DOI: 10.19944/j.eptep.1674 - 8069.2021.03.002

中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究

Research on the development path of carbon peak and carbon neutrality in China's Power Industry

朱法华[1,2]，王玉山[3]，徐 振[2]，李军状[1]，董月红[1]，李 辉[1]，李小龙[1]，胡 芸[2]，孙雪丽[2]，丁 力[2]
(1. 国家能源集团科学技术研究院有限公司，江苏 南京 210023；2. 国电环境保护研究院有限公司
国家环境保护大气物理模拟与污染控制重点实验室，江苏 南京 210031；
3. 北京清新环境技术股份有限公司，北京 100142)

摘要： 自习近平主席宣布中国碳达峰、碳中和的目标以后，电力行业的发展路径广受关注与热议，为结合中国能源资源禀赋、技术水平与安全需求，探索符合中国国情的电力行业碳达峰、碳中和的发展路径，从碳达峰、碳中和的基本概念入手，明确指出碳达峰包括达峰时间与峰值，碳中和不是 CO_2 零排放。结合发达国家碳达峰、碳中和的路径分析，得出中国碳达峰、碳中和与发达国家的异同及难度，提出中国应以节能与掺烧为引领，保留火电机组不少于 8 亿 kW；以低碳能源为关键，大力发展风电与太阳能发电；以储能与碳捕集为补充，保障电力系统稳定等 3 条重要举措。根据中国富煤贫油少气的化石能源现状、水电资源开发基本完毕、核电选址较为困难等实际情况，预测中国碳达峰时火电行业排放的 CO_2 约 47 亿 t，碳中和时火电行业允许排放 CO_2 约 13.5 亿 t，碳中和时中国电力装机容量达 64.3 亿 kW，其中风电与太阳能发电 50 亿 kW，核电 2 亿 kW，水电 4.3 亿 kW，余热、余压、余气发电 0.5 亿 kW，生物质发电 1.2 亿 kW，气电 1 亿 kW，煤电 5.3 亿 kW，非化石能源发电装机容量占比 90.2%，发电量占比 85.3%。碳中和时中国电力行业排放 CO_2 约 15.21 亿 t，其中火电行业排放 13.18 亿 t，小于允许排放量。

关键词： 碳达峰；碳中和；资源禀赋；电力行业；发展路径

Abstract: The development path of the power industry has attracted much attention and heated discussion, since President Xi Jinping announced China's carbon peak and carbon neutrality targets. It points out that carbon peak includes peak time and peak value, and carbon neutrality is not zero emission of CO_2, starting from the basic concept of carbon peak and carbon neutrality. Based on the path analysis of carbon peak and carbon neutralization in developed countries, the similarities and differences between China and developed countries are obtained. It will be harder for China to reach a carbon peak and become carbon neutrality. Three important measures are proposed, the first is with energy - saving and burning with blending as the lead, to retain no less than 800 million kW thermal power units. The second is with low carbon energy as the key, to develop wind and solar power generation. The third is with energy storage and carbon capture as the supplement, to ensure the stability of electric power system. According to the China's practical situation that the fossil energy is with rich coal, poor oil and little gas, the development of hydro - power resources is basically completed, and the site selection of nuclear power stations is more difficult, it is estimated that the CO_2 emission from China's thermal power industry during the carbon peak period is about 4.7 billion tons, the allowable CO_2 emission is about 1.35 billion tons during the period of carbon neutrality. And China's installed power capacity will be 6.43 billion kW, of which wind and solar power generation is 5 billion kW, nuclear power 200 million kW and hydro - power 430 million kW, waste heat, pressure and gas generated electricity of 50 million kW, biomass generated electricity of 120 million kW, gas generated electricity of 100 million kW, coal - fired generated electricity of 530 million kW. The non - fossil energy generated electricity installed capacity accounts for 90.2%, electricity generation accounts for 85.3%. China's power industry emits about 1.521 billion tons of CO_2 during the period of carbon neutrality, of which 1.318 billion tons are emitted by the thermal power sector, less than the allowable emissions.

基金项目： 国家能源集团 2020 年度科技项目“集团公司清洁化发展和指标体系研究”(GJNY - 20 - 110)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Key words: carbon peak; carbon neutrality; resource endowment; power industry; development path
中图分类号: TK16; X701.7　　文献标识码: B　　文章编号: 1674 - 8069(2021)03 - 009 - 08

0 引言

2020 年 9 月 22 日,国家主席习近平首次在第七十五届联合国大会一般性辩论会宣布: 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,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。至 2021 年 4 月 22 日的领导人气候峰会,习近平主席至少在 9 次国际会议、国内 3 次会议与视察福建讲话先后阐述了碳达峰与碳中和的目标、意义、政策、措施、行动等内容,受到国内外的广泛关注。

