

# 认清水电在实现“双碳”中的重要作用

张博庭

中国水力发电工程学会, 北京 100044

**摘要:** 落实“双碳”承诺是我国当前最紧迫的任务之一。但由于对水力发电的地位和作用还缺乏客观的认知, 至今还有不少人认为, 离开了煤电我国的能源安全就岌岌可危。事实上, 真正能够支撑人类走向可持续发展的, 应该是基于可再生能源构建的新型电力系统。核电作为一种不排放二氧化碳的能源形式, 理论上似乎能满足碳中和的要求, 但是, 鉴于自然界中的铀矿资源储量极为有限, 这使得核电在能源转型的初期阶段或许能发挥一定作用, 却难以成为长远的解决方案。当前国际社会在电力能源转型方向上普遍倡导的“退煤、弃核”, 转向主要依赖可再生能源的观点, 实际上是人类社会可持续发展大趋势的体现。而在这个过程中, 能否正确认识水电的地位和作用, 将成为我们实现主要依靠可再生能源供电目标的关键所在。

**关键词:** 能源转型; 碳达峰; 碳中和; 可再生能源; 水电开发

中图分类号: TM612

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2024)02-0147-14

## 引言

根据全球各国在能源转型过程中的实践经验和趋势分析, 普遍认同的观点是: 煤电退出是实现碳达峰的先决条件, 而油气发电的逐步淘汰则是实现碳中和的必由之路。

鉴于矿物资源的不可再生性, 唯一能够长期支撑人类可持续发展愿景的, 是完全由可再生能源构成的新型电力系统。值得注意的是, 核电虽然在减排二氧

化碳方面表现优异, 符合碳中和的各项标准, 但由于铀矿资源在自然界中极为稀缺, 其应用前景在能源转型的初期或许较为乐观, 但长远来看并不乐观。国际上对核电的逐步放弃, 除了安全性和成本考量外, 资源的有限性也是一个不容忽视的因素。毕竟, 稀缺的铀矿资源极为宝贵, 将其用于发电实属可惜。

既然如此, 唯有依赖可再生能源构建的新型电力系统, 方能满足人类可持续发展的需求。水电, 作为重要的可再生能源, 预计在未来能源体系中扮演关键角色。因此, 本文将从能源转型的必然性与紧迫性出

收稿日期: 2023-06-09; 修回日期: 2023-10-23

作者简介: 张博庭 (1953—), 男, 教授、高级工程师, 研究方向为能源转型以及水能开发利用。E-mail: zbt92@163.com

引用格式: 张博庭. 认清水电在实现“双碳”中的重要作用[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2024, 16(2): 147-160. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240032

Zhang Boting. Recognize the Important Role of Hydropower in Achieving “Carbon Peak and Neutrality” Goals[J]. Journal of Engineering Studies, 2024, 16(2): 147-160. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240032

发,深入剖析水电在实现碳中和中的优势与潜力,并探讨我国水电发展的挑战与机遇。通过深入的研究和分析,本文旨在增进大众对水电及更广泛的可再生能源的了解与认识,从而加速能源转型的步伐。

## 1 能源转型（碳中和）是历史必然

能源作为人类社会文明发展的基石,见证了人类从学会使用火的原始时代到现代工业社会的辉煌历程。在数千年的岁月里,生物质能源一直是人类赖以生存的主要能源。然而,近两个世纪以来,随着工业化的迅猛推进,化石能源逐渐崭露头角,成为推动社会进步的重要动力。

尽管化石能源为人类文明的飞速发展注入了强大动力,但其带来的问题也日益凸显。首要问题便是资源的有限性。据预测,地球上的化石能源储量并非无穷无尽,按照当前的消耗速度,这些资源可能在短短几百年内就会面临枯竭。这显然无法满足人类对于可持续发展的长远需求。

更为严峻的是,化石能源的大量使用导致了气候变化的加剧。二氧化碳的排放不断攀升,引发全球极端天气事件频发、海平面上升等一系列严重的生态问题,已经威胁着人类的生存与发展。<sup>[1]</sup>

面对化石能源枯竭和气候变化的双重挑战,人类必须立即采取行动。解决气候变化问题的关键就在于能源转型——从过度依赖化石能源转向大力发展可再生能源。只有这样,才能确保人类文明得以延续,并为子孙后代留下一个绿色、宜居的地球家园。

### 1.1 零碳电力：碳中和的先决条件

从可持续发展的视角来看,可再生能源无疑将成为未来人类能源的主导力量。在各国迈向碳中和的道路上,实现零碳电力成为了一个共同且至关重要的前提。目前,发电是人类获取可再生能源的主要途径,因此,确保电力排放的零碳化是实现全社会碳中和目标的关键一步。

尽管有人提出,即使电力无法完全实现零碳,也可以通过其他碳汇途径来抵消其碳排放。然而,我们必须认识到,当前人类社会的电气化水平平均仅为四

成左右。要实现全社会的碳中和,即使电力全部实现零碳化,我们仍需面临替代大量非电能源的艰巨挑战。<sup>[2-4]</sup>此外,某些领域难以实现完全替代化石能源,这就需要依靠碳汇来实现零碳目标。然而,如果一个国家的电力都需要依赖碳汇才能实现零碳化,那么整个社会的碳中和目标将变得遥不可及。因此,各国实现碳中和的前提条件必须是确保全部电力供应来自可再生能源,至少在初期应以非化石能源为主。

值得庆幸的是,自然界中的可再生能源储量极为丰富,远超过全球当前能源使用总量。这为实现碳中和目标提供了有力的资源保障。我们应该充分利用这些可再生能源,推动电力排放的零碳化,进而实现全社会的碳中和目标。<sup>[2-4]</sup>

### 1.2 摒弃化石能源发电的幻想：走向碳中和的必由之路

我国著名气候专家潘家华明确指出:“有一种观点认为,我们可以在保留化石能源的同时,通过发展森林碳汇、海洋碳汇、碳捕集与封存等手段来实现碳中和。然而,这种观点并不切实际。”<sup>[5]</sup>这一论断的背后,蕴含着对碳中和目标深刻而全面的理解。

**1.2.1 植树造林的碳储存能力具有不稳定性** 尽管植树造林被视为一种有效的手段来吸收大气中的二氧化碳并形成碳汇,但这种碳储存机制并非稳固不变。考古科学的研究揭示,地球早期的地表富含碳元素。然而,经过数亿年的生物演化和地质变化,大量的动植物在吸收太阳能后死亡,它们的遗骸被埋入地下,逐渐转化为各类含碳的化石燃料。这一过程导致大气中的碳含量逐渐减少,从而塑造了现今适宜人类居住的大气环境。<sup>[6]</sup>

从这一点来看,植树造林虽然在一定程度上有助于改善地表的碳循环,但它并不能在短期内从根本上扭转气候变化的趋势。如果人类继续无节制地开采和使用化石燃料,将那些已经深埋地下的碳元素重新释放到大气中,那么大气中的二氧化碳浓度很可能会回升至古生代晚期的水平。<sup>[6]</sup>这样的情景无疑将对人类的生存环境构成严重的威胁。

虽然,一些其他的温室气体排放源,如种植水稻、养牛等产生的排放,虽然也对气候变化有所影

响,但这并不是问题的关键所在(图1)。人类实现碳中和的关键仍然在于必须彻底改变对化石能源的依赖,摒弃保留化石能源发电的幻想。只有通过大力发展可再生能源,减少化石能源的使用和排放,才能真正实现碳中和的目标。这是对我们未来生存环境的负责,也是对子孙后代的负责。<sup>[7]</sup>

