

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.021

太湖流域超标特大洪水风险预警系统建设及应用

吴娟¹,林荷娟¹,姜桂花¹,季海萍¹,刘敏¹,杜诗蕾²

(1.太湖流域管理局水文局(信息中心),上海 200434; 2.上海蓝泰信息咨询有限公司,上海 201508)

摘要:为做好超标洪水调度、保障流域防洪安全,开发建设了由基于水文水动力学耦合的超警超保风险区域预警模型与基于水文学法的洪水淹涝风险快速评估模型共同组成的超标特大洪水风险预警系统,该系统在太湖流域预报调度一体化系统中通过智能交互方式进行模型与系统的紧密集成,实现了预报调度成果的可视化。基于水利一张图的超警超保与淹涝动态展示,实现了预报产品从点到面、从常规预报到影响预测的突破,以及洪水风险由静态评估向实时快速动态分析的转变。应用结果表明:系统在 2020 年太湖流域性大洪水中累计发布超警超保风险提示 39 期、洪水淹涝风险评估 4 期,预测结果与实际基本一致,为科学调度防御超标洪水提供了技术支撑,避免了江苏省苏州市 3 万多的人员转移,有力保障了太湖流域防洪安全。

关键词:洪水风险预警系统;洪水预报;水文水动力学耦合模型;太湖流域

中图分类号:TV122;P338 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)02-0164-07

Risk warning system construction and application under excessive extreme flood

WU Juan¹, LIN Hejuan¹, JIANG Guihua¹, JI Haiping¹, LIU Min¹, DU Shilei²

(1. Bureau of Hydrology Information Center of Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China;
2. Shanghai Lantai Information Consulting Co., Ltd., Shanghai 201508, China)

Abstract: In order to dispatch the excessive extreme flood and ensure the flood control safety, the early warning model for water areas exceeding the alarming and guaranteed level based on the coupled hydrology and hydrodynamic models, and the rapid assessment model of flood risk based on the hydrological method. The models and the system were intelligently interacted in the forecasting and dispatching integration system of the Taihu Lake Basin, to realize the visualization of forecasting and scheduling results. Based on the National Water One Map System, the dynamic demonstration of water exceeding the alarming and guaranteed level, with the risk assessments of flood inundation, achieved the product breakthroughs from station forecasting to area prediction, from conventional forecasting to impacting prediction, as well as the flood risk from static evaluation to real time dynamic assessment. The system has been applied in resisting the 2020 major flood in the Taihu Lake Basin. The results showed that 39 risk reminders of water exceeding the alarming and guaranteed level, as well as 4 risk assessments of flood inundation, were released by the Bureau of Hydrology Information Center of Taihu Lake Basin Authority. The forecasting results were consistent with the observation, provided technical support for the dispatching, and avoided more than 30 thousand people evacuation in Suzhou city of Jiangsu Province, which guaranteed the safety of flood control in the Taihu Lake Basin.

Key words: early warning system of flood risk; flood forecasting; coupled hydrology and hydrodynamic models; Taihu Lake Basin

太湖流域是我国经济最发达、人口最密集、大中城市最集中的地区之一,流域位于亚热带季风区的长江下游,是典型的平原感潮河网地区,受梅雨、台风暴雨等综合影响,洪涝灾害频繁^[1]。20 世纪 90 年代以来,流域经济社会持续高速发展,防洪工程体系进一步完善,尤其是大中型城市防洪工程基本建成并投入运用,流域、区域和城市防洪能力发生了较大的变化,相应区域的风险也发生了变化,为防汛减灾带来了新的挑战^[2]。随着长三角一体化国家战略的实施,太湖流域水安全保障对洪水预报与风险预警工作提出了更高的要求^[3]。受地形地貌影响和工程能力限制,太湖流域外排能力仍然不足,加上流域经济社会高速发展,普遍

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0407900);上海市科技创新行动计划(21002410200)

作者简介:吴娟(1987—),女,高级工程师,硕士,主要从事水文预报、水资源与水环境研究。E-mail:wujian3412@163.com

引用本文:吴娟,林荷娟,姜桂花,等.太湖流域超标特大洪水风险预警系统建设及应用[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):164-170.

WU Juan, LIN Hejuan, JIANG Guihua, et al. Risk warning system construction and application under excessive extreme flood[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 164-170.

