

关于中国碳中和与能源转型实现路径的思考

金之钧^{1,2}, 张川¹, 王晓峰², 李想¹

(1. 北京大学 能源研究院, 北京 100871; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:应对气候变化是当前人类命运共同体面临的重大挑战。2030年碳达峰、2060年碳中和的“双碳目标”是中国作为负责任大国对全世界的庄严承诺,也是中国经济社会系统性变革、转型发展的重要战略目标。能源在实现碳中和目标中承担重要使命。针对中国化石能源占比高、能源需求刚性增长快的特殊条件,研究提出“两个轮子驱动,两大领域发力,一个核心抓手”,未来化石能源占比与终端用能电气化占比2个关键指标的中国能源转型路径。应该充分发挥政府引导和市场主导在能源转型和中国实现碳中和方面的作用,大力发展碳减排和碳消纳核心技术。必须处理好经济发展与能源安全和碳中和的关系,国家层面减排目标和各省、市、企业之间减排目标的关系,传统化石能源公司和新能源公司的关系,碳减排短期行动与长期目标的关系,中国与全球协同推进的关系。

关键词:路径优化;实现路径;能源转型;碳中和;中国

中图分类号:TE02

文献标识码:A

A pathway to China's energy transition in a carbon neutrality vision

JIN Zhijun^{1,2}, ZHANG Chuan¹, WANG Xiaofeng², LI Xiang¹

(1. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: Responding to climate change represents a tremendous challenge to the community with a shared future for mankind. China has committed itself to achieving carbon peaking goal by 2030 and carbon neutrality goal by 2060. The dual carbon goals are not only China's solemn commitments to the world as a responsible power but also key strategic objectives of the systematic socio-economic reforms, transition, and development of the country. Energy plays a crucial role in reaching carbon neutrality. Given China's particular situation featuring a high proportion of fossil energy and rapidly increasing rigid demand of energy, this study proposes a pathway for China's energy transition. In this aspect energy transition is guided initially by government policies and driven by market forces in the long term while focusing on both carbon emission reduction and carbon sequestration, capture, utilization and storage. Carbon pricing, through carbon taxes and emissions trading, lies at the core of the pathway, with the future proportion of fossil energy in the primary energy mix and the level of end-use electrification serving as critical indicators. Specifically, it is recommended to fully leverage government guidance and market dominance to facilitate energy transition and reach carbon neutrality in China, and there is a vital need to vigorously develop core technologies for both carbon emission reduction and carbon sequestration, capture, utilization and storage. Furthermore, it is necessary to effectively manage relationships of economic development with carbon neutrality and energy security, between national emission reduction targets and those of all provinces, cities, and enterprises, between traditional fossil energy companies and emerging new energy enterprises, between short-term actions and long-term goals regarding carbon emission reduction, and the coordinated progress on carbon emission reduction for China and the other countries across the world.

Key words: pathway optimization, implementation pathway, energy transition, carbon neutrality, China

引用格式:金之钧,张川,王晓峰,等.关于中国碳中和与能源转型实现路径的思考[J].石油与天然气地质,2024,45(3):593-599. DOI:10.11743/ogg20240301.

JIN Zhijun, ZHANG Chuan, WANG Xiaofeng, et al. A pathway to China's energy transition in a carbon neutrality vision[J]. Oil & Gas Geology, 2024,45(3):593-599. DOI:10.11743/ogg20240301.

1 碳中和目标与能源转型的背景

工业革命以来,人类社会的经济发展紧密伴随着大规模的能源消费,能源已经成为驱动国内生产总值(GDP)增长的生产要素之一^[1]。以化石能源为基础的现代能源工业体系也成为全球人因CO₂排放的主要来源,根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)统计,自1970年第三次工业革命以来,全球78%的温室气体排放与化石能源的使用相关。2022年全球能源消费总量达到144×10⁸ t油当量,其中,石油和天然气分别占32%和24%;煤炭紧随其后,占比27%。综合来看,化石能源在全球能源消费中的占比合计高达83%,传统能源依然主导全球能源结构^[2]。由于化石能源的高碳排放特性及其在能源消费中的显著占比,2022年因能源使用导致的CO₂排放量高达368×10⁸ t^[3-4],占当年全球CO₂总排放量的90%。

