

## 基于“四预”的永定河洪水预报调度系统研究与应用

李琛亮, 刘国庆, 杨光, 黎东洲, 范子武, 马强

### Development and application of Yongding River flood forecasting and dispatching system based on “four forecasts” system

LI Chenliang, LIU Guoqing, YANG Guang, LI Dongzhou, FAN Ziwu, MA Qiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220218001>

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 基于四旋翼无人机的桥梁裂缝检测系统设计

Design of quadrotor-based bridge crack detection system

水利水运工程学报. 2018(1): 102 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.015>

##### 基于安全监测的水闸健康诊断体系研究

Analysis of sluice health diagnosis system based on safety monitoring

水利水运工程学报. 2018(5): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.001>

##### 基于随机森林与支持向量机的水库长期径流预报

Long-term inflow forecast of reservoir based on Random Forest and support vector machine

水利水运工程学报. 2020(4): 33 <https://doi.org/10.12170/20190626001>

##### 大型河工模型分布式表面流场测量系统研制及应用

Development and application of measurement system for surface flow field in large-scale river model test

水利水运工程学报. 2018(1): 17 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.003>

##### 大型潮汐河工模型试验控制系统设计及应用

Design and application of control system for large tidal river model tests

水利水运工程学报. 2018(1): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.001>

##### 特高拱坝动态安全风险系统研发及应用

Development and application of dynamic safety risk analysis system for super-high concrete arch dam

水利水运工程学报. 2020(1): 112 <https://doi.org/10.12170/20181201002>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220218001

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. (LI Chenliang, LIU Guoqing, YANG Guang, et al. Development and application of Yongding River flood forecasting and dispatching system based on “four forecasts” system[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(6): 45-53. (in Chinese))

# 基于“四预”的永定河洪水预报调度系统研究与应用

李琛亮<sup>1</sup>, 刘国庆<sup>2,3</sup>, 杨光<sup>2</sup>, 黎东洲<sup>2</sup>, 范子武<sup>2,3</sup>, 马强<sup>4</sup>

(1. 水利部海河水利委员会, 天津 300161; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 近年来, 我国洪水频发, 对人民群众的生命财产安全造成了严重的威胁。为能够提前研判洪水态势, 减轻洪灾损失, 依照水旱灾害防御的业务特点, 遵循预报、预警、预演、预案的理念, 提出了以“数字汇聚-数据底板-孪生平台-四预体系”为主线的洪水预报调度系统总体架构, 梳理了系统的业务功能与需求。结合永定河流域特点, 采用流域洪水预报调度、模型与系统实时交互和二三三维地理信息渲染展示等关键技术, 构建了基于“四预”体系的永定河洪水预报调度系统, 支撑永定河洪水调度预演, 为洪水预报调度“四预”体系的建设提供借鉴与参考。

**关键词:** 永定河; “四预”体系; 预报调度; 预演; 数字孪生

**中图分类号:** TV62      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-640X(2022)06-0045-09

物联网、云计算、大数据、5G 和人工智能等新一代信息技术的快速发展为我国信息化与智慧化提供了重要机遇<sup>[1-2]</sup>。基于水利专业模型, 采用新一代信息技术赋能水利业务, 建设智慧水利, 是对区域水安全保障的有效支撑<sup>[3-4]</sup>。2021年12月, 水利部召开数字孪生流域建设工作会议, 提出了以数字化、网络化、智能化为主线, 构建数字孪生流域, 开展智慧化模拟, 支撑精准化决策, 全面推进算据、算法、算力建设, 加快构建具有“四预”功能的智慧水利体系, 为智慧水利的建设指明方向<sup>[5]</sup>。

洪水预报与水工程调度相关系统的开发起步于20世纪50年代, 初期系统以水文信息的统计存储、数据查询功能为主; 80年代左右, 通过集成水文模型, 洪水预报调度系统能够初步实现流域的洪水预报功能, 但由于没有接入实时雨水情信息, 预报结果在及时性与准确性等方面存在不足; 90年代中期, 随着计算机网络的普及, 预报调度系统更加广泛地应用于不同区域、不同对象的防洪决策中, 但是这些系统多以C/S架构为主, 各系统开发环境、标准的不统一导致系统间相对独立, 无法做到服务和数据的互联互通<sup>[6-7]</sup>。21世纪以来, 通过国家防汛抗旱指挥系统的建设, 我国防汛抗旱信息化技术水平得到全面提升。目前, 随着网络信息技术与水利专业模型算法的成熟, 洪水预报调度系统朝着数据标准化、业务集成化、服务智能化、展示立体化的方向发展<sup>[6-7]</sup>; 数字孪生流域、“四预”功能等理念的提出也为洪水预报调度系统的研发提供了新的思路。按照新的理念, 本文选取永定河流域为典型区, 结合流域防洪工程体系, 在梳理防洪业务逻辑, 融合“四预”功能, 构建流域数据底板, 集成一二维耦合的水文水动力模型的基础上, 设计典型区洪水“四预”系统总体构架, 并进行系统功能开发。

