更高效的配置, 流向能带来更多边际产出的生产要素, 实现生产者利润最大化和消费者福利最大化目标。

1.1.2 平稳增长的重要性

经济平稳增长之所以重要, 是因为在平稳增长轨道上可以避免不平稳增长带来的各种负面效应。例如, 经济不平稳积累到一定程度将会引起经济危机的发生, 使经济增长速度减缓、停滞甚至衰退, 进而导致劳动力需求下降, 引发失业率增加; 同时带来投资与消费意愿下降, 产生经济停滞与通货膨胀并存的现象。而经济危机一旦发生, 需要付出很高的时间成本和经济代价使之回到良性增长的轨道。因此, 经济危机通常将持续很长一段时间, 才能使经济主体重新树立对未来增长的信心。

导致经济增长不平稳的原因主要有三个方面。一是由经济要素增长不均衡导致的原因, 若产业升级和技术进步带来对各种生产要素的需求发生改变, 而要素供给没有同步变化时, 将导致经济增长不平稳, 如资本过剩、失业率上升等。二是产品总供给与总需求不均衡, 如果总需求增长率低于总产出, 或者某个行业部门的需求增长率低于产出增长率时, 将带来需求不足和供给过剩的情况, 反之则会出现超前需求等现象, 偏离平稳增长轨道。三是金融工具的使用带来的货币流动性增长与社会产品增长不一致导致的经

济不平稳,这种不平稳还可能通过市场释放的错误信号进一步加剧供需不均衡程度。例如,美国次贷危机就是由美国的超前消费模式带来的:随着各种金融衍生工具的大量使用,不仅掩盖了原本就过剩的住房需求,并进一步刺激了该需求的膨胀,这种经金融工具加速后的产出与需求增长不均衡现象,最后引发了金融危机,进而形成全球性的经济危机。

人类为减缓气候变化所采取的温室气体减排活动,也会通过减排技术的应用和产业结构升级等引起资本和劳动力的这种要素结构的变化。此外,还可能引起传统产业与新兴产业的供给与需求增长不同步等经济不平稳因素的出现,因此,为了避免经济不平稳的各种负面不确定性后果发生,碳减排必须控制在经济平稳增长轨道附近。何琼、王铮等^①从理论上证明了减排下的经济平稳增长轨道的存在性,即通常说的环境库茨涅兹曲线的存在性。

然而,尽管经济波动和不平稳增长是经济可持续发展的障碍,但却是现实经济的一种常态。严格意义上的平稳增长,即消费与产出的变化保持同步只是一种理想状态,而实际上由于受到各种不确定因素和无法预知的因素影响,包括微观行为和政策因素,经济的增长趋势并不是如理想中的那样平稳。平稳增长不仅是我们对现实经济增长的一种期望,同时也为我们提供了对未来经济走势的一种展望,一个试图看清未来、预测未来的基准情景。借由对经济增长的预期,很多研究,包括本书的后面章节都对与经济密切相关的其他趋势,如能源消费、碳排放、气候变化等进行了预测和展望。因此,经济平稳增长假设为研究未来经济增长和相关变化趋势提供了很好的基准情景工具。

1.2 气候 变化

随着人们生活水平的提高,各国对环境问题越来越重视。其中,气候变化作为全球共同面临的环境问题,成为世界各国政府、民众和学界普遍关注的热点。气候变化指的是气候系统的统计属性随时间发生改变的现象,其所考察的时间周期一般为长期尺度,从十年到百万年不等。学界对过去和未来气候的理解主要借助于实际观测和理论模型推演。气候系统的观测基于直接测量和卫星及其他平台的遥感手段。器测(instrumental record)时代对全球尺度温度和其他变量的观测始于19世纪中叶,1950年以来的观测更为全面和丰富。古气候重建可使一些记录延伸到几百年乃至几百万年前,为我们提供了有关大气、海洋、冰冻圈和地表的变率和长期变化的综合视角。基于地球物理科学的大气环流模型(GCM)是理论推演的常用方法,可用于校准历史气候数据,预测未来气候变化以及理解气候变化的原因与影响等。

随着气候变化研究的深入,人们对气候变化的理解越来越清晰,虽然还存在着很多不确定性,但学界已对气候变化的趋势形成了基本一致的认识。政府间气候变化专门委员会(IPCC)针对气候变化研究共计完成了五次综合评估,在最新的第五次评估报告中指出,气候系统的变暖是毋庸置疑的。自20世纪50年代以来,观测到的许多变化在几

