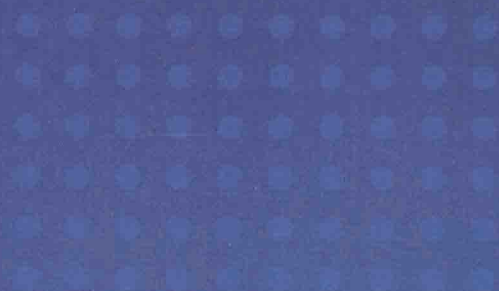




中国能源消费低碳化 发展模型与政策

Low-carbon Oriented Development Models and
Policies for China's Energy Consumption

孟 明 牛东晓 著



科学出版社

中国能源消费低碳化发展 模型与政策

**Low-carbon Oriented Development Models and
Policies for China's Energy Consumption**

孟 明 牛东晓 著

国家自然科学基金资助项目 (71201057, 71071052)
河北省哲学社会科学研究基地资助项目

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

能源消费低碳化发展是缓解温室效应加剧的影响,实现经济与社会环境可持续发展的必由之路。针对中国等发展中国家的特点,本书在碳排放发展路径分解、边际影响分析和发展情景预测三个领域设计了多个模型,并将其应用于中国的实证分析,得到了许多对中国能源及产业政策调整具有借鉴意义的结论。

本书可为能源领域的研究人员提供参考,也可作为管理科学与工程、技术经济与管理以及数量经济等专业高年级本科生或研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

中国能源消费低碳化发展模型与政策=Low-carbon Oriented Development Models and Policies for China's Energy Consumption/孟明,牛东晓著. —北京:科学出版社,2014.5

ISBN 978-7-03-040645-5

I. ①中… II. ①孟… ②牛… III. ①能源消费—研究—中国 IV. ①F426.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第100653号

责任编辑:牛东晓 李丽维/责任校对:宋玲玲
责任印制:肖兴/封面设计:蓝正设计

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014年6月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:230 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

温室效应是指二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4) 和氧化亚氮 (N_2O) 等温室气体有效地吸收地球表面、大气本身相同气体和云所发射出的红外辐射的现象。一定程度的温室效应对人类社会的生存和发展是有益的。据测算,如果没有温室效应,地球表面的平均温度应该为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。正是由于温室效应的存在,才使地球表面的平均温度保持为现在适合人类生活的 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。但是,随着大气中温室气体浓度的增加,温室效应的加剧将会给人类的生存环境带来灾难性的变化,如海平面上升、病虫害增加、气候反常和内陆地区沙漠化加剧等。当前,这种变化不仅已经开始呈现,而且正在以加速趋势发展。研究表明,化石能源燃烧产生的碳排放是造成温室效应加剧的最主要因素,需为此承担 $2/3$ 以上的责任。

在全球主要能源消费国中,中国的化石能源消费比例最高,消费量最大,近年来的增长速度也最快,而且这种状况在可预见的将来应不会发生显著变化。巨大的化石能源消费带来了巨大的碳排放。自 2008 年以来,中国的碳排放量始终高居世界第一位,且所占全球份额逐年增加,2012 年已高达 26.7%。近年来,中国巨大的碳排放量已引起了世界各国的广泛关注。2012 年 12 月通过的《京都议定书》第二承诺期修正协议明确要求,中国等发展中国家必须根据其责任和能力对全球碳排放控制作出相应的贡献。

对于碳排放的控制,可以从技术和管理两个方面进行着手。当前,碳捕捉和储存 (CCS) 等技术由于种种原因尚不能大规模推广,所以管理方法的研究就格外重要。作为一个二元经济结构特征较为明显的发展中国家,能源消费对中国经济增长和社会进步的推动作用是非常明显的。管理方法对于能源消费低碳化发展研究的根本目的在于,以最小的代价换取对化石能源消费及碳排放的有效控制。

当前,对于能源消费低碳化模型的研究主要以西方国家的学者为主导,其研究内容也体现了这些国家的能源消费特点及产业政策调整的需要,很多时候并不适合中国的实际情况。例如,西方国家关注化石能源消费及碳排放总量的变化,所以在分解模型的设计方面也是以上述指标为主,而我国更关注一些比例性指标(如碳生产率和人均碳排放等)的变化。本书将在考虑中国等发展中国家化石能源消费及碳排放特点的基础上,设计一系列的用于能源消费低碳化分析的模型算法,并将其用于对中国的实证分析,进而提出相应的能源及产业政策调整建议。