收稿日期: 2022-02-18

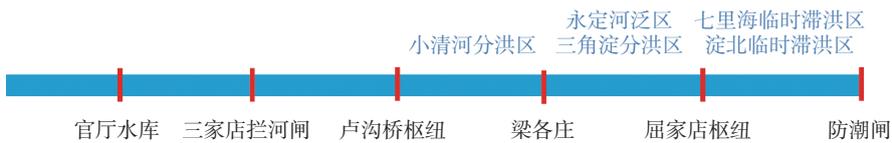
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB2102003); 江苏省水利科技重大技术攻关项目(2017004, 2020021, 2022056); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y121002)

作者简介: 李琛亮(1985—), 男, 山东德州人, 高级工程师, 博士, 主要从事流域防洪调度研究。

E-mail: chenliang-li@163.com      通信作者: 刘国庆(E-mail: gqliu@nhri.cn)

## 1 流域防洪工程体系

永定河流域位于  $111^{\circ}55'E\sim 117^{\circ}45'E$ ,  $38^{\circ}55'N\sim 41^{\circ}26'N$  之间,地跨京、津、冀、晋和内蒙古 5 个省(自治区、直辖市)。目前已形成了由册田水库、友谊水库、官厅水库,440 km 干流堤防,卢沟桥、屈家店等水闸枢纽,小清河分洪区、永定河泛区、三角淀分洪区等蓄滞洪区组成的防洪工程体系,防洪标准基本达到百年一遇的设计标准<sup>[8]</sup>。永定河流域防洪工程体系概化见图 1。其中,官厅水库控制面积为 4.34 万  $\text{km}^2$ ,占全流域 92.3%,是流域中上游洪水调蓄的重要控制节点;卢沟桥枢纽是永定河干流的控制性枢纽,承担着小清河分洪控制的重要任务;屈家店枢纽担负着向永定新河和北运河泄洪的任务,是保护天津市防洪安全的重要枢纽。这些防洪工程将永定河干流划分为不同河段,为了对永定河流域洪水进行全过程跟踪分析,需要在洪水预报调度系统中以上述防洪控制工程为节点,针对不同防洪目标,实现分段调控预演功能。



## 2 系统总体架构

永定河洪水“四预”系统采用 B/S 模式,采用数值模拟、智能算法、数字孪生等信息技术,建设“三网合一、四层融合、二体系贯穿”的架构体系。横向融合层面,主要包括数字汇聚、数据底板、孪生平台与“四预”体系 4 个功能层;纵向贯穿层面,主要构建洪水预报调度标准化和数字信息安全保障两大体系,满足水文预报、洪水预警、调度预演、预案发布等业务功能的需求<sup>[9]</sup>。系统建设的总体架构见图 2。

### 2.1 数字汇聚

基于水物理网、水信息网、水管理网三网合一的水网全要素信息,结合永定河流域洪水预报调度的业务需求,按照基础数据、监测数据、管理数据、跨行业数据、地理信息数据 5 个类别,收集汇聚物理流域相关的水网信息。其中,基础数据包括干支流、水库、枢纽、堤防、蓄滞洪区等;监测数据包括雨水工情、视频监控、洪水淹没灾情等;管理数据包括工程调度规则、运行维护台账等;跨行业数据涉及气象、交通、社会经济等;地理信息是指地理空间数据,包括数字高程、数字表面模型、正射影像、点云等。

### 2.2 数据底板

制定数字流域数据资源目录,形成数据资源管理规范,结合雨水工情等已建数据库,按照标准化的数据结构进一步补充数据库建设,对物理流域相关的数字信息进行管理。按照“面-线-点”的建设思路,借助数据治理、3S 技术、BIM 模型等信息技术,结合高精度遥感数据,构建永定河流域面数据底板;在构建官厅水库、卢沟桥枢纽、屈家店枢纽等水利工程单体模型的基础上,以河流“线”串联工程“点”的形式,融合形成永定河流域“面-线-点”的数据底板。

### 2.3 孪生平台

利用水文预报、一二维洪水演进、工程调度等水利专业模型与遥感解译、视频识别、机器学习等智能算法为流域的数据底板进行赋能,提供洪水预报调度相关业务场景的解决方案。结合虚拟现实、三维建模等可视化技术,为业务场景的模拟仿真提供实时渲染和三维可视化呈现,形成物理流域的孪生体,实现数字孪生流域与物理流域实时同步仿真运行。

