

DOI: 10.19666/j.rlfed.202303030

欧美电力行业低碳发展路径分析及启示

高学睿¹, 史云鹏¹, 王雪松¹, 张康萌¹, 余劲草¹, 顾正阳²

(1.上海勘测设计研究院有限公司综合规划院(碳中和研究院), 上海 200335;

2.长江三峡投资管理有限公司, 上海 200216)

[摘要] 电力行业是能源系统核心, 也是碳排放大户, 其低碳发展是我国碳中和进程的关键。从碳排放情况、能源资源禀赋、行业现状、存在的问题、发展趋势等角度分析了美国和欧盟中德国、法国、英国等国家电力行业的概况、低碳发展路径及成效, 并结合我国的电力行业现状总结了几点启示, 以期为我国电力行业的低碳发展提供借鉴。

[关键词] 电力行业; 双碳目标; 能源转型; 欧美路径; 启示

[引用本文格式] 高学睿, 史云鹏, 王雪松, 等. 欧美电力行业低碳发展路径分析及启示[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 48-55.
GAO Xuerui, SHI Yunpeng, WANG Xuesong, et al. Analysis and enlightenment of low-carbon development path of power industry in Europe and America[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 48-55.

Analysis and enlightenment of low-carbon development path of power industry in Europe and America

GAO Xuerui¹, SHI Yunpeng¹, WANG Xuesong¹, ZHANG Kangmeng¹, SHE Jingcao¹, GU Zhengyang²

(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China;

2. China Three Gorges Investment Management Co., Ltd., Shanghai 200216, China)

Abstract: The power industry is the core of the energy system as well as a major carbon emitter. The zero-carbon development of it is the key to the process of carbon neutralization in China. From the perspective of carbon emission, energy resource endowment, industry status, existing problems and development trend, the general situation, low-carbon development path and effect of the electric power industry in the United States, Germany, France and Britain in the European Union was analyzed. Several enlightenments combined with the current situation of the electric power industry in China were summarized, hoping to provide reference for the low carbon development of Chinese electric power industry.

Key words: power industry; double-carbon target; energy transformation; Euro-American path; enlightenment

随着全球气候变化对人类社会构成重大威胁, 全球各国纷纷将“碳中和”上升为国家战略^[1]。2020年9月22日, 习近平主席在第75届联合国一般性辩论中, 提出中国2030年前“碳达峰”和2060年前“碳中和”的目标愿景^[2]。“30·60双碳目标”是我国在联合国大会上的庄严承诺, 也是我国打破资源约束、实现可持续发展、顺应技术进步趋势、推动经济结构转型升级、保护生态环境、促进人与自然和谐共生、主动担当大国责任及推动构建人类命运共同体的迫切需要^[3]。

化石能源燃烧占我国全部碳排放的88%左右, 其中41%左右的化石能源用于发电^[4]。能源结构由化石能源为主转向清洁的可再生能源为主是“双碳”目标下的必然发展方向。可再生能源包括水电、风电、太阳能光热发电及生物质能等, 除生物质能外都要先转化成电力再利用。因此, 电力行业低碳发展是实现双碳目标的关键。

那么, 如何实现电力行业低碳发展呢? 一般认为碳中和需要电力生产端、电力消费端和固碳端共同发力^[5]: 在电力生产端, 要进行能源结构调整, 扩

收稿日期: 2023-03-10 网络首发日期: 2023-04-19

基金项目: 上海勘测设计研究院有限公司资助

Supported by: Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd.

第一作者简介: 高学睿(1994), 男, 博士, 主要研究方向为电力行业低碳转型, 474269586@qq.com。

大可再生能源比例，同时节能降碳，提高一次能源的利用效率；在电力消费端，要推行电气化，提高能效，因地制宜利用分布式清洁能源，加强需求侧响应，形成“光储直柔”“源网荷储一体化”的新型负荷形式；在固碳端，通过生态碳汇和技术碳汇来抵消不得不排放的碳，最终实现“碳中和”的目标。

在这 3 端中，电力生产端的碳排放最多，因此电力生产端的能源结构调整是最关键的问题。如何立足资源禀赋、经济形势和技术水平，平稳安全地提高电力能源中可再生能源的比例是我国电力行业低碳发展面临的重大课题。从国际上看，2018 年美国、英国、法国、德国等发达国家电力行业的碳排放强度明显低于我国（图 1）^[6]。很多发达国家已经完成“碳达峰”（美国 2007 年左右，欧盟 1990 年左右，日本 2013 年左右），进入了“碳中和”的阶段。发达国家的碳减排之路走在我们前面，其减排路径值得我们学习和借鉴。

