

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.004

滁河流域防洪排涝一体化模型

曾贤敏¹, 范辉², 张非凡³, 陈钢³, 王船海³, 赵鹏轩³, 杨富宝⁴, 胡庆芳⁵

(1. 南京慧水软件科技有限公司, 江苏 南京 211800; 2. 水利部海河水利委员会水文局, 天津 300161;

3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 4. 安徽省水利水电勘测设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088;

5. 南京水利科学研究院水利部水旱灾害防御重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 基于分布式架构水循环模型, 将流域划分为山丘区坡面、平原区坡面、山丘区河道、平原区河道、圩区、闸坝工程等水文特征单元, 在山丘区构建新安江水文模型, 平原区构建平原区水文模型、一维水动力学模型, 圩区和闸坝工程分别构建圩区排涝模型和工程调度模型, 将所有模型耦合为能完整概化滁河流域各自然实体要素的防洪排涝一体化模型, 并通过洪水年(2016 年、2020 年)山丘区与平原区典型站点洪水过程对模型的精度和可靠性进行了验证。结果表明: 该模型能较好地再现 2016 年、2020 年流域洪水过程, 率定与验证结果均达到甲级精度。

关键词: 滁河流域; 分布式架构模型; 防洪排涝; 精细化模拟; 水文水动力耦合

中图分类号: TV87 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)04-0028-10

Integrated flood control and drainage model for the Chuhe River Basin

ZENG Xianmin¹, FAN Hui², ZHANG Feifan³, CHEN Gang³, WANG Chuanhai³, ZHAO Pengxuan³,
YANG Fubao⁴, HU Qingfang⁵

(1. Nanjing Huishui Software Technology Co., Ltd., Nanjing 211800, China;

2. Hydrological Bureau of Haihe River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Tianjin 300161, China;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Anhui Survey & Design Institute of Water Resources & Hydropower Co., Ltd., Hefei 230088, China;

5. Key Laboratory of Flood and Drought Hazard Control, Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the water cycle model of distributed architecture, the Chuhe River Basin was divided into hydrological characteristic units such as the slope of the hilly area, the slope of the plain area, the river channel of the hilly area, the river channel of the plain area, the polder area, and the sluice dam project. The Xin'anjiang hydrological model was constructed in the hilly area; the hydrological model and the one-dimensional hydrodynamic model were constructed in the plain area; the flood drainage model was built in the polder area, and the project dispatching model was constructed for the sluice dam project. All models were coupled into an integrated flood control and drainage model that could fully generalize each natural entity element in the Chuhe River Basin. The accuracy and reliability of the model were verified through the flood processes of typical stations in the hilly and plain areas during the flood years (2016 and 2020). The results show that the integrated model can reproduce the flood processes in the basin in 2016 and 2020 quite well, and both the calibration and verification results reach Grade A accuracy.

Key words: the Chuhe River Basin; distributed architecture model; flood control and drainage; refined simulation; hydrological and hydrodynamic coupling

滁河流域位于长江与淮河之间, 系长江下游左岸的一级支流。所谓“环滁皆山也”, 滁河流域山丘区面积占 88%, 平原圩区占 12%。全流域普降暴雨时, 几乎 90% 面积产生的洪水会迅速汇集于占约 10% 面积的平原圩区, 若遭遇江洪顶托, 则平原圩区极易发生洪涝灾害。作为江苏、安徽两省界河, 滁河堤防漫长, 大中

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3000105)

作者简介: 曾贤敏(1978—), 男, 工程师, 博士, 主要从事水文物理规律及水文预报研究。E-mail: zxmhu@qq.com

通信作者: 王船海(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文物理规律及水文预报研究。E-mail: chwang@hhu.edu.cn

引用本文: 曾贤敏, 范辉, 张非凡, 等. 滁河流域防洪排涝一体化模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 28-37.

ZENG Xianmin, FAN Hui, ZHANG Feifan, et al. Integrated flood control and drainage model for the Chuhe River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 28-37.

小圩、蓄滞泄防洪工程体系庞大,上下游、左右岸洪水安排矛盾尖锐,洪水分析和洪水调算历来复杂困难。由于流域本身的特殊性,至今未能建立能够系统对流域洪涝进行模拟的模型^[1-4]。

流域洪水模拟主要包括水文学方法和水文水动力耦合方法 2 类^[5-8],20 世纪 70 年代以来,国内外众多水文学家提出了各种流域水文模型,其中最具代表性的是由英国、法国和丹麦水文学家共同研制的 SHE 模型和中国的新安江模型^[9-13],由于平原河网地区的复杂汇流特性,水文学方法在平原区流域洪水模拟的适用性并不高,水动力学以 N-S 方程为基础,目前已发展出较为成熟的理论体系^[14-15],水文水动力耦合方法在具备山丘区和平原区组合地形的流域可以获得较高的模拟精度^[16-19]。由丹麦水动力研究所(DHI)开发的 MIKE 模型、荷兰 Delft 水力研究所开发的 DELFT-3D 模型以及英国 Wallingford 软件公司开发的 InfoWorks 模型均结合水文水动力方法模拟流域产汇流过程^[20-23]。王雨洁等^[24-26]耦合水文模型和一、二维水动力模型对流域洪水进行模拟取得了较好的效果,然而这类研究缺少耦合水文、水动力以及圩区、工程调度一体化的模型,无法对人类活动影响剧烈地区的水循环过程进行精确模拟。

本文基于河海大学分布式架构水循环模型及实践^[27-28],构建滁河流域山丘区新安江水文模型,并针对平原区构建平原区水文模型、一维水动力学模型、圩区排涝模型和工程调度模型,并将其耦合为滁河流域防洪排涝一体化模型对流域洪水过程进行模拟与验证,以期对滁河流域洪水模拟与应对提供参考。

