

“碳中和”目标下中国核电发展

李萍^{1,2} 杨红义¹ 刘琳¹ 肖常志¹ 路远¹

(1. 中国原子能科学研究院 北京 102413; 2. 南华大学 湖南 衡阳 421001)

摘要: 中国能源结构不合理,化石能源占比偏高,这对如期实现“碳中和”目标带来巨大的挑战。大规模利用无碳能源是减少碳排放量的主要手段,核能作为优质的无碳能源,在“碳中和”过程中将做出重大贡献。本文从能源的生产、消费及结构等方面分析了中国能源供需现状及其发展趋势,介绍了中国核电的发展现状,预测了中国核电在不同强度低碳情景下的需求量,构建了核电“三位一体”的发展架构,保障核能高速可持续发展。研究表明中国在“碳中和”目标引导下,无碳能源大规模使用,能源结构将获得极大的优化,核能将成为最重要的无碳能源供应来源之一,在强化低碳情景中,随着核电技术及建设能力的极大提高,预计2050年中国核电装机规模最高可达6.9亿千瓦时。

关键词: “碳中和”; 无碳能源; 能源供需; 情景分析; 核电规模

中图分类号: TL11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6339(2023)01-0010-06

Development of Nuclear Power in China under Carbon Neutrality Target

LI Ping^{1,2}, YANG Hong-yi¹, LIU Lin¹, XIAO Chang-zhi¹, LU Yuan¹

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: The irrational energy structure and the high proportion of fossil fuels pose a massive challenge to China's goal of achieving carbon neutrality as scheduled. The primary way to reduce carbon emissions is to use carbon-free energy on a large scale. Nuclear power generation is carbon-free and will make a significant contribution to the process of carbon neutralization. This paper analyzes the current situation of China's energy supply and demand and its development trend from the aspects of energy production, consumption, and structure, introduces the current status of China's nuclear power generation development, predicts the demand of China's nuclear power generation under different low-carbon scenarios, and constructs the "Trinity" development framework of nuclear power to ensure the high-speed and sustainable development of nuclear power. The research shows that under the guidance of carbon neutrality, the large-scale use of carbon-free energy in China will significantly optimize the energy structure. Nuclear energy will become one of the essential sources of carbon-free energy supply. Under the enhanced low-carbon scenario, with the significant improvement of nuclear power technology and construction capacity, it is estimated that the maximum installed capacity of nuclear power in China will reach 690 million kWh in 2050.

收稿日期 2022-04-14 修订稿日期 2022-05-12

基金项目: 中核集团核能开发项目“铅铋反应堆技术”

作者简介: 李萍(1981~),女,博士研究生,讲师,现从事核电厂技术经济方面研究。

Key words: carbon neutrality; carbon - free; energy supply and demand; scenario analysis; nuclear power generation scale

基于环境保护的压力和作为大国的担当,中国政府郑重承诺在 2030 年左右和 2060 年前分别实现“碳达峰”和“碳中和”目标,并将这两个任务提上日程^[1-2]。实现“双碳”目标的基本点是减少二氧化碳的排放量,这意味着短时间内我国的能源供给将严重不足,这与中国高速发展的经济对能源的大量需求是矛盾的。协调这一环境与经济发展的矛盾,首要任务是调整能源结构,使现在的以化石能源为主的能源结构调整到以无碳能源为主的能源结构,无碳能源在中国将迎来飞速发展的机遇。

目前关于低碳政策背景下的中国能源结构及核电发展的研究非常广泛,研究认为“碳中和”过程的实质是低碳转型的过程^[3],“双碳目标”将对中国的经济结构和能源系统带来颠覆性变革^[4]。在低碳情景中,核能应用将迎来多路径发展机遇^[5],核电在能源结构中的占比将进一步提高^[6],但是这些估计是保守的^[5],考虑到核电技术及核电工程建设能力的提高对核电生产能力的提升,合理预测核电发展规模对核能的可持续发展及实现“碳中和”目标有重要意义。

本文总结了我国能源供需现状,比较分析了主要无碳能源技术发展中面临的问题及未来发展趋势,预测了核电在三种“低碳”场景下的发展规模,提出了促进核能可持续发展的建议,为实现中国“双碳”目标提供支持。

1 中国“碳中和”目标

“碳达峰”是指某区域内产生的二氧化碳排放量由升转降,并在某个时段达到最高点的过程,如图 1 所示^[7]。“碳中和”是指人为排放进入大气的温室气体量和人为吸收的量达到平衡^[8]。2060 年前中国实现“碳中和”分阶段目标见图 2。

