

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.04.015

# 数字孪生小流域山洪灾害“四预”平台建设和应用

邱志章<sup>1,2,3</sup>, 胡琳琳<sup>3</sup>, 张 扬<sup>3</sup>, 王月华<sup>3</sup>

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省水利防灾减灾重点实验室, 浙江 杭州 310020;  
3. 杭州定川信息技术有限公司, 浙江 杭州 310020)

**摘 要:** 小流域山洪灾害常年发生, 严重影响着人民群众的生命财产安全。为推进小流域山洪灾害防御工作, 依照水利业务预报、预警、预演、预案“四预”技术要求和流域防洪短板, 梳理“基础信息设施-孪生平台-四预体系”为主线的小流域山洪灾害系统架构, 结合浙江省典型山丘区下管溪小流域, 通过山洪灾害“风险识别、风险研判、风险管控和风险处置”流程, 从信息基础设施补充建设、模型库建设、“四预”功能完善等方面探讨平台关键技术和主要功能。结果表明: “四预”平台能够实现对小流域雨水情的实时监控、提前发现山洪风险、提前发布预警和风险闭环管控。该平台可为小流域的管理和提升山洪灾害防御能力、保障小流域人民生命财产安全起到重要作用。

**关键词:** 小流域; 山洪灾害; 数字孪生; “四预”体系

**中图分类号:** TV87

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2024)04-0099-07

## Construction and Application of the "Four Pre" Platform for Digital Twin Small Watershed Flash Flood Disasters

QIU Zhizhang<sup>1,2,3</sup>, HU Linlin<sup>3</sup>, ZHANG Yang<sup>3</sup>, WANG Yuehua<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou, Zhejiang 310020, China;

2. Key Laboratory of Water Conservancy Disaster Prevention and Mitigation of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310020, China;

3. Hangzhou Dingchuan Information Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310020, China)

**Abstract:** The frequent occurrence of flash flood disasters in small watersheds has been posing great threats to the safety of people's lives and property. In order to promote the prevention of small watershed disasters, a small watershed flash flood disaster system architecture with the main line of "basic information infrastructure-twin platform-FEDE (four functions of forecast, early warning, drill and emergency plan)" has been proposed in accordance with the technical requirements of FEDE in water conservancy business and the shortcomings of small watersheds in flood control. Based on the Xiaguanxi small watershed of typical hilly areas in Zhejiang Province, focusing on the process of "risk identification, risk assessment, risk control, and risk disposal", a FEDE system has been constructed using key technologies such as information infrastructure supplementary construction, model base construction, and four pre platform improvement. The results show that the platform can achieve real-time monitoring, early detection of risks, early issuance of warnings, and closed-loop risk control of the Xiaguanxi small watershed, providing technical support for the management and high-quality development of small watersheds.

**Keywords:** small watershed; flash flood disaster; digital twin; four pre system

智慧水利是新阶段水利高质量发展的显著标志<sup>[1]</sup>, 数字孪生赋能水利行业是中国治水现代化的

科技引擎<sup>[2-4]</sup>, 也是国际研究热点<sup>[5-7]</sup>。数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数

收稿日期: 2024-03-20

修稿日期: 2024-04-19

基金项目: 浙江省属科研院所扶持专项(自控 A21003); 浙江省水利科技计划项目(RB2007); 浙江省水利科技计划项目(RA2003)

作者简介: 邱志章(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利软科学研究、水利数字化建设与管理工作。E-mail: 48805130@qq.com

通讯作者: 王月华(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利数字化工作。E-mail: wangyuehuaok@163.com

据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映实体对象的全生命周期过程<sup>[8-9]</sup>。

