

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.06.003

“双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战

Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak

喻小宝, 郑丹丹, 杨康, 孔杰, 章天浩

YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, KONG Jie, ZHANG Tianhao

(上海电力大学 经济与管理学院, 上海 200090)

(School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

摘要:“双碳”目标升级为国家战略,电力行业作为实现“双碳”目标的重要领域,其低碳发展对我国实现“双碳”目标起着至关重要的作用。基于“碳达峰”和“碳中和”的定义与发展要求,结合我国能源结构现状以及实现“碳中和”的4个主要路径,包括电力生产清洁低碳化,发展氢能源、碳捕捉技术,以及推动交通的电动化、氢能化,对实现“双碳”目标下能源电力行业面临的碳交易市场、储能、不同行业转型路径等机遇与挑战进行了分析研究,为未来能源电力行业更好地实现“双碳”目标提供参考。

关键词:碳中和;碳达峰;能源电力;碳减排;低碳经济;固碳;氢能源;碳捕集;可再生能源消纳

中图分类号:TM 732:TK -9

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2021)06-0021-12

Abstract: The goal of carbon neutrality and carbon peak has been upgraded to a national strategy. As an important field of the goal, the follow-up development of power industry plays a vital role in achieving carbon neutrality and carbon peak in China. Based on the definition and development requirements of carbon peak and carbon neutralization, under the current situation of China's energy structure and carbon emissions, there are four main paths to achieve carbon neutrality which include clean and low-carbon power production, application of hydrogen energy, development of carbon capture technology and promotion of the utilization of electricity and hydrogen energy in transportation industry. With the goal of carbon neutrality and carbon peak, energy and power industry faces opportunities and challenges in three aspects, carbon trading market, energy storage and industrial transformation between different industries. Analyzing these challenges provides a reference for the energy and power industry to adapt to the goal of carbon neutrality and carbon peak.

Keywords: carbon neutrality; carbon peak; electric energy; carbon emission; low-carbon economy; carbon sequestration; hydrogen energy; carbon capture; renewable energy consumption

0 引言

全球气候变暖已经是不争的事实,在联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告中提到,1880—2012年,全球地表平均温度上升 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。随着气候变暖的不断加剧,气候变化给人类造成了巨大威胁,例如沿海洪涝和风暴潮、内陆洪水、海洋生态系统及服务丧失、陆地生态系统丧失、极端高温和极寒引发的健康问题等,可以说,气候变化是人类社会面临的重大非传统安全问题^[2]。在这种背景下,从2009年的哥本哈根会议到2015年的巴黎气候变化大会,中国早已积极参与国

际社会碳减排。在2020年9月的联合国大会上,我国明确提出将努力争取2060年前实现“碳中和”,这也是我国首次在国际社会上提出“碳中和”的承诺^[3]。

对于“碳中和”的研究并不是从近期开始的,在以往关于碳减排的研究中,有一些学者早已开始对“碳达峰”和“碳中和”的相似问题开展研究。张九天等^[4]对“碳中和”背景下碳捕集、利用与封存(CCUS)等大规模碳减排技术面临的挑战进行了分析,并对该技术发展应该关注的重点任务也做了分析。喻小宝等^[5]研究了碳市场与电力市场的关系,基于此构建了电力行业碳减排的动力学模型,结果表明所提出的反馈机制能够有效地抑制电力行业碳排放量增长的趋势。徐冬等^[6]梳理了碳捕获、利用与封存技术的发展现状,通过对中国低碳制氢路

收稿日期:2021-05-13;修回日期:2021-05-30

基金项目:上海市哲学社会科学规划课题(2020BGL032)

径的分析,评估了CCUS耦合低碳制氢的减排潜力及市场竞争力,促进CCUS耦合制氢发展对于实现大气环境治理和助力实现“碳中和”目标具有重要意义。黄欣等^[7]基于碳排放权交易背景,运用微分博弈理论研究了政府与其所辖多个工业企业之间的Stackelberg减排博弈问题,同时考察了多个地区进行合作减排对政府及企业的策略影响情况。高涵等^[8]对有助于提升电动汽车碳减排潜力的关键创新技术以及创新运营模式展开研究,同时提出了推广电动汽车创新技术发展、发掘碳减排潜力的对策与建议。在我国提出“双碳”目标的背景下,“碳中和”与“碳达峰”相关研究更多地在我国各行业中展开,王利宁等^[9]模拟了2060年实现“碳中和”目标的中国能源减排及转型路径,结果表明在当前模式下,中国实现“碳中和”目标面临较大的挑战和难度,中国能源体系须更早、更大力度转型。黄畅等^[10]对燃煤发电技术、产业发展等做了相关研究,并且提出了燃煤发电产业升级策略,助力我国节能减排与“碳中和”国家战略的顺利实施。刘晓龙等^[11]从中国实际国情和碳减排目标出发得出中国在“碳中和”目标背景下能源高质量发展面临的挑战,在此基础上,提出“碳中和”背景下中国能源高质量发展三大显性途径,即节能提效、优化能源结构和技术创新。焦念志等^[12]为落实“碳中和”国家战略提供科技支撑,提出了包括陆海统筹减排增汇、海洋缺氧酸化环境减排增汇、滨海湿地减排增汇等8个海洋负排放相关的基本路径。龙惟定等^[13]对我国城市民用建筑的隐含碳和运行碳作了测算,提出了城市建筑“碳中和”的5项基本措施,强调城市开发建设的方式必须从粗放型外延式发展转向集约型内涵式发展。

综上所述,我国关于“双碳”的研究主要是在碳减排技术以及各行业的初步研究,并没有针对“双碳”背景下能源电力行业所面临的机遇与挑战进行详细的分析研究,如何促进低碳发展,最终实现“碳达峰”和“碳中和”,不仅仅是中国各行各业面临的挑战,更是一次行业转型和发展的机遇。本文就能源电力行业如何实现“双碳”目标,给出“双碳”目标的定义,剖析当前中国能源结构,分析实现“双碳”目标路径和潜在机遇,最后给出一些能源转型的建议措施。

1 “双碳”目标的内涵

1.1 “碳达峰”与“碳中和”

实现“碳达峰”和“碳中和”愿景是生态文明建设的目标之一,也是确定发展目标和选择何种

发展道路的重大战略决策^[14]。从发展观来看,“双碳”目标要求高质量的发展和高水平的保护;从新时代目标来看,“双碳”目标是构建绿色低碳循环发展的经济体,建设人与自然和谐共生的现代化体现;从新发展格局来看,“双碳”目标是经济社会发展全面绿色转型,以能源绿色低碳发展为核心,形成节约资源和保护环境的产业结构、生产方式、生活方式、空间格局。

1.1.1 碳达峰

“碳达峰”的基本内涵是指某个地区或行业年度二氧化碳排放量达到历史最高值,然后经历平台期进入持续下降的过程,是二氧化碳排放量由增转降的历史拐点^[15]。

由于我国目前对能源需求仍处在增长期,化石能源以及高耗能产业占比过高,因此想要在2030年前实现“碳达峰”存在一定难度。“双碳”目标示意如图1所示(数据来源:清华大学气候变化与可持续发展研究院《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》(2020年10月发布)、波士顿咨询、Wind、华泰证券研究所)。从图中可以看出,在2030年实现“碳达峰”,需要在“十四五”和“十五五”期间做好充分准备,尤其是当前阶段的“十四五”期间,对涉及碳排放的多个领域进行管控,才有可能在2030年实现“碳达峰”。