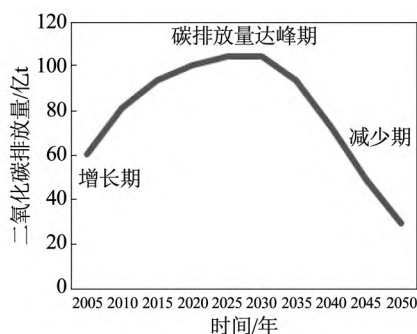


图 1 中国二氧化碳排放量达峰过程

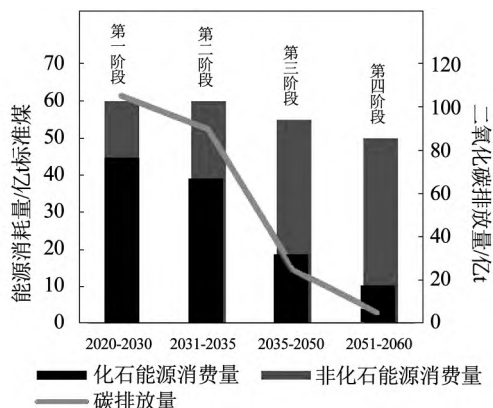


图 2 中国实现“碳中和”分阶段目标^[9]

第一阶段 2030 年,中国的能源消费总量控制在 60 亿 t 标准煤内,单位 GDP 能源消费总量(能耗强度)较 2005 年下降 59%;风电、太阳能发电、核电装机分别达到 6 亿 kWh、8 亿 kWh 和 1.4 亿 kWh,在能源消费中占比达到 26%;二氧化碳峰值水平控制在 105 亿 t 左右。

第二阶段 中国能源需求总量稳定在约 60 亿 t 标准煤内,保持制造业比重 29%,积极推动第三产业发展;非化石能源比重提高至 35%;2035 年碳排放量将至约 90 亿 t,较 2030 年下降 14%。

第三阶段 第二、三产业单位增加值能耗分别累计下降 49% 和 48%,中国能源需求总量将至约 55 亿 t 标准煤;到 2050 年,非化石能源比重提高至 67%,其中水电、核电、风电、太阳能发电和生物质发电装机规模分别达到 5 亿 kWh、3.5 亿 kWh、16 亿 kWh、23 亿 kWh 和 1.2 亿 kWh;碳排放量在 2050 年将至 25 亿 t。

第四阶段 能源消费稳中有降,非化石能源消费占比 80% 以上,最终实现碳中和目标。

由上可知,在实现“碳达峰”和“碳中和”目标过程中,中国的能源消费总量一直是稳中有降的主要原因,是能源技术的发展带来了能源效率的提高和全面节能措施的开展,全方位的实现了能源消费的节约;其次,产业结构的调整促使能源的消费结构不断优化,非化石能源消费占一次能源消费的比重不断增加。现阶段非化石能源行业将迎来一个快速发展机遇。

2 中国能源供需现状

中国是目前最大的能源生产国及消费国,2019 年中国占全球发电量、能源消费量分别为 27.8%、

24.3%。在无碳能源发电中,中国的水电生产和消费居世界首位,核电生产和消费仅次于美国和法国^[10]。自改革开放以来,中国政府围绕社会经济目标制定了清晰的能源发展规划。从“六五”规划到“十三五”规划,能源规划发生了重大转变,从原来的注重增加能源总量改变为重视能源效率。能源规划引导能源工业不断壮大而优化。

2021 年是中国开启实施“十四五”规划的第一年,“十四五”能源工作以能源安全新战略为核心,以实现“碳达峰”和“碳中和”为导向,对中国能源发展与建设提出了构建现代能源体系的目标。现代能源体系构建重点之一在于无碳能源的发展,特别是核能的开发和利用。无碳能源发展势头迅猛,但存在资源限制、技术障碍等问题。

2.1 能源消费总量逐年增加 结构调整依旧艰巨

自新中国建立以来,国民经济历经七十多年的发展获得了巨大的成绩。伴随着经济的发展,能源消费量呈逐年增长态势。根据国家统计局历年数据分析得知,中国能源消费总量自建国初期到现在增加了 50 多倍。中国能源消费增幅最快的时期分别是 1978 年改革开放时期和 2002 年的后金融危机时期。1980 年中国能源消费增幅达到 27%,2002 ~ 2004 年的能源消费增幅均超过 10%,能源消费总量变化如图 3 所示。

