

气候变化背景下水库防洪能力动态评估与适应性管理

闫莉莉

建昌县水利事务服务中心，辽宁葫芦岛，125300；

摘要：在气候变迁引发极端降水现象频繁出现且强度提升的情形下，传统基于历史水文序列的静态水库防洪能力评估方式面临巨大挑战。本文的意图是创建一个动态评估与适应性管理的体系，剖析了气候变化对流域水文状况的关键作用；论述了结合气候模式与水文模型、考量非平稳性序列的防洪能力动态评估方法体系；制定了包括工程与非工程方法的、适应未来不确定性风险的韧性管理举措。只有转变至动态、前瞻性的评估与管理样式，方可保证水库在未来气候状况下的长期安全与功效，维护流域防洪的安全性。

关键词：气候变化；水库防洪；动态评估；非平稳性；适应性管理

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.025

引言

水库作为调节水资源、防范洪涝灾害的关键设施，其防洪能力的规划与运作长期依靠历史观测数据构建的水文频率分析。全球气候的变化正极大地改变着地球的水文循环状况，致使降水的时空分布出现不均衡现象、极端暴雨洪水事件的发生概率与强度显著提升，让过去相对稳定的水文序列呈现出显著的“非平稳性”特征。在这样的情形下，若依旧采用静态的、依据过往气候条件的评估准则与管理举措，极有可能大幅高估或低估水库的实际防洪风险，甚至诱发灾难性后果。怎样以科学动态的方式评估气候变化对水库防洪能力产生的影响，并且拟定具备前瞻性与适应性的管理策略，已成为水资源与防洪安全领域急需攻克的重大难题。本文将从作用机制、测评手段与管控策略三个维度，全面探究水库防洪能力的动态评价与适应性管理途径。

1 气候变化对水库防洪能力的影响机理

气候变化借助改变流域的水文气象因子，从多个方面直接或间接地影响着水库既有的防洪功能与安全边界。

1.1 对入库洪水特性的直接影响

气候变暖明显强化大气的持水能力与对流现象，造成极端降水在强度、频次和持续时段上呈现整体增长趋向，这造成水库所在流域的设计暴雨模式产生结构性转变。具体呈现为短时间强降雨现象增多、雨带停留时间变长，进而或许显著拉高洪峰流量、拉长洪峰历时，并

且极大提高极端洪水出现概率。基于历史数据的既有设计洪水标准（如百年一遇、千年一遇）或许会被频繁打破，水库现有的防洪库容与泄洪设施正经受着前所未有的挑战，防洪安全隐患不断积聚。

1.2 对流域下垫面与水循环过程的间接影响

气候变化引发植被覆盖变动、冰川积雪快速融化、土地覆被调整以及人类活动干预，共同重塑流域产汇流的机制。冰川湖决堤风险增加或许会导致突发性的特大洪水；干旱化或者城市化造成下渗能力降低，继而影响径流系数以及洪水形成流程。这些间接作用致使洪水预报的不确定性明显增大，传统水文模型的适用程度下降，进而极大地加剧了水库防洪调度的复杂性与决策的难度，对实时预警与自适应调控提出了更严格的要求。

1.3 对水库工程安全与调度运行的长期胁迫

愈发频繁的高水位洪水运行状况，不断加重对大坝主体、泄洪建筑物以及下游消能设施的冲刷磨损与疲劳损害，危及工程长期耐久性与结构稳定性，极端气象事件（像风暴、滑坡）可能会直接损毁大坝或附属设施^[1]。在调度运营环节，因气候变化引发的旱涝快速转换、丰枯剧烈变化，让防洪与兴利（如供水、发电、生态）之间的冲突愈发突出，传统静态的调度规则难以适应动态化的气候场景，急需朝着弹性化、智能化调度模式转型。

2 水库防洪能力的动态评估方法体系

为克服非平稳性挑战，要构建一套整合多源信息、着眼未来的动态评估方法，以科学测定气候变化下的水

库防洪风险。

2.1 基于气候—水文耦合模型的未來情景模拟

该方法的关键在于搭建“全球气候模式—区域降尺度—流域水文模型”的完整耦合体系。通过选取多个全球气候模式在各类温室气体排放情景（如 SSP1 - 2.6、SSP5 - 8.5）下的模拟数据，运用统计或动力降尺度手段将其转变为流域尺度的未来气象要素（如降水、气温）时间序列数据。这些高分辨率数据随即带动经过严谨率定与验证的分布式水文模型，达成对未来长期水文过程的连贯模拟，可从模拟结果当中提取洪峰、洪量及过程线等关键洪水特征序列，给后续洪水风险评估和防洪规划提供坚实的数据根基。这一链条全面考量了气候变化的不确定性以及水文响应的空间异质性，是开展系统性防洪适应性分析必不可少的前提。

