

碳中和的 关键问题与颠覆性技术

胡志宇 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

工业革命以来,人类活动使得全球气候变暖,这已经成为了人类不得不直接面对的事实,人们一直在积极寻找一种能够减缓或降低全球气温升高的能源技术。事实上,从工业革命到现在的300年间,人类消耗的化石能源已远超地球本身的负碳能力,产生了显著的温室效应,因此实现碳中和是当前最紧迫的使命。我国作为以煤炭为主、化石能源占很大比重的发展中大国,要在10年内实现碳排放达峰、40年内实现碳中和,任务十分艰巨,急需能够解决此问题的新一代先进能源技术。

2021年7月教育部为深入贯彻党中央、国务院关于碳达峰、碳中和的重大战略部署,印发了《高等学校碳中和科技创新行动计划》,要求各高等学校开展碳中和相关的学科建设,发挥高校基础研究主力军和重大科技创新策源地作用,为实现碳达峰、碳中和目标提供科技支撑和人才保障。

本书从与实现碳达峰、碳中和目标相关的关键碳税及碳交易的政策、法律问题入手,系统性地介绍了一批有可能对实现碳达峰与碳中和目标产生重大影响的颠覆性技术。本书内容新颖、覆盖面广、结构清晰,阐述深入浅出,可供大专院校碳中和和新能源及其相关专业师生使用,同时也可作为碳达峰与碳中和的专业科普书籍供广大读者参阅。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

碳中和的关键问题与颠覆性技术/胡志宇主编. —北京:清华大学出版社,2023.3
ISBN 978-7-302-62109-6

I. ①碳… II. ①胡… III. ①二氧化碳—节能减排—研究—中国 IV. ①X511

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第200227号

责任编辑:宋成斌

封面设计:赵美东

责任校对:王淑云

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23

字 数:557千字

版 次:2023年3月第1版

印 次:2023年3月第1次印刷

定 价:140.00元

产品编号:094882-01

编委会成员

主 编：胡志宇

编委会成员：（按姓氏拼音排列）

布天昭	陈 力	陈志炜	曹道帆	何彦君	胡志宇
孔 彪	刘 科	刘泽昆	李 涛	李 键	李俊国
李培俊	木二珍	裴艳中	上官之春	唐 军	谭 扬
王中林	吴振华	吴 放	吴昌宁	魏 嫣	谢 磊
徐鸿彬	夏建军	肖无云	杨建华	叶 松	杨晓霖
张 弛	张武寿	张召阳	张 帅	张馨月	张婧怡

校订：（按姓氏拼音排列）

陈熹梦 黄 菲 李培俊 裴彦婷 盛 虹 魏 嫣 张婧怡

清华大学出版社

工业革命以来的人类活动使得全球气候变暖,这已经成为了人类不得不面对的事实,人们一直在积极寻找一种能够减缓或降低全球气温升高的技术。应对气候变化,就要推动以二氧化碳为主的温室气体减排。党中央提出实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局。我国已经向全世界庄严承诺:力争二氧化碳排放 2030 年前达到峰值,2060 年前实现碳中和。而我国作为一个以煤炭为主、化石能源占很大比重的发展中大国,要在 10 年内实现碳排放达峰,40 年内实现碳中和,任务十分艰巨,急需能够解决此问题的新一代先进能源技术。

为深入贯彻党中央、国务院关于碳达峰、碳中和的重大战略部署,发挥高校基础研究主力军和重大科技创新策源地作用,为实现碳达峰、碳中和目标提供科技支撑和人才保障,2021 年 7 月教育部印发了《高等学校碳中和科技创新行动计划》。其中明确要求在全国高校系统布局建设一批碳中和领域科技创新平台,汇聚一批高水平创新团队,不断调整优化碳中和相关专业、学科建设,推动人才培养质量持续提升,推动碳中和相关交叉学科与专业建设,实现碳中和领域基础理论研究和关键共性技术新突破。加快与哲学、经济学、管理学、社会学等学科融通发展,培养碳核算、碳交易、国际气候变化谈判等专业人才。建设一批国家级碳中和相关一流本科专业,加强能源碳中和、资源碳中和、信息碳中和等相关教材建设,鼓励高校开设碳中和通识课程,将碳中和理念与实践融入人才培养体系。

本书涵盖了碳达峰与碳中和的挑战、碳排放权交易的制度制定与法律问题、碳中和实现路径等相关内容。在颠覆性技术方面由多个国际著

名学者团队介绍了摩擦纳米发电机、热电材料、微纳加工技术、发电芯片、辐射制冷、水热电联产、磁约束核聚变、凝聚态核科学、功能介孔碳基薄膜、气体水合物等最新国际前沿技术。此外,还介绍了核电核能供热示范工程的实施情况。本书内容覆盖面广、结构清晰、阐述深入浅出,所介绍的技术都是国际前沿研究热点,可作为各高校开设碳中和通识课程和新能源相关专业课程的教材或参考书,对于广大读者也是一部内容丰富的专业科普书籍。

倪维斗

中国工程院院士,清华大学教授

2021年9月

全球共同应对日益严重的气候变化

随着化石能源危机和温室效应日益显著,碳达峰、碳中和已成为当前全球经济发展主题,能源利用的结构已从传统单一能源向多元化的新型洁净能源(风能、太阳能、氢能、核能等)演化。工业革命以来人类活动使得全球气候变暖,这已经成为了人类不得不面对的事实,人们一直在积极寻找能够有效减缓或降低全球气温升高的能源技术。事实上,从工业革命到现在 300 多年间,人类消耗化石能源已远超地球本身的负碳能力(如植物固碳),从而产生了显著的温室效应。到 2020 年,美国航空航天局测量地球表面温度已经比工业化前升高了 1.2°C 左右,距 2015 年联合国制定的《巴黎协议》所规定的 2030 年目标 1.5°C 已经非常接近了,形势日益严峻。联合国秘书长安东尼奥·古特雷斯呼吁:实现碳中和是世界上最紧迫的使命。

在“2060 年实现碳中和”愿景牵引下,我国能源结构转型按下“加速键”。2020 年 9 月,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上表示,我国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。2020 年 12 月 20 日召开的中央经济工作会议,明确将“做好碳达峰、碳中和工作”确定为 2021 年八大重点任务之一。2020 年 12 月 21 日,国务院新闻办公室发布《新时代的我国能源发展》白皮书,更清晰描绘了我国 2060 年前实现碳中和的“路线图”。

2021 年 3 月 15 日习近平主席在主持召开中央财经委员会第九次会

议时强调：推动平台经济规范健康持续发展，把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局。2021年4月中央政治局会议上，习近平总书记在主持学习时指出：实现碳达峰、碳中和是我国向世界作出的庄严承诺，也是一场广泛而深刻的经济社会变革……各级党委和政府要拿出抓铁有痕、踏石留印的劲头，明确时间表、路线图、施工图，推动经济社会发展建立在资源高效利用和绿色低碳发展的基础之上。

