

国际净零排放路线 及其对中国双碳战略的启示

刘仁厚, 丁明磊, 王书华

(中国科学技术发展战略研究院, 北京 100038)

摘要:《巴黎协定》生效后, 净零排放承诺国家不断增多并积极开展行动, 但全球二氧化碳排放量持续增加, 全球平均气温仍处于上升阶段, 人类控制温升的窗口期逐渐缩短。国际能源署发布的《2050年净零排放: 全球能源行业路线图》作为第26届联合国气候变化大会的重要参考报告, 将为下一阶段温室气体减排提供决策依据。文章详细分析了国际净零排放路线分阶段实施的目标, 以及全球在传统能源、电力、工业、交通运输和建筑等二氧化碳排放主要行业的转型路径和关键技术的作用, 提出中国实现碳达峰、碳中和的启示及建议: 制定中国长期低排放发展战略, 赢得国际应对气候变化话语权; 强化中国碳中和科技创新, 分阶段设定目标; 实施差异化政策, 推动绿色低碳转型; 完善应对转型过程中风险挑战的措施; 加强国际合作, 实现净零排放目标。

关键词: 净零排放; 碳达峰; 碳中和; 科技创新; 能源; 工业

中图分类号: F124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-736X(2022)01-0001-12

2021年5月, 国际能源署^[1]正式发布的《2050年净零排放: 全球能源行业路线图》(以下简称《路线图》)作为全球首份净零排放路线研究报告, 提出将全球平均温升

控制在1.5℃以内, 到2050年实现全球能源和工业过程相关二氧化碳净零排放的路径。中央财经委员会第九次会议指出, “十四五”时期是碳达峰的关键期、窗口期。

基金项目: 科技创新战略研究专项“新形势下科技创新开放合作战略研究”(ZLY201917); 北京市软科学计划项目“中美科技战对北京科技创新中心的影响与应对之策研究”(Z20111000050000)。

作者简介: 刘仁厚(1987—), 男, 河北衡水人, 中国科学技术发展战略研究院博士后, 研究方向为科技战略与科技政策、技术经济; 丁明磊(1976—), 男, 河北石家庄人, 中国科学技术发展战略研究院研究员, 研究方向为科技创新战略与政策、区域与产业创新; 王书华(1971—), 男, 河北衡水人, 中国科学技术发展战略研究院研究员, 中国科学技术发展战略研究院院务委员, 通信作者, 研究方向为区域经济、科技政策。

2021—2030年这十年是中国实现碳达峰、碳中和的战略机遇期，也是世界实现净零排放的重要节点。中国正在积极推进绿色低碳转型，科技创新将在支撑碳达峰、碳中和中发挥重要作用，同时也面临一些不足^[2]。《路线图》描述了将全球经济从依赖以化石燃料为主转向以太阳能、风能等可再生能源为主的各行业转型路径和关键技术节点，对中国实现双碳目标和能源转型具有重要借鉴意义和启示。

一、《路线图》发布的重要背景

(一)《巴黎协定》后净零排放承诺国家不断增多并积极开展行动

国家自主贡献（INDC）计划目标不断提高。2015年12月，世界相关国家达成《巴黎协定》，确立了以国家自主贡献为主要方式的减排机制，要求缔约方向联合国气候变化框架公约（UNFCCC）提交国家自主贡献，同时实施能够实现其目标的政策，每五年更新其发展计划^[3]。第一轮191个国家提交自主贡献，涵盖了全球九成以

上能源和工业过程的二氧化碳排放。根据联合国气候变化框架公约，截至2021年7月，已有91个国家向联合国气候变化框架公约提交了新的或更新的国家自主贡献，约占全球二氧化碳排放量的42%^[4]，如图1所示。许多更新后的国家自主贡献计划比第一轮提交的目标更高，涉及更多排放行业或覆盖更广泛的温室气体种类。此外，世界资源研究所数据显示，29个缔约方提交了长期温室气体低排放发展战略，约占全球温室气体排放量的28.2%，如图2所示，其中包含对实现净零排放的承诺。

承诺净零排放的国家不断增多。《巴黎协定》的目标是将全球平均温度升幅较工业化前控制在2℃以内，并努力把温升控制在1.5℃以内。2015年后，各国纷纷宣布二氧化碳净零排放承诺，同意在21世纪下半叶实现温室气体人为排放和碳汇的平衡。通过图3可以看出，《巴黎协定》后宣布净零承诺的国家不断增加，除政治宣布、政策文件承诺方式外，越来越多的国家明确将实现净零排放作为法律规定内容加以推进落实。截至2021年4月23日，已有44个