本书共分 11 章。第 1 章和第 2 章是对研究背景、意义及当前国内外研究现状的介绍。第 3 章是碳生产率三维分解模型及实证,包括绝对分解模型和相对分解

模型,并介绍了该模型的实证应用。第4章是区域经济增长的 Laspeyres 指数分解分析,该章主要研究中国经济增长与碳排放总量、各省份的碳排放结构以及碳生产率之间的关系。第5章是区域能源效率的 DEA-MPI 分解分析,该章研究了造成各省份广义能源效率变化的驱动因素和滞后因素。第6章是基于 IO 模型的中国进出口碳转移分析,该章研究了中国各产业部门的完全碳敏感度以及完全碳转移量,并预测了国际贸易的未来碳转移趋势。第7章是碳排放边际影响及情景预测模型分析,该章以 IPAT 框架和 PLS 算法为基础,测算了各因素对中国碳排放的影响力,并设计了8种发展情景,预测了每种情景下未来的碳排放量。第8章是年度 CO₂ 排放量趋势外推模型,该章提出了用于预测一个国家或地区的长期 CO₂ 排放趋势的 Logistic 曲线方程,并提出了四种参数估计算法,此外该章还提出了用于对发展中国家未来少数年份 CO₂ 排放量预测的混合模型。第9章是基于分段函数的小样本 EKC 分析模型,并以此模型为基础预测了中国未来人均 CO₂ 排放量的边界曲线及可行域。第10章是月度 CO₂ 排放量趋势外推模型,该模型采用小波分解对月度 CO₂ 排放趋势进行拆分,并采用 RBF 网络和灰色模型分别对波动趋势和长期增长趋势进行建模预测,进而得到 CO₂ 排放量的预测值。第11章对全书进行了总结。

本研究得到了国家自然科学基金青年科学基金项目“国际碳排放约束下碳生产率路径分解及预测模型研究”(项目批准号:71201057)和国家自然科学基金面上项目“智能电网中适应不稳定大规模清洁能源发电的联合智能调度管理理论研究”(项目批准号:71071052)的资助,河北省哲学社会科学研究基地也为本研究提供了部分资助,在此一并表示感谢。

鉴于作者的研究水平,本书难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

孟 明

2013年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 能源消费的驱动作用	1
1.1.2 能源消费的供需前景	2
1.1.3 化石能源消费与温室效应	3
1.1.4 中国的能源消费及碳排放	5
1.2 研究意义	7
1.2.1 形成能源消费低碳化分析模型系统	7
1.2.2 模型系统满足发展中国家的需要	8
1.2.3 为中国能源消费低碳化发展提供实证建议	9
1.3 本书的研究思路及主要内容	9
第 2 章 国内外研究进展综述	12
2.1 分解模型综述	12
2.1.1 Divisia 指数分解模型	12
2.1.2 Laspeyres 指数分解模型	15
2.1.3 DEA-MPI 分解模型	17
2.1.4 几种分解模型的比较	18
2.2 边际分析模型综述	19
2.2.1 IO 模型	20
2.2.2 变量投影重要性分析模型	21
2.2.3 基于 EKC 理论的边际影响力分析模型	23
2.3 CO ₂ 排放量趋势外推模型	24
2.3.1 年度 CO ₂ 排放模型	24
2.3.2 月度 CO ₂ 排放模型	25
第 3 章 碳生产率三维分解模型及实证	27
3.1 指标选择及基础分解框架	27
3.1.1 指标选择	27
3.1.2 基础分解框架	27
3.2 碳生产率三维分解模型	28