万物生长靠太阳，由于有太阳持续的照射，地球会一直保持一定的温度，更重要的是，因为有太阳持续巨大的光能与热能输入到地球，我们就有可靠、充沛、持续的能源资源。工业革命以来的人类活动使得全球气候变暖，人类消耗了无数的石化能源产生了巨大的温室效应，这已经成为了人类不得不直接面对的事实，为此人们一直在积极寻找能够减缓或降低全球气温升高的技术。

碳中和意味着经济社会活动引起的碳排放和商业碳汇等活动抵消的二氧化碳，以及从空气中吸收的二氧化碳总量相等。由于实际生产生活中不可能不排放二氧化碳，碳中和的概念其实是通过拥有等量碳汇或国外碳信用冲抵自身碳排放，来实现净碳排放接近于零。

针对碳达峰与碳中和的目标，世界各国已经在采取措施与行动：

日本政府宣布将于2050年实现碳中和。一是2035年后禁燃油车，二是2030年后每年使用约1000万吨氢气发电，并加大财政支援，朝实现碳中和目标迈进。日本政府将投入2万亿日元的财政预算用来促进生态友好型的商业模式和创新发展，以尽快落实2050年的碳中和目标，并且强调“日本希望成为环境友好型投资领域的引领者”。2020年10月，时任日本首相菅义伟宣布，到2050年，日本的目标是将温室气体排放量减少到净零。菅义伟表示，政府将专注于实现“绿色社会”，他表示“积极的气候变化措施会带来产业结构以及我们的经济和社会的转型，从而带来强劲的经济增长”。

2020年10月28日时任韩国总统文在寅在国会发表演说时提出，“作为积极应对气候变化的努力之一，我们将力争在2050年之前实现碳中和。”报道称，文在寅还表示将“力争”达到这一目标，但并非承诺。

欧盟就为实现碳中和目标采取了积极的行动，早在2014年欧盟就设定了实现碳中和的中期目标，即到2030年欧盟整体温室气体排放量比1990年减少40%。欧盟计划到2050年实现碳中和，即温室气体净排放量到2050年降为零。在2020年12月11日，欧盟27国领导人在比利时布鲁塞尔的欧盟总部，通过了欧盟委员会关于提高实现碳中和中期目标的提议。欧洲理事会主席米歇尔表示：“在抗击气候变化的斗争中，欧盟居领先地位。我们决定，到2030年，欧盟温室气体排放将减少至少55%。”

其他积极参与碳中和行动的国家还包括瑞典、瑞士、英国、芬兰、法国、德国、冰岛、爱尔兰

兰、奥地利、不丹、丹麦、新加坡、斯洛伐克、斐济、匈牙利、西班牙、马绍尔群岛、新西兰、挪威、加拿大、智利、哥斯达黎加、葡萄牙、南非、乌拉圭等国,这些国家都已经公布了碳中和时间表。

2021年8月9日,联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)召开记者会,介绍IPCC第六次气候变化评估报告第一工作组报告《2021年气候变化:自然科学基础》。该委员会历时3年多,邀请来自全球66个国家的234位作者,通过对14000多篇科研文献的综合评估而完成报告。编写过程经过两次政府与专家评审和一次针对决策者摘要(summary for policymakers, SPM)的政府评审,共收到近8万条政府/专家评审意见。发现“人类活动已经导致全球气温急剧上升”,委员会大声疾呼,这样急剧的气候变化给人类“一个红色警告”,未来各种极端天气的发生率将会大幅上升,全球必须采取果断措施,大幅减少温室气体的排放量。

根据该报告数据,几十年来,地球正在经历几千年来前所未有的变暖,并且最近的气候变化是迅速的、广泛的,且还在不断加剧。该报告指出过去10年中全球气温比1850—1900年平均高出约 1.1°C ,自工业化以来每个过去的40年都是记录中最热的。自1970年以来,全球表面温度的上升速度超过了过去2000年来,甚至更长时间里的任何时候的变化速度。气候变化已经影响到地球上每个区域,造成许多极端天气和气候事件,人类活动正在使得包括干旱、洪灾、火灾、热浪、强降水在内的各种极端气候事件变得更频繁和更严重。气候变化已经在通过不同方式影响着全球各个区域,工业化以来人为气候影响正在导致复合型极端事件(即并发极端事件)增加,而这样的变化未来将随着气候增暖而增强。

2021年11月联合国COP26气候大会在苏格兰的格拉斯哥召开,通过了《格拉斯哥气候公约》(Glasgow Climate Pact),为期两周的紧张会谈集中讨论了如何让 1.5°C 温控目标仍可实现。大会达成了一系列有关停止和扭转森林损失、土地退化并逐步淘汰煤炭和控制甲烷排放的专项协议,还进一步就车辆电气化和逐步淘汰石油和天然气达成了一致。中国和美国在大会期间发布的强化气候行动联合宣言,受到了联合国秘书长与相关国家的欢迎。

我国碳排放的主要来源分析

目前从我国的能源消费结构和碳排放现状来看,在自然资源先天条件的约束下,我国的能源结构仍然以化石能源为主,我国目前是全球碳排放量最多的国家(见图0.1)。由于各个国家工业化进程阶段的不同,欧盟已经在1990年完成了碳达峰,美国也在2007年完成了碳达峰,全世界已经有49个国家的碳排放实现达峰,占全球碳排放总量的36%,能源消费

总量保持稳定且下降的态势。与其他国家相比,我国电热行业排放了 40% 以上的碳,这与其他国家(如美国)排放量类似。此外,在我国除了电热行业之外,一些高耗能制造业(如建材行业)也贡献了较多的碳,如每生产 1 t 水泥就要产生 0.86 t 二氧化碳(除了燃煤以外,水泥制造过程本身就有大量二氧化碳产生)。而在全球,第二大碳排放来源是包括公路、航空与水运等的交通运输业。

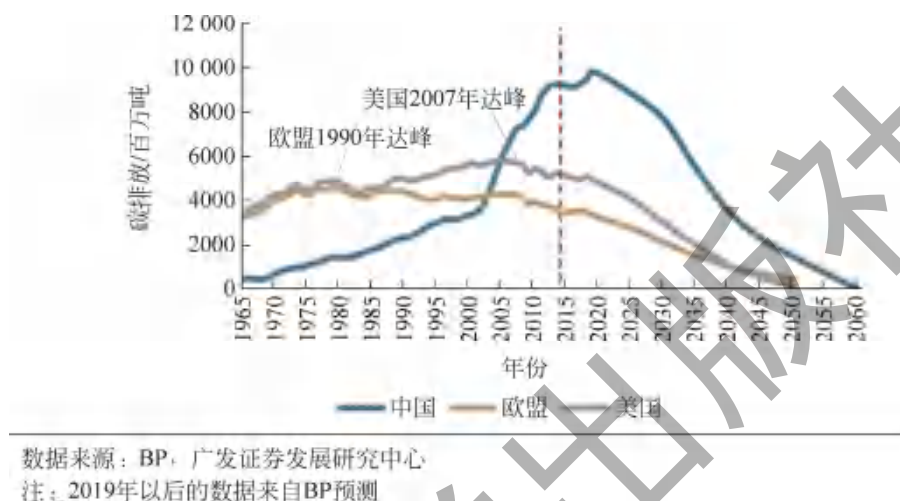


图 0.1 中国、美国与欧盟碳排放走势

根据全球碳项目(Global Carbon Project,GCP)公布的数据,伴随着我国经济的高速增长,2000 年后二氧化碳排放量也迅速攀升,我国二氧化碳排放量增速在 2003 年曾一度高达 17.7%,随后在 2006 年,我国超过美国成为了全球碳排放量最大的经济体。从图 0.1 可以看到,我国二氧化碳排放曲线自 2012 年起已趋于平缓,总的排放量增速明显下降,在 2015 年和 2016 年连续两年实现了碳排放总量的下降。受到总体经济发展与产业活跃度的影响,虽然 2017 年后我国二氧化碳排放量略有反弹,2017 年和 2018 年碳排放增速分别为 1.4% 和 2.3%,但这个增速已远低于 2012 年以前的水平。