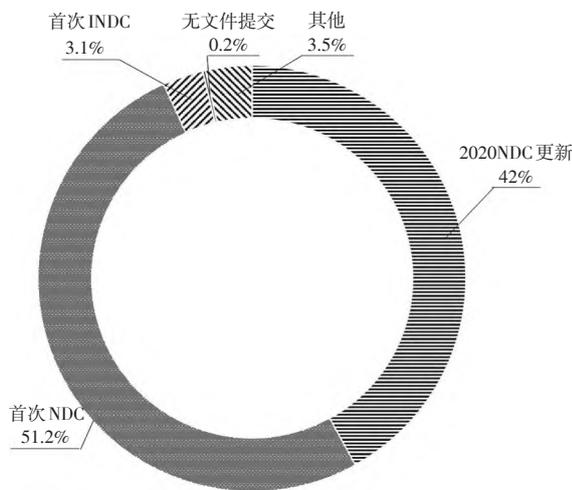


图1 国家自主贡献更新二氧化碳排放量占比

数据来源：世界资源研究所。

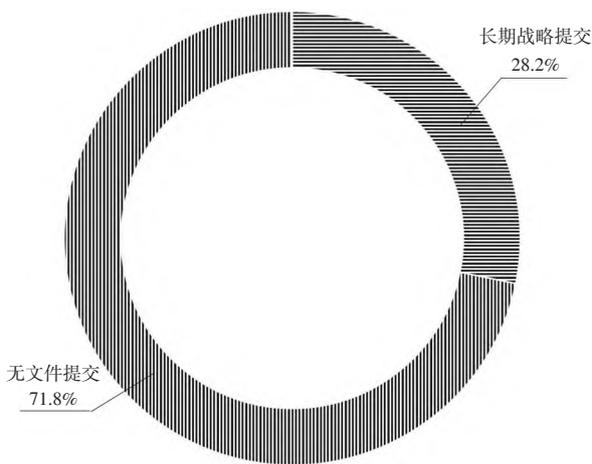


图2 长期低排放战略国家二氧化碳排放量占比

数据来源：世界资源研究所。

国家和欧盟承诺实现净零排放目标，它们总共占全球二氧化碳排放量的70%左右(见图3)。其中，10个国家已将实现“净零”目标作为法定义务，8个国家提议将其定为法定义务，其余国家已在官方政策文件中作出承诺。

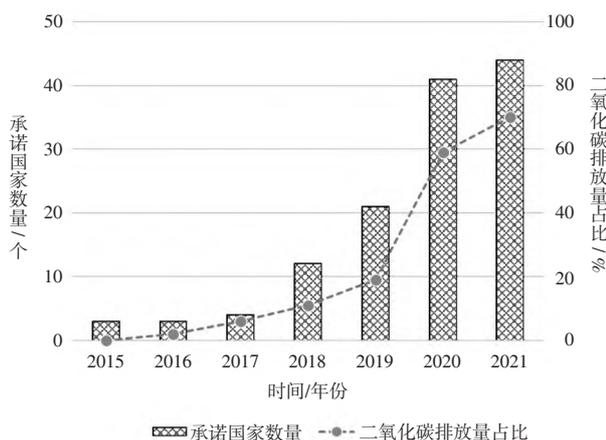


图3 净零排放承诺国家数量及二氧化碳排放量占比

数据来源：国际能源署。

(二) 全球平均气温继续升高，控制温升的窗口期不断缩短

全球继续升温，对人类的潜在风险和影响增加。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) [5]发布的《全球升温1.5℃特别报告》显示，人类活动造成的全球升温高于工业化前水平约1℃，可能区间为0.8℃~1.2℃，仅2006年到2015年这十年，人类活动已经使得世界变暖了0.87℃，如果继续以当前的速度变暖，全球升温可能会在2030年至2052年达到1.5℃。全球温度的持续升高，会放大自然系统对人类生存环境的风险和相关效应。全球升温1.5℃，会造成海平面上升，大多数居住地区的极热事件增加，有些地区的强降水增加，有些地区出现干旱和降水不足。如果温度继续升高2℃，海平面将继续升高0.1米，物种损失、灭绝会对生物多

样性和生态系统造成不可逆的影响，海洋酸化严重，影响农作物生长，威胁人类粮食安全。

《全球升温1.5℃特别报告》提出了两条将全球升温限制在1.5℃的路径：一是将全球温度稳定在比工业化前水平高出1.5℃或低于1.5℃的水平；二是大约在21世纪中叶升温超过1.5℃，持续最长几十年的时间，并在2100年前降回到1.5℃以下。这两种路径中对于温室气体排放、气候变化影响和实现的措施都有明显的区别。努力实现没有或者有限过冲1.5℃的模式，需要到2030年全球人为二氧化碳排放量从2010年的水平减少约45% (40%~60%)，到2050年左右达到净零排放[6]。由于新冠肺炎疫情影响，2020年全球二氧化碳排放量下降，但随着经济的复苏，二氧化碳排放量出现强劲反弹。通过图4可以看出，2020年1—4月中国二氧化碳排放量较2019年同期明显下降，但4月之后二氧化碳排放量持续升高并超过2019年同期水平。随着二氧化碳排放量的增加与2030年全球减排时间的逼近，控制温升的窗口期将逐渐缩短。