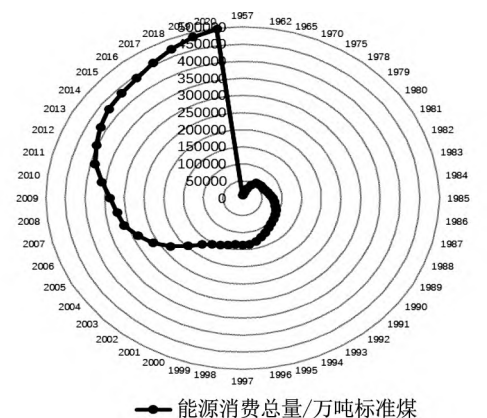


图 3 中国 1957 ~ 2020 年能源消费总量

目前,中国能源消费结构主要存在以下特点:

(1) 煤炭消费占比大,但呈逐年下降趋势。中国的煤炭消费量占比从 1957 年的 92.3% 到 2020 年的 56.8%,下降了 35.5%。从 2018 年开始,煤炭消费量占比降到 60% 以下。

(2) 石油消费量总体变化平缓。石油消费量占比最高点在 2000 年左右,从 1997 ~ 2004 年,石油消费量占比均超过 20%。石油消费的主要部门是工业和交通运输业。近年来,中国石油消费量总体的

变化与工业领域的产业升级和电能替代;交通运输领域传统能源汽车逐步被新能源汽车替代等密切相关^[11]。

(3) 天然气及无碳能源的消费量逐年增加。这一比重将在油气勘探开发技术能力的提高,页岩油气勘探开发技术和装备水平的提升,完备的无碳能源装备制造产业链等先进技术的支持下进一步增加。

(4) 能源消费结构调整的任务依旧艰巨。据国家统计局发布数据统计,2018 年,中国能源消费量按部门划分,位居首位的为工业,能源消费量超过一亿 t 标准煤的部门有 14 个^[12]。中国要实现现代能源体系的构建,到 2050 年非化石能源消费占比必须超过一半^[13],这意味着,中国的非化石能源占比要从目前的 24.3% 扩大到 2050 年的 50% 左右。

2.2 能源生产总量不足 原油和天然气进口依存度高

2020 年,中国能源进口依存度为 21.06%,其中原油净进口量 5.4 亿 t 标准煤,原油进口依存度达到 73.56%;天然气净进口量 1 403 亿 m³,天然气进口外依存度 42.16%。2017 年,中国超过美国成为最大原油进口国。2018 年,中国超过日本成为最大天然气进口国^[14]。

自 1992 年以后,中国的能源供应缺口连续 29 年处于增加状态,2000 年,能源供应量缺口达到了 1 亿 t 标准煤,2016 年能源供应量缺口增幅相比 2015 年达到 32.8%。能源进口依存度也呈逐年上升趋势,其中原油和天然气占比最高。

2.3 无碳能源发电装机容量逐年增加 核能发展潜力大

无碳能源技术的发展顺应了能源的绿色环保低碳发展的国际潮流,符合国家碳中和的政策导向^[15]。近年来,中国无碳电力能源在总能源供需占比逐年增加,目前中国水电、风电、太阳能发电累计装机容量均居世界首位^[10]。在运核电装机容量居世界第二,在建核电装机容量世界第一^[16]。如图 4 所示,2009 ~ 2020 年间,中国太阳能发电和风力发电的装机容量增长速度是最快的,受低碳政策影响及技术进步,未来装机容量有进一步增加趋势。水力发电装机容量增速相对较缓,且其在地理限制和生态保护压力下,未来发展将进一步放缓。核能发电装机容量增长最慢,但核能发电作为基荷电力将随着技术进步及投资的增加更为巩固^[17],装机容量也会进一步增加。核能是除水电外目前可大规模替代化石燃料的唯一能源。