山洪灾害是洪涝灾害中最为严重的致伤致亡灾种<sup>[10-13]</sup>。浙江省特定的地理和气候条件决定了山洪灾害多发频发,灾害突发性、反常性、极端性日益突出。以流域面积较小(200 km<sup>2</sup> 以内)的流域为计算单元建设数字孪生小流域,实现小流域山洪灾害防御的预报、预警、预演、预案“四预”功能建设,提升小流域应对山洪灾害的能力是新时期山洪灾害防治的目标任务。小流域山洪灾害防治属于典型智慧水利应用之一,全面推进山洪灾害“四预”体系,有助于促使山洪灾害防治迈向新阶段和高质量<sup>[14-16]</sup>。本文以浙江省典型小流域为案例,结合山洪灾害降雨水位监测、水位流量预报、风险预警的数据现状,提出了数字孪生小流域山洪灾害“四预”平台建设的关键技术及主要功能,整合集成数据、耦合模型、细化功能模块,结合新型水文监测感知设备,构建未来降雨、水文预报、一二维耦合模型的仿真平台,实现全过程的精准化模拟和预报,对提升山洪数字孪生流域建设具有典型的示范意义。

1 区域概况

下管溪小流域发源于余姚市鸪鹑岩西坡,是曹娥江中下游右岸的一条支流,流域地理位置如图 1 所示。流域面积 234.9 km<sup>2</sup>,主流长 38.3 km,河道平均比降 21.8%。其主要支流有浪撞溪、干溪、陈溪、洙溪、任溪、张溪等。小流域内共建设小(1)型水库 4 座,小(2)型水库 13 座,集水面积合计为 77.7 km<sup>3</sup>;1~10 万 m<sup>3</sup> 山塘 58 处,集水面积合计为 19.7 km<sup>3</sup>。下管溪流域范围内涉及上虞区 4 个乡镇 50 个重要村落,有高风险区 22 个,低风险区 42 个,影响人口 1 070 人。据历史资料统计,由台风暴雨引起的山洪平均每年 3 次,最多年份达 7 次(1959 年、1960 年),由短时暴雨而引起的山洪暴发平均 5 年三遇。

2 平台总体架构

根据《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》《水利业务“四预”功能基本技术要求(试行)》等文件要求,数字孪生小流域山洪灾害“四预”建设系统框架主要由基础信息设施、数字孪生平台、山洪灾害“四预”应用平台 3 部分组成,系统框架如图 2 所示。