1 分布式架构水循环模型

防洪排涝系统需要能够精准模拟水文循环的各个环节,包括降水、产流、汇流、地下水补给、蒸发等过程。受地形、地貌、下垫面及人类工程调控的影响,水循环过程异常复杂,特别是在防洪排涝一体化管理中,需要统筹考虑产流、汇流及工程调度等多个环节。在陆地上,水流遵循由高到低的原则,从山区向平原输送,并最终汇入海洋。然而,不同的地形地貌和工程设施会对水流特性产生显著影响:山区陡峭,河流流速快,径流响应迅速,而平原地区河道网络密集、流向复杂,湖泊、闸坝、泵站等水利工程的调控作用使得洪水运动更具不确定性。在感潮河口区,水流受到潮汐和海水顶托的双重影响,防洪排涝调度难度进一步加大。

防洪排涝系统需要集成多尺度、多因素的水文、水动力学、气象等信息。例如,从小流域到整个流域的水文模拟,或城市排水网络的局部模拟与大范围水系的全局模拟相结合。区域性差异使得陆地水分迁移转化规律呈现高度非线性,难以用单一理论描述。为满足防洪排涝一体化调度需求,本文设计了分布式架构水循环模型,以精细模拟复杂下垫面的水循环过程,其具备以下特点:①模型能够融合集总式、分布式等多种结构模型,并适用于黑箱、概念、物理基础及地形因素等不同类型的计算方法,实现多尺度水动力过程模拟;②模型可根据防洪排涝需求灵活选择求解方法,支持实时决策分析;③具备多尺度离散计算能力,可适应流域、城市、河网等不同水文单元的精细化模拟;④模型参数体系化,能够直接从下垫面特征提取相关参数,提高适用性和物理约束合理性;⑤在防洪排涝调度中,模型可精细刻画垂向与横向水循环过程,综合考虑降水、地表产流、地下水补给及人工调度影响;⑥模型具备良好的可扩展性,可兼容现有水文水动力模型,支持多源数据融合,提高防洪排涝一体化管理的科学性和智能化水平。

1.1 水文特征单元

在分布式架构水循环模型(图 1)中引入水文特征单元的概念,即具有相同产汇流机理的水文地理区域。水文特征单元可分为产流型、汇流型和混合型。与传统的水文单元不同,水文特征单元用于反映产汇流机制的不同。在进行水文单元划分时,需考虑最佳模型离散尺度的影响。

从防洪排涝一体化的角度,流域水循环的复杂性和多变性要求采用一种能够同时考虑洪水、排水、蓄洪以及水资源调度等多方面因素的模型。结合水文特征单元的概念和分布式架构,可以构建一个涵盖水文、排涝和洪水调度的多功能综合模型,精准描述流域的水循环过程和水利设施的运作。流域被分解为不同类型的水文特征单元,这些单元不仅考虑自然水文过程,还融入了防洪排涝工程设施的影响。图 2 列出了流域主要水文特征单元的组成,并展示了如何通过这些单元模拟各个环节的相互作用和反馈。

通过引入水文特征单元的概念,流域水循环可被分解为不同阶段、不同区域的耦合体,同时考虑产流、汇流以及人工水利设施(如堰闸、泵站、排水管网等)对水流的调控作用。在这种框架下,对于每种水文特征单元,采用最适合的模型算法进行求解,可以更加精准地模拟不同区域、不同功能的水文与水动力过程。具体来说,在山丘区,可以运用新安江模型,并将其作为一个水文特征单元进行处理,进一步进行子流域划分,子