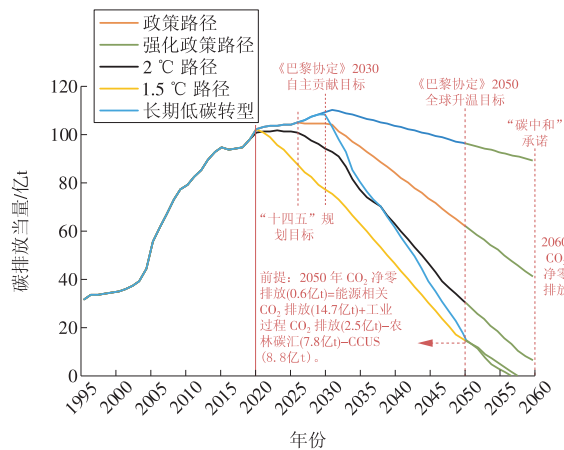


图1 “双碳”目标示意

Fig. 1 The goal of carbon neutrality and carbon peak

1.1.2 碳中和

“碳中和”的基本内涵是指某个地区在一定时间内人为活动所产生的二氧化碳排放量,与其通过植树造林、技术手段等吸收的二氧化碳相互抵消,从而实现二氧化碳“零排放”的效果^[16]。

“碳中和”示意如图2所示(数据来源:清华大学气候变化与可持续发展研究院《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》(2020年10月发布)、波士顿

咨询公司、Wind、华泰证券研究所)。从图中可以看出,相比其他发达国家,中国“碳中和”之路异常困难,从“碳达峰”到“碳中和”的 30 年,碳减排的斜率明显高于其他发达国家,例如欧盟规划从 1980—2050 年,用 70 年的时间实现从“碳达峰”到“碳中和”,而留给中国实现 2060 年“碳中和”目标的时间已不到 40 年。同时,相较于其他承诺在 2050 年左右实现“碳中和”且已经实现“碳达峰”的国家来说,我国在承诺 2060 年实现“碳中和”的时候并没有达到“碳达峰”,因此,中国实现“碳中和”需要付出更大的努力。

1.2 低碳经济

低碳发展的实质是以应对全球气候变化、保护人类家园为导向,以控制二氧化碳排放为载体,以低碳技术和低碳制度创新为保障,加快形成以低碳为特征的产业体系、能源体系和生活方式,从而实现社会经济的可持续发展^[17]。低碳经济减排措施见表 1。可以看出,实现“双碳”目标离不开低碳经

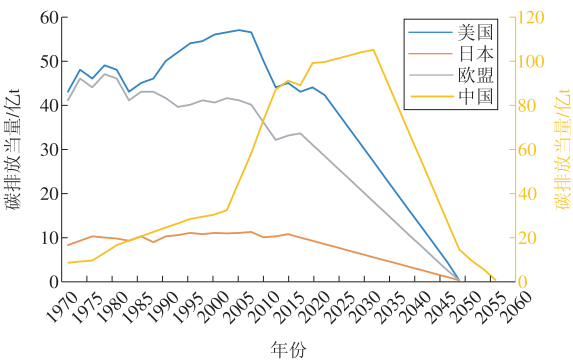


图 2 “碳中和”示意
Fig. 2 Carbon neutrality

济的支持,本文根据 GB/T 4754—2017《国民经济行业分类》挑选 6 个主要行业开展低碳经济研究,包括农、林、牧、渔业,采矿业,制造业,电力、热力、燃气及水生产和供应业,建筑业,交通运输、仓储和邮政业。其中,对于电力、热力、燃气及水生产和供应业而言,应当着重在低碳发电领域做出贡献,提高清洁能源比例,从源头控制碳排放,从而达到碳减排效果,实现低碳经济。

表 1 低碳经济减排措施
Tab. 1 Emission reduction measures for low-carbon economy

行业	可持续需求	低碳发电	电气化	燃料转换	碳封存
农、林、牧、渔业	√				√
采矿业	√	√	√	√	√
制造业	√	√	√	√	
电力、热力、燃气及水生产和供应业		√			√
建筑业	√	√	√	√	
交通运输、仓储和邮政业	√		√	√	

2 “碳中和”背景下能源结构与关键技术

实现“碳达峰”和“碳中和”离不开能源结构调整的支撑,这需要厘清当前能源结构下的碳排放来源。

根据《联合国气候变化框架公约》下的《IPCC 国家温室气体清单指南》,通过对人类活动进行分析,将碳排放来源主要划分为五大类,包括能源活动、工业生产活动、农业活动、林业活动和废弃物处理等活动^[18]。其中,能源活动是指在化石燃料的开采和化石燃料的燃烧过程中所产生的二氧化碳排放,占总碳排放量的 8 成以上^[19];工业生产活动是指在工业生产中二氧化碳排放之外的其他物理或化学反应过程导致的二氧化碳排放,占比约 15.4%。

由此可见,能源活动和工业生产活动所产生的二氧化碳排放量是当前人类活动产生二氧化碳的最主要来源。碳排放构成全景如图 3 所示。

2.1 能源结构

2.1.1 一次能源消费结构

近年来,我国一次能源消费结构发生了一定的变化。我国一次能源消费结构中,煤炭、石油仍是我国能源消费的主要占比,但 2000 年以来总体呈下降趋势,天然气能源消费整体占比较少但逐年递增,反映出我国能源消费结构仍以化石能源为主。由于我国近年来大力发展水电、核电等清洁能源和可再生能源,水电的能源消费占比增长较快,而核能在我国能源结构中占比较少,仍有较大的发展空间。2000—2018 年我国一次能源消费占比如图 4 所示(数据来源:国家统计局)。

在本世纪初,我国非化石能源消费占比的增长较为缓慢,总体维持在 5%~7% 的水平。而自 2008 年至今,我国在非化石能源领域的各项技术已取得较大进步,非化石能源在我国一次能源消费中的占比增长迅速,在 2018 年其占比已超过了 16%,说明在我国一次能源消费结构中,非化石能源正逐步成