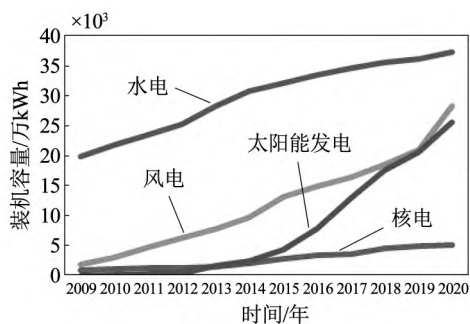


图4 主要无碳能源发电装机容量趋势
从主要无碳能源技术优势、挑战及发展趋势可

表1 无碳能源技术优势、挑战及发展趋势

无碳能源	优势	挑战	发展趋势
水电 ^[18-19]	资源丰富 无污染 发电成本低 投资回报率高 主动力设备效率高 社会综合效益高	地形及资源对规模的限制 初始投资高 建造费用高 发电机组容量限定 生态环境影响大	注重移民及生态问题 阶梯开发水电基地 水电技术智能化 建立蓄能电站
核电 ^[17-20]	能源密度大 无污染 发电成本低 能源转化率高 稳定可靠	初期建造成本高 大型电厂建设周期长 核废料泄露风险	发展聚变堆技术 机组小型化、模块化 提高经济性、安全性和灵活性
风电 ^[21-22]	资源丰富 无污染 建造速度快 经济性好	受自然环境影响大 发电机制造成本高 发电装置土地占用量大 机组运行产生噪音污染 电力稳定性和可靠性欠缺	提高风能的转化效率及传输效率 优化完善风轮控制技术 建立蓄能电站
太阳能发电 ^[22-23]	资源丰富 无污染 建设周期短	受自然环境影响大 发电设备土地占用量大 应用成本高 电力稳定性和可靠性欠缺	提高太阳能光电转换效率 建立系统完善的太阳能发电及输电电网 建立蓄能电站

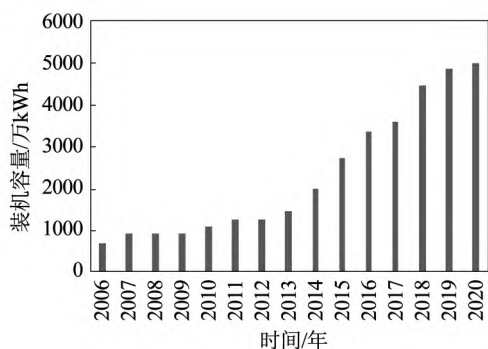


图5 2006~2020年核电装机容量趋势

据国家统计局发布的2020年能源产品产量统计数据显示^[24],中国核能发电量仅占总发电量的4.8%,低于2019年全球核能发电占全球总发电量的平均值10.4%,低于中亚和东亚平均值6.3%^[25],

以看出,相比水电、风电和太阳能发电,核电在能源密度、环境依赖性、稳定性等方面具备优势,且随着第四代核电技术的发展,核电的优势将进一步扩大,详见表1中。

2.4 中国核电发展现状

1994年,中国秦山核电站和大亚湾核电站分别开始投入商业运营,中国核电装机容量从210万kWh到2020年总装机容量5102.7万kWh,取得了辉煌的成绩。2006~2020年核电装机容量趋势如图5。

相比于北美的18.8%、北欧、西欧和南欧的24.2%、东欧的22.1%,中国核电在低碳政策背景下的发展潜力非常大。

3 中国核电发展规模预测

鉴于中国核电发展的实际情况,“十四五”规划提出,到2035年,中国核电运行装机容量达到7000万kWh的目标^[26]。2020年,中国在运机组与在建机组共7021.3万kWh。在建机组将在五年内建成,到2025年,核电在运装机容量将提前实现“十四五”规划目标。假设采用保守策略进行估计,装机容量按照每五年增加2000万kWh,2030年,核电装机容量达到9000万kWh,2050年,核电装机容量将达到1.7亿kWh。

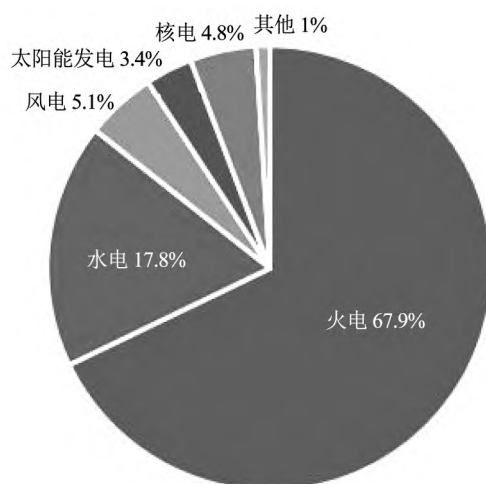


图6 2020年中国能源结构

在基于“碳中和”的低碳情景下,2030年,中国能源需求总量达峰,约60亿t标准煤,风电、太阳能发电和核电装机总量达到15.4亿kWh,其中核电装机量达到1.4亿kWh。2050年,能源需求总量有所下降,电力需求仍将保持增长,这意味着电力结构需持续优化。按能源消费总量55亿t标煤计算,非化石能源消费约36.9亿t标准煤,无碳电力装机规模将超过48.7亿kWh,核电装机规模达3.5亿kWh。

