

# 城市防洪“四预”智能调度系统建设与应用

范子武<sup>1,2</sup>, 刘国庆<sup>1,2</sup>, 杨 光<sup>1,2</sup>, 黎东洲<sup>1,2</sup>, 王 蔚<sup>1,2</sup>, 张小稳<sup>3\*</sup>

(1. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 无锡市防汛防旱指挥部办公室, 江苏 无锡 214021)

**摘要:**围绕太湖流域平原河网城市防洪“四预”智能调度系统建设,从算据、算法、算力、“四预”业务和信息融合共享等方面剖析了传统防汛信息化系统存在的问题,结合无锡大包围水工程智能调度系统实践,从多源数据资源集成汇聚、精细化河网模型构建和知识模型算法深度融合等方面提出了建设措施与技术途径,将滚动预报和调度预演作为核心关键技术,构建了“监测预报-动态预警-场景预演-调度预案”的防洪“四预”业务应用体系,全力打造水工程预报调度一体化防汛模式,对于加快太湖流域数字孪生水网工程和智慧水利建设具有重要的指导意义。

**关键词:**无锡大包围; 防洪四预; 河网模型; 数据底板; 预报预警; 智能调度

中图分类号:TV697.1

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2022)Sup2-0005-06

## Construction and application of “Four Pre” intelligent dispatching system for urban flood control

FAN Ziwu<sup>1,2</sup>, LIU Guoqing<sup>1,2</sup>, YANG Guang<sup>1,2</sup>, LI Dongzhou<sup>1,2</sup>,  
WANG Wei<sup>1,2</sup>, ZHAN Xiaoweng<sup>3</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, National Energy Administration, Ministry of Transport, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Water Governance of Taihu Region Engineering, Nanjing 210029, China; 3. Wuxi Flood and Drought Control Headquarters Office, Wuxi 214021, China)

**Abstract:** Focusing on the construction of the “Four Pre” intelligent dispatching system for urban flood control in the plain river network of Taihu Lake basin, the paper analyzes the problems existing in the traditional flood control information system from the aspects of data, algorithms, computing power, “Four Pre” and information fusion. Combined with the practice of the intelligent dispatching system of the Wuxi water reclamation project, the construction measures and technical approaches are proposed from the aspects of multi-source data resource integration and aggregation, refined river network model construction and deep integration of knowledge model algorithms. With rolling forecast and scheduling rehearsal are taken as the core key technologies, the flood control “Four Pre” business application system of ‘monitoring and forecasting-dynamic early warning-scenario rehearsal-scheduling plan’ is built. Efforts are made to build an integrated flood control model for water project forecasting and scheduling. It is of great guiding significance to accelerate the digital twin water network project and intelligent water conservancy construction in the Taihu Lake basin.

**Key words:** flood control engineering around Wuxi; “Four Pre” flood control; river network model; data base; forecast and early warning; intelligent dispatching

收稿日期:2022-11-16

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFB2102003);江苏省水利科技项目(2017004,2020021,2021027);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y121002)

作者简介:范子武(1970—),男,正高级工程师,博士,主要从事城市水力学、数字流域与智慧水网研究工作。E-mail:zwfan@nhri.cn

通信作者:张小稳(1975—),男,高级工程师,硕士,主要从事防汛抗旱及水利工程管理。E-mail:zxwsm1@163.com

## 1 概 述

物联网、云计算、大数据和数字孪生等新一代信息通信技术的成熟,为国家各行业智慧化建设提供了重要的支撑,水利行业的自动化、信息化和智能化迎来了良好的发展契机<sup>[1]</sup>。2022年3月底,水利部统筹谋划,全国一盘棋协同推进智慧水利建设,印发了《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》《水利业务“四预”基本技术要求(试行)》3个技术文件和《数字孪生流域共建共享管理办法(试行)》1个管理办法,构成了数字孪生流域建设的顶层设计<sup>[3]</sup>。

江苏省相继出台了《“十四五”水利信息化建设规划》《智慧水利建设指导意见》《江苏水利数字化转型三年行动计划》等文件,将数字孪生流域和工程建设内容深度贯穿于未来水利数字化发展进程。目前,江苏省数字孪生秦淮河、数字孪生江苏太湖地区典型水网工程、数字孪生沂沭泗水系(江苏部分)、数字孪生水网(南通城区)等4个项目成功入选水利部数字孪生流域建设先行先试任务。入海水道数字孪生建设列入省级重点实施项目,打造数字化“设计、建造、交付、运行”的水利建设数字化工作体系。