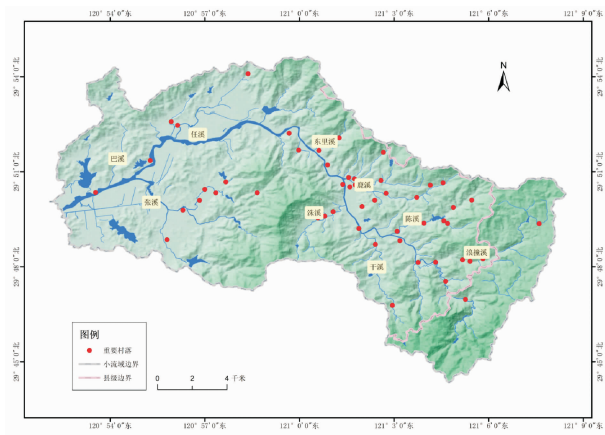


图 1 流域地理位置

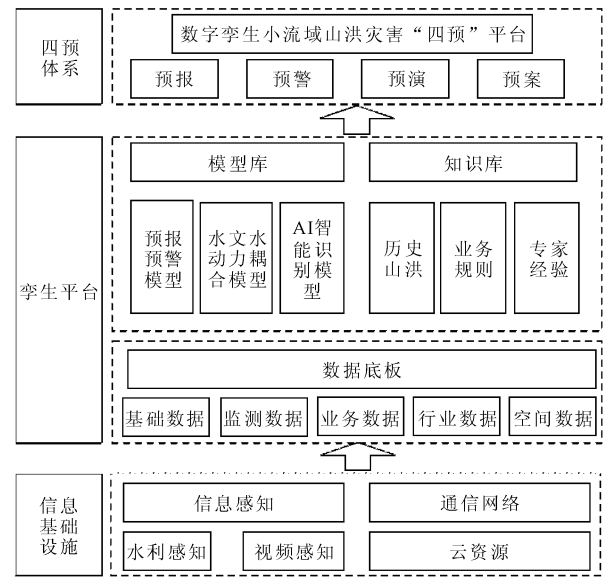


图 2 系统框架图

2.1 基础信息设施

基础信息设施主要包括水利感知网、通信网络和云资源。水利感知网采集基础信息包括雨水情、视频图像等信息,通过专线、网络 VPN 等通信网络传输到政务云、自建云平台进行数据存储和计算。同时还包括水利感知设施的新建、改建、升级和改造,包括水雨情监测设施、工程监测设施的升级改造完善,以及服务器、存储、网络、安全等硬件设施升级改造,信息感知环境搭建升级等。通过共享集成和补充增建雨情、水情监测站点数据,实现可覆盖小流域上下游的降雨、水位等数据监测,准确掌握不同分区的雨水情情况。

2.2 孪生平台

孪生平台主要包括数据底板、模型库、知识库和数字化场景。数据底板是数字孪生的“算据”,主要

包括基础调查评价数据,业务部门运行数据,雨量、水位等水雨情监测数据,气象、自然资源、应急部门共享数据以及地理空间数据等。通过无人机航拍采集小流域重点区域影像地理空间数据,结合无人机倾斜摄影、游戏引擎、Cesium 等新技术,将数字孪生流域的表现形式由以前基于百度地图、高德地图或者天地图的二维地图升级到三维场景<sup>[17-18]</sup>,从而实现精细化动态场景模拟,主要建设任务包括完善 L1 级数据底板、建设 L2 级和 L3 级数据底板<sup>[19]</sup>。利用气象水文模型、一二维洪水模拟演进等水利专业模型与视频识别、大数据分析等智能算法赋能数据底板,实现降雨、产汇流、洪水演进功能,提供山洪预报、预演、预案、淹没分析等相关业务场景的解决方案。结合大场景和重点区域高精度数字模型等可视化技术,为防洪、调度等业务场景的仿真模拟提供实时渲染和可视化呈现,实现物理流域与数字孪生流域实时同步仿真交互<sup>[8,14]</sup>。以历史场景、专家经验、应急预案、水利和山洪灾害知识引擎作为支撑,构建包含水利山洪灾害信息的知识库,支持多场景的交互式、精准化决策分析<sup>[1]</sup>。

2.3 “四预”体系

按照“风险识别、风险研判、风险管控和风险处置”的理念,梳理山洪灾害防治中山洪预报、监测预警、预演、预案的工作重点和业务逻辑。针对小流域,一是降雨预报,包括未来 6 h、24 h 数值预报降雨,1 h、2 h、3 h 临近预报降雨等网格降雨信息、以及雷达反演降雨、雷达与站点融合降雨;二是滚动预报,基于气象预报降雨、实时监测降雨等数据,对河道、重要村落控制断面重要节点的流量和水位进行滚动计算预报,实现变化过程的预先研判。预警是指根据重要节点水位流量预报结果,结合雨量、水位、流量等预警阈值和预警规则,提前向防汛责任人告知预警信息。预演是指在特定的边界条件下,利用水利专业模型对小流域重要河段进行模拟仿真和淹没结果动态展示。预案是结合预演结果影响分析,快速制定防御措施。

3 平台关键技术及主要功能

3.1 信息基础设施补充建设

在山丘区“落地雨”监测难,预警信息传递难、设备管护难等问题进行深度分析的基础上,结合山洪灾害调查评价成果,以流域为单元、以高风险区受威胁群众为预警对象,选择小流域灾害频发的 8 个重要村落开展声光电预警设备建设,在溪河洪水来

