

气候变化对我国水资源和重大水利工程影响研究进展

秦鹏程¹ 刘敏¹ 夏智宏¹ 刘绿柳²

(1 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 2 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 全球气候变化正在改变地球水循环过程, 导致地表水资源总量和时空分布格局的改变, 从而对人类社会的水资源开发、利用和管理造成深刻影响。文中综述了国内外气候变化对水资源和水利工程影响研究方面的最新进展和认知, 分析了当前研究的不足, 指出未来需在极端水文事件及其影响、评估模型及流程规范的建立、针对性适应气候变化的应对策略等方面深化研究, 以期为推进气候变化对我国水资源和水利工程影响评估及适应气候变化的对策研究提供参考。

关键词: 气候变化, 水循环与水资源, 水文模型, 水利工程

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.06.002

Progress in Assessing the Impacts of Climate Change on China's Water Resources and Major Water Conservancy Projects

Qin Pengcheng¹, Liu Min¹, Xia Zhihong¹, Liu Lüliu²

(1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074 2 National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract: Climate change is altering the global water cycle, leading to variation in the total amount as well as the spatial and temporal distribution of surface water resources. This can exert significant impact on the development, utilization and management of water resources. We summarized the recent progress and understanding of the impacts of climate change on water resources and water conservancy projects in China and around the globe. We also identified the deficiencies of the current research and pointed out the future research directions. It is concluded that further studies should be conducted in assessing changes in hydrological extremes and their impacts, developing models, tools and technical guidelines for impact study, and identifying strategies to adapt to uncertain climate changes. It is expected to provide reference for promoting the studies on assessing climate change impacts on water resources and water conservancy projects as well as on the identification of coping strategies.

Keywords: climate change, hydrological cycle and water resources, hydrological model, water conservancy projects

0 引言

自工业革命以来, 随着大气中温室气体浓度的持续增加, 地球气候系统正经历一次以变暖为主要特征的显著变化。气候变暖通过改变水循环过程影响降水、蒸发、径流、冰川积雪等的时空分布, 进而导致地表水资源总量和时空分布格局发生改变, 并对人类社会的水资源开发、利用和管理造成深刻影响^[1-3]。在全球变暖背景下, 地球水循环的加剧导致洪涝和干旱

等极端水文事件的发生频率和强度增加, 伴随着人口增长和社会经济发展对水资源需求的增加, 未来全球水资源短缺问题将更加凸出^[4]。与此同时, 为了实现水资源的合理配置和高效利用, 人类通过广泛修建水库、大坝、堤防等工程设施, 对天然河川径流进行管理和开发, 在气候变化影响下, 水利工程设施的运行效益及其自身安全均可能受到严重影响^[5-7]。因此, 开展气候变化对水资源及其管理系统的影响评估, 尤其是未来气候变化的影响预估, 对水资源的规划管理及其可持续发展具有重要意义。

过去的几十年来, 已有许多研究致力于研究和揭示水循环要素的演变特征、气候变化对水循环过程的影响机理、气候变化对水资源系统的潜在影响以及应对气候变化的适应性管理策略等, 在研究方法、影响后果、影响机制和应对策略等方面取得了丰硕的成

收稿日期: 2021年9月15日; 修回日期: 2022年1月13日
第一作者: 秦鹏程(1986—), Email: qinpengcheng027@163.com
通信作者: 刘敏(1963—), Email: liuminccg@souhu.com
资助信息: 中国气象局软科学研究重大项目(2022ZDAXM03);
国家重点研发计划(2018YFE0196000, 2018YFC1508000)

果。文中综述气候变化对水资源和水利工程影响研究方面的最新进展和认知，讨论和展望当前研究的不足及未来研究方向，以期开展水资源评估相关研究及流域水资源的规划和管理提供参考。

1 气候变化对水资源和水利工程影响的研究方法

气候变化对水资源的影响评估是全球变化研究的重点领域之一，出于不同的研究和应用目的，学者们提出了众多指标和方法用于量化气候变化对水资源的影响，以径流为例，常用的指标如表1所示^[8]。根据气候变化影响的事实是否已经发生，可将气候变化对地表水资源的影响评估分为已发生的气候变化影响评估和未来气候变化影响预估，由于可利用的数据来源不同，二者在研究方法上有显著区别，其基本研究框架如图1所示。

表1 气候变化对地表径流影响评估常用指标^[8]
Table 1 Common indicators for assessing climate change impacts on surface runoff^[8]

指标	定义	单位
流量	单位时间内通过某一断面的水量	m ³ /s
径流量	指定时段（如年、季、月）内通过某一断面的总水量	m ³
径流深	径流总量平铺在整个流域面积上所求得的水层深度	mm
洪水总量	连续N天（如1 d、3 d、7 d等）洪水的径流总量	m ³
年最大N日洪量	一个水文年内连续N天的洪水径流量最大值	m ³
超阈值洪水强度	超过某一阈值的洪水总量	m ³
极端丰水流量	一个水文年内径流序列中95%或90%分位数对应的高流量	m ³ /s
极端枯水流量	一个水文年内径流序列中5%或10%分位数对应的低流量	m ³ /s
中等流量	一个水文年或季（月、日）径流序列的中位数	m ³ /s
洪水频率	多年内洪量等于或超过某阈值洪水的可能出现次数	次
洪水重现期	多年内等于或超过某阈值洪水可能出现的概率的倒数	a
峰现时间	洪峰出现日期	年月日
标准化径流指数	表征某时段内径流量出现概率大小的指数。假设某时段径流量序列服从Γ分布，对其正态标准化后得到的指数	无量纲

对已发生的气候变化对水资源的影响，学者们利用观测到的径流系列数据，基于随机水文学及数理统计方法（如小波分析、EMD-Hilbert变换、Mann-Kendall趋势分析等），对河川径流的演变趋势、周期变化、突变情况以及空间分异等进行检测^[11-10]；结合同时期气象观测数据和土地利用变化信息，一些学者利用灰色关联分析、弹性系数分析或水文模型等方法，开展了气候变化和人类活动对径流变化贡献率的诊断和归因分析^[11-13]。近年来，随着长序列遥感观测资料的积累，基于卫星反演的降水和蒸散发产品开展

