

Path Selection and Strategy of CO₂ Reduction in China
Considering Total Emissions Reduction

总量减排目标下的 我国二氧化碳减排路径及 对策研究

李华楠/著



科学出版社

总量减排目标下的我国二氧化碳 减排路径及对策研究

李华楠 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书基于二氧化碳总量减排的大背景,围绕我国的二氧化碳减排路径及对策的若干关键科学问题,采用管理学、计量经济学、能源经济学、运筹学和工程学等多学科理论、模型和方法,从可持续发展以及气候变化的视角,深入探讨和分析了我国的二氧化碳减排问题,提出了一系列重要的基本结论和可行的政策建议。

本书适合能源经济与管理、温室气体减排政策研究领域的专业人员阅读,也可供从事气候变化管理工作的政府公务人员、企业管理人员、高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

总量减排目标下的我国二氧化碳减排路径及对策研究 / 李华楠著.
—北京:科学出版社,2017.9

ISBN 978-7-03-054617-3

I. ①总… II. ①李… 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 (2017) 第 238275 号

责任编辑:王 倩 / 责任校对:彭 涛
责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 9 月第一次印刷 印张:7 1/2

字数:150 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	4
1.3 研究的由来、目的及意义	10
1.4 本书的思路及研究框架	13
第 2 章 中国碳排放现状及碳流变化趋势分析	16
2.1 中国二氧化碳排放现状分析	16
2.2 中国 2008 ~ 2012 年碳流变化分析	18
2.3 本章小结	38
第 3 章 总量减排目标下我国碳减排模式研究	40
3.1 研究方法	41
3.2 数据来源	45
3.3 主要结论	46
3.4 本章小结	56
第 4 章 我国年碳排放量达峰可能性	58
4.1 研究方法	59
4.2 数据来源	62
4.3 主要结论	62
4.4 本章小结	71
第 5 章 我国关键行业低碳发展技术分析	72
5.1 减碳发展技术	72
5.2 无碳发展技术	83
5.3 去碳发展技术	88
5.4 本章小结	92

第 6 章 CCUS 技术规划选择研究 93

 6.1 研究方法 93

 6.2 数据来源 98

 6.3 主要结论 100

 6.4 本章小结 103

第 7 章 总结 105

 7.1 结论及政策建议 105

 7.2 后续研究计划 108

参考文献 109

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

全球气候变化是 21 世纪人类共同面临的挑战之一，它不仅反映了气候系统本身存在的问题，而且已经扩散到政治、经济和能源等领域，是影响人类生存与发展的重大环境问题。近年来，全球气候异常变化不断增多。目前科学家已观测到许多生物和自然系统的异常变化，如物种迁徙、冰川退化及物种特征发生变化等。这些现象都与近些年气候的变暖具有一致性。珊瑚礁、冰川、红树林、热带和寒带森林、山地与极地生态系统、湿地草原等一些独特的生态系统由于气候变化暴露出越来越明显的脆弱性。更严重的是，许多生物物种的灭绝速度由于气候变化将可能加快，并且气候异常或极端天气的发生频率也将会升高。受到全球气候变化的影响，近 50 年来，我国极端天气气候事件的发生频率和强度出现了明显变化，全国平均炎热日数呈现先下降后增加的趋势，而近 20 年上升较明显，华北和东北地区干旱面积呈增加趋势，长江中下游流域和东南部地区洪涝灾害加重。除了极端气候事件外，冰川的融化也是备受人们关注的全球气候变化的影响后果之一。基于 2006 年发布的《气候变化国家评估报告》，我国的西部冰川到 2050 年估计将会减少 27.2%。该报告还指出，我国未来的气候变化速度将会进一步加快，在未来

50 ~ 80 年全国平均温度很可能升高 2 ~ 3℃。气候变暖将给我国造成严重的损失。据预测,我国的沿岸海平面到 2030 年上升的幅度可能为 10 ~ 16cm,这将会使海岸区的洪水泛滥机会增大。此外,农业生产的不稳定性也因气候变化而增加,产量变化幅度随之增大。到 2030 年,如果不采取任何相应措施,那么我国种植业的生产能力在总体上可能会下降 5% ~ 10%;到 21 世纪下半期,小麦、水稻和玉米等中国主要的农作物产量可能下降 37%,我国的粮食安全将会受到长期的严重影响。