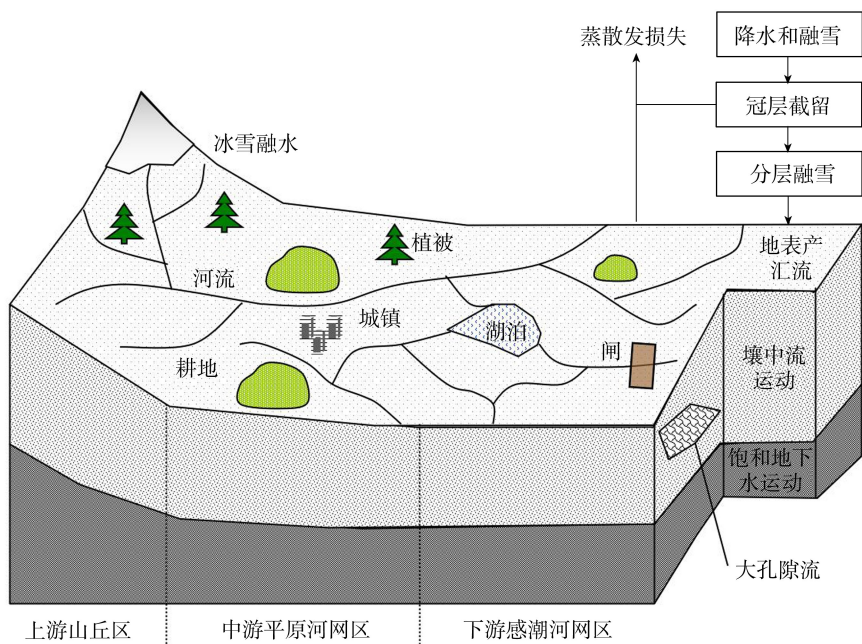


图 1 分布式架构水循环模型结构示意图

Fig. 1 Water cycle model structure of distributed architecture

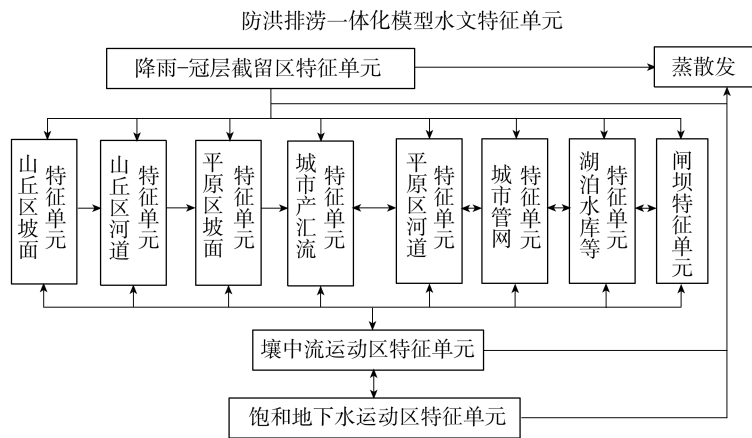


图 2 水文特征单元逻辑结构

Fig. 2 Logical structure of hydrological characteristic units

流域即为水文计算单元。在平原区,模型可以细化为不同类型的水文特征单元,如河道一维特征单元、河道二维特征单元、湖泊零维和二维特征单元、堰闸特征单元以及坡面特征单元等。这些水文特征单元内还可以进一步细分为水文计算单元,如河道一维特征单元中的断面、河道二维特征单元中的网格等。通过这种方法,防洪排涝一体化模型不仅能够在自然水文过程中精确捕捉洪水和排水的动态,还能够考虑工程设施的调度与操作对水流的影响。水文特征单元的分类并非一成不变,随着对流域水循环机理理解的深入,以及防洪排涝调度需求的变化,模型可以不断细化和扩展,逐步提升其在复杂水文环境下的应用效果。各种水文特征单元的详细模拟原理参见文献[29-33]。

1.2 水网地区多要素、多过程耦合

1.2.1 产流与汇流特征单元的耦合

长江下游地区地势平坦,水系发达,河流纵横交错,多呈网状分布。其汇流过程不同于山丘区,没有统一的汇流出口。为了研究平原区产水量的分配过程,将产水汇流到周边河道中,提出河网多边形的概念,实现了产流过程与汇流过程的耦合。河网多边形是指由概化河道、各类分界线所围成的封闭区域(图 3)。图 3(a)多边形面积上的产水或需水必须经周边的概化河道排泄或补给。图 3(b)多边形产水或需水只能通过概化河道周边排出或补给,其他性质的边,例如沿江、沿海、湖泊岸边、山丘分水线或平原区的分界线等,不

能排泄多边形水量。图 3(c)是一些特殊的多边形,它的周边无概化河道,例如滨湖的一些山丘,滨湖一侧的山丘区降雨产流只可能汇入湖泊。

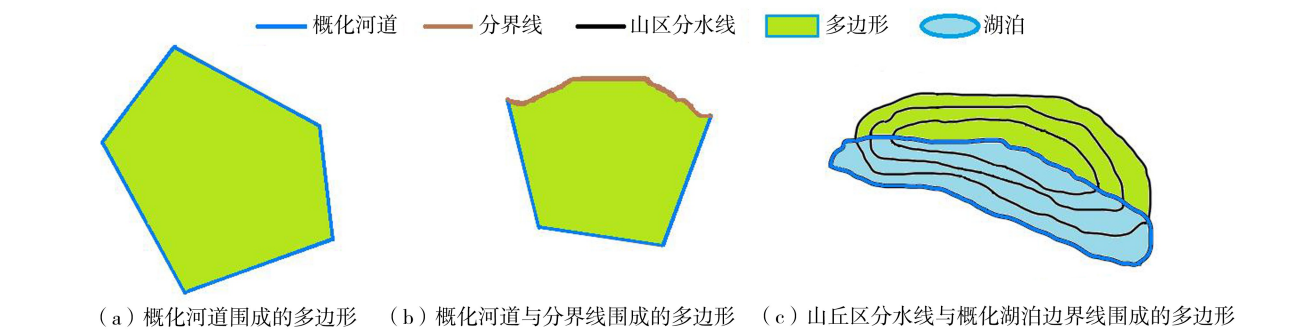


图 3 河网多边形
Fig. 3 River network polygon

为了进行数值模拟,将计算区域划分为网格(如 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$)。图 4 为由概化河道 1、2、3、4、5 构成的多边形的网格划分,多边形的面积及各类下垫面面积,可以用其覆盖的网格计算得到。多边形面积上的产流量等只能分配到多边形周围概化河道 1、2、3、4、5。多边形中的任一网格,需要明确它的产流流向哪一条概化河道,其灌溉需水取自于哪一条概化河道。在没有详细地形资料(DEM)的情况下,假定网格与距离最近的概化河道联系,例如,图 4 中的黑色网格与概化河道 5 联系,即该网格的产水流入概化河道 5,该网格的灌溉需水只能从概化河道 5 引取。该网格与其他概化河道 1、2、3、4 无关。

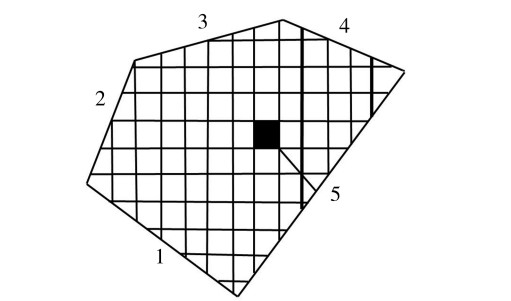


图 4 河网多边形栅格化处理
Fig. 4 Rasterization of river network polygon

仅把距离大小作为网格与周围概化河道联系的唯一依据,有时会产生不合理的结果,会出现一条小河与很多网格相联系的情况,结果洪水时有太多的雨洪汇集到该条小河,来不及排泄而形成高水位;或需要太多的灌溉水而使得河道干涸。因此,为了模型的计算稳定性,在分配中考虑河道过水能力,定义综合系数:

$$\theta = s/AR^{0.67} \tag{1}$$

式中: θ 为综合系数; A 为河道的过水面积; R 为河道水力半径; s 为计算网格到概化河道的最小距离。
将网格分配到周边综合系数最小的那条概化河道,网格所属的下垫面亦随着网格的分配而归属于相应的概化河道。

1.2.2 汇流特征单元的耦合

水流运动模拟可由零维、一维或二维(准三维)模拟组成,各部分模拟必须耦合联立求解才能反映相互间的互馈关系。对于模拟区域中控制水流运动的堰、闸、泵等水利工程,采用水力学闸孔流量公式进行模拟,线性化离散流量公式得到闸孔流量与上下游水位的关系,与零维、一维或二维(准三维)水位耦合进行统一求解。