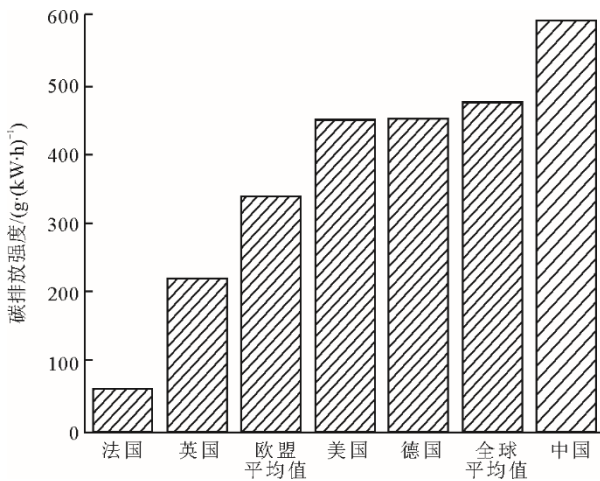


图 1 2018 年世界各国电力行业碳排放强度
Fig.1 Carbon emission intensity of power industry in the world in 2018

1 美国电力行业低碳发展路径

2005 年以前的近百年内，美国一直是世界上碳排放最多的国家，其中电力行业碳排放约占每年总排放量的 1/4^[7]。虽然排放量巨大，但美国的电力行业碳减排之路相当顺利，在 2007 年左右，美国已经总体“碳达峰”。2019 年美国度电碳排放为 408 g/(kW·h)，而全球平均水平为 475 g/(kW·h)^[8]。图 2 为世界各国能源利用产生碳排放量变化。由图 2 可以看出，美国、欧盟的能源产生的碳排放呈逐渐下降趋势，而中国、印度却呈显著上升趋势。

这与产业结构、能效水平密切相关，是经济发展的不同阶段导致的。

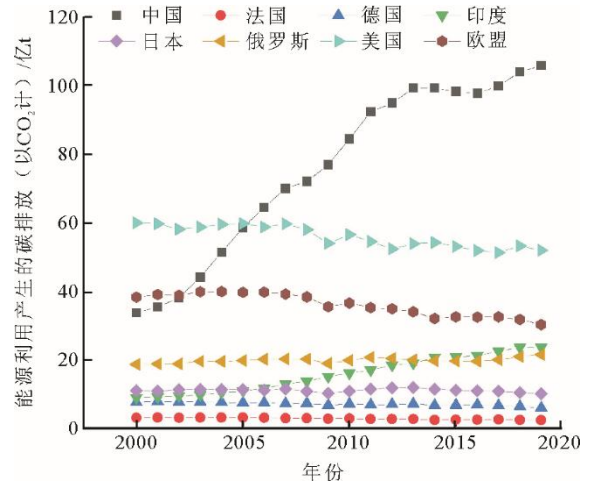


图 2 世界各国能源利用产生碳排放量变化
Fig.2 Changes in carbon emissions from energy production in countries around the world

图 3 为 2021 年美国发电能源来源比例。由图 3 可见，美国发电能源来源中天然气占比 38.0%、煤炭占比 22.0%、石油占比不到 1.0%。可再生能源在美国电力中也占有 20.0%左右的份额，其中包括太阳能 2.8%、风能 9.2%、水能 6.3%、生物质能 1.3%和地热能 0.4%等^[9]。此外，核能发电占美国发电量的 19.0%左右。总体来看，美国的电力利用比较清洁，新能源比例逐渐增加，核能也在不断发展，保持稳定供应。可以说，美国电力行业的净零排放之路已经走了一半。

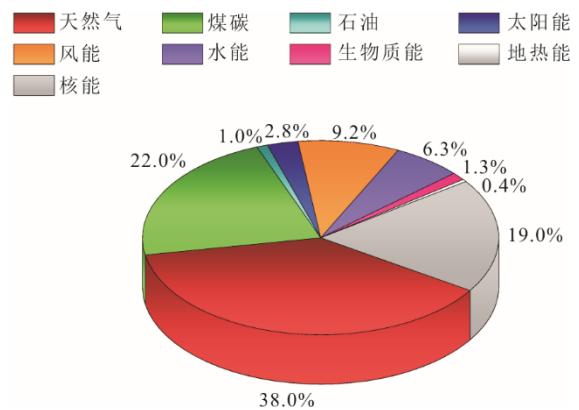


图 3 2021 年美国发电能源来源比例
Fig.3 Proportion of energy sources for power generation in the United States in 2021

