

文章编号: 2097-096X(2023)-04-0331-10

气候-水文变化对水力发电的影响预估综述

鲁帆¹, 杨姗姗², 严登华¹, 岳彩云³

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 中国水利学会, 北京 100053; 3. 西藏自治区水文水资源勘测局, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 气候变化可能改变河川径流的均值、极值、过程及可利用量, 从而影响流域水电工程的规划建设和运行调度。因此, 预测评估未来气候-水文变化对水力发电的影响具有重要意义。本文在简要阐述气候-水文-水电三者纽带关系的基础上, 总结了国内外相关文献中影响预估的技术流程、主要模型与方法, 从区域与季节差异、不确定性、综合影响及适应性调控等三方面分析预估结果, 探讨现有研究存在的不足, 并结合中国气候变化与水电行业的实际特点, 展望了未来研究重点。建议进一步加强水文极值事件对水力发电影响、高海拔地区水循环机理及演变趋势等基础研究, 并在考虑电力需求与多能互补的前提下, 开展气候变化影响下的综合风险预估和整体适应策略研究。

关键词: 气候变暖; 水文变化; 水力发电; 影响预估; 整体适应

中图分类号: P33; TV76

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20220330

1 研究背景

水电是世界上最大的可再生电力来源, 与全球气候变化联系紧密。2020 年联合国《世界水发展报告》聚焦“水与气候变化”, 指出水电将继续在减缓气候变化和增强能源行业适应性方面发挥重要作用, 但气候变化影响水资源的可利用性, 可能加剧缺水形势, 给发电行业带来风险。深入探索气候-水文-水电之间的纽带关系和相互影响机理, 对于水电可持续发展和工程高效安全运行具有重要意义。早在 1990 年代, 欧美发达国家就开始关注气候-水文变化对水力发电的影响。例如: Robinson^[1]研究气候变化对美国东南部杜克及弗吉尼亚地区水电系统的影响及风险; Mimikou 和 Baltas^[2]基于全球气候模式模拟结果研究希腊水电计划的可靠性。21 世纪以来, 随着对气候变暖趋势及风险研究的深入, 气候变化问题日渐成为全球关注焦点, 其对全球水循环及水力发电的影响越来越受到重视。2012 年, Hamududu 和 Killingtveit^[3]研究了气候变化影响下世界各国水力发电量的变化幅度。2016 年, Liu 等^[4]预估了气候变化对中国水力发电潜力的影响。目前, 国内外学者通过气候、水文、水电多类模型集成模拟的手段已在该领域开展了较多定量研究。

本文简要阐述气候-水文-水电三者之间的纽带关系, 系统总结气候-水文变化对水力发电影响的预估方法, 从区域与季节差异、不确定性、综合影响及适应性调控等方面分析现有预估结果, 在探讨现有研究存在不足的基础上, 对未来该领域的重点研究方向进行展望, 以为水电行业应对气候变化提供借鉴。

2 气候-水文-水电纽带关系

水是全球气候变化最直接和最重要的影响领域之一。国内外相关研究表明: 气候变暖已经导致多

收稿日期: 2022-08-15; 网络首发时间: 2023-04-13

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?urlId=10.1788.TV.20230412.1723.001>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2240201)

作者简介: 鲁帆(1981-), 博士, 正高级工程师, 主要从事气候变化与水资源研究。E-mail: lf9805320@163.com

年冻土、冰川持续萎缩，积雪不断减少，部分降雪区春季最大径流量的出现提前，夏季干旱不断加剧^[5]；温室气体排放可能导致 21 世纪农业灌溉用水量增加、水资源利用效率降低、行业之间用水竞争加剧等不利影响^[6-7]；海平面上升会增加极端海平面事件的频率，增加对许多沿海低洼城市和小岛屿的威胁，咸潮上溯会对河口地区用水造成较大影响。根据中国《第四次气候变化国家评估报告》，未来气候变化影响下中国水资源可能较正常年份略少，但变异性增大，极端暴雨、洪涝、干旱事件可能增多增强，水资源脆弱性增强^[8]。总体而言，全球气候变暖会系统影响地表系统中冰川、积雪、冻土、湖泊、河流、地下水等组分特征及降水、蒸发、下渗、融化、汇流、取水、耗水、调蓄等水循环过程，改变河川径流的均值、极值、过程及可利用量，从而影响流域的水力发电蕴藏量、用电需求及水电工程的规划和建设和运行调度，同时也可能对水电工程附近的水文、生态和社会经济系统等带来影响，水电生产未来面临着诸多不确定性。气候变暖既能通过水文循环变化影响水力发电供给，还能影响人类的电力需求。Wenz 等^[9]认为未来气候变暖将使欧洲电力负荷峰值和总消费量出现两极分化。到 21 世纪末，南欧和西欧的平均日电力负荷峰值和总用电量显著增加，而北欧则显著下降。另一方面，水电有助于减少温室气体排放，减缓全球变暖趋势。国际水电协会的分析表明，如果用燃煤发电取代水力发电，每年将额外排放 35 亿~40 亿公吨的温室气体，全球化石燃料和工业排放量将增加约 10%。气候-水文-水电三者之间的纽带关系见图 1。