在最近80万年间,地球大气中CO₂浓度基本维持在250×10⁻⁶,然而,近代以来该浓度显著上升至400×10⁻⁶以上,超过了科学界定义的行星安全边界。目前,大气中CO₂浓度已达到80万年来的最高值,这使得遏制全球气候变暖成为国际社会面临的严峻挑战。为此,第一届全球气候大会在1979年召开,随后在1988年联合国成立了政府间气候协作组织(IPCC),以协调全球各国应对气候变化的碳排放策略。1990年,国际社会启动了联合国气候变化大会(COP)减排控温计划,并在1997年签订了《京都议定书》,人类第一次在控制温度和气候变化上达成了一定共识。2015年180个国家签署的《巴黎协定》标志着人类社会控制碳排放达成了共识^[5],为实现此目标,全球超过100个国家已制定了碳中和技术路线图^[6]。

在2020年9月22日举行的第75届联合国大会一般性辩论中,习近平总书记郑重宣布:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,CO₂排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。”此次宣布的“双碳”目标不仅考虑了国际因素,也兼顾了国内需求,是一项经过深思熟虑的重大决策,涉及到中华民族的永续发展。国内层面,“双碳”目

标及其相关决策将促进内需,顺应可持续发展的要求,满足生态环境建设的需要;国际层面,将有助于促进中国在全球治理中遵循并推动国际道德规范,顺应国际趋势,并支持中国倡导的构建人类命运共同体的理念^[7]。

2 中国实现碳中和面临的挑战

在国家层面,不同国家各异的发展阶段决定了其产业结构和生产方式的不同,进而导致了能源消费类型的显著差异以及用能技术和能效的不同,最终影响到碳排放量的多寡。欧盟等发达国家工业占比相对较低,主要产业是高技术、高附加值的第三产业,拥有较为成熟的工业体系和相对先进的生产方式,能效较高,因此其单位GDP的碳排放量(吨CO₂/万元)相对较低。然而,尽管技术先进,但由于美国等发达国家工业整体体量较大,其绝对碳排放量依然较高。与此相反,中国等发展中国家大多处于大规模工业化阶段,工业占比相对较高,生产技术相对落后,能效较低,加之经济体量和人口规模庞大,绝对碳排放量与单位GDP碳排放量均较高。具体而言,中国在能源转型与实现碳中和目标的过程中面临以下三大挑战:

1) 中国能源需求持续增长,保供压力大。目前中国正处于“工业化、城镇化、现代化”的交叉加速期。预计到2035年,人均GDP将翻倍,经济增长成为关键指标。在这一背景下的短一中期内,中国的GDP增长与碳排放仍将保持正相关关系。面对基于资源驱动的GDP增长模式所带来的能源刚性需求,如何在保障高质量发展的同时,实现经济增长目标和能源保供战略需求,是实现碳中和目标的首要基础性挑战。

2) 以煤为主的能源结构,对中国实现碳达峰、碳中和构成了巨大挑战。在中国的能源结构中,“一煤独大”的特征尤为显著,煤炭是最主要的CO₂排放源。中国当前的CO₂总排放量约为100×10⁸ t,其中约70×10⁸ t源自煤炭。2021年,传统化石能源(石油、天然气和煤炭)占中国一次能源消费比重高达75%,其中煤炭独占55%,石油和天然气约占20%^[6]。这种独特的高依赖度使得中国在全球主要国家的减排任务中面临特别的挑战,显著增加了实现碳中和的复杂性和艰巨性^[8]。

3) 中国实现碳中和的时间紧,任务重。英国和德国在20世纪70年代已实现碳达峰,并计划在2050年实现碳中和^[7],从碳达峰到碳中和共有80 a的时间缓冲。美国则在2007年碳达峰,并预计到2050年实现碳中和,期间有43 a时间,并且碳达峰时的排放量约为 50.0×10^8 t,折算年均减排量约为 1.4×10^8 t^[9]。相比之下,中国计划在2030年达到碳达峰,并争取在2060年实现碳中和,只有30 a的时间来完成这一过程,预计年均减排量需达到 3.5×10^8 t,是美国的2.5倍。中国在减碳速度和强度上所面临的挑战前所未有且任务重大。

