

山东黄河水文数字孪生关键技术研究与应用

岳成鲲 杨钊

黄河水利委员会山东水文水资源局

DOI:10.12238/hwr.v7i11.5045

[摘要] 山东黄河水文数字孪生平台通过开展水陆空立体化数据采集,搭建了多时空、多维度、多图层的L2到L3级的数据底座。通过三维可视化技术构建了覆盖河段内各类地理水文及水利工程关键点的可视化模型。通过水文在线监测技术接入实时水情与预报数据。以自研三维水动力模型和MIKE二维数学模型为核心,对河段洪水进行水动力学模拟推演,并实现洪水传播过程的动态三维仿真模拟。构建了完整的“四预”功能体系。根据上游水情信息利用数学模型进行下游洪水推演预报。研发了智能模型评估分析滩区的淹没风险并进行预警。通过三维流体仿真技术预演洪水的演进过程。通过水利水文知识库技术提取测洪、防汛、抢险预案。实现对该物理河段要素和水利治理管理过程的数字化映射、智能化模拟。使用历史洪水和调水调沙过程对平台进行了复盘分析验证,在黄河冻口河段应用效果良好。

[关键词] 水文; 数字孪生流域; 水力学模型; 黄河下游

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research and Application of Key Technologies for Shandong Yellow River Hydrological Digital Twin

Chengkun Yue Zhao Yang

Shandong Hydrology and Water Resource Bureau, Yellow River Conservancy Commission

[Abstract] The Shandong Yellow River Hydrological Digital Twin Platform has built a multiple spatiotemporal, multi-dimensional, and multi-layered data foundation ranging from L2 to L3 by conducting three-dimensional data collection through water, land, and air. A visualization model covering various geographical hydrology and water engineering key points within the river section has been constructed using three-dimensional visualization technology. Real-time water situation and forecast data are accessed through hydrological online monitoring technology. With self-developed three-dimensional hydraulics models and MIKE two-dimensional mathematical models as the core, hydraulic simulations and dynamic three-dimensional simulations of flood propagation processes are conducted. A complete "four predictions" functional system has been established. Downstream flood forecasting is conducted based on upstream water situation information using mathematical models. Intelligent models have been developed to assess and analyze the inundation risk in flood plain areas and provide early warnings. The evolution process of floods is simulated using three-dimensional fluid simulation technology. Flood measurement, flood control, and emergency response plans are extracted using water resources and hydrological knowledge base technology. The digital mapping and intelligent simulation of reach elements and water management processes in the physical river section are achieved. A comprehensive analysis and verification of the platform was conducted using historical floods and water and sediment regulation processes, and the application effect was good in the Luokou section of the Yellow River.

[Key words] hydrology; digital twin basin; hydraulics model; lower reach of Yellow River

1 概述

数字孪生流域作为智慧水利的核心与关键,它源于数字孪生技术,通过数字模型和实时数据来模拟和预测实际现象,为水文水资源管理和水旱灾害防御提供了全新的思路和方法^[1]。山

东黄河水文数字孪生平台通过开展水陆空立体化数据采集,搭建了多时空多维度多图层L2到L3级的数据底座。通过三维可视化技术构建了覆盖河段内各类地理水文及水利工程关键点的可视化模型,通过水文在线监测技术接入实时水情与预报数据。以

