



Research
Hydro Projects—Review

水电在减缓和适应气候变化中的作用

L. Berga^{a,b}

^a International Commission on Large Dams, Paris 75116, France

^b The Royal Academy of Sciences and Arts of Barcelona, Barcelona 08002, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 March 2016

Revised form 22 June 2016

Accepted 8 July 2016

Available online 9 September 2016

关键词

可再生能源

水电

减缓气候变化

气候变化影响

摘要

水电是一种清洁、可再生，且对环境友好的能源。全球每年的水力发电量达到 3930 TW·h，占全球总发电量的 16%，同时占可再生能源发电量的 78% (2015年)。水电和气候变化具有双重的关系。一方面，水电作为一种重要的可再生能源，对于避免温室气体排放和减缓全球变暖贡献显著；另一方面，气候变化会改变河道流量，进而影响水资源可用量和水力发电。水电对于减少温室气体排放和保障能源供应至关重要。与常规燃煤电厂相比，水电每年可避免 3×10^9 t CO₂ 的排放，占全球年 CO₂ 排放量的 9%。除了对电力行业的贡献，水电项目还可作为多功能水库的融资工具，以及水资源应对气候变化影响的一项适应性措施，这是因为水库的蓄水可作为气候变化的缓冲器，有大水库调节的流域更能适应水资源变化，而不容易受到气候变化的影响。从全球层面来看，预期气候变化对现有全球水力发电的整体影响较小，甚至可能产生一些积极影响。然而，世界不同地区甚至各个国家内部可能存在巨大差异。总之，对水电的解读为：水电是一种廉价、成熟的技术，对减缓气候变化有重大贡献，且可以在水资源适应气候变化中发挥重要作用。有必要关注并减轻巨大的环境压力和社会成本，预计未来几十年内可新增水电装机容量 1 000 GW。

© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

电力是人类生活和可持续发展必不可少的。夜幕降临的地球上，灯火璀璨的区域便是富饶繁荣的地区。然而全球仍有 20% 的人口生活在黑暗当中(他们无法享受照明、冰箱、电脑、良好的教育或自来水)。有电力的地方即意味着社会经济发展，而黑暗是阻碍可持续发展的主要问题。目前，全球有 12 亿人口用不上电，主要在亚洲和非洲地区(其中 80% 的人口生活在农村)[1]。电力

和发展的社会经济分析主要基于若干重要电力指标[年人均用电量、人均用电量及用电人口比例(AE %)]与宏观社会经济指标[人均国民总收入(GNI)、人类发展指数(HDI)]之间的相关性。所有的社会经济分析均表明，发达国家(高收入和高人类发展指数)用电人口的比例达到 100%，年人均用电量为 8500 kW·h；发展中国家(低收入和低人类发展指数)用电人口比例仅为 25%，年人均用电量不到 500 kW·h。由此可见，电力指标与社会经济发展之间存在很强的相关性[2]。

当前,人类面临实现2030年可持续发展目标(SDG)的挑战:指导未来15年发展行动的一项可持续发展计划,由17个目标、169个子目标构成,预估年投资额在3.3万亿~4.5万亿美元。其中目标7为有关能源的挑战,其目的是实现人人都能获得廉价、可靠及可持续的现代化能源。目标7包括4个子目标,即到2030年,确保人人享有能源,提高可再生能源在全球能源结构中的比例,提高能效,扩建基础设施和技术升级以提供现代化的可持续能源[3-5]。

2. 电力能源与气候变化

人类活动导致的温室气体排放正改变着全球能源和气候模式。主要的温室气体为CO₂,占总排放量的76%。这些排放导致CO₂浓度从1750年的277 ppm上升到2014年的397 ppm,增长43%。2015年3月和12月,CO₂峰值浓度有几次超过400 ppm。从经济活动来看,用于发电和供暖的煤炭、天然气和石油的燃烧是最大的全球温室气体排放来源。

国际社会对全球温室气体排放和气候变化的政策响应始于1992年提出的《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC),其为稳定大气温室气体浓度、避免气候系统受到危险的人为干扰提供了法律框架。在多次年会后,UNFCCC第21次缔约方会议(COP 21)于2015年11月29日至12月31日在法国巴黎召开。此次巴黎气候变化大会是一场全球领导人盛会,150多个国家元首和政府首脑出席会议,表达通过全球气候变化新协议的政治意愿。此次会议汇聚了36 000多位参与者,包括近23 100位政府官员,9400位联合国机构、政府间组织和公民社会组织的代表及3700位媒体代表。