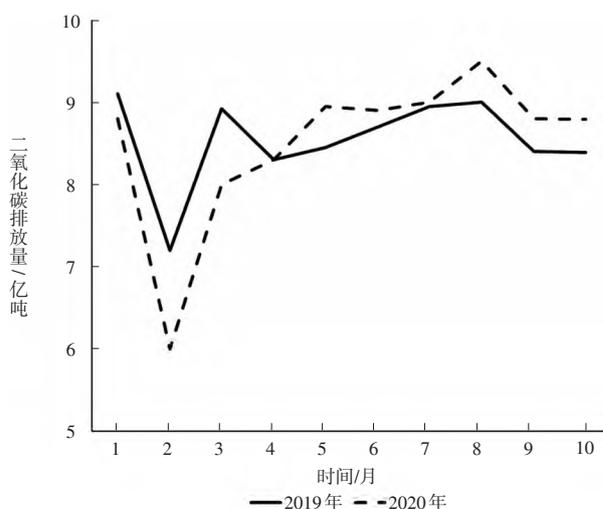


图4 2019年1—10月和2020年1—10月

中国二氧化碳排放量

数据来源：Global Carbon Budget 2019-2020。

(三)《路线图》为第26届联合国气候变化大会重要智库报告

《路线图》采用一种全新的建模方法开发,借鉴结合两个旗舰系列——世界能源展望和能源技术展望的复杂模型^[7],同时还与IIASA的全球生物圈管理模型(GLOBIOM)结合,提供有关生物能源需求对土地利用和净零排放影响的数据。混合模型的应用能够对能源市场、投资、技术以及推动净零排放所需的政策和细节作出独特的分析。

《路线图》将为第26届联合国气候变化大会(COP 26)提供重要决策支撑。联合国气候变化框架公约缔约方大会第二十六次会议于2021年11月在苏格兰格拉斯哥举行,英国担任缔约方会议主席国。这次会议是自2015年《巴黎协定》签署以来最重要的联合国气候变化讨论会,开展了关于粮食和气候变化的建设性对话,加强了对各国远大目标和所处情况的了解,并建立了新的联系和伙伴关系。英国作为主办方积极推动应对气候变化行动和二氧化碳减排,并展示其全球气候领导者姿态。国际能源署《路线图》作为专业智库报告为主办方提供行动建议和决策依据。

二、《路线图》净零排放目标分析

《路线图》最终目标是到2050年实现全球二氧化碳排放量降至零,并控制全球平均温度上升长期不超过1.5℃。这一长期目标与联合国政府间气候变化专门委员会主要目标保持一致,并分阶段设定了可衡量的短期目标。第一阶段目标为到2030年确保能源相关和工业过程的二氧化碳排放量下降约40%,与《全球升温1.5℃特别报

告》中评估没有或有限过冲1.5℃的模式情景一致^[5];同时,与联合国可持续发展目标中有关能源的具体行动相一致,即到2030年实现可持续能源的普遍获取和大幅减少空气污染。第二阶段目标为到2050年在不依赖能源行业以外的减排及负排技术下,实现能源相关和工业过程二氧化碳净零排放,并将能源行业的甲烷排放量降至最低。同时,需要采取行动减少所有温室气体排放来源,并与联合国政府间气候变化专门委员会50%可能性将长期全球平均气温上升限制在1.5℃内而不出现温度过冲的情景保持一致。

制定与全球气候目标相适应的净零排放路线进而实现全球能源绿色低碳转型,具有极大的不确定性。目前,虽然各国政府承诺将实现二氧化碳净零排放,但研究表明,根据现有承诺和政策不足以实现《巴黎协定》的目标^[8]。尽管国际能源署提供了实现全球二氧化碳净零排放目标的路径,但各国处于不同的发展阶段,在能源结构、产业结构、技术水平和经济发展等方面具有明显差异,因此在实现净零排放上各国应结合实际采取针对性措施。中国作为发展中经济体,正处于工业化进程当中,国内不同区域发展差异大,应充分利用资源禀赋、技术、制度等优势,科学制定符合国情的净零排放目标和路线。

三、全球主要行业转型及关键技术作用分析

《路线图》展示了全球现有产业碳排放情况。电力行业占产业碳总排放量的50%以上,其中,燃煤电厂碳排放量占产业碳总排放量的40%;工业是第二大排放源,

钢铁、水泥、化工等行业占现有碳总排放量的30%左右,交通运输行业约占碳总排放量的10%,建筑行业占比不到5%。^[1]到2050年,全球经济和人口总量将进一步增加,要实现净零排放,需要各行业实现绿色低碳转型、大量清洁技术部署以及创新技术的开发应用。

