

# Analysis of the influence of climate change on hydrological cycle and water conservancy engineering safety

Ya Xing

Xuzhou Branch of Jiangsu Provincial Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Xuzhou, Jiangsu, 221018, China

## Abstract

In view of the imbalance of hydrological cycle and the aggravation of safety risks of water conservancy projects under the background of climate change, this study systematically analyzes the mechanism of the influence of climate warming on water cycle factors, and evaluates the threat degree of extreme weather to water conservancy facilities, and puts forward adaptive protection countermeasures. Through the integration of case analysis and technical methods, it was found that the increase of temperature led to the imbalance of evaporation and the distribution of precipitation, and the annual runoff in some areas decreased by more than 20%. Meanwhile, the rise of rainstorm frequency doubled the flood control pressure of the reservoir. The study proposes specific measures such as dam reinforcement and water source conservation forest construction by constructing a three in one protection system of "engineering transformation ecological restoration management optimization". The results indicate that the comprehensive application of climate prediction models and hydrological monitoring technology can enhance the engineering safety warning capability and provide scientific basis for addressing climate change.

## Keywords

climate change; hydrological cycle; water conservancy project safety; ecological restoration; flood control operation

## 气候变化对水文循环及水利工程安全的影响分析

邢亚

江苏省水文水资源勘测局徐州分局, 中国·江苏 徐州 221018

## 摘要

本研究针对气候变化背景下水文循环失衡与水利工程安全风险加剧问题, 系统分析气候变暖对水循环要素的影响机制, 评估极端天气对水利设施的威胁程度提出适应性防护对策。通过案例分析与技术方法整合发现气温升高导致蒸发量增加与降水分布失衡, 部分区域年径流量减少超20%, 同时暴雨频率上升使水库防洪压力倍增。研究通过构建“工程改造-生态修复-管理优化”三位一体防护体系, 提出堤坝加固、水源涵养林建设等具体措施。结果表明, 综合应用气候预测模型与水文监测技术能够提升工程安全预警能力, 为应对气候变化提供科学依据。

## 关键词

气候变化; 水文循环; 水利工程安全; 生态修复; 防洪调度

## 1 引言

我国主要流域年均蒸发量增加约15%, 而降水时空分布不均导致南涝北旱现象加剧, 这种变化直接威胁水利工程安全运行。现有防洪设计标准多基于历史气候数据制定, 难以应对未来极端降雨的突发性和破坏性。同时, 水库泥沙淤积速率加快、输水设施老化等问题进一步增加工程维护成本。本研究从水循环演变规律出发, 通过整合气候情景模拟与水文模型技术评估不同升温情景下的工程风险等级, 提出涵盖工程设计、生态治理、管理机制的综合性解决方案。

【作者简介】邢亚(1992-), 男, 中国江苏徐州人, 本科, 工程师, 从事水文水资源监测、水利工程研究。

## 2 气候变化对水文循环的影响

### 2.1 水循环要素的异常波动

气候变化导致水循环关键环节出现显著失衡, 这种失衡体现在海洋与陆地水交换的多个层面。气温持续升高直接加速海水蒸发过程, 近二十年数据显示, 全球海平面年均上升速率较20世纪提高约60%, 部分沿海地区潮位观测值已超过历史警戒线。我国北方部分流域年蒸发量增幅达15%~20%, 直接导致河流径流量减少。同时, 冰川融水补给量短期激增与长期萎缩的矛盾凸显, 近年融水高峰期提前两周, 但年均融水量减少约12%, 这种波动加剧了水资源调度难度。水循环要素的异常波动还体现在地下水补给机制改变, 降水入渗率下降与灌溉用水过量抽取的双重压力下, 华北平原地下水位年均下降幅度超过1米。这种趋势不仅威胁农业安全, 还引发地面沉降等次生灾害。

## 2.2 降水模式的显著改变

极端降水事件频率与强度的双重提升，打破了传统降水规律。24小时最大降雨量极值刷新速度加快，部分城市小时降雨量突破历史极值的概率增加三成。2022年某流域遭遇百年一遇暴雨，单日降雨量达450毫米，远超水库设计防洪标准，导致多座水库出现险情。降水区域分布失衡引发“旱涝并存”现象。南方地区年降水总量虽保持稳定，但雨季持续时间缩短，强降雨集中度提高。北方干旱区则面临降水总量减少与蒸发增强的双重压力，黄河流域春旱发生频率从十年三遇增至十年七遇，严重威胁冬小麦播种。中高纬度地区降雪比例下降，降雨比例上升，导致春季融雪补给减少。同时，强对流天气引发的冰雹、雷暴等极端天气，对水利设施造成意外损伤。