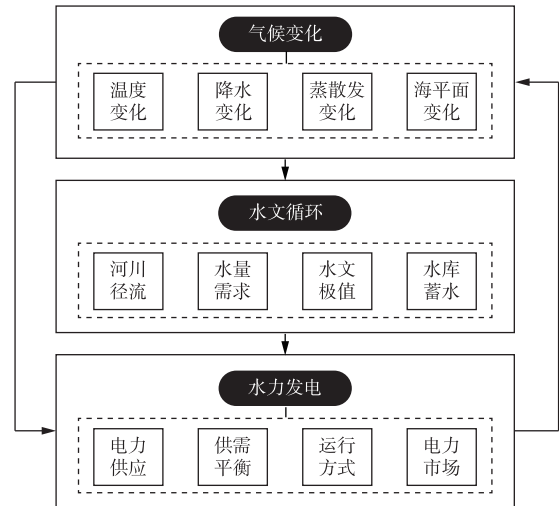


图 1 气候-水文-水电纽带关系示意
Fig.1 Nexus relationship of climate-hydrology-hydropower

3 预估方法

目前，国内外综合采用气候预估、流域水文、水电计算等多类模型来定量预估未来气候-水文变化对水力发电的影响。其中：气候预估模型为流域水文模型提供未来预估期气候要素信息，流域水文模型为水电计算模型提供未来预估期的流域水文过程，水电计算模型提供未来预估期水电生产影响。图 2 描述了这三类模型的基本特点及相互联系。

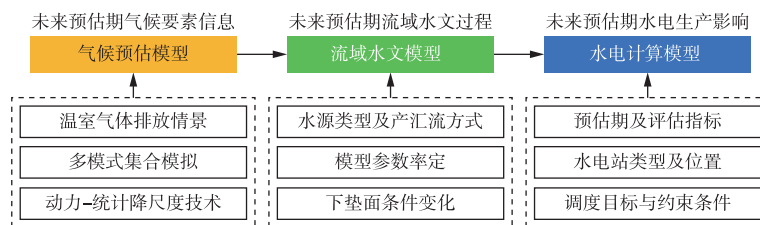


图 2 水电影响预估方法示意
Fig.2 Method of estimating the extent of impact on hydropower

3.1 气候-水文变化预估方法 温室气体排放情景是气候预估的基础。已有相关研究主要使用联合国政府间气候变化专门委员会 (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第五次评估报告^[10-13]或第四次评估报告中的排放情景^[14-16]。第五次评估报告采用了四种典型浓度路径情景，其中 RCP8.5 是高排放情景，RCP6 和 RCP4.5 是中等排放情景，RCP2.6 是低排放情景。为减少全球气候模式 (Global Climate Model, GCM) 结果的不确定性，通常同时选取多个模式开展研究，一是便于比较不同模式计算结果的差异，二是可以通过多模式集合来提高模拟精度。由于 GCM 输出信息尺度大、分

分辨率低,无法直接应用于水文模拟,为获得高分辨率的气候信息,通常采用统计、动力或两者相结合的降尺度技术将其转化为区域尺度的气温、降水等地面气候信息,从而弥补 GCM 对区域气候变化情景预估的局限性。

在流域水文模型构建方面,已使用的模型包括全球水模型 WaterGAP (Water-Global Assessment and Prognosis)^[14]、BP 神经网络模型^[17]、VIC、SWAT、GEOTRANSF 等分布式水文模型^[18-20]和新安江、HY-MOD、WatBal、GR2M 等集总式水文模型^[15,21-23]。应根据研究范围大小和研究区域水源类型、产汇流方式等特点,选择适宜水文模型开展模拟预估。例如:高纬度或高海拔地区对气温升高非常敏感,水文建模时需考虑降水形态及冰川、冻土、积雪等模块^[15,24],提高冰冻圈水文过程的模拟精度;下垫面条件变化可能改变蒸散发和下渗过程,导致降水径流关系发生变化,应关注下垫面变化对水文模型参数的影响,例如中国北方的海河、黄河等流域。为定量分析水文模拟的不确定性,可采用多类水文模型同时开展模拟和预估^[4,10]。

3.2 气候-水文变化对水电影响预估指标及计算方法 水电影响预估中总水能潜力 (Gross hydro-power potential, GHP) 和已开发的水电潜力 (Developed hydropower potential, DHP) 是两个最常用的评价指标^[25]。GHP 指不考虑任何能源损失情况下可潜在利用的总水能潜力。由于不考虑实际工程, GHP 指标并不直接反映气候变化对实际水力发电量的影响程度。DHP 指已建水电站实际的发电潜力。GHP 的计算仅需水量和高程信息,而 DHP 的计算则还需要提供水电站位置、装机容量、调度规则等其他信息。此外,还有可持续性指标和效率指标。可持续性指标包括发电保证率、弹性指标和水电产出缺口等,效率指标包括单位产能耗水量、弃水量和水资源利用效率等。众多研究表明^[15,22,26],评价指标不仅要体现总量,还应强化过程,要更多地关注不同季节水力发电量的变化及其与电力需求的匹配程度。