在河网水流模拟计算中河道的交汇点称之为节点,对于河网节点,按节点处的蓄水面积可分为两类:①节点处有较大的蓄水面积,节点的水位变化产生的蓄水量变化不可忽略,这一类节点称之为有调蓄节点;②节点处的调蓄面积较小,水位变化产生的节点蓄水量变化可以忽略不计,这一类节点称之为无调蓄节点。在河网一维水流计算中,节点有一个基本假定,节点水位和与之相通的河道断面水位相等,即节点水面是平的,不考虑水头差。

河网节点水量平衡公式为

$$\sum Q = A(Z) \partial Z / \partial t \tag{2}$$

式中: $A(Z)$ 为节点调蓄面积; Z 为节点水位; $\sum Q$ 为包括降雨产汇流、河道出入流在内的所有出入节点的产流量。

在河网模拟计算中,节点水位的求解是整个河网水流模型计算的关键,节点水位获得后可以计算得到河

道任一断面的水位产流量。节点水位也是全流域耦合的关键。对于每一个节点,根据节点类型分别建立相应的水量平衡方程,结合边界节点的边界条件,可构建关于节点水位的完备线性方程组,从而实现水动力过程之间的耦合求解。

2 防洪排涝一体化模型

2.1 研究区概况

滁河是长江下游一级支流,发源于安徽省肥东县梁园镇,沿途流经合肥市、滁州市、芜湖市、马鞍山市和南京市,于大门口汇入长江,干流长度 269 km,左岸山丘区有 8 条主要支流汇入,右岸有 5 条分洪道,襄河口闸、汭河集闸为上中下游分界。滁河流域北邻淮河流域,南与秦淮河流域隔江而望,地形四周高,中间低,上游为山丘区,下游为向长江敞开的平原区,地面高程范围为 0~426 m,面积约 8 000 km²(安徽境内 6 250 km²,江苏境内 1 750 km²)。流域属于亚热带季风气候区,年降水量 910~1 056 mm,集中于汛期 5—9 月^[34]。

流域地形水系及水文站点分布如图 5(a)所示。研究区土地利用主要以水田、旱地及非耕地为主,水田主要分布在地势平坦的平原区,旱地及非耕地集中在流域上游的山丘区,滁州市主城区和南京市六合区城区分别集中在来安河、清流河两岸和滁河干流下游平原区,流域土地利用情况如图 5(b)所示。

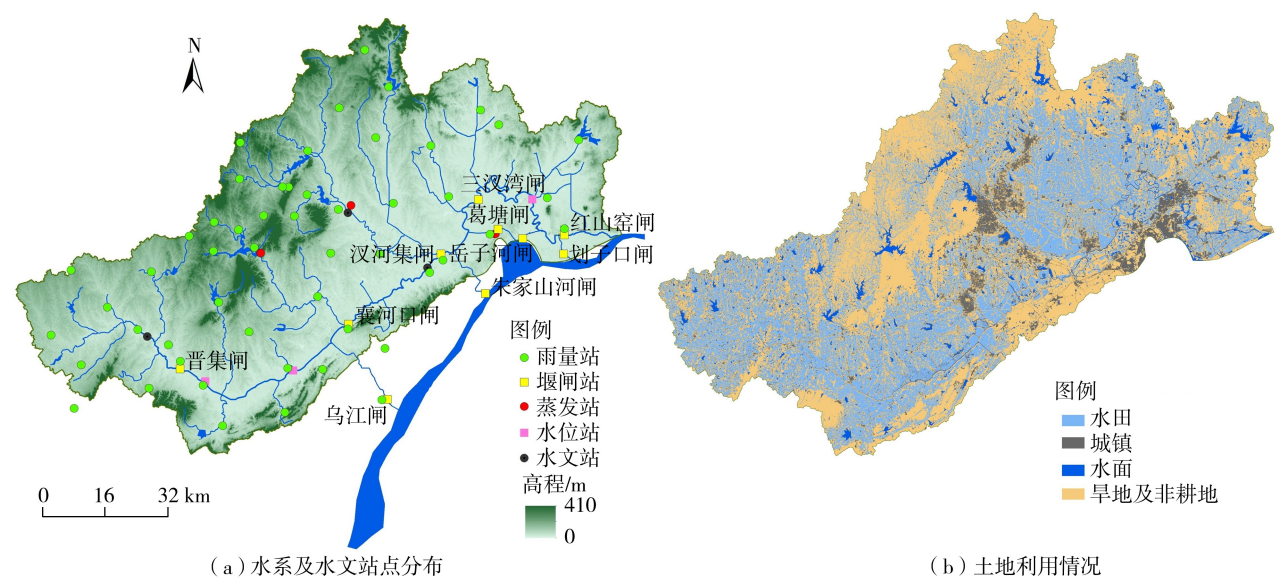


图 5 滁河流域概况
Fig. 5 Overview of the Chuhe River Basin

流域内人口约 300 万人,有扬子乙烯、京沪高铁等国家大型骨干企业和重要铁路线。目前,滁河流域已基本形成了以堤防为基础,分洪道、蓄滞洪区、支流水库和河道整治等工程措施与防洪非工程措施相结合的综合防洪体系。堤防总长 966.4 km,5 条分洪道设计总流量为 2 840 m³/s。流域中共有 4 处蓄滞洪区,分别为荒草二圩、荒草三圩、蒿子圩、汪波东荡,蓄滞洪区总面积 19.5 km²,总蓄洪容积 9 725 万 m³。已建大中型水库 23 座,总库容 10.12 亿 m³,水库总集水面积 1 868 km²,其中防洪作用较大、纳入滁河洪水调度方案的水库包括黄栗树、沙河集、城西、屯仓、金牛山水库,集水面积共 1 041 km²,总库容 6.75 亿 m³,防/滞洪库容约 2.5 亿 m³。干流自上而下建有晋集闸、襄河口闸、汭河集闸、三汊湾闸和红山窑闸,用于对干流水量进行调蓄。21 世纪以来,流域于 2003 年 7 月、2008 年 7 月、2015 年 6 月、2020 年 7 月发生了较大规模的暴雨洪涝灾害,直接经济损失超 73 亿元,受灾总人口约 257 万人。滁河干流行洪能力与汛期来水不匹配,且易受长江潮水顶托,通过构建滁河流域防洪排涝一体化模型对流域洪水进行模拟,可为流域综合治理与管理提供技术与决策支撑。