**1.2.2 碳捕捉与封存的局限性较大** 现有的碳捕捉技术在效能上已经相当成熟,但成本仍然偏高。而碳封存技术的现状则仅限于“气体封存”阶段。简单来说,气体封存指的是将捕获的二氧化碳注入地下特定地层,以利用其推动地下石油的开采。这种方法不仅有效地将二氧化碳封存在地下,同时还取代了以往使用其他物质进行驱油的方式,从而解决了部分成本问题。然而,全球范围内适用于此方法的二氧化碳需求量相对有限。全球油田的开采总量非常有限,可能仅能满足少数几座燃煤发电厂所产生的碳封存需求。<sup>[6]</sup>

除此之外,气体的封存本身也存在一定的不可靠性。例如,地震等自然灾害可能会导致封存在地下的二氧化碳突然重新释放到大气中。因此,为确保碳封存安全可靠,理想的方式应是二氧化碳固化后再进行封存。遗憾的是,目前人类尚未开发出此类技术。而且根据物理学定律,如果我们将地下的含碳固体进行开采利用后再将其埋回地下,不仅可能无法获得能源,反而可能需要消耗额外的能源。

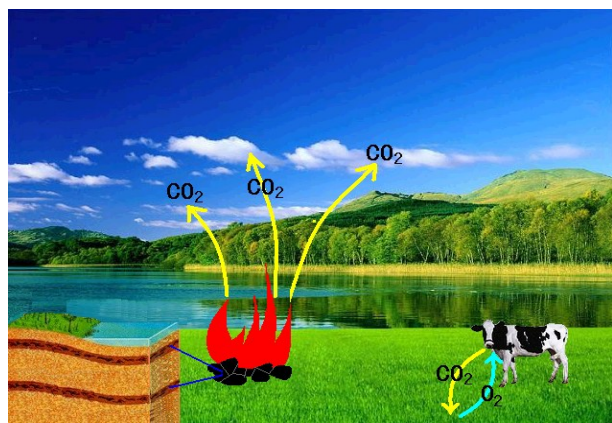


图1 不同性质的碳排放示意图

Figure 1 Schematic diagram of carbon emissions of different natures

**1.2.3 低碳煤电的不现实性与误导宣传** 众所周知,美国在2014年颁布了《清洁电力计划》<sup>①</sup>,其中对新建煤电设施施加了严格的限制。这背后的原因何在?答案很简单:至今尚无电力投资者能够开发出满足《清洁电力计划》标准的煤电技术。值得注意的是,该法案的要求并非零碳煤电,而只是希望煤电的碳排放水平能够与汽电相当。然而,即便是这样一个看似较为宽松的标准,在过去的十几年间,全球范围内也未能取得任何实质性的突破。

此外,我们必须正视一个现状:当前我国在煤电超低排放方面的宣传存在一定的误导性。所谓的“超低排放”,实际上仅仅针对个别污染物而言,与国际社会普遍关注的碳排放问题并无直接关联。更为严重的是,这种“超低排放”技术在实际应用中还有可能会导致碳排放量的增加。严谨的专家学者通常会使用“污染物超低排放”或建议采用“超低排污”这样的表述方式,以准确传达其含义。事实上,这种误导性的宣传已经产生了较大范围的影响。举例来说,就在不久前《中国能源报》网络版刊发了一篇题为“新能源发展形势下的煤电与光伏储能联动发展”的文章。该文就混淆了污染物的超低排放和碳排放的减少概念。<sup>[8]</sup>

而且,由于长期以来煤电超低排放的误导性宣传,国内不少人错误地认为,中国的煤电技术已经先进到足以实现比汽电更低的排放水平。但这完全是一种误解。事实上,无论是零碳煤电还是低碳煤电(即碳排放水平与汽电相当),目前在全球范围内都尚未取得任何实质性的进展。因此,我们必须保持清醒的头脑,以科学和理性的态度来看待煤电技术的发展和宣传。

**1.2.4 关于煤电不退出是否能实现碳中和的探讨** 经过深入研究,我们得出的结论是:若煤电不逐步退出,则碳中和目标将难以实现。国家发改委能源研究所发布的《中国煤电退役报告》<sup>[9]</sup>指出,为实现碳中和的宏伟目标,传统煤电必须逐步退出历史舞台。<sup>[6]</sup>这一论断的科学性在于,它基于严格的数据分析和逻辑

① 《清洁电力计划》是奥巴马政府提出的一项旨在应对人类活动引起的气候变化(全球变暖)的政策,在2014年由环境保护部提出。在2017年3月28日由特朗普签署的行政令让环保部重新审核这项计划,在10月份这项计划被终结执行。

辑推理,从而揭穿了某些试图通过不实之词为煤电辩护的言论。即便有人宣称未来的煤电可以通过先进的碳捕捉、碳封存等技术实现净零碳排放,我们也应明确,这已然超越了传统煤电的技术范畴和定义。<sup>[10]</sup>

简而言之,煤电在未来能源结构中的长期存在性将受到我们能否实现整个电力系统零碳排放的严峻考验。如果我们连电力这一核心领域都无法达成碳中和的目标,那么要在更广泛的社会层面实现碳中和就更是难上加难了。

此外,国际社会的普遍看法是,从电力系统的净零碳排放到全社会碳中和的实现,至少需要经历10年到15年的不懈努力。以美国为例,他们为实现2050年全社会碳中和的目标,已经明确提出了在2035年实现电力系统碳中和的阶段性计划。同样地,《中国煤电退役报告》也审慎地指出,中国需要在2040至2045年间达成电力系统的净零排放目标。因此,为确保我国碳中和目标的如期实现,我们最晚应在2045年完成所有传统煤电的逐步淘汰和替代工作。这是一个紧迫而艰巨的任务,但也是我们实现可持续发展和绿色未来的必经之路。<sup>[7]</sup>

## 2 水电是全球实现碳中和的保障

水能不仅是当前最大的可再生能源发电来源,更是一种确保风、光等间歇性可再生能源发电稳定并入电网的不可或缺的保障。特别是在当前化学储能技术尚未成熟之际,抽水蓄能技术显得尤为重要,它为人类能源转型提供了坚实的基础保障。

尽管世界各地的风、光发电的规律会有很大的不同,但一般来说,风能与太阳能之间展现出了显著的互补性。水电作为一种通常可以人工调控的能源,可以发挥出至关重要的调节作用,它使得风能和太阳能的发电能够更好地匹配电力需求,从而满足不断变化的电力负荷。

然而,令人遗憾的是,自然界中的水能资源相对稀缺,且分布不均。因此,一个国家水能资源的丰富和开发程度,往往成为决定其能否实现全面依赖可再生能源供电的关键。这一点在推动可再生能源发展的过程中必须予以高度重视。<sup>[11]</sup>

## 2.1 2050年许多国家有望实现100%可再生能源供电

根据国际上权威能源研究机构的预测,根据各国的实际情况,到2050年,许多国家有望实现100%的可再生能源供电(图2)<sup>[12]</sup>。研究机构认为,这不仅在技术上具备可行性,而且在经济上也能呈现出优越性。<sup>[13]</sup>地球上的风光发电资源总量非常巨大,远远超出我们的需求,然而,由于风光发电的随机性和间歇性使其常常难以满足电力负荷的持续变动。<sup>[3-4,6]</sup>因此,如果我们能充分利用和开发水电资源,则完全有可能担当起调节风光发电波动、满足电网稳定需求的重任。