受人类活动与气候变化影响,苏南运河沿线水位近年不断刷新历史,城市大包围运河侧面临限排的防洪形势,如何基于调度经验,实现闸泵智能调度,达到保障大包围防洪安全的目标<sup>[4]</sup>。结合无锡城市防洪的特点与需求,按照水利部数字孪生流域建设总体要求,梳理了无锡大包围水工程调度会商业务需求,按照数字孪生流域相关技术要求,研发具有城市防洪“四预”智能调度的系统,能够为城市水旱灾害防御提供科学决策辅助,也为无锡市水利数字化、网络化、智能化水平提升以及智慧水利体系构建提供有力支撑和强力驱动,从而提高区域水治理能力和加速体系现代化进程。

## 2 问题剖析与对策

自2008年无锡市城市防洪运东片防洪大包围工程体系形成后,传统信息化技术在工程调度中得到充分应用,在保障无锡市经济社会平稳发展上发挥了重大作用。近年来,面对苏南运河水位屡超历史的新形势,需实现城市防洪工程的科学、精准调度。同时,对标水利部数字孪生流域的建设要求,运东大包围在数字孪生水网建设方面还存在一定

差距,主要包括建设仍存在零散化现象、缺少统筹,业务系统落地应用程度不高,跨行业以及行业内各部门业务数据缺少联动,模型应用不足、智能程度不高,后期运行维护重视程度不高等。

针对这些问题,可以从以下方面进行改进,一要做好顶层设计,全局统筹谋划,分块分期建设;二要突出业务协同,加强需求分析,明确建设内容,切实解决实际工作中的痛点难点问题;三要加强数据共享,打破“数据孤岛”,实现横向与纵向的数据交换共享;四要重视模型研发,通过模型实现业务场景的模拟、优化,升级业务应用系统的支撑能力;五要完善保障机制,加强系统维护,保障有效运行。

## 3 建设措施与技术途径

### 3.1 集成汇聚多源数据资源池

#### 3.1.1 全面整合基础数据

收集城市大包围内河网水系拓扑、河道断面和特征水位等信息,整合闸、泵、地涵、堤防和圩区等水利工程信息,标准化排水管网、排水分区和下垫面土地利用等信息,抽取大包围枢纽、二级圩闸泵和雨水管网工程调度规则信息,汇聚雨水工情、气象和视频监控等相关监控站网空间属性信息,为基础底图绘制、模型构建与系统可视化表达提供基础数据。

#### 3.1.2 集成在线监测数据

实时对接城市大包围内雨量站点小时雨量、蒸发等信息,集成锡澄地区、无锡市域和大包围内不同空间分辨率的水位、潮位和流量等信息,同步采集8大枢纽工程闸门开启状态和泵站运行过程时序信息,接入水利工程和河道监控视频信息,整编历史雨水工情与调度、灾情信息,一方面能为模型率定验证与特定场景复演提供边界条件,同时是系统监测展示的核心数据源。

#### 3.1.3 梳理挖掘业务数据

建立骨干河道、圩区单元水位-槽蓄量关系曲线,挖掘不同降水量下枢纽工程和二级圩闸泵工程调度习惯与调度规则,构建“预报时段-预报降雨-初始水位”三要素组合的包络场景调度预案库,定量分析枢纽工程运行对象、规模、时长对围内水位的影响规律,构建河道不同特征下二维内涝积水特征关系,为智能调度提供业务知识。

#### 3.1.4 共享气象行业数据

以街镇为单元,对接网格化气象预报小时雨量数据,共享全国尺度不同时段可见光和红外云图动

态变化过程、雷达回波强度变化过程、台风预报路径,江苏省尺度全域风场、不同深度土壤墒情等信息,为“四预”体系中水情滚动预报与调度预演提供预报信息源。

### 3.1.5 融合地理空间数据

融合大包围内数字正射影像图(DOM)、地表、水下数字高程模型(DEM)、数字线划图(DLG)、数字表面模型(DSM)、城市信息模型(CIM)和8大水利枢纽信息模型(BIM)等数据。基于多源数据融合技术,升级平面二维一张图,为孪生展示提供三维场景。