临时,以自动声音预警和光预警的方式提醒群众避险转移,相关设施设备满足《浙江省山洪灾害声光电监测预警设备技术要求(试行)》要求。

3.2 孪生平台建设

3.2.1 数据底板建设

当前小流域区域已建雨量站 48 座、水位站 18 座、视频站 39 座,在已有数据的基础上,补充收集调查评价、风险普查、河流水系、水利工程等数据,实现基础、监测、跨行业、空间等数据的构建、整合和管理,详见表 1。对小流域开展水雨情、水下地形、无人机三维倾斜摄影影像、工程或建筑物等的数据测量采集和预演场景建模,形成支撑山洪平台“四预”能力提升的数据底板。L2 底板覆盖下管溪全流域,并适当外延,面积不低于 240 km<sup>2</sup>,对流域内的重要村庄及河流段采用地面分辨率 3 cm 无人机倾斜摄影进行影像采集和三维建模,并制作 DOM(5 cm)和格网 2 m 的 DEM,面积 50 km<sup>2</sup>。开展断面测量工作,包括下管溪干流和部分支流,选取断面的间距为 200 m,并且在重要村落和局部桥梁堰坝加密测量。根据山洪灾害风险隐患精细化调查与分析成果,在三维场景叠加展示重要村落、危险区、安置点、沟道急弯、桥梁堰坝等重点对象,提升小流域山洪灾害防御态势分析研判和预警决策能力。

表 1 数据底板清单

| 序号 | 数据归类  | 数据明细                                                                          |
|----|-------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 基础数据  | 变动不频繁的、公用程度高的基础信息,主要包括山洪灾害防御基础数据、山洪灾害调查评价成果数据、城镇镇调查评价成果、山洪风险隐患调查、水旱灾害风险普查等数据。 |
| 2  | 监测数据  | 随时间变化会产生增量的监测数据,主要包括山洪雨水情站点、水文监测站点、声光电监测预警、视频等实时监测数据。                         |
| 3  | 跨行业数据 | 从气象部门共享的实时降雨数据、融合降雨数据和降雨数值预报产品等相关数据,以及自然资源、应急等部门共享数据。                         |
| 4  | 空间数据  | 包括试点流域 DOM、DEM、DLG、重要沟道断面、倾斜摄影影像、建筑物建模数据等。                                    |

3.2.2 模型库建设

(1) 短临预报预警模型

为实现山洪灾害监测预警信息同步共享,区水利局与气象局建立信息共享机制,由气象局提供未来 1 h、3 h、6 h 的 1 km×1 km 气象网格预报降雨过程数据,以及 24 h 的 5 km×5 km 的气象网格预报降雨过程数据,制作高精度气象预报产品,开发山洪灾害短临预报预警模型,利用降雨预报数据发布未

来 24 h 预报预警和短临预警,有效延长预见期,提高预报精度。

(2) 水文水动力耦合模型

下管溪小流域采用水文水动力耦合模型进行计算,以满足洪水实时预报和过程模拟需要。考虑到降雨在全流域的不均匀性、流域下垫面、地形等分布的不均匀性,洪水预报模型采用“新安江”流域产汇流模型。洪水演进模型采用水动力洪水演进模型、堤防洪水漫溢模型。采用 CPU 和 GPU 并行耦合计算方式,依据实测或预报降雨实时输出淹没分析结果,并以数据库或接口方式向孪生平台提供数据。

模型采用线性河道 + 区间产汇流方案,水流沿河到从下管溪上游向干流汇合口演进,沿程干溪、陈溪、洙溪大支流经过水文模型计算作为集中入流,区间山坡产水作为旁侧分散入流,图 3 为流域概化图。

水动力模型分析区内河道断面利用实测断面数

据加工处理,河道洪水的计算断面间距与河宽相匹配,一维水动力模型中共建立河道计算断面 177 处,二维网格剖分选择最大可能洪水淹没范围边界线或者堤防或较高的路段等作为网格剖分的外边界约束条件。采用无结构不规则网格进行剖分,主要为四边形网格,网格数量约 10 万个,网格平均面积 355 m<sup>2</sup>。图 4 为水动力学模型建模范围图。