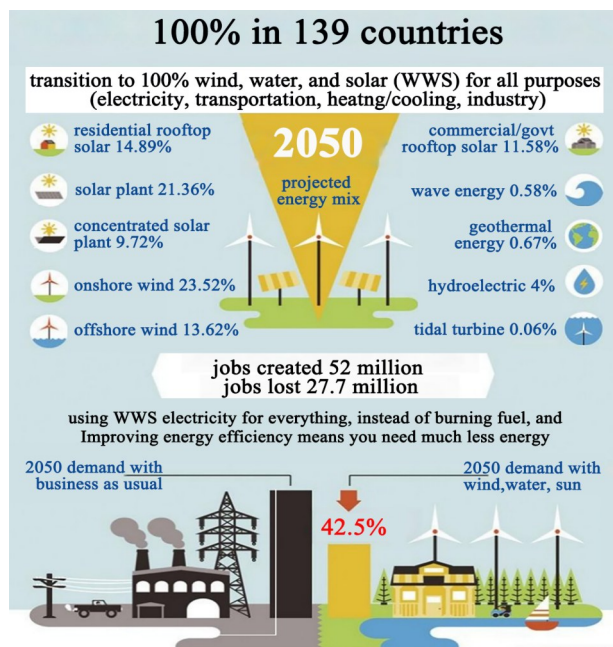


图2 2050年多个国家有望实现100%由可再生能源供电<sup>[12]</sup>  
Figure 2 Multiple countries are expected to achieve 100% renewable energy-based electricity supply by 2050<sup>[12]</sup>

## 2.2 美国能源转型的困惑与抉择

过去几年,美国在能源转型的道路上曾遭遇困惑。特朗普政府一度认为燃气发电在美国无法被取代,并因此正式宣布退出了巴黎协定。然而,他在考察欧洲后发现,挪威通过充分利用小水电资源,不仅满足了自身电力需求,还能为周边的欧洲国家提供一定的电力调峰,从而满足了欧洲大规模风光发电并网的需求。据媒体报道,这一现象使特朗普重新思考了

美国的能源策略,他甚至公开表示美国可能会通过重新开发和利用小水电资源,重返巴黎协定。<sup>[14]</sup>

据国际小水电中心的资料,美国现在已经完成了数万座水库大坝加装发电机组的规划项目,这些新增的小水电有望在燃气机组退出后,为电网提供必要的调峰保障。美国的这一政策反复,是否暗示着:“没有小水电,难以实现碳中和”?<sup>[6]</sup>

### 2.3 水电开发与生态保护

水电开发常被社会舆论指责为破坏生态环境的行为。然而,深入研究探讨后发现,很多所谓的“水电的生态环境影响”其实并非是由水力发电造成的,而主要是大坝和水库建设带来的一些影响。然而,为了保护人类社会免遭毁灭性的洪水和干旱在灾难,我们必须接受水库和大坝的这些代价。这就像种植粮食必须占用土地、改变生态的道理一样,为了调控水资源,我们必须建设大量的水库大坝。从这个角度看,水电的能源作用,完全可以视为一种额外的附加值。

过去,国外极端环保组织常常污蔑大型水电项目破坏生态环境,而国内也有类似的声音指责小水电项目。然而,这些指责往往忽视了水电项目在提供清洁能源、调节水资源以及促进可持续发展方面的积极作用。<sup>[15]</sup>事实上,水库大坝绝对是人类文明不可或缺的组成部分,它们确实会对河流生态产生一定影响。但是,水电作为水库大坝的一种副产品,本身并不产生任何生态问题,反而会对水库大坝的泄水,产生有利的消能保护作用。

因此,如果真想要保护好河流生态,我们应该清理整顿和退出的绝对不是水电项目,而是一些对生态造成巨大负面影响的水库和大坝。值得注意的是,国际社会在过去确实对大型水电的生态作用存在严重误解。在1996年全球可持续发展峰会上,就曾错误地将大型水电排除在可再生能源之外,理由是其对生态环境产生负面影响过大。然而,在我国和一系列专业国际组织以及非洲等欠发达国家的共同努力下,2002年在南非约翰内斯堡召开的同样会议上更正了这一错误结论<sup>[16]</sup>。会议重申了水电开发在可再生能源中的地位,并号召各国加速开发水电。此外,2004年10月联合国还专门委托我国发改委召开了《联合国水电与可持续发展峰会》。会上通过的《北京宣言》明确

阐述了大型水电的可再生能源地位,并强调了其在全球能源转型和可持续发展中的重要作用。<sup>[17]</sup>

## 3 丰富的水电资源:我国能源转型的显著优势

青藏高原的独特地势为我国带来了得天独厚的水、风、光资源。尤其是在水能资源方面,我国储量位居世界第一。青藏高原宛如一座巨大的“光塔”、“风塔”和“水塔”:其高耸的海拔和稀薄的大气层使得太阳辐射强烈,孕育出丰富的太阳能资源;高原的热岛效应和烟囱效应又促成了风力资源的富集;而南亚季风和东亚季风则将大量水汽输送至高原,形成了巨大的水能资源储备。<sup>[18]</sup>

值得一提的是,我国在可再生能源发电技术及成本控制方面已走在世界前列,同时输电技术也处于领先地位。这些因素共同构成了我国在实现碳中和目标上的显著优势。

然而,我国的能源转型可能与国外存在差异。国外通常要经历高碳、低碳、零碳三个阶段,而我国由于油气资源相对匮乏、而可再生资源丰富,很可能会直接从高碳过渡到零碳。这意味着我国在减碳的道路上,起步(碳达峰)的挑战相对较大,但实现碳中和的目标却更为可期。

### 3.1 我国实现100%可再生能源供电的显著优势

我国拥有丰富的可再生能源资源,且开发规模庞大:太阳能方面,陆地理论储量高达1.86万亿kW,目前光电装机已达到3.9亿kW,占全球的35.8%,显示出我国在太阳能领域的强大实力。风能方面,根据2018年普查数据,在陆地80米高度、功率密度 $\geq 150$  W/h的条件下,技术可开发量超过100亿kW。目前,风电装机已达到3.6亿kW,占全球的38.5%,表明我国风能资源开发利用取得了显著成效。水能方面,我国理论蕴藏量达6万亿kWh,可开发量达3万亿kWh/a。凭借先进的发电和输电技术,我国在水电领域形成了全产业链领先优势,开发和制造成本优势明显。目前,水电完成装机4.2亿kW(其中抽水蓄能5249万kW),水电发电量达1.35万亿kWh,占全球的27.0%。总之,依托丰富的可再生能源资源和先进的

技术实力,我国完全有信心如期实现碳中和目标。<sup>[19]</sup>

此外,我国已探明的可开发的常规水能资源7亿多kW,另外还有抽水蓄能16亿kW。结合先进的特高压输电技术,这些资源足以支撑20~30亿kW风电、30~50亿kW光伏的并网需求。然而,在水电开发过程中,仍存在一些待解决的矛盾,如龙头水库的开发等。这些问题需要我们共同努力,通过科学规划和合理布局,确保可再生能源的可持续利用和碳中和目标的顺利实现。<sup>[20]</sup>