3 中国碳中和实现路径的探索

基于前述的问题和挑战,本文将中国实现碳中和的基本路径概括为“两个轮子驱动,两大领域发力,一个核心抓手”。

3.1 “两个轮子驱动”

“两个轮子驱动”是指发挥政府导向与市场主导的双重作用。在起步阶段,重点需要政府制定政策,引导企业和社会各界积极参与碳中和行动。长远来看,市场机制将发挥更大的主导作用,以“看不见的手”激励技术创新和产业升级,实现碳排放的减少和经济的可持续发展。

3.2 “两大领域发力”

“两大领域发力”主要是指碳减排和碳消纳。

碳减排包括4个方面:①在能源领域调整一次能源结构,大力发展清洁能源,降低化石能源比例;②在交通领域大力发展电动汽车、氢燃料电池汽车等以替代燃油汽车;③在农业领域发展新型生态农业,减少甲烷排放量;④在建筑领域着力降低建筑碳排放、材料碳排放以及运输和施工中带来的碳排放。

碳消纳措施涵盖4个方面:①陆地生态系统碳汇,是通过光合作用和碳循环,将大气中温室气体固定下来的所有过程、活动或机制^[10],目前中国已经提出“力争10年内种植、保护和恢复700亿棵树”的行动目标;②海洋生态系统碳汇,是通过海洋生物和海洋化学反应吸收大气中的 CO_2 形成海洋沉积物;③碳捕集、利用和封存技术(CCUS),这是目前减少 CO_2 排放的关键技术之一,被国际能源机构定义为“连接现在和未来能源的桥梁”^[11];④ CO_2 直接利用技术,如通过 CO_2 加氢化学法等直接制造能源化工原料,虽然目前相关技术正处于基础研究和攻关阶段,暂时缺乏市场竞争力,其

技术潜力仍然值得期待。

3.3 “一个核心抓手”

“一个核心抓手”就是碳定价、碳交易和碳税。据世界银行报告(2020),全球已有61项碳定价机制正在实施或计划实施中,其中31项属于碳排放交易体系,30项属于碳税,共覆盖约 120×10^8 t CO_2 ,约占全球温室气体排放量的22%^[12]。2021年,中国生态环境部印发并施行《碳排放权交易管理办法(试行)》,标志着中国碳排放权交易市场已全面启动,以基于市场的碳定价机制提高碳密集型行业的碳排放成本,推动实现碳排放强度持续下降。

4 碳中和路径优化的关键问题探讨

4.1 优化方法与数据

自中国提出“双碳”目标以来,众多研究机构对中国碳中和的路径进行了广泛分析,不同机构给出的碳中和技术路线图不尽相同。碳中和路径的分析优化是一个典型的全局优化问题,需要兼顾中国的资源禀赋、经济增长、能源供应安全以及就业成本等因素。因此,关键在于寻找一个能平衡这些因素的方程最优解[公式(1)]。

$$F_{\text{em}}(x_i, i=1, 2, 3, \dots, N) = C_e - C_s = 0 \quad (1)$$

式中: F_{em} 表示碳中和函数, 10^4 t CO_2 ; x_i 代表的是影响碳中和的关键因素,无量纲; C_e 与 C_s 分别代表碳排放量和碳消纳量, 10^4 t CO_2 。此方程的约束条件是要最小化社会总成本,并确保碳排放和碳消纳之间达到平衡。这一优化问题牵涉多个方面,包括投资、成本、就业率、GDP增长和环境保护等,所有这些因素都需要达到一个综合的最优状态。因此,这是一个极其复杂的多目标优化问题。

实现碳中和的关键在于能源转型,而能源转型的关键在于能源结构的调整,其中供给侧化石能源占比和需求侧电气化占比是2大核心问题。在进一步探讨中国的能源转型的路径优化之前,本文参考了美国普林斯顿大学所进行的美国碳中和路径研究(表1)^[13]。该研究设定了5种不同情景,包括参考情景(未能实现美国2050碳中和目标)、快速电气化、慢速电气化、可再生能源受限以及100%可再生能源情景。除去100%可再生能源的极端情景外,在慢速电气化、快速电气化、可再生能源受限情景中2050年化石能源占比约从20%逐步增加至约36%。特别是在可再生能源受限

表1 美国不同能源转型路径下的能源结构比例

Table 1 Proportions of energy types in the energy mix under different energy transition pathways in the U. S.