## 3.2 构建精细化河网数学模型

以标准化的形式构建无锡运东大包围模型数据库,主要组成包括点、线、面几何拓扑关系的模型网络库,时间序列过程的模型事件库和调度规则的模型逻辑库<sup>[5]</sup>。

### 3.2.1 模型网络库

采用河道分级标准并标注时间标签,构建了区域6级(村级)河道及堤防,八大水利枢纽和22个二级圩区所涉及的所有闸站工程,骨干道路排水管网及配套排水设施和自排与强排区的集水单元,模型网络库主要对象示意图1。

### 3.2.2 模型事件库

模型按照静态和时间序列数据库进行边界条件管理,既能满足设计工况、历史复演和未来预演静态方案计算,也可满足实时滚动计算对边界条件动态更新的要求,其中,大包围要涉及骨干河网无锡(南门)、广丰和二级圩区特征水位初设场、以街镇为单元的降雨、区域内外小时水位过程和枢纽运行过程实况流量等边界条件。

### 3.2.3 模型逻辑库

为满足滚动计算与调度预演的要求,构建了多情景工程调度逻辑,对象涉及枢纽与二级圩工程,逻辑控制综合考虑启排水位、运河限排水位、工程流量控制和工程运行过程的调度习惯等因素,主要涉及基于现行调度方案、基于调度习惯考虑工程运行对象时序和工程运行信息联动的调度规则。

## 3.3 开展多场次模型率定验证

### 3.3.1 代表性降雨场次选择

为了确定模型中水文和水动力模型相关参数,综合考虑选取不同量级大小的场次降雨作为率定验证数据。采用2019年6月20—22日(降水量:17.8 mm)、2020年6月15—17日(降水量:79.8 mm)进行模型率定,采用2018年8月16—18日(降水量:121.6 mm)、

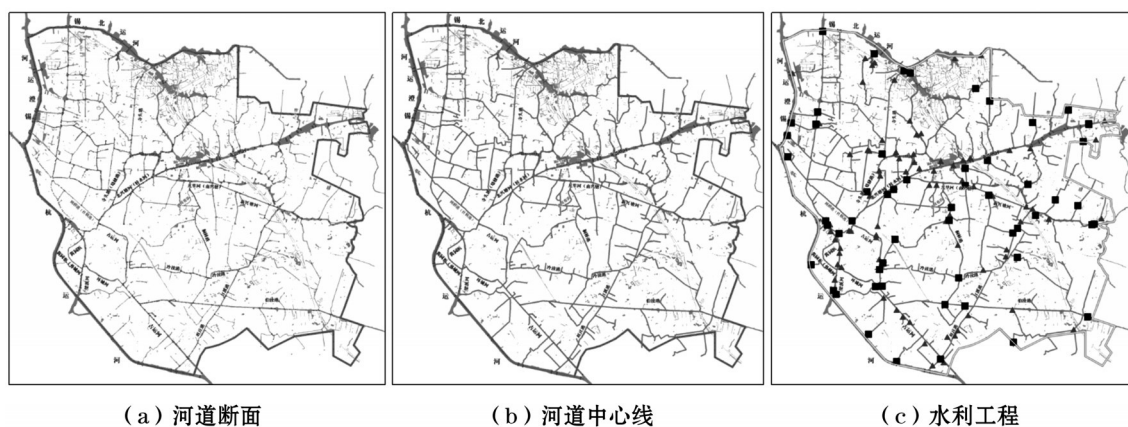


图1 模型网络库

2019年5月25—27日(降水量:90.4 mm)进行模型验证,为模型应用的可靠性提供基础。

### 3.3.2 特征站点结果分析

综合考虑大包围内特征站点和枢纽工程上游节点对象,选取无锡(南门)和利民桥泵前水位作为分析对象,采用Nash-Sutcliffe系数NSE和确定性系数 $R^2$ 对模型有效性进行评定<sup>[6-7]</sup>。如表1所示,NSE系数均大于0,表明模型质量好或者模拟结果接近

