气候变化背景下区域水文极端事件演变趋势分析

蒲海汪洋 张峻豪

长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6367

[摘要] 在全球气候变化加剧的背景下,极端水文事件频发,给水资源管理和生态安全带来严峻挑战。本研究聚焦区域尺度上洪水、干旱等极端水文事件的演变特征及驱动机制,选取长江、黄河中下游典型流域,融合气象、水文与遥感数据,分析近30年极端降水与径流变化规律,并结合统计与模型模拟方法,揭示气候变化与人类活动的影响路径及贡献度。研究提出风险评估框架与适应性管理策略,旨在为区域水资源调度、灾害防控及政策制定提供科学支撑,尤其对我国北方干旱区与南方易涝区的精准防灾具有重要意义。

[关键词] 水资源管理; 水文极端事件; 水文

中图分类号: TV213 文献标识码: A

Analysis of the Evolution Trend of Regional Hydrological Extreme Events under the Background of Climate Change

Haiwangyang Pu Junhao Zhang

Hydrological Bureau of the Yangtze River Water Resources Commission, Hydrological and Water Resources Survey Bureau of the Upper Reaches of the Yangtze River

[Abstract] Against the backdrop of intensified global climate change, extreme hydrological events occur frequently, posing severe challenges to water resource management and ecological security. This study focuses on the evolution characteristics and driving mechanisms of extreme hydrological events such as floods and droughts at the regional scale. Typical watersheds in the middle and lower reaches of the Yangtze River and Yellow River are selected, and meteorological, hydrological, and remote sensing data are integrated to analyze the patterns of extreme precipitation and runoff changes in the past 30 years. Statistical and modeling simulation methods are used to reveal the impact paths and contributions of climate change and human activities. The research proposes a risk assessment framework and adaptive management strategy, aiming to provide scientific support for regional water resource allocation, disaster prevention and control, and policy formulation, especially for precise disaster prevention in arid areas in northern China and flood prone areas in southern China.

[Key words] water resources management; Hydrological extreme events; hydrology

1 前言

水文极端事件是指在特定时空范围内,由于自然或人为因素引发的水文过程显著偏离正常状态的现象,通常包括洪水、干旱、暴雨引发的山洪以及沿海风暴潮等类型,具有突发性强、持续时间短、影响范围广等特点。近年来,受全球气候变化和人类活动加剧的影响,这类事件的发生频率与强度显著上升,给生态系统和社会经济发展带来严峻挑战。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,极端降水事件在全球多地增强,部分区域干旱的发生频率和持续时间也明显增加。例如,2021年德国与比利时特大洪水造成超200人死亡、经济损失逾200亿欧元,2022年中国长江流域严重干旱则导致农业减产与

水电发电能力下降。这些事件表明其高度破坏性及对社会适应能力的挑战。从水文学角度看,其发生受气候、地形、土地利用及水资源管理等多重因素影响,其中降水是关键驱动因子。

2 水文极端事件类型与识别

2.1 洪水事件特征

洪水是典型的水文极端事件,常由强降水、融雪、冰川消退或堤坝溃决引发,具有突发性强、持续时间短、影响范围广、破坏力大等特点。例如2021年河南特大暴雨引发严重内涝,造成重大损失。统计上,洪水具极值分布特征,常用年最大值法(AMS)或超阈值法(POT)分析。其时空异质性明显,南方多季节性洪水,山区易发山洪。水文学中,洪水通过流量过程线和峰值流量描述,

分别反映规模与强度,是工程设计和防洪调度的重要依据。近年来,遥感技术和数值模拟手段的发展,结合卫星与地面数据,提升了流域淹没监测精度与时效性。

2.2 干旱事件识别

干旱是一类成因复杂的水文极端事件,通常由降水减少、气温升高、蒸发加剧及水资源调配失衡等因素共同作用形成。相比突发的洪水,干旱具有渐进性和隐蔽性,持续时间长,可达数月甚至数年,造成农业减产、生态退化和饮水困难等后果。常用的干旱识别指标包括标准化降水指数(SPI)、帕尔默干旱指数(PDSI)和综合气象干旱指数(CI),其中SPI因适用于多时间尺度评估而被广泛使用。研究显示,过去50年全球多地干旱频率和强度上升,尤其在地中海沿岸、撒哈拉以南非洲和南亚地区,这与气候变化引起的温度上升和降水模式变化密切相关。遥感技术的发展提高了干旱识别效率和精度,通过植被指数(NDVI)和地表温度反演数据可有效反映土壤水分状况,辅助干旱等级划分。