气候变化已经引起了全球性的普遍关注,人类已经逐渐意识到了其可能导致的严重后果。因此,我们必须采取强有力的措施去应对这一严重威胁人类生存和地球生态环境的环境问题。世界各国都在通过各种手段积极努力地减少温室气体排放,以减缓全球温度的持续升高,减少温室效应对人类生存环境的影响。1990 年,国际气候公约谈判启动。2005 年 2 月,《京都议定书》正式生效,其主要内容为约束工业发达国家的温室气体排放量,要求 2008 ~ 2012 年工业发达国家在 1990 年的温室气体排放量基础上平均减少 5.2 %;2005 年 12 月,后京都谈判在蒙特利尔气候大会上决定启动。2007 年,全球各国高度关注气候变化和推动低碳经济。2007 年 3 月,欧盟决定到 2020 年比 1990 年水平减排 20% ~ 30%。2007 年 4 月,气候变化被联合国安理会列为涉及国际安全的议题,当月,中国环境与发展国际合作委员会召开了低碳经济和能源与环境政策研讨会。2007 年 9 月,在联合国大会和亚太经济合作组织 (APEC) 会议上,气候变化被列为其重要议题。2007 年 12 月,规模空前的联合国气候大会在印度尼西亚召开,这是为了制定《巴厘岛路线图》。同时,欧盟计划实施气候变化项目 (climate change projects) 和碳交易 (carbon trading),美国加利福尼亚州立法严格要求企业减排二氧化碳。自 2005 年 2 月 16 日《京都议定书》生效以来,全球温室气体排放已经得到一定程度的控制。

2009年12月,联合国气候变化大会中发表《哥本哈根协议》,根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告的科学观点,提出将全球平均温升控制在工业革命以前 2°C 的长期目标。这就意味着必须将大气层中温室气体浓度控制在 $450\text{ ppm}^{\text{①}}$ 以下,然而完成这样的目标对温室气体的减排压力将是十分巨大的。世界各国在后京都时代必须采取新的减排技术措施及积极的减排态度和有力的政策减少温室气体的绝对排放量。但随着经济的快速发展,全球的二氧化碳排放量(最主要的温室气体)在一定时期内仍将继续增长,加上世界各国参差不齐的技术水平、全球人口增长、经济投入及工业发展等诸多因素,减缓气候变化、减少温室气体排放任重而道远。全球二氧化碳排放趋势的预测值与实际值对比如图1.1所示。

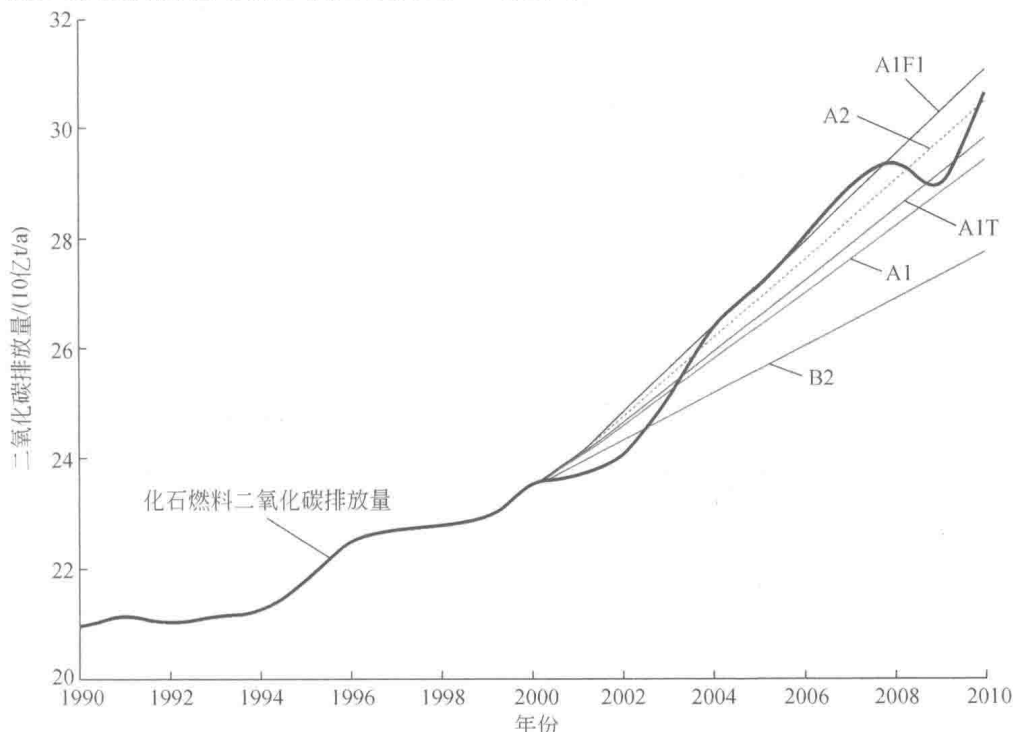


图 1.1 全球化石能源燃烧产生二氧化碳实际排放量与 IPCC 预测值比较

资料来源: 政府间气候变化委员会 (IPCC); 国际能源署 (IEA)