2.2 模型构建

2.2.1 模型概化

根据分辨率为 30 m 的流域数字高程模型(DEM)概化 87 个山丘区子流域(图 6),山丘区子流域总面积

5 889 km²,其中高亮集水文站控制面积 759 km²,滁州水文站控制面积 1 072 km²。各山丘区子流域水文模型采用新安江模型。山丘区在山丘区子流域模型的基础上,利用蓄泄关系概化 5 座纳入滁河洪水调度方案的水库(黄栗树、沙河集、城西、屯仓、金牛山),如图 6 所示。利用分辨率为 10 m 的流域 4 种下垫面(水面、水田、旱地及非耕地、城镇)土地利用信息,网格化平原区,网格分辨率为 200 m,网格总数 50 470 个,各网格内使用平原区降水径流模型进行产流计算,平原区总面积 1 980 km²。模型共概化 108 个圩区(包含荒草二圩、荒草三圩、蒿子圩、汪波东荡 4 个蓄滞洪区),圩区总面积 898 km²,使用圩区模型进行计算。模型考虑了包括滁河干流、来安河、清流河、长江等在内的 25 条河道,其中滁河概化长度 205 km,共 297 个断面,长江概化大通至徐六泾段,长度 489 km,共 157 个断面,具备实测断面资料的河段采用实测断面资料,不具备实测断面资料的河段统一概化为梯形断面,采用一维河道模型进行计算。此外,模型在平原区还概化了 10 座用于控制滁河上下游及其与对江外排水量的堰闸,均依据控制条件进行控制并使用闸坝工程模拟算法进行计算。总体而言,耦合平原区降雨径流模型、圩区模型、一维河道模型和闸坝工程模型对滁河流域平原区进行产汇流计算,山丘区产汇流计算结果通过一维河道模型与平原区产汇流计算进行耦合。

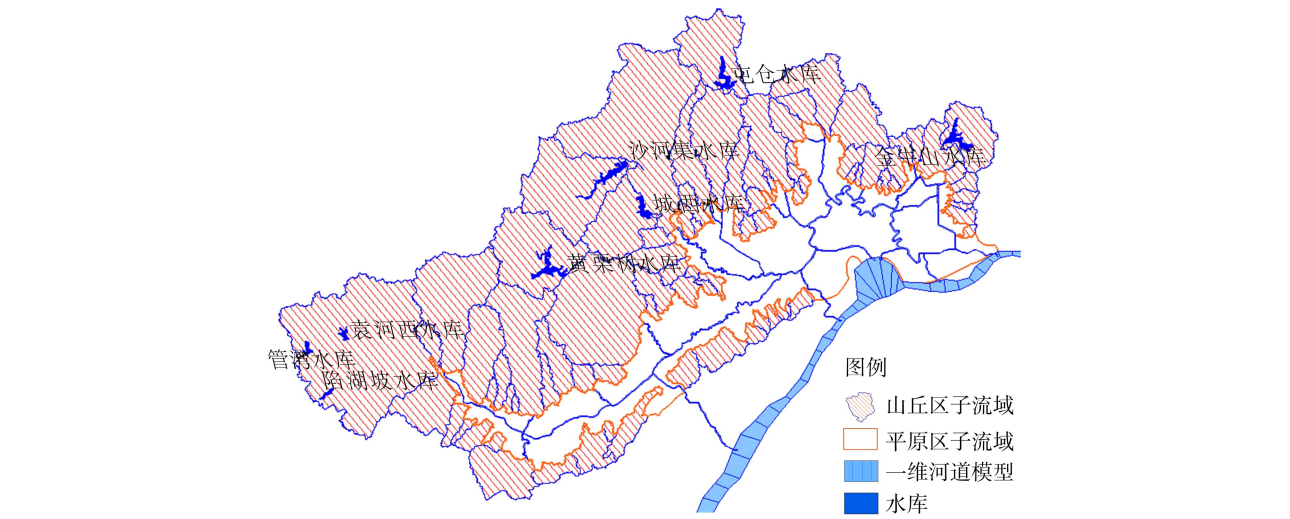


图 6 流域水文水动力模型信息

Fig. 6 Information on hydrological and hydrodynamic models of basin

建立滁河流域水文水动力模型时使用梁园、独山等 52 个雨量站的逐日平均雨量数据,黄栗树等 3 个蒸发站的逐日蒸发数据,雨量站和蒸发站的分布如图 5 (a)所示。综合来看,滁河自上而下分布有古河、赤镇、襄河口闸、晓桥、汊河集闸等堰闸站及水位站,洪水期流域水量外排通道主要有驷马山引江水道、朱家山河、马汊河等 6 条,枯水期可通过驷马山引江水道引江入滁,6 条通道均有闸门控制,流域堰闸站和水位站分布如图 5(a)所示。模型上边界条件采用大通水文站流量边界,下边界条件采用徐六泾潮位站潮位边界,由于长江水位计算结果对滁河流域影响较大,故在大通与徐六泾之间采用芜湖站实测水位数据对长江计算结果进行校准及河道糙率率定。模型采用 2016、2020 汛期洪水过程进行率定和验证,其中 2016 年数据用于模型率定,2020 年数据用于模型验证,水文模型计算时间步长为 1 h,水动力模型计算时间步长为 15 min。模型主要概化基本信息见表 1。

2.2.2 模型率定与验证

选取高亮集水文站 (GLJ) 和滁州水文站 (CHZ) 控制的子流域进行水文模型的参数率定和模型验证,率定与验证结果如图 7 所示。通过纳什效率系数 (NSE)、流量峰值相对误差 (E_{RP}) 以及峰现时差 (E_{PT}) 3 个指标评价模型率定与验证的结果。