### 3.2 水、风、光一体化开发蕴含巨大潜力

以我国雅砻江的风光水一体化开发为例,研究显示,全流域4500万kW的水电装机容量,能够有效调控并优化3000万kW的风电和6000万kW原本不稳定的风光发电,将其转化为随时可用的优质电源。<sup>[21]</sup>这表明,具有良好调控性能的梯级水电,大约可以调控自身装机规模两倍的风光发电。若再结合抽水蓄能技术,这一调控倍数还将大幅提升。<sup>[22]</sup>

### 3.3 退煤电与我国的碳达峰历程

实际上,我国在2013年曾一度达到了碳排放的峰值。这一成就与2009年煤炭价格飙升,进而导致煤电企业普遍面临成本超出收入和严重亏损的困境紧密相连。在那种情境下,煤电行业对于新建煤电厂的意愿显著降低,能源电力行业转而寄望于水电、核电和风电的发展来满足不断增长的电力需求(当时,光伏发电的成本仍然较高)。

因此,我国在“十二五”规划中设定了宏大的目标,即新开工的水电装机容量要达到1.2亿kW。<sup>[23]</sup>尽管后来核电的发展规划因日本福岛核事故而受阻,但仅仅依靠我国大力发展的水电和风电,就已经连续数年成功地满足了社会电力需求的增长,从而初步实现了碳排放达峰的目标。

然而,令人遗憾的是,在2011年前后,由于煤炭行业出现了严重的产能过剩,煤炭价格大幅下跌,这使得煤电企业的利润大幅增加,重新激发了新建燃

煤电厂的热情。再加上2014年之后,中央政府的审批权下放,各地新建燃煤电厂的建设规模开始失去控制,最终导致煤电几乎完全夺回了社会新增电力需求的份额。其结果是,从2017年起,我国连续保持3年的碳排放总量的下降趋势也逆转为上升(图3)<sup>[3,24]</sup>。

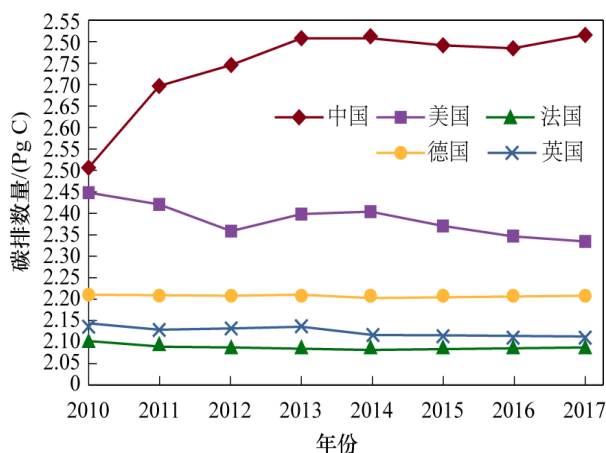


图3 2010—2017年各国重点区域CO<sub>2</sub>排放量<sup>[24]</sup>

Figure 3 CO<sub>2</sub> emissions in key regions from 2010 to 2017<sup>[24]</sup>

### 3.4 确立方向,避免“破错”——以我国能源转型为例

毛泽东主席的“不破不立,破字当头,立也就在其中了”这一观点,无疑揭示了事物发展的普遍规律。然而,在特殊国情下,如我国电力市场的非市场化特性,使得电力建设不能私自进行,因此“先立后破”的策略在一定程度上是可以理解的。但这种思维方式明显带有计划经济的烙印。

在2013年至2017年这段时间里,受“先立后破”计划经济思维的影响,我国电力供应能力大幅超出需求,导致了严重的产能过剩现象。不仅煤电机组的运行时间逐年缩短,同时,水电、风电和光电也面临着严重的被弃用问题(简称“三弃”),其中水电的弃水量在最高峰时每年损失超过千亿kWh。风电的弃风率在最糟糕的情况下接近了50%,这无疑造成了资源的极大浪费。<sup>[25]</sup>

然而,在这一时期,我们并未及时采取“退煤”措施,反而继续增加煤电建设,导致可再生能源为煤

电让路。这里的问题在于，“先立后破”作为计划经济的产物，如果未能明确“立什么、破什么”的方向，就容易出现方向性的错误。在我国特殊国情下，电力产能过剩的最大受害者实际上是小水电。由于许多小水电是民营的，生存竞争能力较弱，因此受到了较大的冲击。

在2015年前后，由于电力产能严重过剩，我国采取了全国范围内的大规模“三弃”措施，以遏制可再生能源的迅猛发展。这一举措使得风电的年新增装机容量从巅峰的4000多万kW急剧下滑至1000多万kW。同时，水电领域的投资和年新增发电量也在某些年份遭遇了重创，相较于最高峰时期下降了约90%。<sup>[2-4]</sup>此外，这一时期还兴起了拆除小水电的风潮，甚至有些地方出现了仅保留水库大坝而拆除发电设备的奇特现象。这引发了人们的疑问：小水电的拆除究竟是因为其对生态造成了破坏，还是背后存在其他深层次的原因呢？

总的来说，从客观上看，我们在2020年前十几年的能源转型过程中并未真正做到“先立后破”，甚至连“先立后也不破”都算不上。相反，我们在一定程度上是在与能源转型背道而驰地发展煤电。这无疑是对我国能源转型战略的一种误解和误导。<sup>[24]</sup>

表1的数据来自《中国电力统计年鉴2020》<sup>[26]</sup>，数据揭示了一个令人深思的现象：在2020年前的十

年里，我国煤电发电量的增长幅度竟然超过了风光发电量增长的两倍，甚至高达水、风、光发电增长总和的127%。这一数据不仅凸显了煤电在我国能源结构中的强势地位，也暴露了我国在能源转型过程中面临的挑战。

同时，数据也彰显了水电在碳减排方面的巨大潜力。唯有推动水电的大发展，我们才能在确保电力安全的前提下，逐步减少对煤电的依赖，进而实现碳达峰的目标。然而，现实却是残酷的。我国煤电的失控发展，不仅未能助力全球减排事业，反而抵消了全世界的减排效果。在中国碳排放量达到峰值的那些年，全球碳排放量也同步攀升至顶点。随着中国碳排放量的恢复增长，全球碳排放量也开始重现增长态势。由此可见，只要中国不退煤，全世界的碳减排目标就难以实现。

历史已经给出了明确的答案：一旦我们开启煤电退出的进程，碳达峰的目标很快就能实现；然而，若压制水电的发展，风电、光伏等新能源也（因为入网困难）将难以充分的发展；2014—2016年的数据已经表明，只要我们大力发展水电和其他新能源，完全可以依靠可再生能源发电量的增长来满足全社会的电力需求增长。既然在2014年我们都能做到这一点，那么在今天光伏发电技术更为成熟的今天，我们更应该有信心和决心实现这一目标。