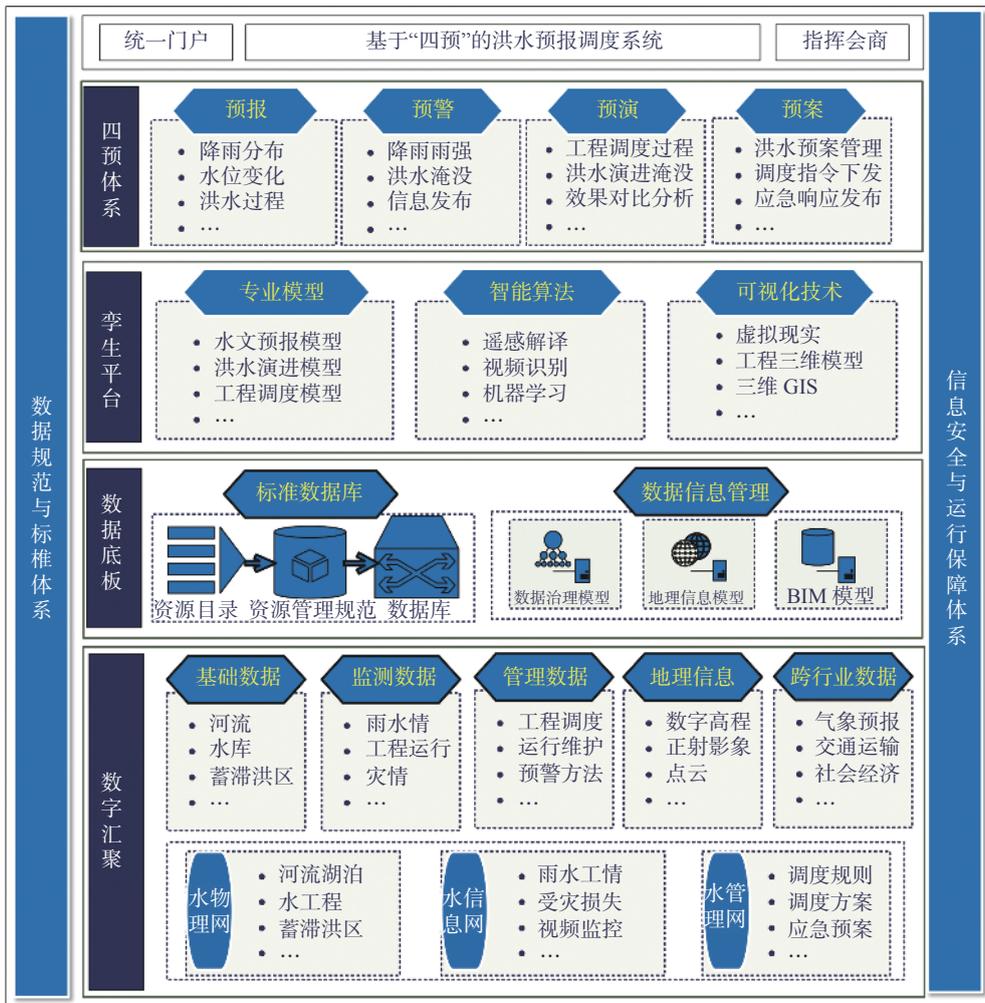


图 2 系统总体架构设计

Fig. 2 Overall system architecture design

### 2.4 “四预”体系

按照“预报是基础、预警是前哨、预演是手段、预案是目的”的理念,梳理洪涝灾害防治中预报、预警、预演、预案的业务逻辑。针对永定河流域,需要对官厅水库、卢沟桥枢纽等工程控制节点的人流进行精准的滚动预报,实现控制节点水位、流量变化过程的预先判断;预警是指根据预报结果,结合预警阈值标准,提前向水利主管部门和公众告知警情信息,为应急措施的制定和社会公众的避灾提供指引;预演是指在特定的降雨、初始水位等边界条件下,利用模型对永定河不同河段防洪工程运行方案的调度效果进行模拟仿真和结果动态展示,为调度方案的科学制定提供支撑;预案是结合预演结果对比分析,综合考虑洪水防御的关键因素,选定工程调度方式,以此制定调度预案,并能够在洪水演进过程中实时、快速下发调度指令。

## 3 关键技术

### 3.1 流域洪水预报调度

预报调度模型是实现防洪“四预”业务的基石。为准确模拟永定河流域洪水演进与调度过程,本文构建了研究区水文水动力一体化模型与重点水利工程调度模型。其中,官厅水库以上采用降雨径流系数法分