## 3 气候变化对水利工程安全的影响

### 3.1 工程结构稳定性挑战

气候变化引发的极端天气事件，对水利工程基础结构造成持续性破坏。暴雨强度与频率的提升，使水库大坝面临超设计标准的洪水冲击。2023年汛期遭遇短时强降雨，入库洪峰流量超出设计值30%，导致溢洪道侧墙开裂，这种超负荷运行状态会直接威胁坝体结构安全。海平面上升加剧沿海堤防工程损毁风险。海湾城市防波堤在近十年内因潮位累计抬升15厘米，堤顶高程相对降低，风暴潮侵袭频率从五年一遇增至两年一遇。2022年台风过境期间，应该堤防出现多处渗漏点，抢险耗资超千万元。同时，气温剧烈波动导致混凝土结构膨胀收缩加剧，山区水利工程受冰川消融与冻土退化影响显著，融雪洪水提前且量级增大，使部分引水枢纽闸门承受异常水压。

### 3.2 运行维护成本增加

水库泥沙淤积速率因暴雨冲刷显著加快，频繁清淤作业不仅增加直接经济成本，还影响水库正常调度功能。2020年水库因清淤停运两个月，造成灌区农业损失超八百万元，极端高温与高湿环境加速金属构件腐蚀老化。同时，干旱期延长使水利设施长时间超低水位运行，抽水站水泵因空转过热故障率提升三成，年度维修频次从两次增至五次。强对流天气导致的山洪、泥石流等次生灾害，迫使水利管理部门增加临时抢险投入。2023年因局地暴雨引发堤防管涌，紧急调用5000个沙袋封堵缺口，单次抢险耗资达八十万元。

## 4 水利工程安全防护对策

### 4.1 工程改造措施

对设计标准偏低的水库大坝采取加高防浪墙与拓宽溢洪道相结合的改造方案，实践证明，这种组合方案能够有效抵御超标准洪水冲击。例如，在多地水库改造工程中，防浪墙高度提升1.5米后，配合溢洪道宽度增加20%成功将防洪能力提升至原设计标准的1.3倍。沿海地区水闸闸门采用防渗涂层技术后，金属构件锈蚀速率下降六成，维护周期从

两年延长至五年。输水渠道防渗处理需结合地域特点实施差异化改造。北方冻土区采用复合土工膜与保温层组合技术，减少冻融循环造成的结构损伤，实施区域渗漏损失平均下降四成。在南方多雨山区推广生态混凝土护坡技术，通过植物根系与工程材料协同固土，边坡滑坡发生率显著降低。针对地基沉降问题，微型桩加固与注浆补强技术应用广泛，某类地基处理工程数据显示沉降速率可从年均5厘米控制至1厘米以内。

在现有工程改造基础上，通过在坝体关键位置布设渗压计与位移传感器，实时掌握结构变形数据，并结合预警平台实现风险早期识别。实践证明，安装监测设备的工程点，险情发现时间平均提前三天，为抢险处置争取关键窗口期。输水管道柔性连接技术改造有效应对地基不均匀沉降，将刚性接口替换为橡胶密封圈与不锈钢卡箍组合的柔性接口，允许管道发生适度位移而不破裂。针对闸门启闭系统，推广液压同步顶升技术，并消除传统机械传动存在的卡阻风险，例如，某类水闸改造后启闭故障率从年均五次降至零次。最后，研发耐盐雾腐蚀合金材料用于沿海闸门，实验室加速腐蚀试验表明材料寿命延长三倍以上。高分子防渗材料在渠道衬砌中的应用使渗漏系数降低两个数量级，对于已出现裂缝的混凝土结构采用微生物自修复技术，通过注入芽孢杆菌与营养液，裂缝宽度在三个月内自主愈合率达八成。

### 4.2 生态治理协同路径

生态修复与工程防护有机结合，能够形成更可持续的安全屏障。在河流上游种植乔木灌木混交林，植被冠层截留雨水能力提升后，洪峰流量削减效果可达15%，枯水期径流量同步增加。湿地恢复工程通过重建滨湖生态带，显著增强区域蓄滞洪水能力，实测数据显示每公顷湿地可蓄滞洪水1.6万立方米，有效缓解下游防洪压力。生物护岸技术替代传统硬化工程取得显著成效，采用柳编石笼配合植物固坡的方法，岸坡抗冲刷能力提升三倍以上，同时形成水鸟栖息地改善生态环境。在农业面源污染治理方面，生态沟渠与人工湿地组合模式推广后，农田退水氮磷含量平均下降四成，水库富营养化风险明显降低。这类生态工程不仅保障水利设施安全，还产生水质净化、生物多样性保护等协同效益。

