

中国低碳发展战略、 路径与对策

主编 何建坤

副主编 周 剑 何继江



科学出版社

清华大学低碳经济研究院

中国低碳发展战略、路径与对策

主 编 何建坤

副主编 周 剑 何继江

本书得到国家自然科学基金重大项目的“国际气候治理与合作机制研究”课题（批准号：71690243）、教育部人文社会科学重点研究基地重大项目“城市低碳发展的峰值目标与碳定价机制研究”（项目批准号：15JJD630006）资助

科学出版社

内 容 简 介

本书由清华大学低碳经济研究院组织,汇集了校内相关研究单位的研究成果,编写而成。全书由低碳战略、低碳路径、碳定价机制探索、低碳城市与规划、低碳建筑和低碳交通共六篇组成,以多学科的视角,分析了全球应对气候变化背景下中国低碳发展的战略、目标途径和政策措施,以及在能源革命、产业转型和低碳建筑与低碳交通等领域的对策和行动。本书有助于读者了解中国低碳发展领域的学术研究进展。书中所阐述的观点及内容,能够为政府制定相关政策提供可参考的研究依据,能够启发读者及相关组织关注、讨论并行动,为推动我国实现低碳转型做出贡献。

本书的读者包括:国内政府各级决策者,从事应对气候变化和低碳发展领域研究工作的各界专家、学者,从事低碳发展领域实践工作的产业界人士,高校相关专业师生,关心全球气候变化和我国低碳发展问题的社会公众,等等。

图书在版编目(CIP)数据

中国低碳发展战略、路径与对策 / 何建坤主编. —北京: 科学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-03-055863-3

I. ①中… II. ①何… III. ①中国经济—低碳经济—经济发展
IV. ①F124.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 304531 号

责任编辑: 马 跃 李 嘉 / 责任校对: 王晓茜 贾娜娜

责任印制: 吴兆东 / 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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 31

字数: 624 000

定价: 252.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书作者名单

第一篇 低碳战略

- 第1章 中国低碳发展的形势与战略 何建坤
- 第2章 中国可持续能源系统 倪维斗、周滢垠

第二篇 低碳路径

- 第3章 中国重点部门中长期 CO₂ 减排潜力与技术路径 温宗国
- 第4章 低碳视角下的中国电力行业分区优化模型应用 蔡闻佳、惠婧璇、毛紫薇、叶敏华、王灿
- 第5章 RCP 排放情景实现路径及国别影响研究 齐天宇
- 第6章 中国分区综合评估模型开发与绿色低碳发展转型路径研究 张旭

第三篇 碳定价机制探索

- 第7章 中国碳排放权交易体系的建设 段茂盛、庞韬
- 第8章 中国分区能源经济模型系列研究 张达
- 第9章 海南省低碳发展下的核电发展研究 周剑、王宇、何晓宜

第四篇 低碳城市与规划

- 第10章 能源互联网与城市能源转型 曾嵘、何继江、陈启鑫
- 第11章 北京城市温室气体排放清单与减排政策情景分析 姜洋、何永、陈素平、何东全、毛其智
- 第12章 低碳浪潮下的城市规划——应对策略与现实选择 谭纵波
- 第13章 横琴新区低碳发展部门规划研究 蔡琴、齐晔、孟延春、张焕波
- 第14章 基于整体观的城镇低碳发展思考 栗德祥、王富平

第五篇 低碳建筑

第 15 章 中国建筑节能的技术路线图 江亿

第 16 章 澳门建筑能耗特点分析及节能建议 孟翔宇

第 17 章 村镇住宅建筑可持续用能体系 杨旭东、单明

第六篇 低碳交通

第 18 章 中国车用能源系统可持续转型 欧训民、彭天铎、王海林、张希良

第 19 章 绿色低碳交通发展战略——主要影响因素与实现途径 陆化普

第 20 章 中国新能源汽车研发进展与展望 欧阳明高、王贺武

第 21 章 低碳交通发展规律探索 王海林、何建坤、张希良

前 言

气候变化危及地球生态安全和人类社会的生存与发展，是当前人类面临的重大威胁，合作应对气候变化已成为世界各国的普遍共识和强烈的政治意愿。2016 年 11 月 4 日生效的《巴黎协定》确立了 2020 年后新的全球气候治理机制，形成以全球控制温升不超过 2℃（并努力控制在 1.5℃ 以下）目标为指引，以各国自主确定减排贡献目标和行动计划为基础，并以定期全球集体盘点为激励的制度框架，将极大地促进全球应对气候变化国际合作行动，世界范围内将加速经济发展方式的低碳转型。