那么美国是如何实现电力行业减排的呢？

一个国家想要推进“碳中和”要考虑 3 个约束条件：1) 经济发展往往带来能源需求上升，这与

节能减排存在矛盾；2) 发展新能源，调整能源结构的同时如何保证能源供应；3) 社会大众能否承受能源结构调整和“碳中和”的成本对生产生活带来的压力。

从这3个条件来看，美国推行碳中和有坚实的基础条件。美国是老牌发达国家，早已完成工业化，通过将高污染高耗能的产业转移到发展中国家，美国产业结构调整为以金融、房地产、专业服务、教育及医疗服务等服务业为主的信息化阶段。从1997年到2019年，美国单位国民生产总值（GDP）能耗总体呈下降趋势。2019年的单位GDP能耗仅为1997年的36%^[10]。能耗强度大幅下降使美国的经济发展和碳排放脱钩，从而很自然地“碳达峰”，进入“碳中和”阶段。此外，美国的煤炭、石油和天然气储量均居世界前列，在传统能源领域具有独立自主的优势地位，能源价格低廉。2021年，美国的电价平均为11美分/(kW·h)，汽油的零售价普遍保持在66美分/L上下，居民天然气的价格为38.8美分/m³^[11]。低廉的能源成本使得美国能源结构调整有充足的操作空间，降低了发展新能源前期的高成本对经济的影响。从经济角度看，自1894年开始，美国GDP连续128年位列世界第一，国富民强。所以，虽然美国的碳减排政策摇摆不定，但其资源丰富，经济发达，基础设施完善，人才云集，技术积累深厚，“碳中和”难度要比中国简单得多。

具体到美国电力行业减排路径，可以归结为清洁能源发展、火电清洁利用、减排政策指引和低碳技术发展4个方面。

1) 电力能源向可再生能源转型是美国电力行业低碳发展的根本推动力。为了应对气候变化、缓解全球变暖，使用清洁的可再生能源以减少碳排放成为世界共识。清洁能源无疑是电力行业未来的发展方向，这是一次能源革命。推进清洁能源战略意在占据技术和产业链的优势地位，抢占清洁能源和碳减排技术的市场，带动相关行业的发展，促进经济繁荣，巩固美国霸权^[12]。因此，虽然拥有丰富的化石能源，美国仍有足够的动力发展可再生能源。通过制定一揽子政策及10余部法规，美国对新能源产业给予税收减免、补贴激励、标准界定和金融支持，对传统能源行业则添加指标约束，同时较好地协调了各方利益，新能源产业发展迅速^[13]。到了2021年，美国可再生能源发电量占总发电量的20%左右。

2) 火电清洁利用是美国电力行业低碳发展的主要前期推动力。天然气发电的碳排放强度不足煤电的一半，火电厂由煤改气是电力行业减排的重要路径。20世纪90年代以来，美国的页岩气革命使美国超越俄罗斯成为全球最大的天然气生产国，充足的天然气促使火电加速从煤到气的能源结构转变。2005年到2020年，美国天然气发电量从7610亿kW·h增加到16170亿kW·h。同时，煤电的总发电量从2005年的20130亿kW·h锐减至2020年的7740亿kW·h，降低了62%。

图4为美国不同燃料发电碳排放情况^[14]。由图4可见，从2000年到2020年，美国煤电碳排放从20.13亿t减少到7.92亿t，煤电退出为美国发电行业贡献了10多亿t的碳减排量，而天然气发电碳排放仅从3.21亿t增加到6.76亿t，煤改气的趋势明显，碳减排效果显著。

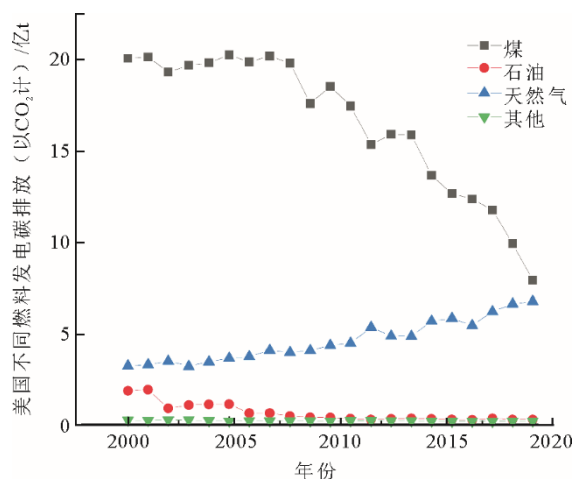


图4 美国不同燃料发电碳排放
Fig.4 Carbon emissions from power generation using different fuels in the United States

3) 政策指引是美国电力行业低碳发展的重要推动力。多年以来，美国由于党派争执，对待气候变化问题的态度一直摇摆不定，但整体来看，美国政府高层大部分具有应对气候变化、发展新能源的共识。在奥巴马政府时期，美国非常重视气候变化危机，发布了《总统气候行动计划》《美国清洁能源与安全法案》《作为经济可持续增长路径的全方位能源战略》《新建电厂碳排放标准》和《清洁电力计划》等文件，提出建立碳交易市场机制、发展可再生能源、清洁电动汽车和智能电网等方案，大力推行“全方位”能源战略，格外重视发展清洁能源。其中《清洁电力计划》不仅提出提高燃煤发电效率，

