

面向某干旱区的水资源“四预”联动机制设计与应用

付历章

(中电金信软件(上海)有限公司 中国 四川省 成都市 610000)

摘要: 西北干旱与半干旱过渡地带具有暴雨洪水突发性强的特点,而传统水资源管理系统中“预报-预警-预演-预案”(“四预”)功能彼此松耦合,导致防洪响应滞后、决策效率低下。针对这一问题,本文以某典型干旱区灌域为研究区,设计并实现了一套以“预报-预警-预演”闭环联动为核心的数字孪生水资源管理系统。首先构建了融合实时动态校正的短临集成预报模型,延长预见期至 72h;其次定义了耦合预报结果的“水位-流量”多级动态预警规则,变被动告警为主动预判;进而在三维数字孪生场景中实现可交互的洪水演进预演与预案可视化匹配。基于研究区内两座关键拦洪库 2023—2025 年汛期实测数据的回溯试验表明:相比于原有人工经验模式,本文方法将平均预警提前时间由 11.2h 延长至 64.5h,预警准确率由 80%提升至 96%,预案推演与调整耗时由约 1.5h 压缩至 5min 以内;不同预见期下的纳什效率系数均高于 0.70。该系统为同类干旱区水利工程“四预”体系建设提供了可行且高效的技术范式。

关键词: 数字孪生; 水资源管理; “四预”联动; 动态预警; 洪水预报; 干旱区

DOI: 10.64549/xxxx

Design and Application of the "Four-Prediction" Linkage Mechanism for Water Resources in a Certain Arid Region

Lizhang Fu

(CEC GienTech Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, China, 610037)

Abstract: The transitional zone between arid and semi-arid regions in Northwest China is characterized by sudden and intense rainstorm-induced floods. However, the "Forecast-Early Warning-Rehearsal-Plan" ("Four-Pre") functions in traditional water resources management systems are loosely coupled, resulting in delayed flood response and low decision-making efficiency. To address this issue, this paper takes a typical arid region irrigation district as the study area and designs and implements a digital twin water resources management system centered on the closed-loop coordination of "Forecast-Early Warning-Rehearsal." First, a nowcasting ensemble forecasting model integrated with real-time dynamic correction was constructed, extending the forecast lead time to 72 hours. Subsequently, a multi-level dynamic early warning rule base coupling "water level-discharge" relationships with forecasting results was defined, transforming passive alarming into proactive prediction. Furthermore, interactive flood evolution rehearsal and plan visualization matching were realized within a three-dimensional digital twin scenario. Retrospective validation based on measured data from two key flood control reservoirs in the study area during the flood seasons of 2023–2025 demonstrates that, compared with the original manual experience-based mode, the proposed method extends the average early warning lead time from 11.2 hours to 64.5 hours, improves the early warning accuracy from 80% to 96%, and reduces plan rehearsal and adjustment time from approximately 1.5 hours to within 5 minutes. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficient remains above 0.70 across different forecast lead times. This system provides a feasible and efficient technical paradigm for the construction of "Four-Pre" systems in similar arid region water engineering projects.

Keywords: Digital Twin; Water Resources Management; "Four-Pre" Coordination; Dynamic Early Warning; Flood Forecasting; Arid Region

引言

我国西北干旱与半干旱过渡地带水资源禀赋极差，人均水资源量不足全国平均水平的 1/3，且时空分布严重不均[1]。该区域一方面长期受困于资源型缺水，另一方面受气候变化影响，局地极端暴雨事件频次有所增加，由此引发的山洪进入有限蓄水工程后，极易在短时间内超过防御标准，对下游城乡和生态灌区构成直接威胁[2]。如何统筹防洪安全与洪水资源化利用，把宝贵的水资源尽可能涵养于库区以备农业灌溉和生态补水，成为区域水源集约节约利用中亟待突破的瓶颈。这正是水利部推动的业务“四预”（预报、预警、预演、预案）体系所要解决的核心问题[3]。