水面、城市建设用地、水田、旱地等不同下垫面进行产流计算;官厅水库与卢沟桥枢纽间(官厅-山峡区间)主要是山区型河道,采用马斯京根法模拟洪水演进;卢沟桥枢纽至防潮闸之间的河道洪水均采用一维水动力学模型进行模拟,基本方程见式(1),采用 Preissmann 隐式格式方法进行离散求解。

$$\begin{cases} B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Qu) + gA \frac{\partial h}{\partial x} - gAs_0 + gAs_f = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $B$ 为断面宽度;  $z$ 为水位;  $Q$ 为流量;  $t$ 为时间;  $x$ 为距固定断面的距离;  $g$ 为重力加速度;  $A$ 为过水断面面积;  $h$ 为水深;  $s_0$ 为河底比降;  $s_f$ 为摩阻比降;  $u$ 为断面平均流速。

大宁水库、永定河滞洪水库、小清河分洪区以及永定河泛区等区域的洪水演进属于平面大范围的自由表面流动,洪水水深尺度远小于平面尺度,故采用二维水动力学模型进行模拟,基本方程见式(2)~(4),在求解时采用非结构化网格对计算域进行剖分。一二维模型耦合时,采用经验公式计算一、二维之间的流量交换。

$$\text{连续性方程:} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = q \quad (2)$$

$$\text{X方向动量方程:} \quad \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial huv}{\partial y} = s_x \quad (3)$$

$$\text{Y方向动量方程:} \quad \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = s_y \quad (4)$$

式中:  $h$ 为水深;  $t$ 为时间;  $x$ 、 $y$ 分别为  $X$ 、 $Y$  方向的距离;  $u$ 、 $v$ 分别为  $X$ 、 $Y$  方向的流速;  $q$ 为入流量;  $g$ 为重力加速度;  $s_x$ 和  $s_y$ 为源项。

官厅水库、卢沟桥枢纽、屈家店枢纽等节点均构建规则调度模型按照洪水量级的不同进行调度。为提高模型的计算效率,满足在线实时计算,支撑防汛决策的需求,模型利用 CPU+GPU 异构并行计算技术,采用“grid-block-thread”三级并行组织形式进行编程,充分发挥了 GPU 的超高运行能力以及 CPU 的逻辑控制能力,将全流域场次洪水模拟计算时间控制在 5 min 以内。模型精度方面,由于缺少合适的实测洪水过程,为验证计算精度,将本模型不同设计边界的计算结果与《北京新机场洪水影响评价报告》已有计算成果进行对比<sup>[10]</sup>(见表 1)。可以看出,各设计边界条件下,模型计算与已有成果的梁各庄、屈家店枢纽等节点最高水位差值均在 20 cm 以内,这说明模型精度符合要求。

表 1 永定河干流关注断面最高水位模拟结果对比  
Tab. 1 Comparison of simulation results of concerned sections in the Yongding River main stream 单位: m

设计边界	梁各庄			屈家店		
	已有成果	模型计算	差值	已有成果	模型计算	差值
50年一遇	23.93	23.99	0.06	5.56	5.44	-0.12
100年一遇	23.93	24.01	0.08	5.62	5.49	-0.13
200年一遇	23.95	24.04	0.09	5.83	5.63	-0.20

### 3.2 模型与系统实时交互

模型与系统实时交互技术是永定河洪水预报调度系统功能应用的基础,是实现模型库、模型方案计算结果数据与系统交互的核心。系统中需实时交互的数据可以分为模型网络库、事件库、逻辑库 3 部分。其中,模型网络数据是建模的基础数据,包括断面、河岸、水库、水闸、泵站、涵洞、道路、2D 区间、结果多边

形等; 模型事件库为模型方案对应的边界条件, 包括降雨、水位、流量等; 模型逻辑库为官厅水库、卢沟桥枢纽等永定河流域重点水利工程的调度方式。

上述由模型提供的数据与系统实现功能应用的数据在格式与配置方式等方面存在差异。为此独立开发了数据交互服务引擎, 用于对模型输出的二进制数据、自有格式文本数据进行解析转义组装, 形成通用的 XML、JSON、文本格式。此外, 对于请求模型服务的数据也通过数据交互服务进行拆解重组, 生成模型服务可识别的数据, 完成模型服务接口的调用功能, 从而实现模型与系统数据的实时交互。模型数据交互逻辑见图 3。