在巴黎气候变化大会上,各方同意确保全球平均气温升幅不超过工业化前2℃,并继续努力,争取把温度升幅限定在1.5℃之内,以大幅减少气候变化的风险和影响。各方应编制、沟通和连续保持《国家自主贡献预案》(INDCs)。各国必须自愿保证,而非强制性地逐步减排温室气体。这是世界各国减缓气候变化的首份全球协议,也是减缓气候变化的关键第一步[6]。然而,全球大多数国家日前提交的《国家自主贡献预案》仅生效到2030年,届时的气温升幅或达3~3.5℃,远远高于承诺的2℃升幅及CO₂浓度450 ppm,为此,有必要提出2030年以后的减排承诺及减排行动[7]。

UNFCCC目前正力求达成全球温室气体减排协议。

此外,各方就电力减排的重要方面达成了普遍共识,如可再生能源的重大发展:太阳能、风能、地热能和生物能(绿色电力)、水电(蓝色电力),提高供电和配电效率,煤改气,核电,热电联产,CO₂捕获的先期应用。与此同时,第21次缔约方会议上通过的《巴黎协定》承认,有必要通过加强推广可再生能源,促进其在发展中国家,尤其是非洲国家的广泛应用。

3. 水电能源与气候变化

水电是一种清洁且对环境友好的可再生能源。全球年平均水力发电量达到3930 TW·h,占全球总发电量的16%,占可再生能源发电量的78%(2015年)。图1中,水电容量为1100 GW(主要在亚洲和拉丁美洲),过去五年水电的复合年增长率约为3.5%,约有160 GW的在建水电项目及1000 MW的规划水电项目。

目前,全球约有1200座在建大坝,其中347座为高达60 m以上的大坝,分布在49个国家,主要在亚洲。在这些大坝中,有202座大坝(58%)主要用于水力发电,而50%以上的大坝为多目标开发项目[8]。

水电在发达国家已经得到广泛的开发,技术可行的水电资源的开发程度超过50%。新兴经济体开发了20%~30%的水电资源,但发展中国家仍有很大的水电资源待开发。如图2所示,非洲是一个极端情况,具有经济可行性的水电资源开发程度仅为8%。整体而言,发达国家已经开发了大部分的水电资源,而新兴国家和发展中国家仍有很长的路要走[1]。

水电和气候变化具备双重关系。一方面,水电作为一种重要的可再生能源,有助于避免温室气体排放及减缓全球变暖;另一方面,气候变化可能改变河道流量,进而影响水的可利用量、规律性及水力发电[9]。

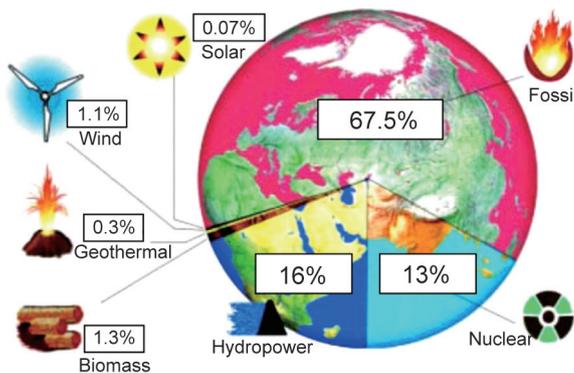


图1. 2015年主要发电来源 (以百分比表示)。

3.1. 水电能源在减缓气候变化中的作用

水电等可再生能源技术有助于显著减少温室气体排放,保障能源供应安全。与常规燃煤电厂相比,水电每年可减排 3×10^9 t CO_2 ,占全球年 CO_2 排放量的9%。总之,水电是一种产生较少温室气体排放的能源。根据世界能源理事会(WEC)的数据,径流式和水库式水力发电每百万度电,分别产生3~4 t和10~33 t的 CO_2 排放量,比传统火力发电的 CO_2 排放量少近100倍[10]。如图3所示,政府间气候变化委员会(IPCC)2011年发布的可再生能源特别报告表明,大多数水电站生命周期内的温室气体排放量为 $4\sim 14$ g CO_2 eq·(kW·h)⁻¹。然而,在某些情景下,水电站的温室气体排放量明显高,但依然显著低于火力发电的排放量[11]。在过去的十年间,人们对水库温室气体排放的方法和可靠性一直存有争议。对水库温室气体排放的长期科学争论,一些事件的不确定性及夸张的描述不利于水电的发展,例如,2000年的研究估计水库