^① $1\text{ ppm}=1\text{ ml/m}^3$ 。

改革开放 30 余年来,中国经济以前所未有的速度发展,在世界上的影响力与日俱增,而如此快速的经济也带来了人口增长、环境污染、产业结构和能源消费结构不合理等众多问题。同时,由于工业发展的突飞猛进,我国温室气体的排放量也越来越多。随着中国经济的持续高速发展,中国的二氧化碳排放量将进一步增加。多项研究表明,目前,中国的二氧化碳排放总量已经超过美国,居世界首位。尽管在《京都议定书》中没有承担减排义务,但作为世界上最大的发展中国家和世界第一大二氧化碳排放国,后京都时代中国的温室气体减排压力将会越来越大。我国作为一个负责任的大国,一直以来都认真贯彻和落实温室气体的减排政策,并且取得了一定的成绩。

“十一五”期间我国明确规定:到 2010 年全国单位国内生产总值能源消耗比 2005 年年末要下降 20% 左右。这意味着在“十一五”期间我国需要节约能源 6.2 亿 tce 左右,相当于减少二氧化碳排放约 15 亿 t。但是,就目前我国能源消费结构及节能技术水平来看,还存在着一系列问题有待解决,如能源消费加快、能源利用率低、能源结构不合理等。我国温室气体减排目标的实现任重而道远。近年来,我国温室气体排放相关问题已经成为国内外学术界、环境界、能源界关注和研究的热点之一。

1.2 国内外研究现状

近些年,人类活动与气候变化的相互作用及一系列由此产生的相关问题,引起了各国政府和学者的广泛关注及研究。对全球气候变化的研究大概始于 20 世纪 80 年代,20 多年来全世界已经有 70 多个国家和地区先后成立了国家级的全球气候变化研究委员会,以协调和组织国家和地区的全球变化研究工作^[1]。

CGE 模型是瑞典斯德歌摩经济学院于 20 世纪 60 年代末开发的一般均衡能源模型, 后又经过发展完善, 于 20 世纪 80 年代末建立了能源 - 环境 - 经济 CGE 模型^[6]。它是自上而下模型的代表, 主要模拟和预测能源、环境与经济发展之间的相互影响。由于 CGE 模型在政策模拟分析方面具有的优势, 以及经济因素在全球气候变化及温室气体减排问题当中的核心地位, CGE 模型现已发展成为国际上研究全球气候变化及温室气体减排问题的主流方法。Zhang^[7] 通过构建动态 CGE 模型研究了我国的二氧化碳减排对经济各部门能源消费和环境排放的影响。中国社会科学院的数量经济与技术经济研究所开发建立了中国能源经济 CGE 模型, 来分析不同情景下我国的二氧化碳减排成本^[8]。王灿等利用 CGE 模型分析了二氧化碳减排对中国经济的

影响^[9]。美国哈佛大学的 Garbaccio、HO 和 Jorgensen 基于 CGE 模型开发了中国经济 - 能源 - 环境的动态 CGE 模型^[10]。Masui 构建了一个动态回归的政策评估一般均衡模型——AIM/Material, 用于分析日本在环境约束下的温室气体减排政策和垃圾治理政策^[11], 并对日本 2030 年以前的碳减排技术进行了评估^[12]。Lu 等基于 CGE 分析以中国西部的陕西省为例研究了能源投资对经济增长和二氧化碳减排的影响^[13]。沈可挺基于贺菊煌教授建立的 CGE-HE 模型分析了我国碳税对国民经济的整体性和结构性影响, 以期更加全面地分析碳税等减排政策的传导机制, 并对减排成本有一个更加全面的揭示^[14]。从均衡过程可以看出经典 CGE 模型存在的一个问题, 那就是投资与技术之间缺乏直接的关系, 技术变化的确定存在一定的外生性与任意性。CGE 模型的问题主要体现在以下几方面: ①模型中的替代弹性、价格弹性和收入弹性的取值一般根据历史样本估计得到, 由于技术成本的变化, 以及新技术的出现, 弹性参数在预测期有可能发生很大变化。这倾向于高估部门的消耗, 就减排而言, 可能高估减排政策的成本。而我国的研究, 由于缺乏必要的实证根据, 因此大部分情况下只能推测。②由于部门集合程度很高, 无法对具体技术进行很好模拟, 新技术的引入缺乏合理的模拟方法, 随生产函数的系数变化。例如, 自动效率改进系数 (AEEI) 体现的渐进技术进步缺乏对于重大技术进步的影响分析, 其分析结果往往是过去趋势的平滑延续。因此, CGE 模型分析得到的未来趋势, 基本是现有发展的一个外推拷贝, 未来的发展与现在非常类似^[15]。其他应用自上向下模型进行温室气体减排方面的研究还有: Chung 等改进了一个基于几何分布滞后需求的能源进程模型——GDL 模型, 用于二氧化碳排放政策控制分析。GDL 模型考虑了石油、煤、电力、气的供需, 评估了二氧化碳排放控制政策对美国 and 加拿大的影响^[16]。Kunsch 和 Springael 运用动态分析和模糊理论模拟了居民部门的碳税政策对碳减排的影响^[17]。