(一) 传统能源行业转型及关键技术作用分析

净零排放路线下,传统能源供应和能源强度大幅下降。根据国际能源署预测,煤炭消费量将从2020年的52.5亿吨标准煤下降到2030年的25亿吨标准煤,然后下降到2050年的6亿吨标准煤,总体下降90%;石油需求将从2020年的8800万桶/天下降到2030年的7200万桶/天,然后下降到2050年的2400万桶/天,总体下降近75%;天然气需求将从2020年的约4.3万亿立方米下降到2030年的3.7万亿立方米,然后下降到2050年的1.75万亿立方米,总体下降约55%。从全球能源强度下降情况看,2010—2020年,能源强度平均每年下降约2%;2020—2030年,平均每年将下降约4%;2030—2050年,平均每年将下降约2.7%^[1]。

1. 二氧化碳捕获、利用和封存(CCUS)

CCUS技术在化石能源转型中被大规模应用。根据全球能源评论,到2050年,化石燃料将约占总能源的20%^[9],大量CCUS将部署在非能源产品的企业,以及用于难以减排的重工业和长途运输业的燃料生产。通过CCUS技术改造,化石燃料工厂能够以天然气为原料制备低碳氢气,部分电力和工业企业可以继续使用煤炭,并有效

减少搁浅资产。

化石能源行业可以促进CCUS技术的开发和部署。二氧化碳捕获技术虽然在一些工业和燃料转化行业使用了几十年,但在很多其他行业的应用仍处于示范阶段。目前,全球大型设施捕获的二氧化碳为4000万吨,约3/4来自石油和天然气行业^[10]。可以借助化石能源行业大规模的工程、管道、地下和项目管理技术,大规模部署和应用CCUS技术,在相对简单的工艺条件和较低的成本下,处理和捕获较高浓度的二氧化碳。基于化石能源体系开发部署CCUS技术,能够有效降低学习成本,提高其他行业CCUS技术示范成功概率和规模化应用的可能性。

CCUS技术将推动衍生技术快速发展,比如生物能源与碳捕获和储存技术(BECCS),在生物能源技术上配备CCUS设施,预计到2050年将捕获约1.3亿吨二氧化碳^[11],能够抵消减排非常困难的行业的碳排放量;直接空气碳捕获和储存技术(DACCS),目前处于原型阶段,短期内很难进入市场并获得应用,通过开发创新,将在净零排放中发挥重要作用。

2. 氢及氢基燃料

氢及氢基燃料可以替代部分化石燃料。根据世界氢评论预测,2050年全球氢产量将比现在增长近6倍,其中约50%用于重工业、运输部门;30%被转化为其他燃料,主要用于航运和发电的氨、航空的合成煤油和天然气网络的合成甲烷;17%用于燃气发电,平衡太阳能光伏发电和风能发电的增长,提供季节性储能调峰。^[12]氢基燃料为氢转化的其他能源载体,如氨、合成碳氢化合物燃料等,具有更高的能量

密度，容易运输和储存。同时，氢还可以与现有的基础设施或工艺技术兼容，作为各种能源燃料，实现部分能源替代。

化石能源行业可以促进氢及氢基燃料的生产、开发和应用。净零排放下，部分氢将由配备CCUS的天然气制备，氢基燃料如氨、合成燃料等产量大增。氢及氢基燃料在生产工艺中，与现有的油气加工和精炼过程的装备技术具有明显的适用性和共性；在储运环节，能够有效衔接利用石油和天然气行业的管道和船舶技术；在应用方面，可以借鉴油气企业对液体和气体燃料大规模、长期运营管理的经验。

此外，氢及氢基燃料可以带动相关技术发展，促进电解槽装备制造技术、氢气运输环节装备和技术、氢气储存装备和技术，以及氢燃料电池技术快速发展。

3. 先进生物能源

现代形式生物能源在净零排放中发挥着关键作用，通过利用先进生物能源技术获得可持续的生物能源，满足区域和行业的部分能源需求，有效降低碳排放。先进生物能源技术包含新型生物原料和先进转化技术。新型生物原料主要为短轮伐期木本作物和不需要使用耕地生产的原料，能够在边际土地和不适合粮食生产的土地上大规模种植。与传统作物相比，其每公顷生物能源产量和能源产量更高。

能源生产主要依靠先进转化技术，一是依靠先进液体生物燃料技术，以木质原料和非耕种土地上的种植作物为原料，利用纤维素乙醇技术生产先进乙醇，利用生物质费托合成（Bio-FT）技术生产先进生物柴油和其他低排放液态烃燃料，利用氢化酯和脂肪酸（HEFA）技术生产生物煤油