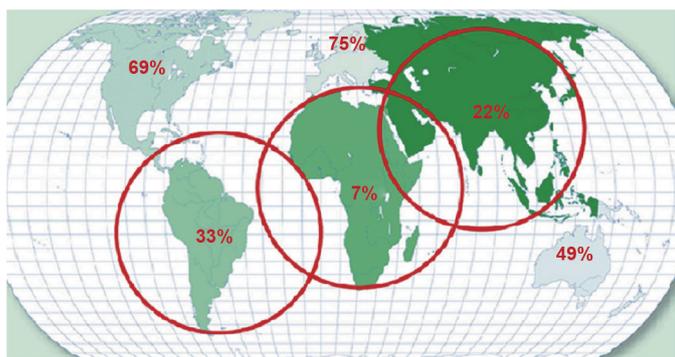
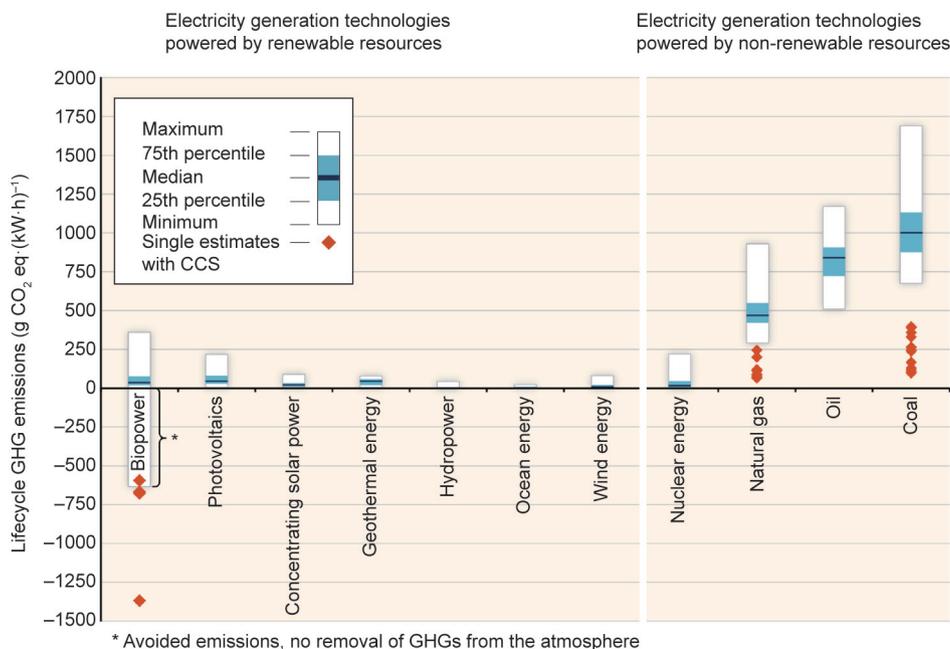


图2. 待开发的具有技术可行性的水电潜能(%)。

温室气体排放占全球总排放量的7%。为了传播最新的研究进展,世界银行2013年4月发布了《生化过程引起水库温室气体排放的阶段技术文件》。发布这一技术文件的主要目的是:澄清对水库温室气体排放的混乱认识;提供在环评过程中研究水库温室气体排放的具体导则。这一阶段性技术文件得出的主要结论是:水库排放大量温室气体的观点主要源于在条件十分恶劣的场址开展的早期研究;绝大多数水库的温室气体排放相对较少[12]。

水电是最廉价的可再生能源,因此在当前能源市场中往往更具价格优势。水电一般需要相对较高的初期投资,但拥有较长的使用周期,且运维成本较低。水电项目发电成本差异很大,在良好条件下,可能低至 $3\sim 5$ 美分·(kW·h)⁻¹(2005年)[11]。水电的另一优势是,在所有已知能源中,水电的能源转换率最高(约为90%)。与此同时,水电项目的可靠性和灵活性较高,且其规模种类较多,这使得水电既能满足大规模集中的城市和工业需求,也能满足分散化的农村需求。