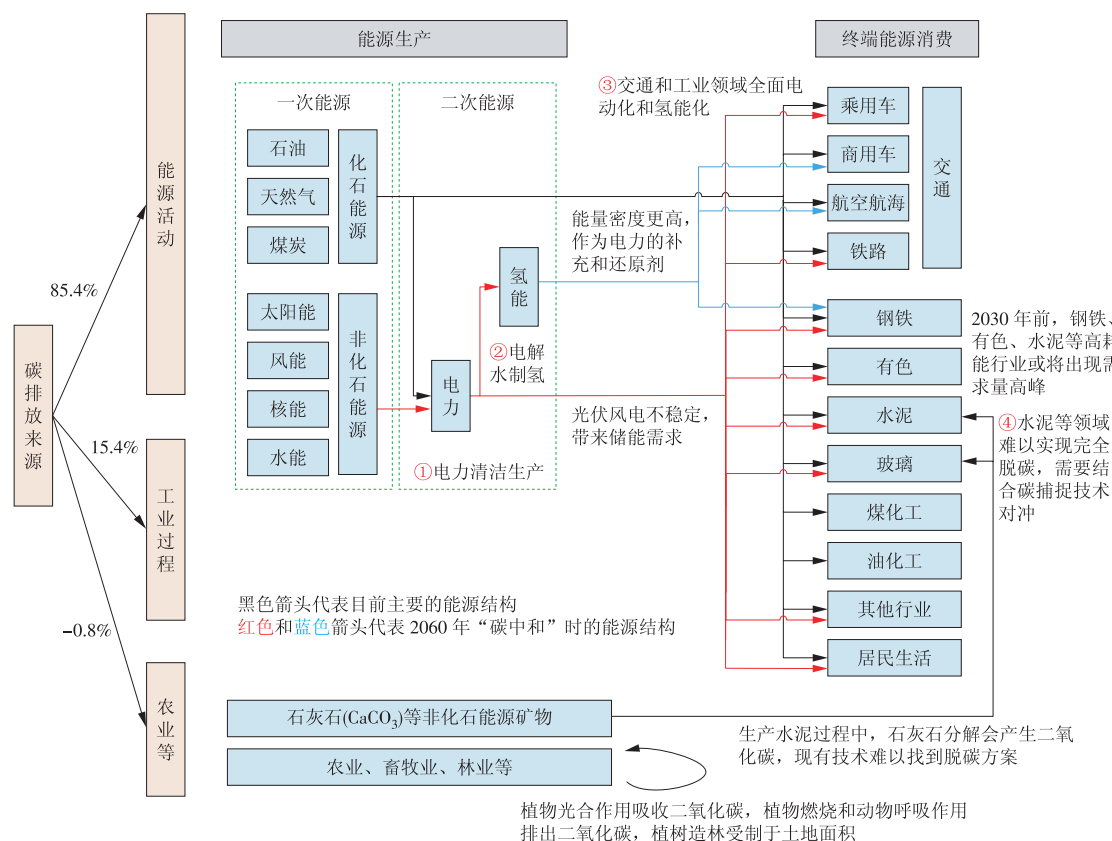


图 3 碳排放构成全景

Fig. 3 Panorama of carbon emissions' composition

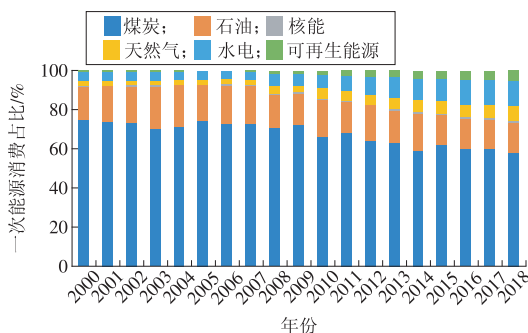


图 4 2000—2018 年我国一次能源消费占比

Fig. 4 Proportion of primary energy consumption from 2000 to 2018 in China

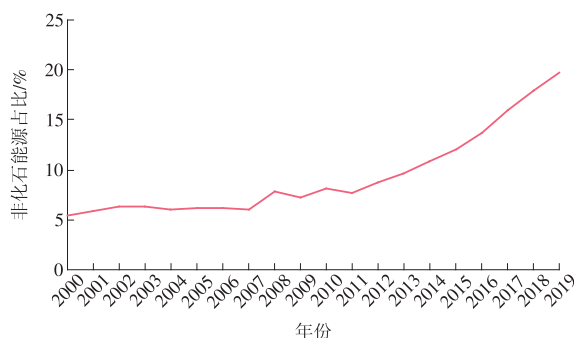


图 5 2000 年以来我国非化石能源占比变化趋势

Fig. 5 Variation trend of non-fossil energy's proportion in China since 2000

为主要的能源消费来源之一。2000 年以来我国非化石能源占比变化趋势如图 5 所示(数据来源:国际能源可再生能源机构)。

根据国家能源局、国家统计局、中电联、中信证券研究部的预测,2010—2019 年,我国能源消费结构中,一次能源消费量逐年递增,而由于发电技术的进步以及能源利用效率的提升,平均发电煤耗逐年递减,因此折算后的电力需求增速低于一次能源消费量的增速。非化石能源占比以及非化石电力需求也不断提升,其中,风光发电量需求及实际占比增长较为明显。基于上述“十二五”“十三五”期间我国能源消费结构数据,国家能源局、国家统计局等相关部门对“十四五”“十五五”光伏发电发电

量需求做出预测。预计在“十四五”“十五五”期间,我国一次能源消费量仍将增长,将于 2030 年达到 59.60 亿 t 标准煤,但一次能源消费量的增速将放缓,体现在年均复合增长率(CAGR)的降低,而平均发电煤耗将进一步降低,于 2030 年达到 258.5 g/(kW·h)。预计非化石能源电力需求将逐年递增。其中,光伏风电发电将得到大力发展,风光发电量需求也将显著提升,相比于 2019 年的 661.2 TW·h,2030 年风光发电量需求预测将达到 2 950.1 TW·h。中国能源消费结构及“十四五”“十五五”光伏风电发电量需求测算见表 2(数据来源:国家统计局、国际能源可再生能源机构、华泰证券研究所)。

表 2 中国能源消费结构及“十四五”“十五五”光伏风电发电量需求测算

Tab. 2 Energy consumption structure in China and the demand for electricity generated by PV systems and wind turbines during the 14th and 15th Five-Year Plan

年份	一次能源消耗标准煤/亿t	平均发电煤耗/[g·(kW·h) ⁻¹]	折算电力需求/(TW·h)	非化石能源占比/%	非化石电力需求/(TW·h)	水电发电量/(TW·h)	核电发电量/(TW·h)	生物质发电量/(TW·h)	风光发电量需求/(TW·h)	风光实际发电量/(TW·h)	风光实际发电量占比/%
2015	42.99	315.4	13 630.3	12.10	1 649.3	1 112.7	171.4	52.7	312.5	223.3	3.98
2016	43.58	312.1	13 963.5	13.50	1 885.1	1 174.8	213.2	64.7	432.4	308.9	5.16
2017	44.85	309.4	14 495.8	13.80	2 000.4	1 194.7	248.1	79.4	478.2	421.0	6.56
2018	46.40	307.6	15 084.5	14.30	2 157.1	1 232.1	295.0	90.6	539.4	543.5	7.77
2019	48.60	306.9	15 835.8	15.30	2 422.9	1 301.9	348.7	111.1	661.2	630.0	8.60
2025E	54.50	295.0	18 458.3	20.00	3 691.7	1 615.0	542.8	169.2	1 549.2	1 364.6	
				22.00	4 060.8					1 733.8	
				25.00	5 222.6					2 532.3	
2030E	59.60	285.5	20 890.2	26.00	5 431.5	1 720.2	764.2	205.9	2 741.2		
				27.00	5 640.4					2 950.1	

2.1.2 重点行业能源消费结构

随着我国经济社会的不断发展,重点行业的能源消费结构也发生着相应的变化。以制造业和交通运输行业为例,我国 2000—2018 年制造业的能源消费结构中,煤炭、石油、天然气、煤油、柴油等一次能源仍占主导地位,其中煤炭消费占比最高。而电力作为被广泛使用的二次能源,在我国制造业中占有一定比例,总体也呈持续增长的态势,说明我国制造业的电气化、自动化水平不断提高,对电能的消费需求也在逐年提升。2000—2018 年我国制造业能源消费占比如图 6 所示(数据来源:国家统计局、国际能源可再生机构、华泰证券研究所)。