存在“淹不起、淹不得”的情况^[4]。

水利数据之间、数据与模型之间、模型与模型之间的关联程度和可视化水平较低导致对新形势下水利业务的支撑能力不足。主要体现在:①预报要素仍停留在传统的水位、流量,尚未开展洪水风险预测预警;②虽已开展风险图编制工作,但由于计算速度极慢,目前仍然停留在太湖流域某一区域的静态风险图上,不能用于全流域风险实时预测预警^[5];③模型与数据关联度差,模型计算前处理、后处理耗时长,时效性不足^[6];④预测预报结果展示多数停留在表格、简单图表上,基于地图的可视化动态展示不足^[7]。

近年来,水利部高度重视智慧水利建设,并在全国范围内开展智慧水利先行先试工作^[8]。基于 GIS 技术,快速融合实时水雨情信息、集成多种预报模型^[9]以提高洪水风险预测预报预警能力与成果可视化^[10],已成为当前智慧水利、防汛减灾的必然要求^[11]。水利部《智慧水利总体方案》确定了天空地一体化水利感知网、高速互联的水利信息网、智慧水利大脑、创新协同的智能应用、网络安全体系、保障体系等 6 项重要任务^[12]。超标特大洪水风险预警系统是太湖流域智慧水利的重要组成部分,由基于水文水动力学耦合的超警超保风险区域预警模型、基于水文学法的洪水淹涝风险快速评估模型共同组成,已集成在太湖流域预报调度一体化系统中,可为超标洪水调度、保障流域防洪安全和人员及财产安全提供重要的技术支撑。

1 太湖流域预报调度一体化系统

1.1 系统架构

太湖流域预报调度一体化系统采用 B/S 模式开发,由数据层、业务层、应用层以及信息安全管理体系统构成,其整体架构如图 1 所示。数据层在水文数据库中,对模型所需的实时雨水情、工程调度等基础水文特征信息进行分类存储,并保证实时更新,系统调用模型时无需重复计算,直接显示报表,提高前端显示的效率,从而解决了模型计算前处理时效性不足的问题。业务层在数据层与应用层的数据交换中起承上启下作用,集成了模型计算模块和成果展示模块,并对水文水动力学耦合模型、水文学法的洪水淹涝模型等数据接口进行统一封装。应用层为用户提供与系统交互的界面(雨水情综合监视、预报调度等),底图为水利一张图,提供图文交互展示功能。基于 Json 和 Web Service 技术,超标特大洪水风险预警系统高度耦合了水文水动力

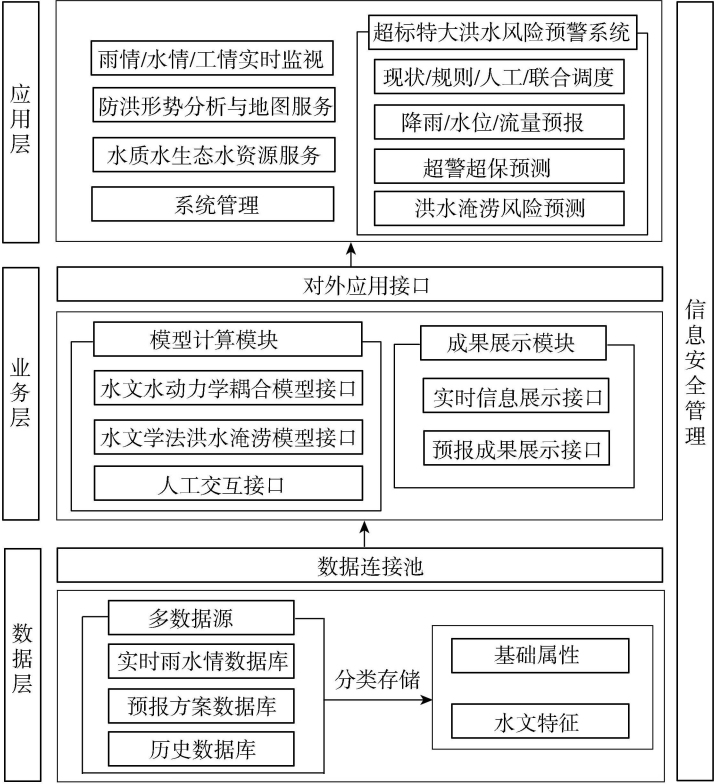


图 1 太湖流域预报调度一体化系统架构

Fig. 1 Integrated system architecture of forecasting and scheduling for the Taihu Lake Basin