在过去的十年间,水电、风电和太阳能发电得到快速发展,可再生能源增长迅猛。2004—2013年共新增760 GW可再生能源,其中水电、风电和太阳能光伏分别占37.5%、35.5%和18%,如图4所示[13]。另一方面,水电为其他可再生能源提供了及时的协同作用。在未来电力结构下,应综合规划水电、风电和太阳能发电。水电与风电和太阳能发电显示出重要的协同效益,因为风能和太阳能是间歇性能源,具有很大的波动性,而水电



* Avoided emissions, no removal of GHGs from the atmosphere

图3. 再生资源与不可再生资源发电技术生命周期温室气体排放情况[11]。

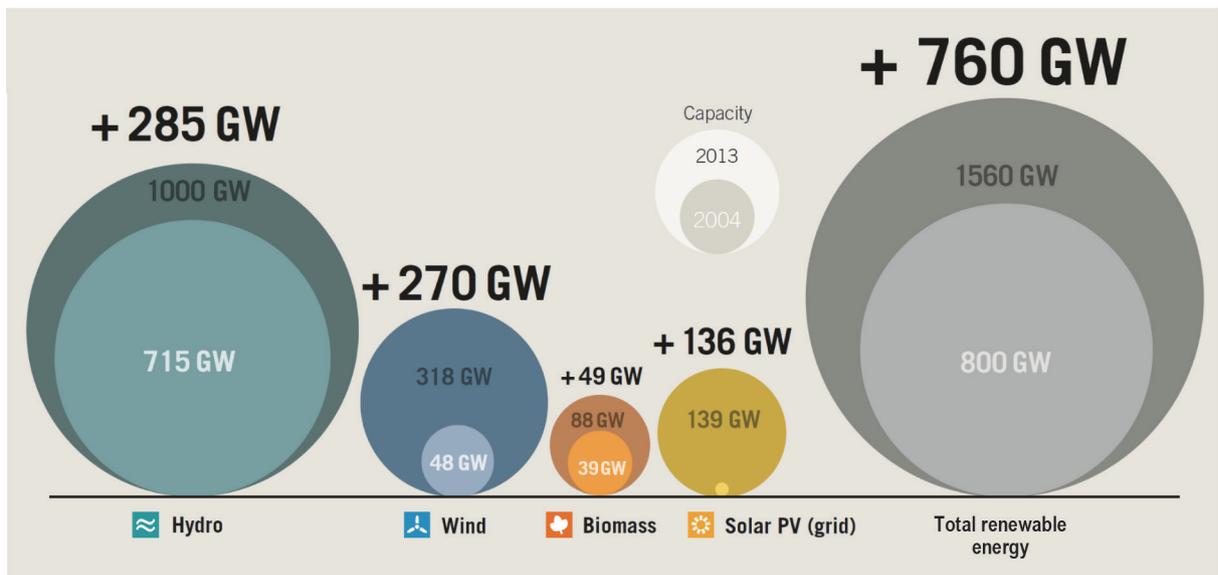


图4. 新增可再生能源的发电容量(2004—2013年) [13]。

能够平衡这种波动性，并提供峰值负荷。此外，水电是目前唯一通过抽水蓄能电站有效存储能源的系统，而全球97.5%能源存储在电力网络中 [14]。

3.2. 水电蓄水在适应气候变化中发挥的作用

气候变化将导致全球变暖、海平面上升、积雪消融。气候变化引起的全球增温与水文循环相互作用，进而导致降水、蒸发、土壤湿度变化、冰川和冰盖融化及河流流量变化，对水资源和供水、洪水和干旱及水力发电产生影响。IPCC第五次评估报告对水资源变化的预测结果表明，高纬度地区、非洲东部热带地区及东南亚的水资源将增加，而许多半干旱和干旱地区(如地中海盆地、美国西部、非洲南部、巴西东北部)的水资源将减少，欧洲南部的径流量将显著减少 [15]。预测表明，气候变化对水资源的影响可能呈现时间不规律和地域分布不均匀的情况，冰川和积雪融水补给的河流的径流量将出现季节性变化。于是，水资源可利用量减少，可能会导致全球缺水国家面临重大水资源短缺问题。在这种情况下，有必要注意到，从蓄水(大坝和水库)和水资源可利用量来看，对调控流域水资源开展的气候变化敏感性分析表明，拥有大调控库容的流域更能适应水资源变化，较少受到气候变化的影响，蓄水有助于减缓气候变化影响 [3]。在气候变化及世界不断变化的背景下，需要负责任地发展，增加蓄水能力是非常必要的。在适应气候变化方面的投资应包括增加蓄水量 [4]。面临的挑战之一是，促进修建多功能大坝，更好地规划综合水利