和其他可再生燃料；二是依靠先进气体生物燃料技术，以生物质为原料，利用生物质气化技术、沼气升级技术生产生物甲烷和其他低碳燃料气体。

虽然生物能源在净零排放中大幅增长，但仍有大部分减排技术处于示范或原型阶段，因此持续推进科技创新十分关键。

（二）电力行业转型及关键技术作用分析

净零排放下，随着人口增长、人们收入和生活水平的提高，电力需求将显著增加，可再生能源电力占重要地位。国际能源署预测，全球电力需求从2020年到2030年将增长近40%，到2050年将增长2.5倍多^[3]；可再生能源发电份额将从2020年的29%提高到2030年的60%以上，并在2050年达到近90%^[7]。

1. 可再生能源

2030年，太阳能光伏发电和风能发电将成为全球主要电力来源。太阳能光伏发电技术较为成熟，在大多数新能源电力市场上成本最低，并获得较多的政策支持。

陆上风力发电技术是一种可以进入市场的低成本技术，在很多国家和地区得到广泛支持，能够迅速应用和扩大规模，其成本在资源禀赋良好的地区可以与太阳能光伏发电的成本相媲美。海上风电技术处于快速发展阶段，很多国家和沿海地区已经开始加速部署，目前技术难点是固定底部安装。浮动式海上风力发电技术可以有效挖掘世界各地巨大的海上发电潜力，将在未来发挥重要作用。

水电、生物能源和地热发电技术具有成熟、灵活的特点，作为补充调度的发电选项，对保障电力安全至关重要。目前，

尽管聚光太阳能和海洋发电技术还不太成熟,但从长远目标来看,持续科技创新将使这些技术在净零排放中发挥重要作用。

2. 核电

核电是最具成本效应和低碳的可再生能源,发达经济体都在寻求延长反应堆使用寿命的方法。净零排放下,新兴市场和发展中经济体主要选择建造大型反应堆,但2021年到2035年新建的反应堆越来越重视小型模块化技术。大型反应堆技术较为注重增强安全功能,但其建设周期较长、成本较高。小型模块化反应堆、高温气体反应堆和其他先进的反应堆技术正朝着全规模的示范方向发展,具有可扩展的设计、较低的前期成本、操作和输出灵活性强(如电、热或氢)等特点。

3. 燃煤电厂改造

CCUS技术改造是在现有煤炭和天然气发电技术的基础上加装捕集设备,改善机组燃烧性能,实现碳减排和支撑电力安全。改造应选择规模大、新建或者运行时间较短的燃煤和燃气电厂,并具备二氧化碳储存条件或将其作为原料进一步利用。

共燃技术改造是通过改造燃煤和燃气发电厂,使其可以共同燃烧高比例的生物质或氢基燃料。净零排放下,能够实现百分百可再生燃料(氨气、氢气)取代。共燃技术改造有一定针对性,兼具可再生燃料成本低和保证电力系统的稳定性、灵活性优点,目前处于快速发展阶段。

4. 能源存储

电池存储技术与太阳能光伏发电和风能发电技术相结合,可以保障短期电力需求和灵活性响应部署,提高电力系统的安全性和弹性。抽水蓄能技术一般可以用于

提供几小时、几天内的电力。氢储能技术比电池储能多几个数量级的优势,可以补充电池和解决较长时间如季节性储存的需求,在提高电力稳定性中将发挥重要作用。

5. 电力安全

能源安全是净零排放下需要解决好的一个重要问题,随着可再生能源在发电结构中占比的提高,构建一个可靠、灵活和安全的电力系统更加重要。通过一系列技术创新将实现这一转型,例如,常规发电机组低比例运行技术通过对传统发电机组进行低碳技术改造,在可再生能源高比例输出的时间段内,维持最小化的发电量,保证净零下电力系统稳定;电网代码更新技术被用于调用可再生能源和电池并网,以提供快速的频率响应服务,减少电力系统稳定所需的常规发电量;同步冷凝器技术能够在不发电的情况下提供惯性,该技术已经在丹麦和澳大利亚得到验证,但仍需要更大规模的扩展试验;并网变换器技术可以允许可再生能源和电池产生电压信号,对于可再生能源接入电网十分重要,目前该技术被用于微电网系统,下一步将转向大型电网系统进行试验;在电力数字化技术方面,随着联网设备的大量使用,数字化网络能够更灵活地支持电网运营,更好地管理可再生能源和需求响应。

6. 电力输送

净零排放下,新型电力网络能够支持使用所有的灵活资源,平衡大面积的需求和供应。但可再生能源发电一般位于偏远地区,远离需求中心,超高压直流技术可以支持长距离电力传输,在建立能够双向可变操作和最大限度灵活性的新型传输系统方面发挥重要作用。