对于大范围、大尺度的影响预估, DHP 的计算容易受到资料限制。Hanasaki 等^[27]提出一套考虑防洪、发电等目标的通用水库调度规则,计算中国 447 座水库及印度 7 座大水库的 DHP^[4,13]。Hadde-land 等^[28]结合 VIC 水文模型开发了一套适用于大空间尺度的水库调度模型,用于研究灌溉用水等人类活动对地表水通量的影响。该方法被用于全球气候-水文变化及水力发电系统的脆弱性评价中^[11,29]。Turner 等^[14]利用月尺度的递推优化算法建模,研究气候变化影响下全球水力发电供应的脆弱性。当研究范围缩小到具体流域时,相应采用的水电计算方法可以更加完善,可考虑水库库容、跨流域调水、河道生态与航运流量、河道外取用水、水轮机过流能力等约束条件,对流域梯级电站群所受影响开展联合评估^[21,26]。还有学者通过分析实际发电量与地区降水量之间的关系建立由降水驱动的水电响应模型^[30-31],从而研究未来气候变化对水力发电的影响。

4 预估结果

已有文献从不同空间尺度预估了气候-水文变化对水力发电的影响,认为不同区域和季节的影响存在差异,预估模型的选择和计算存在不确定性,应针对生态、能源、经济等方面的潜在影响开展能源系统的适应性调控。本文主要从区域与季节差异、不确定性、综合影响及适应性调控三方面综述预估结果。

4.1 区域与季节差异 在全球尺度上, Hamududu 和 Killingtveit^[3]利用 IPCC 第四次评估报告提供的 12 个 GCM 评估了中等排放情景 A1B 下世界各国现有水电站在 2050 年发电潜力的变化幅度,认为不同区域未来的变化趋势存在差异,应针对具体流域或电网开展精细化评价。多模型集合预估结果表明,在 RCP2.6 和 RCP8.5 两种排放情景下 2070—2099 年间全球 GHP 将比 1971—2000 年的均值分别增长 2.4% 和 6.3%^[10]。增长最快的区域包括非洲中部、印度、亚洲中部及北半球高纬度地区。然而,全球水电站在 2070—2099 年期间的实际年发电能力预估将减少 0.4%~6.1%^[11]。中国所在的东亚和太平洋地区、欧洲是全球水电生产最大的 2 个地区,装机容量之和约占全球的 56%。一些研究预估未来整个欧洲的 GHP 将受气候变化影响而下降,其中北欧和东欧增长,欧洲西部和中部保持稳定,欧洲南部则下降^[25,32]。8 个全球水文模型在中国的预估结果表明,2070—2099 年的年均 GHP 将比 1971—2000 年

增加 3%~6%，年均 DHP 则将减少 1.3%~4%^[4]。其中：中国北方及西南地区的 GHP 将增加，中南部及东部地区将减少；四川、湖北等水电装机容量较大省份的 DHP 将减少，尤其是在秋冬季。上述研究表明：全球气候变暖对世界不同地区甚至各个国家内部水循环及水力发电的影响存在明显的区域差异。区域的 GHP 和 DHP 虽然存在密切关系，但两者间的变化趋势也不完全一致，这跟水电站的位置分布和其他客观条件有关。如果大多数水电站位于平均年径流将下降的地方，容易导致区域水电生产能力降低。一个地方如水电装机容量较少，即使 GHP 显著增加，DHP 增加的作用也相对有限。

Hamlet 等^[33]预估气候变化将使美国哥伦比亚河流域 2040 年的冬季发电量增加，夏季发电量减少，全年发电量减少 2.0%~3.4%。到 2080 年，夏季发电量将减少 17.1%~20.8%；2011 年 Mehta 等^[26]发现冬季越来越多的降雪转化为降雨将导致冬季径流量上升，春季积雪融化时间会提前，夏季径流由于积雪储量减少可能降低；Berghuijs 等^[34]认为气候变暖导致的降雪到降雨的转变将导致总径流减少；Su 等^[35]认为受气温升高和降雨增加的双重影响，2041—2070 年间青藏高原 6 条主要河流的总径流将增加，但不同河流对气候变化的响应存在差异。季风区河流水文过程变化不大，但西风区控制的印度河上游冰雪开始融化的时间将提前，春季径流将增加；2017 年欧洲阿尔卑斯地区的研究发现，未来气候变化对 2031—2050 年河川径流和径流式水力发电存在影响，特别是在小的山区流域，3—4 月的径流由于气候变暖明显增加，夏季 7—8 月的径流减少幅度甚至能达到 70%^[15]；2018 年 Ali 等^[13]认为虽然未来降雨增加，但由于气温显著上升加速流域积雪融化，21 世纪末印度两座大型水电站未来 5—6 月的径流和发电量将减少。综上所述，冰川和积雪融水补给河流对气候变暖非常敏感，径流出现季节性、趋势性变化可能是共同趋势。