2.3 其他极端水文事件

除洪水和干旱外,山洪泥石流、风暴潮以及冰雪灾害等复合型极端水文事件同样具有突发性强、致灾性高和连锁反应明显等特点,对社会经济与生态环境造成多重威胁。这类事件通常由高强度降雨、陡峭地形和低植被覆盖等多种自然因素叠加触发,导致地质灾害与强烈水文响应同步发生。同时,随着气候变暖,极端降雪及春季快速融雪引发的春汛也日益频繁。当前,对极端水文事件的识别已不再局限于传统水文监测网络,而是结合遥感技术、地理信息系统(GIS)与大数据分析,构建多源信息融合的动态追踪体系,以提升预警能力,增强风险防控,并为科学应对策略提供支撑^[1]。

3 水文过程响应机制

3.1 降水-径流关系

降水是水文循环中最基本的驱动力之一,其与径流之间的关系直接决定了流域内的水资源分布和极端水文事件的发生频率。在自然条件下,降水量、降水强度以及降水历时共同决定了地表径流的生成过程。例如,在中国长江流域,研究表明年均降水量的变化与年径流量之间存在显著的正相关关系,特别是在夏季暴雨频发的情况下,短时强降雨往往会导致河流水位迅速上升,从而引发洪水。不同地貌条件下的降水-径流响应速度也存在明显差异,如黄土高原地区由于地形破碎、植被覆盖率低,降水转化为径流的速度远快于东南丘陵地区。这种差异不仅影响了区域水资源的可利用性,也在一定程度上加剧了极端水文事件的区域性特征。

3.2 土地利用影响

土地利用变化对水文过程的影响已成为当前水文学研究的重点领域之一。城市化进程加快导致不透水面比例增加,这使得雨水下渗能力减弱,地表径流量显著上升,进而改变了传统的水文响应模式。以北京市为例,过去30年间城市建成区面积扩大了近三倍,相应的地表径流量增加了约40%。因此农业用地的扩张和森林砍伐也会通过改变地表粗糙度和土壤结构来影响径流路

径和汇流时间。例如,在云南红河流域,大规模的橡胶林种植改变了原有的森林生态系统,导致雨季初期的地表径流形成时间提前,并伴随更大的洪峰流量。这些变化不仅对区域水资源管理构成挑战,也增加了洪水风险,因此在制定水文管理策略时需充分考虑土地利用格局的变化趋势。

3.3 下垫面变化效应

下垫面作为大气与陆地水文过程的连接界面,其地形、地质构造、土壤类型及植被覆盖等物理特性显著影响降水入渗、地表产流与地下水流。地形起伏决定降水空间分配与径流路径,山地坡度大使降水易形成快速地表径流,平原则易出现滞留水并延长排水时间。喀斯特地貌因裂隙发育,促进降水快速入渗,减少地表径流量。土壤类型影响水分储存与渗透速度,粘性土持水性强但渗透慢,易积水;沙质土反之,利于排水。植被通过截留、蒸散发和固土作用间接调控水文响应。如内蒙古退化草原,随着植被减少,降水更多地以地表径流形式流失,加剧水土流失与干旱风险。因此,评估下垫面变化对水文过程的影响,有助于预测气候变化背景下极端水文事件的演变趋势^[2]。

4 驱动因素探讨

4.1 气候因子作用

气候变化是水文极端事件发生频率和强度变化的重要驱动因素之一。在全球变暖背景下,气温上升导致蒸发加剧,改变了区域水循环过程,从而影响降水的时空分布。以亚洲季风区为例,研究表明,近几十年来该地区的强降雨事件显著增加,与海表温度异常升高密切相关。例如,印度次大陆在2019年经历了异常强烈的季风降水,多个邦出现严重洪涝灾害,其直接原因可追溯至赤道东太平洋海水异常升温引发的厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)现象。极地冰盖融化也通过改变大气环流格局,间接影响中纬度地区的降水模式。北极放大效应使得极涡减弱,进而增加了北美和欧亚大陆冬季极端寒潮的发生概率,这种气候反馈机制对区域水文系统构成了复杂而深远的影响。

4.2 人类活动影响

除了自然气候因子外,人类活动对水文极端事件的演变起到了不可忽视的作用。土地利用变化是其中最为显著的方面之一。城市化进程加快导致大量自然地表被不透水层覆盖,降低了雨水入渗能力,从而增加了城市内涝风险。例如,中国深圳在过去40年间经历了快速城市化,城市建成区面积从不足3平方公里扩展至超过1000平方公里,伴随而来的是暴雨期间排水系统超负荷运行问题频发,2023年“龙舟水”期间,深圳市多处低洼地区发生严重积水,交通中断数小时。水库建设、河流改道等水利工程也在一定程度上改变了天然径流过程。三峡水库自2003年蓄水以来,虽然有效缓解了长江中下游的洪水威胁,但也改变了局部水文情势,影响了下游湖泊生态系统的稳定性。