学耦合模型与水文学法的洪水淹涝模型,实现了多维度、多时空尺度的仿真模拟。系统基于 Entity framework 技术架构、WebSocket 微服务云架构,采用前端缓存、数据库连接池与预报调度并发计算等技术,提高了模型计算效率及系统的实用性与扩展性。其中:水文水动力学耦合模型实现了全流域 1 793 条河道、863 座闸泵共 10 112 个断面的水位流量预报;基于水文学法的洪水淹涝风险快速评估模型,综合考虑了区域前期雨量、河网初始水位、分区外排能力和圩区排涝动力等综合因素的影响,实现了洪水淹涝风险预报预警。为确保系统的安全,采用授权访问模式,根据不同权限分配应用功能,为了保障数据安全、防止对底层数据进行篡改,在数据层进行统一控制使得无法直接访问数据库,只有授权用户才能对接口进行访问控制,并对数据进行加密。

系统以面向 Microsoft. Net 平台的 C#语言为程序设计语言,基于 ArcGIS Engine 搭建可视化平台,以 Microsoft SQL Server 实现水文数据存储。基于 WebSocket 的微服务系统云架构,采用 API Gateway 封装内部系统架构,并统一向外部系统提供 API,为增加个性化需求、提高系统使用效率,后期也可基于 API 服务自主开发其他应用模块。

1.2 系统功能

基于 Json 和 Web Service 技术^[13],超标特大洪水风险预警系统将降雨预报成果、直管工程(常熟水利枢纽、望亭水利枢纽、太浦闸)的不同调度方案(现状/规则/人工/联合调度)、太湖流域水文水动力学耦合模型、基于水文学法的太湖流域洪水淹涝快速评估模型集成到太湖流域预报调度一体化系统中。基于大数据平台的云服务理念^[14],各模型独立封装 Web Service 服务,平台直接与各模型通信,节省请求转换时间,提高数据传输效率,通过调用模型库,实现同一个进程中多个模型的动态运行与无缝耦合。系统以数据库为基础,模型库为核心,各级水行政主管部门批复的调度方案为依据,实现了不同调度方案下的太湖流域任意河道断面水位与流量变化过程、超警超保区域与淹涝风险范围等的快速预测预报,并可以基于地图直观地展示预报成果的动态变化等。

雨情/水情/工情实时监视提供单站与区域时段降雨量、河道/闸坝/潮位/水库等站水位、水利工程(闸、泵等)流量等查询。防洪形势分析与地图服务提供了不同预见期、直管工程现状调度条件下,自动快速展示基于水文水动力学耦合模型的洪水预报,并在地图上展示太湖与河网代表站水位与流量过程及时段特征值,实现了太湖流域当前与未来防洪形势分析。水质水生态水资源服务提供环太湖、望虞河、太浦河等主要河流水质指标(氨氮、高锰酸盐指数、溶解氧等),太湖湖区浮游植物(蓝藻、绿藻、硅藻等)数量及蓝藻面积,以及重点河湖代表站水位、流量等信息查询。系统管理包括用户管理与权限管理等模块。

1.3 系统特色

太湖流域预报调度一体化系统解决了原有预报需手动设置大量参数和边界条件,且模型之间互相独立、操作步骤复杂、成果处理烦琐、作业预报耗时长、可视化效果差等问题。系统操作简单方便,通过预设数值降雨预报模式、设计暴雨情景以及工程调度,可根据实际反演暴雨洪水,从降雨输入到工程调度再到成果输出展示的整个预测预报过程,无须人工干预,流程化操作快捷方便。预报快速高效,计算速度明显提高,预见期为 3 d 的全流域水位预报、超警超保风险区域及淹涝风险范围预报,控制在 5 min 以内。成果展示直观,所有预报成果均可基于地图动态展示和渲染,也可以图表形式输出,实现了预报产品从点到面、从常规预报到影响预测的突破^[15],可为超警超保区域、淹涝风险预报业务提供有力的数据支撑。