4.2 不确定性 由于人类对复杂气候系统认识和技术条件的局限性，气候预估存在不确定性。目前已有研究着重于比较不同气候模式、不同排放情景及未来不同阶段下水电生产指标预估结果的差异。一方面，不同气候模式的建模机理和边界条件并不完全相同，由此预估的未来水电指标存在差异。例如：根据 CanESM2、CNRM-CM5、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM、MPI-ESM-LR 等（英文全称见文献[12]）5 种全球气候模式的预估结果，RCP2.6 排放情景下澜沧江上游梯级电站 2051—2100 年的 GHP 将较 1960—2005 年分别增加 1.7%、14.6%、19.4%、20.5%、30.9%^[12]。美国、厄瓜多尔、尼泊尔等国家的研究案例也表明，不同气候模式下预估的各季节水力发电量存在较大差异^[14,22,35]。为减少单个模式的不确定性，可采用贝叶斯多模型平均等方法开展未来气候变化情景预估，在给出多模式平均情况的同时，客观分析结果的不确定性^[36]。另一方面，不同温室气体排放情景下升温幅度不同，相应的预估结果也存在差异。例如：RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 等三种排放情景下预估广西南流江流域未来 2021—2050 年水力发电潜力都比基准年 1981—2010 年增加，但增加幅度存在差异，分别为 9.1%、15.6%、7.7%^[36]。Meng 等^[37]通过识别全球升温 1.5℃ 和 2℃ 情景下水电站修建的优化位置，进而评价不同升温情景以及是否考虑自然保护区等因素对水电产量的影响。另外，未来不同阶段气候模式输出结果之间的差异也会影响水力发电量的变化。Su 等^[35]的研究表明，青藏高原远期（2041—2070 年）的年均降水量比基准期 1971—2000 年增长 10%~20%，而近期（2011—2040 年）增长幅度只有 5%~10%，这将导致远期径流的持续增加。

除气候预估因素外，气候-水文变化对水电的影响还跟水文建模、发电调度方式及水资源利用政策等密切相关，上述因素的不确定性也会影响到水电指标的预估结果^[4,20]。例如：未来下垫面变化导致产汇流参数甚至过程发生变化，将增大流域水文建模的不确定性；全球气候变化影响下未来能源需求与电价的不确定性会直接影响水电工程的调度方式，未来人类取用水与生态流量核算也不完全与现状相同，都会影响预估结果。为量化气候变化对水力发电潜力影响的不确定性，可采用蒙特卡罗模拟方法对气候情景、水文建模、冰川演变、发电调度等过程中的不确定性进行集成分析^[38]。综上所述，基于气候模式对未来预估的不确定性来自诸多方面且不可避免，可通过集合预估、集成分析等手段来减少不确定性，增强预估结果的可信度。应加强不同情景下预估结果的比较，让利益主体了解其所受影响的范围和可能性。

4.3 综合影响及适应性调控 综合影响体现在经济、生态等方面。一些文献利用水文、水库、电力市

场、经济等模型研究了水电站项目对气候变化的敏感性，认为气候变化导致的发电量变化可能会直接影响未来的电网电价和水电站的电力销售收入^[32,39-41]。例如：Van Vliet 等^[32]研究发现气候变化影响下欧洲的水资源约束将影响电力供应和电价。河流流量变化将使北欧国家的 GHP 增加 8% 以上，南欧国家的 GHP 将下降 15% 以上。上述变化会导致欧洲大多数国家电价升高，同时改变国家之间的电力供求平衡；非洲巴托卡峡谷、巴西亚马逊河、西班牙南部等地的研究发现气候变化将使年电力生产减少，从而导致未来水电项目的电力销售收入下降^[16,23,42]。研究表明：中国西南地区澜沧江、金沙江等流域梯级水电站的发电潜力、弃水、稳定性等指标对气候变化敏感。不同气候变化情景下水电受影响的程度存在差异，西南地区 GHP 变大的同时 DHP 将减少，两者的变化趋势并不一致^[4,21]。一些年调度电站的发电量随径流增加而增加的同时，单位产能的耗水量却变小，水电系统的稳定性、可持续性增加，但部分月份的弃水也会增加，水资源利用效率降低^[12]。流域水文变率可能增强，即使梯级电站无发电调度，水库下游河道生态流量破坏率也可能增大。因此，应重视发电、生态等不同目标间的协调关系及长历时干旱造成的不利影响，充分发挥水电工程在不利气候情景下提高生态流量保证率和生态系统稳定性方面的作用^[17,24]。

国内外文献针对气候变化影响开展了能源系统的适应性调控研究。De Lucena 等^[43]针对巴西水电供应约占全部电力需求 80% 的特点，讨论气候变化对区域电力规划的影响，研究了国家能源系统的适应路径。Taseska 等^[44]采用优化建模方法研究气候变化驱动下马其顿能源需求的变化及适应策略。Parkinson 和 Djilali^[45]研究了加拿大不列颠哥伦比亚省水电系统更好地适应气候变化的措施。Van Vliet 等^[11]从全球尺度探讨了适应气候变化，提高水电及热电系统效率的措施。国内，一些文献针对汉江流域未来气候和径流变化问题，研究如何改进丹江口等水库的调度规则^[46-48]。丁琨等^[49]研究气候变化对淮河上游淠河灌区水电站群发电与灌溉效益的影响，提出优化运行方式。吴书悦等^[50]预估未来气候变化将使新安江水库径流和发电量减少，并基于未来气候变化情景下的入库径流绘制了适应性调度图。上述研究说明在能源系统的中长期规划及水电站调度运行中考虑气候变化和量化影响程度的重要性。未来基础设施的设计应充分考虑气候条件的可能变化范围，提高系统鲁棒性。