工程。在水资源综合管理的框架下，水力发电的蓄水可确保灌溉、饮用水、防洪和通航用水。多功能大坝的蓄水有助于确保水资源适应气候变化。此外，除了对电力部门的贡献，多功能水电项目还可作为多功能水库的融资工具 [11, 16]。

3.3. 气候变化对水力发电的影响

气候变化可能导致河流流量变化，进而影响水力发电。一般而言，气候变化对水力发电的影响变化差别很大，并随地域而异，取决于流态变化及冰川和积雪融化的影响。以欧洲为例，到2070年，预计整个欧洲的水电资源将下降6%，北欧和东欧的水电资源将增长15%~30%，欧洲西部和中部将保持稳定，而地中海地区的水电资源将下降20%~50% [17]。根据IPCC可再生能源特别报告，从全球层面来看，气候变化对现有全球水力发电的整体影响可能较小，甚至可能产生一些积极影响。然而，相关结果也表明，世界不同地区甚至各国内部可能存在很大差异，如表1所示 [11]。

然而有必要指出的是，这些预测存在很大的不确定性。社会经济情景、模型预测等级的不确定性表明，对一些地区的预测存在明显的矛盾。未来水文状况的不确定性，对水资源和水电管理人员对气候变化的认识是一个挑战。尽管这些预测无法为决策者提供未来变化的准确信息，但可以提供十分有用的信息，供初期评估使用。未来应密切监测和分析水力发电数据、趋势和预测，并依据充分的信息实施适应性管理 [1]。

4. 水电能源发展趋势

21世纪以来,水力发电的演化呈现出一种增长态势,如图5所示[18]。

与此同时,预测未来几十年内,水电仍将呈显著发展趋势。预测结果表明,到2030年,全球102个国家共有3700个装机容量达1 MW以上的水电项目,包括629个在建项目(17%)及3071个规划项目(83%)。这些项目主要位于发展中国家和新兴经济体,包括亚洲、南美洲、欧洲(巴尔干半岛、安纳托利亚和高加索地区)和非洲(见图6),预估投资额将达到2万亿美元[19]。

这些水电项目的总装机容量将达到700 GW,其中76%以上的水电项目为中小型水电项目(1~100 MW),但812个大型水电项目(>100 MW)的装机容量占比达到92%,如图7所示。

水电发展在未来的气候变化减缓中扮演着重要的

表1 2005年发电量及2050年预估气候变化($\text{TW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$, SRES A1B[11])

| | Power generation capacity (2005) | | Change by 2050 ($\text{TW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ ($\text{PJ}\cdot\text{a}^{-1}$)) |
|---------------|----------------------------------|---|---|
| | GW | ($\text{TW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ ($\text{PJ}\cdot\text{a}^{-1}$)) | |
| Africa | 22 | 90 (324) | 0.0 (0) |
| Asia | 246 | 996 (3 586) | 2.7 (9.7) |
| Europe | 177 | 517 (1 861) | -0.8 (-2.9) |
| North America | 161 | 655 (2 358) | 0.3 (≈ 1) |
| South America | 119 | 661 (2 380) | 0.3 (≈ 1) |
| Oceania | 13 | 40 (144) | 0.0 (0) |
| Total | 737 | 2 931 (10 552) | 2.5 (9) |

SRES is short for Special Report on Emissions Scenarios, which is a report by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); A1B stands for “a balanced emphasis on all energy sources,” which is one of the SRES scenarios.

角色。国际能源署(IEA)提出的峰值排放量450 ppm (最大增温为 2°C)是被普遍认可的,在这一条件下,2030年的水电装机容量将增长70%,2050年的水电装机容量将翻一番[20]。近期,国际可再生能源署(IRENA)的2030年可再生能源发展路线图(符合联合国秘书长发起的“人人享有可持续能源(SE4ALL)”倡议)提出,将全球可再生能源的占比翻一番,实现这一目标需要总水电装机容量达到2200 GW,这表示需要在IEA预测结果基础上,新增500 GW的水电装机容量[21]。

5. 结语

水电是一种清洁可再生,且对环境友好的能源。全球年水力发电量占全球总发电量的16%,占可再生能源发电量的78%(2015年)。水电有助于显著减少温室气体排放、确保能源供应安全。与常规燃煤电厂相比,水电