由表 2 可知,用于率定的 2016 年 2 场次洪水过程 NSE 均在 0.85 以上, E_{RP} 在 $\pm 3\%$ 以内, E_{PT} 在 3 h 以内。

表 1 滁河流域主要概化信息

Table 1 Information of major generalized elements in the Chuhe River Basin

特征单元	模型算法	概化个数
山丘区坡面单元	新安江模型	87
平原区坡面单元	平原区降雨径流模型	1
平原区河道单元	一维水动力学模型	25
水库单元	零维模型	5
圩区单元	圩区模型	108
闸坝工程单元	闸坝工程模拟算法	10

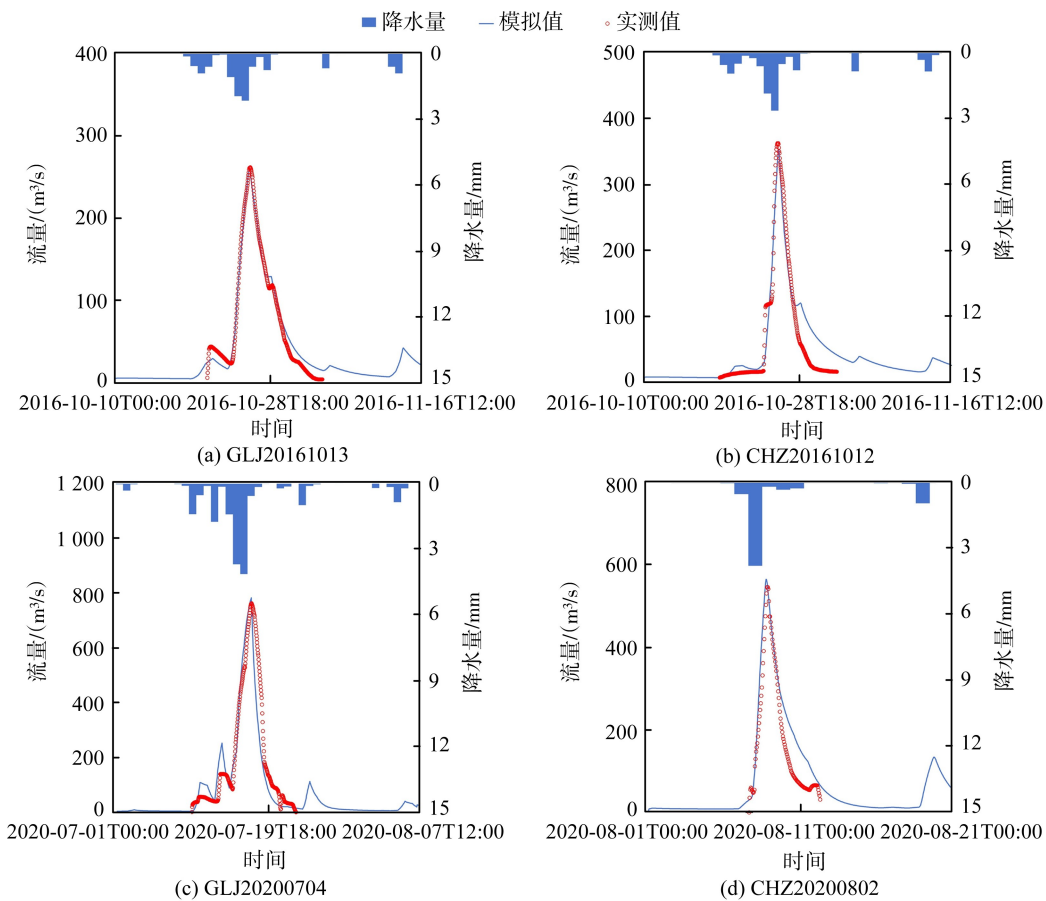


图 7 水文模型率定与验证结果

Fig. 7 Calibration and validation results of hydrological model

用于验证的 2020 年 2 场次洪水过程 NSE 同样均在 0.85 以上, E_{RP} 在 $\pm 4\%$ 以内, E_{PT} 在 3 h 以内, 率定与验证结果均达到甲级精度, 两个子流域率定的模型参数可适用到其他子流域。

选取古河 (GH)、赤镇 (CZ)、襄河口闸 (XHKZ)、晓桥 (XQ)、汴河集闸 (CHJZ) 等堰闸站及水位站的闸上水位/水位模拟过程对水动力模型进行率定与验证, 率定站点为古河、赤镇、襄河口闸、晓桥、汴河集闸, 验证站点为古河、赤镇、襄河口闸。通过洪峰水位差 (E_{ZP})、峰现时差 (E_{PT}) 和纳什效率系数 (NSE) 3 个指标评价模型率定与验证的结果。

由表 3 可知, 率定站点 E_{ZP} 最大为 0.51 m, 最小为 ± 0.24 m, E_{PT} 最小为 4 h, 最大为 75 h, 主要是由于 GH2016 次洪水实测是“双峰”过程 (图 8, 图中日期代表该日零点), 造成了水位模拟误差; NSE 最大值为 0.92, 最小值为 0.60。验证站点 E_{ZP} 最大为 1.95 m, 最小为 0.64 m, E_{PT} 最小为 3 h, 最大为 18 h; NSE 最大值为 0.75, 最小值为 0.57。在 2020 年验证站点, 均出现模拟水位峰值较实测水位峰值高的情况, 分析原因可能为: ①2020 年滁河流域发生流域性大洪水, 襄河口闸上游除古河站外, 实测洪峰水位均超过历史最高水位, 荒草二圩、荒草三圩相继破圩进洪, 但受限于资料

表 2 水文模型率定与验证结果误差统计
Table 2 Error statistics of calibration and validation results of hydrological model

次洪序号	NSE	$E_{RP}/\%$	E_{PT}/h
GLJ20161013	0.98	-0.11	3
CHZ20161012	0.89	-2.46	1
GLJ20200704	0.86	2.64	1
CHZ20200802	0.88	3.59	3

表 3 水动力模型率定与验证结果
Table 3 Error statistics of calibration and validation results of hydrodynamic model