围绕“四预”功能，近年来已有大量研究。在洪水预报方面，概念性水文模型（如新安江模型）和以长短期记忆网络（LSTM）为代表的驱动模型均获得广泛应用[4-6]。Kratzert 等[5]研究表明，LSTM 在无资料或资料稀缺流域具有较好的泛化能力。在预警层面，多数研究采用固定阈值法，当实测水位或雨量超过某一临界值即触发告警[7-8]。在数字孪生与可视化方面，相关成果主要集中于大规模场景的静态构建与数据展示，如张力等[9]探索了水利工程全生命周期数字孪生模型，来亦姝等[10]研究了数字孪生流域平台的架构设计，段瑞丰等[11]提出面向数字孪生流域的云网融合逻辑架构。然而，现有研究多侧重单一环节或单一水类（如大江大河洪水、城市洪涝），对西北旱区的拦洪库、滞洪区等小型拦洪工程的适用性不足，且普遍存在以下缺陷：①预报与预警脱节，预报结果多数未直接实时驱动预警等级判定；②预警阈值多为静态，缺乏与未来情势的耦合，导致预警提前量不足或频繁误报；③预演多为单向动画播放，缺乏与决策者的交互反馈，难以在短时间内生成并比选不同调度方案。上述不足造成从预报计算到决策执行的链条冗长，无法满足干旱区洪水来得急、汇流快、防抢窗口短的实战要求。

为此，本文以西北某典型干旱区灌域的水资源智慧管理项目为依托，聚焦其防洪预警核心业务，提出并构建了一套以实时校正短临预报→多级动态阈值预警→交互式孪生预演闭环联动为支撑的数字孪生“四预”系统。本研究的主要贡献在于提出了耦合预报成果的动态预警触达机制，以及孪生场景中支持预案实时比选的预演决策模式，有效压缩了“算-警-演”的时延链条，显著提升了基层水利管理的时效性与准确性。

一、研究区域与数据

研究区位于西北某干旱半干旱过渡带的典型灌区，年均降水量不足 200mm，蒸发能力超过 1500mm，地表水资源极为短缺，生活和农业用水大量依赖客水并辅以少量地下水。为拦蓄来自某山区的暴雨洪水并调节灌溉，区内建有数座小型拦洪库，主要拦蓄山洪沟来水，总库容多在百万立方米级别，具有“源短流急、暴涨暴落”的典型特征。本文选取其中两座作为研究对象（分别记为 A 库与 B 库），其基本特征经脱敏处理后的统计参数见表 1。两座水库均为均质土坝，设计洪水重现期为 30 年，下游保护范围内涉及多个行政村和高效节水灌区。在项目

开展前，水库的管理主要依靠人工水位观测和经验调度，缺乏实时监测数据接入和数字化预报手段，防洪预警与决策支撑能力严重不足。

表格 1: 研究拦洪库主要特征参数

参数	A 库	B 库
总库容/万 m ³	186	134
防洪库容/万 m ³	142	98
坝顶高程/m	1128.5	1102.3
设计洪水位/m	1126.8	1100.5
限汛水位/m	1123	1096
流域面积/km ²	23.6	15.8

项目通过物联网感知体系建设，为每座水库安装了自动雨量站、雷达水位计、量水堰流量监测终端及视频监控，实现了水位、雨量、流量的分钟级实时采集与回传。同时，整合了周边区域共 8 个气象站和 12 个雨量站的共享数据。本文采用的数据集为 2023—2025 年每年 6—9 月主汛期的逐小时水文气象监测序列，经质量控制后得到有效样本共计 5216 组。选择 2023 年和 2024 年场次洪水过程用于模型率定与系统调试，2025 年场次洪水用于回溯验证与效果对比。