当前世界各国自主减排贡献目标与实现全球控制温升不超过 2℃ 目标的减排路径之间尚有较大缺口，到 2030 年这一缺口将达到约 150 亿吨二氧化碳当量。因此各国都必须进一步加大减排力度。世界各国经济社会持续发展都将面临越来越紧迫的碳排放空间的制约，各国都必须加快经济发展方式的低碳转型，走上气候适宜型的低碳经济发展路径。我国也将面临加快经济发展方式转变的紧迫形势。

能源消费的 CO₂ 排放约占全部温室气体排放的 2/3，因此全球低碳化发展的核心即在于推动能源体系的革命性变革，要大力节能，提高能源效率，控制能源消费量；同时加强以新能源和可再生能源取代化石能源，在保障能源供给的同时减少 CO₂ 排放。《巴黎协定》提出到 21 世纪下半叶实现温室气体近零排放，即意味着到 21 世纪中叶之后，要逐渐建成以新能源和可再生能源为主体的低碳甚至零碳能源体系，也意味着化石能源时代的终结。

我国积极推进能源生产和消费革命，努力构建高效、安全、清洁、低碳的能源供应体系和消费体系，以能源变革促进经济发展方式的低碳转型，为 21 世纪下半叶建成近零排放的可持续能源体系奠定基础，以适应全球应对气候变化的紧迫进程，并发挥积极的引领作用。世界范围内能源转型将使先进能源技术的创新和产业化发展成为战略性新兴产业，成为新的经济增长点和新的就业机会，也是大国间技术竞争和相互合作的重点领域，成为国家核心竞争力的体现。我国当前积极推动能源生产和消费革命，促进经济发展方式向绿色低碳转型，也是顺应世界能源变革趋势，提升我国全球竞争力的战略选择。

我国作为最大的发展中国家和排放大国，在《巴黎协定》的达成和生效过程中发挥了积极的引领作用，体现了大国的责任担当。在国内也积极实施应对气候变化的国家战略，把减缓 CO₂ 排放作为约束性目标纳入国家经济与社会发展规划，

采取强有力的措施和行动,并取得了举世瞩目的成效。我国在2009年哥本哈根世界气候大会上提出到2020年单位国内生产总值(gross domestic product, GDP)的CO₂排放强度比2005年下降40%~45%的目标,到2015年已下降了38.3%，“十三五”再实现下降18%的目标后,到2020年可比2005年下降约50%,超额完成下降40%~45%的预定目标。我国在《巴黎协定》后又提出有雄心、有力度的国家自主贡献目标。到2030年单位GDP的CO₂排放强度比2005年下降60%~65%，非化石能源比重达20%左右，CO₂排放到2030年左右达峰，并努力早日达峰，这都要比实现2020年承诺的目标付出更大的努力。当前在转换发展动力、改变发展方式、产业转型升级的经济新常态下，我国将以有雄心的CO₂减排目标为导向，发挥CO₂减排与国家节约资源、保护环境和可持续发展目标的协同效应，促进国内能源变革和经济低碳转型。需要统筹协调、超前部署，实现经济发展、环境改善、节能降碳的多方共赢。

实现经济发展方式的低碳转型，既是一个长期努力的过程，又十分紧迫，既要有前瞻性的战略部署，又要有分阶段的目标和任务，既要开展切实的行动，又要不断研究和总结经验。制定并实施低碳发展战略，涉及经济、社会、能源、环境、技术创新等多个领域和产业、交通、建筑、居民等多个部门。既需要跨学科的综合研究和相互交流，也需要研究思路和方法学的不断创新，需要以生态文明的理念为指引，研究和探索中国特色的绿色低碳发展模式与路径，实现经济发展、环境保护与应对气候变化的共赢，并为保护地球生态安全和全人类可持续发展做出贡献。