CO_2 排放的最大来源是化石能源的燃烧,据《世界能源统计年鉴 2020》[1],中国煤炭、石油、天然气消费量分别占世界总量 51.7%、14.5%、7.8%,可见中国控制 CO_2 排放,首当其冲的是要控制煤炭消费。中国煤炭约一半用于燃烧发电,2018 年中国火电(约 90% 是煤电)的 CO_2 排放量占全国总排放量的 43%,是 CO_2 排放的最大单一来源[2]。减少电力行业的煤炭消费确实是减少 CO_2 排放的有效手段,但中国富煤贫油少气的资源禀赋[3],使得电力行业很难离开煤炭。针对碳达峰、碳中和约束下电力行业的发展路径,各种观点分歧很大,有的提出加快燃煤电厂退出,煤电清零[4];有的提出煤炭开发的绿色转型[5],因地制宜推进区域能源革命[6]。随着经济社会的发展,电力行业面临着增加供应和减少碳排放的双重挑战,有必要从中国的国情出发,结合技术可靠性、减碳效果、成本等,探讨能够提供安全、环境友好、社会可承受的电力行业的发展路径。

1 电力行业碳达峰、碳中和概念与实现路径

1.1 碳达峰、碳中和的定义

根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovermental Panel on Climate Change,IPCC)的定义,碳达峰是指某个地区或行业年度 CO_2 排放量达到历史最高值,然后进入持续下降的过程,是 CO_2 排放量由增转降的历史拐点。碳达峰(peak CO_2 emissions)包括达峰年份和峰值。碳中和是指由人类活动造成的 CO_2 排放量,与 CO_2 去除技术(如植树造林)应用实现的吸收量达到平衡。

1.2 电力行业碳达峰、碳中和的概念

对照碳达峰的定义,碳达峰包括达峰年份和峰值。习近平主席已代表中国政府宣示,中国力争在 2030 年前实现碳达峰。达峰年份基本确定,而且有条件的地区、行业可以率先实现碳达峰,但到目前为止具体峰值尚未公布。

事实上,电力行业除 CO_2 外,SO_2 和 NO_x 也都有排放达峰的过程,如中国电力行业 SO_2 排放在 2006 年达到峰值 1320 万 t,此后逐步下降到 2014 年的 620 万 t,2015 年快速下降至 200 万 t; NO_x 排放量在 2011 年达到峰值 1107 万 t,此后逐步下降到 2014 年的 620 万 t,2015 年快速下降至 180 万 t[7-9],如图 1 所示。从图 1 可以看出,尽管中国燃煤电厂基本上均实现了烟尘、SO_2、NO_x 超低排放,但 2019 年电力行业的 SO_2 和 NO_x 排放量仍分别高达 89 万 t 和 93 万 t[10-11]。

根据 IPCC 碳中和的定义,CO_2 的排放量与吸收量相等。事实上电力行业只要发电就会排放 CO_2,表 1 是 IPCC 发布的全球各种电源发电的 CO_2 平均排放强度[2]。

可见,不论是何种电源形式,只要发电都要排放 CO_2。对于化石能源发电,即使加装碳捕集工程(Carbon Capture and Storage, CCS 或 Carbon Capture, Utilization and Storage ,CCUS),由于脱除效率所限,也是排放 CO_2 的,因此电力行业自身实现碳中和是不可能的,只能是在保障电力供应的同时,电力行业尽可能减少 CO_2 排放。所有国家碳中和时电力行业都应有一定额度的 CO_2 排放,所以电力行业碳中和不是 CO_2 零排放。

1.3 电力行业碳达峰、碳中和的实现路径

世界各国由于资源禀赋、技术水平、经济水平、地域范围等各不相同,因此不同国家电力行业碳达峰、碳中和的路径也各不相同。需要指出的是发达国家的碳达峰过程一般都是经济社会发展的自然过程,如英国 1973 年就已实现碳达峰,法国、德国、瑞典 1978 年实现碳达峰,美国 2007 年实现碳达峰,这些早已实现碳达峰的国家,其共同点是早已完成工业化,进入了后工业化时代或信息时代,经济增长已不依赖能源消费的增长,电力装机容量或发电量多

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

年维持在相对稳定的水平[1,12]。

实现碳中和,促进低碳发展转型的各种国际规则、行业准则及企业标准层出不穷。世界范围内力推实现 1.5℃温升控制目标,到 21 世纪中叶全球实现碳中和的呼声日益强烈。欧盟提出“欧洲绿色新政”,宣布 2050 年实现净零排放,成为首个碳中和欧洲大陆。全球已有 121 个国家提出 2050 年实现碳中和的目标和愿景,其中包括英国、新西兰等发达国家以及智利、埃塞俄比亚、大部分小岛屿国家等发展中国家。不少国家和城市也提出 2030—2050 年期间实现 100% 可再生能源目标,提出煤炭和煤电退出以及淘汰燃油汽车的时间表,并有 114 个国家表示将强化和更新国家自主贡献(National Determined Contributions, NDC)目标[13]。