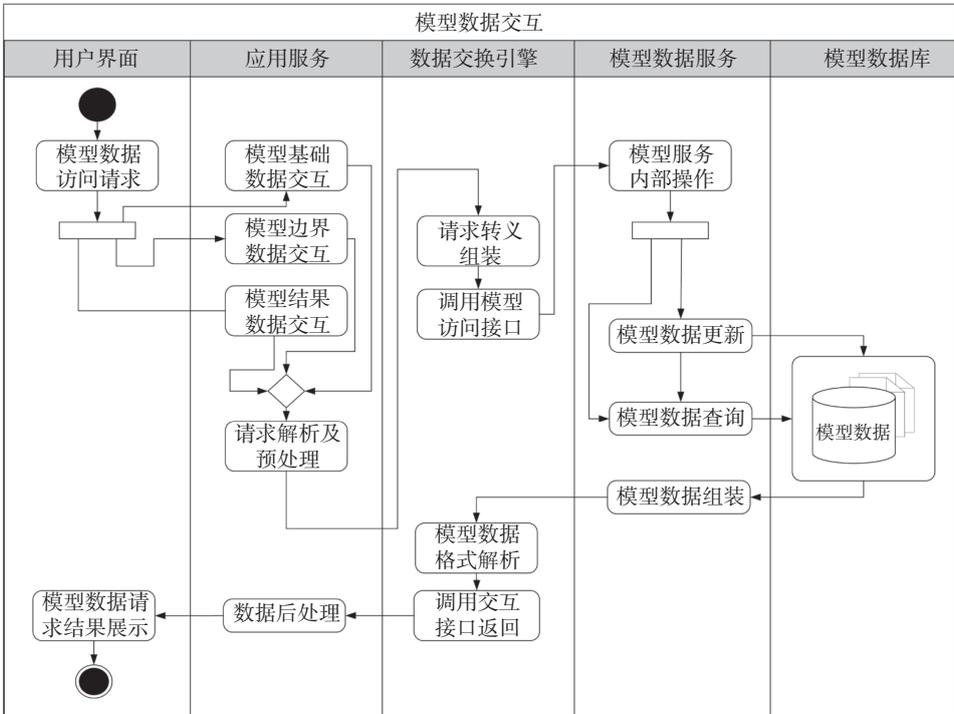


图 3 模型数据交互逻辑图

Fig. 3 Model data interaction logic diagram

具体地, 模型与系统数据接口设计为实时数据类、模型管理类、模型输出类, 其中实时数据类能够实时对接、读取雨、水、工情数据库, 并将数据输入模型中, 作为模型的计算边界; 模型管理类能够完成建模数据的更新, 包括主要参数(径流系数、糙率等)、水利工程调度规则、闸门过流能力曲线等; 模型输出类则是将模型计算的结果按照系统所需的数据格式进行整理。通过上述接口, 在实现数据实时传递的同时也完成了模型计算的控制。

### 3.3 二三维地理信息渲染

永定河洪水预报调度系统涉及基础地理信息、水文、气象、淹没等多元化的地理信息数据, 数据量庞大。为实现河道洪水动态演进、蓄滞洪区洪水演进等不同场景的实时渲染, 节省计算机算力, 系统采用了基于 WebGL (Web Graphics Library) 的地理信息展示框架<sup>[11]</sup>。在渲染过程中, 为了避免损失地理信息数据, 系统采用连续 LOD 技术绘制几何体表面状况。具体地, 渲染前, 系统采用 Douglas-Peucker 算法, 对淹没原始矢量数据进行分层简化, 减少原始数据量; 而在渲染阶段, 计算 LOD 层数据顶点时, 基于深度偏移值动态设置方法处理顶点数据, 以减少计算量及渲染的顶点数, 从而达到提升渲染效率, 减少渲染响应时间的目的<sup>[12]</sup>。

## 4 系统主要功能

基于“四预”体系,按照流域防洪预报调度业务需求,结合水利一张图矢量数据以及重点防洪工程的数字化三维模型,构建系统的数据底板;采用数字孪生、三维建模、720°VR 全景、数值模拟和智能分析等技术手段,实现流域雨水工情的实时监测、洪水的预报预警、工程调度的预演以及预案的管理下发等业务功能<sup>[13-14]</sup>。系统主要业务功能模块见图 4。