根据我国生态环境部于 2019 年 11 月发布的《中国应对气候变化的政策与行动 2019 年度报告》,2018 年我国单位国内生产总值(GDP)二氧化碳排放比 2005 年累计下降了 45.8%,已提前完成了我国在 2009 年向国际社会承诺的到 2020 年碳强度比 2005 年下降 40%~45% 的目标。我国碳强度逐步下降,已提前完成 2020 年的阶段性目标。2019 年,我国煤炭消费占比 57.5%,石油消费占比 18.9%,天然气消费占比 8.1%,化石能源消费总量占比接近 85%。不断增长的能源需求以及化石能源为主的能源消费结构导致我国二氧化碳排放量较高,这给我们实现碳达峰与碳中和目标带来了很大的压力。目前我国由化石能源消费产生的碳排放量接近 10^{10} t,而从分品种化石能源碳排放来看,煤炭消耗导致的二氧

化碳排放量已经超过 7.5×10^9 t, 占化石能源碳排放总量超过 75%; 其次为石油和天然气消耗导致的二氧化碳排放, 其占比大致为 14% 和 7%。

按不同行业的碳排放来看, 作为一个已经高度工业化的国家, 我国的碳排放主要集中在发电、建材、钢铁等行业, 此外, 随着全国公路网的覆盖面进一步拓宽, 我国机动车年度销售量已经超过 2400 万辆, 成为世界上第一大机动车生产与销售国, 这导致与交通相关的碳排放也占有较大的份额, 而居民、商业、农业和公共服务等行业的碳排放相对较低。具体分析一下各个行业, 发电行业作为一个国家的经济命脉, 在国民生活中具有不可或缺的地位。目前我国的电能源结构仍然是以煤电为主, 截至 2019 年底, 燃煤发电装机容量占发电装机总容量的 51.8%, 2019 年燃煤发电量则占总发电量的 62.2%。根据 2020 年国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 的最新数据, 全球电力和热力生产行业贡献 42% 的二氧化碳排放, 工业、交通运输业分别贡献为 18.4% 和 24.6%, 而我国的情况是, 电力和热力生产行业贡献了 51.4%, 工业、交通运输业分别贡献了 27.9%、9.7%。也就是说在我国, 二氧化碳排放来自电热、工业的占比相比全球更高, 这给我们后续要实现碳达峰与碳中和带来了较大的压力。

从其他工业端来看, 能源加工行业、钢铁行业以及化学原料制造业等相关高耗能行业不仅是煤炭消费的主要用户, 也是二氧化碳排放的主要来源。在电力和热力生产行业之外, 其他工业行业贡献了将近 30% 的化石能源碳排放。最后, 从交通行业来看, 随着我国城镇化的持续推进, 交通行业的能源消费和碳排放也呈现出显著递增趋势。我国的交通行业以石油消费为主, 目前贡献了大概 10% 的化石能源碳排放, 而在其他国家 (如美国) 交通行业的化石能源碳排放要高很多 (超过 20%)。

实现碳中和目标的对策

我国在 2030 年实现碳达峰之后, 需要在接下来的 30 年内完成碳中和目标, 考虑到如此巨大的碳排放总量, 时间很有限、任务十分艰巨! 为此, 国家自然科学基金委组织专家进行了评估, 如果还是按部就班地靠现有的技术手段与工作模式, 是完全无法实现这个宏伟目标的。在如此紧迫的形势下, 要求我们国家的管理人员和科技人员对我国能源技术与管理运行系统进行一场革命性与颠覆性的改变。未来需要一批颠覆性技术来大幅加速推广可再生能源、储能、节能等相关低碳、零碳以及负碳行业, 用可再生能源替代化石能源, 使之成为碳中和目标实现的主导方向。但是, 由于不同减排技术与运行模式的成本收益差异较大, 针对不同行业的实施难易度也有较大的不同, 需要按照行业具体情况统筹规划、分类分步实施。

对于电力行业来说,由于我国煤电占比超过60%,在电力系统开展深度脱碳的技术改造是我国实现碳中和目标的关键着力点。随着信息化、现代化与城市化进程的推进,电气化与电力化发展非常快速,未来全国性的电力管理营运系统将进一步整合,增强系统性、协调性与整体性,形成以可再生能源与高效储能为主的电力供给体系。我们看到在过去的十年中,可再生能源(光伏与风电等)的发电成本已经显著下降,尤其是光伏发电成本在过去十多年间下降超过90%,在部分地区,光伏上网电价与煤电相差无几。目前,我国生产了全世界90%的光伏组件,这样规模与幅度的巨大变化在十年前是完全不可想象的。存在的问题是光伏与风电的年平均有效发电时间有限,并且可发电时间与发电量受气候影响很大,在大部分地区有效光伏发电时间不足1/5(每年有8760 h,而年平均光伏发电时间在1000~1600 h),并且发电时间受到光照、气候等的严格限制,如果出现长时间无光照(如梅雨季节或极寒大雪天气),光伏与风供电缺口还需要传统火电与核电等来保障。

而随着国家大力推进扩大清洁能源的发展,在规模经济的作用下,其光伏成本有望进一步下降20%~30%,使之成为具有强大竞争力的规模化电力供给方式。可再生能源中风电、光伏具有显著的间接性和波动性的特点,在大规模并网之后,会对电力系统和电网的稳定性产生冲击。进一步推进储能技术与再生能源发电的结合,可以大幅改善可再生能源发电时间与气候变化的波动性,储能系统可以通过多模式负荷管理进行电网调峰。可再生能源与储能系统的结合不仅可以有效提升可再生能源发电的可靠性和稳定性,同时可以有效降低电力系统的碳排放,推动碳中和目标的实现。但是,目前超大功率的电池储能技术还不是很完善,安全性还需提高,而其他储能技术(如抽水储能),效率比较低,并且受地域条件等应用场景的限制比较多。

从总体工业端来看,未来我国必须摆脱“高能耗、高污染”的产业结构模式。随着城镇化建设的逐步完成,我国对水泥、钢铁、装修等产品的需求可能出现较大幅度的下降,这样工业部门的化石能源的消耗和碳排放将会大幅下降。煤炭、石油等化石能源将主要作为工业原材料投入使用,排放的二氧化碳较少。而要实现工业端的完全零碳排放,需要结合先进的规模化废热回收发电技术,提高工业端的总能源使用效率、控制煤炭消费以及加快煤炭替代则是降低碳排放的重要手段。