2 基于水文水动力学耦合的超警超保风险区域预警模型

太湖流域水文水动力学耦合模型^[16]集成了太湖流域、区域、城市防洪工程的最新洪水与水量调度方案,经过率定验证后,预报精度较高,可用于洪水实时预报。预报模型所需的实时雨水工情、长江与钱塘江潮位预报、降雨数值预报均采用数据接口访问实时雨水情库。为有效运用防洪工程、减少洪灾损失、提升用户体验,模型调度分 4 种模式:现状调度、规则调度、人工调度与联合调度。模型预见期内直管工程现状调度按昨日实测日均流量运行,规则调度按《太湖流域洪水与水量调度方案》运行,人工调度按会商决策意见及可供使用的防洪手段交互修改工程运行流量,联合调度指不同直管工程按上述 3 种调度模式的组合,从而使系统具备灵活的参数调整、实时演算等功能。

通过太湖流域预报调度一体化系统驱动水文水动力学耦合模型开展不同模式降雨预报、不同工程调度下的河网断面水文要素(水位、流量)预报,按照预报依据时间、直管工程调度、降雨数值预报模式组合编码

格式,自动编写预报方案说明文件,并将预报成果数据与预报方案说明文件一并存储在专用数据库中,供后续的预报成果可视化、超警超保风险区域渲染调用。为解决预测预报成果基于地图的可视化动态展示不足的问题,成果可视化既可以针对不同的预报站点,也可以针对不同的防洪区域,还可以针对不同的调度方案。从维度要素来看,可视化分 2 种:①基于时间序列的河网代表站水位过程线线状要素静态显示,即以图表形式展示重要河网代表站预见期内预报水位过程,并可与警戒水位、保证水位进行对比,统计预见期内最高水位及出现时间、超警超保持续时间;②基于电子地图的面状要素动态显示,以不同颜色代表不同等水位面的方式动态展示水位预报成果变化过程,同时可展示超警超保风险区域的动态变化。通过读取专用数据库预报方案说明文件及相应的预报成果数据,可以查询不同预报依据时间、直管工程调度、降雨数值预报组合条件下的预报结果,点击地图上任意河网代表站可查看预见期内预报水位、警戒水位、保证水位过程线,供用户直观地看到不同预报方案下流域与区域未来防洪形势变化。

为实现地区河网水位超警超保范围展示功能,通过普通克里金插值法^[17]生成预见期内不同时刻的预报水位、警戒水位、保证水位 3 类水位的空间分布矢量图层^[18],然后判断预报水位是否超警或超保,根据图例颜色切割成瓦片图像,并计算逐时流域超警、超保面积。当接收到 Web 端请求并返回瓦片图像时,图片转成前端可以调用的 Json 格式,并同时返回超警、超保范围数值。返回的瓦片图像叠加在水利一张图^[19]的底图上,可实现超警、超保区域动态显示,同时展示预见期内超警面积、超保面积数值。

3 基于水文学法的洪水淹涝风险快速评估模型

为了解决太湖流域静态洪水风险图不能用于全流域实时预测预警的问题,采用基于水文学法的洪水淹涝风险快速评估模型,根据地形资料,构建太湖流域数字高程模型^[20];根据历史洪水资料,针对不同前期降雨,采用时空序列数据挖掘技术中的决策树技术^[21],分析推求降雨径流系数曲线簇^[22]。从历次洪水涨水过程看,反映下垫面条件及土壤含水量的河网代表站雨前起涨水位对涨水过程影响较大,因此采用起涨水位作为参数分析平原河网地区降雨与水位涨幅关系、构建降雨径流系数曲线簇:

$$\Delta Z_i = f(P_i, Z_{i0}) \tag{1}$$

式中: ΔZ_i 为第 i 水利分区的水位涨幅, m; P_i 为第 i 水利分区面雨量, mm; Z_{i0} 为第 i 水利分区的起涨水位, m。

降雨径流系数 α_{ij} 为从降雨到径流的综合折减系数。针对不同水利分区,分别采用对应分区不同起涨水位 Z_{i0} 、不同场次降水建立各水利分区的降雨径流系数 α_{ij} 曲线簇。由分区起涨水位 Z_{i0} 、场次降水量 P_{ij} ,根据式(1)可求得分区水位涨幅 ΔZ_{ij} ,再由下式计算降雨径流系数:

$$\alpha_{ij} = \frac{1000\Delta T_{ij} A_{外i} + 10W_{ij}}{R_{ij} A_i} \tag{2}$$

式中: α_{ij} 为第 i 水利分区第 j 场次降水的降雨径流系数; ΔT_{ij} 为第 i 水利分区第 j 场次降水的水位涨幅, m; $A_{外i}$ 为第 i 水利分区的圩外水面面积, km²; W_{ij} 为第 i 水利分区第 j 场次降水期间的净排水量, 10⁴ m³; R_{ij} 为第 i 水利分区第 j 场次降雨量, mm; A_i 为第 i 水利分区面积, km²。

根据分区前期降雨不同,每个水利分区均可绘制出降雨径流系数曲线簇;根据预见期降雨预报成果、前期实况降雨以及研究提出的降雨径流系数曲线簇,计算各分区产水量。依据产水量,结合圩区和区域排涝能力、特征水位(致涝水位等)和实时水位(圩内外代表站起涨水位等),利用洪涝风险快速评估模型实现洪水淹涝风险淹没范围(面积)以及强度(淹没水深、淹没历时等)的定量化评估。考虑到超标洪水形成主要是由于强降雨、排涝能力不足共同造成水位迅速抬升形成淹没,在全力排水的情况下,当计算水位高于致涝水位时,区域开始受淹;基于数字高程模型,将淹没范围信息在 GIS 中转换成矢量数据,叠加在太湖流域水利一张图上,即可生成预见期内洪水淹没时空分布图及相应的统计信息(面积、水深与历时),当接收到 Web 端的洪水演进请求后,即可实现洪水淹没区域风险提示、快速预警及动态演示^[23]。通过上述方法,既解决了水动力法洪水风险模拟速度慢等问题,同时也解决了水文学水量平铺法的精度问题,实现了洪水风险由静态评估向实时动态分析的转变,从而达到了流域洪水风险预测预警实时演算、可视化的要求。

4 系统应用

2020 年汛期,太湖流域降水量 1011.9 mm,较常年偏多 40%,时空分布不均,7 月降水量位列历史同期

第1位。梅雨期长达42 d,较常年偏多17 d,暴雨极值大,全流域最大30 d降水量位列1951年以来第3位。太湖发生超标洪水,最高水位4.79 m,与1991年并列为1954年有实测资料以来历史第3高水位^[24];太湖高水位持续时间长,超警48 d,超保9 d,超警时间超过2016年特大洪水。地区河网水位超警超保范围大,7月6日单日河网超警站点多达67个,占设有警戒水位站点总数的71%,超保站点多达42个,占设有保证水位站点总数的48%,部分站点超历史,其中上海5个,江苏1个。

太湖流域大洪水期间,面对流域多地出现超警超保汛情,结合智慧水利先行先试项目“超标特大洪水风险预警系统”,开展了超警超保风险区域预警和洪水淹涝风险评估,累计发布超警超保风险提示39期,洪水淹涝风险评估4期。以2020年7月6日预报为例,气象部门预测太湖流域将降大到暴雨,流域未来24 h面平均雨量38.0 mm,据此预测7月7日3时太湖流域超警超保风险区域最大,除湖西区北部和上海浦东片,其余区域均存在超警风险(图2),超保风险区域则主要集中在杭嘉湖区;预测流域杭嘉湖北部、淀泖片和长兴平原存在淹涝风险(图3)。实际太湖流域7月7日5时超警超保范围最大,大范围超保出现在杭嘉湖东部平原;根据太湖局防汛工作组现场了解,实际淹涝主要出现在杭嘉湖区北部,即实际超警超保和淹涝区域与预测结果基本吻合,预报避免了江苏省苏州市3万多的人员转移,有力地保障了太湖流域防洪安全,获得了当地人民政府和东部战区的高度表扬。