针对 2022 年 9 月 12 日—2022 年 9 月 15 日降雨以及对应水文站的水位资料,对比模型计算结果和历史实测数据,具体见图 5,由对比结果可看出,场次降雨洪水模拟结果与实测水位整体趋势比较吻合,基本捕捉到了洪水的起涨和消落过程,在洪峰处误差较小(小于 20 cm),低于《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)中规定的许可误差,预报确定性系数为 0.93,模拟预报效果较好,达到甲级精度等级。

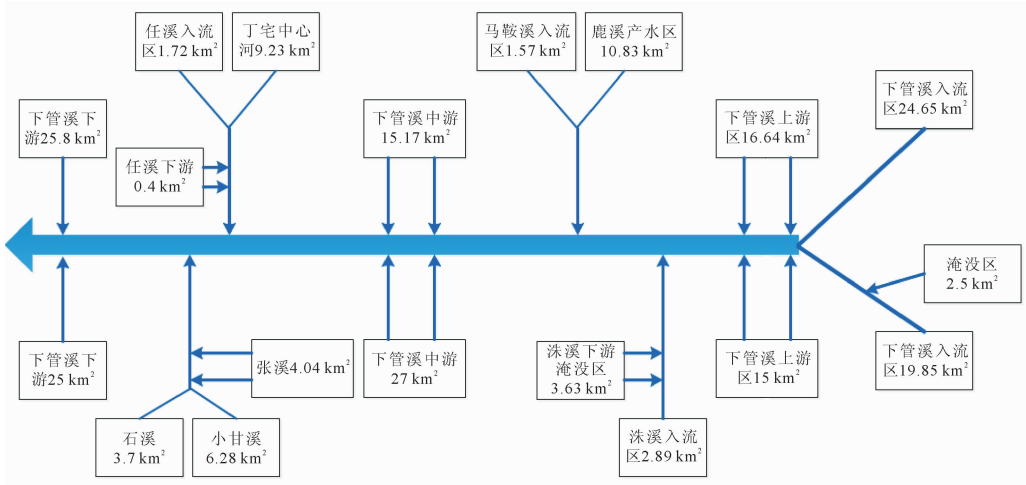


图 3 流域概化图

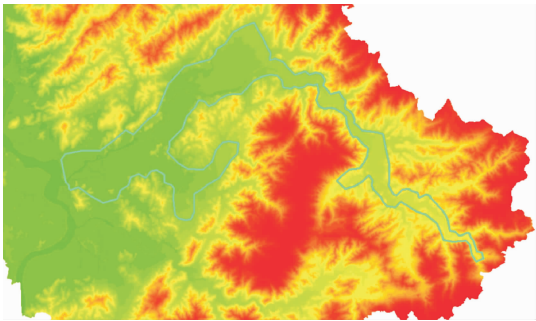


图 4 水动力学模型建模范围

(3) AI 智能识别模型

系统接入重要沿河村落两岸的已建视频监控,基于 Auto Model Search、AutoDL 算法,通过从视频源中抽取、采样关键信息,构建专业的视频分析模型,

对河道警戒水位和危险水位进行智能识别,并及时在平台自动预警。

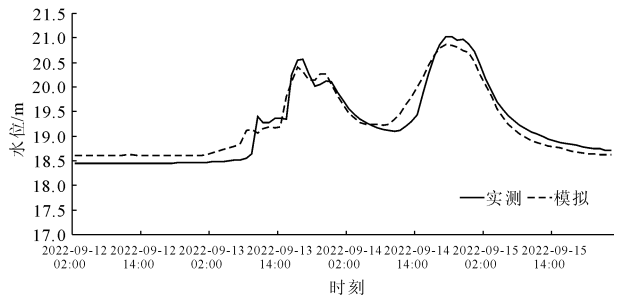


图 5 预报结果检验

3.2.3 知识库建设

归集小流域山洪灾害调查评价成果、历史山洪

灾害数据和主要应对措施、山洪灾害应急预案,梳理总结调查评价基础数据和历史山洪资料并录入知识库。分级分类整理预案对应村落危险区、预警指标、责任人、山洪防御应对措施等信息,并录入知识库,提供数字化表达和存储方式,并定时更新。