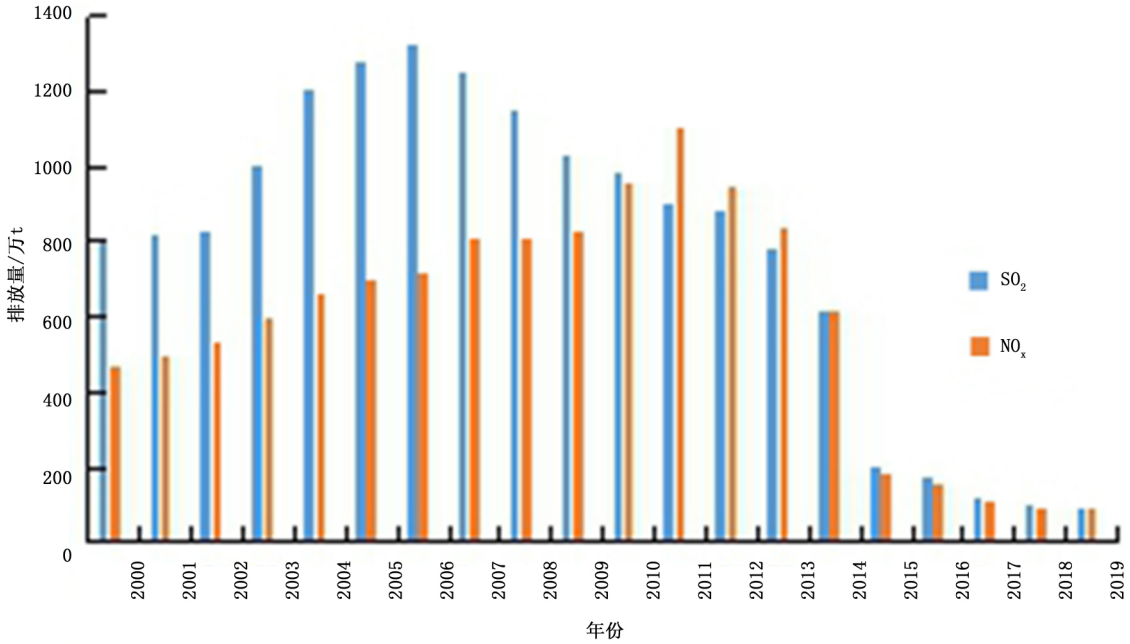

图 1　中国电力行业 SO_2 和 NO_x 排放量的达峰与下降过程

表 1　全球各种电源的平均 CO_2 排放强度　g/(kW·h)

电源名称	排放强度
煤电	1001
油电	840
气电	469
光伏	48
地热	45
光热	22
生物质	18
核电	16
风电	12
潮汐	8
水电	4

从表 1 中可以看出,化石能源电力,即煤电、石油和气电均为高碳排放电源(简称“高碳电源”),其中以煤电为最高,而其余所有的 8 种电源,均是低碳排放电源(简称“低碳电源”)。从各种电源的 CO_2 排放强度可以看出,降低 CO_2 的最简单方法就是大力发展低碳电源,抛弃高碳电源。如 2019 年 11 月新西兰通过《零碳法案》,2035 年实现 100% 可再生能源发电。2020 年 7 月,德国联邦议会通过了《燃煤电厂淘汰法案》,最迟到 2038 年年底,完全淘汰煤炭发电能力[14]。

其次是燃煤发电的燃料替代,如用低碳、零碳燃料替代煤炭,欧洲有不少国家利用天然气、秸杆替代燃煤发电,如英国最大的燃煤电厂 Drax 拥有 6 台 660 MW 机组,其中 4 台机组全部改燃生物质燃料,另外 2 台改烧天然气[2]。美国则大量使用页岩气替代燃煤发电。

再次是燃煤电厂的 CO_2 捕集利用,可分为燃烧前捕集、富氧燃烧和燃烧后捕集。从现阶段来看,燃烧前捕集技术主要是应用于整体煤气化联合循环(Intergrated Gasification Combined Cycle, IGCC)电

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

厂，已有大规模工业应用的成功案例，但由于该技术工艺复杂，投资成本高，与现有工艺兼容性差，不适用于对现有工艺设备的改造，导致其发展较为缓慢。富氧燃烧仍处于中试验证阶段，没有商业规模项目开始实施建设，大型空分装置的高投资和高能耗，以及系统升压－降压－升压过程中的不可逆损失较大，是制约富氧燃烧技术成本降低的主要因素。燃烧后捕集技术是目前相对成熟的碳捕集技术，是现阶段实现 CO_2 大规模捕集的重要途径，其主要研究方向是提高效率，降低运行成本[15]。

2　中国电力行业碳达峰、碳中和的适宜路径

2.1　中国与发达国家电力行业碳达峰、碳中和的路径异同

发达国家碳达峰是经济社会发展的自然过程，碳达峰时经济发展已度过工业化阶段，进入了后工业化阶段或信息化阶段，经济发展已不依赖能源消费的增长，电力长期处于相对稳定的状态，因此其碳中和主要是在保持现有电力供应的基础上，尽可能减少 CO_2 排放。