表1 2011—2020年我国煤电与可再生能源发电量增长比较<sup>[26]</sup>

Table 1 Comparison of growth in electricity generation from coal power and renewable energy sources in China from 2011 to 2020<sup>[26]</sup>

| 年份   | 煤电/亿 kWh |       | 水电/亿 kWh |      | 风电/亿 kWh |      | 光伏/亿 kWh |      | 备注   |
|------|----------|-------|----------|------|----------|------|----------|------|------|
|      | 总电量      | 增长    | 总电量      | 增长   | 总电量      | 增长   | 总电量      | 增长   |      |
| 2011 | 38337.0  |       | 6681.0   |      | 703.3    |      | 6.0      |      |      |
| 2012 | 38928.1  | 591   | 8556.1   | 1875 | 959.8    | 256  | 36.0     | 30   |      |
| 2013 | 42470.1  | 3542  | 8921.0   | 365  | 1412.0   | 552  | 84.0     | 38   | 碳达峰  |
| 2014 | 44001.1  | 1531  | 10601.0  | 1680 | 1509.8   | 97   | 235.0    | 151  |      |
| 2015 | 42841.9  | -1160 | 11127.0  | 526  | 1857.7   | 348  | 395.0    | 160  |      |
| 2016 | 44370.7  | 1528  | 11840.5  | 538  | 2370.7   | 513  | 665.0    | 270  |      |
| 2017 | 47546.0  | 2576  | 11978.7  | 138  | 2972.3   | 603  | 1178.0   | 513  | 排碳增长 |
| 2018 | 50963.2  | 3417  | 12317.9  | 339  | 3659.7   | 687  | 1769.0   | 591  |      |
| 2019 | 52201.5  | 1238  | 13044.4  | 727  | 4057.0   | 398  | 2240.0   | 471  |      |
| 2020 | 53302.5  | 1101  | 13552.1  | 508  | 4665.0   | 608  | 2611.0   | 371  |      |
| 累计   |          | 14965 |          | 5193 |          | 3961 |          | 2605 |      |

## 4 影响我国水电发展的某些认识和问题

### 4.1 对新型电力系统的理解容易导致水电的误解

以往,我国在宣传新型电力系统时,常常采用“以新能源为主体的电力系统”这样的表述。这里的新能源主要指的是风能和光能发电。然而,这种表述方式容易导致对水电的误解,因为水电显然不属于新能源的范畴,而是可再生能源的重要组成部分。事实上,所谓“新能源”并不是一个科学上严谨的概念,缺乏准确的定义。因此,在2021年中美关于气候变化的联合公报中,采用了更为准确的表述:“以可再生能源为主体的新型电力系统”。这种表述方式既尊重了科学事实,也避免了对水电等可再生能源的误解。

然而,由于国内媒体宣传的惯性,这种准确的科学表述并未得到广泛接受。这导致许多人误认为水电在未来的新型电力系统中的作用将大幅减少。实际上,水电作为最重要的可再生能源之一,在未来的新型电力系统中将发挥不可或缺的作用。从可持续发展的角度看,未来的电力系统不仅要以可再生能源为主体,而且要逐步实现100%的可再生能源供电。在当前科技水平下,水电是实现这一目标的关键因素之一。

### 4.2 研究机构可能被以往数据误导

许多国内的能源研究机构在预测我国未来能源发展时,往往忽视了水电的重要性。这主要是因为它们被以往公布的水电资源数据所误导,认为我国的水电资源已经开发得所剩无几。

实际上,以往我国公布的水电资源可装机容量数据可能不够科学。国际上通常采用年发电量来表达水电资源的情况,而不是可装机容量。因为可装机容量的表述方式容易让人产生误解,尤其是在需要水电承担更多调峰填谷任务的情况下。具有调节能力的水电站往往需要增加装机以提高调峰能力,而这并不意味着水电资源已经枯竭。此外,为了增加电网的调峰能力,我国还专门修建了一些纯抽水蓄能电站。这些电站的装机容量显然不应该计入水电可装机容量的资源

内。因此,为避免误解,更科学的水电资源数据应该以年发电量为基础进行表述。

从我国十三五规划开始,就已经改为只颁布水电的年发电量作为可开发的水电资源量。根据普查结果,我国可开发的水电资源量为3万亿kWh/a。而根据2022年的水电年发电量测算,我国的水电开发程度还不到40%,仍有大量资源等待开发。<sup>[27]</sup>随着我国水电资源普查的深入进行,可开发的水电资源总量还将不断增加。

这些情况除了国家能源局的智库——水电水利规划总院之外,其他研究机构很难了解到。因此,在看待我国水电发展问题时,需要更全面、客观地分析数据和实际情况,避免被误导和产生误解。总的来说,我国水电开发程度仍有很大提升空间,发展潜力巨大。在未来的新型电力系统中,水电将继续发挥重要作用,为实现可持续发展目标贡献力量。<sup>[28]</sup>

### 4.3 水电充分开发将显著提升电网调峰能力

尽管我国水电开发程度已接近40%,但由于龙头水电站的开发相对滞后,水电的调峰能力受到了严重限制。例如,雅砻江上的两河口水电站全面投产后,与锦屏一级水电站协同运行,有望使雅砻江各梯级水电站在枯水期的发电量超过汛期。同样地,金沙江上的龙盘水电站若能顺利开发,将大幅提升金沙江和长江上各梯级水电站的调峰能力,从而彻底改变川渝地区在汛期经常弃水、枯期却严重缺电的尴尬局面。

目前,我国风能和光能发电在成本和效益方面已具备竞争力,能够满足社会用电需求。然而,电网将可再生能源转化为可用电力的调峰能力仍显不足。可以预见的是,随着我国剩余60%的常规水电资源得到充分开发,电网调峰能力将获得远超现有150%的显著提升。

因此,我们可以确信,若我国常规水电资源得到全面开发,补齐龙头水电站建设滞后的短板,将不仅有助于解决水资源调控难题,更能为电网中约占装机总量40%的风能和光能发电提供坚实的入网保障(若需接入更高比例的风光发电,则需依赖具备双向调节能力的抽水蓄能技术)。

此外,《国家水网建设规划纲要》最新发布的内容

容也强调了与电力建设的融合发展。事实上,大型水库的建设通常都伴随着大型水电站的兴建,而我国龙头水电站建设的滞后已成为制约水网建设的关键因素。因此,从国家水资源调控的战略角度出发,未来我们必须加大龙头水电站的建设力度。<sup>[29]</sup>

国家水网的建设对于任何国家都至关重要,因为储水能力与社会的文明进步息息相关。2007年联合国的一项调查曾经显示,一个国家的人均水库库容与其社会经济发展紧密相关,水资源开发程度与人类发展指数完全呈正比。

在全球范围内,我们可以观察到一个明显的趋势:水资源开发程度较高的地区,其经济往往越发达,生态环境通常也更优越。然而,与欧美发达国家相比,我国的储水能力仍存在较大差距。例如,欧洲的河流库容系数(即径流量与蓄水量的比值)超过了0.9,美国为0.66,而我国当前还不足0.4。这种差距导致我国洪水和干旱灾害频繁交替发生,给社会经济发展带来了严重挑战。

因此,建设完善的国家水网体系显得尤为重要。只有通过加强水网建设,提高储水能力,我们才能从根本上解决洪涝和干旱问题,确保水资源的可持续利用,为社会经济的持续健康发展提供有力支撑。同时,这也是改善生态环境、提升生活质量的重要途径。

#### 4.4 亟需解决龙头水电站开发难题,推动水电可持续发展

我国早期实行的水电成本加成上网电价政策,由于龙头水电站的高造价,导致电网企业对其高电价接受度不高。随后的标杆电价政策又削弱了开发企业对建设龙头水电站的积极性。造成这种高造价的主要原因在于水库移民费用,水库移民本应成为政府扶贫和促进社会公平的重要契机。然而,由于我们的某些政策制定的不够科学,以至于让某些地方政府将中央企业的水电开发视为经济利益来源,从而导致一些水电移民费用不断非理性的攀升。