2.2 考虑非平稳性的水文频率分析与设计洪水修订

针对气候变化情形下日益凸显的非平稳洪水序列，以往基于平稳假设的频率分析手段已无法适用，应当引入非平稳水文频率分析理论^[2]。该方法利用构建时间或气候协变量（像全球平均温度、大气 CO₂ 浓度）与洪水分布参数（像均值、标准差、偏态系数）之间的函数联系，创建时变概率分布模型，以此描述洪水统计特征随时间的演变规律。依托此模型，可推算未来不同阶段（如 2050 年前后）的动态设计洪水值，并非单一恒定值，这为科学修正水库防洪设计标准（如校核洪水位、泄洪设施能力）提供了关键支撑，助力工程在变化环境下的长期稳定运行与风险管控。

2.3 防洪能力的多指标综合风险评估

动态评估应突破单一设计洪水位的局限，转入多指标综合风险评估体系。评价指标往往包含：防洪标准的达标比率（也就是未来情景里设计洪水位超出的概率）、泄洪设施的安全裕度（最大泄洪能力和可能出现的洪峰之间的差值）、防洪库容的充足比例，以及在极端情景之下的漫坝或者溃坝的概率等。利用蒙特卡洛模拟等途径，可对不同气候情景以及水文模型不确定性之下的风险演变过程进行量化，制作风险概率分布图谱。经过综合研判，能够找出水库防洪体系里的薄弱之处（像泄洪能力欠佳、库容有限等）以及高风险时期，为有针对性地采取加固、调度调整或非工程举措提供决策参考，增

强系统应对未来极端洪水的本领。

3 面向气候适应的水库防洪韧性管理策略

评估的终极意图是引领管理实践，适应性管理主张从静止的、以工程准则为关键的管理，过渡到聚焦提升系统韧性的动态管理。

3.1 工程措施的适应性加固与升级

依据长期监测、安全鉴定和动态风险评估所反映的工程弱项，针对经综合评定存在显著防洪能力欠缺或结构安全问题的水库，应在深度论证的基础上，慎重谋划并开展有针对性的工程改造，此类改造意在全面性地增强工程的物理防护能力与运转稳定性，其具体细则需按照短板之处精准谋划^[3]。普遍的改造趋向也许包含：为应对更高规格的设计洪水标准而合理加高大坝坝体或增配防浪墙；针对泄洪能力不够的情形，通过增添非常溢洪道、新建或拓宽泄洪隧洞来强化超标准洪水的下泄能力；对下游已出现冲刷毁坏或消能欠缺的消能工程、护岸和海漫等实施全面稳固与修补；以及对陈旧破损、自动化水平欠佳的闸门及启闭机系统开展更新改造，增强其操作稳定性、控制精准度与远程自动化程度。

这些工程措施的推行，并非零散的技术方案叠加，而是要历经严谨的筛选与全面性论证。论证过程应全方位权衡改造举措的技术可操作性、对既有工程结构的作用、施工阶段的安全度汛规划、环境效应以及全生命周期的成本收益。其核心目的是让改造后的水库整体工程系统，能够真正顺应因水文资料系列延长、气候变化也或流域下垫面变动而重新校准并可能提升的洪水设计标准。利用这种精准聚焦的工程革新，可从系统层面弥补原有设计瑕疵或长期运转带来的损耗，进而在物理层面夯实工程安全壁垒，确保水库在未来更严峻的水文条件下依旧拥有足够的防洪安全保障能力。

3.2 调度规则的动态优化与智能预演

为应对渐趋突出的气候变化不确定性，有必要对水库现有的防洪调度规程开展系统性的修订与升级。修订的重点在于将未来气候变化的可能状况（例如极端降水频率与强度的上扬）以及多时间尺度的预报数据，正式、体系化地纳入调度决策的考量范畴。这表明调度管理从主要依靠历史水文统计规律的“事后响应”模式，转变为融入未来预测信息的“事前预判与主动适应”模式，