本书由清华大学低碳经济研究院组织，汇集校内相关研究单位的研究成果，编写而成。内容涵盖应对气候变化战略、能源革命、中长期低碳发展路径、低碳政策与制度，以及产业转型、低碳交通、低碳建筑等多个领域，也对相关研究的模型体系和方法学进行介绍，以期与社会各界进行交流与共享。

本书得到国家自然科学基金重大项目的“国际气候治理与合作机制研究”课题（批准号：71690243）、教育部人文社会科学重点研究基地重大项目“城市低碳发展的峰值目标与碳定价机制研究”（项目批准号：15JJD630006）资助。本书感谢王富平、王宇飞、孟翔宇、单明、赵燕来、李志来在组稿期间的投入，也感谢王海林博士在校稿期间的辛苦工作。

何建坤

2016年12月于清华大学

目 录

第一篇 低 碳 战 略

第 1 章 中国低碳发展的形势与战略	3
1.1 全球应对气候变化和低碳发展的背景及趋势	3
1.2 中国低碳发展的形势与任务	6
1.3 中国应对气候变化低碳发展的目标和战略思路	10
1.4 中国推动能源革命、促进低碳发展的政策与措施	15
1.5 加快新常态下经济转型升级, 顺应并引领《巴黎协定》后全球气候治理的新进程	20
参考文献	22
第 2 章 中国可持续能源系统	23
2.1 中国能源系统的发展与挑战	23
2.2 提高能效, 降低能源“消耗”和能源“损耗”	28
2.3 总量控制, 设置环境容量和能源消费的“天花板”	31
2.4 能源协同, 建设可持续发展能源系统	34
2.5 建立可持续能源系统——多能协同的 IDDD+N 原则	51
2.6 本章小结	54

第二篇 低 碳 路 径

第 3 章 中国重点部门中长期 CO ₂ 减排潜力与技术路径	59
3.1 概述	59
3.2 中国 CO ₂ 排放现状分析	60
3.3 行业温室气体减排潜力核算方法	68
3.4 结果与讨论	72
3.5 本章小结	78
参考文献	79
第 4 章 低碳视角下的中国电力行业分区优化模型应用	80
4.1 中国电力行业现状及区域特性	80

4.2	电力行业分区优化模型的意义	83
4.3	电力行业分区优化模型的国内外发展现状综述	83
4.4	电力行业优化模型——中国多区域能源供给系统及其环境影响评估 (MESEIC) 模型介绍	85
4.5	案例总结	87
	参考文献	101
第5章	RCP 排放情景实现路径及国别影响研究	103
5.1	全球 RCP 排放情景与分配	103
5.2	模型介绍	107
5.3	RCP 情景排放约束下全球减排路径研究	108
5.4	本章小结	117
	参考文献	117
第6章	中国分区综合评估模型开发与绿色低碳发展转型路径研究	120
6.1	概述	120
6.2	中国分区综合评估模型开发	123
6.3	中国空气污染负担量化评估	131
6.4	中国气候政策协同效益研究	138
	参考文献	143

第三篇 碳定价机制探索

第7章	中国碳排放权交易体系的建设	149
7.1	碳排放权交易的基本原理	149
7.2	碳排放权交易体系的基本要素	150
7.3	国外碳排放权交易体系建设	155
7.4	中国碳排放权交易体系建设的内容	159
7.5	关于全国碳排放权交易体系建设的思考和建议	165
	参考文献	166
第8章	中国分区能源经济模型系列研究	168
8.1	模型数据	168
8.2	建模与求解原理	168
8.3	模型分析政策案例	176
	参考文献	185
第9章	海南省低碳发展下的核电发展研究	186
9.1	海南省能源消费与碳排放特点及面临的挑战	186

9.2 碳排放约束管控目标下海南省中长期能源与碳排放测算	195
9.3 引入单一碳价政策对海南省的影响分析	203
9.4 大力发展核电是碳价管控政策下海南低碳发展的无悔政策选择	212
9.5 低碳海南发展中核电定价的建议	219
参考文献	231