对于交通部门来说,随着新能源汽车技术的发展以及交通基础设施的快速发展与完善,未来电动汽车将对传统燃油汽车实现有效替代,路面交通将实现完全电气化。过去5年,动力电池的容量按平均每年20%提升,同时价格平均每年下降20%。同时,电池组件与电控系统的安全性持续得到改善。未来随着钠离子电池等新型高效电池的规模化推广,电池的成本将大幅下降。按照欧盟的要求,2035年后将不得再销售纯油车,欧洲部分城市与地

区甚至宣布不允许任何以化石能源为动力的车辆进入城市道路。因此,电动汽车加上完善的交通基础设施将是路面交通部门实现脱碳的重要途径。同时存在的挑战是我国总体汽车的普及率与人均保有率(目前汽车保有量仅仅为发达国家的 1/4 左右)还在一个快速提升的阶段,而目前电力的主要来源是煤,即使未来都是电动汽车,如果改变不了以煤电为主的能源结构,就仍然不能到达减碳的目的。未来第一阶段的主要工作是提高能源使用效率,逐步替代发电和工业端的煤炭消费,控制煤炭消费总量,大力发展可再生能源,推进新能源汽车对传统燃油汽车的替代,引导消费者向低碳生活方式转型。第二阶段是需要系统性地改造路网系统,更好地保障电动汽车的普及,包括实现交通部门全面电力化、智能化与网络化。

据统计,2020 年,我国二氧化碳排放大约是 10^{10} t,其中,超过 95% 的碳排放来自煤炭、石油、天然气的使用,另外一部分是来自沼气、生物质等的排放。在碳达峰目标实现之后,我国需要在接下来的 30 年内将超过 10^{10} t 的碳排放实现净零排放,因此在开始的 15 年内,我国需要快速降低碳排放。要实现深度脱碳,实现碳中和目标,仅仅依靠现有技术手段是不够的,未来还需要加强新兴技术的研发和创新,本书介绍了一些正在研发中的颠覆性技术,未来这些技术的广泛应用,能够保障我国碳中和目标的实现。特别是需要鼓励全社会的积极参与,面对未来巨大的市场,相关的国营与民营企业应该尽早入局,利用雄厚的资金和成熟的技术与积累的市场优势,“借船出海”成为新一代清洁、低碳、安全、高效的能源体系下的重要参与者和获利者。

实现碳达峰与碳中和,事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。我们应该积极参与能源国际合作,成为全球碳减排进程的重要参与者。目前全球提出了碳中和目标的国家已经超过 120 个,我国作为目前全球最大的碳排放和煤炭消费国,我国对于碳中和目标的努力必然会加快全球气候变化治理进程。碳排放关系全人类未来的发展,加强国际合作不仅可以提升我国的国际影响力、话语权与领导力,同时可以通过合作、创新,在相关技术上互补不同国家之间在节能减排、低碳、零碳以及负碳等方面的不足,最终实现互惠互利、合作共赢,最后最大的赢家就是我们所有人都赖以生存的地球。

开展颠覆性创新面临的挑战与机遇

能源与环境保护是关系到我国国民经济发展和国家安全的重大问题。当今世界,能源安全是各国国家安全的重要组成部分,我国作为世界最大的能源消费国,如何有效保障国家能源安全、有力保障国民经济和社会发展,始终是我国能源发展的首要问题。世界正处于能源革命的浪潮中,本次能源革命的发展趋势主要呈现以下几个特点:①一次能源结构正处

于由高碳向低碳转变的进程；②新能源和可再生能源将成为未来世界能源结构低碳演变的重要方向；③电力将成为终端能源消费的主体；④能源技术创新将在能源革命中起决定性作用。科技发展是当今世界的主题，我国已进入了世界舞台，我国制造更需向世界展现实力和威力。近 100 年来我们一直在学习国外先进的科学技术，“山寨”目前在我国仍有很大市场。我国要成为世界强国，必须采取“超越”战略，占领科技制高点，引领经济发展，从“跟踪模仿和学习”转向“原始创新与超越”。

如果还是亦步亦趋地模仿他国科技，我国科技将一直落后。即使我们紧跟世界先进科技步伐，最多只能学到“N-1 代”的技术。“山寨”和模仿需要投入大量的人力、财力和物力，关键是大规模的投入之后技术还是处于落后状态。以我国引进彩色电视机生产线为例，20 世纪 80 年代，我国从世界各国引进了 200 多条显像管彩色电视机生产线，到 2002 年我国生产的显像管彩色电视机占据了 80% 以上的国际市场。索尼、飞利浦等厂家纷纷把显像管彩色电视机方面的设计、专利和生产线高价卖给我国厂家。可就仅仅过了 3 年，正当我国厂家为了争夺市场，竞相降价恶性竞争时，这些国际厂家把数字高清平板电视拿了出来，我国厂家又开始一代又一代地去购买生产线和专利技术，重复 30 年前的过程。

近 30 年来，我国经济的快速发展使得国家和企业能够在科研项目中投入大量资金，但资金买不来创新，真正的创新不依赖大量的资金。据相关统计，1976 年至 2020 年，美国共产生了 249 位诺贝尔物理、化学、生物学和经济学奖获得者，按照这 45 年间美国的科技投入累计计算，平均每花费 237.1 亿美元左右（合约 1527.2 亿人民币），就可产生 1 位诺贝尔奖获得者。如果单从成本产出考量，我国 2020 年全社会科技投入为 2.4 万亿元人民币，如按此产出比例我国应该产生 15.7 位诺贝尔奖获得者。

我国科技投入回报率低的根本原因是科技成果和科研人才评价体制中的片面性和局限性。研发体系内存在太多规避风险的意识，限制了创新。我国科学家需要更多的独立性和自由从事高风险研究的机会。未来我国需要进一步开展科技体制改革，大幅提升我国国际科技竞争力与科技贡献率。

例如：美国的巴特尔纪念研究所是为了纪念美国钢铁实业家戈登·巴特尔于 1923 年成立的，巴特尔纪念研究所是世界上最大的独立研究机构，单独管理或共同管理着隶属于美国能源部和国土安全部的 6 个实验室，同时还参与管理英国国家核实验室。该研究所一直是“科学技术转化成生产力”“专利转化为生产力”运动的实践者和领导者，致力于“让沉睡在学术刊物上的研究成果站立起来”，投入到实际应用中去，这与我国目前促进科技成果转化的政策不谋而合。

目前我国的科技项目侧重应用和产品的研发，基础研究所占比例只有 5%，与其他国家

15%~20%的基础研究相比投入比例过低,这也是我国科学家难以获得注重基础科学研究的诺贝尔科学奖的重要原因。许多科研人员不得不从事一些没有相关性的短期研究以维持实验室运转,无法专心治学治研。