为达成这一目的,要全力推进集成“预报、预警、预演、预案”的“四预”智慧调度体系建设,为科学决策提供有力的技术手段支撑。

智慧调度系统应深度融汇实时雨水情监测与高精度短期天气预测,做到洪水过程的滚动测报与风险提早预警,以此支撑汛期的精准化、动态化调度工作。更具决定性的是,系统应创建基于中长期气候预报与多种来水状况的水库调度预演模块^[4]。借助大量的情景模拟与方案甄选,事先制订并不断改进一个针对不同风险等级(如不同预见期、不同量级洪水)的适应性调度规则库,能够在确保防洪安全的基础上,探究推行考虑降雨预报的动态汛限水位管控策略,在洪水预见期间提前排洪、在预见期过后及时蓄洪。这种动态统筹防洪安全与蓄水兴利的调度模式,意在转变以往相对刻板的水位调控模式,在风险能够把控的情况下,科学、积极地运用雨洪资源,最大程度实现洪水资源的安全转变与高效运用。

3.3 流域协同与风险分担的韧性管理

增强防洪韧性需突破对单个水库的独立强化,进而从整个流域系统的层面实施整体性建设。这需要强化流域内全部水库、水闸等水利设施的联合防洪调配,借助构建统一的信息共享平台与协商决策体系,达成上下游、干支流水库群在洪水拦挡、错峰、补偿调节等方面的协同行动与风险共担。需要坚守“工程措施与非工程措施相结合”的综合性策略,在工程范畴,应将水库调度和流域内蓄滞洪区的科学谋划与适时运用相结合,并且持续开展骨干河道的系统治理与堤防达标打造,进而构建起水库拦蓄、蓄滞洪区分洪、河道泄排相融合的立体防洪工程体系。

搭建全面的社会防洪韧性体系,需要非工程措施的深度融入与支撑。这涵盖拟定并持续优化针对超标准洪水或极端情形的流域级应急处置预案,明晰不同危险情形下的预警传达、工程调控、人员撤离、应急救援等全流程应对举措。极其关键之处在于,要依据精准化的溃坝洪水模拟与洪水风险图,按期组织开展跨部门、跨区域的应急演练,特别是受威胁区域中社区的避险转移实战演练^[5]。借助反复操练与常态化宣传普及,能够切实提高基层社区、企事业单位等社会承灾体对洪水风险的认识,强化其自主预警、敏捷反应、自救互救的实际能

力与集体行动效能。依靠工程体系与社会体系的紧密融合和能力共筑,才可达成从物理防御至社会适应的整体跃升,搭建起具备高度适应性与恢复力的全流域防洪韧性体系。

4 总结

气候变化正重塑着水文极值事件的出现规律,给水库这一关键防洪设施带来了系统性难题,坚守静态的评估与管理方式已不合适。本文全面探讨了气候变化对水库防洪产生影响的内在原理,构建了依托气候-水文耦合模拟、非平稳频率分析和综合风险评估的动态评估方法体系,并进一步从工程加固、智能调度和流域协同三个维度阐明了适应性管理策略。未来水库防洪安全管理工作,必定是一个整合动态评估、实时监控、弹性调控和风险防范的持续适应进程。这促使管理者、科研人员与决策部门协同合作,把具有前瞻性的气候风险意识融入规划、设计、运营和应急的整个生命周期,进而在充满不确定性的气候未来里,切实守住水安全底线。

参考文献

- [1] 匡洋,李浩,夏军,等. 气候变化对跨境水资源影响的适应性评估与管理框架[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(1):10.
- [2] 王欣妍,王辰星,张英男,等. 基于“潜力-连通度-韧性”的粤港澳大湾区城市群生态风险适应能力评估与提升策略[J]. 生态学报, 2025, 45(7):3047-3061.
- [3] 黄晓军,王博,刘萌萌,等. 社会-生态系统恢复力研究进展——基于 CiteSpace 的文献计量分析[J]. 生态学报, 2019, 39(8).
- [4] YAN Meng, DU Erhu, WANG Zongzhi, 等. 行为经济与自然过程耦合视角下的水资源复杂系统建模研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6):8.
- [5] 华晨,高雅清,李咏华. 生态韧性导向下的城市绿色雨水基础设施规划研究——理论框架与技术路径[J]. 建筑与文化, 2022(2):3. 5.

作者简介: 闫莉莉(1982.08-),女,汉族,辽宁建昌人,本科,副高级职称,研究方向:水利工程建设或水库运行管理。