增大水电、风电、光伏、核电的比例,提高能源使用效率等减排路径,还确立了2030年之前将发电厂的二氧化碳排放量在2005年水平上削减至少30%的目标。这一系列顶层设计,引领了美国的碳减排进程。虽然特朗普政府上台后又放宽了对化石燃料的限制,鼓励发展传统能源,并要求环保署重审《清洁电力计划》,阻碍了碳减排的脚步,但2021年拜登成功入主白宫,又开始大力推动清洁能源战略,发布了《迈向2050年净零排放的长期战略》,设定了到2030年碳减排50%~52%、2050年净零排放的总体双碳目标,并提出了2035年实现电力系统净零排放的目标。对于下一步的电力行业低碳发展路径,拜登政府暂时还未出台像《清洁电力计划》之类明确的规划,但通过行政命令的方式在交通、建筑、清洁能源等领域加大了投资和支持力度,建立了多层次政策协调和咨询机制,通过减税、补贴和碳市场等手段激励清洁能源和相关技术的发展,美国的许多州也形成了州际减排合作机制,如12个州参与的区域温室气体倡议(RGGI)、纽约市和加州联合发起的《美国承诺》倡议等^[15-16]。

4) 低碳技术进步是电力行业低碳发展的重要支撑。长期以来,美国低碳技术发展迅速,在煤气化联合循环技术、阿拉姆循环技术、联合循环天然气发电、燃料电池、纤维素生物质和生物燃料发电等领域开展了很多研究、示范和应用^[17]。目前,天然气联合循环发电厂在可以达到60%的发电效率的同时,排放的二氧化碳低于350 g/(kW·h),远远低于燃气锅炉和燃煤电厂^[18]。低碳高效发电技术的发展,促进了火电能源结构的调整,减少了碳排放。图5为各国发电碳强度指数变化。由图5可以看出,近年来美国发电碳排放强度持续明显下降,2019年的碳排放强度仅为2000年的60.16%。

除了以上路径外,美国在技术碳汇方面也做了很多探索。通过增加可再生新能源比例和火电节能减排可以显著降低碳排放,但一些不得不排放的碳需要通过技术碳汇的手段加以中和。联合国政府间气候变化专门委员会指出,如果没有碳捕集、利用和封存(CCUS)技术,几乎不能实现《巴黎协定》目标,且全球碳减排成本将会成倍增加。因此,CCUS成为美国低碳技术研究的优先领域。1972年,美国的Terrell项目是全球首个CCUS项目^[19]。目前,全球65个商业化CCUS项目中有33个在美国,二氧化碳捕集量达到每年3000万t^[20]。不过

CCUS技术尚不成熟,经济可行性较差。据调查,2010—2017年,美国能源部高级化石能源研究计划耗资约11.2亿美元资助了9个CCUS示范项目。除Petra Nova坚持运营到2020年才中止,其他项目早已流产。这主要是捕集、封存过程的高成本导致的巨额亏损所致。

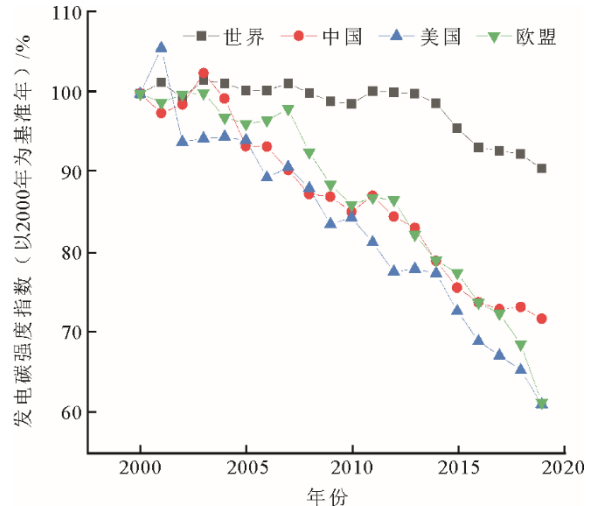


图5 各国发电碳强度指数变化

Fig.5 Changes in the carbon intensity index of power generation in various countries

综合来看,在政策指引和技术进步推动下,美国电力行业能源结构持续优化,能耗下降,促使美国电力行业实现了显著的碳减排。

2 欧盟电力行业发展路径

2021年欧洲地区发电量达到4.033万亿kW·h,占全球发电量的14.2%。欧盟是世界上第三大碳排放集团,根据国际能源署数据,2021年全球碳排放量达到363亿t^[21],其中欧盟排放了27.3亿t^[22]。欧洲电力行业减排工作对全世界应对气候变化都很重要。

从资源禀赋上看,欧盟整体上化石能源匮乏,是世界上最大的能源进口地。据欧盟统计局数据,2021年欧盟27国化石能源进口依赖度达57.5%。可再生能源方面,欧盟则有相当大的开发空间。北海、波罗的海、格陵兰岛及周边海域、挪威海和巴比伦支海地区有丰富的风能。南部地中海沿岸、伊比利亚半岛、亚平宁半岛、巴尔干半岛南部及毗邻欧洲的北非地区有非常丰富的太阳能资源。阿尔卑斯山脉地区、喀尔巴阡山脉地区(中欧)和北欧地区有丰富的水能资源。