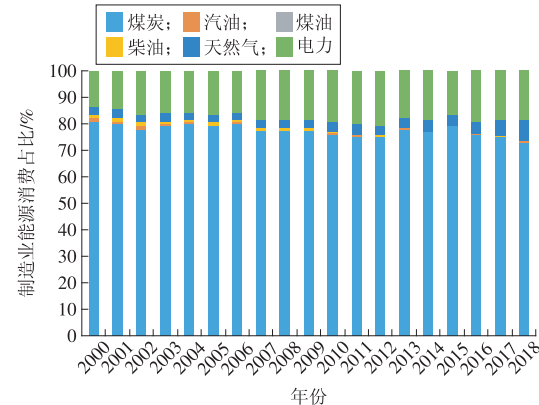


图 6 2000—2018 年我国制造业能源消费占比
Fig. 6 Proportion of energy consumption in manufacturing industry in China from 2000 to 2018

我国 2000—2018 年交通运输业的能源消费结构中,煤炭自 2000 年以来占比显著减少,作为交通运输业曾经的主要能源消费来源之一,煤炭几乎已被其他能源取代。汽油、柴油、煤油在交通运输业

的能源消费结构中占比较大,并且自 2000 年以来维持在较为稳定的水平。天然气、电力是交通运输业的新兴能源,并在近年来得到了较明显的发展,正逐步成为交通运输业主要的能源消费来源。由此可以看出,在我国的交通运输业中,低效、落后的能源正逐渐被抛弃,高效、清洁的能源正逐步得到应用。2000—2018 年我国交通运输业能源消费占比如图 7 所示(数据来源:国家统计局、国际能源可再生机构、华泰证券研究所)。

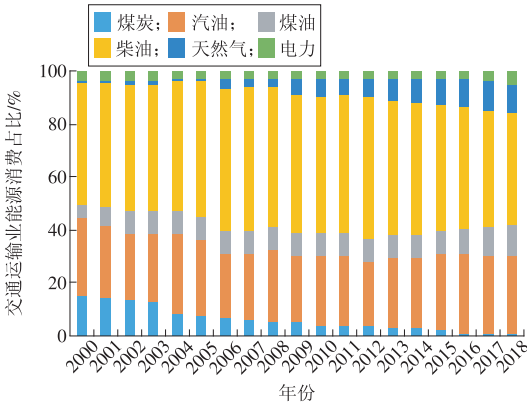


图 7 2000—2018 年我国交通运输业能源消费占比
Fig. 7 Proportion of energy consumption in transportation industry in China from 2000 to 2018

2.1.3 主要行业电力消费结构

2000—2018 年,我国电力总消耗量逐年递增,到 2018 年已超过 7 000 TW·h,说明随着我国经济社会的不断发展,对电能的需求量也逐步提高。在本世纪初,我国电力总消耗量同比增速较快,而近年来有所放缓,总体维持在 5%~10% 的水平。2000—2018 年我国电力总消耗量的变化趋势如图 8 所示

(数据来源:国家统计局、国际能源可再生能源机构、华泰证券研究所)。

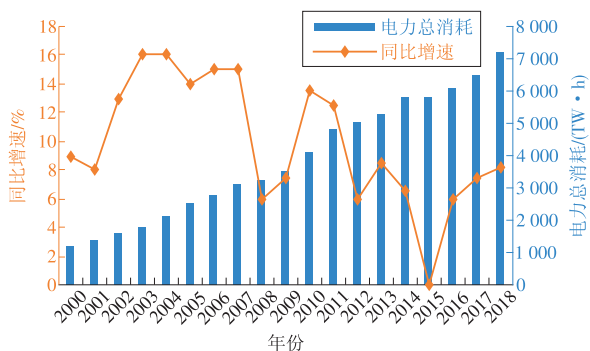


图8 2000—2018年我国电力总消耗量的变化趋势

Fig. 8 Variation trend of total electricity consumption in China from 2000 to 2018

在2000—2018年我国主要行业电力消耗结构中,第一产业(农林牧渔业)由于电力需求相对不高,在主要行业电力消耗量中占比较小。制造业作为第二产业的主要部分,在我国主要行业电力消耗量中占比一直较高,建筑业、采掘业和电煤水业也在主要行业电力消耗量中占一定的比例。第三产业较少涉及对大型用电设备的使用,例如批发零售和住宿餐饮业等,因此在我国主要行业电力消耗量中占比较小。2000—2018年我国主要行业电力消耗占比如图9所示(数据来源:国家统计局、国际能源可再生能源机构、华泰证券研究所)。

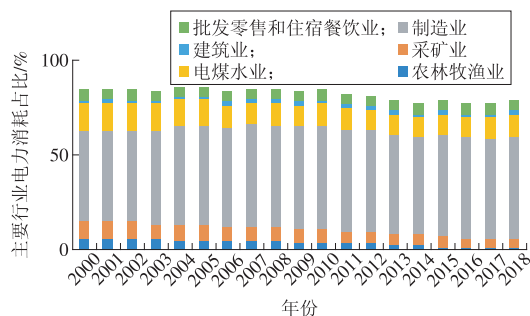


图9 2000—2018年我国主要行业电力消耗占比

Fig. 9 Power consumption structure of major industries in China from 2000 to 2018

2.2 “碳中和”实现的关键技术

实现“碳中和”的途径主要分为4个方面:电力生产清洁低碳化,发展氢能源,发展碳捕捉技术,以及推动交通的电动化、氢能化^[20]。

2.2.1 电力生产清洁低碳化

发电行业是当前碳排放的最主要来源,其碳排放占全部碳排放的1/3以上,实现“碳达峰”和“碳中和”离不开发电行业的碳减排,目前国内主要电力来源还是火电,是碳排放的关键,需要通过提高清洁能源发电比例来降低碳排放,包括光伏、风电、核

电和水电等。其中,水电由于受到水力资源的限制,未来替代火力发电的潜力较小;核电由于受到近年来其他国家及地区核事故影响,国内新增核电容量也受到较大影响,替代效应不明显;风电和光伏的潜力最大,我国国土面积辽阔,适合风电和光伏发展,目前主要受“弃能”影响较大,未来随着风电、光伏建设成本的进一步降低以及配套储能设施的不断完善,替代火力发电的可能性最大,也是实现“碳达峰”和“碳中和”最佳清洁能源^[21]。

2.2.2 氢能源发展

能源供给结构中,电力作为二次能源,在一定程度上替代了传统化石能源^[22],但有部分工业生产场景无法使用电力供能,例如电池能量密度限制,电能无法作为一些化学反应的还原剂,而继续使用化石能源有悖于实现“双碳”目标,故而需要其他清洁能源作为补充。氢能源的燃烧只产生水,可以作为电能的重要补充能源备选。电池的能量密度远低于化石能源和氢能源,在航空航天等领域无法用电力作为动力来源,氢能源很好地解决了这一问题;另外在工业生产中,例如炼钢过程的还原反应,电力只能提供能量而无法作为还原剂,氢能源也能有效解决这一问题。截至目前,国内制氢过程主要来源于工业副产物和煤炭制氢,这一过程会产生碳排放,未来氢能源应该来源于光伏、风电等清洁电力对水的分解。