中国 GDP 总量居全球第二，但人均 GDP 刚刚超过 1 万美元，2019 年中国人均 GDP 仅占美国的 16%，2020 年末才消除贫困。中国 2019 年的人均 GDP 仅是 16 个国家碳达峰时人均 GDP 平均值的 18.6%[12]，中国计划在 2035 年左右基本实现代化，人均 GDP 达到中等发达国家水平。

中国目前尚未完成工业化，GDP 的增长仍依赖能源消费的增长，因此中国电力行业的碳中和不仅要减少 CO_2 排放，而且要满足电力需求的持续增长。据解振华等人的研究预测，中国全社会用电量将从 2020 年的 7.5 亿(kW·h) 增长到 2050 年的 11.91～14.27 亿(kW·h)[13]，增长率高达 58.8%～90.3%。可见，中国电力行业碳中和的难度要远高于任何发达国家。

中国电力行业碳中和的另一难度在于中国的资源禀赋，据《中国矿产资源报告 2019》的数据测算，中国已查明的化石能源储量中煤炭、石油、天然气分别占 99%、0.4%、0.6%[3]，因此欧美国家普遍采用的用天然气、页岩气等替代燃煤发电，在中国是行不通的。尽管中国目前的燃气电厂比例很低，但 2019 年中国天然气的进口依存度 43%，石油的进口依存度则高达 71%，远超国际公认的安全警戒线[16]。可见，在中国完全淘汰燃煤电厂是不现实的。

2.2　以节能与掺烧为引领，保留火电机组装机不少于 8 亿 kW

2.2.1　实施煤电节能改造，降低单位煤电发电量的碳排放

2014 年 9 月发展改革委、环境保护部、能源局印发了《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014－2020 年)》，与节能改造前的 2013 年相比，2019 年全国火电行业平均供电煤耗从 321 g/(kW·h) 降低到 306.4 g/(kW·h)，下降 14.6 g/(kW·h)，相当于 2019 年节约标煤 7368 万 t[18]，仅此就可减少 CO_2 排放近 2 亿 t。

2019 年全国火电机组容量 118957 万 kW，其中燃煤发电 104063 万 kW(占 87.5%)，燃气发电 9024 万 kW，生物质发电 2361 万 kW，余温、余压、余气发电 3272 万 kW，燃油发电 175 万 kW。

60 万 kW 及以上的大机组容量占比为 45.0%；30～60 万 kW 等级的机组容量占比 35.4%，其中亚临界机组约 3.5 亿 kW，近 1000 台，容量占比超过 30%；单机容量小于 30 万 kW 的老小机组容量占比 19.6%[11]。这说明全国火电装机容量中近一半的是效率低、煤耗高、性能差的亚临界及以下参数的机组和热电联产小机组，如表 2 所示。

表 2　全国火电机组容量等级占比

单机容量/(万 kW)	占比/%
容量＜10	9.8
10≤容量＜20	5.5
20≤容量＜30	4.3
30≤容量＜60	35.4
60≤容量＜100	33.0
容量≥100	12.0

在实现碳中和过程中，国家应出台政策首先淘汰关停效率低、煤耗高、役龄长的落后老小机组。2019 年的统计数据表明，小于 10 万 kW 的小机组容量 11657.8 万 kW，占火电总容量的 9.8%，年利用小时数 4431 h，比全国火电机组的平均利用小时 4365 h 高出 66 h[11]，小于 30 万 kW 的机组容量超过 2.3 亿 kW，应逐一分析这些机组的实际情况，该淘汰的坚决淘汰；其次应该对占煤电容量 30% 的近 1000 台亚临界机组进行升级改造。将亚临界机组

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的效率和煤耗提升到超超临界的水平，以大幅度地降低其煤耗，同时大力改善其低负荷调节的灵活性，以大大提高其消纳风电和光伏发电量的能力，尤其是亚临界机组均是汽包锅炉，具有良好的水动力学的稳定性，因而更加适应电网的负荷调节。徐州华润电厂于 2019 年 7 月完成了对 32 万 kW 亚临界燃煤机组的改造，额定负荷下的供电煤耗从改造前的 318 g/(kW·h) 降低到 282 g/(kW·h)，每度电降低标准煤耗 36 g，按年利用小时 4 500 h 计，相当于每年节约标煤 5.2 万 t，减少 CO_2 排放约 14 万 t。改造后机组不但具有稳定的 100% ~20% 范围内的调峰调频性能，而且在 19.39% 的低负荷下仍然实现了超低排放，达到了大幅降低煤耗，显著提高灵活性的目标[2]。

2020 年 12 月并网发电的安徽平山电厂二期工程设计供电煤耗 251 g/(kW·h)，厂用电率按 5% 考虑，发电煤耗仅为 238.45 g/(kW·h)，折算单位发电量的 CO_2 排放量为 643.8 g/(kW·h)，介于 IPCC 公布的油电与气电 CO_2 排放强度之间。