欧洲化石能源对外依赖程度高,而化石能源在电力行业中占据相当的比例,这样就导致了能源安全风险。2021 年上半年,因市场波动,欧洲化石燃料、天然气价格几乎翻了一番,进口煤的价格也激增了 70%,德国、西班牙、法国和意大利的化石能源发电成本,已是风能和太阳能的近 2 倍^[23]。2022 年俄乌冲突引发欧洲电力行业能源危机,电价飙升,从 2022 年初到 8 月份,天然气价格上涨近 4 倍,电价上涨 2 倍多^[24]。能源危机使得欧盟付出了沉重的代价,也坚定了其向清洁能源转型的决心。

在可再生能源方面,欧洲在风电和光伏中更倾向于风电。究其原因,一方面是欧洲有充足的风电资源,另一方面是技术优势。欧洲光伏产业缺乏竞争力,过去长期依赖中国的进口。而欧洲的风电产业居世界前列,维斯塔斯、西门子歌美飒是世界排名第一、第三的风电龙头。

欧盟各国电力行业的减排路径略有不同,本研究整理了德国、法国、英国等欧盟主要国家的案例。

2.1 法国

法国是世界范围内电力行业碳排放强度最低的国家之一。根据国际能源署数据,2018 年全球平均发电碳排放为 475 g/(kW·h),而法国度电碳排放为 61 g/(kW·h)^[25]。如此低碳的电力能源结构是通过大规模使用核电实现的。2019 年法国的电力结构为:核能 71%、太阳能 2%、风能 6%、化石能源 8%、水力 11%、其他生物能源 2%。

核能属于清洁的化石能源,超高的核电比例使得法国的电力系统十分低碳。但核电建设成本高,热效率低,且会产生核废料,另外调峰调谷能力很差,建设运营中存在安全风险,还涉及一些政治因素。与风电和光伏相比,核电显得不那么绿色。而对核电的路径依赖也使得法国的风电、光伏等新能源发展迟缓。

法国能大规模发展核电,与其资源禀赋密切相关。法国是一次能源十分匮乏的国家,缺乏石油、天然气和煤炭。但法国是世界上最大的铀矿开采国,在非洲尼日尔、亚洲哈萨克斯坦、澳大利亚等主要产铀地区都拥有铀矿开采权,产量非常高。作为联合国五常之一,法国有世界上较成熟和先进的核能技术,包括第三代核电 EPR(欧洲先进压水堆),拥有世界上最大的核电公司之一(阿莱瓦集团),同时法国临近英吉利海峡,有利于核燃料和废物的运输。所有这些为法国开发核电提供了极高的

便利,促使法国选择核电作为能源主力。

2.2 德国

德国是欧洲第一大经济体。在 2020 年,德国全社会的用电量达到了 4 840 亿 kW·h,在欧盟国家中排第一。德国的能源结构曾很大程度上依靠燃煤发电与核电。但德国一次化石能源资源缺乏,目前的能源进口依存度约为 64%,尤其在原油和矿物油产品方面,德国的进口依存度高达 97%,天然气则为 89%,煤炭为 44%。出于保障能源安全、打破资源约束、应对气候变化等方面的考虑,德国具有强烈的能源转型意愿和决心。从 21 世纪初开始,德国便大力推行能源结构转型。通过早期布局建设基础设施、投资新技术研发、慷慨的新能源补贴以及提前关闭煤矿等措施,德国电力行业能源转型效果明显。根据德国联邦统计局公布的最新数据,2021 年德国电力能源结构中可再生能源发电量占比达 42.4%,煤炭、天然气等传统能源占比为 57.6%。

不过德国的转型过于激进,在新能源尚未成熟的情况下,过早退出了核电和煤电,导致能源危机。德国早在 2013 年就宣布将于 2022 年关闭所有核电站,在 2018 年底,德国已经关停了境内所有的无烟煤采矿,只剩下东部和西部的大型褐煤露天煤矿仍然在开采。2019 年宣布 2038 年前淘汰煤电,腾出的空间由新能源发电和气电弥补。但由于核电和煤电发电量总计超过 1/3,新能源暂时无法稳定地供应这些用电需求,致使德国陷入新能源的远水解不了近渴的窘境,在当前的能源危机面前举步维艰。俄乌冲突爆发后,面对天然气大涨的情况,德国作为全球最大的天然气进口国不得不重金购入天然气,并选择重启煤电应急。

此外,德国慷慨的新能源补贴政策也难以以为继。德国的补贴政策虽然刺激了光伏和风电的快速发展,但高额补贴导致高电价,并最终由消费者买单。2015 年,德国居民用电平均价格为 2.0~2.4 元/(kW·h),在西欧国家中是最高的,其中新能源补贴附加在居民电价中占比达到 20%以上,家庭用电负担沉重。

