

News & Highlights

蓬勃发展的水电行业——全球两座巨型水电站投入运营

Sean O'Neill

Senior Technology Writer

2022年2月，非洲最大的水电站大坝——埃塞俄比亚复兴大坝（GERD）（见图1）首次正式全面投产发电[1]。这只是持续繁荣的全球水电站大坝行业的最新里程碑之一。随着全球人口的增长，全球电力需求也持续增长，因而迫切需要生产环境友好型能源，这使水电站大坝行业一扫颓势[2]。



图1. 施工中的埃塞俄比亚复兴大坝。大坝由Webuild集团（意大利米兰）从埃塞俄比亚电力局承建，接近完工。如图所示，水流通过非常溢洪道倾泻而下，大坝的两个发电站设置在两侧灰色长方体处。来源：Webuild集团（公有领域）。

埃塞俄比亚复兴大坝由碾压混凝土建造而成[3]，坐落于埃塞俄比亚本尚古勒-古马兹州西部的青尼罗河上，距离西北边境与苏丹的交界处约15 km。坝体全长1800 m，高170 m，于2010年动工，并于2020年7月开始了持续数年的填筑过程[4]。大坝预计需数年填筑（主要取决于河流环境），完成后的库区约为1900 km²，库容约为7.4 × 10¹⁰ m³。

埃塞俄比亚复兴大坝的两座发电站分别位于河道两侧的坝基处。大坝配备了13台混流式水轮机组，预计总装机容量达5.15 GW，几乎能使该国目前的发电量翻番，并成为埃塞俄比亚经济发展的引擎[5–6]。但该项目自启动伊始就引起了多地政治动荡和关注，尤其是大坝下游国家——苏丹和埃及——均试图保护自己在尼罗河重要水域的利益[7]。

与此同时，中国又一超大型水电项目即将落成。白鹤滩大坝（见图2）由中国长江三峡集团有限公司（以下简称长江三峡集团）建设运营，是金沙江（长江上游）四个梯级水电站中的第二级。白鹤滩坝址位于乌东德大坝和水电站下游约180 km处，横跨四川省宁南县和云南省巧家县。乌东德水电站装机容量10.2 GW，是长江三峡集团的另一个项目，于2021年全面投入运营。白鹤滩坝区水库山高谷深，地形起伏程度超过了埃塞俄比亚复兴大坝，其混凝土拱坝需双向（水平向及竖向）弯曲；大坝的最高点为289 m，库容为2.06 × 10¹⁰ m³ [8]。

白鹤滩的两座电站分别包含八个1 GW的混流式水轮机，最大装机容量为16 GW。为便于说明其规模，以英国为例，2020年其全国总发电容量为76 GW [9]。白鹤滩采用了世界上最大的水电涡轮机。每个机组包括涡轮机、发电机和相关设备，高50 m，重6800 t [10]。与之相比，2024年将投入商用的全球最大风力涡轮机的装机容量仅为15 MW [11]；使用这种涡轮机的风力发电厂需安装一千多台涡轮机方能达到16 GW的发电容量。



图2. 白鹤滩大坝于2022年6月通过了72 h 试验，其16台混流式水轮机中的一半已开始正式投产，每台水轮机的机组功率1 GW。当这16台全球最大的涡轮机于2022年年底均投入运行时，这座大坝预计将成为全球第二大水力发电站。来源：长江三峡集团（公有领域）。

总部位于英国克罗伊登的国际工程公司 Mott MacDonald 的水电客户主管 Ajay Chaudhary 表示：“水电项目的机电设备供应商在切实推动扩大涡轮机尺寸。他们的生产规模使一切基本原则都需要被重新考量，包括水力学、物流运输以及发电站内涡轮机的可施工性。”

白鹤滩的首批涡轮机（两台）已于2021年7月投运。另外六台于2022年5月开始运行，使发电容量达到8 GW。当该电站于2022年末全面投入运营后，它将成为仅次于中国三峡大坝的世界第二大水电站，这座22 GW 装机容量的庞然大物将横跨中国中部的长江。

Chaudhary 认为，这些水电项目代表了土木工程的顶级挑战。“水力发电需要机械、电气、通信、输电线路、变电站、进场公路、桥梁等学科的专业知识，甚至还要和“河神”打交道！整合这样的项目需要数量惊人的工程专业支持。”