5 存在问题及研究展望

气候-水文变化对水力发电的影响预估这一方向具有鲜明的学科交叉特征，涉及到气候、水文、电力等多个领域。从已有文献来看，相关研究已从 1990 年代的萌芽起步阶段正在步入快速发展阶段，但目前国内相关成果数量还较少，研究范围有限，主要集中在气候变化对单一水库的功能影响预估上，对极值水文事件影响和能源系统整体适应考虑较少，对西部梯级水电系统研究还不够深入^[24,30,46-47,49-50]。建议未来结合我国大型水电基地分布、能源结构及实现“双碳”目标的实际需求，进一步加强气候变化对水文极值事件、高海拔地区水循环、区域能源系统的影响及适应对策研究。

5.1 水文极值事件对水力发电影响 全球尺度上，强降雨、干旱等极端气候事件增多会导致水文极值事件增多、风险增大和暴露度增加。部分区域的已有研究表明：气候变暖导致的地表蒸散发加速也会消耗区域地下水资源，从而加剧干旱强度和持续时间^[51]；大范围长历时干旱易导致水电企业严重减产，影响区域能源系统的稳定运行。2022 年 8 月四川极端高温干旱期间，全省电网最高负荷同比增长 25%，但天然来水电量降幅达 50%，多个大型水电站水库蓄水几乎消落至死水位，造成用电紧张^[52]。珠江流域季节连旱与咸潮上溯叠加，对上游梯级电站影响较大。同年，欧洲的高温干旱也造成许多流水库的水位大幅下降，水电产量随之骤减。一旦多个地区同时遭遇高温干旱事件，通过电力输送缓解能源短缺的潜力有限^[33,53-54]。此外，气候变暖和暴雨量增加可能导致部分流域径流系数和水文变率增加，从而增加发电之外的水库弃水^[55-58]。Liu 等的研究表明未来气候变化影响下云南省电力供应将面临梯级水库弃水量增大、长历时干旱等不利影响^[17]。黄河、海河等北方流域则主要面临径流量衰减问题，发生极端枯水的概率增加，水力发电的潜力随之减少。总体而言，未来研究重点应兼顾考虑“均值”与“极值”，更深入地研究不同气候变化情景下暴雨洪水、干旱等极值事件对水力发电的影响。

5.2 高海拔地区水循环机理及演变趋势 2019年IPCC发布的《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》强调了高山冰冻圈消退对山地及下游地区径流、农业、水电、灾害等方面的影响^[59]。中国水电基地主要位于长江、黄河、澜沧江等大江大河源头区，控制流域海拔高，是全球气候变化的敏感区和预警区。区域升温幅度是全球平均升温幅度的两倍，近年来呈现冰川加速退缩、湖泊显著扩张、冰川径流增加等失衡现象，也引发了冰崩、冰湖溃决等自然灾害，多年冻土活动层加深引起蒸散发增大，未来水资源短缺的潜在风险逐步加剧^[60-62]。冰川消融短期内会造成江河径流量增加，但长期来看，随着冰川面积不断萎缩，产流区范围逐步缩小，当冰川融水拐点出现后，对河川径流的调节能力会逐渐降低，从而影响到下游水电工程的运行效率和经济效益^[63]。此外，高海拔地区暖湿化气候可能造成暴雨、山洪、崩滑流等多灾种的叠加与碰头，对水电工程形成威胁。当前，该区域水文气象监测站点密度非常小，水循环相关基础研究较为薄弱。后续研究应加强高海拔地区“天-空-地”水循环立体观测体系建设，摸清冰川、积雪、冻土、湖泊、河流等组分的变化规律及对未来气候变化的响应机制，定量评估其对下游水资源及水电工程的影响，提高缺资料地区水文分析计算成果的可靠性，提升高海拔缺氧环境下的多灾种应急处置能力。

5.3 考虑电力需求与多能互补的整体适应 气候变化还影响电力需求。例如：温度升高、高温天数增加可能导致夏季冷却降温所需的能源消耗增加和电力系统的最大负荷需求增长^[33,64]，冬季变暖则会导致取暖的能源消耗减少，电力系统传输损耗也会因气候变暖而增加。此外，一些研究认为，气候变化等因素导致的流域水循环变化可能缩短发电高峰期，引起发电峰值下降等不利情况，使得季节性供电与电力需求峰值不匹配^[30,65]。气候变暖引起的河流水温升高会影响冷却水使用，导致非水力发电厂减产^[10-11]。气候变化还对风电、太阳能光伏发电等存在影响^[66]。当前，加快构建清洁低碳安全高效的能源体系是确保如期实现“双碳”目标的重要措施之一。中国水能资源丰富，因地制宜开发水能，加快推进抽水蓄能规模化应用，提高电网对水电能源的消纳和调控能力是未来的工作重点。在此背景下更应重视气候变化影响及适应，后续研究应紧密围绕绿色低碳发展对水电能源的要求，考虑未来社会经济发展、气候变化情景及水资源变化趋势，构建水与能源的集成建模框架，综合评估气候变化对电力系统供需两侧的影响及风险，开展不同能源之间的协同互补机制研究，预估未来电力供应的脆弱性和弹性，提出电网应对气候变化的整体适应策略。