^① 见王铮等(2010)所著《气候保护的经济学研究》一书附录。

十年乃至上千年时间里都是前所未有的。大气和海洋已变暖,积雪和冰量已减少,海平面已上升……这些变化与人类的经济活动息息相关,甚至将影响人类未来的生存问题。

1.2.1 气候变化起因

从本质来讲,全球变暖等一系列气候变化问题的根源在于,地球从太阳获得能量的速率快于其向宇宙空间散发的能量,破坏了地球系统的能量守恒。能量进一步通过风、洋流和其他机制在全球扩散,影响不同区域的气候特征。因此,从地球能量守恒的角度来看,影响地球气候系统的因素可分为两类,第一类影响因素是太阳辐射、地球轨道等的变化,造成到达地球的能量发生改变;第二类影响因素改变到达地球能量的扩散,减少地球能量向外扩散,如各种温室气体在大气中积累带来的温室效应(Tol, 2014)。

自工业革命开始以来,人类活动对气候系统施加的影响越来越大。二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和一氧化二氮(N_2O)这三种主要的温室气体在大气中的浓度显著上升,尤其是过去150年的增长趋势在近12000年的历史中显得极不寻常。这些温室气体分子可以透过可见光,却无法通过红外线。于是,太阳散发的能量(大多是可见光)可以轻易地穿透大气到达地球,而地表散发的热量(多数为红外辐射)则被温室气体分子吸收,或被反射回地球,使得地表温度升高。因此,人为温室气体排放增加已成为全球变暖的主要成因。

温室效应现象最早由Fourier于1827年发现,Tyndall进一步对温室效应的原理进行了详细的阐述。Arrhenius(1896)估计认为,化石燃料燃烧将增加 CO_2 在大气中的浓度,带来温室效应的增强与地球的变暖。迄今为止, CO_2 是导致地球能量平衡改变的主要气体。而其他所有温室气体对辐射强迫的贡献只有 CO_2 的三分之二左右。

除 CO_2 之外,臭氧也是一种温室气体,但它不是由人类活动直接排放的,而是源于人类排放的某种物质在大气中的作用。由于交通和农业产生的污染物排放,带来近地表的臭氧浓度高于以往水平;而高空中的臭氧浓度由于氯氟碳化物的排放而低于历史水平。水蒸气同样也是温室气体,甚至是最重要的温室气体,但人类对其浓度的影响十分有限,主要是通过甲烷在大气中的分解间接增加了其在大气中的浓度。

此外,人类活动也会改变地球的反照率,即地球表面反射的能量比率。例如,煤烟、黑炭和烟灰等物质加深了冰雪表面的颜色,比历史时期吸收了更多的能量,带来冰雪的消融。而冰雪消融意味着冰雪的减少和地表颜色的加深,使这一过程进一步加剧。另外,颜色相对较深的树木已被较浅的草地所取代,这也会使反照率下降,带来地表温度的升高。

除了人类活动对气候系统的影响以外,自然因素也起到了一定的作用。例如,火山喷发可以给气候带来十分显著的短期影响,太阳辐射的能量输出具有周期性的变动趋势等,但相比温室气体带来的温室效应,这些自然因素产生的气候影响十分微不足道。

尽管已有研究对温室效应的原理和各种温室气体的升温潜力有了确定性的认识和测度,但气候变化本身仍存在很大的不确定性。全球升温幅度不仅取决于辐射强迫的强弱,还与气候系统的一系列反馈有密切关系。例如,气候变暖会增加空气中水蒸气的含量,而水蒸气作为一种温室气体又将进一步增加气候变暖的幅度;云的形成过程非常复杂,

其一方面可以阻止太阳辐射到达地球，另一方面也会阻止地球热量向外散失。这些复杂的现象和动态反馈过程很难被气候模型描述。因此，虽然模型都可以近似地模拟当前的气候特征，但在预测未来气候趋势时却存在很大的不确定性，有可能得出完全不同的结果。

IPCC 第四次评估报告第一工作组对模型不确定性进行了研究，在全球、六大洲、陆地与海洋等多个空间尺度上，对两组情景进行了模型重构，并与实际观测结果进行比较，发现考虑人为与自然因素的模型重构结果与观测结果基本一致，而忽略人为因素后，观测结果则落入模型重构范围之外。由此说明，人为温室气体排放是全球变暖不容忽视的诱因。

从碳循环视角来看，在工业化时代之前，CO₂ 的交换主要发生在大气、海洋与植被之间。这三个圈层分别存储着相当一部分 CO₂，随着植被的夏长秋亡，CO₂ 的流量转化也非常可观。在自然过程中，化石燃料中存在着的另外一部分 CO₂ 在碳循环中并未起到显著的作用。但是，随着人类的开采，这部分 CO₂ 也流动起来，虽然相比自然过程中的碳流量而言，这部分 CO₂ 总量相对较小，但自然界中并没有多余的吸收机制来消解这部分 CO₂。因此，CO₂ 在大气中的积累越来越多，造成温室效应进一步加剧。