观测值的平均值水平,相关系数 $R^2$ 结果表明相关性中等偏上,即模型结果总体可信,图2~5给出4个场次率定与验证的结果,不同场次率定验证分析结果见表1。

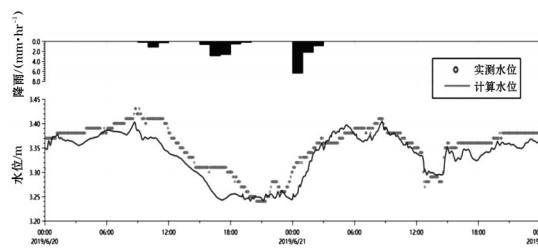
## 3.3 开发知识模型智能算法库

收集2013—2020年大包围八大水利枢纽调度运行、圩内及以无锡(大)、青阳为代表的周边水位和降雨等数据,根据水文遥测数据标准规范处理降

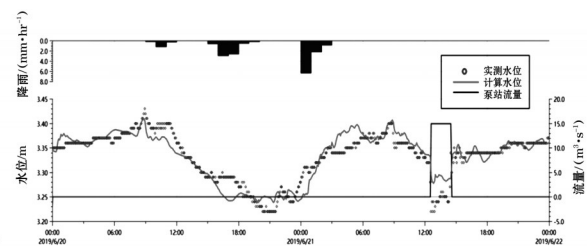


表1 不同场次率定验证分析结果

| 率定验证场次        | 特征站点  | NSE  | $R^2$ |
|---------------|-------|------|-------|
| 场次1           | 南门    | 0.16 | 0.56  |
| 2019年6月20—22日 | 利民桥泵站 | 0.19 | 0.57  |
| 场次2           | 南门    | 0.32 | 0.79  |
| 2020年6月15—17日 | 利民桥泵站 | 0.50 | 0.88  |
| 场次3           | 南门    | 0.67 | 0.89  |
| 2018年8月16—18日 | 利民桥泵站 | 0.80 | 0.90  |
| 场次4           | 南门    | 0.52 | 0.73  |
| 2019年5月25—27日 | 利民桥泵站 | 0.76 | 0.88  |

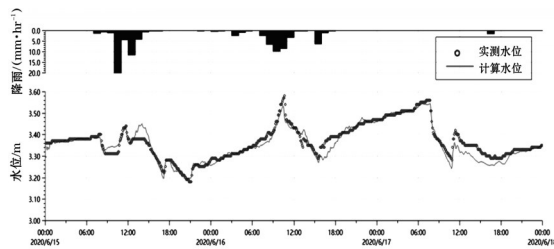


(a) 无锡(南门)

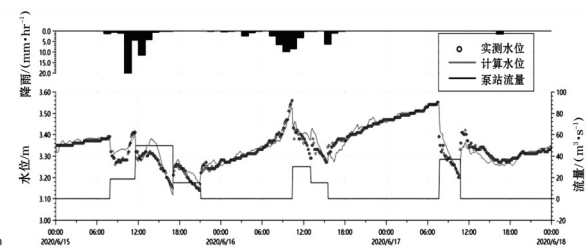


(b) 利民桥泵站

图2 计算值与实测值对比(2019年6月20—22日)

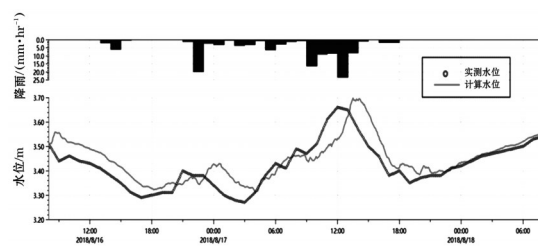


(a) 无锡(南门)

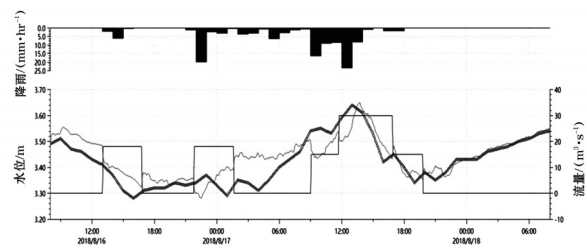


(b) 利民桥泵站

图3 计算值与实测值对比(2020年6月15—17日)

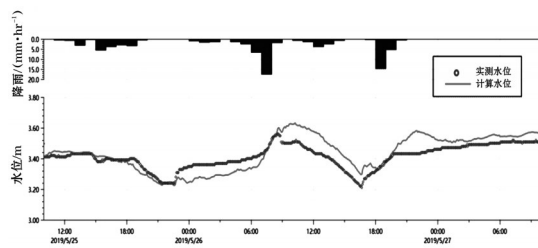


(a) 无锡(南门)