在强化低碳情景下,且核电技术及建设能力得到极大提高,2030年、2050年中国核电发电量占总发电量比例分别为10%、20%(分别接近目前全球核电发电量平均占比和达到有核电发达国家的核电占比水平)^[25],2030年电力消费占能源消费40%,2050年电力消费占能源消费达到60%,则核电需求量分别为1.79万亿kWh和5.38万亿kWh^[27],按照年利用小时数7800h计算,核电装机规模将分别达约2.29亿kWh和6.9亿kWh,如图7所示。

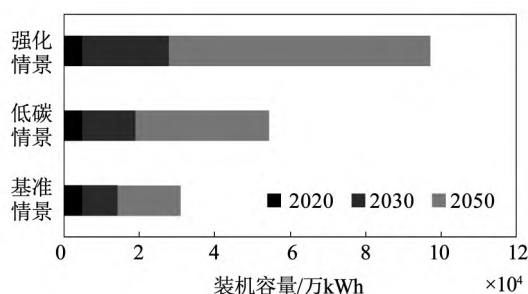


图7 中国核电需求总量预测

4 促进中国核电发展几点建议

中国核电的发展离不开专业人才的培养,离不开先进技术的创新,更离不开社会公众的信任支持。为实现“碳达峰”和“碳中和”目标,在发展核电方面要建立人才立本、技术保障、公众支持的“三位一

体”发展架构。

4.1 培养优质优量核能专业人才

行业的发展在于人才的推动,中国的核能利用始于国防事业的需要,蓬勃发展于民用核电站的建设。核能开发是一项复杂的高技术含量工作,核电站的建设,从反应堆的研究、开发、设计,到核电站的建造、运营等都需要大量的专业人才,培养核类专业人才主要通过高校和一些核科研单位。

未来核电装机容量的持续增加,行业投资将超过1万亿元人民币^[28],核能专业及相关专业人才的需求也将进一步增加。以国家核电发展规划为纲,制定核能专业人才培养规划尤为迫切。从而引导高校核类相关专业的开设及招生规模的确定,促进核能企业有计划的开展人才储备,加强企业和科研院所的“产学研”合作,建立人才培养经验交流和反馈机制,建立稳定的实习基地,提升人才质量。

4.2 先进核能技术重点发展

在“碳中和”目标下,中国核能技术创新活跃。先进小型堆因“小”而“活”,具备灵活的负荷跟踪能力、灵活的部署能力、灵活的产品输出,灵活的互补其他能源形式^[27]。基于良好的发展基础,液态金属快堆如钠冷堆和铅冷堆将得到重点发展。钍基熔盐堆技术因燃料可持续性优势也将成为未来的重点。聚变堆的发展将为核能应用开展新的局面。随着先进核能技术的发展,核能的安全性和经济性将更具竞争力,核能的利用将进一步深入市场和用户并在“碳中和”目标的实现中发挥重大作用。

4.3 加强核安全科普宣传

核安全不仅关系到核能利用的未来,更关乎国家安全、生态环境安全和民众身体健康。“核”本身不可怕,但是,普通民众对于核能科学知之甚少,曾经出现了核电站选址建设引起附近民众恐慌、核电站周边几十公里商品房没人敢买、甚至误解核电站循环水把周边鱼虾烫死了等情况^[29],福岛第一核电站泄漏事故发生后,更是引发世界范围内核能利用的谨慎。因此,通过公共媒体宣传核安全知识并在基础教育中增设核科学辅修课,加强全民核安全知识的教育宣传和科学普及;提高信息公开度,准确及时的发布核设施周边环境监测信息,接受群众监督;完善核应急管理制度,建立通畅的核应急交流平台,及时回应公众疑虑,获得民众的信任支持,避免谈“核”色变。

5 结语

在未来的几十年里,“减碳”与“发展”将成为

中国经济的主要矛盾,协调这一矛盾的根本路径是中国的能源结构的深刻改革。能源结构调整的方向在于大力发展无碳能源,同时提高化石能源的能效转化率,减少碳排放量。

无碳能源的发展受到资源、技术、经济、环境、安全、政策等多方面的影响,在“碳中和”目标的引导下,中国的无碳能源,如风电和太阳能发电等发展迅猛,但受到资源及技术的影响,后劲不足。