2.2.3 碳捕捉技术

在工业生产中,有些过程产生的碳排放并不来源于化石能源,而来源于矿物质,例如石灰石的分解过程。水泥、玻璃等产品的制造过程离不开石灰石的分解过程,石灰石本身含有碳元素,该过程必然也会产生大量碳排放。在当前技术水平下,并没有适合替代的绿色建筑材料,大概率在未来几十年还会由于这些工艺的存在导致碳排放。降低这一过程中的碳排放可通过其他途径实现,例如大量的植树造林和发展碳捕捉技术等。考虑到土地资源的约束,植树造林并不能完全解决碳吸收的问题,未来需要更多考虑碳捕捉技术的发展,通过技术手段对二氧化碳进行捕集、封存、利用等,从而实现碳减排的目的^[23]。

2.2.4 交通运输业的电动化

除了工业生产过程中产生的碳排放之外,在日常生活中接触到的交通领域也是实现碳减排关注的重点之一。近年来电动汽车的推广,减少了对石油进口的压力,也是减少碳排放的措施之一。在乘用车、商用车领域,随着“三电”技术的不断进步,未来一段时间实现高续航、快速补能等目标并不会成

为限制电动汽车发展的障碍,从近年来各国电动汽车市场保有量占比的增长可以看出,电动汽车必然会取代燃油汽车,使用清洁能源发电,可全过程降低碳排放^[24];在航空航天领域,受电池功率的限制,可以采用氢能源或者氨能源替代传统化石能源,从而解决电动化在航空航天领域限制的问题,氨能源产业链如图10所示。

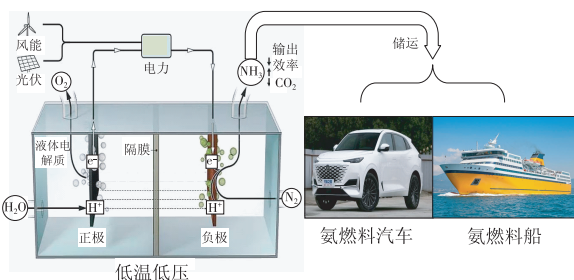


图 10 氢能源产业链

Fig. 10 Ammonia energy industry chain

3 实现“双碳”目标的机遇

3.1 碳交易市场

“碳市场”即二氧化碳排放权交易市场^[25]。在大气环境能够承受的范围内,政府通过给予企业向大气中排放一定量二氧化碳的权利,并引入总量控制与市场交易机制,在控制二氧化碳排放总量的前提下,让二氧化碳的排放权利实现自由交易。碳市场的功能主要体现在2方面:激励功能,即激励新能源产业或非化石能源产业,以高效率改变能源产业结构;约束功能,即约束抑制化石能源产业,以低成本提高能源利用效率。

我国碳市场的建设,由开展碳排放交易试点工作起步。2011年,国家发展和改革委员会(以下简称国家发改委)颁布《关于开展碳排放权试点工作的通知》,北京、上海、天津、重庆、湖北、广东和深圳7省市率先开展碳排放权交易试点工作。为进一步探索全国统一碳市场的建设,国家发改委于2012年出台了《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》,形成了规范的碳市场管理机制。经过数年运行,7个试点省市于2014年全部启动交易,碳价格激励企业减排的机制初步形成,碳交易示意如图11所示。图中MRV为监测、报告、核查。2017年年底,国家发改委印发《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》,标志着全国碳排放交易体系完成了总体设计并正式启动。截至2019年6月,7个试点省市配额现货交易约3.4亿t,交易额约66.2亿元,碳交易覆盖总量已跃居世界首位,我国单位国内生产总值二氧化碳排放(即碳强度)下降4.0%,比2005年累

计下降45.8%,相当于减排52.6亿t二氧化碳,非化石能源占能源消费总量比重达到15.3%(中国电力规划设计总院《中国能源发展报告2019》《中国电力发展报告2019》),基本扭转了二氧化碳排放快速增长的局面。

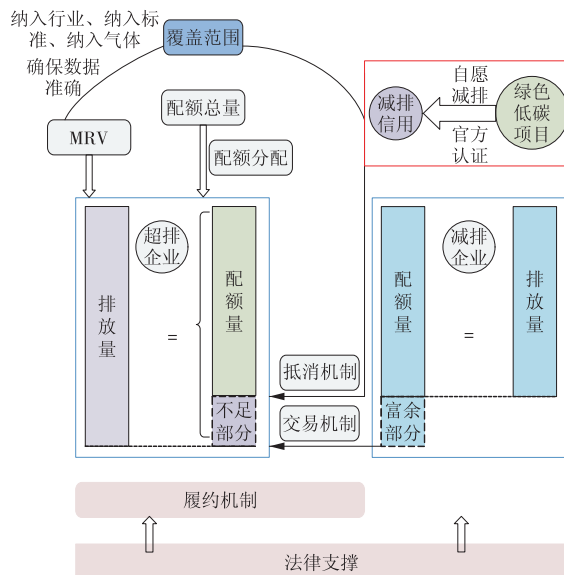


图 11 碳交易示意

Fig. 11 Carbon trade

近年来,国家主管部门陆续发布了24个行业企业排放核算报告指南和10个行业企业碳排放核算国家标准,并于全国多地开展了区域内碳市场能力建设培训,为全国碳市场的建设提供了可靠的政策支持 and 人才储备。此外,试点碳市场自启动运行以来也积累了丰富的经验,为全国碳市场的运行提供了有力保障。2021年年初,随着生态环境部发布《碳排放权交易管理办法(试行)》,标志着全国碳排放交易体系正式投入运行,政府将在碳排放配额、企业参与范围、产品定价机制等方面作出系统性的安排,创造出更广阔的碳市场交易空间,我国碳交易市场的发展前景值得期待。

3.2 储能

储能行业是当前匹配风电、光伏发展的主要配套行业,风电、光伏的不稳定性导致其弃能率一直居高不下,从而限制其发展,而储能行业的发展对于减少这一影响起到了至关重要的作用^[26]。储能 在电力行业的应用可划分为三大块:发电侧、电网侧和需求侧,此外还包括微电网和分布式离网等。其中,发电侧储能主要通过火储联合调频,从而稳定输出功率,通过负荷调节平滑间歇性能源供能,提高新能源消纳和电网备用容量等;在电网侧,输配电储能能够实现提高电能质量、降低线路损耗、提高电网备用容量、提高输配电设备利用效率和延

缓增容需求等作用;在需求侧,主要是分布式储能系统,能够提高分布式能源消纳率、起到削峰填谷、负荷转移的作用,此外可以实现平抑负荷、抑制需求量、降低用电成本,提高供电可靠性和电能质量的目的。

根据能量存储方式的不同,储能可分为机械储能、电气储能、电化学储能、热储能和化学储能五大类。相比抽水蓄能等机械储能,电化学储能受地形等因素影响较小,可灵活运用于发电侧、输配电侧和用电侧。同时,随着近年来电化学储能成本的快速下降、商业化应用逐渐成熟,其优势愈发明显,开始逐渐成为储能新增装机的主流,且未来仍有较大的成本下降空间,发展前景广阔。在电化学储能中,锂电池储能具备能量密度更高、使用与循环寿命更长、响应时间更快等优势。在国内电化学储能新增装机规模中,锂电池储能占新增电化学储能的比例从2017年的51%上升到2020年的89%。根据有关权威机构预测,未来10年我国新能源发电侧配储容量将达到110~160 GW·h,结合产业链视角,光伏、风电目前处于成长期的中后期,已经具备大规模发展的条件,而储能起步较晚,还未达到爆发期拐点,目前以示范性应用为主,随着光伏、风电大规模发展,储能也将迎来拐点,向运营性应用转变。截止目前,国内新能源发电侧锂电池储能保有量为