无资料地区和大尺度水循环要素变化的监测和检测成为一种重要的研究手段^[14]。

对于未来气候变化的可能影响，多数研究遵从“未来气候情景设计—水文模拟—影响评估”的模式，利用特定的温室气体排放情景下气候模式模拟结果驱动水文水资源模型，通过比较基准时段和预估时段不同气候情景下水资源指标的变化，据此量化评估气候变化的影响^[1]。但是，基于气候模式单向驱动水文模型存在时空尺度不匹配和缺少反馈等缺点，近年来，从气候系统出发，将大尺度陆面水文模型与气候模式双向耦合成为一种新的趋势，通过对水循环整体机制的刻画，有望实现对水循环要素趋势检测、归因研究和未来预估的更加科学的认识^[4]。与此同时，基于气候情景和水文模型构建水文情势变化的情景，通过耦合水库调度和水力发电模型，为进一步开展气候变化情景下水资源管理系统的运行效益和安全风险的评估提供了可能^[15-16]。

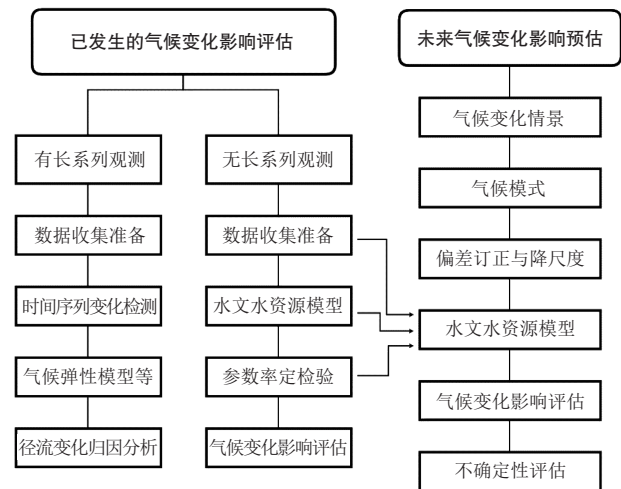


图1 气候变化对地表水资源量影响评估框架
Fig. 1 The framework for assessing climate change impacts on surface water resources

2 气候变化对地表水资源影响的最新认知

2.1 气候变化对全球水循环和水资源的影响

20世纪中期以来，随着全球气温升高，全球水文循环明显加强^[14, 17-18]。观测到的全球尺度水汽、降水、蒸散发、冰川积雪、土壤水和地表径流等的分布、强度和极值都发生了显著变化^[3, 14, 19-23]。全球对流层和地表水汽含量呈增加趋势，近40年来全球大气水汽含量上升了3.5%左右^[24]。陆地降水的变化趋势不显著，但区域差异极大，中高纬度极端降水事件明显增加^[3, 22, 24]。全球地表蒸散发在20世纪中后期呈下降趋势，但近20年来呈显著增加趋势，2003—2019年，全球陆地蒸散

量增加 $(10 \pm 2)\%$ ^[14]，地表湿度增加趋势减缓，全球海洋蒸发与降水的差值在20世纪中期以来呈增加趋势^[24-25]。全球冰冻圈普遍退缩，极地冰盖和山地冰川不断融化，北极地区6月积雪面积在1967—2018年间平均每10年减少 $(13.4 \pm 5.4)\%$ ，9月海冰范围在1978—2018年间平均每10年减少 $(12.8 \pm 2.3)\%$ ^[26]。与此同时，全球主要河流在年平均径流量、枯水期低流量和极端洪水方面均发生了一定变化。世界前200条河流中约1/3的河流年径流量有明显的变化趋势，其中45条呈下降趋势，19条呈增加趋势，在季节性积雪区域，冬季径流增加、夏季径流减少，春季最大径流量的日期有所提前^[25]。在大洋洲南部、非洲南部、欧洲南部、南美洲东部、北美洲的西部和东部地表径流总体呈减少趋势，而在南美洲大部、欧洲中北部和北美洲中部地表径流呈增加趋势，亚洲、非洲和大洋洲的大部径流变化不显著^[19]。然而，观测到的径流变化不同程度的受到人类活动（如取用水、水利工程调节、土地利用改变等）的共同影响，有相当大部分流域径流变化的主要驱动力是人类活动^[19, 27]，气候变化只是径流变化的主导因子之一。另外，部分区域径流变化存在阶段性和突变现象，在突变前呈下降趋势，突变后呈增加趋势。

基于不同的社会经济发展和温室气体排放情景假设，模拟显示全球平均气温在未来相当长一段时间内仍将继续升高^[28]。伴随着气温的进一步升高，预计21世纪全球冰川消退、多年冻土融化、积雪面积和北极海冰范围减小的趋势仍将持续^[26]，随着冰川萎缩，冰川供水能力下降，水资源波动将加大。同时，全球陆地潜在蒸散发极有可能呈增加趋势^[3, 25, 29]。全球陆地降水在21世纪总体有不同程度增加，且高排放情景增幅更明显，但时空分布的不均匀性加剧^[30-31]，基于最新的第六次国际耦合模式比较计划第6阶段（CMIP6）预估结果与先前的CMIP5预估结果趋势一致，且信度更高、幅度更大^[28-29, 32-34]。由于地表潜在蒸散发和降水的不同程度变化以及全球增温和降水变化的区域响应差异，未来全球地表径流的变化呈现明显的区域差异。基于CMIP5模式的预估显示，即使在高排放情景（RCP8.5）下，全球平均气温较当前增加 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，仅北半球高纬度地区和非洲东部地表径流呈增加趋势，全球其他大部地区径流减少，同时，干旱的发生频率和强度将有明显增加，全球水资源短缺加剧^[35]。进一步的分析表明，随着全球地表温度的升高，流域尺度地表径流的变化并非呈线性的趋势变化，当气温增加至某一阈值时，径流变化趋势可能出现反转^[36]。最新