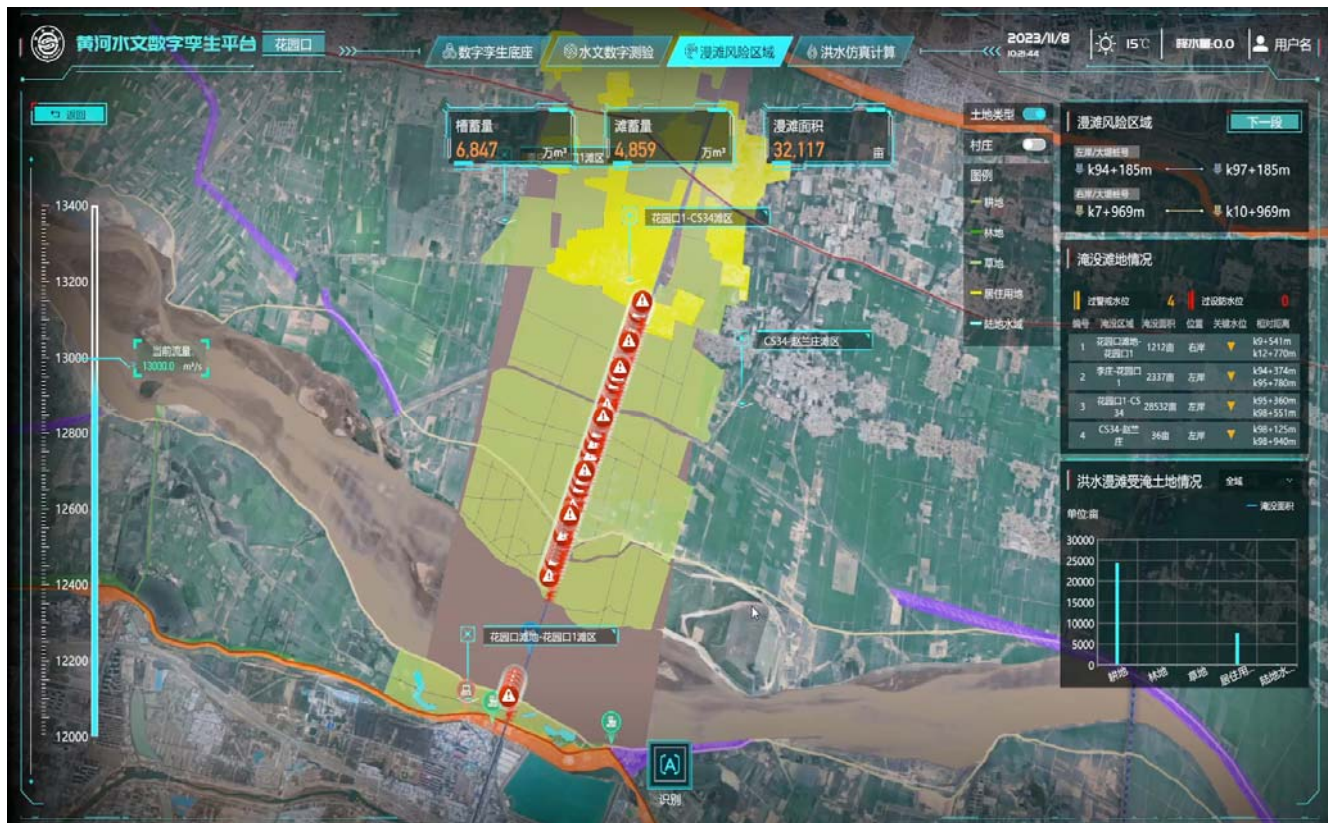


图1 滩区淹没风险评估智能模型分析结果

自研三维水动力模型和MIKE二维数学模型为核心,对该河段的预报洪水、设计洪水、历史洪水进行水动力学模拟推演,并实现洪水淹没过程的动态三维仿真模拟。研发了智能模型评估分析滩区的淹没风险,根据上游水情信息,利用数学模型进行下游洪水推演预报,结合底座高程数据对漫滩风险区域进行预警。通过三维流体仿真技术预演各预警区域漫滩洪水的演进过程。通过水利水文知识库技术智能提取测洪、防汛、抢险预案,构建了完整的“四预”功能体系。实现对该物理河段要素和水利治理管理过程的数字化映射、智能化模拟。使用历史特大洪水、2021秋汛和2023年调水调沙过程对平台进行了复盘分析验证,在黄河汇口河段应用效果良好。

2 平台应用场景

山东黄河水文数字孪生平台面向水利业务,为适应多目标、多层次复杂需求,尤其是黄河下游汇口河段的防洪“四预”重点需求,初步构建了描述水利对象空间特征、业务特征、关系特征和时间特征一体化组织的数据底板。按照数据精度和建设范围分为L1、L2、L3三级^[2],搭建了模型平台、知识平台,从而为数字孪生流域2+N应用体系提供支撑。

2.1 洪水灾害防御业务应用

实现黄河防洪“四预”功能^[3],根据上游来水迅速利用水动力模型推演出下游洪水预报的结果,对两岸漫滩区域、可能出险的工程进行预警,预演预警区域的洪水漫滩后在滩地演进的过程,针对不同情况提出相应的测洪预案、防汛预案、抢险预案。

2.2 水资源管理与调配业务应用

水资源管理与调配业务应用。对河段内引黄闸点的水位、流量实时模拟计算,为取水口基础数据、水资源监控提供信息服务,可结合水文监测断面数据开展低水流量调度,为水资源的管理与调配提供依据。

2.3 河湖管理保护应用

根据数字孪生底座中河道以内精准的倾斜摄影数据,可利用图像识别功能进行滩区土地性质分析,准确锁定河湖“四乱”等违法违规用地,促进河湖管理保护工作的高效开展。

3 主要技术研究

3.1 水动力学模型技术

平台采用DHI公司MIKE水动力数学模型为基础,并进行二次开发,开展了28km河段河道洪水演进计算分析工作,实现设计洪水模拟和历史洪水推演。MIKE21水动力模型基于数值解的平面二维浅水方程,即沿水深积分的不可压缩流体雷诺平均Navier-Stokes方程,服从布西涅斯克假定和静水压力假设^[4]。为动态反映洪水在平面上的演进过程,采用MIKE21模型模拟黄河下游洪水过程。通过MIKE水动力学模型的模拟,即可对该河段不同流量级别下进行设计洪水推演、历史洪水场景再现,得到洪水演进过程。通过二次开发,最终可呈现当前河段内任何计算网格的水位、流量、流速、流向等相关信息。模型计算时间步长为20分钟,数字孪生场景显示时间步长为1小时,计算单元采用的三角形非结构网格,最大网格面积为1500m²,网格单元数为2万个。已