4.27 GW·h,储能是实现“双碳”目标机遇下必然将迎来“跨越式”发展。

4 不同行业转型路径

4.1 电力

中国拥有全世界最大的电力部门,总装机容量达到2.2 TW,随着电力需求和电力生产的快速增长,发电所产生的碳排放量也随之增加。

据统计,由于我国电力和热力生产产生的碳排放量占全部碳排放量的一半以上,碳排放强度也明显高于其他发达国家。

中国燃煤发电系统的碳排放强度(以CO₂计)约为600 g/(kW·h),美国约为410 g/(kW·h),欧盟约为270 g/(kW·h)。考虑到电力仍是未来清洁能源利用的主要用能方式,可以通过灵活发电、改进电网基础设施、需求侧响应以及提高储能技术水平来提高电网灵活性,进而提高电力供应效率和扩大电力供应范围^[27]。

电力系统的灵活性并不仅仅局限于电力供需本身,而是一个相对复杂的系统,可再生能源的渗透也是逐步完善的,各阶段如图12所示。图中FIT为补贴政策,PPA为购电协议。就中短期来看,电力部门可以通过以下措施来强化系统,进而为全面实现零排放奠定基础。

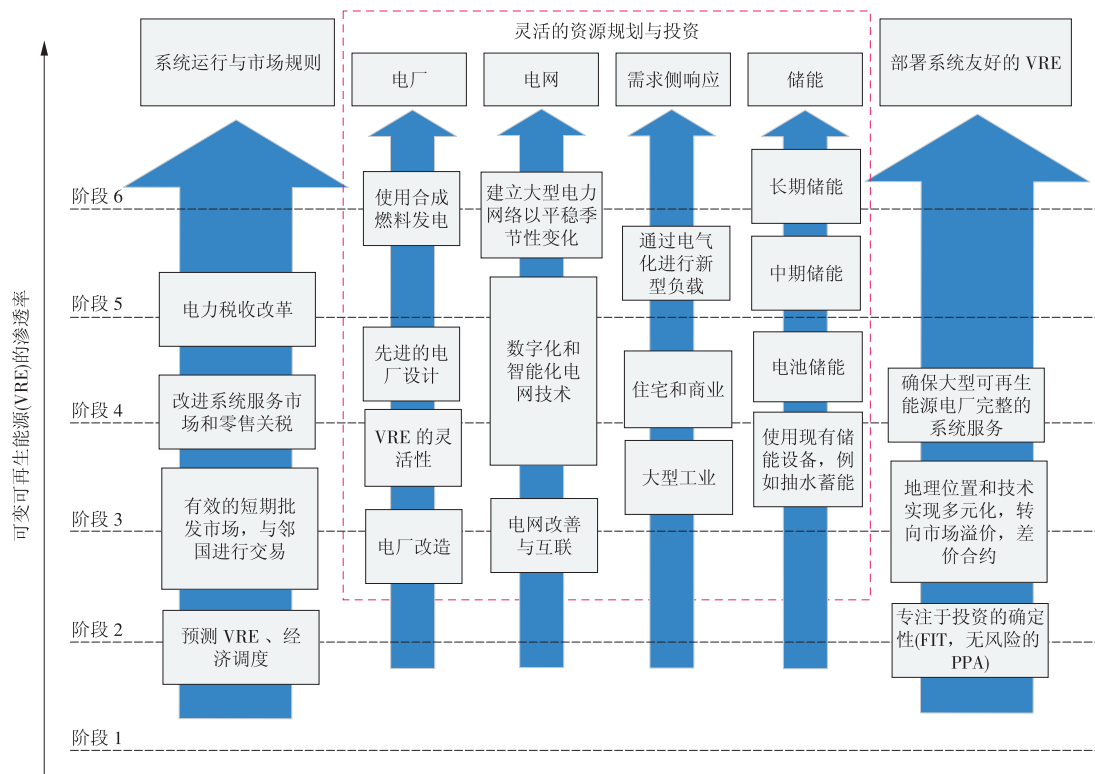


图 12 可再生能源渗透各阶段

Fig. 12 Stages of renewable energy's penetration

4.1.1 增加清洁能源发电比例

截至目前,我国火力发电仍是发电侧的主力军,这并不符合推进实现“双碳”目标的工作进程,建议近期不再新建燃煤电厂,降低火电发电比例,提高清洁能源发电比例。整合非化石能源发电需要改进清洁能源发电并网问题,尤其是市场调节和跨省跨区输电可以优先考虑低成本的清洁能源发电,从而增加清洁能源资源丰富地区的清洁能源供应量,并采取补贴等政策手段来继续刺激清洁能源发电投资。

4.1.2 关停低效率高排放电厂

“十三五”期间,为了解决空气污染问题,截至2020年年底,全国燃煤电厂完成超低排放和节能改造0.95 TW,占全国燃煤电厂总装机的76%左右。中国累计关停了近40 GW的小型、老旧、低效电厂,最具代表性的是京津冀地区,通过关停低效率高排放电厂,北京地区蓝天计划进展顺利。与此同时,其他各地也制定了相应的行动计划和目标,于近期淘汰落后电厂。建议在“十四五”期间,继续推进关停低效高排电厂,并根据技术、经济和环境标准对不合格电厂进行识别,同时不断更新完善标准文件,一旦确定,快速启动关停计划,这样不仅是能源转型计划合理布局的重要构成,也能够短期内对空气质量、公共卫生等目标产生较好的协同效应。

4.1.3 建立完善的电力现货市场

第二轮电力体制改革以来,各地区不断完善电力交易市场机制,但侧重点主要集中在中长期交易市场,而清洁能源发电受到其不稳定性的影响,在中长期市场表现一般,因而需要建立更为有效的现货市场来提高清洁能源普及率和提高电网灵活性。运行良好的电力市场短期内对于推动电力体制改革有着重要意义,尤其是建立电力现货市场,是改善电力市场交易规则和电力系统运行机制的重要组成部分。短期电力市场电价是当下电力供需关系的实时体现,可以为中长期电价提供参考,从而一方面指导新增发电装机容量的投资,另一方面推进完善电力金融市场。此外,电力现货市场的完善也促进了储能市场的发展,进而为提高风电、光伏等清洁能源发电量提供基础,达到多方共赢、互相促进的目的^[28]。

4.1.4 强化碳捕捉技术并在电厂推行使用

碳捕捉技术在当前市场环境下并不成熟,在实际应用中推广程度一般,但其是未来实现零排放的重要基础,尤其是对于火力发电而言。目前我国燃煤电厂作为发电主力,短期内关停燃煤电厂不切实际,推广利用碳捕捉技术可以减少对现有化石能源