微纳技术作为现代最前沿的科技,其最典型的应用就是我们被“卡脖子”的半导体芯片制造技术。芯片制造需要以广泛厚实的基础研究为依托,加上技术、技巧和技能长期积累。芯片制造是国产短板,美国用芯片来卡我们的脖子。但我国有像华为一样的企业,有国家与社会群体的支持,从长期来看,我国芯片将会站在世界的顶峰。

如果从我们的短板上分析,一方面,我国缺少在芯片半导体以及光刻机方面的人才,同时也没有足够规模化的高端人才培养体系,没有足够的人才就无法冲击高端领域;另一方面是制造光刻机的高端零件被国外垄断,想买都买不到,更别提制造了。由于美国掌握着世界顶级芯片技术的众多专利,我国想要绕开它们研究出替代芯片技术难度很大。台积电是世界最领先的芯片和半导体制造的厂商,张忠谋是该公司的创始人。目前全球能制造最先进的5 nm芯片厂商只有两家,台积电就是其中之一。张忠谋说,“就算举国之力也难造出顶级芯片”,就目前来看这也确实是事实。之前华为的大多数芯片都是向台积电订制的,在美国禁令下,台积电断供华为芯片实属无奈之举。我们之前花钱从国外买回的一些光刻机零件,有不少都是国人研究出来的。在美国一再科技打压下,我们只能砥砺前行,相信最终通过努力拼搏、突破瓶颈,开创新的技术路线。

华为创始人任正非表示,我国无法制造高端芯片,问题不在硬件层面,而是缺少高端人才。大学应该做能够“捅破天”的基础研究,把大量的钱砸在物理学家、数学家与化学家等科学家身上,而不是解决目前的“卡脖子”技术。今天的“卡脖子”技术,未来都会成为一般技术,如果没有颠覆性、创新性基础研究的支撑,等我们学会了今天的“卡脖子”技术,别人又发展出新的“卡脖子”技术了。现在,大学什么专业火,我国学生就选什么专业,大学就扩招什么专业。近几年大学里热门的是计算机专业,以前还有会计、法律专业等,理工科专业的学生越来越少。不少学生考上了研究生之后,也是跨专业去上能赚钱的专业。为什么华为的鸿蒙班设立在西北工业大学?原因在于国内某些名校的学生坐不了冷板凳,耐不住寂寞,学有小成后又跑到国外去。

芯片技术的开发不在一朝一夕,不能急于求成,但是我们相信我们最终会迎来爆发的一天。现在已经有许多的人和公司投入进去了,期待有一天能从芯片封锁中闯出一条路来。如今我国半导体行业的发展,变得沉稳了不少,多家大学的集成电路学院相继成立,人才培养开始持续进行。光刻机的各种零部件,中科院各个研究所,一些大学的研究机构在各个击破。

我们的短板从基础材料到芯片制造的精密设备,跟发达国家差了至少 30 年。20 世纪 70 年代我国半导体计算机行业居世界第三,落后美国、日本 3~5 年,领先韩国和我国台湾地区 2~4 年。说一个简单的例子,制造芯片的碳元素,我们现在纯度最多提炼到小数点后 5 个 9(99.999 99%),现在阿斯麦提炼到小数点后 11 个 9 了(99.999 999 999 99%),更不用提还需要使用这些材料的高精度、高通量精密生产制造设备了。同时,国外的科研环境比国内好,科技人才外流的问题也要解决好。与此相关的是我国的教育问题,我国的教育大多是为了生存,不像西方国家大多是为兴趣和理想,所以难以培养出很高端的、战略型科研人才。

根据教育部的部署,未来各个大学会建立一批碳中和学院,开展人才培养与科研攻关,我们要吸取芯片发展的教训,从一开始就认真开展基础理论、基础材料、基础工艺、基础设备等研究,用我国的智慧着力研发一批颠覆性的先进能源技术。

科学需要创造力,创造力的前提是兴趣与包容试错的宽松环境,把科学作为任务甚至命令,只能适得其反。不是所有东西都能“山寨”,如航空发动机、半导体芯片与高端光刻机,就是给你图纸、样品也是难仿制的。一台智能手机的设计与制造可能涉及上千个相关专利,每一个专利都很重要,每一个专利背后都有长期厚实的研发支撑。芯片等高端制造需要长期的技术、技巧和技能积累,而这后面其实是人才的积累。现在的问题是,人才大多跑到国外,这是硬伤。我国需要从培养科技人才入手,建立留住科技人才的国家机制与一个适合人才成长的环境。

芯片是技术工程类的攻关,单靠个人或一个团体的努力是不够的,还得举全国之力,各科研单位生产部门统一协调、合理分工、密切配合才能完成。国家集中优势打歼灭战,补短板政策是对的。世界高新科技领域都有华人的身影,华为就有很好的自主研发和芯片工厂。国家应下力气抓好基础教育,特别是创新型理、工科人才的培养。

我国力争 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和,是党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策,事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。实现碳达峰、碳中和是一场硬仗,也是对我们党治国理政能力的一场大考。

在全球碳中和目标下迎来投资热潮,碳中和、零排放正在以前所未有的方式重塑科技与资本地图,碳达峰、碳中和是挑战,也是比当年互联网更大的机遇。世界各国实现碳中和所需投资规模在千万亿美元以上,将创造出一大批新的行业,带来巨大的投资机会。目前世界各国政府都在大力支持碳中和相关技术。美国新任能源部长在国会作证时说,美国将在 2030 年前花费 2.3 万亿美元发展清洁能源技术,以保证美国的未来竞争力。我国在碳中和方面也将进行超大规模的投入,到 2030 年预计投入将超过 150 万亿元。能否按时实现碳中和目标,目前已经成为我国与世界各国科技力量的一场较量。

如期实现“碳达峰与碳中和”目标将彰显大国的责任和担当,对全球可持续发展具有重要意义。具体到我国这样一个以煤炭为主、化石能源占很大比重的发展中大国,就急需能够解决此问题的新一代先进能源技术。本书以介绍新一代先进能源技术为出发点,希望以此为契机,为颠覆性创新做出应有的贡献。

本书可作为高校碳中和或新能源专业方向课程的教科书,或是作为一部专业科普书籍供广大读者参考学习。通过本书读者能够对实现碳达峰与碳中和目标的意义、制度、法律、路径等有一个全面与深刻的理解。书中由国际顶级学者团队撰写的各项颠覆性技术代表着目前国际学术的最前沿成果,未来这些技术的推广必定会成为实现碳达峰与碳中和目标不可或缺的重要组成部分。

本书全体作者非常感谢一直关心与支持我们工作的各位领导、专家、老师与朋友们,更加感谢我们的家人们给予我们无私的爱与支持,才使得我们能够顺利高效地完成本书!

特别感谢国家自然科学基金(51776126)的资助!