1.2.2 温室气体减排

为减缓温室效应带来的全球变暖趋势，必须减少温室气体排放，而进行温室气体减排的前提是要厘清温室气体排放的来源。图 1.1 给出了不同温室气体的相对贡献。

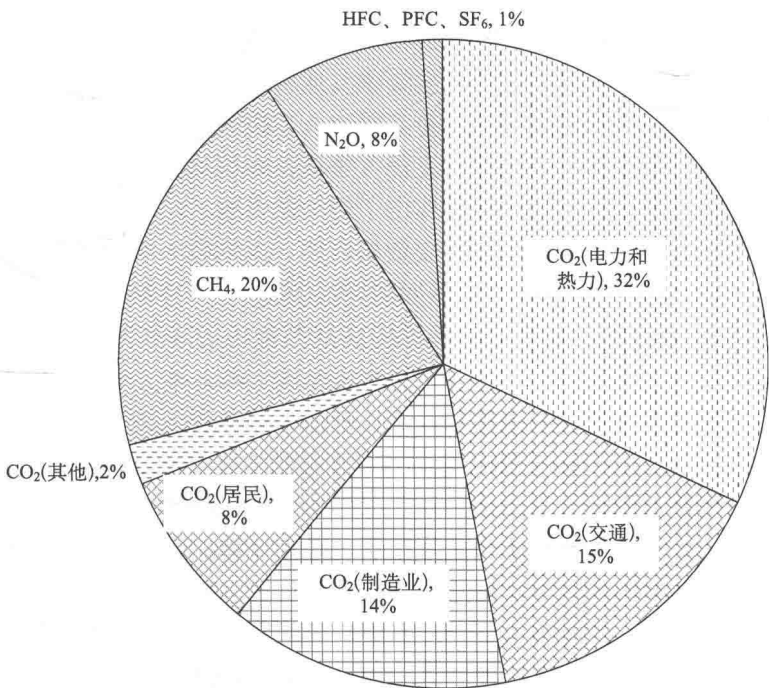


图 1.1 全球 2000 年温室气体排放贡献比例 (Tol, 2014)

如图 1.1 所示, CO_2 是最重要的人为温室气体, 在所有温室气体排放中的贡献比例达到 71%。化石燃料燃烧是 CO_2 排放的主要排放源, 化石燃料主要为碳氢化合物, 其氧化过程释放能量, 同时不可避免地产生 CO_2 排放。土地利用变化也是 CO_2 的重要排放源, 随着森林被草地取代, 植被中储存的 CO_2 减少, 另外大量木材的燃烧也产生一定量的 CO_2 排放。水泥生产过程中石灰岩分解也伴随着 CO_2 排放。

其他温室气体, 如 CH_4 排放主要来源于厌氧环境中的有机物分解, 如水稻生长、牛羊等反刍动物消化以及垃圾填埋, 化石燃料开采也伴随 CH_4 的泄露。 N_2O 排放来源于农业土壤中氮肥的使用。因此可以说, 温室气体排放, 尤其是 CO_2 排放, 与人类经济活动密切相关, 是工业化以来经济增长不可避免的“副产品”。

Kaya 恒等式 (Kaya, 1989) 从宏观角度揭示了导致排放的各种因素, 同时也反映出减排的几种可行手段。

$$M = P \cdot \frac{Y}{P} \cdot \frac{E}{Y} \cdot \frac{M}{E} \quad (1.1)$$

式中, M 表示排放量; 等式右边四项分别代表人口、人均 GDP、能源强度 (单位经济活动的能源消耗量) 和排放强度 (单位能源使用的排放量)。对该式两边取对数, 并对时间求偏导可得

$$\frac{\partial \ln M}{\partial t} = \frac{\partial \ln P}{\partial t} + \frac{\partial \ln(Y/P)}{\partial t} + \frac{\partial \ln(E/Y)}{\partial t} + \frac{\partial \ln(M/E)}{\partial t} \quad (1.2)$$

由此可知, 排放的增长率等于人口增长率、人均 GDP 增长率、能源强度增长率和排放强度增长率之和。Kaya 恒等式有助于解释历史排放趋势各驱动因子的贡献率, 可以通过各驱动因子未来情景的假设预测未来的排放趋势。更为重要的是, Kaya 恒等式还揭示了减排的途径: 减少人口或收入, 降低能源强度或排放强度。