能源类型	能源结构占比/%					
	2020年	2050年				
	现实情景	参考情景	快速电气化情景	慢速电气化情景	可再生能源受限情景	100 %可再生能源情景
石油	38.66	38.89	15.13	21.21	15.47	0.01
天然气	33.34	39.31	9.98	10.13	20.76	0.03
煤炭	12.41	4.91	0.42	0.21	0.08	0.00
核能	8.86	4.50	7.94	7.61	32.43	0.00
水能	1.08	1.11	1.53	1.27	1.22	1.46
地热能	0.05	0.06	0.08	0.06	0.61	0.15
生物质能	3.59	3.64	17.58	14.61	14.00	16.79
太阳能	0.52	1.97	16.77	13.96	5.65	28.55
风能	1.49	5.61	30.57	30.94	9.78	53.01
化石能源合计	84.41	83.11	25.53	31.55	36.31	0.04
非化石能源合计	15.59	16.89	74.47	68.45	63.69	99.96

情景下,化石能源占比约为36%,而核能则占据了约32%,其后分别是生物质、水电、太阳能和风能。

普林斯顿大学进一步对不同能源转型情景对应的年化投资情况进行了分析,模型分析结果(表2)表明,在2050年之前,实现不同能源转型路径的年化投资将呈现出显著差异,到2050年,年化投资是参考情景的2~4倍。在要求基本淘汰化石能源的100%可再生能源情景下,投资额最高,而在化石能源占比36%的可再生能源受限情景中总投资额最低,大约是100%可

再生能源情景的60%,即节省了近 2×10^{12} 美元^[13]。然而这也存在隐形成本,例如煤矿和石油天然气设施的关闭将影响相关职工的就业率,政策制定需要在应对气候变化、能源安全和经济发展等多重挑战时,做出合乎国情的不同战略选择。美国的能源结构较为优越,其中石油约占39%,天然气约占33%,核能约占9%,煤炭约占12%,非化石能源约占16%。尽管如此,美国仍计划保持约36%的化石能源比例。相比之下,中国当前依赖于以煤炭为主的能源结构,其中煤炭和石

表2 美国不同能源转型路径下的年化投资情况

Table 2 Annualized investments under different energy transition pathways in the U. S.

10¹²美元(基准年:2018年)

投资项目	2020年	2050年				
	现实情景	参考情景	快速电气化情景	慢速电气化情景	可再生能源受限情景	100 %可再生能源情景
可再生能源电厂	0.04	0.08	0.33	0.37	0.16	0.61
其他,包括天然气碳捕集与封存(CCS)发电	0.13	0.11	0.09	0.08	0.11	0.09
石油产品运输	0.03	0.02	0.03	0.01	0	0
核能电厂	0.02	0.02	0.02	0.03	0.15	0
天然气基础设施	0.06	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03
天然气和电力制氢、合成燃料	0	0	0.02	0.08	0.02	0.21
电网电池	0.01	0	0.46	0.01	0.01	0.02
电力传输与分配	0.16	0.29	0.28	0.39	0.41	0.53
增量末端使用投资	0	0	0.03	0.23	0.29	0.28
CO ₂ 运输/储存和直接空气捕获	0	0	0	0.39	0.06	0.06
生物转化工厂	0.01	0.01	0.11	0.09	0.06	0.15
合计	0.46	0.59	1.41	1.71	1.30	1.98

油总占比高达75%。将这一比例降低至2060年的目标(20%)将是一个巨大的挑战,这不仅涉及经济发展,还可能牵涉到能源安全等多方面问题。基于这些考量,本文进一步探讨了中国未来能源结构中化石能源占比与终端电气化率这两大关键问题。