胡志宇

2022年11月

清华大学出版社

第 1 章 实现碳达峰与碳中和目标的挑战	1
1.1 什么是碳足迹、碳达峰与碳中和	3
1.1.1 碳足迹	3
1.1.2 碳达峰	3
1.1.3 碳中和	5
1.2 《京都议定书》与《巴黎协定》	8
1.2.1 《京都议定书》	8
1.2.2 《巴黎协定》	9
1.3 全球气温升高与 IPCC 第六次气候变化评估报告	10
1.4 关于全球气温升高 1.5℃ 的影响	12
1.5 全球升温的潜在影响及相关风险	14
1.5.1 对气候变化的影响	14
1.5.2 对海平面的影响	14
1.5.3 对陆地的影响	15
1.5.4 对海洋生物的影响	15
1.5.5 对个人健康、生活质量、粮食安全和水供应的影响	16
1.5.6 对生态系统的影响	16
1.6 符合全球升温 1.5℃ 的排放路径和系统转型	17
1.6.1 没有或有限过冲 1.5℃ 的模式路径情形	17
1.6.2 不高于或略超过 1.5℃ 的模式路径情形	18
1.6.3 在升温不高于或略超过 1.5℃ 的路径加上规模化使用二氧化碳移除技术应用	19
1.6.4 在可持续发展和努力消除贫困背景下加强全球响应	20
1.7 实现双碳目标面临的挑战	21
1.7.1 现实阻力	21
1.7.2 城市转型升级	23
1.7.3 能源生产、消费和管理方式的转变挑战	25
1.7.4 对世界经济格局造成的冲击	27

1.8 小结	29
第2章 碳排放权交易的制度设计和法律问题	31
2.1 引言	33
2.2 国际碳排放权交易制度概述	33
2.2.1 国际条约中的碳排放权交易制度	33
2.2.2 美国碳排放权交易制度简介	36
2.2.3 欧盟碳排放权交易制度简介	36
2.3 国外重点碳排放权交易的法律实践	37
2.3.1 欧盟排放交易体系	37
2.3.2 美国区域温室气体减排行动	38
2.3.3 新西兰排放交易体系	39
2.3.4 东京都排出量取引制度	39
2.4 我国碳排放权交易与交易管理制度	40
2.4.1 我国碳排放权交易实践	40
2.4.2 我国碳排放权交易管理制度	41
2.4.3 分配与登记	41
2.4.4 碳排放权定价与风险管理	43
2.4.5 碳排放核查与清缴	44
2.4.6 监督管理和罚则	45
2.5 碳排放权交易发展前瞻与涉及的法律问题	45
2.5.1 我国碳排放权交易发展前瞻	45
2.5.2 碳排放权法律属性	47
2.5.3 碳排放权交易的风险防范	48
2.6 小结	49
第3章 摩擦纳米发电机	51
3.1 引言	53
3.2 摩擦纳米发电机的基本原理	53
3.3 摩擦纳米发电机的工作模式	56
3.4 摩擦纳米发电机和传统电磁发电机的对比	57
3.5 摩擦纳米发电机的特性与应用	60
3.5.1 电荷密度增强与高性能输出	61
3.5.2 电容型阻抗与主动式传感	64
3.5.3 高电压源与可控驱动	67
3.5.4 能量管理与自驱动系统	71
3.6 小结	74

第 4 章 热电转换之多层薄膜与器件	77
4.1 热电效应及多层热电薄膜	79
4.1.1 热电效应概述	79
4.1.2 热电性能参数	81
4.2 多层热电薄膜概述	81
4.2.1 多层薄膜制备方法	83
4.2.2 薄膜热导率测试方法	84
4.2.3 Si 基多层热电薄膜	87
4.2.4 Sb_2Te_3 基多层热电薄膜	91
4.3 多层热电薄膜传热理论分析	94
4.3.1 多层热电薄膜热传输的界面效应	94
4.3.2 多层热电薄膜界面处的电声子耦合效应	94
4.4 微型热电器件及进展	95
4.4.1 平面型结构	95
4.4.2 垂直型结构	95
4.5 小结	97
第 5 章 微机电系统技术与芯片上的发电厂	99
5.1 微机电系统简介	101
5.1.1 MEMS 技术分类	102
5.1.2 MEMS 的发展及应用	103
5.1.3 MEMS 的特征	105
5.1.4 MEMS 技术在热电器件加工中的应用	106
5.2 微机电系统热电器件结构设计与加工工艺	109
5.2.1 热电器件加工工艺介绍	110
5.2.2 热电器件制备及测试	112
5.3 小结	116
第 6 章 热电能源转换技术原理及应用	119
6.1 引言	121
6.2 热电转换技术的基本原理	122
6.2.1 热电效应	122
6.2.2 热电转换效率及热电材料性能	123
6.3 热电材料的输运基础理论	126
6.3.1 载流子的输运性质	126
6.3.2 固体中的热传导	128
6.3.3 热电材料的品质因子	128
6.4 热电输运性质的测量	129

6.4.1	电学输运性质	130
6.4.2	热学输运性质	131
6.5	热电材料性能优化策略及典型热电材料	132
6.5.1	载流子浓度调控优化电学性能	132
6.5.2	能带调控提升电学性能	134
6.5.3	声子调控最小化晶格热传导	135
6.6	典型热电材料及其性能优化	136
6.6.1	低温及近室温区域($<300^{\circ}\text{C}$)典型热电材料	137
6.6.2	中温区($300\sim 800^{\circ}\text{C}$)典型热电材料	138
6.6.3	高温区($>800^{\circ}\text{C}$)典型热电材料	139
6.7	块体热电器件的设计与应用	140
6.7.1	热电器件的结构设计	140
6.7.2	热电器件的电极连接与技术界面设计	141
6.8	小结	142
第7章	辐射制冷技术在碳中和的应用	145
7.1	辐射制冷基础	147
7.1.1	传热基础	148
7.1.2	辐射制冷机理	150
7.1.3	辐射制冷理论热分析	153
7.1.4	选择性辐射体结构	156
7.1.5	辐射冷却器的性能指标	157
7.2	辐射制冷材料与器件	158
7.2.1	自然辐射体	158
7.2.2	薄膜基辐射体	158
7.2.3	纳米颗粒基辐射体	161
7.2.4	光子辐射体	164
7.3	辐射制冷在 MEMS 热电发电中的应用	166
7.3.1	辐射制冷理论	166
7.3.2	辐射体加工原理及方法	166
7.3.3	辐射体结构与性能表征方法	167
7.3.4	辐射制冷发电系统的建立与测试方法	169
7.3.5	辐射体结构与性能表征测试结果	169
7.3.6	基于辐射制冷的热电发电	169
7.4	小结	170
第8章	水热电联产技术	171
8.1	水热电联产技术应用背景	173
8.1.1	北方城镇供热现状及发展分析	173