以三峡为例,作为全球公认最难开发的水电项目,我国凭借制度优势成功完成了百万水库移民的壮举,并为全球树立了典范。但遗憾的是,在后来的电

力市场化进程中,我们似乎未能继续发挥三峡开发的成功经验,反而让某些地方政府部门与水电开发企业形成了对立。

水电开发的扶贫作用在全球范围内已经得到公认。各级政府本应将扶贫工作与水电开发相结合,如怒江等地区的扶贫和水电开发。怒江地区贫困的根源,其实在于地质灾害频发、生存环境恶劣。而水电开发能够把制造地质灾害的水能利用起来发电,变害为利。这才能从根本上改善怒江地区的地质灾害频发和恶劣环境,进而推动当地实现真正的脱贫致富。<sup>[2,30]</sup>

世界银行对水电开发的定义,也曾明确强调了“减贫、减碳”的作用。我们当然支持开发水电以造福民众,但必须避免个别地方政府部门将央企的水电开发视为利益来源的行为,必须防止腐败和不法分子借机敲诈公共利益。只要地方政府态度明确,这些移民中的难题完全可以避免。水电移民也就是扶贫和促进社会公平的重要机遇。

近年来,随着水电开发市场化进程的推进,一些地方政府将央企水电开发视为利益来源,导致水电建设成本大幅上升。为了控制成本,国家不得不将原有的成本加成定电价政策改为标杆电价政策。这样一来,龙头水库高成本开发的矛盾就转嫁到了开发企业身上,导致长期效益显著的龙头水电站开发受到严重阻碍。

这个矛盾其实是可以解决的。首先,水电的发电效益至少应持续百年以上,但目前的还贷期最多只能达到30年,这就造成了项目的前期困难。其次,龙头水电站的建设通常会为下游梯级电站带来较大的补偿效益。然而,一旦流域电站分属不同企业,龙头电站的开发企业就无法顺利地收回应有的效益。这两个原因使得本来非常重要且效益显著的龙头水电站无法得到开发。

为了解决这些矛盾并体现龙头水电站开发的经济性,国家可以从政策层面进行调整。例如建立龙头水电开发基金以补贴初期的上网电价,减轻开发企业初期还贷压力,还贷期过再逐步收回水电企业的超额利益补偿基金。同时,对下游收益电站合理的收取补偿费用,对于政府部门是相对容易的。

总之, 如果不解决龙头水电站开发的政策矛盾, 我国的水电就无法正常发展; 而水电不能大力发展又会导致煤电无法正常退出并制约风光等可再生能源的发展。这几乎就是我国目前面临的现状。如果我们当年没有受到标杆电价政策的制约并避免重走煤电无序扩张的弯路, 在2013年实现碳达峰目标的话; 那么我们完全有可能在2030—2035年实现电力的碳中和目标。事实上, 凭借中国的资源禀赋和技术水平, 我们本应该成为全球最先实现碳中和的国家之一。

#### 4.5 准确理解以人为本的生态优先在水电开发中的重要性

在水电开发中, 我们必须明确一点: 生态优先并不意味着某种特定鱼类、草类或其他动植物的优先, 而是指人类的生态优先。这一点至关重要, 也是我们进行水电开发时必须坚守的原则。<sup>[31]</sup>

“生态优先、绿色发展”的理念不仅强调了生态的重要性, 更明确了发展的主体是人。因此, 在水电开发中, 我们必须始终将人的生存和发展放在首位, 确保生态优先的真正意义得以体现。过去, 某些极端环保主义者官员在理解生态优先方面似乎有所偏离。以长江保护法的立法草案为例, 其中一度出现了“对大中型水电开发实施严格限制”的不当措辞。然而, 这种理解忽视了人类发展的需求。幸运的是, 在习近平总书记的批示指导下, 这种荒唐的措辞得到了修正。<sup>[32]</sup>

从人类命运共同体的角度来看, “碳排放”的本质绝对是损人不利己的。“两山理论”科学地强调了环保与人类生存发展的紧密关系。我们知道“金山”“银山”对于动植物而言可能是生命的禁区, 但它们代表着能够给人类带来幸福的财富。因此, 我们环保的目的不仅仅是为了保护自然环境, 更是为了人类的更好的生存和可持续发展。在推进碳减排的过程中, 我们非常需要转变观念, 从过去的被动应对转变为主动作为。我们要积极采取措施, 减少碳排放, 推动绿色发展, 为实现双碳目标贡献自己的力量。同时, 我们也要加强国际合作, 共同应对全球气候变化挑战, 构建人类命运共同体。<sup>[33]</sup>

在2015年, 美国前国务卿克林顿访华并出席了

《中美清洁空气论坛》。在此论坛上, 他透露了一项关于气候变化对全球影响的科学研究结果。这项研究指出, 随着气候变暖引起的海平面上升, 全球受淹没影响最严重的十个地区以及经济损失最大的十个地区中, 都包含了中国的长三角和珠三角地区。这明确表明, 中国因气候变化而面临的损失远高于全球平均水平。这一发现强调了应对气候变化的重要性, 也凸显了中国在应对环境挑战方面的责任和努力。<sup>[2]</sup>

因此, 过量的碳排放对中国而言, 不仅不是发展机遇, 而是潜在的灾难。事实上, 通过减少甚至停止碳排放, 中国不仅能够继续发展, 而且还有可能实现更高质量的发展。以2013年为例, 当时我们达到碳排放峰值时, 并未出现全国性的电力短缺的问题; 然而, 去年却由于煤电过剩和煤价的飙升而遭遇了严重的电力供应危机。

最近, 欧洲正在考虑实施碳关税政策。一些持传统观念的人认为这是对发展中国家发展权的威胁。然而, 我们的煤炭专家则持不同看法, 他们认为这对中国经济来说实际上是一件好事。这些专家深知燃烧煤炭发电所带来的巨大损失, 因此他们认为如果能够通过碳关税政策减少煤炭的使用量, 那将是非常有益的事情。他们甚至指出, 煤炭的价值实际上远超黄金。以黄金每克500元计算, 一吨黄金的价值为5亿元; 然而, 一吨煤炭经过精细化工处理后的产值却可以达到几十亿元。目前, 他们处理一吨煤焦油所能获得的效益更是高达4000多亿元。

#### 4.6 实现双碳目标: 最重要的生态保护任务

当前, 一些被视为处于生态保护重点区域的龙头水库, 由于我们对生态优先原则的误解, 被错误地视为仅为保护珍稀动植物而禁止开发的圣地。然而, 科学家们则警告说, 若无法履行双碳承诺, 地球温度一旦攀升超过6°, 将导致近半数地球物种走向灭绝的边缘。在这样的灾难性前景下, 我们想要保护的珍稀物种能幸免吗?<sup>[2]</sup>

现今, 我国划定的众多保护区已将大量抽水蓄能资源囊括其中, 这无疑极大限制了我们对这些宝贵资源的开发利用。若电化学储能技术未能取得革命性突

破,我们将无法实现完全依赖可再生能源供电的宏伟目标。其连锁反应必然是气候持续变暖,冰川加速融化。科学家们甚至预测,当地球两极的冰川彻底消融后,海平面将上升60~66 m。<sup>[2]</sup>

因此,控制碳排放已刻不容缓地成为我们面临的最紧迫任务。仅仅海平面上升6 m,就足以让我国最繁华富庶的长三角、珠三角地区遭受难以估量的损失。鉴于此,我们应将这些地区视为“碳中和”生态保护区的重中之重,赋予它们重要的保护地位。<sup>[2]</sup>当其他生态保护区的划定与碳中和目标发生冲突时,我们应毫不犹豫地优先考虑碳中和目标的实现。<sup>[2,34]</sup>