的CMIP6多模式集合预估的21世纪地表径流变化格局与CMIP5基本一致，但径流增加的幅度略有增加，且欧洲和亚洲北部径流增加的区域有所扩大^[29]。同时，CMIP5和CMIP6模式预估的干旱和洪涝等极端水文事件发生频率、持续时间和强度均呈显著增加趋势，且局部区域变化更剧烈，这意味着未来水资源有效性下降、不稳定性增加^[22, 29, 34-35, 37-39]。

2.2 气候变化对中国区域水资源的影响

中国区域水循环的变化符合全球水循环变化的特征，同时具有更复杂的区域特征^[24, 40]。自20世纪60年代以来，在气候变暖影响下，中国冰川整体呈现加速退缩和消融之势，内部不稳定加剧；中国融雪径流在西北地区尤其是新疆天山和阿尔泰山地区呈显著增加趋势，东北地区以减少为主，青藏高原有增有减或变化不显著，同时，融雪径流的集中期一致向前推移；中国多年冻土在过去几十年退化明显，多年冻土区大部分流域冬季径流增加^[41]。在全球气候变化和人类活动的共同影响下，中国主要河流径流量已观测到不同程度的趋势性变化，但呈现明显的区域差异。对20世纪50年代以来中国主要河流年径流量变化趋势及其成因的综合分析表明^[42]，近70年来，中国北方河流年径流量除西北诸河外，大部以下降趋势为主，其中以松花江、辽河、海河、黄河尤为显著，大部河流年径流量在1970年代或1980年代存在显著突变，突变前呈增加趋势，之后为下降趋势，这可能是由于人类活动影响加剧所致；南方流域年径流量无显著趋势变化，但年代际变化较大，20世纪60—80年代和21世纪的前10年径流量以偏少为主，20世纪90年代和近10年以偏多为主。气候变化对南方流域年径流影响较北方显著，其中长江上游干流气候变化影响超过70%，珠江流域气候变化与人类活动影响大致相当，北方流域第二松花江、辽河、海河、黄河、淮河年径流变化的成因中人类活动的影响大于气候变化，其中黄河中游人类活动影响超过75%。子流域尺度径流变化的驱动力与大尺度流域存在一定区域差异，北方大部分三级流域的年径流变化趋势和主要驱动力与一级流域一致，南方长江上中游和西南诸河的多数三级流域年径流变化主要驱动力与一级流域基本一致（图2）。

预估显示，21世纪中国降水总体呈增加趋势，且北方地区增幅大于南方^[33]，与此同时，受气温升高影响，地表潜在蒸散发显著增加。在中国北方流域，由于地表蒸散发的增长总体小于降水的增幅，地表径流主要呈增加趋势，在中国南方流域，由于降水增加幅度小，而蒸散发增加幅度较大，地表径流增加不明显

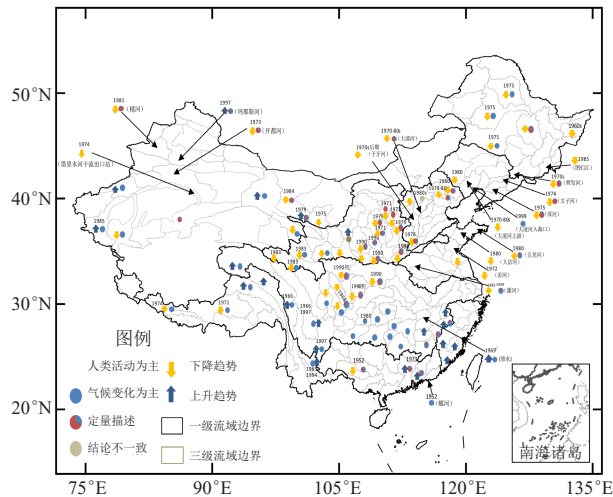


图2 中国三级流域1950s以来年径流变化趋势、突变时间及其主要驱动力^[42]

(注: 相邻三级流域单元面积小且结论一致时共用一个标注)
Fig. 2 Annual runoff variation trend, abrupt change time and its primary driving forces in the third level water resource zones in China since 1950s (If consistent conclusions are found in neighboring third-level zones, one set of markers including arrow, pie and timing of abrupt change are used. If different conclusions are found in a large third-level zone, more than one set of markers are used)

甚至有减少趋势^[43-44]。其中, 在长江上游和西南高原地区, 由于降水增加幅度相对较大, 以及高山融雪径流的增加, 地表径流呈显著增加趋势^[45-46], 但长江中下游地区由于降水变化不明显或有所减少, 在21世纪的近期地表径流呈减少趋势, 21世纪中期以后可能呈现增加趋势^[43]。东南诸河流域和珠江流域21世纪径流变化总体呈下降趋势^[43, 47]。然而, 研究显示, CMIP5模式对东亚夏季风强度的模拟存在偏差, 可能低估了中国东南部季风区的降水量, 最新的CMIP6情景下未来中国东南部季风区降水的增加幅度有所增加, 预估径流可能呈增加趋势^[32-33, 37, 48]。因此, 目前对中国南方流域21世纪径流变化的预估还存在较大的不确定性, 尤其是对21世纪的近期径流减少趋势及其幅度的预估, 很大程度受气候模式对中国东部季风区降水趋势模拟不确定性的影响, 而中国北方地区预估径流持续增加的不确定性相对较小, 但现有的水文模型对中国冰川融水径流模拟能力欠佳, 可能低估了21世纪后期冰川融水径流下降对地表径流变化趋势的影响^[45, 49]。与此同时, 尽管预估的年径流量有所增加, 但较强的季节性变化以及极端径流的增加对水资源的综合利用仍具有较大的挑战性^[50-51]。