8.1.2	北方地区水资源概述	175
8.1.3	我国海水淡化产业发展	176
8.1.4	水热电联产技术的意义	177
8.2	水热电联产技术方案	178
8.2.1	海水淡化与水热同产同送技术原理	178
8.2.2	高温淡水制备原理与流程介绍	178
8.2.3	长距离输送	184
8.2.4	末端热量析出	185
8.3	水热电联产案例	188
8.3.1	火电机组水热同送案例	188
8.3.2	核电机组水热同送案例	190
8.3.3	工程应用案例	193
8.4	水热电联产技术应用前景分析	195
8.4.1	我国核电厂现状及供热潜力分析	195
8.4.2	我国火电厂现状及供热潜力分析	196
8.4.3	水热电联产应用前景分析	196
8.5	小结	196
第9章	磁约束核聚变前沿科学技术	197
9.1	核能行业与碳中和	200
9.2	核聚变领域与碳中和	201
9.2.1	可控核聚变的基本原理	203
9.2.2	磁约束核聚变能的开发历程	205
9.2.3	中国聚变工程实验堆	211
9.2.4	托卡马克的材料问题	212
9.3	关于托卡马克的工程问题	215
9.3.1	第一壁结构	216
9.3.2	第一壁结构的工作环境	216
9.3.3	包层结构设计	216
9.3.4	氟工厂	217
9.4	小结	217
第10章	凝聚态核反应	219
10.1	什么是凝聚态核科学	221
10.2	凝聚态核科学简史	221
10.3	凝聚态核科学主要实验结果	223
10.3.1	束靶反应中的屏蔽能异常增高	223
10.3.2	自然界中的核反应	224
10.3.3	钷-氡系统	225

10.3.4	镍-氢系统	232
10.3.5	镍合金-氢(氘)气系统	235
10.3.6	钛-氘系统	236
10.3.7	生物与化学系统	236
10.4	理论解释	237
10.5	凝聚态核科学的影响	238
10.5.1	科学影响	239
10.5.2	技术影响	239
10.5.3	经济、社会和文化影响	240
第 11 章	功能介孔碳基薄膜的界面组装及能源应用	241
11.1	介孔碳基薄膜材料的合成	243
11.1.1	介孔碳	244
11.1.2	多孔碳基薄膜组件	249
11.2	在能源体系上的应用	257
11.2.1	超级电容器	258
11.2.2	锂离子电池	261
11.2.3	钠离子电池	262
11.2.4	锂硫电池	265
11.2.5	金属锂电池	266
11.2.6	析氢反应和析氧反应	267
11.2.7	氧化还原反应	270
11.2.8	二氧化碳还原反应	271
11.2.9	氮气还原反应	272
11.3	小结	273
第 12 章	分子光储能	275
12.1	引言	277
12.1.1	理想的分子光储热体系	278
12.1.2	常用的分子体系	279
12.2	太阳能的收集与转化	280
12.2.1	分子结构优化	281
12.2.2	提高光子能量	284
12.3	太阳能的储存	285
12.3.1	提高能量密度	285
12.3.2	延长半衰期	289
12.4	释放储存的能量	291
12.5	小结	293

第 13 章 碳中和误区与实现路径	295
13.1 关于碳中和的误区	297
13.1.1 第一个误区	297
13.1.2 第二个误区	298
13.1.3 第三个误区	299
13.1.4 第四个误区	299
13.1.5 第五个误区	299
13.1.6 第六个误区	300
13.2 为什么前一百年电动车未能战胜燃油车	300
13.3 为什么氢能汽车还没有产业化	302
13.4 为什么甲醇可能是最好的储氢载体	303
13.5 造成雾霾的元凶在哪里	304
13.6 现实的碳中和路径	305
13.6.1 通过现有煤化工与可再生能源结合实现低碳能源系统	305
13.6.2 利用煤炭领域的碳中和技术——微矿分离技术	305
13.6.3 实现光伏与农业的综合发展	306
13.6.4 峰谷电与热储能综合利用	306
13.6.5 利用可再生能源制取甲醇,然后做分布式发电	306
13.7 小结	306
第 14 章 海阳核电核能供热示范工程探索实践与展望	307
14.1 海阳核电核能供热示范工程建设意义	309
14.1.1 开展核能供热有利于生态环境改善,促进绿色低碳发展	309
14.1.2 开展核能供热有利于解决清洁供热问题,促进地企共赢发展	309
14.1.3 开展核能供热有利于推动核能技术创新,促进企业高质量发展	309
14.2 开展海阳核电核能供热示范工程的探索与实践	310
14.2.1 海阳核电核能供热技术前期研究论证	310
14.2.2 国家能源核能供热商用示范工程实践	311
14.2.3 积极推进海阳核电核能供热后续项目建设和成果应用	313
14.3 海阳核电核能供热长距离大规模技术与规划	315
14.4 小结	316
总结与展望	317
参考文献	319

清华大学出版社

第 1 章 实现碳达峰与碳中和目标的挑战

胡志宇 杨建华

工业革命以来,人类活动使得全球气候变暖,这已经成为了人类不得不面对的事实,人们一直在积极寻找一种能够减缓或降低全球气温升高的能源技术。从工业革命到现在 300 年间,人类消耗的化石能源总量已远超地球本身的负碳能力,从而产生了显著的温室效应。地球表面温度已经比工业化前升高了 1.2°C 左右,距 2015 年联合国制定的《巴黎协议》所规定的 2030 年目标 1.5°C 已经非常接近了,形势日益紧迫。联合国秘书长古特雷斯呼吁:实现碳中和是世界上最紧迫的使命。在近期的中央经济会议上,“2030 年碳达峰”和“2060 年碳中和”被列为 2021 年八项重点任务之一。碳中和目标是我国为了应对全球气候变化付出的行动,彰显了大国的责任和担当,对全球可持续发展具有重要的意义。我国作为以煤炭为主、化石能源占很大比重的发展中大国,要在 10 年内实现碳排放达峰、40 年内实现碳中和极具挑战,任务十分艰巨,急需能够解决此问题的新一代先进能源技术。

在本章中首先介绍了碳足迹、碳达峰与碳中和的基本概念,然后系统地介绍了《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》与《巴黎协定》的历史沿革,并且完整地梳理了联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在 2021 年发布的第六次评估报告中的主要内容,包括全球气温升高 1.5°C 的影响与相关风险。

受我国巨大的经济体量与高碳能源结构的影响,未来我国要按时实现双碳目标面临诸多挑战。但是这样倒逼机制与巨大的投资总量也为我们的发展提供了前所未有的动力,通过大力推进科技创新不仅可以解决实现“双碳”目标的问题,更重要的是这是一场影响深远的国际科技水平的大比拼,借此千载难逢的历史机遇,可使我国的原创性、颠覆性科技创新产生一次质的飞跃。

——主编的话

摘 要：工业革命以来的 300 年间，人类消耗的化石能源总量已远超过地球本身的负碳能力，因此产生了温室效应及环境问题。联合国及多国政府呼吁实现碳中和是当前世界最紧迫的使命。我国政府高度重视碳达峰及碳中和，制定了一系列的政策，采取了强有力的举措。本章首先介绍了碳足迹、碳达峰与碳中和的基本概念，之后系统地介绍了《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》与《巴黎协定》的历史沿革，并且完整地梳理了联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在 2021 年发布的第六次评估报告中的主要内容，包括全球气温升高 1.5℃的影响与相关风险。本章还介绍了我国发展过程中所面临的高碳能源结构的现状以及未来我国要按时实现双碳目标面临的诸多挑战。

关键词：碳达峰，碳中和，温室效应，能源结构，气候变化

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》(以下简称《纲要》)已正式公布。《纲要》规划部署的碳达峰、碳中和路线图对未来的发展具有重要的意义。碳减排是过程,碳中和是目标,碳达峰、碳中和也是我国经济可持续发展的必然选择。实现碳达峰与碳中和目标面临较大的挑战,政府对实现路径的方向性指引也是明确的,多目标协调、统筹推进是基本原则,以能源行业低碳转型为关键。