核能作为无碳基荷能源的优势将得到更大的发挥机会。中国通过搭建核电“三位一体”发展架构,培养大量优秀的核能专业人才;把握小型堆技术发展潮流,抓住制氢、供热、海水淡化等领域的替代利用,重视经济性,降低成本,促进核能全产业链的提质升级;消除公众对核事故的恐惧心理,提高核能建设项目接受度;进一步扩大核电在一次性能源中的占比,牢固核能在能源系统中的地位。

参考文献

- [1] 习近平. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话(全文) [EB/OL]. 新华社, (2020-09-22) http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm.
- [2] 李克强. 政府工作报告[Z]. 北京: 新华社, 2021-03-21.
- [3] 杜祥琬. 有些观点对“碳达峰碳中和”存在误解[J]. 电力设备管理, 2021(5): 1.
- [4] 王永中. 碳达峰、碳中和目标与中国的新能源革命[J]. 社会科学文摘, 2022(1): 5-7.
- [5] 王海洋, 荣健. 碳达峰、碳中和目标下中国核能发展路径分析[J]. 中国电力, 2021, 54(6): 86-94.
- [6] 刘铠诚, 何桂雄, 王珺瑶, 等. 电力行业实现2030年碳减排目标的路径选择及经济效益分析[J]. 节能技术, 2018, 36(3): 263-269.
- [7] 清华大学项目综合报告编写组. 《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.
- [8] 孙川永, 彭友兵, 东琦, 等. 陕北典型风能特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12): 110-115, 122.
- [9] 李继峰, 郭焦锋, 高世楫, 等. 我国实现2060年前碳中和目标的路径分析[J]. 发展研究, 2021, 38(4): 37-47.
- [10] 余娜. bp 世界能源统计年鉴[N]. 第70版. 中国工业报, 2021-07-13(002).
- [11] 国务院. 《关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)的通知》国办发(2020)39号, [Z]. 国务院办公厅, 2020-11-02.
- [12] 中国统计年鉴2018[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [13] 国家发展改革委, 国家能源局. 《能源生产和消费革命战略(2016-2030)》发改基础(2016)2795号, [Z]. 北京: 国家发展改革委, 2016-12-29.
- [14] 前瞻产业研究院. 2019年中国能源消费行业市场前景及发展前景分析[DP/OL]. 北京: 前瞻产业研究院, (2019.10.08) <https://bg.qianzhan.com/report/detail/459/191008-0c105e4f.html>.
- [15] 周宏春, 李长征, 周春. 碳中和背景下能源发展战略的若干思考[J]. 中国煤炭, 2021, 47(5): 1-6.
- [16] 国务院新闻办公室. 《新时代的中国能源发展》白皮书[Z]. 北京: 国新办, 2020-12-21.
- [17] 赵琛, 王一帆, 李思颖, 等. 中国未来核电发展趋势与关键技术[J]. 能源与节能, 2020(11): 46-49, 67.
- [18] 康信茂. 我国水力发电的现状与发展趋势[J]. 轻工科技, 2016, 32(3): 64-65.
- [19] 任海波, 钟杰, 彭梁, 等. 我国水力发电的历史与发展[J]. 南方农机, 2019, 50(2): 225.
- [20] 邓清华, 胡乐豪, 李军, 等. 大型发电技术发展现状及趋势[J]. 热力透平, 2019, 48(3): 175-181.
- [21] 邱欢. 关于新能源发电风力发电技术的探讨[J]. 科技风, 2020(25): 135-136.
- [22] 全斌. 新能源发电在电力系统中的发展前景[J]. 科技风, 2020(29): 126-127.
- [23] 彭科翔, 郭少臣, 李智毅, 等. 光伏发电技术发展分析与前景分析[J]. 中国设备工程, 2020(8): 169-170.
- [24] 国家统计局. 2019年全国能源生产总量[DP/OL]. 国家统计局, (2018.11.27) <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [25] IAEA. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050[R]. IAEA-RDS-1/40. Vienna: IAEA, 2020.
- [26] 国务院. 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》[EB/OL]. 新华社, [2021-03] http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [27] 荣健, 刘展. 先进核能技术发展与展望[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(9): 1638-1643.
- [28] 余娜. 核电重启呼唤人才储备运营管理人员需3~4万[EB/OL]. 中国电力新闻网, (2015-03-26) http://www.cpn.cn/zdyw/201503/t20150326_790069.html.
- [29] 朱宁宁. 加强核安全科普宣传消除谈“核”色变[N]. 法制日报, 2017-04-25.