4.2 化石能源占比问题

假设中国保持未来化石能源比例在40%,预计将产生 $32 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ 。面对这一挑战,需考虑多种路径来消纳这些排放。于贵瑞院士指出:如果维持中国当前的陆地生态系统,每年消纳掉的 CO_2 为 $(10 \sim 15) \times 10^8 \text{ t}$,而如果通过扩容认定、生态增汇和生态封存,可能将这一数字提高到 $(20 \sim 30) \times 10^8 \text{ t}$,甚至在乐观估计下能达到 $(30 \sim 45) \times 10^8 \text{ t}^{[14]}$ 。保守估计,到2060年,中国每年通过陆地和海洋生态系统可以消纳 $20 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ 。CCUS技术方面,根据国际能源署(IEA)估算,2060年CCUS技术对全球净零排放目标的贡献率将达到17.4%,到2070年这一比例将超过20%。在没有CCUS技术的情况下,能源转型和应对气候变化的目标将难以实现。预计到2060年,中国通过CCUS技术人工封存的碳量将超过 $15 \times 10^8 \text{ t}$ 。结合陆地生态系统的碳汇,总消纳量可达 $35 \times 10^8 \text{ t}$ 。此外,若人工碳封存技术或陆地生态系统碳汇功能未能完全符合预期,还可以考虑通过海洋碳汇和 CO_2 的直接利用技术来补充消纳差额。例如,通过 CO_2 加氢技术生产甲醇和乙烯,尽管当前这些技术在成本上没有

市场竞争优势,但其技术可行性和发展潜力值得看好。

综上所述,通过综合应用陆地生态系统碳汇、海洋生态系统碳汇、CCUS技术以及 CO_2 的直接利用等4个维度的碳消纳措施,即使是在化石能源占比为40%的情况下,中国在2060年实现碳中和的目标也依然可行,碳消纳措施将有助于中国更好地实现GDP增长和能源安全。

4.3 终端电气化率问题

终端电力消费的比例并非越高越好。基于2060年 CO_2 排放量不超过 $15 \times 10^8 \text{ t}$ 的目标,化石能源的比例必须限制在20%以内,而剩余的需求则需依赖风能和太阳能等可再生能源来满足。然而,根据国家电力投资集团2021年5月的分析,实现80%的终端电气化率具有较大的挑战性,更现实的预期是达到60%~70%,舒印彪院士领导的研究团队则认为70%的终端电气化率更为适宜^[15],也有其他国际团队的研究结果表明终端电气化率应在50%~60%^[4,13]。

以上关于终端电气化率的预估结论同样参考了美国普林斯顿大学的研究结果^[13]。普林斯顿团队根据模型预测的不同能源转型路径下各类能源的供应情况(表3),发现终端电气化率较高的情景下(快速电气化情景、可再生能源受限情景、100%可再生能源情景),电能可以提供 $25\,202 \times 10^{12} \text{ kJ}$ 的能量,约占2050年能源供应总量的48%,而在终端电气化率较低的情景下

表3 美国不同能源转型路径下的能源供应情况

Table 3 Energy supply under different energy transition pathways in the U. S.

能源消耗类型	能源消耗量/(10^{12} kJ)					
	2020年		2050年			
	现实情景	参考情景	快速电气化情景	慢速电气化情景	可再生能源受限情景	100%可再生能源情景
电能	14 009	17 663	25 202	21 041	25 202	25 202
氢能	897	939	3 550	2 643	3 550	3 550
蒸汽	4 661	5 234	5 161	5 173	5 161	5 161
管道天然气	13 364	12 724	3 017	6 509	3 017	3 017
管道天然气原料	150	321	321	321	321	321
汽油	17 925	13 821	743	5 843	743	743
柴油	8 536	8 205	991	3 826	991	991
喷气燃料	3 072	4 039	2 734	2 734	2 734	2 734
液化石油气	848	919	208	499	208	208
液化石油气原料	3 096	4 400	4 400	4 400	4 400	4 400
其他石油	5 006	5 810	3 338	3 955	3 338	3 338
石油化工原料	769	1 433	1 433	1 433	1 433	1 433
生物质和废弃物	664	716	698	690	698	698
煤炭和焦煤	920	1 031	234	264	234	234