### 3.3 “四预”功能

下管溪小流域“四预”业务系统基于省级山洪智防进行研究开发,实现基于数字化场景的重要河段山洪演进过程模拟与风险清单精准化生成和实现预报预警,提升梅雨、台汛等强降雨期间山洪数字化演练复盘能力,直观生动展示山洪灾害影响的风险清单及薄弱环节,支撑山洪灾害防御精准化决策和人员转移避险<sup>[20]</sup>。“四预”功能界面如图6所示。

#### 3.3.1 预报

预报功能分为两部分:一是未来降雨预报,二是小流域洪水滚动预报和预估预报。降雨预报提供气象部门共享的1 h、3 h、6 h、24 h数值降雨预报,以及2 h彩云天气预报降雨数据;小流域洪水滚动是以实时监测降雨和预报降雨数据驱动水文模型和一、二维水动力模型为基础,实现下管镇、陈溪乡、丁宅、陈墩等重要节点流量、水位过程的滚动分析计算和查询,滚动周期为0.5 h,并提供全流域沿程水面线过程查询。预估预报增加方案配置功能,包括预报起止时间、雨量过程、放大系数,用于计算和分析典型场次洪水过程。

#### 3.3.2 预警

在多阶段递进式(预报预警、监测预警、现地预警、视频AI预警)山洪灾害监测预报预警体系下,基于预报降雨、监测降雨和小流域洪水预报结果,提供下管流域预警发布、跟踪和展示功能。根据小流域特征及现有基层防汛体系,分析流域内各重要村落及重点对象山洪灾害预警阈值,明确不同风险等级(红、橙、黄、蓝和准备转移、立即转移)下预警对象及预警要素。①未来3 h预报预警(红、橙、黄、蓝)通过短信发送至区乡村责任人,预警内容包括预警村落、预警时间、预警级别等基本信息。洪水预报预警根据不同情景预报方案成果,自动生成流域内重要村落风险清单,包括村落名称、预报最高水位、发生时间、预警等级、预警阈值、预警时间等信息,支持一键导出。同时,可根据专家经验综合研判后,将风险预警信息以短信、智能语音电话等形式通知到区乡村相关责任人。②监测预警提供预警处置功能,支持预警自动发送和手动发送、预警梯级(短信、浙政钉群消息、浙政钉消息、语音叫应)发布

功能,同时建立上下游联动预警机制,下游重点村落关联上游监测站点,当上游水雨情监测达到阈值,自动向村落责任人发送预警短信,实现山洪预警的上下游联动,保障群众安全。③现地预警根据声光电预警规则,当实时监测雨量、水位超过设定的预警指标时,自动触发强光、警报等现地声光报警。④视频AI预警在重点防范区域接入10路沿河已建视频信号,通过AI智能识别模型通过从视频源中抽取、采样关键有用信息,基于计算机视觉技术构建专业的视频分析算法,对河道警戒水位和危险水位进行识别,对超警水位进行自动预警。

#### 3.3.3 预演

为实现河道洪水动态演进不同场景的实时渲染,系统采用了Web前端引擎、SuperAPI服务、云渲染Web业务模块三个核心组件,支持倾斜摄影影像-OSGB、GIS-SHP多种数据融合,支持空间模型数据在线和动态加载,支持全要素场景表达。接入水动力模型输出的淹没时间、淹没栅格、淹没水深、最大水深等信息,基于三维地形对洪水进行渲染展示。采用计算型云平台,利用渲染资源池化、5G等技术,提供在线实时云渲染产品,利用视频流和控制流的方式向终端推送云渲染服务,有效降低了终端设备对于显卡的要求。