(三) 工业转型及关键技术作用分析

工业碳排放比重大,绿色低碳转型对科技创新依赖性强。2020年,全球工业领域二氧化碳排放量约为84亿吨,为能源相关行业第二大排放源^[1]。国际能源署报告显示,从2030年开始,所有新增工业产能都接近零排放,但要实现净零排放,大约60%的重工业减排来自目前尚未上市的技术^[1]。

1. 化工工艺新型技术

化工领域的乙烯、丙烯、苯、甲苯、混二甲苯作为基础材料,将长期占较大份额。2030年之前,塑料回收和再利用技术、氮肥高效利用技术和其他提高能效的技术,将实现全球化学工业大部分减排。2030年以后,大多数减排需要依赖目前正在开发的新技术,包括零碳排放新型化学过程技术、CCUS-化工过程集成应用技术、可再生电力直接电解氢技术。

2. 钢铁生产新型技术

净零排放下,钢铁行业转型的重要思路是从煤炭向电力转变。到2030年,新材料工艺技术和能效提高技术将为钢铁生产减少约85%的碳排放^[1]。2030年以后,大部分减排需要依赖正在开发的技术,包括废钢电弧炉技术、氢基直接还原铁技术、铁矿石电解技术和辅助设备电气化技术。在天然气丰富的地区,可以开发创新熔炼还原技术、基于天然气直接还原铁技术和配合装备CCUS工艺技术。

3. 水泥生产新型技术

目前,全球水泥生产中的碳排放约2/3来自生产原料^[1]。到2030年,熟料替代技术在减排中将发挥重要作用,该技术核心是新型替代材料的研发和熟料水泥比在新生产工艺下的不断创新改进。2030年以

后,大部分减排需要依赖目前正在开发的技术:(1)供能系统技术创新,使用低排放生物质能源、可再生废料配合CCUS技术提供热源,或直接使用可再生能源;(2)装备技术创新,水泥窑直接电气化技术,目前还处于小规模原型阶段;(3)新型水泥技术,基于可替代粘结材料的新型水泥,这种创新水泥能够限制或避免生产过程中的碳排放,甚至能够在固化过程中捕获二氧化碳。

(四) 交通运输行业转型及关键技术作用分析

交通运输业转型主要是通过提高运输系统操作和技术效率、模式转换和公路运输电气化来实现的。《路线图》预测到2030年,电动汽车销量将占汽车总销量的60%以上,燃料电池或电动汽车销量将占重型卡车销量的30%;到2035年,全球电动汽车销售将实现100%;到2050年,所有重型卡车都将使用燃料电池或电动。^[1]

1. 道路车辆减排

净零排放下,公路用车脱碳取决于两个方面的技术转型:一是向电动汽车和燃料电池汽车转变,二是向更高的燃料混合比和直接使用低碳燃料(生物燃料和氢基燃料)转变。主要包括:(1)新型动力电池技术,到2030年纯电动汽车的动力电池能量密度至少为400瓦特小时/千克(Wh/kg)^[14];(2)到2030年下一代先进电池技术(固态电池),实现市场化应用,并将使电池能量密度进一步增加^[13];(3)燃料电池技术,基于电池重量、体积、充电需要的高能量和功率,将主要用于重型卡车的电气化,2030年后应进入市场应用阶段;(4)道路电气化系统技术,使用导电或感应电力传

输技术为长途运营的电池卡车和燃料电池卡车提供电力。

2. 航空航运减排

航空和航运需要高能量密度的燃料, 转型过程主要有三种技术路径: 一是低排放燃料替代技术, 改进航空航运动力系统使用先进生物燃料替代传统燃料, 到2050年, 生物燃料消耗将占航空总燃料消耗的45%, 占航运燃料消耗的20%^[1]; 二是新型动力技术, 开发以氢为燃料的新型航空发动机和以氨为燃料的新型船舶内燃机; 三是超高能量密度电池技术, 能够满足短途飞行或者短距离航运需求。

(五) 建筑行业转型及关键技术作用分析

建筑行业转型包括两个方面: 一是主要依靠现有技术对现有建筑进行低碳改造, 到2030年, 全球现有建筑存量的20%左右将被改造; 二是新建建筑符合零碳建筑标准, 依靠零碳建筑技术创新, 供热将采用新式锅炉燃料并能与氢兼容, 热泵将大量使用, 化石燃料锅炉将停售, 电力将成为建筑使用的主要能源^[1]。

1. 零碳建筑体系

净零排放下, 大部分建筑将符合零碳能源要求, 深度技术改造将大规模开展。零碳建筑具有高度节能特征, 可直接使用可再生能源或者使用完全脱碳的能源, 如电力或区域供热, 并最大限度地高效利用能源、材料和空间。零碳建筑技术体系包括三个重要方面: 一是采用被动式节能设计、改进建筑围护结构和高能效设备, 降低能源需求、建筑运营和脱碳能源供应成本; 二是有效整合当地的可再生能源, 如太阳能热、太阳能光伏、光伏热和地热,