(参考情景和慢速电气化情景),电能提供了(17 663 ~ 21 041) $\times 10^{12}$ kJ的能量,约占2050年能源供应总量的23%~35%。但是基于表2中各类情景的投资情况估算结果,更高的终端电气化率可能会意味着更高的投资成本。现阶段尽管太阳能和风能的发展迅速,但在电力系统中的高比例应用仍面临技术瓶颈,尚未完全突破。考虑到电力系统的安全、稳定性以及成本问题,普林斯顿研究团队综合考虑后,认为维持美国终端电力消费在维持在50%左右是一个较为理想的平衡点。相较而言,德国的电气化率已超过60%,显示出各国在电气化推进方面的差异。根据国家电力投资集团的研究,预计到2050年,中国工业领域的终端电气化率能从目前的30%提升至50%,交通领域预计从5%增长至50%,而建筑领域则可能从30%增至60%,并可能在随后10年内达到60%~70%。这些数据表明,尽管中国的电气化程度有显著进步,但在当前技术和系统条件下达到80%的全面电气化目标仍难以实现。

5 碳中和约束下能源转型的主要趋势

5.1 多元化

中国正加速推进能源来源的多元化,尤其是在可再生能源领域,风电和太阳能发电的增长尤为显著。此外,生物质发电、氢能、新型储能技术、煤制油、煤制气及地热能等也在能源供应结构中占据重要位置。

5.2 低碳化

低碳化是全球能源发展的重要趋势。据国际能源署(IEA)预测,太阳能发电装机量将迅速增长,而煤电将持续下降,核电和电池储能则预计将稳步增长。特别是太阳能和风能发电装机量的增长最为迅猛,预计到2030年,风能装机量将是2020年的4倍,而太阳能光伏装机量将超过风能。此外,电动汽车的数量预计将是现有水平的18倍,相关技术是发展最快的清洁能源技术。随着这些技术的发展,中国单位GDP的能耗强度预计将逐年减少4%。

5.3 再电气化

工业、交通和建筑领域的电气化率正在逐年增加。据国家电力投资集团预测,到2060年,终端电气化率将达到60%~70%,终端电力消费总量将介于(15~18) $\times 10^{12}$ kW·h,届时清洁能源的装机总量预计将占能源相关总装机量的90%以上。

5.4 数字化和智能化

这一趋势涉及能源数据的采集与监测、能源管理与优化、能源交易与市场化、以及能源设备与服务的智能化。数字化技术的应用不仅能提升能源生产的效率,还能优化能源消耗、排放和资源配置,增强能源供应的安全性和可靠性,进一步推动能源行业的转型升级。

5.5 分散化

尽管集中式太阳能发电在中国部署广泛,分布式发电显示出巨大的潜力,特别是农村屋顶光伏。江亿院士研究团队发布的数据显示,农村屋顶光伏的装机潜力高达19.70 $\times 10^8$ kW,年发电量潜力达2.95 $\times 10^{12}$ kW·h^[16]。这意味着乐观估计,在未来农村地区的屋顶光伏将可能承担起中国规划的40 $\times 10^8$ kW光伏装机总量的一半。

6 讨论和结论

中国实现碳中和与能源转型任重道远,要基于实际情况,充分发挥政府的引导和市场的主导作用,顺势而为,大力发展碳减排和碳消纳核心技术,在保证能源安全和能源供给的前提下持续推进碳中和的进程。在此过程当中一定处理好5大关系:①要处理好经济发展、能源安全和碳中和的关系,把稳定发展当作首要目标。②要处理好国家层面减排目标和各省、市、企业之间的关系,积极做好国家层面统筹协调。碳达峰、碳中和是整个中国的事情,在全国一盘棋的框架下,各个行业或者各省市各司其职,并且要差异化推进工作,不能齐步走,一刀切。③要处理好传统化石能源公司和新能源公司的关系。在积极支持新能源企业发展的同时,也需要依赖传统能源公司协作支撑能源产业的稳定过渡,这需要在国家层面重视行业内部的平衡性和协同性。④要处理好短期行动与长期目标的关系。着眼长期、着手近期,积极培育能改变能源结构的变革性技术,确保技术创新能够支撑能源行业的长远发展。⑤处理好中国与全球的关系。在全球碳减排努力中既要引领趋势,又要确保不受外部因素制约,实现国际合作与自主发展的平衡,保护国家的发展权和生存权。