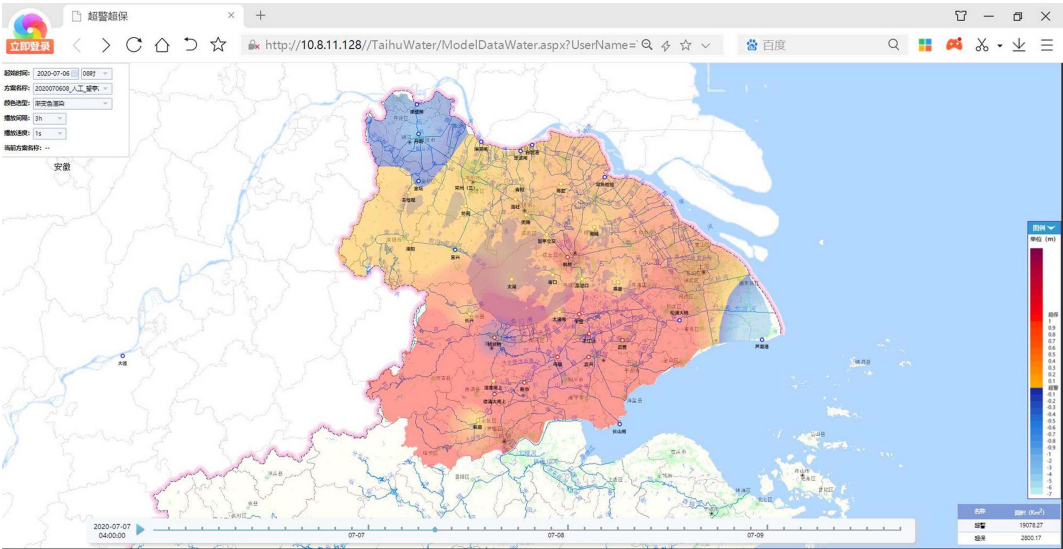


图2 超警超保风险区域预测

Fig. 2 Risk prediction of water areas exceeding the alarming and guaranteed level

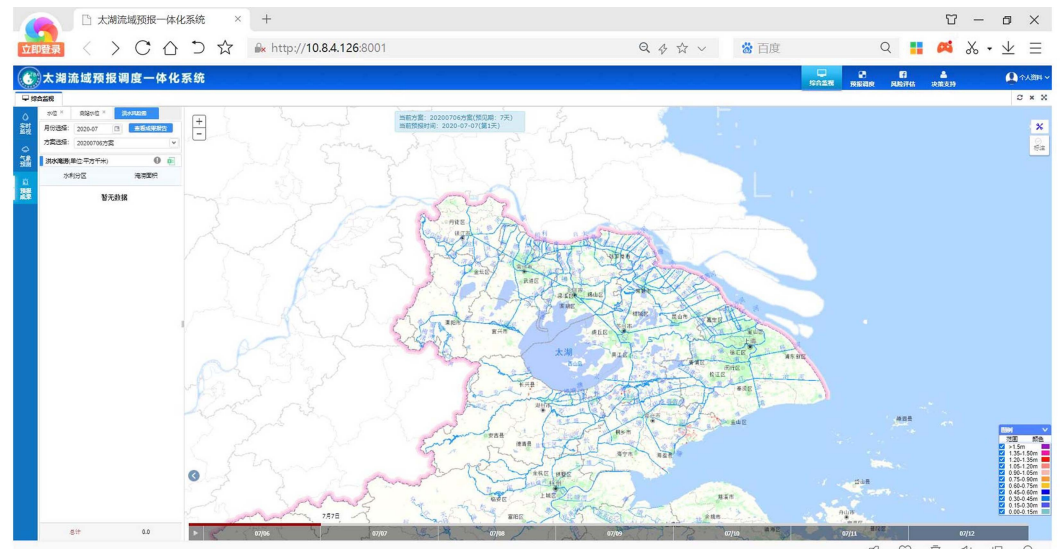


图3 洪水淹涝风险预测

Fig. 3 Risk prediction of flood inundation

由于预测预报服务精准,流域各类水利工程调度措施根据预报意见提前启用,流域仅农业受灾,受灾面积约 3 333 hm²,因灾直接经济损失远小于 1991 年、1999 年、2016 年 3 个大水年,经济和社会效益显著。超标特大洪水风险预警系统为研判水文情势、科学调度防御超标洪水和台风暴雨、保障人民生命财产安全提供了坚实的技术支撑,为长三角生态绿色一体化发展示范区的防洪安全保障提供了有效的技术手段。2020 年底,经水利部部长专题会议审议,在中期检查评估中,“超标特大洪水风险预警系统”获评水利部智慧水利先行先试 10 项最佳实践之一。