4.3 自然与人为耦合效应

水文极端事件是自然气候与人类活动耦合的结果,两者相互作用复杂。气候变化可能增强人为干扰下的水文响应,而土地管理和水资源调配又可能缓解或加剧自然变异的影响。以美国

加州干旱为例,高温干旱频发加剧了水资源供需矛盾,地下水过度开采削弱了恢复能力,形成“干旱-用水紧张-地下水枯竭”的恶性循环。数据显示,2012—2016年加州中央谷地地下水储量减少了约10立方公里,相当于洛杉矶两年用水量,导致地面沉降加剧、农业灌溉成本上升,凸显自然与人为因素的交互效应。因此,评估区域水文极端事件需综合考虑双重驱动因素,构建多维度风险评估与管理框架,提升应对未来不确定性的能力^[3]。

5 应对策略与管理

5.1 监测与预警系统

监测与预警系统在应对水文极端事件中具有基础性作用。通过水文气象观测网络、遥感技术和地面设备,可实现对降水、蒸发、径流和地下水位的实时监控。中国长江流域的“智慧水利”平台整合多类信息,提升了洪水预警的准确性和响应效率。然而,预警系统的有效性还需依赖数值模型进行预测分析。近年来,统计分析机器学习模型已广泛用于干旱与洪涝的早期识别。2023年欧洲环境署报告显示,结合卫星遥感与GIS技术的系统在地中海地区成功提前识别重大干旱事件,为地方政府赢得应急准备时间。此外,高效的预警信息发布机制也至关重要,需建立多层次信息传递通道。日本的“灾害信息共享系统”可在暴雨前数小时向社区报警,并通过多种媒介传播,有效减少人员伤亡与财产损失。

5.2 适应性管理措施

面对气候变化带来的水安全挑战,传统工程治理手段已显不足,适应性管理成为重要方向。该模式强调动态调整、生态系统服务功能和社会经济系统韧性的提升。在农业方面,节水灌溉技术和耐旱作物种植有效缓解干旱影响,如美国加州中央谷地通过滴灌与精准灌溉技术提升用水效率20%以上,并推广高粱、鹰嘴豆等低耗水作物;在城市领域,海绵城市建设理念逐步普及,深圳光明区截至2024年底建成区年径流总量控制率超75%,通过透水铺装、雨水花园、生态湿地增强蓄水、渗水与净水能力;此外,政策法规也推动适应性管理落地,如澳大利亚墨累-达令流域将生态需水量纳入水资源分配计划,保障河流生态健康,为全球提供借鉴。

5.3 区域协同治理

水文极端事件常具跨区域特征,单一行政主体难以独立应对,因此区域协同治理成为提升抗灾能力和水资源配置效率的关键路径。这种治理模式涵盖政策协调、信息共享与联合调度等多个维度,核心在于构建有效的跨区域合作机制。京津冀通过建立“海河流域水资源统一调度机制”,结合南水北调中线工程实现水资源优化配置,2023年累计调水超80亿立方米,有效缓解区域供需矛盾。此外,区域协同治理还需注重公众参与和社会资本引入,德国鲁尔工业区通过政府、企业、NGO与居民多方协商,成功恢复莱茵河水环境,展现出多元共治的包容性与可持续性。

6 结束语

本研究系统分析了气候变化背景下区域水文极端事件的演变趋势,结合长时间序列观测数据与气候情景模拟结果,发现极端洪水与干旱事件频率和强度显著上升。全球变暖通过改变降水格局、加剧蒸发过程等途径影响水文循环,以长江流域为例,近30年极端降水增加约20%,黄河流域与西北地区干旱亦呈增长趋势,城市扩张与水资源过度开发进一步放大风险。然而,因水文系统复杂性及模型不确定性,预测精度受限,区域差异大、监测数据不足以影响研究广度与深度。未来应加强多学科融合,结合遥感、观测与模拟手段,提升监测与预测能力,推动区域精细化研究与数据库建设,利用人工智能技术提高识别与评估水平,并强化政策应对与跨区域协同治理,构建适应气候变化的水资源管理体系。

[参考文献]

- [1] 蒋圣淇,张雪丽,徐林,等.碳-水利用效率动态归因及其对极端干旱事件的响应[M].中国水利水电出版社,2024.10.157.
- [2] 徐慧,江善虎.气候变化背景下赣江流域复合高温干旱事件时空演变特征[J].水利水电技术(中英文),2024,55(4):1-11.
- [3] 杨晨.雅鲁江流域极端气象水文事件时空变化特征及归因分析[D].湖北:三峡大学,2023.

作者简介:

蒲海汪洋(1993—),女,重庆市人,本科,工程师,主要从事水文测验、水文水资源分析计算。