2.2.2　掺烧非煤燃料，进一步降低煤电碳排放

煤电的另一个低碳发展的方向是煤与生物质、污泥、生活垃圾等耦合混烧。煤与生物质耦合混烧发电主要的突出优点是: 利用固体生物质燃料部分或全部代替煤炭，显著降低原有燃煤电厂的 CO_2 排放量; 利用大容量高参数燃煤发电机组发电效率高的优势，大幅度提高生物质发电效率，节约生物质燃料资源; 利用已有的燃煤发电机组设备，只对燃料制备系统和锅炉燃烧设备进行必要的改造，可以大大降低生物质发电的投资成本; 参与混烧的生物质燃料比例可调节范围大(通常为 5% ~20%)，调节的灵活性强，对生物质燃料供应链的波动性变化有很强的适应性[2]。

燃煤电厂掺烧生物质燃料，在国内外均有成熟经验。掺烧污水处理厂污泥，在国内也有不少电厂投运，如广东深圳某电厂 300 MW 燃煤机组、江苏常熟某电厂 600 MW 燃煤机组、江苏常州某电厂 600 MW 燃煤机组。掺烧生活垃圾的主要是循环流化床锅炉的燃煤电厂，也有先将垃圾气化再掺入煤粉炉燃烧的电厂。

2.2.3　碳中和时中国火电机组的保留规模

2020 年 12 月到 2021 年 1 月自湖南省通知有序用电之后，浙江、江西、陕西等多地都发出了限电的通知，全国多地出现拉闸限电。2021 年 1 月 7 日当天晚高峰创出了全社会用电高点，达到了 11.89 亿 kW，全国的发电装机容量为 22 亿 kW，为何不能保证 11.89 亿 kW 的用电负荷呢? 这就需要区分发电装机容量与保供装机容量。

2020 年底中国发电装机容量达到 22 亿 kW，但并不意味着这些机组能够同时发电。2021 年 1 月 7 日 11.89 亿 kW 的用电负荷高峰出现在晚上，太阳能就是光伏发电没有出力。刚好 1 月 7 日全国大面积没有什么风，风力发电的装机出力大概 10% 左右，全国 5.3 亿 kW 风电和光伏的总装机，有 5 亿 kW 没有出上力。冬季又是枯水期，我国 3.7 亿 kW 水电的装机容量在用电高峰时超过 2 亿 kW 没有出上力。另外，冬季是天然气的用气高峰，中国 1 亿 kW 左右的天然气发电装机，有一半左右也没有出上力。加上发电机组停机检修、区域布局等问题，造成冬季缺电就显而易见了[2]。

2060 年前中国争取实现碳中和，电力行业首当其冲，需要大力发展可再生能源，但可再生能源不可控，不能作为保供电源。能够作为保供电源的主要是火电、水电、核电、储能(含抽水蓄能)。火电包括燃煤发电、燃气发电、燃油发电、生物质发电等，是最可靠的保供电源。

2020 年中国的水电装机容量 3.7 亿 kW(含抽水蓄能 3149 万 kW)，容易开发的水电资源已开发完毕，据报道中国的水电开发极限是 4.32 亿 kW。2020 年中国的核电装机容量 0.5 亿 kW，核电由于核安全问题，选址极其困难，加上核燃料资源的限制，不可能大规模发展，预计可发展到 2 亿 kW。

2020 年中国建成投运的储能项目累计装机规模 3560 万 kW，其中抽水蓄能 3149 万 kW[19]。2021 年 4 月 19 日，国家能源局印发《2021 年能源工作指导意见》，明确提出开展全国新一轮抽水蓄能中长期规划，稳步有序推进储能项目试验示范。在所有储能方式中，抽水蓄能经过了几十年的工程实践检验，技术最为成熟，也最具经济性，具有大规模开发潜力，但选址较为困难。

与抽水蓄能相比，其他储能项目规模都比较小，且有潜在的安全风险。储能项目都是将电能的再次转化，如抽水蓄能是将电能转化为机械能，机械能再转化为电能; 化学储能是将电能转化为化学能，再将化学能转化为电能等等，在转换过程中会有大量的

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

能源损耗。考虑到中国大规模开发风电与光伏发电，预计储能项目需新增 2 亿 kW。

考虑到将来极端天气会更多，仍以用电负荷高峰出现在冬季晚间为例，储能、核电的出力能力均取 1，水电的出力能力取 0.5，计算可得储能、核电、水电的同时发电能力为 6.16 亿 kW。

保留火电机组装机 8 亿 kW，出力能力取 0.85，用电高峰时发电能力 6.8 亿 kW。这样，用电高峰时顶得上的发电能力为 12.96 亿 kW，基本可以保证电力供应。

2.3　以低碳能源为关键，大力发展风电与光伏发电

从表 1 中可以看出，国内外有商业应用的低碳能源有 8 种，中国的水电资源开发程度已经很高，核电选址较为困难，生物质发电规模已近 2500 万 kW，多余生物质燃料可掺烧到现有燃煤电厂，能够发电的地热资源非常有限，潮汐能发电早有建成的示范项目，但一直未能推广，因此，现在能够大规模发展以至于取代化石能源电力，取代煤电的就是可再生能源电力的风电和太阳能发电这两种电源。