5 结 语

太湖流域超标特大洪水风险预警系统以电子地图、专用数据库、水雨工情信息、基于水文水动力学耦合的超警超保风险区域预警模型以及基于水文学法的洪水淹涝风险快速评估模型为基本支撑,在太湖流域预报调度一体化系统中,实现了模型与系统的紧密集成,通过智能的交互方式,完成了洪水超警超保区域、淹涝风险范围预测及预报调度成果可视化等业务功能,有效地支持了流域防洪调度决策。

超标特大洪水风险预警系统延长了洪水预见期,保障了作业预报效率和精度,提高了防汛减灾经济效益,已成为智慧水利发展的重要支撑。“十四五”期间,太湖流域管理局水文局(信息中心)将继续贯彻落实智慧水利建设总体思路,基于 2021 年“烟花”台风等暴雨洪水资料对模型系统进行参数率定,进一步优化系统的逻辑功能与应用场景,加强三维数字底板、数字映射建设,实现数字模型调度效果的三维动态演示及多目标调度优化方案集,更高程度地提升智慧化应用水平。

参考文献:

[1] 吴娟,梁萍,林荷娟,等.太湖流域梅雨的划分及其典型年异常成因分析[J].湖泊科学,2021,33(1):255-265. (WU Juan, LIANG Ping, LIN Hejuan, et al. Meiyu determination and causes of typical abnormal Meiyu years in Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2021,33(1):255-265. (in Chinese))

[2] 吴娟,林荷娟,季海萍,等.城镇化背景下太湖流域湖西区汛期入湖水量计算[J].水科学进展,2021,32(4):577-586. (WU Juan, LIN Hejuan, JI Haiping, et al. Calculation of water quantity entering the Taihu Lake from the Huxi Sub-Basin during flood season under the background of urbanization[J]. Advances in Water Science, 2021,32(4):577-586. (in Chinese))

[3] 吴浩云,陆志华.太湖流域治水实践回顾与思考[J].水利学报,2021,52(3):277-290. (WU Haoyun, LU Zhihua. Review and thinking of water management practice in Taihu Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021,52(3):277-290. (in Chinese))

[4] 陈华鑫,陆沈钧,何建兵,等.长三角一体化示范区水资源保护协作机制创新研究[J].水资源保护,2021,37(5):56-61. (CHEN Huaxin, LU Shenjun, HE Jianbing, et al. Research on innovation of water resources protection cooperation mechanism in Yangtze River Delta integration demonstration area[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):56-61. (in Chinese))

[5] 张文婷,刘永志,张行南,等.联安围防洪保护区洪水演进模拟分析[J].水资源保护,2022,38(2):1-6. (ZHANG Wenting, LIU Yongzhi, ZHANG Xingnan, et al. Flood routing simulation and analysis of Lian'anwei flood protection zone[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):1-6. (in Chinese))

[6] 王船海,杨勇,丁贤荣,等.水文模型与 GIS 二元结构集成方法与实现[J].河海大学学报(自然科学版),2012,40(6):605-609. (WANG Chuanhai, YANG Yong, DING Xianrong, et al. Dual-structured hydrological model and GIS integration method and its implementation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012,40(6):605-609. (in Chinese))

[7] 陈华,徐坚,盛晟,等.面向流域防洪安全的态势图谱构建及可视化方法[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):498-505. (CHEN Hua, XU Jian, SHENG Sheng, et al. Construction and visualization methods of situation map for flood control in river basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020,48(6):498-505. (in Chinese))

[8] 蒋云钟,冶运涛,赵红莉,等.智慧水利解析[J].水利学报,2021,52(11):1355-1368. (JIANG Yunzhong, YE Yuntao, ZHAO Hongli, et al. Analysis of smart water conservancy[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(11):1355-1368. (in Chinese))

[9] 卢家波,向小华,李超,等. GIS 中的通用水文模型数据结构研究[J].水资源保护,2021,37(5):89-93. (LU Jiabo, XIANG Xiaohua, LI Chao, et al. Research on data structure of general hydrological model in GIS[J]. Water Resources Protection, 2021,37(5):89-93. (in Chinese))