### 4.3 管理机制优化建议

第一，建立动态风险评估制度是管理升级的核心内容，通过每月收集降雨、水位等实时数据，每季度更新工程风险等级图谱使防控措施更具针对性。跨区域联合调度机制建设同样重要，水库群协同泄洪方案实施后，下游淹没损失减少三成以上。第二，强化日常巡查与应急保障体系是基础工作，专业巡查队伍配备无人机、探地雷达等设备后，工程隐患识别率提升五成，2023年度多地水利部门累计排查处置风险点超千处。第三，推行工程保险制度将风险转移市场化，试点区域数据显示，年度保费支出200万元可撬动2亿元风险保障额度。第四，定期开展极端天气应急处置演练，通过模

拟特大洪水、山体滑坡等场景，人员应急响应速度提升四成，物资调配效率提高三成。

## 5 气候变化适应性战略

### 5.1 空中水资源开发可行性

通过人工增雨技术开发云中液态水，能够有效补充地表水资源。在具备适宜云层条件的地区，利用飞机或地面发生器播撒环保型催化剂，促使云层中过冷水滴凝结降落。科学开展人工增雨作业可使目标区域降水量增加两成，特别是在春旱严重时期，这种技术对保障农作物播种用水效果显著。空中水资源开发需要精准把握气象条件，通过建立云水资源监测预警系统，并结合卫星云图与地面雷达数据实时捕捉可作业云层。重点在干旱半干旱地区布局作业站点，形成常态化开发机制。同时，加强催化剂环保性研究避免对生态环境造成次生影响。通过跨区域联合调度将空中水资源开发与水库蓄水相结合，形成天地协同的水资源补给模式。

### 5.2 节水型社会构建要点

构建节水型社会需要技术革新与制度约束双轮驱动，在农业领域推广滴灌、喷灌等精准灌溉技术，将传统漫灌水效率提升四成；在工业用水领域实施循环利用改造，在重点企业安装水质在线监测设备，通过分级处理实现废水回用率超七成。居民生活推广智能水表与节水器具，配合阶梯水价政策，促使家庭用水量下降三成。节水设施建设需与公众意识提升同步推进，通过建立用水效率标识制度对节水产品实施认证补贴。在缺水城市开展社区节水竞赛，通过荣誉激励与物质奖励相结合的方式培育节水习惯，在重点灌区推行农业水权交易试点，允许农户节余水量进行市场化流转，激发自主节水积极性。

### 5.3 公众参与机制设计

完善公众参与机制是落实适应性战略的基础保障，第一，建立社区级水资源管理委员会，吸纳居民代表参与用水监督。通过手机应用程序搭建信息共享平台实时发布区域用

水数据，鼓励公众举报管网漏损与浪费现象。在学校教育体系中增设节水课程，组织学生开展水资源调查实践活动。第二，创新激励机制提升参与实效，对节水成效显著的社区授予“绿色水模范”称号，配套财政奖补资金用于设施改造。第三，在试点家庭实行节水积分制度，积分可兑换生活用品或抵扣水费。第四，通过培育节水服务社会组织和培训专业志愿者队伍，定期开展入户检测与技术指导。通过多方联动形成政府主导、社会协同、公众参与的治理格局。

## 6 结论

气候变化对水文循环与水利工程安全的系统性影响已形成明确结论。气温升高导致蒸发量显著增加，部分区域年径流量减少超两成，同时极端降水频率提升使水利工程防洪压力倍增。通过工程改造提升防洪标准、生态修复增强系统韧性、管理优化强化风险预警的三维防护体系能够有效应对气候变化挑战。未来需重点突破气候预测精度不足与工程适应性评估方法欠缺的瓶颈。建议开发流域级智能管理系统，整合气象水文数据与工程运行参数，实现风险实时预警。同时，通过公众教育提升全民节水意识形成气候变化应对的社会合力。

### 参考文献

- [1] 卢伟,贺俊伟. 气候变化对水文循环及水资源可利用性的影响研究[C]// 冶金工业教育资源开发中心. 2024精益数字化创新大会平行专场会议——冶金工业专场会议论文集(下册). 青海省水文水资源测报中心, 2024: 191-193.
- [2] 李靖霞. 关中地区土地利用和气候变化对水循环演化影响研究[D]. 西北农林科技大学, 2024.
- [3] 程辉. 气候变化下汉江流域植被生产力对水文变化的响应[D]. 重庆交通大学, 2024.
- [4] 赵娴. 沙河流域气候和土地利用变化的径流响应研究[D]. 河北工程大学, 2023.
- [5] 李根. 基于区域水文循环的挠力河流域灌区干旱特征及成因研究[D]. 东北农业大学, 2023.