3 气候变化对水利工程影响的最新认知

3.1 气候变化对全球水利工程的影响

水库、大坝和堤防等水利工程设施是人类通过改变天然河道径流的不均匀分布, 合理开发和利用水资源的重要途径, 通常具有防洪、供水、发电、航运和改善生态环境等综合效益^[52-55]。据统计, 全球有超过半数的河流受到人类工程设施的调控和管理^[56-57]。然而, 由于气候变化导致全球水循环的改变, 引起河川径流在时间和空间上的重新分配以及总量的变化, 水利工程设施的运行及其效益正在受到气候变化的深刻影响。借助于全球气候模式、水文模型以及水库调度模拟技术, 最近的20年来已经出现了许多关于气候变化对水利工程影响评估的研究报道。

水库大坝通过蓄泄调节进行兴利调度, 对上游来水总量及其时间分布十分敏感。预估的气候变化可能导致全球河流径流量增加, 这将有助于水库蓄水和供水效益的发挥^[5, 58-59], 但径流季节分布的变化对水库调度和效益的影响更大。在全球典型区域的研究显示, 美国大部河流径流的季节分布在未来气候变化情景下将发生显著变化, 呈现出丰水期高流量增加、枯水期低流量减少的趋势^[59], 这导致水库在丰水期的防洪调度和枯水季节的供水调节能力加强, 水库的季节调节效益显著提高^[60]。在印度北部贝阿斯河流域, 尽管气候变化可能导致水库来水增加, 但时间变率显著增加, 水库系统的不稳定性和脆弱性增加^[58]。在中国长江上游, 气候变化导致径流在年内各月均有不同程度增加, 使水库的供水和发电效益提高, 水库在枯水季节对下游河段自然流量和生态平衡的影响减弱, 但汛期洪水风险和防洪调度压力显著增加^[5, 61]。

生产清洁水电是大部分水库的重要功能之一, 全球水力发电量约占总发电量的1/5, 对保障能源安全和碳减排起着关键作用^[55]。全球气候变化可能通过影响河流的径流资源以及用电需求直接或间接影响水力发电量。在全球尺度, van Vliet等^[62]和Turner等^[63]综合评估了气候变化对全球大型水电站21世纪发电量的影响, 尽管预估未来全球平均发电量变化不明显, 但在特定区域呈现显著的增加或减少趋势。一些研究也通过更加具体的模型开展了国家和区域尺度气候变化对水电生产的影响预估, 如美国^[64-65], 加拿大^[66], 印度^[67], 中国^[68-70]和欧洲国家等^[71-72]。值得注意的是, 气候变化对水电生产的影响同时受到流域水库系统调节库容和调度管理方式的制约, 许多研究揭示了在未来气候变化情景下由于极端径流增加, 水库防洪调度职能加强, 导致弃水增加, 水资源利用率下

降, 发电量对径流变化的响应呈现出非线性的特征(图3)^[5, 63, 73]。此外, 一些学者同时研究了气候变化对用电需求和水电供应之间供需平衡的影响, 揭示了气

候变化对电力投资、电网系统稳定性以及温室气体排放的潜在影响^[16, 56, 74-76]。

近年来, 气候变化导致的水文情势变化对水库

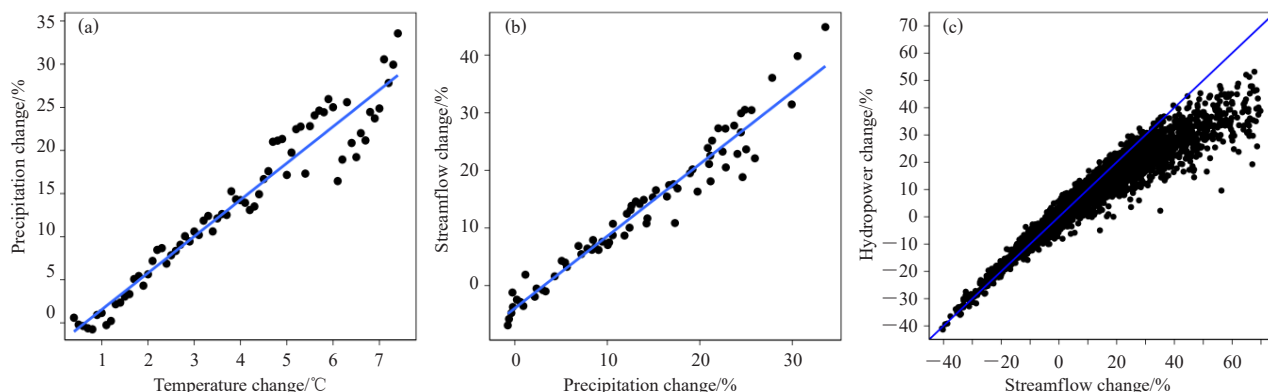


图3 长江上游流域水资源系统对气候变化的响应

(a) 降水对增温的响应, (b) 径流对降水变化的响应, (c) 发电量对径流变化的响应

Fig. 3 Responses of water resource systems to climate change

(a) precipitation response to temperature change, (b) streamflow response to precipitation change, and (c) hydropower generation response to streamflow change

运行和安全可能造成的影响正逐渐引起学者和流域管理部门的关注。Fluixá-Sanmartín等^[7]从大坝风险的不同组成部分系统综述了气候变化对大坝安全的可能影响, 为开展大坝对气候变化的脆弱性评估提供了技术导则, 并以西班牙托玛思河上游的一个大坝为例, 定量评估了气候变化导致的溃坝风险变化, 揭示了气候变化导致入库径流改变造成大坝溃坝风险显著提高的现象^[77]。2017年2月位于美国加州北部的奥罗维尔水坝, 在经历了持续5年的严重干旱后因遭遇暴风雨和融雪洪水, 主溢洪道泄洪时出现严重损坏引发溃坝风险, 造成了严重的社会经济损失和人员伤亡, 该事故为极端气候影响下大坝的安全管理敲响了警钟^[6]。随后, Mallakpour等^[6, 15]系统评估了加州地区主要大坝和堤防设施在未来气候变化情景下面临的洪水风险和遭受破坏的可能性, 结果表明, 当前百年一遇的洪水在未来发生的可能性将增加5倍以上, 未来加州地区水利基础设施因极端洪水而遭受破坏的风险显著, 水利设施的运行和维护成本显著增加。然而, 有关气候变化对全球其他地区水利工程设施运行安全影响的案例研究十分有限。