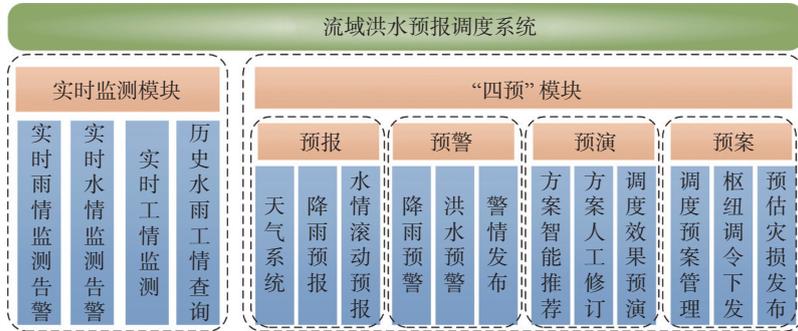


图 4 系统功能模块设计

Fig. 4 System function module design

### 4.1 雨水情实时监测

以永定河流域现有物理感知站网为基础,以降雨量、水位、流量、视频等要素为对象,构建系统的实时监测模块。提供标准化接口,对接流域水文监测数据,结合不同站点水文要素的警戒阈值,实现雨水情的全面感知与实时告警,并对水文要素的变化态势进行实时动态分析;接入重点水利工程视频,实时掌握闸门启闭情况、闸门开度等工程运行状态,并对异常运行进行告警;建立面向不同要素的监测数据库,实现历史雨、水、工情信息的存储与查询。

### 4.2 实时模拟计算

系统在集成水文水动力一体化模型的基础上,能够实现官厅水库以上、官厅水库-卢沟桥枢纽段、卢沟桥枢纽-屈家店枢纽等河段的水文预报及水动力模拟,并通过数据交互服务引擎实现模型在线计算及模型数据与系统的实时交换。

系统计算实例:受强降雨影响,官厅水库以下,卢沟桥枢纽以上的山峡区间形成较大洪水,根据卢沟桥枢纽控泄规则,分别设定按照 2 500 和 3 000  $\text{m}^3/\text{s}$  控泄的方案,作为水动力学计算的上边界,并输入系统。方案如图 5 所示。利用系统计算不同方案永定河洪泛区淹没过程,计算结果见表 2,淹没范围见图 6。

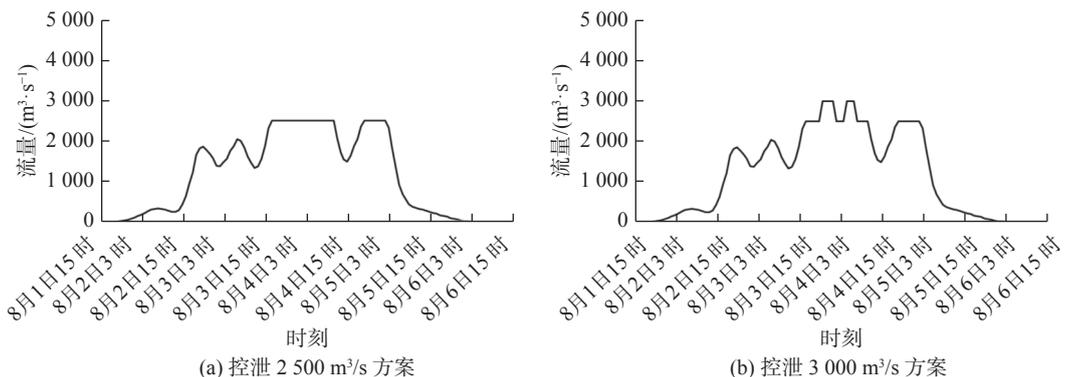


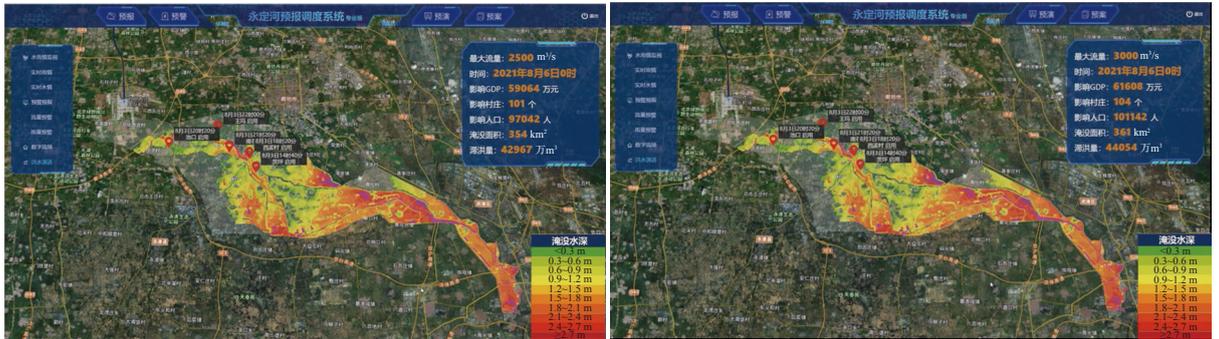
图 5 卢沟桥不同控泄方案

Fig. 5 Different drainage schemes of Lugou Bridge

表 2 卢沟桥枢纽不同控泄方案对永定河泛区影响对比

Tab. 2 Comparison of impacts of different drainage schemes of Lugouqiao hydroproject on Yongding River floodplain