3.2.1	绝对分解模型	28
3.2.2	相对分解模型	30
3.2.3	两种分解模型的关系	32
3.3	数据来源及分解结果	32
3.3.1	数据来源及转换	32
3.3.2	定量分解结果	35
3.4	分解结果分析及政策建议	37
3.4.1	产业部门维度分析	37
3.4.2	年份维度分析	40
3.4.3	影响因素维度分析	41
3.5	本章小结	44
第 4 章	区域经济增长的 Laspeyres 指数分解分析	45
4.1	研究对象及目的	45
4.2	Laspeyres 指数分解算法	45
4.2.1	基础分解框架	45
4.2.2	完全分解算法	46
4.3	数据来源及转换	47
4.3.1	数据来源及选择	47
4.3.2	数据转换	49
4.4	分解结果分析	50
4.4.1	定量分解过程及结果	50
4.4.2	驱动因素分析	52
4.4.3	地理分布分析	54
4.5	本章小结	57
第 5 章	区域能源效率的 DEA-MPI 分解分析	59
5.1	研究框架及方法选择	59
5.2	DEA-MPI 分解算法	60
5.2.1	DEA 的原理及算法	60
5.2.2	MPI 分解算法	62
5.3	数据及分解结果	64
5.3.1	数据来源及选择	64
5.3.2	MPI 分解结果	65
5.4	分解结果分析	66
5.4.1	总体状况分析	66
5.4.2	特殊省份分析	67

5.4.3 地理分布分析	72
5.5 本章小结	74
第 6 章 基于 IO 模型的中国进出口碳转移分析	75
6.1 研究框架与基本思路	75
6.2 IO 碳转移模型	76
6.2.1 IO 模型的种类	76
6.2.2 投入产出表	77
6.2.3 IO 模型算法	78
6.2.4 进出口碳转移算法	82
6.3 数据来源及预处理	83
6.3.1 投入产出数据	83
6.3.2 直接碳密度数据	84
6.3.3 进出口数据	86
6.4 计算结果分析	88
6.4.1 完全碳密度分析	88
6.4.2 完全碳转移量分析	90
6.4.3 碳转移量趋势分析	91
6.5 本章小结	92
第 7 章 碳排放边际影响及情景预测模型分析	94
7.1 研究框架及基本思路	94
7.2 多重共线性问题及识别	94
7.2.1 OLS 方法的原理	95
7.2.2 多重共线性的原理及影响	97
7.2.3 多重共线性的识别	98
7.3 PLS 及扩展方法	100
7.3.1 PLS2 模型的核心思想	100
7.3.2 PLS1 模型的简化算法	102
7.3.3 交叉有效性	103
7.3.4 PLS1 的建模步骤	104
7.3.5 PLS1 的辅助分析算法	105
7.4 数据选择及初步分析	107
7.4.1 数据来源及预处理	107
7.4.2 数据的初步分析	108
7.5 结果分析及情景预测	110
7.5.1 PLS 回归模型	110

7.5.2 样本及变量分析	111
7.5.3 情景设计及预测分析	112
7.6 本章小结	118
第 8 章 年度 CO₂ 排放量趋势外推模型	119
8.1 趋势规律与拟合方程	119
8.1.1 CO ₂ 排放趋势分析	119
8.1.2 Logistic 曲线方程	122
8.2 参数估计算法	123
8.2.1 Yule 算法	123
8.2.2 Rhodes 算法	124
8.2.3 Nair 算法	125
8.2.4 灰色模型算法	126
8.2.5 混合模型算法	129
8.3 数据拟合及预测结果分析	131
8.3.1 长期趋势的拟合结果分析	131
8.3.2 近期年份的预测结果分析	134
8.4 本章小结	136
第 9 章 基于分段函数的小样本 EKC 分析模型	137
9.1 研究框架与基本思路	137
9.2 分段曲线及其拟合方程	138
9.2.1 分段曲线	138
9.2.2 分段函数	138
9.3 数据来源及初步分析	139
9.3.1 数据来源	139
9.3.2 数据的初步分析	139
9.4 结果与讨论	141
9.4.1 趋势拟合方程	141
9.4.2 发展趋势预测	142
9.4.3 峰值年份预测分析	144
9.5 本章小结	144
第 10 章 月度 CO₂ 排放量趋势外推模型	146
10.1 月度 CO ₂ 排放量趋势特征	146
10.2 趋势外推算法	147
10.2.1 传统分解及预测算法	147
10.2.2 固定振幅算法	148

10.2.3	变动振幅算法	153
10.3	数据拟合及预测结果分析	155
10.3.1	数据来源	155
10.3.2	预测方法设计	156
10.3.3	三种算法的中间值及预测结果	156
10.3.4	误差分析	159
10.4	本章小结	161
第 11 章	结论与展望	162
11.1	结论与主要创新点	162
11.2	展望	163
参考文献		165