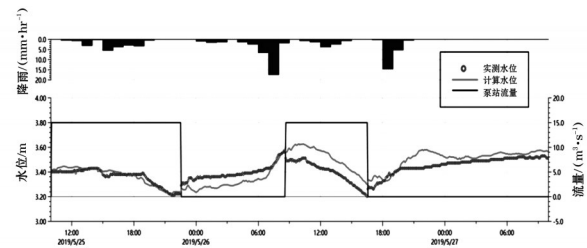


(b) 利民桥泵站

图4 计算值与实测值对比(2018年8月16—18日)



(a) 无锡(南门)



(b) 利民桥泵站

图5 计算值与实测值对比(2019年5月25—27日)

雨、水位和工情文件,共计1 955 678条数据,其中工情数据1 133 175条、雨量数据396 193条、水位数据426 310条,通过梳理大包围启用的场次降雨事件,依据时间分析水利枢纽历史开机过程、开机台数、外排流量,通过关联站点水位、降水量进行汇总入库,形成人工智能模型学习库,共计整编81 848条训练数据。

构建感知-思维-学习-调度全过程业务流程的关键技术涉及3个方面。一是基于历史雨情、水情和枢纽调度运行同步数据,分析无锡运东大包围无锡(南门)不同水位与调度情景的响应关系;二是通过扩大训练样本数量与添加极端事件样本,提高循环神经网络模型(RNN)在线学习预测精度;三是利用已有场次降雨的调度方案构建预案集,实现任意降雨事件的智能决策<sup>[8]</sup>。

## 4 防汛“四预”业务应用

系统以“算据”为基础、以河网模型“算法”为核心,围绕防洪“四预”建设总体要求,紧扣水工程智能调度中预报、预警、预演、预案业务应用场景,以无锡大包围枢纽工程体系和一二级圩联动调度为重点,感知与模型联合驱动,开发了监测预报、动态预警、场景预演、调度预案的业务封闭流程,全过程支撑大包围水工程群的智能调度。

### 4.1 加强监测,特征站点滚动预报

全面对接江苏省、无锡市和所在区实时雨水情和水利工程运行信息,集成以街镇为对象的气象预报、视频等监控数据,利用与江苏省太湖地区河网模型嵌套的无锡大包围预报调度模型,配置降雨泰森多边形单元实时小时雨量、河网初始场水位,枢纽工程闸泵运行状态和预报雨量等信息,基于大包围和二级圩水利工程群调度规则,开发模型与边界条件时间序列库动态交互接口,实现无锡(南门)、广丰以及22个二级圩代表断面的洪水滚动预报,预报刷新频率为2 h,预见期为1~3 d,以方案列表和地图联动交互的形式展现洪水预报结果,并支持预报结果与历史数据的对比分析。系统开发了实时雨情、实时水情、实时工情、气象信息、水情预报和视频监控等多个功能,既能满足当前防汛形势研判,也可提前预判城区在遭遇不同量级降雨时,分析当前工程运行状态下,基于调度规则的河网特征站点洪水过程,为预报预警提供数据支持。

### 4.2 确定阈值,雨水工情动态预警

以无锡(南门)为区域特征站,划分红、橙、黄、

蓝四级预警,结合实时雨情、水情、预报降雨和河网水位滚动预报数据,按照大包围预警响应管理办法,为调度人员智能推送预警信息,是预警发布的重要依据,系统开发了雨情告警、水情告警和预警发布等功能。其中,雨情告警涉及实时告警和暴雨预警,实时告警依据过去24 h累计降水量统计达到暴雨、大暴雨、特大暴雨等级的站点,在地图上以颜色分级、同步闪烁的方式进行展示。暴雨预警主要接入12379国家突发事件预警信息发布网信息;水情告警涉及实时水位告警和预报水位预警,水位告警依据实时水位,按照水位特征值进行等级划分,包括超警戒、超保证、超历史3个等级,以列表的形式展示站点及相应的预警等级,并在地图中采用闪烁的方式同步提醒;水位预警依据滚动预报水位,可实现未来24 h、3 d的预报预警,警情判别标准与水情告警一致,以时间轴的形式提供预警时刻查询;预警发布包括已发布的预警清单和待发布的预警列表,该预警列表的数据源既包括实时水位,又包括预报水位,可以为区域预警提示、预警发布提供全过程的智慧管理,极大地提升了预警的及时性,为预警响应提供决策支撑。