卢沟桥控泄方案	影响GDP/万元	影响村庄/个	影响人口/人	淹没面积/km <sup>2</sup>	滞洪量/万m <sup>3</sup>
控泄2 500 m <sup>3</sup> /s	59 064	101	97 042	354	42 967
控泄3 000 m <sup>3</sup> /s	61 608	104	101 142	361	44 054



(a) 控泄 2 500 m<sup>3</sup>/s 方案

(b) 控泄 3 000 m<sup>3</sup>/s 方案

图 6 卢沟桥不同控泄流量对永定河泛区影响对比

Fig. 6 Comparison of effects of different discharge of Lugou Bridge on Yongding River floodplain

### 4.3 “四预”功能

在预报方面,系统实时接入气象信息,采用全流域水文水动力耦合模型,得到官厅水库、三家店、卢沟桥和屈家店等重要节点洪水的网格化滚动预报成果,滚动周期为 1 h;并提供全流域雨量站实测降雨过程、水文站水位流量过程以及墒情空间信息高精度展示等功能。

在预警方面,系统根据气象预报和水情预报结果,按照相应的预警标准,以面降雨量、官厅、山峡等站点流量过程为预警对象,提供永定河流域降雨、洪水、灾损等防洪减灾全要素的全过程跟踪预警展示功能,预警等级分红、橙、黄、蓝四级;提供警情轻重及影响范围的智能判别功能,并进行预警信息的实时推送。

在预演方面,系统自动匹配预报降水量级、时空分布、河道(水库)水位等信息,基于实时工况,提供调度方案的预演功能;满足调度方案的人工干预功能,可以对方案中水利工程的调度规则、调度方式进行修改;针对选定的调度方案采用三维 GIS 地图的飞行模式串联洪水的演进过程,实现不同调度情景下官厅水库拦洪削峰效果,小清河分洪区、永定河泛区等蓄滞洪区二维淹没与滞洪效果,展示永定河、永定新河等河道洪水演进的动态过程。

在预案方面,系统建立调度预案的历史库、实时库和预报库,实现预案的存储更新管理,提供官厅水库、卢沟桥枢纽、屈家店枢纽等工程调度指令的自动生成与下发,并实现洪水影像范围、灾情损失、应急响应的发布。功能界面见图 7。



(a) 预报界面



(b) 预警界面



图7 “四预”功能界面

Fig. 7 “Four forecasts” function interface

## 5 结 语

本文结合“四预”理念,从数字汇聚、数据底板、孪生平台、四预体系4个层面探讨洪水预报系统的架构,并将其业务功能划分为实时监测模块与“四预”模块,据此构建了智能化的永定河洪水预报调度系统。该平台可支撑防汛演练过程中天气形势预测分析、水文测报、预警发布、洪水调度、蓄滞洪区运用、视频调度等演练科目,能够为永定河流域洪水调度决策提供指导,为智慧水利体系的建设与完善提供帮助,增强了防汛抗洪指挥决策的数字化水平。

## 参 考 文 献:

- [1] 李德仁,邵振峰,杨小敏.从数字城市到智慧城市的理论与实践[J].地理空间信息,2011,9(6):1-5,7.(LI Deren, SHAO Zhenfeng, YANG Xiaomin. Theory and practice from digital city to smart city[J]. Geospatial Information, 2011, 9(6): 1-5, 7. (in Chinese))
- [2] 左其亭,纪义虎,马军霞,等.人与自然和谐共生的水利现代化建设体系及实施路线图[J].人民黄河,2021,43(6):1-5.(ZUO Qiting, JI Yihu, MA Junxia, et al. Water conservancy modernization construction system and implementation roadmap of human-nature harmony theory[J]. Yellow River, 2021, 43(6): 1-5. (in Chinese))
- [3] 张建云,刘九夫,金君良.关于智慧水利的认识与思考[J].水利水运工程学报,2019(6):1-7.(ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, JIN Junliang. Understanding and thinking of smart water conservancy[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 1-7. (in Chinese))
- [4] 段勇,杜文.黄河防洪防凌调度决策会商系统建设[J].人民黄河,2020,42(12):156-160,168.(DUAN Yong, DU Wen. The Yellow River's flood and ice control consultation & decision support system[J]. Yellow River, 2020, 42(12): 156-160, 168. (in Chinese))
- [5] 刘昌军,吕娟,任明磊,等.数字孪生淮河流域智慧防洪体系研究与实践[J].中国防汛抗旱,2022,32(1):47-53.(LIU Changjun, LÜ Juan, REN Minglei, et al. Research and application of digital twin intelligent flood prevention system in Huaihe River Basin[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(1): 47-53. (in Chinese))
- [6] 张建立,李纪人,禹雪中,等.基于RS和GIS的淮河流域洪水预报与调度系统[J].南水北调与水利科技,2007,5(5):28-30.(ZHANG Jianli, LI Jiren, YU Xuezhong, et al. Research on the flood forecasting and dispatching system for Huai River Basin based on RS and GIS technology[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(5): 28-30. (in Chinese))
- [7] 周惠成,彭勇,王国利.基于图论的水库群洪水预报调度系统的集成研究[J].防灾减灾工程学报,2006,26(4):383-388.(ZHOU Huicheng, PENG Yong, WANG Guoli. Integrative research on the system of multi-reservoir flood forecast and operation based on graph theory[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(4): 383-388. (in Chinese))