最后,德国电网基础设施滞后问题始终未能解决。德国的新能源早期以分布式开发为主,近年来,随着北海及波罗的海风电的规模化开发,北电南送产生了大规模远距离输电需求。但受征地难、环保政策制约、周期长等因素影响,电网建设进度缓慢,制约了新能源大规模增长。

2.3 英国

英国的电力行业能源结构也十分低碳，碳排放强度显著低于国际水平。根据英国气候政策网站碳简报（CarbonBrief）的统计数据，2017年英国度电碳排放为237 g/(kW·h)，而世界平均水平为450 g/(kW·h)。2017年，英国的电力结构以低碳能源为主，其中39.7%来自天然气，20.9%来自核能，29.4%来自可再生能源，燃煤发电只占6.7%^[26]。

总的来说，英国的能源转型之路是从“以油气代煤”到“可再生能源代替化石能源”的过程。英国早期的能源结构与中国相似，电力能源以燃煤为主。现如今，英国则主要以天然气、核能、可再生能源发电为主，燃煤发电量在整体发电量中大幅减少。下一步，英国将大力发展海上风电和核电。其2022年4月7日公布的《英国能源安全战略》计划到2050年将核电容量增加2倍，到2030年海上风电装机容量将达到50 GW^[27]。

英国的电力行业脱碳有其显著的特征。

首先，立足国情的“两步走”战略很成功，短期火电的煤改气有效减少了碳排放，长期发展核电和海上风电减少对化石燃料的依赖，该战略充分考虑了经济性、能源现状和技术水平限制，实现了平缓的过渡。

其次，在可再生能源方面，2017年，英国的可再生能源来源中，生物能源占比66%。生物能源既可以为英国的交通、热力、电力提供燃料，又能减少碳排放，是英国电力行业低碳发展的重要路径。

最后，因地制宜大力发展海上风电。英国处于北纬40°~60°的西风带，西面为大西洋，并且没有高山阻隔，长期处于盛行西风的控制下，风力资源丰富。英国属发达国家，资金和技术雄厚，有发展风能的资本。目前英国在海上风电领域处于技术、规模领先地位。2019年3月14日，英国发布《海上风电产业战略规划》。该规划明确提出作为清洁能源的海上风电将在2030年前装机容量达到3 000万kW，为英国提供30%以上的电力^[28]。

3 欧美案例的启示

3.1 美国的启示

美国的案例为我国电力行业的低碳发展提供了很好的借鉴。

首先，火电的清洁改造是电力行业低碳发展的前期重要抓手。美国火电的“煤改气”在其电力行

业碳减排中发挥了主要作用。这对于我国以煤为主的能源结构现状很有借鉴意义。煤炭在我国能源结构中扮演非常重要的角色。新能源暂时无法替代煤炭提供基础负荷，而且新能源出力不稳定，反而需要稳定的煤电提供调节能力。我国《“十四五”节能减排综合工作方案》提出，要抓好煤炭清洁高效利用，推进存量煤电机组节煤降耗改造、供热改造、灵活性改造“三改联动”，持续推动煤电机组超低排放改造。煤炭清洁高效利用一方面可以提高能效，减少碳排放，另一方面可以增加调节资源，提高电网灵活性，从而吸纳更多可再生能源，有助于可再生能源的发展。

其次，发展风电、光伏等可再生能源是我国能源发展的出路，也是实现“碳中和”的必由之路，这是国际上的共识。尽快建立完善的政策、法规体系，制定科学的标准是推动可再生能源发展的重要路径。

最后，在用能端，要坚持完善能耗双控制度，严格合理控制煤炭消费增长，推进能耗双控向碳排放双控转变，促进产业结构升级，追求高质量可持续发展，减少单位GDP能耗强度。

3.2 欧盟的启示

法国通过大规模利用核电实现了低碳电力，虽然对我国而言，核电未必适合作为能源主力，但核能仍是人类打破能源约束的潜在技术。核电技术成熟，供应稳定，仍将作为电力的重要清洁能源，坚持发展核电也是电力行业低碳发展的重要路径。

通观德国能源转型，我国也能从中得到2点启示：第一，能源转型要确保能源安全，先立后破，不能急于求成。未来我国经济进一步发展，用能端也在推行电气化，电力需求必然要持续刚性增长，能源保供压力大，立足国情，推动煤炭清洁高效利用，同时抓住机遇大力发展可再生能源的转型战略是十分正确的。第二，发展新能源能够明显降低能源供应风险。石油、天然气和煤炭国际贸易涉及美国、俄罗斯、中东等国家及地区，容易被“卡脖子”。而风电和太阳能发电资源丰富，分布相对均衡，随着技术进步和成本下降，开发潜力巨大，分布式能源加以智能微网在提高效率的同时也能降低化石能源集中配置的风险。