总而言之,在面向碳中和的能源转型中,如何制定清洁、高效、可靠、低碳的路径策略是事关未来若干年中国经济社会发展的重要战略问题,需要更多切合中国实际的讨论与研究,以确保策略的实用性和有效性。

致谢:本文写作过程中部分观点得到了于贵瑞院士、戴民汉院士等的具体指导,北京大学能源研究院研

究生冯轶楠等协助了本文的修改工作。

参 考 文 献

- [1] 鄢琼伟, 陈浩. GDP与能源消费之间的关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(7): 13-19.
YAN Qiongwei, CHEN Hao. Research on the relationship between GDP and energy consumption [J]. China Population Resources and Environment, 2011, 21(7): 13-19.
- [2] Energy Institute. Energy institute statistical review of world energy [R]. [S. l.]: [s. n.], 2023.
- [3] 李洪言, 赵朔, 林傲丹, 等. 2019年全球能源供需分析——基于《BP世界能源统计年鉴(2020)》[J]. 天然气与石油, 2020, 38(6): 122-130.
LI Hongyan, ZHAO Shuo, LIN Aodan, et al. Analysis on world energy supply & demand in 2019—Based on BP statistical review of world energy (2020)[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(6): 122-130.
- [4] 王铃. IEA发布《2022年全球二氧化碳排放》报告[J]. 石油炼制与化工, 2023, 54(6): 110.
WANG Ling. IEA releases the 2022 Global Carbon Dioxide Emissions report [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2023, 54(6): 110.
- [5] 巢清尘, 张永香, 高翔, 等. 巴黎协定——全球气候治理的新起点[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 61-67.
CHAO Qingchen, ZHANG Yongxiang, GAO Xiang, et al. Paris agreement: A new start for global governance on climate [J]. Climate Change Research, 2016, 12(1): 61-67.
- [6] 丁仲礼, 张涛. 碳中和: 逻辑体系与技术需求[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
DING Zhongli, ZHANG Tao. Carbon neutrality: Logic system and technical requirements[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [7] 金之钧, 江亿, 戴民汉, 等. 碳中和概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2023.
JIN Zhijun, JIANG Yi, DAI Minhan, et al. Introduction to carbon neutrality[M]. Beijing: Peking University Press, 2023.
- [8] 金之钧, 张谦, 朱如凯, 等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-819.
JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 801-819.
- [9] 王超, 孙福全, 许晔. 世界主要经济体碳中和战略剖析及启示[J]. 世界科技研究与发展, 2023, 45(2): 129-138.
WANG Chao, SUN Fuquan, XU Ye. Analysis of carbon neutral strategy of the world's major economies and its enlightenment[J]. World Sci-Tech R & D, 2023, 45(2): 129-138.
- [10] 简尊吉, 朱建华, 王小艺, 等. 我国陆地生态系统碳汇的研究进展和提升挑战与路径[J]. 林业科学, 2023, 59(3): 12-20.
JIAN Zunji, ZHU Jianhua, WANG Xiaoyi, et al. Research progress and the enhancement challenges and pathways of carbon sinks in China's terrestrial ecosystems [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(3): 12-20.
- [11] 黄晶. 碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展的几点研判[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(1): 100.
HUANG Jing. Some understanding of the research on the development of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology [J]. China Population Resources and Environment, 2023, 33(1): 100.
- [12] International Carbon Action Partnership. Emissions trading worldwide: Status report 2020 [R]. Berlin: International Carbon Action Partnership, 2020.
- [13] LARSON E, GREIG C, JENKINS J, et al. Net-zero America: Potential pathways, infrastructure, and impacts [R]. Princeton, NJ: Princeton University, 2021.
- [14] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423-434.
YU Guirui, HAO Tianxiang, ZHU Jianxing. Discussion on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 423-434.
- [15] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [16] 江亿, 胡珊. 屋顶光伏为基础的农村新型能源系统战略研究[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(3): 272-282.
JIANG Yi, HU Shan. Research on the development strategy of production and consumption integrated roof-top PV system in rural China [J]. Climate Change Research, 2022, 18(3): 272-282.

(编辑 张玉银)