3.2 气候变化对中国水利工程的影响

中国水资源丰富, 但时空分布极不均匀, 且与经济社会发展格局不相适应^[4], 水利工程建设规模和数量位居世界前列, 拥有南水北调、黄河小浪底、长江三峡、溪洛渡与白鹤滩等世界级水利水电工程, 在水资源管理和防洪减灾中发挥着重要作用, 同时, 水力

发电量占全世界水电总量的1/4^[78]。在气候变化情景下, 中国水利工程设施运行的水文条件将发生显著变化, 势必对其运行管理和效益的发挥造成一定影响。

南水北调工程是我国南北方水资源优化配置的战略工程, 东线从长江下游调水至天津和胶东半岛, 中线从长江中游调水至河南、河北、北京、天津, 西线计划从长江上游调水至黄河上游。由于水源区和受水区地理空间上跨度大, 且处于不同的气候区, 工程效益与南北区域气候条件及其年际间的波动密切相关, 并可能受到气候变化的潜在影响^[79]。研究显示, 20世纪以来, 中线工程水源区与受水区同枯概率处于近500年来高位^[80], 东线和中线工程运行以来, 可调出水量与需求量处于紧平衡状态。在未来气候变化情景下, 南水北调工程水源区和受水区降水均不同程度增加, 约80%的年份对调水有正面的影响。但未来降水变率增加, 干旱和暴雨洪涝事件增多, 径流季节分布的不均匀性和年际间变化加剧, 导致汛期洪水风险和枯水季节断流风险增加, 水资源有效性下降。尤其是21世纪中期以前, 东线和中线水源区降水增加幅度较小, 但年际间变异显著增加, 水源区干旱事件将明显增加, 部分年份极端缺水的程度和持续时间可能加剧, 从而对供水安全造成严重的负面影响^[81]。21世纪中后期降水增幅较大, 水源区和受水区存在同涝的风险, 这可能增加工程的防洪压力以及地质灾害的发生。

长江上游以三峡水库为核心的大型控制性水库

群，是开发和治理长江的关键性骨干工程，具有防洪、发电、船运和供水等巨大的综合效益^[82-84]。气候变化对长江上游水利工程设施的运行安全及其效益的潜在影响已经受到了相关学者和流域管理部门的广泛关注。已有的多数研究表明^[61, 85-86]，未来气候变化对长江上游水库供水和发电总体有正面的影响，预估的未来长江上游年径流量及各月平均径流均有增加趋势，21世纪中期约增加2.0%~4.7%，21世纪末约增加10.7%~16.0%，但流域内气候变化存在明显空间差异，金沙江和岷沱江子流域径流增加幅度均大于流域平均值，乌江流域在21世纪中期以前径流呈减少趋势。流域内大部分水库来水增加，尤其是汛前期和汛后期，与此同时，洪水发生频率和洪量明显增加，当前百年一遇的洪水在未来的发生频率可能增加2~5倍，超标准洪水出现的概率也显著增加。受来水增加影响，未来大部分水库的发电量增加，21世纪中期约增加4.0%~8.4%，21世纪末约增加6.0%~13.2%，发电保证率有所提高，但弃水率显著增加，在21世纪末期发电量年际变化略有增加。在未来气候变化情景下，水库的季节调节功能在汛期增强，在枯水季节减弱，水库在汛期防洪中的作用将更加突出，而在枯水季节对下游河段自然流量和生态平衡的影响减弱^[61]。这些结果表明，流域内的水资源和发电潜力在未来气候情景下将有所增加，这将有助于提高水库在维持供水、生态平衡和可再生能源生产方面的效率。与此同时，气候变化情景下不断增加的洪水风险将增加水库调度的难度，为应对极端洪水可能需要新增额外的库容，现行水库运行规则，特别是水库汛期维持防洪库容和其他服务之间的平衡需要重新设计。

有关气候变化对中国其它区域水利设施影响的研究相对较少，Liu等^[68]基于CMIP5预估结果，评估了气候变化对21世纪中国水能理论蕴藏量和已开发水电的影响，表明21世纪前半叶和后半叶中国水能理论蕴藏量较当前分别变化-1.7%~2%和3%~6%，已开发水电发电量分别变化-5.4%~-2.2%和-4%~-1.3%，其中中国北部水能理论蕴藏量未来呈增加趋势，南部地区呈下降趋势，而中国当前已开发水电主要集中在南方地区，因此已开发水电受气候变化的影响以不利为主。Wang等^[87]基于5个CMIP5模式预估表明，西南地区南流江流域水能理论蕴藏量在未来30年呈增加趋势。由于上述研究使用的气候模式预估结果与最新的CMIP6预估结果在部分区域存在较大差异，对水能影响的预估结果存在较大的不确定性。然而，对中国其他流域如黄河、珠江、淮河和松辽流域以及长江中下

游地区的水库、堤防和蓄滞洪区等水利设施可能受到气候变化影响的认识仍十分有限。此外，中小河流堤防和中小型水库由于设计标准较低、距人口聚居区近，对气候变化可能更脆弱，近年来我国中小河流洪水及其次生灾害占比越来越高，亟需对其开展系统的评估^[88]。