英国的减排之路对我国也有2点启示：一是要立足资源禀赋，充分考虑能源现状、工业发展以及经济性。统筹兼顾，处理好当前与长远，发展与减

排,整体与局部,政府与市场的关系。二是要利用好生物质能源。目前我国主要生物质资源年产生量约为34.94亿t,而资源能源化利用量约为4.61亿t^[29],还有很大的开发潜力。生物质能来源包括农业废弃物、木材和森林废弃物、城市有机垃圾、藻类生物质等,开发生物质能作为可再生能源可以促进物质循环和资源回收,减少废弃物造成的环境污染,拓展清洁能源来源,孕育新技术,催生新业态,创造新供给,形成新需求,为乡村振兴和高质量发展提供强劲的发展动能。生物质燃料具有良好的可储藏性和运输性,和传统化石能源相似,在我国有火电清洁改造,交通业低碳发展等方面使用生物质能源代替化石能源也是很有前景的路径。

电力行业低碳发展的核心在于能源结构调整,对我国而言要做好3个方面的工作:首先,要在保证能源安全的基础上,立足“多煤、贫油、少气”的资源禀赋,坚持先立后破,促进煤炭清洁高效利用,这是前期碳达峰工作的主要抓手;其次,通过产业结构升级、提升能效、采用清洁能源等手段促使化石能源的使用与经济产出之间“脱钩”,弹性管理能源消费总量,降低碳排放总量和强度;最后,建立健全政策、法规和标准体系,结合各地资源禀赋,指引风电、光伏、核能、生物质能等清洁能源的快速发展和大规模利用,并促进这类能源最终占据主导地位。

[参考文献]

- [1] 田聿申. 全球典型国家碳中和目标实现路径对我国的启示[J]. 中国能源, 2021, 43(9): 80-88.
TIAN Yushen. Enlightenment of the realization path of carbon neutrality goal in typical countries in the world to China[J]. Energy of China, 2021, 43(9): 80-88.
- [2] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(001).
Statement by H.E. Xi Jinping President of the People's Republic of China at the general debate of the 75th session of the United Nations General Assembly[N]. People's Daily, 2020-09-23(001).
- [3] 习近平主持中共中央政治局第三十六次集体学习并发表重要讲话[EB/OL]. (2022-01-25) [2023-02-02]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/25/content_5670359.htm.
H.E. Xi Jinping President of the People's Republic of China presided over the 36th collective study session of the Political Bureau of the CPC Central Committee and delivered an important speech [EB/OL]. (2022-01-25) [2023-02-02]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/25/content_5670359.htm.
- [4] 张新. 张新代表: 服务“双碳”目标加快新疆新能源大基地建设[EB/OL]. (2022-03-08) [2023-02-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1726714114294060083&wfr=spider&for=pc>.
- ZHANG Xin. Representative Zhang Xin: Serve the “double carbon” goal and accelerate the construction of Xinjiang new energy base [EB/OL]. (2022-03-08) [2023-02-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1726714114294060083&wfr=spider&for=pc>.
- [5] 丁仲礼. 实现碳中和重在构建“三端发力”体系[J]. 中国石油企业, 2021, 434(6): 10-11.
DING Zhongli. The key to achieving carbon neutrality is to build a “Three-Terminal Force” system[J]. China Petroleum Enterprise, 2021, 434(6): 10-11.
- [6] IEA. Electricity information 2019[R]. International Energy Agency, 2019: 25.
- [7] BP. Statistical Review of World Energy June 2022[R]. British Petroleum, 2022: 5.
- [8] 胡杰, 于淼, 白慧媛. 基于 STIPRAT 评估模型的中美碳排放与电力消费相互关系分析[J]. 中外能源, 2022, 27(10): 1-7.
HU Jie, YU Miao, BAI Huiyuan. Analysis on correlations between carbon emissions and electricity consumption in China and the United States based on STIPRAT evaluation model[J]. Sino-Global Energy, 2022, 27(10): 1-7.
- [9] EIA. Electricity explained Electricity in the United States[R/OL]. 2022 [2023-02-02]. <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/electricity-in-the-us.php>.
- [10] EIA. TODAY IN ENERGY. U.S[R/OL]. (2021-08-03) [2023-02-02]. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=48976>.
- [11] 王能全. 碳达峰: 美国的现状与启示[EB/OL]. (2021-03-11) [2023-02-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1693931863829095307&wfr=spider&for=pc>.
WANG Nengquan. Carbon Dafeng: the status quo and enlightenment of the United States[EB/OL]. (2021-03-11) [2023-02-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1693931863829095307&wfr=spider&for=pc>.
- [12] 梁亚滨. 美、日、德能源战略比较与借鉴意义[EB/OL]. (2022-08-12) [2023-02-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1740970188343702763&wfr=spider&for=pc>.
LIANG Yabin. Comparison and reference significance of energy strategies of the United States, Japan and Germany[EB/OL]. (2022-08-12) [2023-02-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1740970188343702763&wfr=spider&for=pc>.
- [13] 国务院发展研究中心课题组. 美国支持可再生能源发展的政策体系及启示[J]. 发展研究, 2010, 284(4): 57-59.
Research group of Development Research Center of The State Council. The policy system and enlightenment of the united states to support the development of renewable energy[J]. Development Research, 2010, 284(4): 57-59.
- [14] IEA. Energy and carbon tracker (2021 edition) 2021[R]. International Energy Agency, 2021: 2.
- [15] 左瑜, 廖琴. “美国承诺”倡议提出 10 项高影响力气候行动策略[EB/OL]. (2018-08-24) [2023-02-02]. <http://www.tanjiaoyi.com/article-24669-1.html?from=groupmessage&isappinstalled=0>.
- ZUO Yu, LIAO Qin. The U.S. Pledge initiative proposes 10 high-impact climate action strategies[EB/OL]. (2018-08-24) [2023-02-02]. <http://www.tanjiaoyi.com/article-24669-1.html?from=groupmessage&isappinstalled=0>.
- [16] BRUCE L. America's Pledge report strong promises [EB/OL]. (2017-12-06) [2023-02-02]. <https://yaleclimateconnections.org/2017/12/americas-pledge-report-strong-promises/>.