完成 $7000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $11000\text{m}^3/\text{s}$ 等定流量洪水模拟。目前已完成1958年8月大洪水、1982年8月大洪水、1996年大洪水、2021年秋汛等场次洪水模拟。

3.2 滩区淹没风险评估智能模型

滩区淹没风险评估模型依据水动力学模型的模拟结果,同步智能适配流域时空地理、经济社会等大数据,自动生成区域洪水灾害影响仿真评估报告,分析上游不同来水情况下(水位/流量级别)滩区内不同利用类型土地的淹没面积及相应比例,并可根据此分析潜在的滩区损失,为主管部门汛期防汛调度、抗洪抢险等提供业务数据支撑。采用计算机视觉CV检测算法识别、跟踪和测量受灾土地类型和面积等,分析不同流量级下滩区内村庄的淹没风险,并实时动态展示村台高程与洪水位的水位差,分析区域洪水灾害的影响。本模型采用的计算机视觉CV检测算法主要有两类:

(1)使用语义分割算法,该方案数据预处理和训练过程耗时长,效果好;(2)利用大模型SAM的开源模型+分类模型,该方案借助开源模型,方案容易实现,效率高。

通过分析得到可能受灾的滩区位置、相对距离、村庄数量、不同利用类型土地的淹没面积及相应比例等,并以数据、图表等不同形式直观呈现在洪灾影响仿真评估报告中。分析结果如图1所示。

3.3 水利水文知识库技术

(1)预报预调方案库,可进行漫滩风险区域的模拟,对于各流量级来水条件下搜寻到的漫滩风险区域,实现洪水演进过程、洪水漫滩后传播过程的预报。(2)业务规则库,根据水面比降、水位流量关系等业务规则,构建水文知识库,整理河段内各防洪工程的抢险预案、水文站的测洪方案,为防汛、水资源调度提供可靠保障。(3)历史场景库,依据历史实测资料、河段水文规律,可重现各次历史大洪水在现有河道条件下发生时的场景。

3.4 水文在线监测技术

进行水文监测能力提升,建设新型水利监测站网,实时获取水文监测基础数据,为数字孪生平台的水利信息输入端提供可靠保障。利用黄委山东水文局自主开发的“山东黄河水文智能在线监测系统”,实现水文要素自动采集、在线传输,水文情报预报成果一站式汇集。

3.5 三维流体仿真技术

数字孪生流域需要解决的核心问题,即流体仿真。流体仿真

一直以来是计算机图形学中的尖端热门研究课题,如何真实、高效地进行流体的仿真解算,以及基于物理模型的仿真方法,一直是一个行业难题。针对这一难题,采用基于欧拉方法的流体推演仿真方法,基于拉格朗日方法的流体解算漫滩仿真方法,自主研发三维水动力模型,对流域内发生的水文过程进行模拟计算,确保数字孪生水利模拟流体的高精度仿真。

4 应用效果及结论

基于以上技术构建的数字孪生平台具有完备的“四预”功能应用体系,在2023年汛期洪水灾害防御中,对调水调沙过程进行分析复盘验证。黄河下游调水调沙前,针对不同级别洪水可能达到的量级进行了经验分析预报,调水调沙过程中移用2021年秋汛洪水过程和 $5000\text{m}^3/\text{s}$ 固定流量过程进行预演,分析了基于现状地形条件下的洪水演进及漫滩情形,调水调沙结束后,对不同场次洪水演进进行了复盘,进一步调整河道地形和模型参数,并进行了精度对比,完善了二维水动力模型,其中北店子水位站至泇口水文站的水位模拟精度最大误差为 0.12m 。

目前该平台在高精度数据采集及处理、多源异构数据融合技术、数学模拟结果仿真可视化等方面已具有成熟的推广条件。此外,在黄河水资源管理与调配中,可为取水口基础数据、水资源监控提供信息服务,结合水文监测断面数据开展低水流量调度;在黄河河湖管理保护中,可利用精准的倾斜摄影数据和图像识别功能,提高管理保护工作的效率。

[参考文献]

- [1]中华人民共和国水利部.数字孪生流域建设技术大纲(试行):水信息[2022]147号[S].北京,2022:1-2.
- [2]中华人民共和国水利部.水利业务“四预”基本技术要求(试行):水信息[2022]149号[S].北京,2022:5-6.
- [3]中华人民共和国水利部办公厅.数字孪生流域数据底板地理空间数据规范(试行):办信息[2022]325号[S].北京,2022:2-3.
- [4]衣秀勇,关春曼,果有娜.DHIMIKEFLOOD洪水模拟技术应用与研究[M].北京:中国水利水电出版社,2014.

作者简介:

岳成鲲(1970--),男,汉族,山东利津人,本科,正高级工程师,研究方向:水文及水资源管理研究,黄河水利委员会山东水文水资源局。

杨钊(1989--),男,汉族,山东济南人,本科,工程师,研究方向:水文信息化与水文情报,黄河水利委员会山东水文水资源局。