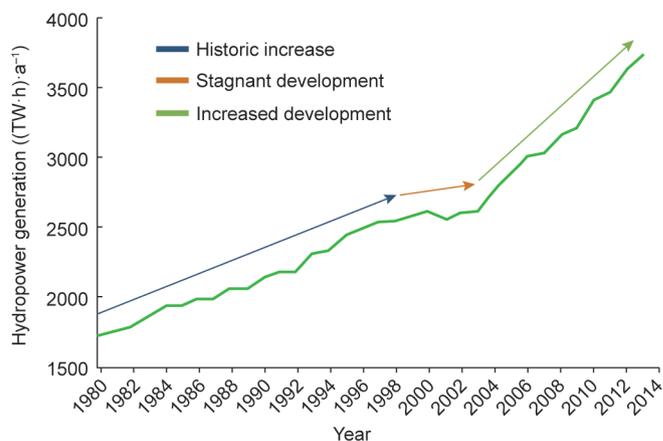


图5. 1980年以来全球水力发电量的演化 [18]。

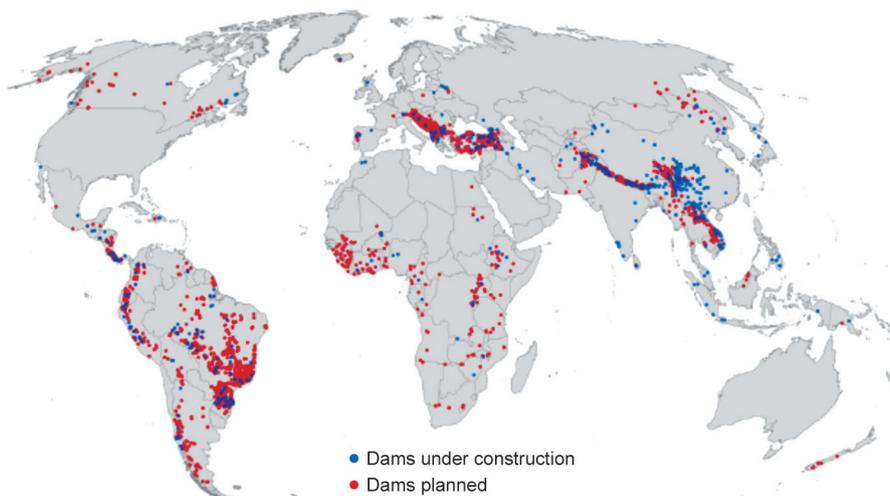


图6. 2030年在建、规划水电站位置图 [19]。

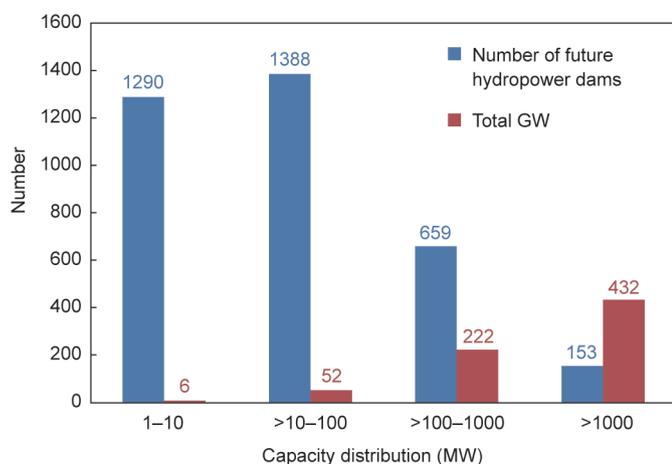


图7. 未来水电站数量及装机容量分布。

每年减排 3×10^9 t的CO₂排放, 占全球CO₂排放量的9%。因此, 水电是一种产生较少温室气体排放的能源。

水电的其他优势包括: 是最廉价的可再生能源, 因此在当前能源市场中往往更具价格优势。水电一般需要相对较高的初期投资, 但其拥有较长的使用周期, 且运行和维护成本较低。在所有已知能源中, 水电的能源转换率最高(约为90%)。与此同时, 水电项目的可靠性、灵活性较高, 且其规模种类较多, 这使得水电既能满足大规模集中城市和工业的需求, 也能满足分散化的农村需求。