次洪序号	Z_{PS}/m	Z_{P0}/m	E_{ZP}/m	E_{PT}/h	NSE/%
GH2016	12.50	12.74	-0.24	75	0.92
CZ2016	12.21	11.7	0.51	4	0.60
XHKZ2016	11.74	11.34	0.40	4	0.76
XQ2016	9.83	9.52	0.31	4	0.62
CHJZ2016	9.39	9.15	0.24	4	0.79
GH2020	16.06	15.42	0.64	3	0.75
CZ2020	15.41	13.46	1.95	18	0.60
XHKZ2020	13.71	12.67	1.04	8	0.57

注: Z_{PS} 为洪峰水位模拟值, Z_{P0} 为洪峰水位实测值。

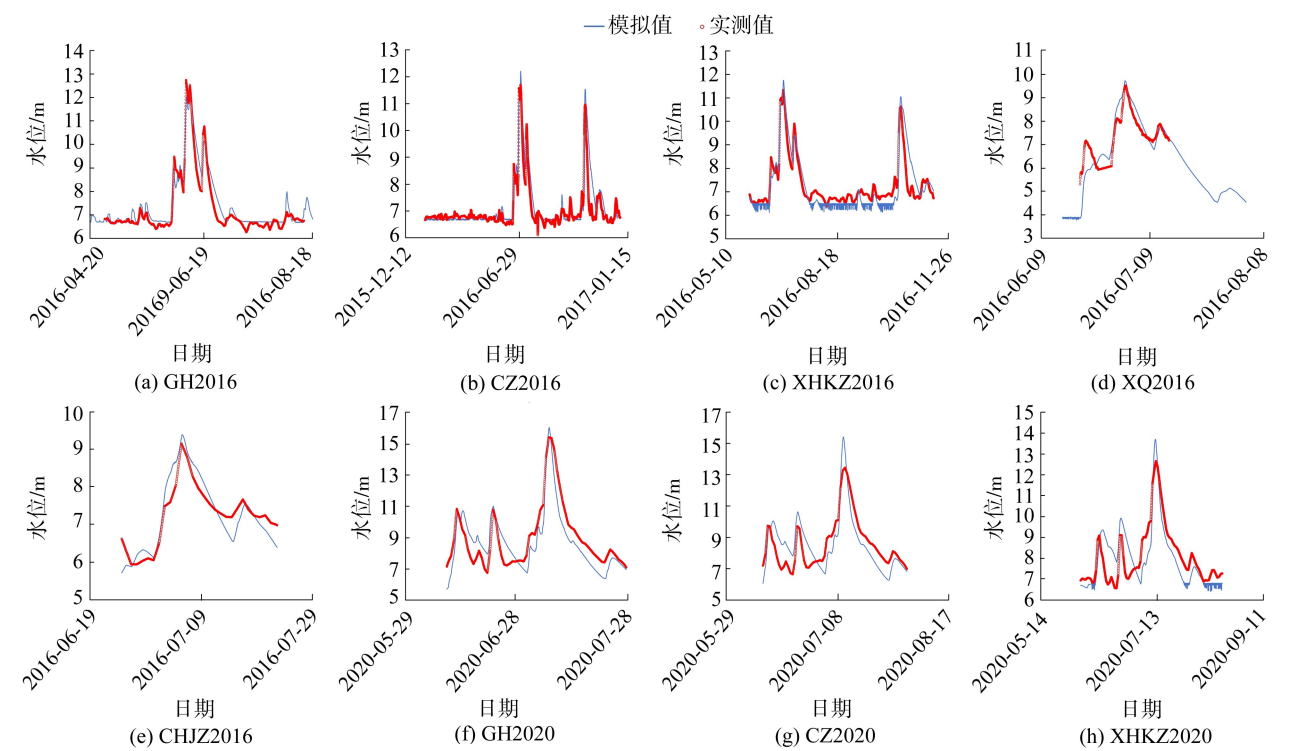


图 8 水动力模型率定与验证结果

Fig. 8 Calibration and validation results of hydrodynamic model

情况,建立的模型并未对破坏进行模拟,故出现模拟洪峰水位较实测值高的情况;②部分入江水道堰闸实际控制条件资料并未掌握(岳子河闸、朱家山河闸等),使用概化假设的控制条件,造成流域入江水量计算与实际有差别,进而给水位模拟带来一定的误差。

2.3 讨论

针对滁河流域洪水特点和实际防洪需求,基于分布式架构水循环模型构建滁河流域水文水动力耦合防洪排涝一体化模型,模拟结果表明模型能够较好地再现 2016 年和 2020 年流域内汛期洪水过程。针对流域山丘区所建立的新安江模型经过 2016 年高亮集、滁州水文站实测洪水过程的率定,对 2 站 2020 年洪水过程的模拟纳什效率系数均在 0.85 以上,洪峰相对误差在 4% 以内,峰现时差在 3 h 以内,可较好地再现 2020 年流域山丘区洪水过程。针对流域平原区,耦合平原区降雨径流模型、圩区模型、一维河道模型和闸坝工程模型对平原区进行产汇流计算,依据滁河干流自上而下分布的堰闸站、水位站实测数据,对平原区水文水动力模型进行率定,率定站点水位过程模拟效果纳什效率系数最高达 0.92,洪峰水位差最小为 ± 0.24 m,经过率定的模型能够较好地再现 2016 年洪水期滁河干流各站水位变化过程,在验证站点洪峰水位差最小为 0.64 m,模拟水位变化过程基本与实测水位过程相符。