4 研究不足与展望

4.1 极端水文事件及其影响的研究有待加强

纵观国内外已有的研究，对水资源总量及发电潜力影响的研究较多，取得的结论一致性较高，对极端水文事件变化规律及其影响的研究相对较少，认知的不确定性更大，且以定性结论为主。然而，多数气候模式预估未来中国地区和全球极端降水、干旱事件的频率和强度均呈增加趋势^[3, 89]，而水资源系统对径流季节分布的变化及洪水、干旱等极端水文事件尤其敏感。深入开展未来极端水文事件发生频率和强度变化及其对水资源系统的影响研究，对未来水资源管理和水利工程设施的安全运营极其重要。为此，未来需进一步提高气候模式对极端气候事件的模拟能力及水文模型对极端径流的模拟能力，增强极端水文事件气候变化预估能力及其不确定性的认识；另一方面，需深化极端径流对水资源系统和防洪体系影响的研究，尤其是典型流域超标准洪水风险变化及中小河流洪水对水利基础设施和防洪安全的影响评估；最后，还需关注极端水文事件尤其是复合型灾害事件（如高温和干旱并发）对电力能源系统可能造成的影响，为“双碳”目标的实现提供科学支撑。

4.2 气候变化影响评估模型和规范有待完善

数值模拟是开展未来气候变化影响评估和探索有关适应措施的重要手段。然而，由于地球气候系统内部反馈、水文循环过程以及流域水资源管理的复杂性，当前在气候模式、水文模型、水资源管理系统模型构建及其耦合方面仍存在一定的不足和局限性^[90-92]，致使研究结果存在较大的不确定性，严重制约了对气候变化影响的认识以及适应策略的制订，未来需进一步发展和完善气候变化影响评估的模型工具。在气候模式及其降尺度技术方面提升对降水时间分布和极值的模拟效果；在水循环过程模拟方面，发展考虑自然和人为因素影响与反馈的水文模型，提高对融雪过程和极端径流模拟能力及对降水空间分布差异的响应能力；在水资源系统模拟方面，提高对工程设施调度过程刻画精细程度和模拟的时间分辨率，增加考虑用水、用电需求约束，并在适应策略研究中有效结合决策支持系统。此外，鉴于开展气候变化对水资源影响

评估的多学科属性和广泛存在的不确定性,亟需从数据、模型的选取、不确定性度量及结果解读方面建立相关的技术流程和规范,从而促进气候变化影响评估成果在科研、业务和决策管理中的规范化使用。

4.3 适应气候变化的应对策略研究有待深化

尽管大量研究已经揭示了气候变化对全球水资源及其管理系统的潜在影响,有关适应气候变化的水资源管理策略研究仍较薄弱,尤其是受不同地区气候变化特点、水利设施水平和社会经济系统对水资源需求差异的影响,决定了适应气候变化的水资源管理策略具有鲜明的地域特色。中国水利设施和水资源管理体系异常复杂,同时要面对季风气候影响下艰巨的防洪任务和日益加剧的洪水风险,适应气候变化的应对策略十分必要和迫切^[93]。未来需进一步深化气候变化情景下水资源适应性管理对策的理论和方法研究,基于水资源系统模拟与优化理论,综合评估现有水利基础设施适应气候变化的潜力及其脆弱性,加强部门合作研究,从工程措施和非工程措施多方面探索适应未来气候条件下防洪安全和水资源综合利用的管理措施,从制度、模式及保障途径方面提出应对气候变化风险、保障水资源和水利工程运行安全的适应性政策建议。

参考文献

- 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的影响研究综述.地理科学,2013,33:457-464.
- 王顺久.全球气候变化对水文与水资源的影响.气候变化研究进展,2006,2(5):223-227.
- Douville H, Raghavan K, Renwick J, et al. Water cycle changes// IPCC. Climate Change 2021: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- 夏军,刘春霖,任国玉.气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战.地球科学进展,2011,26(1):1-12.
- Qin P C, Xu H M, Liu M, et al. Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation. Journal of Hydrology, 2020, 580: 123922.
- Mallakpour I, AghaKouchak A, Sadegh M. Climate - induced changes in the risk of hydrological failure of major dams in California. Geophysical Research Letters, 2019, 46(4): 2130-2139.
- Fluixá-Sanmartín J, Altarejos-García L, Morales-Torres A, et al. Review article: climate change impacts on dam safety. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(9): 2471-2488.
- 郭玉静,李春晖,刘绿柳.气候变化对水资源影响预估常用指标.气候变化研究进展,2021,17(4):496-502.
- Zhang Q, Liu C L, Xu C Y, et al. Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China. Journal of Hydrology, 2006, 324(1-4): 255-265.
- Do H X, Westra S, Leonard M. A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow. Journal of Hydrology, 2017, 552: 28-43.
- Zheng H X, Zhang L, Zhu R R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River basin. Water Resources Research, 2009, 45(7): 641-648.
- 夏智宏,刘敏,王苗,等.1990s以来气候变化和人类活动对洪河流域径流影响的定量辨识.湖泊科学,2014,26(4):515-521.
- Xu J, Chen Y, Lu F, et al. The Nonlinear trend of runoff and its response to climate change in the Aksu River, western China. International Journal of Climatology, 2011, 31(5): 687-695.
- Pascolini-Campbell M, Reager J T, Chandanpurkar H A, et al. A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019. Nature, 2021, 593(7860): 543-547.
- Mallakpour I, Sadegh M, AghaKouchak A. Changes in the exposure of California's Levee-Protected critical infrastructure to flooding hazard in a warming climate. Environmental Research Letters, 2020, 15: 064032.
- Qin P C, Xu H M, Liu M, et al. Assessing concurrent effects of climate change on hydropower supply, electricity demand, and greenhouse gas emissions in the Upper Yangtze River basin of China. Applied Energy, 2020, 279: 115694.
- Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources. Science, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- Immerzeel W W, Beek L P H, van Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- Gudmundsson L, Boulange J, Do H, et al. Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. Science, 2021, 371: 1159-1162.
- Winsemius H C, Aerts Jeroen C J H, van Beek Ludovicus P H, et al. Global drivers of future river flood risk. Nature Climate Change, 2015, 6: 381.
- Mallakpour I, Villarini G. The changing nature of flooding across the central United States. Nature Climate Change, 2015, 5: 250.
- Yin J B, Gentile P, Zhou S, et al. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes. Nature Communications, 2018, 9. DOI: 10.1038/s41467-018-06765-2.
- Wang Y J, Qin D H. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: an overview. Advances in Climate Change Research, 2017, 8(4): 268-278.
- 姜彤,孙赫敏,李修仓,等.气候变化对水文循环的影响.气象,2020,46(3):289-300.
- 翟建青,占明锦,苏布达,等.对IPCC第五次评估报告中有关淡水资源相关结论的解读.气候变化研究进展,2014,10(4):240-245.
- 王朋岭,黄磊,巢清尘,等. IPCC SROCC的主要结论和启示.气候变化研究进展,2020,16(2):133-142.
- 黄斌斌,郝成元,李若男,等.气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展.自然资源学报,2018,33(5):899-910.
- IPCC. Special report on global warming of 1.5°C. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- Cook B I, Mankin J S, Marvel K, et al. Twenty-First century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. Earth's Future, 2020, 8(6): e2019EF001461.
- Zhang W, Zhou T, Zhang L, et al. Future Intensification of the water cycle with an enhanced annual cycle over global land monsoon regions. Journal of Climate, 2019, 32: 5437-5452.
- Giuntoli I, Vidal J P, Prudhomme C, et al. Future hydrological extremes: the uncertainty from multiple global climate and global hydrological models. Earth System Dynamics, 2015, 6(1): 267-285.
- Chen Z, Zhou T, Zhang L, et al. Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 projections. Geophysical Research Letters, 2020, 47(14): e2019GL086902.
- Tian J, Zhang Z, Ahmed Z, et al. Projections of precipitation over China based on CMIP6 models. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35(4): 831-848.
- Zhao T, Dai A. CMIP6 model-projected hydroclimatic and drought changes and their causes in the 21st century. Journal of Climate, 2022: 1-58.
- Schewe J, Heinke J, Gerten D, et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(9): 3245-3250.