第1章 绪 论

1.1 研究背景

自第一次工业革命以来,能源消费一直是人类经济发展和社会进步的重要驱动力量之一。但随着消费数量的积累以及消费规模的不断扩大,化石能源的供应已经日趋紧张,而非化石能源在可预见的将来尚无法成为消费主流。此外,化石能源的大规模消费对人类的生活环境造成了重大影响,其排放的 CO_2 是造成温室效应加剧的最主要原因之一。上述能源供应及环境污染问题在中国的表现尤为明显,使得中国在未来的国际 CO_2 排放控制协议中承担相应责任已成为必然。如何降低中国的 CO_2 排放控制成本,提高能源消费的经济性,实现经济与环境的可持续发展,就成为迫切需要解决的问题。

1.1.1 能源消费的驱动作用

18 世纪中后期,以蒸汽机为代表的多种现代工业设备开始陆续出现,人类生产方式开始由传统的手工生产转变为以能源消费为基础的机器生产。这种生产方式的转变,对人类社会的各个方面均产生了深远影响,称为第一次工业革命^[1]。

第一次工业革命前,除了自然灾害和战争等原因,世界各国的人均 GDP 长期以来基本保持稳定。由于能源动力设备在第一次工业革命时的广泛应用,英法等主要西方国家的社会生产力均大幅提高,部分国家的人均 GDP 在此后短短的 50 年内甚至提高了数倍^[2]。不仅如此,第一次工业革命对社会生产力的大幅提高,巩固了资产阶级的统治地位,开始了欧美国家工业化及现代化进程,使资本主义世界体系初步形成。

此后,随着各国工业化的发展及科技水平的提高,能源消费对人类经济发展和社会进步的驱动作用更加显著,且持续至今。自 1973 年由第四次中东战争引起的第一次能源危机以来,历次能源危机均对世界经济的发展造成了重大影响。同时,世界经济发展的每次复兴,也都伴随着能源消费需求的迅速增加。

当前,能源消费已成为各国经济发展和社会进步的重要驱动力量之一。虽然受到多种不确定因素(如重大技术进步^[3,4]和产业结构调整^[5,6])的影响,能源消费与经济增长之间的因果关系仍然被多项研究成果所证实。表 1-1 列出了部分相关的研究成果。

在可预见的将来,能源消费对各国经济发展和社会进步的驱动作用仍将存在。

表 1-1 能源消费与经济增长关系的代表性研究成果

作者	年份	研究结论
Kraft J, Kraft A ^[7]	1978	采用 1947~1974 年美国 GNP 和能源消费数据,证明了从 GNP 到能源消费的因果关系
Nachanea D M, Nadkarnia R M, Karnika A V ^[8]	1988	采用 11 个发展中国家和 5 个发达国家的数据,证明了 GDP 和能源消费之间存在协整关系
Glasure Y U, Lee A R ^[9]	1998	韩国和新加坡的能源消费和 GDP 之间呈现双向因果关系
Asafu-Adjaye J ^[10]	2000	在印度和印度尼西亚,存在能源到收入的单向因果关系;在菲律宾和泰国,存在能源到收入的双向因果关系
Yang H Y ^[11,12]	2000	台湾的能源消费与 GDP 之间存在双向因果关系,煤炭消费存在从经济增长到煤炭消费的单向因果关系
林伯强 ^[13]	2003	中国存在从电力消费到收入水平的单向因果关系
Ghali K H, El-Sakka M I T ^[14]	2004	加拿大的经济增长和能源消费存在双向因果关系
赵进文, 范继涛 ^[15]	2007	中国经济增长对能源消费的影响具有非线性特征,并可以通过 LSTR2 模型来表达
尹建华, 王兆华 ^[16]	2011	从长期来看,中国经济增长和能源消费之间存在长期协整关系,且存在从能源消费到经济增长的单向因果关系
王世进, 周敏 ^[17]	2012	中国工业能源消费与增加值之间存在长期协整关系