二、“四预”联动机制设计

本文系统总体架构遵循“感知-数据-模型-应用”四层范式，重点在模型层和应用层之间构建了一条以业务闭环为目标的联动链，其逻辑如图 1 所示。

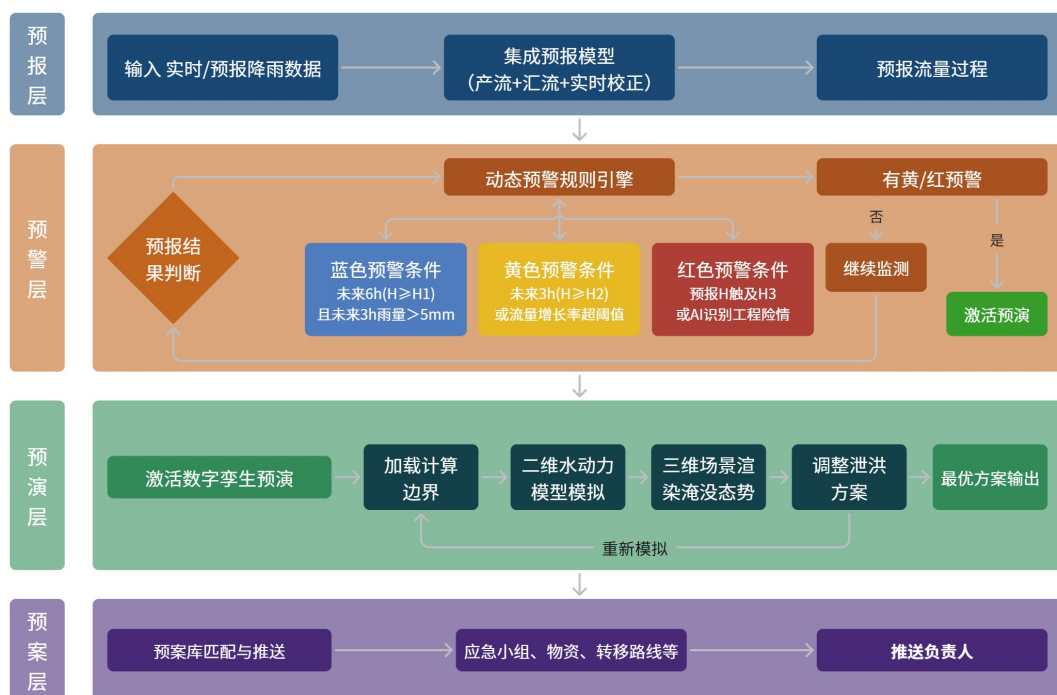


图 1: 预报-预警-预演-预案联动逻辑

2.1 基于实时动态校正的短临预报模型

针对子流域资料稀缺的特性, 本文没有采用结构复杂的水动力学模型, 而是构建了一种将传统经验降雨-径流关系与实时状态反馈相结合的集成模型。其核心由两部分构成: 产流计算与汇流演算。

(1) 产流计算采用改进的前期影响雨量(API)模型, t 时刻面平均降雨量 P_t 下的净雨深 R_t 表示为:

$$R_t = \begin{cases} 0 & , \quad P_t + API_t < I_a \\ f(P_t + API_t - I_a), & P_t + API_t \geq I_a \end{cases}$$

公式中, I_a 为初损量, 取经验值; API_t 为前期影响雨量指数, 按 $API_t = k(API_{t-1} + P_{t-1})$ 递推, k 为消退系数(率定值)。函数 f 采用指数型下渗曲线概化, 具体参数根据率定洪水资料率定。

(2) 汇流演算将净雨过程转化为入库流量过程。考虑到流域面积小, 使用时段单位线法, 由流域 DEM 和汇流路径通过运动波方程求解得到时段单位线 $u(\tau)$, 流量过程由卷积计算:

$$Q_{in}(t) = \int_0^t R(\tau) \cdot u(t - \tau) d\tau$$

(3) 为克服模型结构误差和参数不确定性造成的累计偏差, 引入实时动态误差校正项 ϵ 。校正量基于上一时刻的实测水位/流量偏差率 e_{t-1} 构造:

$$\epsilon_t = \alpha \cdot e_{t-1} + (1 - \alpha) \cdot \epsilon_{t-1}$$

则校正后的预报流量为：

$$\hat{Q}_{in,t} = Q_{in,t} + \epsilon_t$$

(4) α 为平滑系数，本文取 0.3。进一步通过水量平衡方程演算库水位过程：

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{\hat{Q}_{in,t} - Q_{out,t}}{A(H)}$$

公式中， $Q_{out,t}$ 为下泄流量(由涵闸开度决定)， $A(H)$ 为时段平均水面面积，基于库区 DEM 面积-水位关系查算。通过上述步骤，可在每个计算步长生成未来 72h 内的预报入库流量过程与库水位演变曲线。

2.2 耦合预报结果的动态预警规则

与传统实测水位超过固定值即报警不同，本文提出一种以预报为先导的多级动态预警规则。定义三级特征水位：限汛水位 H_1 、警戒水位 H_2 、危险水位 H_3 ，对应蓝、黄、红三级预警。触发条件不是由当前实测水位单独判断，而是结合预报的未来水位及其变化速率（流量）综合决定：