据总部位于法国巴黎的国际能源署估计，从2021年至2030年，中国将占全球水电产能增长的40%，因而仍将在该领域占主导[12]。事实上，中国对全球水电行业产生了巨大影响——它广泛参与了世界各地的水电设施的融资和建设（见图3）。

除占据绝大部分人类储能外，水电发电量占大约一半低碳发电量，比核能发电量多55%，甚至超过了所有其他

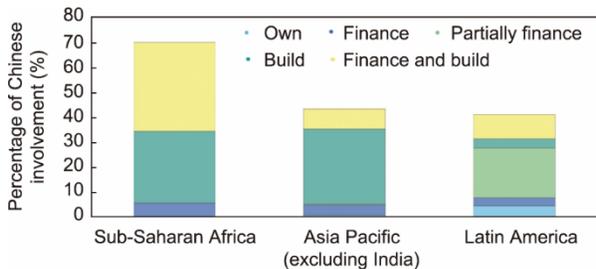


图3. 中国为全球水电项目提供了重要支持。图中示出了从2021年至2030年中国在自有、融资和建设水电项目（发电量）方面的预估参与度。来源：国际能源署（经许可）。

可再生能源发电量的总和（见图4）[12]。按绝对值计算，2020年的水电发电量占全球总发电量的17%，仅次于煤炭和天然气[12]。

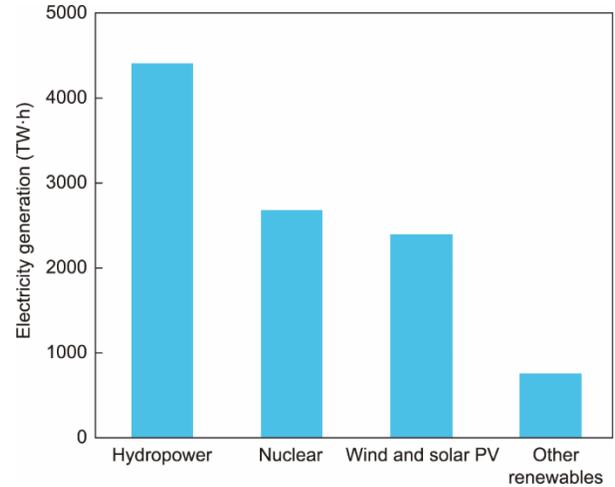


图4. 2020年低碳科技发电量。水力发电量超过了所有其他可再生能源发电量的总和，比核能多55%左右。PV：光伏。来源：国际能源署（经许可）。

尽管如今的全球水电行业欣欣向荣，但就在20世纪90年代末，大型水电项目还因产生负面社会、经济和生态影响，以及缺少水资源管理和可持续性的国际标准而引起了社会和环境震荡，以及随之而来的法律纠纷。这些问题促使世界银行（总部设在美国华盛顿特区的一家大型水电投资机构）和世界自然保护联盟（总部位于瑞士格朗）召开了一次峰会，争议双方派代表出席了会议[13]。会议的成果包括成立世界水坝委员会（WCD），该委员会于1997年至2001年履职。

对于环境问题，该委员会在2000年11月出具的最终报告[14]中承认了水坝的优势，同时强调：“大型水坝通常会对河流、流域和水生生态系统产生多种广泛影响，且负面影响大于正面影响，这在很多情况下会对物种和生态系统造成不可逆的损害。”对于人类的影响，该委员会强调：“（大型水坝建设）未能全面和系统评估潜在负面影响的范围和落实针对无家可归者的相应救济、徙置和住宅新建方案，以及未能说明大型水坝对下游民生的影响，致使数百万（人）陷入贫困和痛苦。”

大坝相关问题此前一直被淡化，委员会在报告中强调的内容在较大范围内对行业产生了降温作用。英国圣安德鲁斯大学的可持续发展讲师 Christopher Schulz 对世界水坝委员会的影响进行了研究，他说：“据说大型水坝因被视为争议性高风险投资而在2000年后逐渐淡出人们视线[15]。但因为气候变化，如今它们再次登场。这次

情况与之前迥然不同，这是因为气候变化在20世纪90年代尚未如现在一样受到重视。”这种说法可得到数据印证，比如2010年至2012年的年均水电投资是十年前的六倍以上[15]。