发电厂的提前关停,降低安全供电风险。此外,碳捕捉技术应用到生物能源中,甚至可以实现碳的负排放效果,进而抵消其他不可脱碳领域的碳排放量。尽管目前碳捕捉技术的推广和应用面临一些问题和困难,但碳捕捉技术对于实现“双碳”目标至关重要,建议相关政府部门可以通过政策手段,吸引投资,发展碳捕捉技术,并推动碳捕捉技术试点项目落地,以便提高脱碳技术水平,改造现有电厂,实现零排放。

4.2 工业

中国的工业可持续发展仍然面临着较多的挑战,尤其是当前中国工业发展主要还是依靠资源和能源的量投,单位工业增加值能耗相比发达国家明显偏高。受到疫情影响,在疫情后经济时代,经济复苏缺乏政策和投资指导,进一步加剧了中国的工业产能过剩及结构性问题,增加了工业转型难度。“十四五”期间,工业部门将面临产能过剩、高耗能产品占比大、附加值低、能效低以及区域分布不均等多重问题,在面临挑战的同时,中国工业部门也将获得转型升级的机遇,向低碳经济转型,全面提高生产力,创新商业模式,为长期高质量、高水平发展奠定基础。

4.2.1 消除产能过剩,提高集中度

产能过剩是工业部门向低碳经济转型的主要矛盾。在市场机制下,应该由价格和生产要素的分配来确定市场力,而生产要素的分配由企业竞争力决定,从而达到消除产能落后的目的。消除过剩产能离不开政府部门的参与,在市场调节的基础上,政府参与市场,建立市场调节机制,建立“绿色准绳”,在工业发展过程中考虑能效、环保、安全、质量和其他因素,从而使“十四五”期间主要工业部门的整体产能利用率提高5%以上。

4.2.2 提高节能技术水平,控制能源需求

相比其他先进企业的产品能耗,中国高耗能行业的能耗水平普遍偏高,为了降低能耗水平,充分挖掘现有节能技术潜力是比较有效且低成本的减排方法。一方面通过提高重点企业和产品的能效,从部分环节和个体节能向全过程和全系统节能转变,这离不开管理部门的激励措施;另一方面,通过促进锅炉、发动机和变压器等关键耗能设备的绿色升级和能耗改进,达到最大限度挖掘节能潜力的目的;最后,数字化和信息化技术的发展也能够应用到节能领域,通过数控和信息化反馈,实现高效节能的目的。

4.2.3 提高电气化水平,实现电能替代

如果将电气化与电力行业脱碳有机结合,将对

工业部门尽早实现“碳达峰”发挥至关重要的作用^[29]。实现电气化需要采取多项措施,包括促进工业方法创新,实现工业电气化与数字化和智能技术的协同发展;采用先进的用电生产工艺代替传统生产工艺,满足高规格产品生产需求;促进电热发展,通过电热泵提供低温热源;最后,完善市场机制,支持工业电气化。例如,根据工业企业的规模、用电时间分布和用电效率,完善用电峰谷价格、差价和分级价格政策。

4.3 交通运输

交通运输部门是推动中国经济活动与社会连通性的关键纽带,近年来各类交通工具的保有量不断增长,其带来的能源消费和碳排放问题也日益凸显^[30]。据统计,2018年交通运输行业碳排放总量达到了11亿t,其中,公路运输碳排放量最高,占比达77%,如图13所示(数据来源:国家统计局、国家能源局)。图中内环表示不同交通运输方式的二氧化碳碳排放量占比,外环表示能源需求量占比。

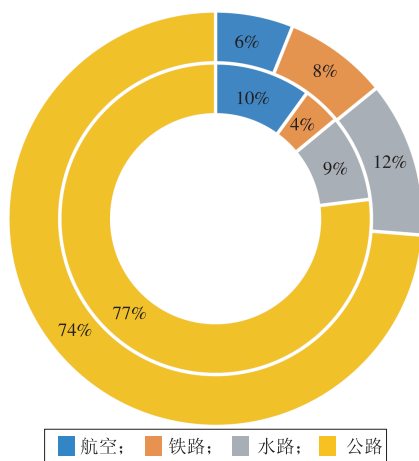


图13 交通运输碳排放构成

Fig. 13 Composition of carbon emission from transportation

4.3.1 加快调整货运方式

中共中央国务院《关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》、交通运输部《关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战实施意见》以及其他政策文件均要求减少公路货运量,增加铁路货运量。中国需要提高铁路和水路货运在大宗货物长距离运输中的比例,提高交通运输网铁路和港口密度,并逐步减少重型柴油货车在大宗货物长距离运输中的比例。

4.3.2 促进新能源汽车转型

随着中国新能源汽车产业的快速发展,新能源汽车的销量和渗透率将继续提高。中国需要继续加快修建新能源汽车充电桩,推进向新能源汽车的大规模转型。中国可考虑制定阶段性目标,到达限

定时间除重型货车以外禁止销售新燃油车。

4.3.3 推进智能交通发展

促进5G通信技术与车路协同系统的融合发展。到2025年将在部分路段实现车路协同试点应用。提高交通运输基础设施规划、设计、修建、养护、运营和管理全周期的数字化水平,搭建大规模和系统性大数据集,以及覆盖运载车辆和基础设施的综合交通大数据中心体系。

5 结论

“碳达峰”“碳中和”是统筹各项工作的重大举措,各行各业发展都置身其中,电力行业作为“双碳”目标实现的重要领域,其低碳发展对实现我国“双碳”目标具有积极作用。促进电力系统低碳发展既是挑战也是机遇,电力行业要有发展转型的紧迫感和责任感,为国家的能源转型做出积极贡献。因此,本文就能源电力行业如何实现“双碳”目标,给出“碳达峰”“碳中和”的定义,对中国当前能源结构进行系统性剖析,分析实现“双碳”目标的路径与潜在机遇,并给出能源转型等建议。希望本文的相关分析能够对能源电力行业实现“双碳”目标起到一定的推动作用。

参考文献:

- [1]李梁.酷热2019再敲全球变暖警钟[J].生态经济,2020,36(5):1-4.
LI Liang. The extreme heat of 2019 will ring the global warming alarm again[J]. Ecological Economy, 2020, 36(5): 1-4.
- [2]郭霄鹏,刘芸.世界正面临严重气候危机[J].生态经济,2020,36(1):1-4.
GUO Xiaopeng, LIU Yun. The world is facing a serious climate crisis[J]. Ecological Economy, 2020, 36(1): 1-4.
- [3]何建坤.碳达峰碳中和目标导向下能源和经济的低碳转型[J].环境经济研究,2021,6(1):1-9.
HE Jiankun. Low carbon transformation of energy and economy aiming for the peaking of carbon emission and carbon neutrality[J]. Journal of Environmental Economics, 2021, 6(1): 1-9.
- [4]张九天,张璐.面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨[J].热力发电,2021,50(1):1-6.
ZHANG Jiutian, ZHANG Lu. Preliminary discussion on development of carbon, utilization and storage for carbon neutralization[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 1-6.
- [5]喻小宝,郑丹丹.动力学视角下电力行业碳减排反馈机制研究[J].上海电力大学学报,2020,36(6):603-612.