- [17] 敬朝文. 天然气联合循环电厂二氧化碳捕获整体性能及经济性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 12.
JING Chaowen. Study on overall performance and economy of CO₂ capture at natural gas combined cycle power plant[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 12.
- [18] 姜秀民, 秦裕琨. 整体煤气化联合循环技术及其在美国的发展[J]. 电力建设, 1995, 16(11): 4.
JIANG Xiumin, QIN Yukun. Integrated coal gasification combined cycle technology and its development in the United States[J]. Electric Power Construction, 1995, 16(11): 4.
- [19] Global CCS. Institute. Global Status of CCS Report 2011[R]. Global CCS Institute, 2011: 18.
- [20] 姜睿. 国内外 CCUS 项目现状分析及展望[J]. 安全、健康和环境, 2022, 22(4): 1-4.
JIANG Rui. Status Analysis and prospect of domestic and foreign CCUS projects[J]. Safety, Health and Environment, 2022, 22(4): 1-4.
- [21] IEA. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021 [R/OL]. (2022-03)[2023-02-02]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>.
- [22] IAN T. Carbon dioxide emissions in the European Union 1965-2021[EB/OL]. (2022-06-02)[2023-02-02]. <https://www.statista.com/statistics/450017/co2-emissions-europe-eurasia/>
- [23] 唐奕奕. 俄乌冲突半年: 电费暴涨 欧元汇率暴跌 [EB/OL]. (2022-08-27)[2023-02-02]. <https://www.Investgo.cn/article/gb/tjsj/202208/625277.html>.
TANG Yiyi. Six months of Russia-Ukraine conflict: Soaring electricity costs and plunging Euro exchange rate [EB/OL]. (2022-08-27)[2023-02-02]. <https://www.Investgo.cn/article/gb/tjsj/202208/625277.html>.
- [24] 于琳娜. 燃料碳价双上涨 可再生能源地位凸显 [EB/OL]. (2021-08-18)[2023-02-02]. https://www.cpnn.com.cn/news/zngc/202108/t20210818_1419535.html.
- YU Linna. Double increase of fuel carbon price and prominent role of renewable energy[EB/OL]. (2021-08-18)[2023-02-02]. https://www.cpnn.com.cn/news/zngc/202108/t20210818_1419535.html.
- [25] IEA. Global Energy & CO₂ Status Report. The latest trends in energy and emissions in 2018[R/OL]. (2019-03-01)[2023-02-02]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f9eb39-7493-4722-aced-61433cbffe10/Global_Energy_and_CO2_Status_Report_2018.pdf.
- [26] GOV. UK. UK Energy Statistics, 2017 & Q4[R/OL]. (2018-03-09)[2023-02-02]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/695626/Press_Notice_March_2018.pdf.
- [27] GOV. UK. British energy security strategy[EB/OL]. (2022-07-04)[2023-02-02]. <https://www.gov.uk/government/publications/british-energy-security-strategy/british-energy-security-strategy#renewables>.
- [28] GOV. UK. Industrial Strategy: Offshore Wind Sector Deal[EB/OL]. (2019-03-07)[2023-02-02]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/786279/BEIS_Offshore_Wind_sector_deal_print_ready.pdf.
- [29] 中国产业发展促进会生物质能产业分会等. 3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书[R]. 2021-09-14: 8.
China Association for Industrial Development and Promotion of Biomass Energy Industry Branch, et al. 3060 blue paper on development potential of zero-carbon biomass energy[R]. 2021-09-14: 8.

(责任编辑 刘永强)