Kwon 利用情景分析, 基于“影响 = 人口 $\times$ 附加 $\times$ 技术”理论, 研究了英国汽车部门的二氧化碳排放趋势^[18]。Kawase 等利用扩展的 Kaya 指数进行了二氧化碳排放因素分解分析, 讨论了日本的长期气候稳定情景模型^[19]。Fan 等运用投入 - 产出模型, 对中国的能源需求和二氧化碳排放进行了情景分析^[20]。Samuel 等分析了国际合作减排二氧化碳的收益, 利用纳什均衡理论和社会最优化理论, 指出了目前各国对温室气体减排的不同态度主要取决于经济因素^[21]。Arar 和 Southgate 应用时间自回归分析模型, 对美国的碳减排目标进行了情景分析^[22]。Lia 等根据关于储藏经济的容量潜力和二氧化碳供应潜力对储藏点进行分级, 以固定排放源和储藏点年度总额的距离来描述存储站点的供应潜力^[23]。Svensson 等根据不同的成本、容量、距离、运输方式和储藏类型确认和分析不同的二氧化碳运输情景^[24]。李永等将源汇匹配问题归结为一个具有多背包问题性质的组合最优化问题。在确定折现减排总成本最小化的目标下, 通过引入虚拟汇, 建立了 CCS 源汇匹配数学模型, 并选择与贪婪算法相结合的混合遗传算法作为模型的优化算法^[25]等。

自下向上模型主要研究最底层单位的技术经济变化所导致的综合效应和随之产生的经济影响。这类模型跟 CGE 模型形成了鲜明对比。由于其较详细地描述了各种工艺流程和具体技术, 因此在评估资源生产技术的替代效应方面具有较高可信度。在自下而上的能源模型中, Markal、AIM 及 Leap 模型较具有代表性。Markal(Market allocation)^[26, 27]模型是由国际能源署于 1976 ~ 1981 年发起, 由美国、德国等国家共同努力, 基于工程角度建立起的一种能源供应技术远期动态线性优化模型。随着不断的发展和完善, Markal 模型的交互界面已经由 MUSS(Markal user support system)发展到现在的 ANSWER Markal^[28]。陈文颖等利用建立的中国 MARKAL-MACRO 模型对未来能源发展与碳排放的基准方案以及碳减排对中国能源系统的可能影响进行了研究^[29]。

Sato 等应用 MARKAL 模型分析了 1990 ~ 2050 年日本 CO₂ 减排的潜力, 并确定了未来日本的主要能源和能源技术选择^[30]。Ybema 等利用 MARKAL 的改进模型, 分析了在近期减排政策中考虑长期减排的风险^[31]。Gielen 和 Chen 运用 MARKAL 模型分析了温室气体减排的附加效益——污染物的减排^[32]。Ichinohe 和 Endo 应用 MARKAL 模型对日本的交通部门的碳减排进行了分析^[33]。Kram 应用 MARKAL 模型, 对 9 个国家的二氧化碳减排潜力进行了分析^[34]。Ko 等应用 MARKAL-MACRO 模型, 对台湾碳温室气体排长期目标进行了情景分析、影响评估和政策优化^[35]。