- YU Xiaobao, ZHENG Dandan. Feedback mechanism of carbon reduction in power industry under the perspective of dynamics [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2020, 36(6): 603-612.
- [6] 徐冬, 孙楠楠, 张九天, 等. 通过耦合碳捕集、利用与封存实现低碳制氢的潜力分析[J/OL]. 热力发电: 1-9. (2021-04-22) [2021-05-20]. <https://doi.org/10.19666/j.rld.202102034>.
- XU Dong, SUN Nannan, ZHANG Jiutian, et al. Potential analysis of carbon dioxide capture, utilization and storage equipped low carbon hydrogen production [J]. Thermal Power Generation: 1-9. (2021-04-22) [2021-05-20]. <https://doi.org/10.19666/j.rld.202102034>.
- [7] 黄欣, 凌能祥. 基于排放权交易与减排研发补贴的政企减排微分博弈模型[J]. 系统管理学报, 2020, 29(6): 1150-1160.
- HUANG Xin, LING Nengxiang. A differential game model of government and enterprise emission reduction based on emission permits trading and subsidy for emission abatement [J]. Journal of Systems & Management, 2020, 29(6): 1150-1160.
- [8] 高涵, 张建寰, 赵静波, 等. 基于电动汽车创新技术应用的碳减排潜力分析[J]. 科技管理研究, 2020, 40(19): 230-236.
- GAO Han, ZHANG Jianhuan, ZHAO Jingbo, et al. Analysis of carbon emission reduction potential based on application of innovative technologies of electric vehicles [J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40(19): 230-236.
- [9] 王利宁, 彭天铎, 向征艰, 等. 碳中和目标下中国能源转型路径分析[J]. 国际石油经济, 2021, 29(1): 2-8.
- WANG Lining, PENG Tianduo, XIANG Zhengjian, et al. Analysis of China's energy transition pathways under the goal of carbon neutrality [J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(1): 2-8.
- [10] 黄畅, 张攀, 王卫良, 等. 燃煤发电产业升级支撑我国节能减排与碳中和国家战略[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 1-6.
- HUANG Chang, ZHANG Pan, WANG Weiliang, et al. The upgradation of coal-fired power generation industry supports China's energy conservation, emission reduction and carbon neutrality [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 1-6.
- [11] 刘晓龙, 崔磊磊, 李彬, 等. 碳中和目标下中国能源高质量发展路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(3): 1-8.
- LIU Xiaolong, CUI Leilei, LI Bin, et al. Research on the high-quality development path of China's energy industry under the target of carbon neutralization [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 23(3): 1-8.
- [12] 焦念志, 刘纪化, 石拓, 等. 实施海洋负排放践行碳中和战略[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(4): 632-643.
- JIAO Nianzhi, LIU Jihua, SHI Tuo, et al. Implement negative ocean emissions and implement a carbon neutral strategy [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021, 51(4): 632-643.
- [13] 龙惟定, 梁浩. 我国城市建筑碳达峰与碳中和路径探讨[J]. 暖通空调, 2021, 51(4): 1-17.
- LONG Weiding, LIANG Hao. Discussion on paths of carbon peak and carbon neutralization of urban buildings in China [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(4): 1-17.
- [14] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.
- WANG Can, ZHANG Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(6): 58-64.
- [15] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches [J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [16] 耿国彪. “碳达峰”“碳中和”将如何实现[J]. 绿色中国, 2021(6): 34-39.
- GENG Guobiao. How will "Carbon Peak" and "Carbon Neutral" be realized? [J]. Green China, 2021(6): 34-39.
- [17] 王迅. 低碳经济的发展模式研究[J]. 长江技术经济, 2020, 4(S2): 128-129.
- WANG Xun. Research on development model of low carbon economy [J]. Technology and Economy of Changjiang, 2020, 4(S2): 128-129.
- [18] IPCC. Special report on global warming of 1.5 °C [M]. UK: Cambridge University Press, 2018.
- [19] 朱婧, 刘学敏. 能源活动碳排放核算与减排政策选择[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(7): 70-75.
- ZHU Jing, LIU Xuemin. Accounting and reduction policy on carbon emissions from energy activities [J]. China Population Resources and Environment, 2016, 26(7): 70-75.
- [20] 张振芳. 露天煤矿碳排放量核算及碳减排途径研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [21] 陈晓科, 周天睿, 李欣, 等. 电力系统的碳排放结构分解与低碳目标贡献分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 18-25.
- CHEN Xiaoke, ZHOU Tianrui, LI Xin, et al. A review of CIRED 2011 on development of distributed energy resources and energy efficiency improvement on customer side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 18-25.

- [22] ENDO N, GOSHOMEA K, TETSUHIKO M, et al. Thermal management and power saving operations for improved energy efficiency within a renewable hydrogen energy system utilizing metal hydride hydrogen storage [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(1): 262-271.
- [23] 高华. 全球碳捕捉与封存(CCS)技术现状及应用前景[J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(5): 33-38.
GAO Hua. Research on global CCS technology status and application prospect [J]. Coal Economic Research, 2020, 40(5): 33-38.
- [24] 何义团, 张鹏博, 邵毅明, 等. 燃油与纯电动汽车流通过程中 CO₂ 排放分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(7): 126-130.
HE Yituan, ZHANG Pengbo, SHAO Yiming, et al. CO₂ emission of fuel and pure electric vehicle in the process of circulation [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(7): 126-130.
- [25] 冯升波, 黄建, 周伏秋, 等. 碳市场对可再生能源发电行业的影响[J]. 宏观经济管理, 2019(11): 55-62.
FENG Shengbo, HUANG Jian, ZHOU Fuqiu, et al. The impacts of the carbon market on the industry of renewable energy power generation [J]. Macroeconomic Management, 2019(11): 55-62.
- [26] 李铁, 李正文, 杨俊友, 等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3622-3630.
LI Tie, LI Zhengwen, YANG Junyou, et al. Coordination and optimal scheduling of multi-energy complementary system considering peak regulation initiative [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3622-3630.
- [27] 薛恒. 电力行业节能减排及低碳化发展分析[J]. 应用能源技术, 2021(1): 49-51.
XUE Heng. Analysis on energy saving and emission reduction and low carbonization development of electric power industry [J]. Applied Energy Technology, 2021(1): 49-51.
- [28] 史新红, 郑亚先, 范振宇, 等. 新能源参与省级现货市场的模式设计[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(5): 451-460.
SHI Xinhong, ZHENG Yaxian, FAN Zhenyu, et al. Model design considering participation of variable renewable energy in provincial spot market [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 451-460.
- [29] 屈博, 刘畅, 李德智, 等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(2): 1-3, 9.
QU Bo, LIU Chang, LI Dezhi, et al. Research on the development strategy of electricity substitution under the target of "carbon neutral" [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2): 1-3, 9.
- [30] 王海燕, 王楠. 中国综合交通运输体系碳排放影响因素研究[J]. 物流技术, 2019, 38(2): 78-83.
WANG Haiyan, WANG Nan. Research on factors affecting carbon emissions of China's comprehensive transportation system [J]. Logistics Technology, 2019, 38(2): 78-83.

(本文责编: 张帆)

作者简介:

喻小宝(1989—), 男, 安徽池州人, 讲师, 管理学博士, 从事电力市场、综合能源服务等方面的研究工作(E-mail: yuxiaobao1222@163.com)。

郑丹丹(1995—), 女, 贵州黔南人, 在读硕士研究生, 从事电力市场方面的研究(E-mail: zhengdandan08@126.com)。