- [36] Zhang X J, Tang, Q H, Liu X C, et al. Nonlinearity of runoff response to global mean temperature change over major global river basins. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(12): 6109-6116.
- [37] Ukkola A M, De Kauwe M G, Roderick M L, et al. Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(11): e2020GL087820.
- [38] Asadih B, Krakauer N Y. Global change in streamflow extremes under climate change over the 21st century. *Hydrology and Earth System Sciences Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(11): 5863-5874.
- [39] De Luca P, Messori G, Wilby RL, et al. Concurrent wet and dry hydrological extremes at the global scale. *Earth System Dynamics*, 2019: 1-24.
- [40] 王国庆, 张建云, 章四龙. 全球气候变化对中国淡水资源及其脆弱性影响研究综述. *水资源与水工程学报*, 2005(2): 7-10, 15.
- [41] 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. *水科学进展*, 2020, 31(5): 68-80.
- [42] Liu L L, Du J J. Documented changes in annual runoff and attribution since the 1950s within selected rivers in China. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 8(1): 37-47.
- [43] Chen Z, Lei H, Yang H, et al. Historical and future trends in wetting and drying in 291 catchments across China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 21(4): 2233-2248.
- [44] Xu H M, Liu L L, Wang Y, et al. Assessment of climate change impact and difference on the river runoff in four basins in China under 1.5 and 2.0°C global warming. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(10): 4219-4231.
- [45] 刘苏峡, 丁文浩, 莫兴国, 等. 澜沧江和怒江流域的气候变化及其对径流的影响. *气候变化研究进展*, 2017, 13(4): 356-365.
- [46] 秦鹏程, 刘敏, 杜良敏, 等. 气候变化对长江上游径流影响预估. *气候变化研究进展*, 2019, 15(4): 405-415.
- [47] 段青云, 徐宗学, 等. 未来水文气候情景预估及不确定性分析与量化. 北京: 科学出版社, 2017: 338.
- [48] Zhu X, Ji Z, Wen X, et al. Historical and projected climate change over three major river basins in China from Fifth and Sixth Coupled Model Intercomparison Project models. *International Journal of Climatology*, 2021: 1-19.
- [49] 丁永建, 赵求东, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文未来变化及其对干旱区水安全的影响. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 23-32.
- [50] Gu H, Yu Z, Yang C, et al. Projected changes in hydrological extremes in the Yangtze River basin with an ensemble of regional climate simulations. *Water*, 2018, 10(9): 1279.
- [51] Wen S, Su B, Wang Y, et al. Comprehensive evaluation of hydrological models for climate change impact assessment in the Upper Yangtze River basin, China. *Climatic Change*, 2020, 163(3): 1207-1226.
- [52] Boulange J, Hanasaki N, Yamazaki D, et al. Role of dams in reducing global flood exposure under climate change. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 417.
- [53] Ho M, Lall U, Allaire M, et al. The future role of dams in the United States of America. *Water Resources Research*, 2017, 53(2): 982-998.
- [54] Niu X. Key technologies of the hydraulic structures of the Three Gorges project. *Engineering*, 2016, 2(3): 340-349.
- [55] Berga L. The role of hydropower in climate change mitigation and adaptation: a review. *Engineering*, 2016, 2(3): 313-318.
- [56] Giuliani M, Anghileri D, Castelletti A, et al. Large storage operations under climate change: expanding uncertainties and evolving tradeoffs. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(3): 035009.
- [57] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, 308(5720): 405-408.
- [58] Soundharajan B S, Adeloje A J, Remesan R. Evaluating the variability in surface water reservoir planning characteristics during climate change impacts assessment. *Journal of Hydrology* 2016, 538: 625-639.
- [59] Naz B S, Kao S C, Ashfaq M, et al. Effects of climate change on streamflow extremes and implications for reservoir inflow in the United States. *Journal of Hydrology*, 2018, 556: 359-370.
- [60] Ehsani N, Vörösmarty C J, Fekete B M, et al. Reservoir operations under climate change: storage capacity options to mitigate risk. *Journal of Hydrology*, 2017, 555: 435-446.
- [61] Qin P C, Xu H M, Liu M, et al. Projected impacts of climate change on major dams in the Upper Yangtze River basin. *Climatic Change*, 2022, DOI: 10.1007/s10584-021-03303-w.
- [62] van Vliet M T H, Wiberg D, Leduc S, et al. Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 375.
- [63] Turner S W D, Ng J Y, Galelli S. Examining global electricity supply vulnerability to climate change using a high-fidelity hydropower dam model. *Science of The Total Environment*, 2017, 590-591: 663-675.
- [64] 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. *Energy*, 2015, 80: 239-250.
- [65] Bartos M D, Chester M V. Impacts of climate change on electric power supply in the Western United States. *Nature Climate Change*, 2015, 5(8): 748.
- [66] Minville M, Brissette F, Krau S, et al. Adaptation to climate change in the management of a canadian water-resources system exploited for hydropower. *Water Resources Management*, 2009, 23(14): 2965-2986.
- [67] Ali S A, Aadhar S, Shah H L, et al. Projected Increase in hydropower production in India under climate change. *Scientific Reports*, 2018, 8: 12450.
- [68] Liu X C, Tang Q H, Voisin N, et al. Projected impacts of climate change on hydropower potential in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(8): 3343-3359.
- [69] Fan J L, Hu J W, Zhang X, et al. Impacts of climate change on hydropower generation in China. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2018, 167: 4-18.
- [70] 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. *Energy*, 2019, 179: 685-696.
- [71] Gaudard L, Romerio F, Dalla Valle F, et al. Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian Alps. *Science of The Total Environment*, 2014, 493: 1211-1221.
- [72] Höltinger S, Mikovits C, Schmidt J, et al. The impact of climatic extreme events on the feasibility of fully renewable power systems: a case study for Sweden. *Energy*, 2019, 178: 695-713.
- [73] Tarroja B, Aghakouchak A, Samuelsen S. Quantifying climate change impacts on hydropower generation and implications on electric grid greenhouse gas emissions and operation. *Energy*, 2016, 111: 295-305.
- [74] Turner S W D, Hejazi M, Kim S H, et al. Climate impacts on hydropower and consequences for global electricity supply investment needs. *Energy*, 2017, 141: 2081-2090.
- [75] Turner S W D, Voisin N, Fazio J, et al. Compound climate events transform electrical power shortfall risk in the Pacific Northwest. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 8.
- [76] Tarroja B, Forrest K, Chiang F, et al. Implications of hydropower variability from climate change for a future, highly-renewable electric grid in California. *Applied Energy*, 2019, 237: 353-366.
- [77] Fluixá-Sanmartín J, Morales-Torres A, Escuder-Bueno I, et al. Quantification of climate change impact on dam failure risk under hydrological scenarios: a case study from a Spanish dam. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19: 2117-2139.
- [78] Li X Z, Chen Z J, Fan X C, et al. Hydropower development situation and prospects in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 232-239.
- [79] 陈锋, 谢正辉. 气候变化对南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇的影响. *气候与环境研究*, 2012, 17(2): 139-148.
- [80] 方思达, 刘敏, 任永建. 南水北调中线工程水源区和受水区旱涝特征及风险预估. *水土保持通报*, 2018, 38(6): 269-273.