满足部分公共能源需求; 三是能源与电力系统集成, 利用连通性和自动化技术, 管理建筑电力需求和能源存储设备运行, 提供灵活性能源来源。

2. 供热和供冷

净零排放下, 家庭用电量将大幅上升, 高效电热泵技术用于空间加热将成为主要选择。生物能源和氢能源锅炉、太阳能热、区域供热、低碳气体燃气网络、氢燃料电池等技术将在为建筑物提供能源方面发挥重要作用。

3. 电器和照明

净零排放下, 建筑采用分布式发电技术, 由太阳能光伏、电池存储和电动汽车充电组成。智能控制技术能够及时调整电力负荷, 与可再生能源发电相适应, 或为电力系统提供灵活服务, 并能优化家庭电池和电动汽车储能, 加强个体与电网互动。

这些技术的创新发展将有助于提高电力供应的安全性, 降低能源转型成本, 使可再生能源更容易和更便宜地被整合到居民生活中。

四、国际净零排放路线对中国实现碳达峰、碳中和目标的重要启示及建议

世界各国对应对气候危机已达成广泛的共识, 开展国际合作、采取实质性的行动也到了关键时刻。中国宣布2030年前实现碳达峰, 2060年实现碳中和, 这是世界实现净零排放目标的重要组成部分。中国正在接近解决气候变化的决定性时刻, 同时也面临着重大挑战。我们需要对经济、社会、能源、技术体系进行全面改革, 但实现绿色低碳转型不能一刀切, 我们要科

学规划，在保障国家和人民发展的基础上制定合理的路线图。

（一）制定中国长期低排放发展战略，赢得国际应对气候变化话语权

2021年4月，美国举办的“领导人气候峰会”提出了气候目标及相应的减排承诺，美国重回全球气候变化领域并以此获得盟友支持。英国计划借助国际能源署《路线图》报告，在联合国气候变化框架公约第26次缔约方会议上取得应对气候变化的国际领导地位。中国应争取更多应对气候变化的主动权，立足国内发展，科学制定新一轮国家自主贡献计划，在联合国气候变化大会上获得更多的支持。同时，开展中国长期低排放战略的研究和制定，设定短期目标、长期目标并出台与之匹配的政策，既满足中国转型发展要求，又与国际应对气候变化总体目标相一致。将碳达峰、碳中和纳入中国长期低排放战略整体研究内容，科学研究时间表、行业技术路线图及提高科技创新支撑潜力，形成具有可操作性和最优的碳达峰行动方案、碳中和行动方案、温室气体净零排放方案，以中国贡献和中国方案应对全球气候变化。

（二）强化中国碳中和科技创新，分阶段设定目标

以2030年和2050年为关键时间节点，推动科技创新对碳中和的持续支撑。结合中国清洁技术发展情况，参考国际能源署和IPCC对于2030年、2050年的目标设定，分阶段制定科技创新优先行动。（1）2030年前，大规模部署可用的清洁能源高效技术，提高现有传统能源行业效能，以太阳能、风能为主的清洁能源技术大幅发展，进一步扩大具备市场应用条件的技术

规模并提供适用场景，限制某些燃料和技术的使用；（2）持续强化科技创新，2030—2050年一半的减排来自目前处于示范或者原型阶段的技术，重工业和长途运输领域甚至大部分技术还尚未开发，为此需要针对重点行业持续开展科技创新，优化现有技术、创新原型技术，系统性组织研究、开发、示范和部署，同时建设技术所需的新型基础设施；（3）2050年后，进一步快速部署现有技术，促进清洁技术大幅转化，广泛使用尚未推向市场的新型技术，按照碳中和目标，根据各个部门和实施步骤对科技创新依赖程度的差异性，制定更加详细和精确的科技创新支撑方案。

（三）实施差异化政策推动绿色低碳转型

国际能源署发布的《路线图》具有参考性和一般性，但仍具有很强的不确定性，每个国家都需要根据自己的具体情况设计自己的发展战略。中国双碳战略目标的实现路径可以吸收和借鉴发达国家相关经验和做法，但没有一个路线图是直接可以照搬执行的。中国应加快实施“1+N”政策，“1”是坚持全国一盘棋，坚持顶层设计，立足新发展阶段和经济增长的实际，充分考虑转型过程中现有资产分类，最大限度发挥现有资产效能，最大限度减少搁浅资产，制定合理的路线图和施工表；“N”是根据各个区域、各个行业、各个领域的发展不同，资源、人才、技术优势不同，以顶层设计为核心，打破区域、行业、部门的壁垒和孤岛，制定细分的转型政策。同时，要防止各地“运动式”减碳，推进减碳要符合技术经济发展规律，先立后破。

