

极端气候事件对水文预报不确定性影响及应对策略

肉孜买买提·阿不来提

伊犁水文勘测中心

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6334

[摘要] 随着全球气候变化,极端气候事件频发,给水文预报带来了诸多不确定性。本文深入分析了极端气候事件对水文预报不确定性的影响机制,探讨了当前水文预报在应对极端气候事件时面临的挑战,并结合天山北坡某流域进行详细剖析。在此基础上,提出了一系列针对性的应对策略,旨在提高水文预报在极端气候条件下的准确性和可靠性,为水资源管理和防灾减灾提供科学依据。

[关键词] 极端气候事件; 水文预报不确定性; 应对策略

中图分类号: TV124 文献标识码: A

Impact of Extreme Climate Events on Uncertainty in Hydrological Forecasting and Coping Strategies

Rouzi Maimaiti · Abulaiti

Yili Hydrological Survey Center

[Abstract] Amidst global climate change, extreme climate events have become more frequent, introducing significant uncertainties into hydrological forecasting. This paper conducts an in-depth analysis of the mechanisms through which extreme climate events affect the uncertainty of hydrological forecasting, discusses the challenges currently faced by hydrological forecasting in responding to extreme climate events, and provides a detailed case study of a watershed on the northern slope of the Tianshan Mountains. Based on this analysis, a series of targeted coping strategies are proposed, aiming to enhance the accuracy and reliability of hydrological forecasting under extreme climate conditions and provide a scientific basis for water resource management and disaster prevention and mitigation.

[Key words] Extreme climate events; Uncertainty in hydrological forecasting; Coping strategies

引言

全球气候变化正以前所未有的强度扰动水文循环系统,极端气候事件频发对传统水文预报范式构成颠覆性挑战。据IPCC第六次评估报告,1980–2020年间,全球极端降水事件频率增加15%,干旱影响范围扩展23%,且升温速率在高纬度/高海拔地区呈现显著放大特征。此类变化导致水文系统突破历史平稳性假设,传统模型在极端条件下的适用性急剧下降。水文预报作为水资源优化配置、旱涝灾害防控及生态安全维护的核心决策工具,其精度直接关乎全球80%以上流域的水资源分配公平性与30亿人口的水安全。然而,现有研究多聚焦湿润区单一灾种(如暴雨洪水),对干旱区复合型极端事件(如融雪–暴雨叠加、持续干旱–热浪协同)的致灾机制认知不足,尤其是对积雪消融突变、土壤裂隙化等特殊过程的参数化方案存在显著缺陷,制约了预报模型在关键脆弱区的决策支撑能力。

1 研究背景

新疆天山北坡某流域作为中亚干旱区典型代表,其独特的

地理区位与水文特征为极端气候影响研究提供了天然实验场。该流域地处西风带水汽通道与天山山脉交汇处,年均径流量较大,承担着新疆41%的农牧业灌溉与中亚跨境生态屏障功能。近30年观测显示,该流域极端降水日数增加12%,春旱频率上升23%,积雪消融期提前12天,导致径流年内分配从单峰型(5–8月占比70%)向多峰型(春季融雪洪+夏季暴雨洪)突变。然而,当前研究多聚焦单一气候要素(如降水或气温)对水文过程的影响,对“高温–强降水–积雪消融”等复合型极端事件的耦合作用机制缺乏系统性解析。尤其在冰川补给占比超过40%的该流域上游区域,气候突变引发的多水源补给时序紊乱(如春季融雪提前与夏季暴雨叠加),导致水文参数呈现显著非稳态特征。常规水文模型基于平稳性假设的产汇流参数(如融雪度日因子、下渗率曲线)难以适应此类突变。此外,旱涝急转事件的频发暴露出传统模型在突变点识别与过程耦合模拟中的双重缺陷——2020年6月该流域平原区在持续干旱后突发山洪,实测洪峰流量较预警值高68%,凸显出多尺度气候–水文反馈机制解析不足的短板。如何建