除了非洲一些残暴政权积极谋求减少其国内人口以外, 很少有民主国家会以气候政策的名义来减少人口。虽然人口政策存在很大争议, 中国通过长期实行计划生育政策已经避免了人口的急剧增长, 为气候政策作出了较大的贡献。

另外, 苏联解体和大萧条时期的历史数据表明, 人均收入水平的下降可以有效地减少温室气体的排放, 但是经济衰退与人类发展背道而驰, 更不可能成为各国谋求的目标。因此, 根据 Kaya 恒等式, 减排只能通过提高能源使用效率和降低排放强度的手段来实现。

能源强度通常被解释为能源效率的提高, 能源效率改进无论有无气候政策都将是一个必然趋势, 因为能源投入意味着成本支出, 未来降低能源支出, 提高产品的竞争力, 企业自身便有投资进行能源效率改进的动机。然而, 能源效率改进并不意味着能源使用量的必然降低, 由于能源效率改进带来了使用成本的下降, 反而可能刺激能源使用量的增加, 即反弹效应 (rebound effect)。

除了能源效率以外, 能源强度还与产业结构的调整有关: 当高耗能行业在经济中的比重下降时, 也将带来综合能源强度 (式中第三项) 的降低。排放强度则与能源结构中含碳能源的比重密切相关, 当化石能源比重较高时, 排放强度也较高。因此, 提高可再生能源, 如太阳能、风能、核能等的比重, 是降低排放强度的主要途径。基于此, 本书

将分能源效率、产业结构和能源结构三个篇章对中国的减排控制策略进行研究。

1.3 中国碳排放驱动因素

基于对碳排放驱动因素的历史发展趋势分析,我们发现:经济持续快速增长是造成能源消费和碳排放增长的主要因素;能源强度则在过去30年间持续下降,成为减缓CO₂排放的主要动力。同期结构变动对减缓碳排放的贡献较小,产业结构虽然出现了明显变化,但仅限于农业和其他服务业等非能源密集型产业,而工业、交通运输和建筑业部门的比重相对比较稳定,且建筑业比重还有明显提高;能源结构在过去30年没有明显改善,仍然延续以化石能源为主的趋势,但石油比重略有下降,相反,天然气和电力比重略有上升。

从已有对碳排放驱动因素的研究中,我们也可以看出类似的结论:Steckel等(2011)认为1971~2000年中国经济高速发展对碳排放的贡献可由能源强度的稳步下降所抵消,但在2000~2007年,碳排放强度的增长导致排放总量的大幅上涨;Zhang(2000)发现1980~1997年经济增长和人口扩张促进了碳排放的增加,而能源强度的下降使中国至少减排了432MtC;Wang等(2005)通过分析1957~2000年我国碳排放的驱动因素,同样认为中国由于改进能源强度已经在很大程度上减少了碳排放增长。Zhang等(2009)基于1991~2006年相关数据,认为能源强度的显著下降对减缓碳排放起到至关重要的作用,但是结构变化对减排的作用甚微。Hu和Huang(2008)基于1990~2005年的历史数据计算了我国碳排放的规模效应、结构效应和技术效应,分别为15.76%、-0.86%和4.65%。

可见,从历史发展中可以得出结论:中国经济高速增长是碳排放快速增加的主要驱动因素,得益于能源强度的稳步降低,抵消了部分碳排放量。而产业结构和能源结构并未发生显著改变,一方面说明结构调整的难度较大,另一方面也说明通过结构调整可以带来较大的减排潜力。

1.4 平稳增长与减排的联系

如前所述,经济增长是人类发展的首要目标,减排不应以减少收入或降低经济增长为手段。或者更进一步说,经济平稳增长乃是实现减排的必要前提和基本保障。

首先,温室气体减排与减缓气候变化需要充足的资金支持和长期的技术储备。例如,旨在提高能源使用效率的高效能源利用技术的开发应用、新能源技术的研发推广以及CCS技术实现碳收集和储存等减排措施,从理论提出到技术可行,需要投入大量的前期研发费用;从技术可行到经济可行,又需要长期的推广试行等成本投入。而这些投入必须要有实力雄厚的经济作为支撑和保障,这也是为什么欧盟等发达国家积极领导全球减排的原因。因此,经济的平稳增长是减排技术与资金得到长期持续供应的基础。中国近年来经济的高速稳定发展也为其承诺更高的减排目标提供了底气,当前,中国在核能、太阳能等新能源技术领域已经取得了瞩目的成绩,其产品也已在国际市场占据显著的