由瑞典斯德哥尔摩环境研究所 (SEI) 开发的 LEAP 模型是静态能源环境经济模型。该模型通过建立数学模型来预测各部门的能源需求、消费和环境影响, 并详细分析各种可用方案的环境和经济效益, 实现了能源消费的系统仿真, 通常被称为“终端能源消费模型”^[36]。Wang 等应用 Leap 模型, 分析了不同情境下中国钢铁部门的碳减排潜力^[37]。AIM 模型是一个著名的能源终端消费模型, 由日本国立环境研究所 (NIES) 于 1994 年开发。该模型旨在对由人类活动导致的温室气体排放、温室气体排放增加导致的气候变化, 以及气候变化对自然环境、社会、经济产生的影响进行综合分析。因此, 评价控制地球温暖化各种对策的实施效果常常用到该模型^[38]。应用 AIM 模型, Jiang 等全面地分析了未来中长期亚太地区发展中国家的温室气体排放情况^[39]。胡秀莲和姜克隽基于 AIM 模型对我国的温室气体减排技术及减排效果进行了综合评价分析, 给出了三种不同情景下我国的温室气体排放预测结果^[40]。在温室气体减排模型方面, 其他利用自下向上模型进行研究主要有: Wang 从自下向上的角度考虑针对交通部门的所有可能的减排政策, 研究技术效率的提升对和减排成本的影响, 预测了各种政策情境下的减排潜力^[41]。Akimoto 等开发了一个混合整数规划模型, 该模型考虑了 CCS 技术的特性,

以及运输和二氧化碳地下储藏的成本对经济领域的影响^[42]。胥蕊娜等针对电力部门,重点总结并比较了各种二氧化碳捕集技术成本,分析了影响成本的重要因素,量化捕集过程中的效率损失、能源需求及相关资源消耗。结合中国未来发展趋势,分析实行二氧化碳捕集技术对中国能源和经济的影响^[43]。黄斌等介绍电厂二氧化碳捕获技术路线、二氧化碳分离技术、二氧化碳的封存技术^[44]。Motoaki Utamura 构建了一个基于能源投资回收效应的二氧化碳排放分析模型,该模型通过可再生能源替代矿物燃料的方式实现二氧化碳减排^[45]。Wahbaa 等使用 PAGE2002 模型计算了二氧化碳在 IPCC 的 A2 和 B2 两个减排情景下的边际影响,以及各地区部门随着时间的推移它们所产生的影响^[46]。Dooleya 等在假设未来气候政策和二氧化碳捕获与储存 (CCS) 技术的有效成本的大规模可获得性前提下,研究了美国大规模非传统燃料生产和二氧化碳捕获及储存技术的作用^[47]。Bistline 等分析了在美国电力部门中,碳捕获和储存 (CCS) 技术在减少温室气体排放量上的潜在贡献^[48]。Fan 等用 I-O 模型考虑技术、人口、经济和城市化 4 个因素,计算了能源需求与二氧化碳排放量,并用 Visual Basic 6.0 开发出计算中国能源需求和二氧化碳排放量分析系统相应软件 (CErCmA)^[49]。自下向上模型的最大问题在于它本质上属于部分均衡模型,不包含经济模块,所有的宏观经济与结构变量都必须外生确定,无法反映政策的宏观与结构影响。这种经济变量的外生对于政策模拟与评估研究存在困难。

可进行宏观经济分析和能源政策评价的自上而下模型(能源经济模型)与可对能源消费和能源生产过程的技术进行系统描述和仿真的自下而上模型(能源工程模型)有机结合就是混合能源模型。目前比较有代表性的混合能源模型有美国能源部、国际能源署开发的能源经济区域模型 (NEMS)^[50]、国际应用系统分析研究所 (IIASA) 和世界能源委员会 (WEC) 开发的动态线性规划能源 -

经济-环境模型 (IIASA-WECE3)^[51]、欧盟开发的研究预测和长期能源规划的能源经济模型 (MIDAS)^[52]。通过对我国的能源模型进行深入研究,张阿玲等构建了中国的能源-经济-环境系统的综合分析评价模型^[5, 52]。郑淮等在INET模型的基础上借鉴国内外模型发展经验,提出了改进的经济-能源-环境(3E)模型。该模型基于中国经济社会发展现状,通过引进电力负荷曲线、技术改造投资等工具改进交互界面,针对我国经济发展中出现的一些问题和统计数据不易收集等问题,构造适合中国国情的研究温室气体减排/限排问题的模型工具^[53]。Kainuma等采用投入-产出模型(I-O)和一般均衡模型(GE模型)估计了二氧化碳排放量。I-O模型可以有效地估计产品直接的二氧化碳排放量,但不能并入社会经济结构变化引起的间接效应,而GE模型可以并入结构变化的非线性效应^[54]。