6 结语

本文阐述气候-水文-水电三者间的纽带关系，总结气候-水文变化对水力发电影响预估的技术流程、主要模型与方法，从区域与季节差异、不确定性、综合影响及适应性调控等方面分析预估结果，探讨现有研究存在的不足，并结合中国气候变化与水电行业的实际特点展望未来研究重点，得到以下结论：

(1) 相关研究已从1990年代的萌芽起步阶段步入快速发展阶段，不同空间尺度的预估结果表明：全球气候变暖对世界不同地区甚至各个国家内部水循环及水力发电的影响存在明显的区域差异；区域的GHP和DHP联系紧密，但受水电站位置分布、调节能力等客观条件影响，两者的变化趋势不完全一致；受气候变暖影响，冰川和积雪融水补给河流的径流量将出现季节性与趋势性变化。

(2) 影响预估涉及气候预估、流域水文、水电计算等多类模型，应加强不同情景的比较，通过集合预估、集成分析等手段减少预估结果的不确定性，让利益主体了解其所受影响的范围和可能性。水电站规划建设和运行调度应充分考虑气候变化影响，充分发挥水电工程在不利气候情景下提高生态流量保证率和生态系统稳定性方面的作用，以增强电网的稳定可靠性。

(3) 未来应围绕我国清洁低碳安全高效能源体系的构建需求，充分发挥水电等非化石能源在实现“双碳”目标、减缓气候变化及其影响中的作用，进一步加强水文极值事件对水力发电影响、高海拔地区水文循环机理及演变趋势等基础研究，并兼顾电力供应侧与需求侧，开展气候变化影响的综合风险预估和整体适应策略研究，提升复杂不确定环境下的应急处置能力。

参 考 文 献:

- [1] ROBINSON P J. Climate change and hydropower generation [J]. *International Journal of Climatology*, 1997, 17(9): 983–996.
- [2] MIMIKOU M A, BALTAS E A. Climate change impacts on the reliability of hydroelectric energy production [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1997, 42(5): 661–678.
- [3] HAMUDUDU B, KILLINGTVEIT A. Assessing climate change impacts on global hydropower [J]. *Energies*, 2012, 5(2): 305–322.
- [4] LIU X, TANG Q, VOISIN N, et al. Projected impacts of climate change on hydropower potential in China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(8): 3343–3359.
- [5] IPCC. *Climate Change 2014: Impact, Adaptation, and Vulnerability* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [6] SRINIVASAN S, KHOLOD N, CHATURVEDI V, et al. Water for electricity in India: A multi-model study of future challenges and linkages to climate change mitigation [J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 673–684.
- [7] SPALDING-FECHER R, CHAPMAN A, YAMBA F, et al. The vulnerability of hydropower production in the Zambezi River Basin to the impacts of climate change and irrigation development [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21(5): 721–742.
- [8] 《第四次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第四次气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2022. (The Editorial Board of the Fourth Assessment Report of China on Climate Change. The Fourth Assessment Report of China on Climate Change[M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese))
- [9] WENZ L, LEVERMANN A, AUFFHAMMER M. North-south polarization of European electricity consumption under future warming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(38): 201704339.
- [10] VAN Vliet M T, VAN Beek L P H, EISNER S, et al. Multi-model assessment of global hydropower and cooling water discharge potential under climate change [J]. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2016, 40: 156–170.
- [11] VAN Vliet M T, WIBERG D, LEDUC S, et al. Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4): 375–380.
- [12] ZHONG R, ZHAO T, HE Y, et al. Hydropower change of the water tower of Asia in 21st century: A case of the Lancang River hydropower base, upper Mekong [J]. *Energy*, 2019, 179: 685–696.
- [13] ALI S A, AADHAR S, SHAH H L, et al. Projected increase in hydropower production in India under climate change [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 12450.
- [14] TURNER S W D, NG J Y, GALELLI S. Examining global electricity supply vulnerability to climate change using a high-fidelity hydropower dam model [J]. *Sci. Total Environ.*, 2017(590/591): 663–675.
- [15] WAGNER T, THEMEBL M, SCHÜPPEL A, et al. Impacts of climate change on stream flow and hydro power generation in the Alpine region [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76: 4.
- [16] SOLAUN K, CERDÁ E. The impact of climate change on the generation of hydroelectric power—A case study in southern Spain [J]. *Energies*, 2017, 10: 1343.
- [17] LIU B, LUND J R, LIU L, et al. Climate Change Impacts on Hydropower in Yunnan, China [J]. *Water*, 2020, 12: 197.
- [18] ZHANG L, SU F, YANG D, et al. Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(15): 8500–8518.
- [19] DE Oliveira V A, DE Mello C R, VIOLA M R, et al. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(15): 5005–5023.
- [20] MAJONE B, Villa F, DEIDDA R, et al. Impact of climate change and water use policies on hydropower potential in the south-eastern Alpine region [J]. *Sci. Total Environ.*, 2016, 543: 965–980.