虽然水力发电在全球的发展如火如荼，但建设地点发生了迁移。德国图宾根大学环境系统分析教授Christiane Zarfl表示：“在欧洲、美国和亚洲大部分地区，许多具有巨大水力发电潜力的地方已被开发殆尽。”他进一步表示：“水电项目向所谓的‘全球南方’发生了空间转移，即非洲、南美洲（特别是亚马孙河）以及东南亚的大型河流域。”Zarfl及其同事的研究显示，在2014年，全球有超过3700座装机容量超过1 MW的大坝计划或正在建造[2,16]。

对低碳能源的需求已经成为强大的商业和政治动力。事实上，作为水电行业的代表机构和倡导团体，总部设在英国伦敦的国际水电协会（IHA）在今年发起了一场运动，口号是“我们可以，用水电！”[17]。这句话意为结合太阳能和风能，利用水力发电加速实现净零排放[17]。

但人们对水电的低碳性尚有争议，特别是当各项目计划向热带和亚热带地区转移时，如亚马孙盆地[18]。就气候方面而言，在热带地区修建大型水电站的关键问题在于建造大坝通常需要淹没大片雨林以形成低地水库。被淹没的树木和植被会在低氧水库环境中分解，从而释放大量甲烷——以20年时间尺度为限，该温室气体的危害比二氧化碳强80倍[19]——以及二氧化碳[20–21]。对亚马孙拟建大坝的研究表明，虽然高地大坝的碳强度（考虑了甲烷）可能与太阳能和风力发电的碳强度相当，但部分低地大坝的碳强度可能超过化石燃料发电厂的碳强度[22]。

“并非所有的热带水坝都会产生可怕的后果。”联合国教科文组织主席Yves Prairie在加拿大魁北克省蒙特利尔的魁北克大学全球环境变化会议上表示，“当一群细菌产生甲烷时，另一群细菌会消耗甲烷，二者能否平衡决定了水库是否会排放大量甲烷。”

Prairie指出，水库也可能造成水电站水库下游排放甲烷，具体排放量取决于进水口的深度，因为水流需从水库通过进水口流向涡轮机[23]。“在马来西亚沙捞越州的巴当艾水坝，我们根据计算结果认为如果工程师们能把进水口抬高3米，就能减少该发电站92%的甲烷足迹。因此，即使在热带地区，我们也能对未来的电站采取一些简单的措施，以尽量减少温室气体足迹。”

总之，Zarfl认为：“就温室气体排放量而言，与煤炭能源相比，我们目前最好使用水力发电，因为水电站水库的温室气体排放量会随着时间的推移大大减少。”

Chaudhary认为，人们往往会忽略水力发电的另一方面，即它可能比其他形式更持久地获取能源。以美国为例，在所有1930年以前建造且当前依然运行的设施中，水力发电装机容量占总装机容量的99% [24]。“如果电力公司继续投资机电领域，”Chaudhary说，“现代水力发电的民用基础设施可持续运行100~200年。数十年后，一旦水力发电站还清其基本建设费用，这些设施就能提供目前最便宜且最清洁的能源。”

Zarfl对此有所保留。他认为：“太阳能和风能的价格正在下跌，而它们对环境的影响明显小于水力发电。”无论如何，专家们似乎普遍认为利用多种可再生能源提高发电量是满足日益增长的全球电力需求的必要举措。而对于水力发电，正如Zarfl所言，有一点毋庸置疑：“即使大坝拆除，河流也再不能恢复如初。”