水电、风电和太阳能发电将产生重要的协同效益, 因为风能和太阳能是间歇性能源, 具有很大的波动性, 而水电能够平衡这种波动性, 并提供峰值负荷。此外, 水电是目前唯一通过抽水蓄能电站有效存储能源的系统, 而全球97.5%的能源储存在电力网中。

21世纪初以来, 水力发电呈现出一种增长态势。与此同时, 预测未来几十年内, 水电将继续呈现巨大发展, 尤其是在发展中国家和新兴经济体。水电发展在未来的气候变化中将扮演重要的角色。最新的国际可再生能源署2030年可再生能源发展路线图报告提出将全球可再生能源比例翻一番的目标, 实现这一目标, 全球的水电装机容量需要达到2200 GW。

总之, 水电作为一种廉价、成熟的技术, 将有助于

显著减缓气候变暖, 且可以在气候变化适应水资源可用性中发挥重要作用。然而, 有必要关注并减轻巨大的环境和社会成本。在未来几十年内, 预计可能新增1000 GW的水电装机容量。

References

- [1] Berga L. The role of hydropower in climate change mitigation and adaptation [presentation]. In: AFRICA 2013: International Conference and Exhibition on Water Storage and Hydropower Development for Africa; 2013 Apr 16-18; Addis Ababa, Ethiopia; 2013.
- [2] Berga L. Dams for sustainable development. In: Proceedings of High-level International Forum on Water Resources and Hydropower; 2008 Oct 17-18; Beijing, China; 2008.
- [3] Berga L. Dams for sustainability in the Global Challenges era [presentation]. In: The 82nd Annual Meeting of ICOLD: International Symposium on Dams in Global Environmental Challenges; 2014 June 1-6; Bali, Indonesia; 2014.
- [4] Berga L. Water storage infrastructure for the UN Sustainable Development Goals. In: Proceedings of the 7th World Water Forum: Water for Our Future; 2015 Apr 12-17; Daegu & Gyeongju, Republic of Korea; 2015. p. 111-23.
- [5] Sustainable development knowledge platform [Internet]. New York: United Nations; c2016 [cited 2016 Jul 31]. Available from: <https://sustainabledevelopment.un.org>.
- [6] United Nations Framework Convention on Climate Change. Adoption of the Paris agreement, FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1; 2015.
- [7] Kintisch E. After Paris: the rocky road ahead. Science 2015;350(6264):1018-9.
- [8] The International Journal on Hydropower and Dams. World atlas and industry guide 2015. Wallington: Aqua-Media International Ltd.; 2015.
- [9] Berga L. Role of hydropower in climate change mitigation and adaptation. In: Proceedings of Hydropower 2013-CHINCOLD Annual Meeting & the 3rd International Symposium on Rockfill Dams; 2013 Nov 1-3; Kunming, China; 2013.
- [10] World Energy Council. Comparison of energy systems using life cycle assessment: a special report of the World Energy Council. London: World Energy Council; 2004.
- [11] Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Seyboth K, Matschoss P, Kadner S, et al., editors. Renewable energy sources and climate change mitigation: summary for policymakers and technical summary—special report of the intergovernmental panel on climate change. New York: Cambridge University Press; 2011.
- [12] Liden R. Greenhouse gases from reservoirs caused by biochemical processes: interim technical note. Water papers. Washington, DC: World Bank; 2013.
- [13] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). 10 years of renewable energy progress: the first decade 2004-2014. Paris: REN21; 2015.
- [14] Fairley P. Energy storage: power revolution. Nature 2015;526(7575):S102-4.
- [15] Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, et al., editors. Climate change 2013: the physical science basis. Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change. New York: Cambridge University Press; 2013.
- [16] Berga L. Solving dam engineering challenges. Hydro Rev 2008;16(1):14-5.
- [17] Lehner B, Czisch G, Vassolo S. The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. Energy Policy 2005;33(7):839-55.
- [18] World Energy Council. World energy resources: charting the upsurge in hydropower development 2015. London: World Energy Council; 2015.
- [19] Zarfl C, Lumsdon AE, Berlekamp J, Tydecks L, Tockner K. A global boom in hydropower dam construction. Aquat Sci 2015;77(1):161-70.
- [20] International Agency Energy. Technology roadmap: hydropower. Paris: International Energy Agency; 2012.
- [21] International Renewable Energy Agency (IRENA). IRENA REMAP 2030: doubling the global share of renewable energy, a roadmap to 2030. Abu Dhabi: IRENA; 2013.