从目前碳排放的基本情况来看,我们实现碳达峰与碳中和(双碳)目标面临着较大的挑战。第一,经济高质量发展,经济要保持一定增速。全球经历新冠肺炎疫情,且疫情的变数尚大,全球经济还远没有复苏的迹象。但是为了保持全球经济的高速增长,全球工业化的进程不可放缓。第二,碳达峰与碳中和目标与经济高质量发展面临的挑战叠加。这些挑战包括生产成本持续上升、制造业比重下降、发展不平衡不充分(区域、城乡、收入差距)等。第三,生产侧能源效率潜力已经释放,未来减排可能更依赖结构调整。第四,节能减碳降污与经济发展短期内存在两难抉择。

总的来看,实现碳达峰与碳中和目标虽然面临多方面挑战,但更是充满机遇的。实现“双碳”目标有利于实现经济高质量发展和促进生态环境改善。

1.1 什么是碳足迹、碳达峰与碳中和

1.1.1 碳足迹

碳足迹(carbon footprint)是人类行为产生的温室气体(包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、六氟化硫、氢氟碳化物和全氟化碳)总量^[1]。能源支撑着人类社会的发展(图 1-1),各国的发展都对应着各自的碳足迹。然而世界各国的碳足迹是不同的。根据国际能源署的数据^[2],1971—2019 年,全球人均二氧化碳排放(以下简称碳排放)水平整体较为稳定,增长幅度约为 21%。2019 年,全球人均碳排放达 4.42 t,中国人均碳排放达 6.83 t,低于加拿大(15.2 t)、美国(14.49 t)、韩国(11.31 t)、日本(8.45 t)、德国(7.93 t)等国家,但高于大部分欧洲国家,如英国(5.08 t)、法国(4.35 t)、瑞典(3.16 t)等,以及印度(1.71 t)、巴西(1.94 t)等部分发展中国家。

碳足迹是由个人所参与的生活、工作、事件、组织、服务、场所或产品引起的温室气体(GHG)排放总量,以二氧化碳当量表示。温室气体,包括含碳气体二氧化碳(CO_2)和甲烷(CH_4),可通过化石燃料燃烧、土地清理以及食品、制成品、材料、道路、建筑、运输和其他服务的生产和消费排放出来。在大多数情况下,由于对贡献过程之间复杂的相互作用认识不充分以及数据不足(包括储存或释放二氧化碳的自然过程的影响),我们无法准确计算总碳足迹。衡量特定人群、系统或活动的二氧化碳和甲烷排放总量,需要考虑到感兴趣的人群、系统或活动的空间和时间边界内的所有相关源、汇和储存,使用相关的 100 年全球增温潜能值(global warming potential, GWP),再计算为二氧化碳当量。对于个人而言,碳计算器简化了清单的编制。通常,他们以千瓦时为单位测量电力消耗,例如用于加热水和取暖的燃料的数量和类型。在某些情况下,超越碳中和并成为负碳(通常在达到碳收支平衡所需的一段时间后)是下一个目标。

1.1.2 碳达峰

碳达峰(peak carbon dioxide emissions)是指二氧化碳的排放量不再增长,达到峰值之后

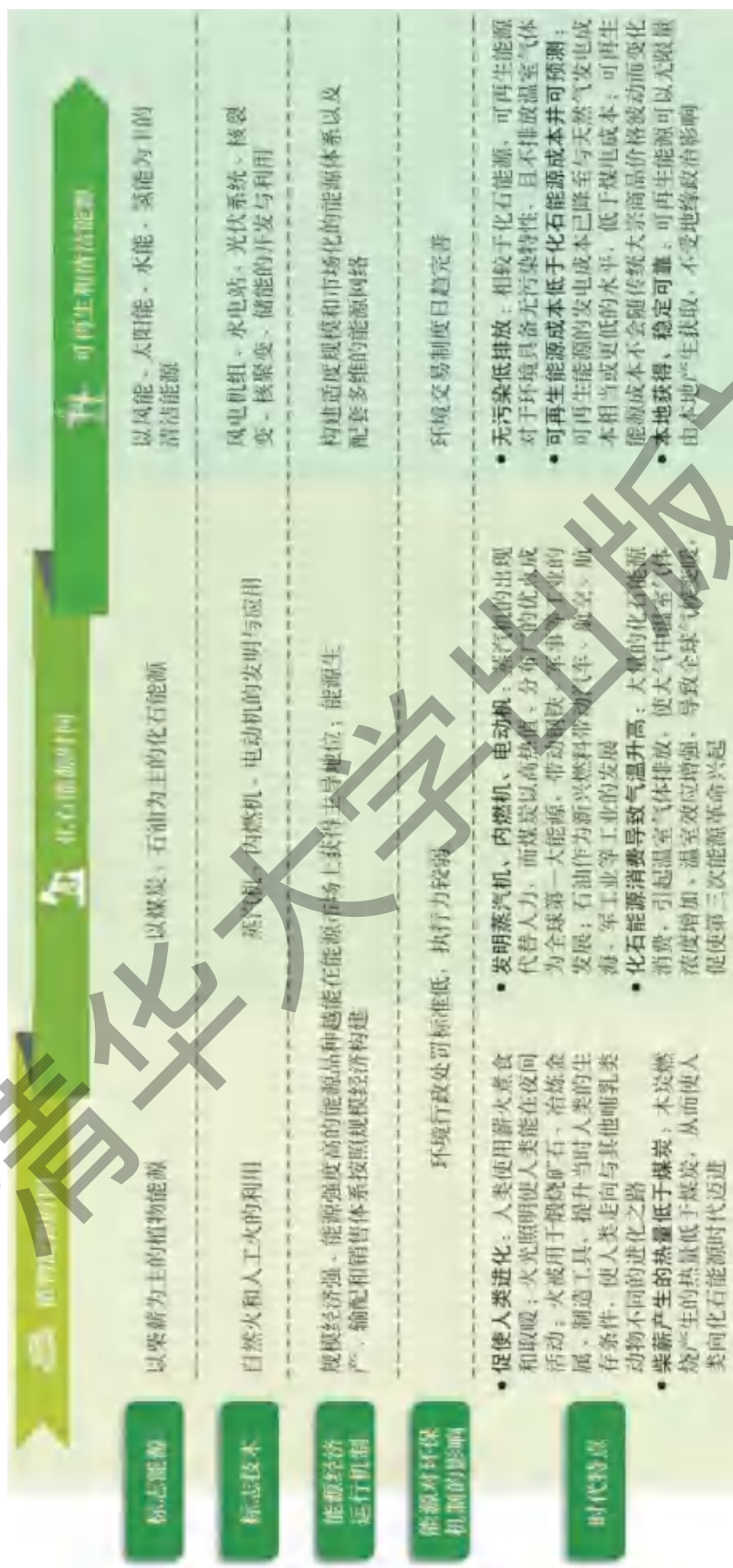


图 1-1 能源支撑着人类社会的发展