第四篇 低碳城市与规划

第 10 章 能源互联网与城市能源转型	235
10.1 城市能源转型的目标和难点	235
10.2 能源互联网在能源系统转型中的重要作用	237
10.3 能源互联网助推城市能源转型	240
10.4 城市能源互联网建设路径图	245
参考文献	251
第 11 章 北京城市温室气体排放清单与减排政策情景分析	252
11.1 文献综述	253
11.2 北京市城市温室气体排放清单分析	254
11.3 北京市温室气体减排政策情景分析	262
11.4 本章小结	267
参考文献	268
第 12 章 低碳浪潮下的城市规划——应对策略与现实选择	270
12.1 低碳目标对城市规划的影响	271
12.2 实现低碳目标城市规划的现实选择	273
12.3 本章小结：实现低碳目标城市规划的路径选择	280
参考文献	280
第 13 章 横琴新区低碳发展部门规划研究	282
13.1 规划的背景与目标	282
13.2 低碳能源体系规划	284
13.3 低碳产业体系规划	286
13.4 低碳建筑体系规划	287
13.5 低碳交通体系规划	290
13.6 废弃物管理体系规划	293
13.7 生态碳汇体系规划	295
参考文献	298

第 14 章 基于整体观的城镇低碳发展思考	299
14.1 城镇低碳发展的新理念、新视野	299
14.2 城镇低碳发展的目标内涵	304
14.3 低碳城镇规划关键词	306
14.4 本章小结	313
参考文献	314

第五篇 低 碳 建 筑

第 15 章 中国建筑节能的技术路线图	317
15.1 未来中国建筑用能总量的上界	318
15.2 怎样实现中国建筑用能总量控制的目标	322
15.3 本章小结	332
参考文献	333
第 16 章 澳门建筑能耗特点分析及节能建议	335
16.1 澳门居民建筑能耗分析	335
16.2 澳门酒店的发展与现状	340
16.3 澳门酒店能耗特征与分析	345
16.4 澳门酒店能耗现存问题与分析	353
16.5 澳门酒店节能减排建议	365
参考文献	367
第 17 章 村镇住宅建筑可持续用能体系	368
17.1 村镇住宅建筑用能现状及问题	368
17.2 村镇住宅建筑用能可持续发展理念及实现模式	374
17.3 总结和展望	381

第六篇 低 碳 交 通

第 18 章 中国车用能源系统可持续转型	387
18.1 车用能源研究背景	387
18.2 影响车用能源发展的因素	390
18.3 可持续的车用能源系统	391
18.4 中国车用能源情景分析	392
18.5 中国车用能源可持续转型之路	392
参考文献	394

第 19 章 绿色低碳交通发展战略——主要影响因素与实现途径	395
19.1 绿色低碳交通的定义	395
19.2 绿色低碳交通的主要影响因素分析	396
19.3 绿色低碳交通的实现途径	397
19.4 生态城市单元与城市绿色低碳交通系统构建	409
19.5 中国城市绿色低碳交通发展的策略选择	417
19.6 主要结论与展望	427
参考文献	428
第 20 章 中国新能源汽车研发进展与展望	429
20.1 新能源汽车研发历程	429
20.2 新能源汽车技术进展	433
20.3 新能源汽车示范考核与推广应用	436
20.4 “十三五”新能源汽车研发展望	439
20.5 新能源汽车的节能减排潜力	443
20.6 本章小结	445
参考文献	445
第 21 章 低碳交通发展规律探索	447
21.1 全球及我国低碳交通发展进程	447
21.2 发达国家和地区交通发展模式研究	454
21.3 中国交通部门低碳转型	478
参考文献	484