1.1.2 能源消费的供需前景

近年来,随着全球经济的增长,能源消费总量也迅速增加。图 1-1 显示了 1970 年以来全球一次能源的年消费总量(单位:亿吨标准油)及构成情况^[18]。

如图 1-1 所示,从 1970 年到 2011 年,全球一次能源的年消费总量从 49.44 亿吨标准油增长到 122.75 亿吨标准油,增长了约 1.48 倍,而且这种增长趋势并无放缓的迹象。此外,虽然非化石能源(包括图 1-1 中的水电、核电和其他)的发展长期以来得到了很多国家和地区的重视,但由于各种客观条件的限制,其在一次能源消费中所占的比例始终很小。事实上,在过去的二十年中(1992~2011 年),非化石能源所占的比例始终稳定在 12.34%~13.30%,并无显著增加。

当前,非化石能源主要由水电(约占总量的 6.45%)和核电(约占总量的 4.88%)构成。水电的建设需要以特殊的自然地理条件为基础,随着未开发的优质水力资源的逐渐减少,其建设速度也必然会逐渐放缓。此外,水电站对生态环境的破坏作用也逐渐被人们所认识,这就使得各国对水电站的建设态度变得越来越谨慎^[19~22]。自从 1954 年苏联建成世界上第一座向工业电网供电的奥布宁斯克(Obninsk)核电站以来,核电一直被认为是一种成本低廉、蕴藏量巨大且较为安全的能源,其在全球的发展较为迅速。但 2011 年 3 月的日本福岛核电站事故,彻底改变了这种传统观点^[23]。出于对核电事故危害的重新认识,日本迅速关闭了其境内的所有核电站,至今仍无法顺利重启。而德国政府早在 2002 年就通过了一项“核电逐步退出”

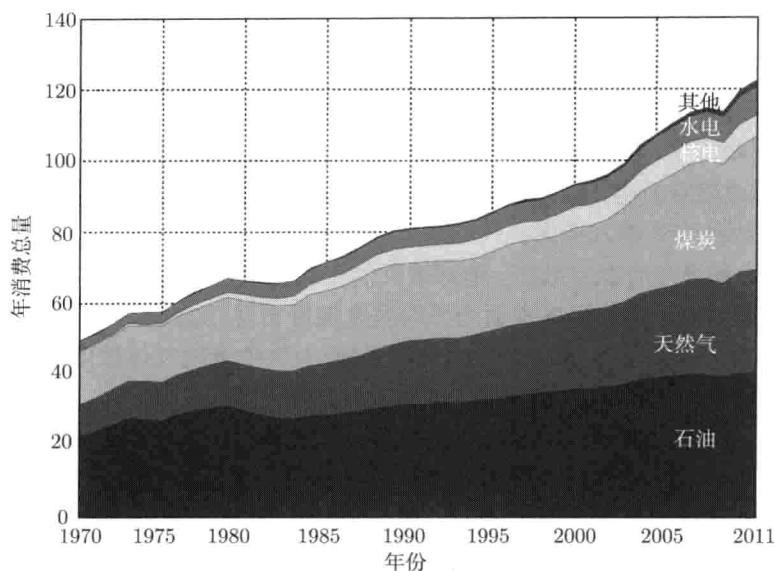


图 1-1 全球一次能源的年消费总量及构成

法令，确定到 2022 年左右关闭德国境内的全部核电站。瑞士政府也决定在 2034 年前关闭其境内的全部核电站。其他国家虽未出台核电退出计划，但在其国内建设新核电站的阻力越来越大，出于安全考虑而增加的建设成本也越来越高^[24,25]。

因此，在可预见的将来，全球一次能源消费总量将持续增长，而化石能源仍将是全球一次能源消费的主体，非化石能源消费的比例仍难以大幅增加。

但是，煤炭、石油和天然气等化石能源是由古代生物的化石经过千万年沉积而来，是不可再生的，其有限的储量必将随着消费量的积累而减少。美国地质局估计，全球煤炭总可采储量约为 8475 亿吨，石油总可采储量约为 3 万亿桶，天然气总可采储量约为 177 万亿立方米。如果维持现有消费趋势，全球的煤炭、石油和天然气将分别在今后的约 192 年、29 年和 49 年内开采殆尽^[26]。因此，可以预计的是，今后全球的化石能源供应将日趋紧张，各国所面临的能源压力将进一步增加。