[10] 于翔,解建仓,姜仁贵,等.数字水网可视化表达及其与业务融合应用[J].水资源保护,2020,36(6):39-45. (YU Xiang,

XIE Jiancang, JIANG Rengui, et al. Digital water networks visualization and its integration application[J]. Water Resources Protection, 2020,36(6):39-45. (in Chinese))

[11] 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))

[12] 蔡阳.智慧水利建设现状分析与发展思考[J]. 水利信息化,2018(4):1-6. (CAI Yang. Status analysis and development thinking of smart water conservancy construction[J]. Water Resources Informatization, 2018(4):1-6. (in Chinese))

[13] 肖志远,陈雅莉,陈春华. 面向 Web 的长江水文数据"一站式"服务系统[J]. 人民长江,2018,49(12):111-116. (XIAO Zhiyuan, CHEN Yali, CHEN Chunhua. Study on one-stop service technology for Changjiang River hydrological data based on Web service system[J]. Yangtze River, 2018,49(12):111-116. (in Chinese))

[14] 李肖杨,陈亚宁,刘璐,等. 博斯腾湖流域水资源管理决策支持系统设计与实现[J]. 水资源保护,2020,36(6):53-59. (LI Xiaoyang, CHEN Yaning, LIU Lu, et al. Design and implementation of water resources management decision support system in the Bosten Lake Basin[J]. Water Resources Protection, 2020,36(6):53-59. (in Chinese))

[15] 李致家,朱跃龙,刘志雨,等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):13-18. (LI Zhijia, ZHU Yuelong, LIU Zhiyu, et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium-sized rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021,49(1):13-18. (in Chinese))

[16] WU Juan, WU Zhiyong, LIN Hejuan, et al. Hydrological response to climate change and human activities: a case study of Taihu Basin, China[J]. Water Science and Engineering,2020,13(2):83-94.

[17] 陈华,盛晟,夏润亮,等. 基于矩阵分解的降水时空插值方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):35-41. (CHEN Hua,SHENG Sheng, XIA Runliang, et al. Spatiotemporal interpolation method of rainfall based on matrix decomposition [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021,49(1):35-41. (in Chinese))

[18] 成波,江波,李红清. 菜子湖湿地生态数据库管理系统的设计与实现[J]. 水资源保护,2020,36(6):46-52. (CHEN Bo, JIANG Bo, LI Hongqing. Design and realization of Caizi Lake wetland ecological database management system[J]. Water Resources Protection, 2020,36(6):46-52. (in Chinese))

[19] 蔡阳,谢文君,程益联,等. 全国水利一张图关键技术研究综述[J]. 水利学报,2020,51(6):685-694. (CAI Yang, XIE Wenjun, CHENG Yilian, et al. A review of key technology research on the national water one map system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020,51(6):685-694. (in Chinese))

[20] 万定生,王坤,朱跃龙,等. 中小河流洪水预报智能调度平台关键技术[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):204-212. (WAN Dingsheng, WANG Kun, ZHU Yuelong, et al. Key technologies of intelligent flood forecasting and dispatching platform for small and medium-sized basins[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021,49(3):204-212. (in Chinese))

[21] 吴娟,吴志勇,姜桂花,等. 决策树技术在杭嘉湖区水位预报中的应用[J]. 水电能源科学,2020,38(9):28-31. (WU Juan, WU Zhiyong, JIANG Guihua, et al. Application of decision tree technology in water stage forecast of Hangjiahua Sub-region[J]. Water Resources and Power, 2020,38(9):28-31. (in Chinese))

[22] WU Juan, LIN Hejuan, WU Zhiyong, et al. Precipitation and water stage variability under rapid developments of urbanization in Taihu Basin[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2020,383:13-24.

[23] 李宗礼,张宜清,许明祥,等. 武汉市防洪排涝体系建设方略[J]. 水资源保护,2022,38(5):39-45. (LI Zongli, ZHANG Yiqing, XU Mingxiang, et al. Construction strategy of flood control and drainage system in Wuhan City[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):39-45. (in Chinese))

[24] 朱威,章杭惠,甘月云,等. 2020 年太湖洪水调度实践与思考[J]. 中国水利,2021(15):46-48. (ZHU Wei, ZHANG Hanghui, GAN Yueyun, et al. Practices of flood regulation in the Taihu Lake in 2020 and considerations[J]. China Water Resources, 2021(15):46-48. (in Chinese))