近 10 多年来中国的风电与太阳能发电均取得快速发展，如图 2 所示。从图 2 可以看出，中国风能发电装机从 2009 年的 1 613 万 kW 增长到 2019 年 28 153 万 kW，太阳能发电装机从 2009 年的 2 万 kW 增长到 2019 年 25 343 万 kW[11]。

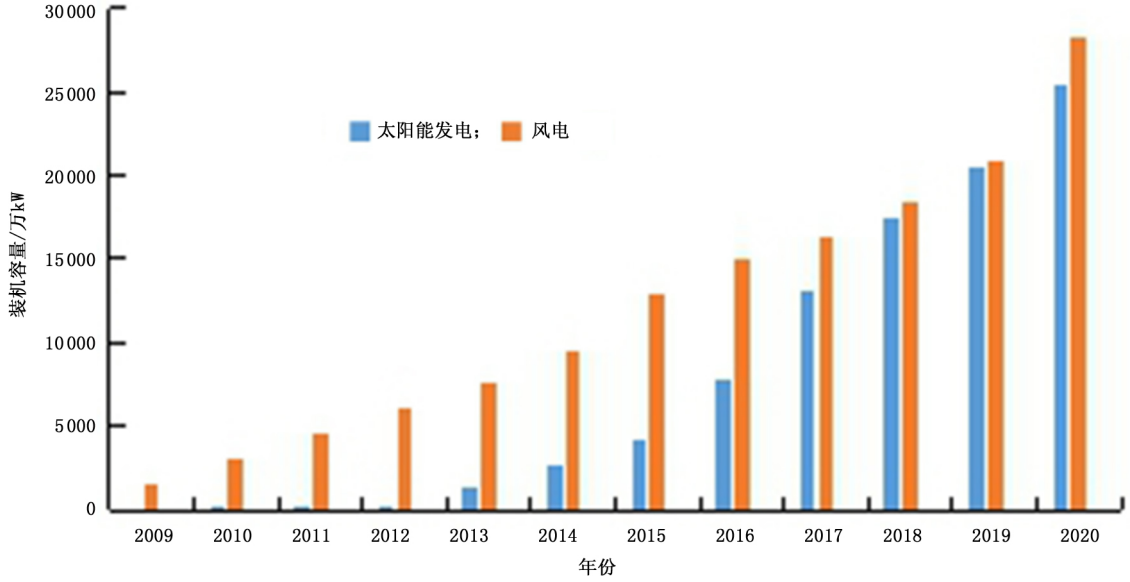

图 2　中国风电与太阳能发电的发展状况

2020 年 12 月 12 日，习近平主席在气候雄心峰会上进一步宣布：到 2030 年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65% 以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到 25% 左右，森林蓄积量将比 2005 年增加 60 亿 m^3，风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿 kW 以上。

为了满足全社会的用电需要，碳中和时中国非水可再生能源的发展预计将达到 50 亿 kW，主要是风电与太阳能发电，会有少量的地热发电及潮汐能发电。

2.4　以储能与碳捕集为补充，保障电力系统稳定

为减少弃风、弃光、弃水现象，保障电力系统稳定，发展储能项目是非常必要的，但储能项目不仅投资较大，而且本身消耗电能，如抽水蓄能是效率较高的储能方式，能源转换效率仅有 75% 左右，因此国家必须出台相关政策，推动储能项目的建设。

碳捕集工程，包括碳捕集和封存（CCS）、碳捕集和利用（CCU）以及碳捕集、利用和封存（CCUS）。碳捕集工程不仅投资大、运行费用高，而且面临高耗能、高风险等问题[20]。使用 CCUS 单位（kW·h）发电能耗增加 14% ~25%[21]，导致能耗需求量大幅增加；CCUS 各个环节成本高昂，导致 CCUS 难以发展应用；并且不论哪种方式封存 CO_2 都存在泄漏风险，会造成难以评估的环境风险。但是，CCUS 仍是碳减排潜在的重要技术，中国政府高度重视，在一系列国家规划与方案中将 CCUS 列为缓解气候变化的重要技术[22-31]。

2021 年 1 月国内最大规模 15 万 t/a CO_2 捕集

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和封存全流程示范工程在国家能源集团国华锦界电厂建成[32]。

因此,降低碳捕集,利用和封存(CCUS)的成本、能耗及风险任重道远,在没有重大的技术突破以前,显然不宜推广应用。即使 CCUS 技术有所突破,也需要政府持续推进。

3　电力行业碳达峰、碳中和时 CO_2 排放量

3.1　火电行业碳达峰时 CO_2 排放量

2018 年火电行业排放的 CO_2 占全国排放总量的 43%,约 43 亿 t[2,17]。2021 年 4 月 22 日,习近平主席在领导人气候峰会上指出: 中国将严控煤电项目,“十四五”时期严控煤炭消费增长、“十五五”时期逐步减少煤炭消费量。可以看出,2030 年前煤电装机容量还是会增长的,全国煤碳消费量会有所减少,但电煤消费量会有所增加,需要大力推进“以电代煤”,提高电气化水平。