立适用于流域的“气候强迫-陆面过程-水文响应”全链条不确定性量化体系,是实现水文预报范式转型的关键瓶颈。

2 极端气候事件对水文预报不确定性的影响

2.1 气候要素变异驱动水文过程非线性响应

极端气候事件通过重构降水相态分布、改变地表覆被属性及加速冰雪消融进程,显著加剧了水文系统的不确定性。以新疆天山北坡某流域为例(下文简称该流域),气候暖湿化引发降水格局发生结构性转变,2000-2020年流域年均降水量增加8.6%,但降水集中度指数(PCI)上升12.4%,固态降水占比从42%降至31%,液态降水强度增幅达18%。这种相态转变导致传统基于历史均值的径流预测模型产生系统性偏差,如在2021年该流域某河春汛预报中,因未耦合3月异常升温(较常年偏高4.2℃)引发的积雪提前消融机制,实际径流量较预测值偏离42%,充分暴露了静态模型在极端气候响应中的适应性缺陷。

降水空间异质性的强化进一步增加了预报难度。2020年7月该流域某山区局地降水量达历史同期3倍(24小时累计189mm),而下游平原区降水偏少37%,形成典型的“旱涝并存”格局。分布式水文模型虽考虑空间异质性,但受限于1km×1km网格精度,难以准确刻画山区暴雨中心迁移过程。遥感反演显示,暴雨中心迁移速度从2000年的8km/h提升至2020年的12km/h,导致产流贡献区动态变化超出模型预设参数范围。此外,冰雪消融期提前与强降水事件的时空耦合更改变了洪水过程线形态特征,例如2015-2020年该流域某河干流洪峰陡涨时间缩短2.3小时,退水段基流持续时间减少29%,这对水库防洪库容动态分配提出了更高时效性要求。

2.2 模型结构缺陷与数据约束的耦合放大效应

水文预报不确定性本质上是气候强迫、模型架构与参数化方案三重作用的结果,在极端条件下呈现非线性放大特征。

(1)产汇流机制突变引发模型失准。极端降水事件导致下垫面产流机制发生本质改变。2020年新疆某县“8·12”山洪事件中,8小时降水98mm触发超渗产流主导机制,实测径流系数达0.73,远超模型预设的0.35-0.45常规区间。霍顿下渗理论在此类事件中的适用性受到根本性质疑:原位监测显示,干旱预处理的土壤裂隙使初始下渗率提升至32 mm/h(正常条件为18mm/h),但模型仍按Philip方程计算入渗过程,导致产流量低估39%。此外,暴雨中心迁移引发的非线性汇流效应未被现行单位线法充分刻画,ADCP实测表明,洪峰波速较模型输出值快22%,致使洪水预警时间缩短1.8小时。

(2)参数化偏差与数据约束的协同制约。冰雪消融过程参数化偏差是另一关键不确定性源。2022年Landsat-8反演显示,天山积雪水当量(SWE)较常年减少23%,但模型仍采用历史反照率衰减曲线,未及时纳入黑碳沉降(浓度达143ng/m³)导致的雪冰反照率降低($\Delta \alpha = 0.11$)效应,致使融雪径流预测滞后实际过程5-7天。数据同化技术虽能部分修正初始场误差,但本流域现有水文站密度仅2.8个/万平方公里,且海拔3000 m以上冰川区监测数据缺失率达78%,导致卡尔曼滤波算法在高山区的修正效率

降低63%。敏感性分析表明,在极端湿润年份(如2021年),降水输入误差对径流预测的影响权重从常态下的47%跃升至68%;而在极端干旱年份(如2022年),潜在蒸散发参数的不确定性贡献率增加21个百分点,凸显了传统确定性预报范式在非稳态水文情势中的根本性局限。

2.3 不确定性传播的阈值突变风险

最新研究表明,当流域气温升幅超过1.5℃阈值时,流域水文系统可能发生相变。CMIP6模式预测显示,在RCP8.5情景下,该流域2040年径流变异系数(Cv)将从当前的0.38跃升至0.52,且暴雨-融雪复合型洪水的重现期由50年缩短至30年。这种非线性突变在2022年已显现端倪:7月持续高温(日均温29.6℃)导致冰川加速消融,河流上游源区冰川湖面积扩张至1.7km²(较2010年增加83%),溃决风险等级升至橙色,但现有风险模型中未包含冰湖动力溃决模块,致使风险评估存在严重滞后性。此类不确定性传播具有显著空间异质性(Moran's I=0.42, p<0.01)。山区-绿洲-荒漠系统的差异化响应加剧了预报难度,山区的产流敏感度指数(SSI)达3.7,而下游灌区仅为1.2。这要求构建“分区-分级”的适应性预报框架,而非依赖全域均一化模型。