Chinese))

- [8] 李琛亮. 永定河“四预”智慧防洪系统建设初探[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(3): 57-60. (LI Chenliang. Preliminary study on construction of “forecast, early warning, rehearsal and plan” intelligent flood prevention system of Yongding River[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(3): 57-60. (in Chinese))
- [9] 水利部网信办. 智慧水利建设顶层设计[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2021. (Internet Information Office of the Ministry of Water Resources of People’s Republic of China. Top level design of intelligent water conservancy construction[R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People’s Republic of China, 2021. (in Chinese))
- [10] 中水北方勘测设计研究有限公司. 北京新机场洪水影响评价报告[R]. 天津: 中水北方勘测设计研究有限公司, 2014. (Zhongshui North Survey and Design Research Co., Ltd. Flood impact assessment report of Beijing new airport[R]. Tianjin: Zhongshui North Survey and Design Research Co., Ltd, 2014. (in Chinese))
- [11] 刘爱华, 韩勇, 张小垒, 等. 基于WebGL技术的网络三维可视化研究与实现[J]. 地理空间信息, 2012, 10(5): 79-81, 7. (LIU Aihua, HAN Yong, ZHANG Xiaolei, et al. Research and implementation on the Web3D visualization based on WebGL[J]. Geospatial Information, 2012, 10(5): 79-81, 7. (in Chinese))
- [12] 李尚林, 胡夏, 刘晓平. 三维GIS中矢量数据的高效精确渲染方法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(5): 965-972. (LI Shanglin, HU Xia, LIU Xiaoping. Precisely and efficiently vector data rendering method in 3D GIS[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(5): 965-972. (in Chinese))
- [13] 秦昊, 陈瑜彬. 长江洪水预报调度系统建设及应用[J]. 人民长江, 2017, 48(4): 16-21. (QIN Hao, CHEN Yubin. Construction and application of Changjiang River flood forecasting and dispatching system[J]. Yangtze River, 2017, 48(4): 16-21. (in Chinese))
- [14] 刘晓涛. 新时期上海水旱灾害防御工作思路[J]. 中国水利, 2019(9): 5-7, 17. (LIU Xiaotao. Current working contents of flood control and drought relief in Shanghai[J]. China Water Resources, 2019(9): 5-7, 17. (in Chinese))

## Development and application of Yongding River flood forecasting and dispatching system based on “four forecasts” system

LI Chenliang<sup>1</sup>, LIU Guoqing<sup>2,3</sup>, YANG Guang<sup>2</sup>, LI Dongzhou<sup>2</sup>, FAN Ziwu<sup>2,3</sup>, MA Qiang<sup>4</sup>

(1. Haihe River Water Conservancy Commission, Tianjin 300161, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory of Taihu Basin Water Security Management, Nanjing 210029, China; 4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In recent years, floods occur frequently in China, which poses a serious threat to the safety of people’s lives and property. To study and judge the flood situation in advance and reduce flood losses, according to the operational characteristics of flood and drought prevention and following the concepts of “four forecasts”, this paper puts forward an overall architecture of flood forecasting and control system based on “digital convergence - data backplane - twin platform - four pre-system”, and combs the business function and logic of the system. Based on the present situation of river system and flood control project in the Yongding River Basin, key technologies such as coupling simulation of hydrological hydrodynamic model and flood control operation model, real-time interaction between nested model and system data, and dynamic display of two- and three-dimensional geographic information are adopted, and a flood forecasting and control system of the Yongding River based on “four forecasts” is constructed to provide support for the flood dispatching decision-making of the Yongding River.

**Key words:** Yongding River; four pre-system; forecast scheduling; rehearsal; digital twins