当然,我们现在也拥有调整的空间和机会。通过审慎调整保护区的相关规定,我们可以逐步将特定的龙头水库或抽水蓄能站点从生态红线中调整出来,以确保我国双碳目标的顺利实现。但这一过程中,我们必须在全社会范围内牢固树立碳中和是最重要的生态保护理念。<sup>[2]</sup>我们必须清醒认识到,保护水能、风能等关键资源是实现碳中和目标的基石。唯有如此,我们才能从法律层面破解资源丰富却利用不足的困局。丰富的水能资源本是我国实现双碳目标的得天独厚的优势和保障。然而,若我们无法确保这些资源得到合理有效的开发利用,那么实现双碳目标恐将只能寄希望于未来科技的奇迹了。

#### 4.7 抽水蓄能资源:满足电网中任何比例风光装机需求的可靠保障

尽管当前电化学储能技术尚未达到完全成熟阶段,但我国丰富的水电资源(包括抽水蓄能)已足以支撑我们实现百分之百依赖可再生能源供电的目标。近年来,国家已对大型抽水蓄能建设给予了高度重视。然而,需要强调的是,我国《抽水蓄能中长期规划》所提及的常规电站抽水蓄能改造及小型水电抽水蓄能建设,实际上蕴藏着近乎无限的调峰潜力。<sup>[4]</sup>

由于我国季风性气候的影响,许多常规水电站在汛期水量充沛,而在枯期则水量匮乏,这严重影响了水电站的正常运行及调峰能力。然而,若对常规水电站进行抽水蓄能改造,即便在枯水期,只要保留必要的水资源,这些水电站便能转变为纯抽水蓄能电站,

继续与周边的风光发电设施协同工作,满足社会用电需求。

当然,抽水蓄能机组技术仍有待进一步突破,特别是提高其双向“可变速”性能,以实现全频的发电和抽水。目前,抽水蓄能机组在抽水 and 发电时受到一定水头限制,这在一定程度上制约了其在电网中的灵活应用。不过,最近我国四川省阿坝州成功改造了一个小型实验电站,实现了可逆机组的双向可变速运行,且实测蓄能效率超过80%。<sup>[35]</sup>成果充分证明了我国各地丰富的小水电资源具有巨大的改造潜力。未来,配合各地的风、光发电设施,遍布我国各地的众多小水电(经过抽水蓄能改造)将完全有能力承担周边居民用电的调峰保障任务。

同时,我国的大型抽水蓄能机组也需要攻克双向可变速技术难题,争取早日实现全频抽水、全频发电。这将极大提升我国电网的调峰能力,为实现百分之百可再生能源供电目标提供坚实保障。

## 5 结语

(1) 在电力行业中,实现碳中和的最佳途径是“退煤、弃核”,实现100%依赖可再生能源供电。从可持续发展的视角看,只有可再生能源才能满足人类可持续发展的能源需求。

(2) 我国拥有得天独厚的可再生资源条件,使其在实现碳中和目标方面具有显著优势。然而,令人遗憾的是,许多人甚至包括一些能源研究机构和水电行业内部人士,都未能充分认识到这一点。他们错误地认为,即使中国电力行业实现了碳中和,仍需保留一定数量的煤电产能。作为水电专业人士,我们有责任澄清这一误解。

(3) 只要我们坚定推进煤电退出进程,并大力发展水电等可再生能源,在确保国家电力安全的前提下,碳达峰目标可以在短短几年内实现。

(4) 煤电退出已成为不可逆转的趋势。这不仅仅是因为煤电产生的碳排放问题难以解决,更因为煤炭资源本身具有极高的价值,将其用于燃烧发电是一种巨大的浪费。

(5) 水电的大力发展与煤电的逐步退出是紧密相连的。只有水电等可再生能源得到充分发展, 才能确保煤

电的安全、有序退出。反之亦然。在未来实现双碳目标的过程中, 我们必须同时关注并解决好这两个问题。

## 参考文献

- [1] 刘哲. 我国应对气候变化立法的基本问题探究[J]. 江苏大学学报(社会科学版), 2016, 18(2): 15-21.  
Liu Z. The basic problems in China's legislation on climate change[J]. Journal of Jiangsu University (Social Science Edition), 2016, 18(2): 15-21.
- [2] 张博庭. 水力发电是我国能源革命电力转型的安全保障[J]. 水电与新能源, 2022, 36(5): 1-6.  
Zhang B T. Hydropower: security insurance of China's energy revolution and power transformation[J]. Hydropower and New Energy, 2022, 36(5): 1-6.
- [3] 张博庭. 发展抽水蓄能对实现净零目标至关重要[J]. 电器工业, 2022(2): 75-78.  
Zhang B T. The development of pumped storage is crucial for achieving net-zero goals[J]. China Electrical Equipment Industry, 2022(2): 75-78.
- [4] 张博庭. 发展抽水蓄能对实现"零碳"目标至关重要[J]. 水电与抽水蓄能, 2022, 8(1): 1-3.  
Zhang B T. The pumped storage is very important to achieve zero carbon emissions[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2022, 8(1): 1-3.
- [5] 翁爽. 深刻认清碳中和核心路径及本质规律: 专访中国社会科学院学部委员、国家气候变化专家委员会副主任潘家华[J]. 中国电力企业管理, 2022(22): 8-11.  
Weng S. Deeply understanding the core path and essential law of carbon neutralization—interview with Pan Jiahua, member of the Chinese academy of social sciences and deputy director of the national expert committee on climate change[J]. China Power Enterprise Management, 2022(22): 8-11.
- [6] 张博庭. 水电和抽水蓄能是实现碳中和的重要保障[J]. 水电与新能源, 2023, 37(4): 1-5.  
Zhang B T. Hydropower and pumped storage: Important guarantees to achieve carbon neutrality[J]. Hydropower and New Energy, 2023, 37(4): 1-5.
- [7] 张博庭. 水电的温室气体减排作用无可替代[J]. 中国三峡, 2013(1): 44-49.  
Zhang B T. The role of hydropower in reducing greenhouse gas emissions is irreplaceable[J]. China Three Gorges, 2013(1): 44-49.
- [8] 张博庭. 我国水电的发展与能源革命电力转型[J]. 水力发电学报, 2020, 39(8): 69-78.  
Zhang B T. Hydropower development, electric power transformation and energy revolution in China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(8): 69-78.
- [9] Cui R, Hultman N, Jiang K, et al. A high ambition coal phaseout in China: feasible strategies through a comprehensive plant-by-plant assessment[EB/OL]. College Park: Center for Global Sustainability, University of Maryland, 2020. [2020-01-30]. [https://cgs.umd.edu/sites/default/files/2020-01/1.13.2020\\_AhighAmbitionCoalPhaseoutInChina\\_EN\\_fullreport%20.pdf](https://cgs.umd.edu/sites/default/files/2020-01/1.13.2020_AhighAmbitionCoalPhaseoutInChina_EN_fullreport%20.pdf).
- [10] 张博庭. 水电是100%可再生能源的必要条件[J]. 能源, 2020(9): 34-40.  
Zhang B T. Hydropower is a necessary condition for 100% renewable energy[J]. Energy, 2020(9): 34-40.
- [11] 张博庭. "超低排放"成清洁能源的危害几何?[J]. 能源, 2017(1): 49-54.  
Zhang B T. What is the harm of "ultra-low emission" into clean energy? [J]. Energy, 2017(1): 49-54.
- [12] Jacobson M Z, Delucchi M A, Bauer Z A F, et al. 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world[J]. Joule, 2017, 1(1): 108-121.
- [13] 朱旌. 世界2050年前有望全部使用可再生能源[N]. 经济日报, 2017-04-12(9).  
Zhu J. World expected to use only renewable energy by 2050[N]. Economic Daily, 2017-04-12(9).
- [14] 国际电网. 特朗普: 我为水电开发呼吁![EB/OL]. [2018-01-15]. <https://power.in-en.com/html/power-2286500.shtml>.  
International Water Grid. Trump: I advocate for hydropower development![EB/OL]. [2018-01-15]. <https://power.in-en.com/html/power-2286500.shtml>.
- [15] 王亦楠. 落实"碳达峰碳中和"须纠正对小水电的偏见[J]. 中国经济周刊, 2021(9): 106-109.