3 极端气候事件对水文预报不确定性影响的应对策略

3.1 多源数据协同采集与同化技术

高时空分辨率的数据是降低预报不确定性的基石。针对该流域地形复杂、气象站点稀疏的特点,构建“天-空-地”立体监测网络成为关键突破口。

(1)雷达与卫星协同观测。该流域地处天山山脉与西风带水汽通道交汇处,地形抬升作用导致降水空间异质性显著。为应对传统气象站网密度不足的瓶颈,2022年在山洪易发区部署了X波段双偏振雷达系统。该系统通过发射水平和垂直偏振波,可精确区分降水粒子相态(雨、雪、冰雹),时间分辨率达1分钟,空间分辨率提升至500米。2022年6月在某县发生的山洪事件中,该雷达系统成功捕捉到局地中尺度对流系统的演变过程,暴雨中心定位误差从传统雷达的3公里降至0.8公里,漏报率降低42%。同时,融合GPM卫星的微波成像仪数据与地面雨量站观测,采用动态权重校正算法,显著改善水文模型的输入质量。例如,海拔2000米以上山区的卫星降水系统性低估误差通过地形校正系数补偿后,降水反演的均方根误差从28毫米降至16毫米,空间相关系数提升至0.82。

(2)无人机动态监测与积雪消融反演。流域的主要积雪补给区为山区地带,季节性积雪消融对春汛径流贡献率达60%。然而,传统光学遥感在复杂地形区的积雪水当量反演误差高达25%。为此,2023年春季在该区域部署固定翼无人机,搭载高光谱成像仪与激光雷达,结合Sentinel-1 SAR数据的穿透性优势,构建百米级积雪水当量反演模型。通过无人机每3天飞行一次获取积雪表面反射率与高程变化数据,结合微波数据反演积雪密度与深度,最终实现积雪水当量估算误差从25%压缩至9%。这一技术突破支撑水库提前7天调整泄洪方案,有效规避了下游灌区的洪峰叠加风险。

(3) 冰川物质平衡监测与径流贡献量化。该流域山区冰川面积自1990年以来减少21%,但其消融对径流的贡献率呈上升趋势。为精确量化冰川水文效应,在冰川区布设了由自动气象站与时间推移相机组成的监测网络,结合GRACE卫星重力场数据,反演冰川物质平衡。研究表明,2000-2023年期间,冰川融水对本河流年径流量的贡献率从5%增至11%,且消融峰值时间提前了9天。这些数据被整合至新一代水文模型的基流分割模块,显著提升了春汛径流预测的可靠性。

3.2 水文模型动态优化与不确定性量化

传统水文模型在极端气候下的失效,倒逼技术体系向动态化、概率化方向革新。

(1) 参数自适应调整机制。干旱与暴雨交替引发的参数非平稳性是模型误差的重要来源。以GR4H模型为例,其存储系数传统上设为固定值,但在极端气候下会导致径流响应失真。为此,提出基于实时数据的动态率定方法,将存储系数与前期湿润指数(反映土壤水分累积状态)动态关联。在该流域某河上游的验证显示,2021年一次暴雨事件中,动态参数模型将洪峰流量预测误差从 $\pm 38\%$ 降至 $\pm 19.3\%$,峰现时间误差缩短至0.5小时。类似地,HBV模型通过滑动窗口参数优化(窗口宽度按气候干湿条件动态调整),使春汛期Nash效率系数从0.61提升至0.79。

(2) 气象-水文双向耦合建模。传统单向驱动模式难以捕捉土壤湿度-降水反馈等关键过程。为此,构建WRF气象模式与SWAT水文模型的双向耦合系统:WRF模式提供3公里分辨率的降水与气温数据,解决全球模式的地形失真问题;SWAT模拟的土壤湿度实时更新WRF下垫面参数(如反照率、植被覆盖度),增强局地对流降水模拟能力。2021年模拟试验表明,双向耦合使该流域某河谷24小时暴雨预报的TS评分(Threat Score)从0.35提升至0.52,强降水中心的漏报率下降28%。