### 4.3 实时交互,联合调度场景预演

场景预演是“四预”调度的关键,通过集成无锡运东大包围精细化河网模型,开发防汛预报调度推演能力,其中,正向预演能够基于当前雨水情、实时工情或现行调度规则,预测未来不同时段降雨特征下河网水位变化过程,自动判断是否超警,是否需要启动应急预案;反向预演能够基于未来气象预报信息,以河网多站点水位控制为目标,提供最优的调度方案和应急相应建议及措施建议。通过建立统一数据传输协议,接入大包围及周边实时雨情、水情、工情数据,并与气象预报完成对接。开发模型库、结果库与系统数据实时交互技术,满足防洪决策预案集模型网络库、事件库、逻辑库的可视化构模与预演方案自动创建,开发预报调度人工干预功能,提供未来3 h、6 h、12 h和3 d不同预报时段,任意时段预报降水量和以无锡(南门)为代表站的河网初始场的人工选参功能,满足基于实时工程运行状态下,河网水情过程、外排水量的预演,也可任意调整不同枢纽工程泵站运行台数,预判不同工程方案下的洪水调度效果,不同调度预演方案审核后入库管理,为反向优化调度提供调度预案集。

### 4.4 智能优选,自动推送调度预案

系统构建了未来3~24 h特征时段、0~200 mm特

征降雨、3.2~4.2 m特征水情组合条件下的包络场景,形成符合区域调度特点的“预报降雨+实时水情+工程调度”组合情景库,利用模型分析不同调度方案下典型断面洪水过程,构建大包围枢纽工程防洪调度预案集,为防洪调度系统的智能决策提供支持。系统对创建的调度预案集,选择性地集成最佳“执行调度预案”汇入“综合调控数据仓库”。每一次调度执行过程对调度效果进行是否可行判断,完成系统的学习过程,形成调度预案的“大数据”,通过扩大训练样本数量与添加极端事件样本,实现大数据分析模型与行业机理模型有机融合。按照系统思维,未来调度从“综合调控数据仓库”中快速查询“与当前河网情势相似的历史过程”,最终实现调度方案的智能优选,并将历史过程的调度方案、效果进行全方位展示与发布,实现水工程群智能化调度。

## 5 结 语

利用江苏省太湖地区精细化河网模型,建立了与之嵌套的运东大包围水文-水动力耦合模型,采用2018—2020年汛期典型场次雨情、水情、工情实时同步数据,完成区域大、中、小雨多场次模型率定验证,为防洪“四预”提供了核心算法支持。

按照“四预”业务逻辑,基于B/S架构,开发了无锡运东大包围防汛“四预”业务系统,系统接入大包

围及周边实时雨情、水情、工情数据,并与气象预报数据对接,研发在线预报预警滚动计算接口,满足水文~水动力模拟边界条件自动更新,数据同化的河网初始场自动矫正,驱动引擎滚动计算,实现大包围内任意关注点未来24 h、3 d水情的预报预警,开发预报调度人工干预功能,实现水工程群正向和逆向的调度预演。

### 参考文献:

- [1] 黄立锴. 浅谈数字孪生技术在智慧水利工程中的应用[J]. 珠江水运, 2022(16): 46-48.
- [2] 刘业森, 刘昌军, 郝苗, 等. 面向防洪“四预”的数字孪生流域数据底板建设[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(6): 6-4.
- [3] 程海云. 推进长江数字孪生流域建设的水文实践与思考[J]. 中国水利, 2022(15): 49-50.
- [4] 张春松, 宋玉, 陶娜麒, 等. 江苏省苏南运河沿线地区联合调度实践与思考[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(3): 4-6.
- [5] 张小稳, 刘国庆, 范子武. 动态洪水风险图在无锡市城区防洪中的应用研究[J]. 水资源开发与管理, 2019(5): 10-17.
- [6] 徐文新, 王浩, 周祖昊, 等. 鸭绿江流域分布式水文模型开发及验证[J]. 水利水电技术, 2010, 41(2): 1-5.
- [7] 李立. 基于HEC-HMS的洪水预报模型研究[J]. 水利规划与设计, 2019(4): 76-77, 121.
- [8] 胡健伟, 周玉良, 金菊良. BP神经网络洪水预报模型在洪水预报系统中的应用[J]. 水文, 2015, 35(1): 20-25.