预计火电行业碳达峰时 CO_2 排放量会在 2018 年的基础上增长 15% 左右,约 47 亿 t。

3.2　火电行业碳中和时 CO_2 允许排放量

据 Pierre Friedlingstein 等人的研究[17],2009—2018 年全球每年化石燃料排放的 CO_2 介于 330 ~ 370 亿 t 之间,平均约 350 亿 t,全球碳循环后每年造成大气中 CO_2 增加约 180 亿 t,即全球每年化石燃料排放 CO_2 约 170 亿 t 时,就可实现全球碳中和。中国人口数占世界人口总数的 18.5%,如果不考虑共同但有区别的责任,按全球人均 CO_2 排放来考虑,中国碳中和时可排放 CO_2 约 31.45 亿 t,比 2018 年排放的 100.3 亿 t 减少 68.85 亿 t。

2018 年中国火电行业排放的 CO_2 占全国排放总量的 43%[2],不考虑碳中和实现时煤炭基本上均用来发电,其他工业行业的 CO_2 排放占比会有所下降,火电行业应该上升的因素,火电行业可以排放 CO_2 约 13.5 亿 t,电力行业的 CO_2 排放指标应超过该限值。

3.3　电力行业碳中和时 CO_2 预测排放量

依据前面的分析,在现有能源资源、技术水平及安全需求基础上,碳中和时中国电力行业的发电装机构成、发电量及 CO_2 排放量测算如表 3 所示。风电与太阳能各按 25 亿 kW 计,考虑到技术进步,除燃煤发电外,CO_2 排放强度均按表 1 中数值的 0.8 倍计算,全国煤电机组按发电煤耗 281 g/(kW·h)、供电煤耗 295 g/(kW·h)计,全国生物质量按折算 1.07 亿 t 标准煤计,折算其装机容量及发电量,1 t 标煤燃烧后排放 2.7 t 的 CO_2。

表 3　碳中和时中国电力行业生产与 CO_2 排放

发电类型	装机容量 /亿 kW	年利用小时 /h	发电量 /亿(kW·h)	CO_2 排放强度 /g·(kW·h)$^{-1}$	CO_2 排放量 /亿 t
风电与太阳能	50	1500	75000	24	1.80
核电	2	7000	14000	12.8	0.18
水电	4.3	3600	15480	3.2	0.05
余热、余压、余气	0.5	3000	1500	0	0
生物质	1.2	3000	3600	0	0
气电	1	3000	3000	375.2	1.12
煤电	5.3	3000	15900	758.7	12.06
合计	64.3	–	128480	–	15.21

从表 3 中可以看出,碳中和时,全国发电装机容量高达 64.3 亿 kW,其中非化石能源发电装机容量 58 亿 kW,占比 90.2%;煤电装机容量 5.3 亿 kW,占比 8.2%;包括生物质与余热、余压、余气在内的火电装机容量 8 亿 kW,占比 12.4%。从发电量来看,碳中和时,全国发电量近 13 万亿(kW·h),其中非化石能源发电量占比 85.3%。

全国电力行业排放 CO_2 量 15.21 亿 t,其中火电行业排放 13.18 亿 t,占全国可排放总量 31.45 亿 t 的 41.9%,小于目前的占比水平 43%。可见,如果能够实现上述目标,电力行业作出的贡献是相当巨大的。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 结语

(1) 碳达峰包括达峰时间与峰值，碳中和不是 CO_2 零排放，中国碳达峰时火电行业排放的 CO_2 量约 47 亿 t，碳中和时火电行业允许排放 CO_2 量约 13.5 亿 t。

(2) 中国电力行业的发展路径应贯彻以节能与掺烧为引领，保留火电机组不少于 8 亿 kW；以低碳能源为关键，大力发展风电与光伏发电；以储能与碳捕集为补充，保障电力系统稳定等 3 条重要举措。

(3) 碳中和时中国电力装机容量预计可达 64.3 亿 kW(不包括储能容量)，非化石能源发电装机容量占比 90.2%，发电量占比 85.3%。电力行业排放 CO_2 将从超过 47 亿 t 下降至 15.21 亿 t，其中火电行业排放 13.18 亿 t。

参考文献:

[1] 英国石油公司. Statistical Review of World Energy 2020 [M]. 2020.

[2] 毛健雄. "3060"目标下，我国煤电如何低碳发展 [N]. 中国电力报，2021 - 03 - 19.

[3] 自然资源部. 中国矿产资源报告 2019 [M]. 北京：地质出版社，2019.

[4] 崔宜筠，Nathan Hultman，姜克隽，等. 加快中国燃煤电厂退出：通过逐厂评估探索可行的退役路径 [R]. https://news.bjx.com.cn/html/20200108/1034690.shtml，2021 - 05 - 07.