(四) 完善应对转型过程中风险挑战的措施

净零排放中, 能源行业将发生系统性变革, 由此带来三个方面的挑战。(1) 传统化石燃料行业的技术人员将面临失业的风险。向净零排放转型中, 随着化石燃料的减少, 大量技术工作人员将面临重新择业。中国应在推动绿色低碳转型中, 综合考虑资源依赖性较强的地区, 加大清洁能源领域投资, 创造和带动新的就业, 并制定政策, 对工人进行技术再培训, 优化就业人员结构, 实现平稳过渡。(2) 清洁能源技术面临关键矿物安全风险。推动能源转型需要大量的关键矿物, 铜、锂、镍、钴、锰和各种稀土金属的消耗将大幅增长。中国应建立新能源体系下的关键矿物清单并增加战略储备, 对国内相应矿产资源进行摸底, 统筹有序高效开发, 建立完善的长效开发利用机制, 避免未来的价格波动增加成本和关键原料“卡脖子”。(3) 新型电力系统面临网络安全风险。各个行业和部门的快速电气化, 使得电力在全球能源中的比重日益增加。平衡风能、太阳能与需求侧响应的电力灵活性, 需要更智能、更数字化的电力网络的支持。中国应建立相应的电力网络安全系统, 加强电力数字化技术的监管和控制, 增强应对能力, 以抵御未来对电力系统的网络攻击和其他数字化威胁。

(五) 加强国际合作实现净零排放目标

国际合作对实现2050年净零排放至关重要。(1) 气候变化是一个全球性问题, 目前即使承诺的国家完全兑现, 其碳排放量也只占全球总碳排放量的70%, 只有继

续加强国际合作, 形成全球性的减排承诺, 才有可能实现应对气候变化的目标。(2) 加强国际间的科技创新合作。尽管各国发展阶段、科技发展程度、市场需求、资源分布不同, 但对清洁能源技术部署都有共同的需求。中国应加强与不同发展阶段国家的合作, 加快关键技术的创新和示范、增强制定清洁技术国际标准主导权, 同时输出清洁技术扩大国际市场需求, 构建连接发达国家、新兴市场和发展中经济体的全球模式, 形成广泛深刻的全球合作体系。(3) 吸引全球性资金。绿色低碳转型需要大量的投资, 国际合作有助于吸引国际公共资金、私营部门和私人融资, 共同降低绿色低碳转型风险, 促进现有和新型清洁能源技术的发展。

五、结语

中国为实现碳达峰、碳中和目标, 将付出极其艰巨的努力。实现绿色低碳转型是社会的深层系统性变革, 涉及科技、产业、经济等不同层面, 需要多主体参与, 制定较清晰的行动方案和路线图。国际能源署从全球净零排放的角度研究制定的关于政策、行业、科技、创新等方面的路线图, 值得我们研究和借鉴。同时, 中国还需要结合自身产业结构、经济和科技发展情况, 在保证社会经济平稳运行的前提下, 制定科学可行的净零排放规划, 既要提高社会和民众对低碳转型的理解认识, 推进行动, 又要避免盲目上马新项目和运动式减碳, 符合科技、经济发展规律, 实现绿色低碳转型促进建设社会主义现代化强国和构建人类命运共同体的伟大目标。

参考文献:

- [1] International Energy Agency. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector[R]. Paris: IEA, 2021.
- [2] 刘仁厚,王革,黄宁,等.中国科技创新支撑碳达峰、碳中和的路径研究[J].广西社会科学,2021(8):1-7.
- [3] UNFCCC. The Paris Agreement[EB/OL]. (2019-01-20) [2021-09-20]. http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.
- [4] United Nations Climate Change. Full NDC Synthesis Report[R]. New York: UNFCCC, 2021.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5°C[R]. Geneva: IPCC, 2018.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change. Sixth Assessment Report (AR6)[R]. Geneva: IPCC, 2021.
- [7] International Energy Agency. World Energy Outlook 2021[R]. Paris: IEA, 2021.
- [8] National Intelligence Council. Climate Change and International Responses Increasing Challenges to US National Security Through 2040[R]. Washington: U.S. Office of the Director of National Intelligence, 2021.
- [9] International Energy Agency. Global Energy Review 2021[R]. Paris: IEA, 2021.
- [10] International Energy Agency. Energy Technology Perspectives: Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage[R]. Paris: IEA, 2020.
- [11] International Energy Agency. Carbon Capture, Utilisation and Storage: The Opportunity in Southeast Asia[R]. Paris: IEA, 2021.
- [12] International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2021[R]. Paris: IEA, 2021.
- [13] International Energy Agency. World Energy Investment 2021[R]. Paris: IEA, 2021.
- [14] International Energy Agency. Global EV Outlook 2021[R]. Paris: IEA, 2021.

责任编辑:王政武