1.1.3 化石能源消费与温室效应

1824 年，法国数学家和物理学家 Fourier 提出，如果仅仅依靠地球表面吸收太阳辐射的热量，地球应该比实际情况寒冷很多。他提出了各种可能存在的额外的热源，包括地球大气的加温作用^[27]。其后，爱尔兰物理学家 Tyndall 于 1859 年在实验中验证并解释了大气的加温作用。1896 年，瑞典物理学家和化学家 Arrhenius 系统地解释了大气中 CO_2 改变地球温度的过程，并第一次提出了温室效应的概念^[28]。今天所公认的温室效应是指温室气体有效地吸收地球表面、大气本身相同气体和云所发射出的红外辐射的现象^[29]。而温室气体则是指大气中由自然或人为

活动产生的能够吸收和释放地球表面、大气和云所射出的红外谱段特定波长辐射的气体成分,其种类有二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)和六氟化硫(SF_6)^[30]。其中, CO_2 对全球温室效应的贡献超过了80%^[31],因此 CO_2 一直是被关注的重点。此外,水蒸气(H_2O)和臭氧(O_3)也能形成温室效应,但其时空分布变化较大,因此在进行减量措施规划时,一般都不将这两种气体纳入考虑。

据测算,如果没有温室效应,地球表面的平均温度应该为 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ ^[32]。正是由于温室效应的存在,才使地球表面的平均温度保持为现在的 $14\text{ }^\circ\text{C}$ ^[33]。因此,适度的温室效应对于人类生存是有益的。但是,随着大气中温室气体浓度的增加,温室效应的加剧将会给人类的生存环境带来灾难性的变化。

事实上,作为温室效应加剧的直接后果,全球平均气温在整个20世纪已经上升了超过 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ^[34]。更为严重的是,这种升温作用在可预见的将来是迅速加剧的。据估计,2050年的全球平均气温有99%的可能性比21世纪初增加 $2\text{ }^\circ\text{C}$ ^[35]。当前,对于温室效应的间接影响尚未完全研究清楚,但至少有以下几个方面。第一,海平面上升。温室效应导致的海洋温度升高,会使得南极洲和格陵兰岛的大陆冰川加速融化,导致海平面上升,会淹没沿海低海拔地区。尽管从长期看,温室效应的加剧才仅仅处于开始阶段,但海平面上升对人类的影响已经开始明显显现。南太平洋岛国图瓦卢(Tuvalu)已经逐步被海水淹没,国内居民已经从2001年起分批撤往国外^[36,37]。多项研究结果均表明,海平面会在今后继续加速上升^[38,39]。第二,地球上的病虫害增加。全球气温上升将使两极冰层溶化,已经被冰封亿万年的史前致命病毒可能会重新出现。这将使地球上的病虫害显著增加。更重要的是,由于人类对这些原始病毒大多都没有抵抗能力,这将导致全球陷入疫症恐慌,人类生命受到严重威胁^[40]。此外,由于大气温度升高,也将导致热带传染病出现向高纬度地区扩散的趋势。第三,气候反常。研究表明,温室效应将导致全球气候反常,地球上各种生物经过亿万年进化后所熟悉的气候环境将迅速发生显著变化^[41,42]。第四,内陆地区沙漠化加剧。温室效应会加剧内陆干旱和半干旱地区向沙漠化发展,进一步恶化人类的生存环境^[43]。

化石能源消费所排放的 CO_2 约占全球 CO_2 排放总量的80%并对上述温室效应加剧的影响承担约2/3的责任^[31],因此化石能源的消费及其 CO_2 排放问题一直是各国学者、企业和政府所关注的重点。

解决大气中 CO_2 浓度增加所带来的温室效应加剧问题,最直接而有效的方法就是碳捕捉及封存(Carbon capture and storage, CCS),即将释放到大气中的 CO_2 捕捉并压缩之后放置到枯竭的油田、天然气田或者其他安全的地下场所。但遗憾的是,由于技术原因,这种方法在短时间内成本过高而难以大规模推行^[44]。因此,解决上述问题还应依靠管理途径。