- Wang Y N. To implement "carbon neutrality in peak carbon dioxide emissions", we must correct the prejudice against small hydropower[J]. China Economic Weekly, 2021(9): 106-109.
- [16] 张博庭. 大坝平反的曲折历程[J]. 能源, 2014(4): 78-80.  
Zhang B T. The tortuous course of dam rehabilitation[J]. Energy, 2014(4): 78-80.
- [17] 贾金生. 世界水电开发情况及对我国水电发展的认识[J]. 中国水利, 2004(13): 10-12, 5.  
Jia J S. Development of hydropower in the world and understanding of hydropower development in China[J]. China Water Resources, 2004(13): 10-12, 5.
- [18] 杨永江, 张晨笛. 中国水电发展热点综述[J]. 水电与新能源, 2021, 35(9): 1-7.  
Yang Y J, Zhang C D. Key aspects of the future hydropower development in China[J]. Hydropower and New Energy, 2021, 35(9): 1-7.
- [19] 白雪. 2022年中国可再生能源发展成绩斐然[N]. 中国经济导报, 2023-07-08(3).  
Bai X. China's achievements in renewable energy development in 2022 were remarkable[N]. China Economic Journal, 2023-07-08(3).
- [20] 张博庭. 水电在能源革命中的重要地位和作用[J]. 水电与新能源, 2019, 33(11): 15-21.  
Zhang B T. The key position and role of hydropower in energy revolution[J]. Hydropower and New Energy, 2019, 33(11): 15-21.
- [21] 杨永江, 王立涛, 孙卓. 风、光、水多能互补是我国"碳中和"的必由之路[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(4): 15-19.  
Yang Y J, Wang L T, Sun Z. The complementary between wind power, solar power and hydropower is the only way to neutralize carbon in China[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(4): 15-19.
- [22] 王铁辰. 水风光一体化开发探新路[N]. 经济日报, 2023-05-31(6).  
Wang Y C. Exploring a new path for integrated development of hydropower, wind power, and solar energy[N]. Economic Daily, 2023-05-31(6).
- [23] 本刊编辑部. "十二五"期间将开工建设1.2亿kW水电[J]. 华北电力技术, 2011(4): 43.  
During the Twelfth Five-Year Plan period, 120 million kW hydropower will be started[J]. North China Electric Power, 2011(4): 43.
- [24] 张博庭. 如何兑现减排承诺:我国首次实现碳达峰的启示[J]. 水电与新能源, 2021, 35(3): 1-6.  
Zhang B T. How to fulfill the carbon emission reduction commitment: enlightenment of the first carbon emission peaking in China[J]. Hydropower and New Energy, 2021, 35(3): 1-6.
- [25] 张博庭. 新常态下看水电弃水[J]. 中国电力企业管理, 2015(11): 14-17.  
Zhang B T. Discussion on hydropower abandoning water under the new normal[J]. China Power Enterprise Management, 2015(11): 14-17.
- [26] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.  
China Electricity Council. China Electricity Statistics Yearbook 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [27] 张博庭. 中国水电与水资源开发[J]. 电器工业, 2016(3): 17-25.  
Zhang B T. Hydropower and water resources development in China[J]. China Electrical Equipment Industry, 2016(3): 17-25.
- [28] 张博庭. 水库建设: 被误读的水资源利用[J]. 知识就是力量, 2015(3): 24-27.  
Zhang B T. Reservoir construction: misread utilization of water resources[J]. Knowledge Is Power, 2015(3): 24-27.
- [29] 张博庭. 大型龙头水电站攸关国家水安全[J]. 中国经济周刊, 2015(13): 18-19.  
Zhang B T. Large-scale leading hydropower station is vital to national water security[J]. China Economic Weekly, 2015(13): 18-19.
- [30] 张博庭. 西南地质灾害高发区水电站建设安全性研究[J]. 水力发电, 2009, 35(5): 6-10, 14.  
Zhang B T. Study on the safety of the construction of hydropower station in the southwest area with high geological disasters[J]. Water Power, 2009, 35(5): 6-10, 14.
- [31] 张博庭. 我国的水电开发与环境保护[C]// 第三届环境与发展中国论坛论文集. 北京, 2007: 164-168.  
Zhang B T. Hydropower development and environmental protection in our country[C]// Proceedings of the Third Forum on Environment and Development in China. Beijing, 2007: 164-168.
- [32] 王亦楠. «长江保护法»不应与水电建设相对立[J]. 能源, 2021(1): 28-32.  
Wang Y N. The Yangtze River Protection Law should not be opposed to hydropower construction[J]. Energy, 2021(1): 28-32.
- [33] 潘家华, 李萌, 张坤. 实现碳达峰碳中和的中国方案[N]. 中国社会科学报, 2021-11-26(006).  
Pan J H, Li M, Zhang K. China's plan to achieve carbon peak and carbon neutrality[N]. Chinese Social Sciences Weekly, 2021-11-26(006).
- [34] 张博庭. 兑现减排承诺须将"碳中和"视为最重要的生态红线[J]. 小水电, 2021(1): 18-21.  
Zhang B T. Fulfilling carbon emission reduction commitments must regard "carbon neutrality" as the most important ecological red line[J].

Small Hydro Power, 2021(1): 18-21.

[35] 李欣忆. 全球首个梯级水光蓄互补电站在川投运[N]. 四川日报, 2022-05-14(001).

Li X Y. The world's first cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid power station begins operation in Sichuan[N]. Sichuan Daily, 2022-05-14(001).

## On the Important Role of Hydropower in Achieving “Carbon Peak and Neutrality” Goals

Zhang Boting

*China Society for Hydropower Engineering, Beijing 100044, China*

**Abstract:** Fulfilling the "dual carbon" commitment is one of the most urgent tasks in China. However, due to the lack of objective understanding of the status and role of hydropower generation, many people still believe that without coal power, China's energy security is at stake. In fact, what can truly support human beings towards sustainable development should be a new power system based on renewable energy. As an energy form that does not emit carbon dioxide, nuclear power seems to theoretically meet the requirements of carbon neutrality. But we must clearly recognize that the reserves of uranium ore resources in nature are extremely limited, which makes nuclear power perhaps play a certain role in the early stage of energy transformation rather than a long-term solution. The current international community generally advocates the transition direction of electric power energy, which is "to retire coal and abandon nuclear" and turn to rely mainly on renewable energy which is actually a manifestation of the general trend of sustainable development in human society. In this process, whether we can correctly understand the status and role of hydropower will be the key to achieving the goal of relying mainly on renewable energy for power supply.

**Keywords:** energy transformation; carbon peak; carbon neutral; renewable energy; hydropower development