- [21] FENG Y, ZHOU J, MO L, et al. Long-term hydropower generation of cascade reservoirs under future climate changes in Jinsha River in Southwest China [J]. *Water*, 2018, 10: 235.
- [22] CHILKOTI V, BOLISETTI T, BALACHANDAR R. Climate change impact assessment on hydropower generation using multi-model climate ensemble [J]. *Renewable Energy*, 2017, 109: 510–517.
- [23] HARRISON G P, WHITTINGTON H B W. Susceptibility of the Batoka Gorge hydroelectric scheme to climate change [J]. *Journal of hydrology*, 2002, 264(1/4): 230–241.
- [24] 陈晓宏, 钟睿达. 气候变化对澜沧江下游梯级电站发电及生态调度的影响 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 754–764. (CHEN Xiaohong, ZHONG Ruida. Hydropower generation and ecological operation under climate change: a case study of the downstream cascade of Lancang River hydropower plants[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 754–764. (in Chinese))
- [25] LEHNER B, CZISCH G, VASSOLO S. The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 839–855.
- [26] MEHTA V K, RHEINHEIMER D E, YATES D, et al. Potential impacts on hydrology and hydropower production under climate warming of the Sierra Nevada [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2011, 2(1): 29–43.
- [27] HANASAKI N, KANAE S, OKI T. A reservoir operation scheme for global river routing models [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(1/2): 22–41.
- [28] HADDELAND I, SKAUGEN T, LETTENMAIER D P. Anthropogenic impacts on continental surface water fluxes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(8): L08406.
- [29] HADDELAND I, HEINKE J, BIEMANS H, et al. Global water resources affected by human interventions and climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3251–3256.
- [30] 李薇, 包哲, 李雾恒, 等. 基于中尺度气候模式的降水对水力发电的影响 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(3): 184–191. (LI Wei, BAO Zhe, LI Jiheng, et al. Influence of precipitation on Hydropower generation based on mesoscale climate model[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, 41(3): 184–191. (in Chinese))
- [31] KAO S C, SALE M J, ASHFAQ M, et al. Projecting changes in annual hydropower generation using regional runoff data: An assessment of the United States federal hydropower plants [J]. *Energy*, 2015, 80: 239–250.
- [32] VAN Vliet M T, VÖGELE S, RÜBBELKE D. Water constraints on European power supply under climate change: impacts on electricity prices [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 035010.
- [33] HAMLET A F, LEE S Y, MICKELSON K E B, et al. Effects of projected climate change on energy supply and demand in the Pacific Northwest and Washington State [J]. *Climatic Change*, 2010, 102(1/2): 103–128.
- [34] BERGHUIJS W R, WOODS R A, HRACHOWITZ M. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 583–586.
- [35] SU F, ZHANG L, OU T, et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 136: 82–95.
- [36] WANG H, XIAO W, WANG Y, et al. Assessment of the impact of climate change on hydropower potential in the Nanliujiang River basin of China [J]. *Energy*, 2019, 167: 950–959.
- [37] MENG Y, LIU J, LEDUC S, et al. Hydropower production benefits more from 1. 5° C than 2° C climate scenario [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(5): e2019WR025519.
- [38] SCHAEFLI B, HINGRAY B, MUSY A. Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(3): 1191–1205.
- [39] MARAN S, VOLONTERIO M, GAUDARD L. Climate change impacts on hydropower in an alpine catchment [J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, 43: 15–25.
- [40] GAUDARD L, GILLI M, ROMERIO F. Climate Change Impacts on Hydropower Management [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(15): 5143–5156.
- [41] GAUDARD L, ROMERIO F, DALLA Valle F, et al. Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian Alps [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 1211–1221.
- [42] MENDES C A B, BELUCO A, CANALES F A. Some important uncertainties related to climate change in projections for the Brazilian hydropower expansion in the Amazon [J]. *Energy*, 2017, 141: 123–138.