综上分析可以看出,关于温室气体减排相关模型的研究,国外学者做了大量深入细致的工作。国内研究由于起步比较晚,在模型开发方面处于起步阶段,研究成果相对较少,落后于世界先进水平,需要在建模方法上进行探索和积累实践经验^[55]。

目前国内外的研究成果虽然给我们提供了大量可供借鉴的基本模型和方法,但是缺乏通用性,并且缺少综合评估模型。国内引进的成熟模型,如LEAP、MARKAL等都是依据国外的经济体系建立的,不能充分考虑中国的国情,所以每个分析模型都具有一定的局限性。

1.3 研究的由来、目的及意义

1.3.1 研究的由来

本书的研究是在国家自然科学基金青年基金项目“区域能源经济4E系统耦

合优化模型及其在碳减排中应用”(基金号:71401010)和中国博士后基金“基于碳减排的区域能源经济系统优化模型研究”(基金号:2014M550024)的支持下完成的。

1.3.2 研究的目的地及意义

全球气候变暖日益引起国际社会的普遍关注,并成为世界各国共同面临的危机和挑战。中国是世界上最大的发展中国家,据粗略计算,1990年,我国的二氧化碳排放总量为23.92亿t,而2013年我国二氧化碳排放总量为84.27亿t,年均增长率高达7.25%。目前,中国二氧化碳的排放量已经超过美国,位居世界第一。据估计,2013年二氧化碳排放量占全球二氧化碳排放量的27%。随着中国经济的快速发展,二氧化碳排放量不可避免地会继续出现一定幅度的增加,中国的二氧化碳总量减排的压力将越来越大。2009年在哥本哈根气候大会上,中国政府做出了到2020年碳排放强度比2005年下降40%~45%的承诺,考虑到我国“十二五”和“十三五”经济年均增速分别为7%和6%,那么如果要实现这个承诺,我国到2020年的二氧化碳排放总量的年均增长率仍将高达4.15%(碳排放强度下降40%目标下)和3.38%(碳排放强度下降45%目标下),碳排放总量仍然巨大。特别是在2014年的北京APEC会议上,中美两国领导人共同签署了《中美气候变化联合声明》,声明中我国政府承诺我国的二氧化碳排放在2030年前后达到峰值,并尽早达到。因此,研究碳总量减排目标下我国的二氧化碳减排路径十分重要,其不仅有利于我国的可持续发展,而且对缓和全球气候变暖具有重要意义。

减排路径,顾名思义,即是指二氧化碳的减排措施和手段,既包括减排政策的制定,又包括减排技术的升级与推广。从宏观角度来说,减排路径是

使主要指标下降的各项政策措施的集合；从微观角度来说，减排路径是能达到减排效果的各项具体手段，如调结构、技术改造等。从范围上来说，减排路径不是唯一的一种发展方式，而是达到社会、经济、能源、环境协调发展的不同政策和手段的集合。减排路径这一概念在国内外很多研究文献中均有涉及，怎样找到最优减排路径，即最优的减排措施集合是目前国内外学者研究的重点。本书正是基于这样一种研究思想，通过对围绕我国二氧化碳减排的不同问题的回答，提出一些有利于实现我国二氧化碳减排目标的政策措施。

二氧化碳排放是一个复杂的大系统问题。对于这样的技术问题和相关经济问题，目前可行的分析手段是模型分析方法，即对实际的技术和相关社会指标用计算模型进行分析、预测与评价，用得到的研究成果来指导相应的实际技术应用。这不仅可以降低技术施行的风险，同时可以指导相关政策的制定。

因此，针对上述科学问题，开展适合我国国情的二氧化碳总量减排理论与方法研究，具有重要的现实意义。本书在借鉴国内外经典数学模型方法的基础上进行了一定的创新，从定量和定性两个角度对中国二氧化碳的减排问题进行了分析和探讨，以期达到以下研究目的。

(1) 通过对我国碳排放现状及近年来碳流通变化情况进行分析，找出我国社会经济系统中的碳排放特点。

(2) 通过对我国未来的二氧化碳总量减排目标进行优化分析，找出我国在碳排放增量最小化的目标下未来可行的发展方式，为我国未来的二氧化碳减排政策提供理论依据。

(3) 通过对碳排放峰值目标的分析，给出我国能否实现该目标的个人观点。

(4) 通过对重点行业的低碳发展技术进行分析，从定性的角度得出我国