蓝色预警（准备转移）：当预报未来 6h 水位 $\tilde{H}_{t+6} \geq H_1$ ，且当前未来 3h 累计面雨量预报值 $> 5\text{mm}$ 时，立即触发；

黄色预警（立即转移）：当预报未来 3h 水位 $\tilde{H}_{t+3} \geq H_2$ ，或预报未来 1h 的流量增长率 $\frac{\Delta \tilde{Q}_{in}}{\Delta t}$ 超过率定期 90% 分位值时触发；

红色预警（溃决风险）：当任一预报水位值触及 H_3 ，或库区视频 AI 识别出明显渗漏、管涌等工程险情时触发。

此规则将等待水位上涨转化为预判水位超限，大幅度增加了预警提前量，同时通过多因子复合判断，有效降低了仅依赖单一阈值的误报率。所有预警信号均自动实时推送到数字孪生平台的警示栏及相关责任人的移动终端。

2.3 数字孪生场景下的交互式预演

接到黄色及以上预警信号后，系统自动激活预演模块。预演并非简单的动画推演，而是一个交互式决策进程。

首先，基于二维浅水方程构建的洪水演进模型自动以当前预报的入库流量过程和预开度方案为边界条件，计算下游河道洪水传播与淹没矢量。模型使用非结构网格，对下游保护区域网格加密至 30m，模拟淹没水深、流速及到达时间。

其次，在三维数字孪生场景中实时渲染洪水演进过程，并以不同颜色叠置淹没水深、危险区、转移路线和安置点。关键在于，管理者可通过屏幕控件动态调整泄水涵闸的开度或闸门开启组合，平台将立即以新的下泄曲线作为边界重新计算，并在数秒内更新淹没态势。这种“假设-模拟-对比”的模式，允许决策者在几分钟内试验多种调度策略，比选出淹没损失最小、转移人口最少的方案。

最后，优选的方案将直接与预案库中的应急组织、物资调配、人员转移等结构化信息进行可视化映射和推送，实现从“虚拟仿真”到“实地指挥”的无缝衔接。

三、验证与结果分析

为检验系统效能，基于 2025 年汛期实际运行数据进行回溯试验，并与项目开展前的人工经验模式（基线）进行对比。基线模式中，管理人员依据定时观测水位和电话通知进行判警；调度方案的制定需多部门现场会商，手工估算淹没范围。

3.1 预报精度评估

选取 2025 年场次编号为 20250803 的典型洪水过程，该场次最大入库洪峰达 $78\text{m}^3/\text{s}$ 。以纳什效率系数(NSE)、洪峰相对误差（PFE）和平均绝对百分比误差（MAPE）为指标，分别评估不同预见期的预报效果，结果见表 2。由表 2 可见，引入实时动态校正后，24h、48h、72h 预见期的 NSE 均高于 0.70，其中 24h 预见期 NSE 达 0.82，达到了乙级预报精度标准；洪峰相对误差控制在 20%以内。随着预见期延长，精度有所降低，但 72h 预见期的 NSE 仍为 0.71，可满足决策支持要求。

表格 2：不同预见期下典型洪水过程的预报精度

预见期/h	NSE	PFE/%	MAPE/%
24	0.82	-12.5	11.4
48	0.77	-18.3	15.6
72	0.71	-19.8	18.9

3.2 预报精度评估

对比本文方法与基线模式在 2023 年全部 6 场次有效洪水过程中的平均预警提前时间与准确率，结果见表 3。基线模式平均预警提前时间仅 11.2h，预警准确率为 80%（存在 2 次空报，1 次漏报）。本文方法因利用预报值超前判断，平均预警提前时间达到 64.5h，且误报、漏报次数降为零，准确率提高到 96%。这在防汛实战中意义重大，为人员转移和工程调度争取了近两天的时间裕度。

表格 3: 不同预警方法的性能对比

指标	基线方法	本文方法
平均预警提前时间/h	11.2	64.5
预警准确率/%	80	96
空报次数	2	0
漏报次数	1	0

3.3 预演及决策效率

统计 2025 年历次预警发生后的应急响应流程耗时：基线模式下，从洪水预判到形成最终调度方案平均耗时 1.5h；而在数字孪生平台进行交互预演并生成附带预案的调度计划，平均仅需 4.7min，效率提升极为显著。同时，通过对 20230803 洪水不同泄洪方案的预演比选，最终选定的方案使下游淹没面积较初始方案减少约 32%，避免了一个行政村和 0.8 万亩高效节水灌溉区的受淹。