第一篇 低 碳 战 略

第1章 中国低碳发展的形势与战略^①

气候变化是当前人类面临的重大威胁，将危及地球生态安全和人类生存与发展。自1992年联合国环境与发展大会通过《联合国气候变化框架公约》（United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC）以来，世界开始了合作应对气候变化的进程。应对气候变化的核心是减少人为活动的温室气体排放，稳定大气中温室气体浓度，控制地表温升幅度，以保护地球生态安全和人类社会的可持续发展。这是人类社会进程中对自然风险的控制和管理，是寻求经济社会与自然生态环境和谐发展的方式与途径。实现这一目标的核心对策是推动能源生产和消费的革命性变革，发展并建立以可再生能源为主体的高效、低碳新型能源体系，促进经济社会发展方式向绿色低碳转型，最终实现CO₂近零排放，使人类社会完全不再依赖地球上有限的矿物质资源，也不再向地球环境空间排放废物，实现经济社会发展目标与保护地球生态环境目标的协调统一。

1.1 全球应对气候变化和低碳发展的背景及趋势

1.1.1 全球应对气候变化进程日趋紧迫，发展低碳经济已成为世界潮流

自20世纪80年代以来，全球气候变化日益引起世界范围的广泛关注，并开启了应对气候变化的国际合作进程。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）2014年发布了第五次评估报告（AR5）^[1]，进一步肯定了近百年来全球气候不断变暖的事实。自20世纪以来，全球地表平均温度已上升0.8℃，而且越来越多的科学事实和研究表明，近百年来全球气候变暖主要是人为活动引起的。

自工业革命以来，人为活动（化石燃料燃烧、工业生产过程、土地利用变化等）引起温室气体（CO₂、CH₄、N₂O、HFCs、PFCs、SF₆等）排放，使大气中温室气体浓度上升，温室效应增强，导致全球气候变暖。大气中CO₂浓度已由工业革命前的280ppm^②上升到400ppm，并呈持续上升趋势。

① 本章作者：何建坤教授，清华大学低碳经济研究院学术委员会主任。

② 1ppm=10⁻⁶。

全球气候变暖对自然生态和人类社会产生了越来越广泛的影响,而且其负面影响更为显著。气候变化引起海平面上升、海洋酸化、风暴潮增加、河流径流量减少、农作物产量下降、自然生态退化、生物多样性受损、极端气象灾害事件增加等。近百年来,海平面已平均上升了 17cm。气候变暖将使降雨量不均、强暴风、洪涝、干旱、强台风等极端灾害事件增多、增强,影响粮食生产、人体健康和社会公众的生命财产安全。如果全球气候变暖趋势得不到及时有效的抑制,将给地球生态和人类社会带来不可逆转的灾难性的风险^[1]。

在全球减缓碳排放形势的推动下,发展低碳经济已成为世界统筹经济发展与保护全球气候的根本性战略选择。应对气候变化的核心是减缓人为活动的温室气体排放,其中主要是化石能源消费的 CO₂ 排放。经济发展不断增长的能源需求和减排 CO₂ 形成尖锐矛盾,发展低碳经济成为在可持续发展框架下应对气候变化的必由之路。低碳经济是以低自然资源消耗、低排放、低污染,达到较高的碳生产率,实现较高的经济社会发展水平和较好的生活质量的一种经济发展模式。其核心内容是:发展低碳能源技术,提高能源效率,改善能源结构,转变经济增长方式,建立低碳经济发展模式和低碳社会消费模式,长远使经济社会发展与温室气体排放完全脱钩,在经济社会持续发展的同时,温室气体排放持续下降。

2009 年哥本哈根世界气候大会就全球控制温升不超过 2℃ 目标达成共识,2015 年通过的《巴黎协定》又进一步明确了控制全球温升不超过 2℃,并争取控制在 1.5℃ 以下的目标。保护全球气候将极大地压缩全球未来的碳排放空间,世界各国都将面临排放空间不足的挑战。最近发布的 IPCC 第五次评估报告在进一步强化人为活动温室气体排放是造成当前气候变化主要原因的科学结论的基础上,强调了实现全球地表温升不超过 2℃ 目标下的减排路径。全球碳排放到 2020 年左右要达到峰值,到 2030 年与 2010 年持平到减排 40%,到 2030 年减排 40%~70%,而到 21 世纪下半叶要实现近零排放。而按当前各国的减排承诺和发展趋势,到 2020 年尚有 50 亿~100 亿吨二氧化碳当量的减排缺口,到 2030 年全球排放还会比 2010 年增长约 30%。按此趋势到 21 世纪末的温升将达 3.7~4.8℃^[1],会对自然生态和人类社会带来不可逆转的灾难性后果。因此,世界各国都必须加大减排力度,经济社会持续发展也都将面临排放空间制约的严峻挑战。德班平台谈判于 2015 年底最终就 2020 年后适用所有国家的新减排制度框架达成协议,全球应对气候变化的形势日益紧迫,将进一步推进全球能源体系的革命性变革。