[5] 谢克昌. "乌金"产业绿色转型 [J]. 中国煤炭工业，2016(2)：6 - 7.

[6] 谢克昌. 因地制宜推进区域能源革命的战略思考和建议 [J]. 中国工程科学，2021，23(1)：1 - 6.

[7] 朱法华，王 圣，赵国华，等. GB 13223 - 2011《火电厂大气污染物排放标准》分析与解读 [M]. 北京：中国电力出版社，2013.

[8] 朱法华，李军状，马修元，等. 清洁煤电烟气中非常规污染物的排放与控制 [J]. 电力科技与环保，2018，34(1)：23 - 26.

[9] 朱法华，王 圣. 煤电大气污染物超低排放技术集成与建议 [J]. 环境影响评价，2014(5)：25 - 29.

[10] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2019 [M]. 北京：中国建材工业出版社，2019.

[11] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2020 [M]. 北京：中国建材工业出版社，2020.

[12] The World Bank Group. World development indicators - economy [EB/OL]. https://data.worldbank.org.cn/，2021 - 05 - 08.

[13] 解振华，保建坤，李 政，等.《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告 [J]. 中国人口·资源与环境，2020，30(11)：1 - 25.

[14] 德国议会. 减少和终止燃煤发电法 [EB/OL]. https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2020/kw27 - de - kohle-ausstieg - 701804，2021 - 05 - 08.

[15] 韩 涛，赵 瑞，张 帅，等. 燃煤电厂二氧化碳捕集技术研究及应用 [J]. 煤炭工程，2017，49(S1)：24 - 28.

[16] 张运洲，代红才，吴潇雨，等. 中国综合能源服务发展趋势与关键问题 [J]. 中国电力，2021，54(2)：1 - 10.

[17] Pierre Friedlingstein，Matthew W Jones，Michael O'Sullivan，et al. Global carbon budget 2019 [J]. Earth System Science Data，2019，11(4)：1783 - 1838.

[18] 朱法华，许月阳，孙尊强，等. 中国燃煤电厂超低排放和节能改造的实践与启示 [J]. 中国电力，2021，54(4)：1 - 8.

[19] 赵 冉. 构建新型电力系统课题下储能市场升温：多元技术模式等待市场检验 [N]. 中国电力报，2021 - 04 - 29.

[20] 生态环境部. 我国应对气候变化的政策与行动 2018 年度报告 [EB/OL]. (2018 - 12 - 05) [2019 - 12 - 05]. http://hbj.als.gov.cn/hjgw/201812/t20181205_1584933.html.

[21] 李 琦，陈征澳，张九天，等. 中国 CCUS 技术路线图未来版的(更新)启示：基于世界 CCS 路线图透视的分析 [J]. 低碳世界，2014(13)：7 - 8.

[22] 李小春，张九天，李 琦，等. 中国碳捕集、利用与封存技术路线图(2011 版)实施情况评估分析 [J]. 科技导报，2018，36(4)：85 - 95.

[23] 马 丁，陈文颖. 中国 2030 年碳排放峰值水平及达峰路径研究 [J]. 中国人口·资源与环境，2016，26(S1)：1 - 4.

[24] 韩学义. 电力行业二氧化碳捕集、利用与封存现状与展望 [J]. 中国资源综合利用，2020，38(2)：110 - 117.

[25] 米剑锋，马晓芳. 中国 CCUS 技术发展趋势分析 [J]. 中国电机工程学报，2019，39(9)：2537 - 2544.

[26] 韩 力，谢 辉，李 治. 碳捕获利用与封存技术发展探究 [J]. 建材发展导向，2020，18(4)：57 - 59.

[27] 陈敏曦. 氢将在未来能源系统中发挥重要作用 [J]. 中国电力企业管理，2019(19)：92 - 94.

[28] 李家全. 碳捕集利用与封存项目决策方法及其应用研究 [D]. 北京：中国矿业大学，2019.

[29] 白宏山，赵东亚，田群宏，等. CO_2 捕集、运输、驱油与封存全流程随机优化 [J]. 化工进展，2019，38(11)：4911 - 4920.

[30] 陈新新，马俊杰，李 琦，等. 国内地质封存 CO_2 泄漏的生态影响研究 [J]. 环境工程，2019，37(2)：27 - 34.

[31] 秦积舜，李永亮，吴德彬，等. CCUS 全球进展与中国对策建议 [J]. 油气地质与采收率，2020，27(1)：20 - 28.

[32] 国华电力公司. 国内最大规模碳捕集示范工程完成安装建设 [EB/OL]. (2021 - 01 - 22) [2021 - 01 - 22] https://newenergy.in - en.com/html/newenergy - 2399982.shtml.

收稿日期: 2021-04-16；**修回日期:** 2021-05-02

作者简介: 朱法华(1966-)，男，江苏省灌南县人，研究员级高工，主要从事电力环保领域的科研与管理工作。E - mail: zhufahua@vip.sina.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net