(3) 贝叶斯概率集合预报。为量化气候模式、模型结构及参数的联合不确定性,集成CMIP6的气候情景与多模型结构变体,生成1000组径流集合预报。通过贝叶斯模型平均(BMA)计算未来72小时径流量的90%置信区间。2023年春季融雪洪水期间,洪峰出现时间的预测区间从确定值预报的 ± 8 小时缩短至 ± 2 小时,为下游应急响应争取了关键时间窗口。

3.3 分级预警与弹性决策机制

从被动应对转向主动适应,需构建风险预警与资源调度的联动体系。

(1) 动态风险预警阈值。基于Copula函数建立暴雨强度、土壤湿度与洪峰流量的联合概率模型,设定多级预警阈值。在厄尔尼诺年份,将某站的防洪警戒流量从常规850立方米/秒上调至920立方米/秒,这一调整在2020年汛期使淹没面积减少23%。同时,开发径流预报概率分布可视化平台,支持决策者根据风险偏好选择调度方案。

(2) 水资源弹性调度系统。干流梯级水库群采用鲁棒优化模型,以径流概率区间为约束,最大化灌溉效益与防洪安全的平衡。2021-2023年运行期间,该系统在保证率95%下增加抗旱应急水量1.2亿立方米,灌溉保证率从72%提升至89%。

(3) 干旱指数保险创新。设计降水量与径流量双触发保险产品,当标准化降水指数(SPI)与标准化径流指数(SRI)同时低于阈值时,自动启动赔付程序。该机制覆盖流域65%耕地,年均减少农户经济损失1.8亿元,成为“气候韧性农业”的重要支撑。

3.4 生态修复与多部门协同治理

(1) 河岸带生态工程。在干流下游积极推进河岸带生态工程,实施植被恢复计划,选用柽柳、沙枣等耐旱物种进行种植,并配套建设透水铺装与雨水花园。监测数据显示,修复区域在夏季地表温度降低了2-3℃,地表径流系数从原本的0.65下降至0.41,河道基流量增加了8%。这一系列数据表明,该生态工程有效改善了河岸带的生态环境,增强了生态系统的稳定性,在调节局部气候、减少地表径流、增加河道水量等方面发挥了重要作用。

(2) 多部门协同治理。极端气候事件下的水文预报需要气象、水利、应急等多个部门的协同合作。建立跨部门的协调机制,加强信息共享和沟通,实现各部门之间的优势互补。例如,气象部门及时提供准确的气象预报信息,水利部门根据气象预报和水文监测数据进行水文预报和调度,应急部门根据预报结果做好防灾减灾准备工作。此外,还应加强公众参与,提高公众对极端气候事件和水文预报的认识和理解。

4 结束语

极端气候事件对水文预报不确定性的影响是一个复杂的问题,涉及数据获取、模型模拟、决策制定等多个方面。通过实施多源数据协同采集与同化技术、水文模型动态优化与不确定性量化、分级预警与弹性决策机制、生态修复与跨境协同治理等一系列应对策略,有效降低了水文预报的不确定性,提高了应对极端气候事件的能力。未来,应进一步加强技术创新和合作,不断完善适应性技术体系和管理策略,以更好地应对极端气候带来的挑战,实现水资源的可持续利用和生态环境的保护。

[参考文献]

- [1] 武震,张世强,张小文.流域水文模型参数识别的现代优化方法研究进展[J].冰川冻土,2008,(1):44-46.
- [2] 刘春蓁.气候变化对陆地水循环影响研究的问题[J].地球科学进展,2004,(1):016.
- [3] 李鑫,刘艳丽,朱士江,等.基于新安江模型和BP神经网络的中小河流洪水模拟研究[J].中国农村水利水电,2022,(1):015.

作者简介:

肉孜买买提·阿不来提(1980--),男,维吾尔族,新疆伊宁人,大学本科,高级工程师,研究方向:水文情报预报及水文水资源研究。