- [43] LUCENA A F P D, SCHAEFFER R, SZKLO A S. Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system [J]. *Global Environmental Change*, 2010, 20(2): 342-350.
- [44] TASESKA V, MARKOVSKA N, CALLAWAY J M. Evaluation of climate change impacts on energy demand [J]. *Energy*, 2012, 48(1): 88-95.
- [45] PARKINSON S C, DJILALI N. Robust response to hydro-climatic change in electricity generation planning [J]. *Climatic Change*, 2015, 130(4): 475-489.
- [46] 杨光, 郭生练, 李立平, 等. 考虑未来径流变化的丹江口水库多目标调度规则研究 [J]. *水力发电学报*, 2015, 34(12): 54-63. (YANG Guang, GUO Shenglian, LI Liping, et al. Multi-objective operation rules for Danjiangkou Reservoir under future runoff changes [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(12): 54-63. (in Chinese))
- [47] 周研来, 郭生练, 李雨, 等. 多目标调度图对气候变化的自适应研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2): 6-10. (ZHOU Yanlai, GUO Shenglian, LI Yu, et al. Multipurpose reservoir operating rule curves adapt to climate change [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science*, 2014, 42(2): 6-10. (in Chinese))
- [48] CHANG J X, WANG X Y, LI Y Y, et al. Hydropower plant operation rules optimization response to climate change [J]. *Energy*, 2018, 160: 886-897.
- [49] 丁琨, 熊珊珊, 张礼兵, 等. 气候变化条件下大型灌区小水电群优化运行研究 [J]. *水力发电学报*, 2015, 34(7): 36-44. (DING Kun, XIONG Shanshan, ZHANG Libing, et al. Study on optimal operation of small hydropower stations in large-scale irrigation districts under climate changes [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(7): 36-44. (in Chinese))
- [50] 吴书悦, 赵建世, 雷晓辉, 等. 气候变化对新安江水库调度影响与适应性对策 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36(1): 50-58. (WU Shuyue, ZHAO Jianshi, LEI Xiaohui, et al. Impacts of climate change on operation of Xin'an River reservoir and adaption strategies [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(1): 50-58. (in Chinese))
- [51] CONDON L E, ATCHLEY A L, MAXWELL R M. Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-8.
- [52] 孙昭莹, 张强, 孙蕊, 等. 2022年西南地区极端高温干旱特征及其主要影响 [J]. *干旱气象*, 2022, 40(5): 764-770. (SUN Zhaoxuan, ZHANG Qiang, SUN Rui, et al. Characteristics of the extreme high temperature and drought and their main impacts in southwestern China of 2022 [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2022, 40(5): 764-770. (in Chinese))
- [53] VAN Vliet M T H, SHEFFIELD J, WIBERG D, et al. Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11: 124021.
- [54] BARTOS M D, CHESTER M V. Impacts of climate change on electric power supply in the Western United States [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(8): 748-752.
- [55] YIN J, GENTINE P, ZHOU S, et al. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4389.
- [56] TARROJA B, AGHAKOUCHAK A, SAMUELSEN S. Quantifying climate change impacts on hydropower generation and implications on electric grid greenhouse gas emissions and operation [J]. *Energy*, 2016, 111: 295-305.
- [57] TARROJA B, FORREST K, CHIANG F, et al. Implications of hydropower variability from climate change for a future, highly-renewable electric grid in California [J]. *Applied Energy*, 2019, 237: 353-366.
- [58] 刘慧, 杨泽川, 许凤冉, 等. 澜沧江-湄公河流域干旱分析及上游水库影响 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, 18(6): 479-485. (LIU Hui, YANG Zechuan, XU Fengran, et al. Drought in Lancang-Mekong River Basin and the impact of upstream reservoirs [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-power Research*, 2020, 18(6): 479-485. (in Chinese))
- [59] IPCC. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [R/OL]. [2019-12-3]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf.
- [60] GAO J, YAO T, MASSON-DELMOTTE V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies; Nature

Publishing Group, 2019.

- [61] 王浩, 王芳, 严登华, 等. 中华水塔面临的挑战与应对战略 [J]. 中国水利水电科学研究院学报 (中英文), 2022, 20(6): 485–491. (WANG Hao, WANG Fang, YAN Denghua, et al. Challenges and coping strategies of China's Water Tower[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(6): 485–491. (in Chinese))
- [62] 王芳, 王天慈, 白雁翎, 等. 大通河降雨径流关系演变与水资源衰减初步研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(4): 361–370. (WANG Fang, WANG Tianci, BAI Yanling, et al. The relationship evolution of rainfall and runoff and preliminary study of water resource attenuation[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(4): 361–370. (in Chinese))
- [63] 丁永建, 张世强, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展 [J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 690–702. (DING Yongjian, ZHANG Shiqiang, WU Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 690–702. (in Chinese))
- [64] SATHAYE J A, DALE L L, LARSEN P H, et al. Estimating impacts of warming temperatures on California's electricity system [J]. Global Environmental Change–Human and Policy Dimensions, 2013, 23(2): 499–511.
- [65] ARIAS M E, FARINOSI F, LEE E J, et al. Impacts of climate change and deforestation on hydropower planning in the Brazilian Amazon [J]. Nature Sustainability, 2020, 3(6): 430–436.
- [66] TOBIN I, GREUELL W, JEREZ S, et al. Vulnerabilities and resilience of European power generation to 1.5 °C, 2 °C and 3 °C warming [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(4): 044024.

A review on assessment of projected impacts of hydro-climatic change on hydropower potential

LU Fan¹, YANG Shanshan², YAN Denghua¹, YUE Caiyun³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of

Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing 100053, China;

3. Tibet Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Lhasa 850000, China)

Abstract: Climate change can alter the runoff in many aspects such as the mean value, extremes, hydrological process, and available water resources, which significantly affect the hydropower planning and management. Therefore, it is of great significance to predict and evaluate the impact of climate-hydrological changes on hydropower generation in the future. This paper briefly describes the relationship between climate, hydrology and hydropower. Based on a systematic literature review, this study summarizes the methodology that used to predict hydropower development. The predicted results have been analyzed in three aspects, including regional and seasonal differences, uncertainties, comprehensive impacts and adaptive regulation. Finally, this study discusses the shortcomings of current research. The key points in future research have been explored by considering the features of climate change and hydropower industry in China. It is recommended to further strengthen basic research, including: (1) the impact of extreme hydrological events on hydropower; (2) the mechanism and evolution of water cycle in high-altitude areas; (3) under climate change, studies should focus on the comprehensive risk estimation and overall adaptation strategy with the consideration of power demand and multi-energy complementarity.

Key Words: climate warming; hydrological change; hydropower; projected impact; overall adaptation

(责任编辑: 王学风)