- [81] 徐影, 赵宗慈, 高学杰, 等. 南水北调东线工程流域未来气候变化预估. 气候变化研究进展, 2005, 1(4): 176-178.
- [82] Li H, Liu P, Guo S, et al. Climatic control of upper Yangtze River flood hazard diminished by reservoir groups. Environmental Research Letters, 2020, 15(12): 124013.
- [83] Hu H, Yang K, Sharma A, et al. Assessment of water and energy scarcity, security and sustainability into the future for the Three Gorges Reservoir using an ensemble of RCMs. Journal of Hydrology, 2020, 586(4): 124893.
- [84] Zhou Y, Guo S, Chang F J, et al. Boosting hydropower output of mega cascade reservoirs using an evolutionary algorithm with successive approximation. Applied Energy, 2018, 228: 1726-1739.
- [85] Zhang Y, Gu A, Lu H, et al. Hydropower generation vulnerability in the Yangtze River in China under climate change scenarios: analysis based on the WEAP model. Sustainability, 2017, 9(11): 2085.
- [86] Zhong W, Guo J, Chen L, et al. Future hydropower generation prediction of large-scale reservoirs in the upper Yangtze River basin under climate change. Journal of Hydrology, 2020, 588(11): 125013.
- [87] Wang H J, Xiao W H, Wang Y C, et al. Assessment of the impact of climate change on hydropower potential in the Nanliujiang River basin of China. Energy, 2019, 167: 950-959.
- [88] 杜士强, 温家洪. 从2020年汛期灾情看我国洪涝风险管理的挑战与建议. 中国防汛抗旱, 2020, 17: 12-15.
- [89] Merz B, Blöschl G, Vorogushyn S, et al. Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(9): 1-18.
- [90] Woldemeskel F M, Sharma A, Sivakumar B, et al. A framework to quantify GCM uncertainties for use in impact assessment studies. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1453-1465.
- [91] Yao F M, Qin P C, Zhang J H, et al. Uncertainties in assessing the effect of climate change on agriculture using model simulation and uncertainty processing methods. Chinese Science Bulletin, 2011, 56: 729-737.
- [92] Krysanova V, Hattermann F F, Kundzewicz Z W. How evaluation of hydrological models influences results of climate impact assessment: an editorial. Climatic Change, 2020, 163(3): 1121-1141.
- [93] 夏军, 陈进, 王纲胜, 等. 从2020年长江上游洪水看流域防洪对策. 地球科学进展, 2021, 36(1): 1-8.