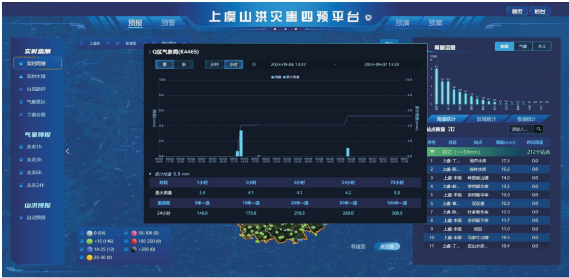
结合流域前期降雨,开展未来24 h重要断面水位、流量和村落风险预报,构建山洪预估预报(包括实测降雨加预估降雨和实测降雨加气象预报两种模式)方案参数配置功能,通过预报成果及设定参数、自定义方案参数设置,开展预报计算。依托数字孪生三维可视化模型,基于洪水预报方案计算成果,动态模拟预演山洪沟道洪水演进过程,淹没影响范围与淹没水深,评估灾害风险程度。基于数字孪生技术构建山洪风险淹没场景,在全流域及重点区域数字化场景以热力图等形式动态展示洪水演进过程。从流量、水位、时间多维度展示各预报节点、重点断面的预报过程。在数字化场景下,基于高精度孪生底板,实现洪水演进过程和影响的全程模拟展示,生动形象展示洪水演进过程中的淹没情况。

#### 3.3.4 预案

接入预演方案,支持一键调用预演分析成果,列表展示山洪淹没范围、影响人员等预演成果主要信息,生成风险管控清单。根据山洪淹没范围、影响人员和避灾安置场所信息,确定山洪防御避险方案,提出有针对性的山洪灾害防御措施,及时传达至防汛责任人。基于通讯软件“钉钉”,邀请并形成技术专

家库,并在页面展示专家姓名、所在单位、职称、类型、擅长方向、联系方式等信息。当险情发生时,通过系统一键发起钉钉视频会商,邀请相关专家推演

会商可采取的预警手段、转移避险组织方式、应急救援对策等,辅助山洪灾害防御决策,实现技术专家一线指导。



(a) 预报界面



(b) 预警界面



(c) 预演界面



(d) 预案界面

图 6 “四预”功能界面

4 应用效果

4.1 模拟计算

系统在集成水文模型、一二维水动力模型的基础上,能够实现河段的水文预报及水动力模拟,并通过多源多类型数据交互服务引擎实现水文水动力模型在线计算及计算过程和成果数据与系统的实时交互。

系统计算实例:受强降雨影响,区间形成较大洪水,计算方案采用 50 年一遇洪水,并输入系统。当缺少实测径流资料时,可参照《浙江省短历时暴雨》,确定暴雨均值、设计暴雨日程、时程分配,以此计算设计暴雨,进而采用推理公式推求设计洪水过程线,并与水文模型计算结果相互校验。干流入口流量如图 7 所示。

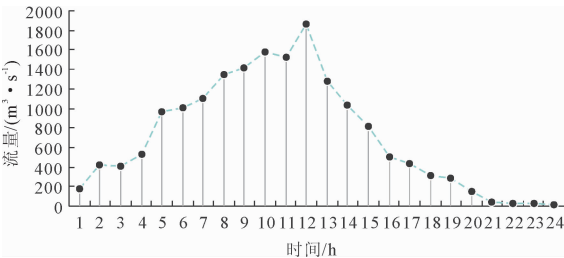


图 7 干流入口流量

利用系统计算下管溪洪泛区淹没过程,计算结

果为影响人口 374 人、淹没面积 10.84 km<sup>2</sup>,最大水深 6.93 m,准备转移村落 11 个,立即转移村落 10 个,淹没范围见图 8。



(a) 下管镇



(b) 陈溪乡

图 8 不同乡镇影响范围图

4.2 典型案例

2022 年 9 月 13 日,受第 12 号台风“梅花”影

响,绍兴市上虞区下管溪流域暴发山洪,省水利厅于 13 日 17 时和 14 日 6 时 30 分两次发布未来 24 h 山洪灾害红色预警并启动叫应机制,本平台及时发送气象预警、预报预警、准备转移和立即转移监测预警。预警发布区域如图 9 所示,由于预警、叫应及时,决策科学果断,上虞区先后完成高风险区 463 人和低风险区 2 596 人(含扩面转移)的转移安置,提前做出梯次转移人员的决策部署并果断执行,有效避免了下管溪流域因山洪导致人员被困事件的发生,成为水利部 2022 年山洪灾害防御五大典型案例之一。山洪灾害预警、叫应、转移环环相扣,科学延长灾害预见期,做到人员应转尽转、应转早转,切实打好山洪防御主动仗。