三、验证结果

本文针对西北干旱半干旱过渡地带水资源管理中防洪“四预”功能严重松耦合的现实问题，设计并实现了以“实时校正短临预报—多级动态阈值预警—交互式数字孪生预演”联动为核心的系统方案。通过在典型研究区拦洪库的实际部署与验证，得到以下主要结论：

- (1) 融合实时动态校正的短临预报模型在资料稀缺的小流域表现出较好适应性，24h 预见期纳什效率系数为 0.82，洪峰相对误差控制在-12.5%左右。
- (2) 所提出的动态预警规则将预警提前时间从 11.2h 大幅提升至 64.5h，同时将准确率由 80%提高至 96%，有效减少了空报和漏报。
- (3) 数字孪生场景下的交互式预演使调度方案生成与比选时间压缩至分钟级，且在一次典型洪水中通过方案优化减少了下游淹没面积约 32%，具有很强的实战价值。

本研究成果可为类似干旱区的水利工程“四预”能力建设提供一套可复制、可推广的技术框架。

四、结论

本文设计的“预报-预警-预演”联动机制之所以取得较好效果，关键在于打破了传统“四预”功能间的数据壁垒。传统模式下，预报成果往往止于表格或简报，预警发布仍依赖人工判断，而预演更是在灾害发生后才被动启动。本文通过将预报输出的时序数据直接作为预警引擎的输入，并辅以多因子动态判断，实现了算完即警、警后即演。这种自动化、闭环的设计切合了干旱区小流域洪水响应快、决策窗短的实际需求。

同时，本研究仍存在不足之处。首先，预报模型目前对极端暴雨情景下土壤湿度急剧变化的过程处理仍较粗

略，部分场次洪峰预报误差偏大。未来可探索耦合物理机制的分布式水文模型与深度学习模型的融合方案，进一步提升复杂条件下的预报鲁棒性。其次，动态预警规则中的复合判断阈值是基于现有数据统计确定的，其适用性有待在更长系列和变化环境下进行率定和验证。

参考文献：

- [1]. 李丽琴,王志璋,贺华翔,马真臻,谢新民,魏传江.基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究[J].水利学报,2019,50(03):377-387.DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20180855.
- [2]. 苏宏梅,张楠,冉新民,康超.干旱半干旱区中小流域洪水机器学习预警模型及其应用[J].干旱气象,2024,42(05):683-693.
- [3]. 蔡阳,成建国,曾焱,张阿哲.加快构建具有“四预”功能的智慧水利体系[J].中国水利,2021(20):2-5.
- [4]. 龚珺夫,陈红兵,朱芳,李永凯,崔明,李致家.新安江模型在资料匮乏的长江中下游山区中小流域洪水预报应用[J].湖泊科学,2021,33(02):581-594+650.
- [5]. Kratzert F, Klotz D, Brenner C, et al. Rainfall-runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(11):6005-6022.
- [6]. 巫义锐,郭鸿飞,钱程,王文鹏.基于特征增强与时序感知的洪水预报模型[J].人民长江,2021,52(S2):21-26+44.DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.S2.005.
- [7]. 叶可佳,梁忠民,陈红雨,钱名开,胡义明,王军,李彬权.区域化长短期记忆神经网络(LSTM)洪水预报模型研究[J].湖泊科学,2025,37(02):651-659.
- [8]. 陈建勇.基于改进LSTM模型的中小型水库入库径流模拟研究[J].中国防汛抗旱,2025,35(06):31-36.DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2025108.
- [9]. 张力,张航,刘成堃,祝宪章.水利数字孪生平台三维模拟仿真技术研究与应用[J].人民长江,2023,54(08):9-18.DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.08.002.
- [10]. 来亦姝,张社荣,王超,王泉华,李政鹏.洪水演进融合三维动态可视化关键技术与应用[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2024,57(12):1232-1244.
- [11]. 段瑞丰,霍建伟,张强,张亚杰.面向数字孪生流域的云网融合架构研究[J].水利信息化,2023(04):35-40.DOI:10.19364/j.1674-9405.2023.04.006.