References

- [1] Rao R. Ethiopian dam generates power, but what's next? [Internet]. New York City: IEEE Spectrum; 2022 Mar 9 [cited 2022 Jul 20]. Available from: <https://spectrum.ieee.org/ethiopian-dam>.
- [2] Zarfl C, Lumsdon AE, Berlekamp J, Tydecks L, Tockner K. A global boom in hydropower dam construction. *Aquat Sci* 2015;77:161–70.
- [3] Roller-compacted concrete [Internet]. Washington, DC: Portland Cement Association; c2019 [cited 2022 Aug 30]. Available from: <https://www.cement.org/roller-compacted-concrete-rc-c-old>.
- [4] Francis turbine [Internet]. Calgary: Energy Education, University of Calgary; [cited 2022 Aug 20]. Available from: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Francis_turbine.
- [5] Abou Samra RM, Ali RR. Detection of the filling phases of the Grand Ethiopian Renaissance Dam using Sentinel-1 SAR data. *Egypt J Remote Sens Space Sci* 2021;24(3):991–7.
- [6] Ethiopia—country commercial guide [Internet]. Washington, DC: International Trade Administration; 2022 Jul 21 [cited 2022 Jul 30]. Available from: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/ethiopia-energy>.
- [7] Mbaku MM. Nile basin at a turning point as Ethiopian dam starts operations [Internet]. London: The Conversation; 2022 Mar 6 [cited 2022 Jul 20]. Available from: <http://theconversation.com/nile-basin-at-a-turning-point-as-ethiopiandam-starts-operations-178267>.
- [8] Baihetan Hydropower Station [Internet]. Beijing: Ministry of Water Resources, the People's Republic of China; 2021 Jun 21 [cited 2022 Jul 20]. Available from: http://www.mwr.gov.cn/english/MagnificentAchievements/202106/t20210621_1523370.html.
- [9] Digest of UK energy statistics (DUKES): electricity [Internet]. London: UK Government; [updated 2021 Jul 29; cited 2022 Jul 20]. Available from: <https://www.gov.uk/government/statistics/electricity-chapter-5-digest-of-unitedkingdom-energy-statistics-dukes>.
- [10] The world's largest turbine produces renewable energy [Internet]. London: International Hydropower Association; c2021 [cited 2022 Jul 20]. Available from: <https://www.hydropower.org/case-study/worlds-largestturbine>.
- [11] O'Neil S. Giant turbines poised to claim offshore wind. *Engineering* 2021;7: 894–6.
- [12] Hydropower special market report. Paris: International Energy Agency; 2021 Jul.
- [13] Dubash NK, Dupar M, Kothari S, Lissu T. A watershed in global governance? An independent assessment of the world commission on dams. Report. Washington, DC: World Resources Institute; 2001.
- [14] Dams and development: a new framework for decision-making: the report of the world commission on dams. Report. London: Earthscan Publications Ltd., 2000.
- [15] Schulz C, Adams WM. Debating dams: the world commission on dams 20

- years on. *Wiley Interdiscip Rev Water* 2019;6(5):e1396.
- [16] Berga L. The role of hydropower in climate change mitigation and adaptation: a review. *Engineering* 2016;2(3):313–8.
- [17] Global campaign will highlight hydropower’s role in achieving net zero and energy security [Internet]. London: International Hydropower Association; 2022 Mar 20 [cited 2022 Jul 20]. Available from: <https://www.hydropower.org/news/global-campaign-will-highlight-hydropowers-role-in-achievingnet-zero-and-energy-security>.
- [18] Wenzel F, Hofmeister N, Papini P, Gehm B. Is hydropower making a comeback in the Amazon? [Internet]. London: Dialogo Chino; 2022 Mar 17 [cited 2022 Jul 20]. Available from: <https://dialogochino.net/en/climate-energy/51950-ishydropower-making-a-comeback-in-the-amazon/>.
- [19] O’Neill S. Climate change action alights on satellite detection of methane. *Engineering* 2022;16:9–12.
- [20] Grossman D. Deliberate drowning of Brazil’s rainforest is worsening climate change [Internet]. London: New Scientist; 2019 Sep 18 [cited 2022 Jul 20]. Available from: <https://www.newscientist.com/article/mg24332480-200-deliberate-drowning-of-brazils-rainforest-is-worseningclimate-change/>.
- [21] Kemenes A, Forsberg BR, Melack JM. CO₂ emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil). *Biogeosciences* 2011;116(G3).
- [22] Almeida RM, Shi Q, Gomes-Selman JM, Wu X, Xue Y, Angarita H, et al. Reducing greenhouse gas emissions of Amazon hydropower with strategic dam planning. *Nat Commun* 2019;10:4281.
- [23] Soued C, Prairie YT. The carbon footprint of a Malaysian tropical reservoir: measured versus modelled estimates highlight the underestimated key role of downstream processes. *Biogeosciences* 2020;17(2):515–27.
- [24] Hydroelectric generators are among the United States’ oldest power plants [Internet]. Washington, DC: US Energy Information Administration; 2017 Mar 13 [cited 2022 Jul 20]. Available from: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=30312>.