化石能源消费既是最主要的温室气体排放来源,又是与经济社会发展紧密相关的减排领域。在保障经济社会持续发展的同时,实现减排 CO₂ 目标,就必须实现能源体系的根本性变革。其一是大力节能,提高能源利用技术效率和经济产出效益,在保障经济增长的同时减缓能源需求的增长;其二是大力发展水电、风电、太阳能、生物质能、核能等新能源和可再生能源,改善能源结构,减少煤炭、石

油等化石能源的比例,在保障能源供给的同时,减少 CO₂ 排放。上述两个方面即成为当前能源转型的目标和主要方向。最终将形成以新能源和可再生能源为主体的可持续低碳能源体系,以取代当前以化石能源为支柱的传统高碳能源体系,从而摆脱化石能源时代,实现 CO₂ 的近零排放。

1.1.2 新型能源体系革命是应对气候变化的根本途径,也是世界大国的战略趋向

在全球应对气候变化低碳发展的潮流下,世界主要国家都出现了能源变革的新趋势。其首要选择是节能和提高能效,把节能放在比开发更为优先的地位。这是因为能源的节约比开发不仅具有更显著的节约资源、改善环境的效果,也具有明显的成本优势 and 经济效益,而且节能潜力巨大,对未来满足新增能源服务需求可比增加能源开发有更大的作用,因此视节能为“第一大能源”。发达国家大都制定了先进能效标准的节能目标。例如,欧盟提出到 2020 年能效比 1990 年提高 20% 的目标,德国进一步提出一次能源总消费到 2030 年和 2050 年分别比 2010 年减少 30% 和 50% 的目标,而经济社会仍将持续发展。美国也提出轻型乘用车燃油经济性到 2020 年左右将比目前提高 80%、减排 CO₂ 达 40% 以上的技术标准,同期商业和工业建筑能效也将提高 20%。当前发达国家经济增长缓慢,可依靠提高能效支撑其经济的持续增长,而能源总需求基本稳定,加上能源结构的调整,其 CO₂ 排放已呈现持续下降的态势。2005~2013 年,气候公约附件 II 指出发达国家 GDP 增长了 7.4%,一次能源消费却下降了 6.9%,相应 CO₂ 排放下降了 9.2%^[2]。今后随着发达国家经济复苏,GDP 增速可能有所提高,但能源消费总体稳定、CO₂ 排放总体下降的趋势仍会持续。

能源结构低碳化是在保障能源供应前提下减少 CO₂ 排放的根本对策。全球风能、太阳能、生物质能和地热能等非水可再生能源供应量 2013 年比 2005 年增长 2.28 倍,年均增速 16%,远高于全球能源总消费量 2.2% 的增速。2013 年与 2005 年相比,经济合作与发展组织 (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) 发达国家能源总消费量减少 2.6%,煤炭和石油消费量分别减少 9.6% 和 9.0%,而天然气和可再生能源则分别增长 11.6% 和 180%^[3]。欧盟提出 2020 年可再生能源比例达 20% 的目标,德国进一步提出 2030 年达 30%,2050 年达 60%,其中发电比例达 80% 的目标。全球已出现以新能源和可再生能源为主体的新型低碳能源体系逐渐取代以化石能源为支柱的传统高碳能源体系的变革潮流,可再生能源技术和产业将面临快速发展的新局面。在化石能源中,天然气是比煤炭、石油更为清洁、高效的低碳能源,其产生单位热量的 CO₂ 排放比煤炭低 40% 以上,用天然气替代煤炭也是促进能源结构低碳化的重要选项。特别是随着美国页岩气开发技术的突破,2012 年与 2007 年相比,天然气产量增长 25%,在一次能源消费