图 9 预警发布区域

5 结 论

针对下管溪小流域山洪防御短板问题,从基础设施、孪生平台、四预体系 3 个层面探讨数字孪生技术在小流域山洪灾害四预平台的应用模式,并进行实践探索。通过建设雨量站、水位站等感知设施,汇集调查评价、实测降雨、预报降雨、三维地形等数据底板,融合水利专业模型和知识,开发“四预”平台,为下管溪小流域山洪防御过程中水文监测预报、预警发布、洪水预演、风险闭环管控提供解决方案,提升山洪灾害防御能力,保障人民生命财产安全,为浙江省“数字孪生小流域”的建设与完善提供参考。

参考文献:

[1] 韩 培,王新涛,郭东光,等. 数字孪生山洪灾害“四预”试点建设构想及展望——以新疆托里县为例[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(10):40-47.

[2] 张 冰,李 欣,万欣欣. 从数字孪生到数字工程建模仿真迈入新时代[J]. 系统仿真学报,2019,31(3):369-376.

[3] 黄 艳. 数字孪生长江建设关键技术与试点初探[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(2):16-26.

[4] 何正中,王玉铜,林灿文,等. 飞云江数字孪生流域平台设计[J]. 中国科技信息,2022(24):108-113.

[5] Berglund E Z, Shafiee M E, Xing L, et al. Digital twins for water distribution systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2023,149(3):1-7.

[6] Grieves M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises [J]. International Journal of Product Development, 2005,2(1-2):71-84.

[7] Bauer P, Stevens B, Hazeleger W. A digital twin of earth for the green transition [J]. Nature Climate Change, 2021,11(2):80-83.

[8] 王万祯,康德奎,王晓军. 石羊河数字孪生流域建设探讨[J]. 中国农村水利水电,2022(8):117-120.

[9] 张绿原,胡露骞,沈启航,等. 水利工程数字孪生技术与探索[J]. 中国农村水利水电,2021(11):58-62.

[10] 吴泽斌,何秉顺,田济扬,等. 数字山洪防治理论框架和实施路径初探[J]. 中国水利,2022(8):41-46.

[11] 黄国如,成国栋,洗卓雁,等. 清远市瑶安小流域山洪灾害成因分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(3):136-141.

[12] 戚 蓝,李 楠,李少明. 浙江省沿河村落山洪灾害的研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(6):113-117.

[13] Hapuarachchi H A P, Wang Q J, Pagano T C. A review of advances in flash flood forecasting[J]. Hydrological Processes, 2011,25(18):2771-2784.

[14] 李琛亮,刘国庆,杨 光,等. 基于“四预”的永定河洪水预报调度系统研究与应用[J]. 水利水运工程学报,2022(6):45-53.

[15] 王井腾,孙祥鹏,张文明,等. 珠江防汛“四预”平台建设及应用[J]. 中国水利,2022(22):39-42,20.

[16] 刘业森,周 芹,刘媛媛,等. 我国防洪减灾三维数字流域应用综述[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(8):39-43,60.

[17] 刘业森,陈 胜,刘媛媛,等. 近年国内防洪减灾信息技术应用综述[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(1):48-57.

[18] 刘家宏,王光谦,王 开. 数字流域研究综述[J]. 水利学报,2006,37(2):240-246.

[19] 王 巍,刘永生,廖 军,等. 数字孪生关键技术及体系架构[J]. 邮电设计技术,2021(8):10-14.

[20] 杨 帆,于泽兴. 广东省山洪灾害防御体系建设与成效[J]. 广东水利水电,2023(6):44-48.