本质上讲,化石能源的消费具有典型的负外部效应。具体而言,一个经济体对化石能源的消费往往会促进其自身的经济发展,但其排放的 CO_2 却可以通过温室效应影响全球的气候环境。因此,通常情况下(不考虑特殊的博弈环境),任何一个理性的经济体都不会主动对其化石能源消费及 CO_2 排放进行控制,政府间的联合行动是唯一的可行途径。鉴于此,世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)和联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)于1988年成立了政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)。IPCC的宗旨是对当前世界上有关全球气候变化的科学、技术和社会经济信息进行评估,从而推动各国 CO_2 排放控制工作的开展^[45]。在IPCC的推动下,联合国环境与发展会议于1992年6月4日通过了联合国气候变化框架公约(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)。UNFCCC是世界上第一个为全面控制 CO_2 等温室气体排放,以应对全球气候变暖给人类经济和社会带来不利影响的国际公约,也是国际社会在对付全球气候变化问题上进行国际合作的一个基本框架。作为UNFCCC的补充条款,《京都议定书》也于1997年在日本京都召开的UNFCCC第3次缔约方会议上通过。《京都议定书》是第一个明确规定了减排目标(在2008~2012年,全球主要工业国家的工业 CO_2 排放量比1990年的排放量低5%)和全球主要工业国家减排份额的国际性公约^[30],被认为是迄今为止最重要的国际减排协议^[46,47]。

2009年12月,UNFCCC第15次缔约方会议在丹麦首都哥本哈根召开。这次会议的核心议题是商讨《京都议定书》一期承诺到期(2012年)后的后续方案,就未来应对气候变化的全球行动签署新的协议。这次会议将直接决定2012年以后的全球 CO_2 排放控制安排,因此被寄予厚望。由于与大多数经济现象一样, CO_2 减排的边际成本也是上升的。特别是诸如欧洲碳交易体系(European Union Emissions Trading System, EU ETS^[48])等碳交易市场的出现更是使减排成本变为现实的经济利益。因此,尽管与会各国在这次会议上都同意继续努力控制全球 CO_2 排放,但对于各自的减排份额却发生了激烈的争议,最终达成的《哥本哈根协议》也并不具有法律约束力^[49]。这就意味着,在2012年《京都议定书》第一承诺期到期后,全球将没有一个共同文件来约束温室气体的排放。

但是,考虑到化石能源消费所具有的典型负外效应特征,以及当前人类所面临的温室效应明显加剧的严峻局面,在IPCC、各国政府及学术界的推动下,新的国际 CO_2 减排体系应该能够在不久之后形成。

1.1.4 中国的能源消费及碳排放

1978年12月,中国共产党召开了具有重大历史意义的十一届三中全会。全会明确指出中国共产党在新时期的历史任务是把中国建设成为社会主义现代化强国,

而改革开放是完成这一历史任务的重要途径。从此,中国政治稳定,经济发展进入高速上升的通道。

从 1979 年到 2011 年,按现价美元计算的中国 GDP 由 1756 亿美元增长到 72981 亿美元,年平均增长率高达 12.35%^[50-52]。由于技术进步和产业结构调整等节能措施无法完全分解经济高速增长对能源需求的压力,中国的能源消费也因此迅速增加。中国同期的能源消费总量由 4.06 亿吨标准油增长到 26.13 亿吨标准油,年增长率达 6%。从 2009 年起,中国的一次能源消费总量已经超过美国,居世界第一位。由于中国的一次能源消费始终以化石能源为主体,中国的 CO₂ 排放量也在同期迅速增长,由 14.62 亿吨增长到 89.79 亿吨,并且从 2006 年起已经超过美国,居世界第一位^[18]。

表 1-2 列出了中国与全球总体水平的主要能源消费指标的比较情况。包括:能源消费总量(单位:亿吨标准油)^[18]、能源消费比例(%)、能源密度(单位:100Btu/2005 年等值美元)^[53]、化石能源比例(%)^[18]、煤炭消费比例(%)^[18]、CO₂ 排放量(单位:亿吨)^[18]、CO₂ 排放比例(%)、碳密度(单位:公吨 CO₂ 排放量/1 万 2005 年等值美元)^[54] 以及相关指标的增长率(%)。

表 1-2 中国主要能源消费指标与全球总体水平的比较

消费指标	1979 年	1985 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2011 年	增长率
中国能源消费总量	4.06	5.22	6.62	8.88	10.11	16.59	26.13	8.83
全球能源消费总量	67.10	71.61	81.05	85.64	93.56	107.54	122.75	2.78
中国能源消费比例	6.05	7.29	8.17	10.37	10.81	15.43	21.29	—
中国能源密度	799.15 ^①	611.24	513.55	370.76	256.51	302.36	259.82 ^②	—
全球能源密度	107.35 ^①	98.95	113.62	108.36	99.19	100.21	98.03 ^②	—
中国化石能源比例	96 ^①	95.1	94.9	93.9	93.6	93.2	91.4 ^③	—
全球化石能源比例	92.14	88.89	88.02	86.86	86.77	87.23	87.08	—
中国煤炭消费比例	72.2 ^①	75.8	76.2	74.6	69.2	70.8	68.0 ^③	—
全球煤炭消费比例	26.8	28.8	27.23	26.06	25.36	27.73	30.34	—
中国 CO ₂ 排放量	14.62	18.86	23.87	31.64	35.51	58.03	89.79	8.60
全球 CO ₂ 排放量	196.52	203.03	225.87	234.33	254.63	296.52	340.32	2.53
中国 CO ₂ 排放比例	7.44	9.29	10.57	13.5	13.95	19.57	26.38	—
中国碳密度	66.96 ^①	51.60	43.17	30.53	20.11	24.42	21.75 ^③	—
全球碳密度	6.89 ^①	6.18	7.05	6.59	5.96	6.18	6.21 ^③	—

① 为 1980 年数据; ② 为 2009 年数据; ③ 为 2010 年数据

与全球总体水平相比,中国能源消费具有以下特点: 第一,能源消费总量增长率明显快于全球平均水平,这就使得中国能源消费总量所占全球份额逐年增加,到 2011 年已达 21.29%; 第二,中国的化石能源消费比例高于全球平均水平,特别是煤炭消费比例更为突出,这就使得中国占全球的 CO₂ 排放比例始终高于能源消费

总量比例；第三，中国的能源经济性指标，如能源密度和碳密度等都明显劣于全球平均水平。

1997年通过的《京都议定书》的设计原则，实际上是以经济发展水平为主要指标。因此，负有CO₂排放控制责任的“附件1”(Annex I)缔约方全部为发达的市场经济国家或正在向发达的市场经济过渡的国家，包括中国在内的发展中国家并不需要承担CO₂排放控制责任^[30]。考虑到20世纪90年代以前全球大部分生产性化石能源CO₂排放量确实是由发达国家产生的，以及发达国家与发展中国家之间经济实力的明显差距，以经济发展水平作为减排份额分配的主要指标在当时并没有受到太多质疑。但是，在过去的十几年中，世界经济与碳排放格局发生了巨大变化。其中，中国的GDP总量由20世纪90年代初的全球第11位上升到2010年的第2位^[51]；中国的CO₂排放比例由90年代初的全球10.57%增长到2011年的26.38%^[18]。此外，中国的能源经济性指标至今仍明显劣于全球平均水平。在这种情况下，在未来的国际减排协议中，中国需要承担CO₂排放控制责任几乎是毋庸置疑的。因此，如何降低中国CO₂排放的控制成本，提高能源消费的经济性，就成为迫切需要解决的问题。

1.2 研究意义

研究中国能源消费低碳化发展模型，形成一套适合包括中国在内的发展中国家的能源消费低碳化分析模型系统，将有助于为中国的能源消费向低碳化方向发展提供以实证分析结果为基础的政策建议。

1.2.1 形成能源消费低碳化分析模型系统

随着全球化石能源消费的不断增长以及温室效应的不断加剧，对能源消费低碳化模型的研究越来越引起各国政府和学者的重视。但迄今为止，由于对能源消费低碳化模型的研究起步较晚，尚未形成较为全面的模型系统。

虽然早在工业革命以后，能源消费对经济发展的驱动作用就逐渐被人们所认识，但长期以来，化石能源的供应一直较为平稳，未大规模出现由于供应不足而影响经济发展的情况。至于人们对温室效应加剧的重视，更是仅仅在最近三十年左右的时间。因此，除了出于企业调度经济性的目的而对短期能源需求模型^[55-57]进行的研究，对能源消费低碳化模型相关领域的研究均起步较晚。

能源消费模型第一次引起人们重视是在第一次世界能源危机后。1973年10月6日，埃及与叙利亚结成军事联盟，对以色列进行突袭，分别打算以军事手段收复六年前被以色列占领的西奈半岛和戈兰高地，从而引爆了第四次中东战争。尽管这仅仅是一次规模不大的地区战争，而且时间很短（仅约20天），却对世界经济发