防洪排涝一体化模型是滁河流域首次尝试建立耦合长江边界的全流域一体化防洪排涝模型,模拟效果尚佳,但研究仍存在一些不足和局限性:①受限于资料收集情况,流域部分主干河道(如八百河、新篁河、新禹河、皂河等)均没有实测河道大断面资料,模型中均使用概化的梯形断面和统一设置的比降,势必会给平原区水位模拟带来较大的误差。②水利工程资料掌握不全面,部分入江水道控制闸(岳子河闸、朱家山河闸、划子口闸等)工程数据和控制条件均采用概化数据和假设条件,其与闸门实际启闭过流过程不甚相同,这导致模型计算的流域对江外排水量存在一定的误差。③参与模型率定和验证的水文序列仅有 2016 年和 2020 年 2 个丰水年水文资料,模型在平水年或枯水年的应用效果未知。在对滁河流域未来更加深入的研究中,应搜集整理更加全面的河道地形、水利工程和水文资料,对现有的滁河流域防洪排涝一体化模型的概化假设部分进行实际基础资料的模块化替换,并增加漫堤破坏模拟和城市洪涝模拟部分,进一步提高模型对流域洪水的模拟效果,以期对滁河流域防洪及水资源管理规划提供模型基础,提高流域应对气候变化条件下极端洪水和城市洪涝的能力。

3 结 论

- a. 建立的滁河流域一体化防洪排涝模型对流域典型洪水过程的模拟效果较好,能够初步应用于流域防洪和水资源管理规划。
- b. 模型模拟过程反映了流域洪水的水文水动力特性,流域“环滁皆山”的基本地理格局决定了洪水期山丘区的水量会快速汇集于平原区河道,而流域下游平原区水动力条件较差,因此造成丰水年洪水期滁河干流水位过高而致涝的主要原因是对外排不畅。在模型的角度,降低滁河干流洪峰水位一方面要“坦化”山丘区洪水过程,即工程上增加水库调蓄(上拦),另一方面要“加速”平原区河道水流,即工程上疏浚河道,增加分洪道泄流能力(下排)。若遇长江顶托下排不畅,要“调蓄”河道洪水过程,即工程上完善蓄滞洪区建设,增强流域应对极端洪水的能力(分蓄)。

参考文献:

[1] 丁胜祥,游中琼,宁磊. 2016 年滁河洪水对新修订洪水调度方案的检验[J]. 人民长江,2017,48(4):32-36. (DING Shengxiang,YOU Zhongqiong,NING Lei. Verification of newly revised flood dispatching scheme by flood control practice of 2016 Chuhe River flood[J]. Yangtze River,2017,48(4):32-36. (in Chinese))

[2] 王荣喜,徐维国,陈祥. 2020 年安徽省长江流域防汛抗洪回顾与启示[J]. 人民长江,2020,51(12):52-55. (WANG Rongxi,XU Weiguo,CHEN Xiang. Review and enlightenment on Yangtze River flood control in Anhui province in 2020[J]. Yangtze River,2020,51(12):52-55. (in Chinese))

[3] 游中琼,彭兴. 滁河襄河口以上 2020 年洪水应对措施思考[J]. 人民长江,2020,51(12):160-165. (YOU Zhongqiong,PENG Xing. Reflections on countermeasures against 2020 flood above Xianghekou sluice of Chuhe River[J]. Yangtze River,2020,51(12):160-165. (in Chinese))

[4] 张锦堂,洪建智,朱琼,等. 2020 年滁河洪水调度实践与分析[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(3):32-35. (ZHANG Jintang,HONG Jianzhi,ZHU Qiong,et al. The practice and analysis of flood dispatching in Chuhe River Basin in 2020[J]. China Flood & Drought Management,2021,31(3):32-35. (in Chinese))

[5] LI Zhiqing,SUN Zhaohua,CHEN Li,et al. A large-scale hydrological and hydrodynamic coupled model for flow routing in the Yangtze-Dongting system[J]. Journal of Hydrology,2024,641:131768.

[6] 刘金涛,宋慧卿,张行南,等. 新安江模型理论研究的进展与探讨[J]. 水文,2014,34(1):1-6. (LIU Jintao,SONG Huiqing,ZHANG Xingnan,et al. A discussion on advances in theories of Xin' anjiang model[J]. Journal of China Hydrology,2014,34(1):1-6. (in Chinese))

[7] 杨甜甜,梁国华,何斌,等. 基于水文水动力学耦合的洪水预报模型研究及应用[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(1):72-78. (YANG Tiantian,LIANG Guohua,HE Bin,et al. Study and application of a flood forecasting model based on coupled hydrological-hydrodynamic approach[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(1):72-78. (in Chinese))

[8] XU Yu,XU Youpeng,WANG Qiang,et al. Spatial diversion and coordination of flood water for an urban flood control project in Suzhou,China[J]. Water Science and Engineering,2024,17(2):108-117.

[9] JABER F H,SHUKLA S. MIKE SHE:model use,calibration,and validation[J]. Transactions of the ASABE,2012,55(4):1479-1489.

[10] 张旭旻,瞿思敏,李倩,等. 基于协整理论的淮河流域上游洪水预报实时校正方法[J]. 水资源保护,2022,38(6):88-95. (ZHANG Xumin,QU Simin,LI Qian,et al. Real-time correction method of flood forecasting for the Upper Huaihe River Basin based on cointegration theory[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):88-95. (in Chinese))

[11] 石朋,陆美霞,吴洪石,等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. 水资源保护,2023,39(4):19-25. (SHI Peng,LU Meixia,WU Hongshi,et al. Evaluation of different optimization algorithms in parameter calibration of Xin' anjiang model [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):19-25. (in Chinese))

[12] GUO Xiao,WU Zhiyong,FU Guobin,et al. A multi-variable calibration framework at the grid scale for integrating streamflow with evapotranspiration data to improve the simulation of distributed hydrological model[J]. Journal of Hydrology:Regional Studies,2024,55:101944.

[13] 林雍权,陈启慧,李琼芳,等. 基于新安江模型的老挝南俄河流域径流变化贡献率分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):21-26. (LIN Yongquan,CHEN Qihui,LI Qiongfang,et al. Analysis of contribution rate of runoff variability of Nam Ngum

River Basin in Laos based on Xin'anjiang model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(3): 21-26. (in Chinese))

[14] 殷寅,曾贤敏,李伟,等. 基于水文水动力耦合模型的三江流域防洪模拟预报应用研究[J]. 江淮水利科技,2024(2):23-27. (YIN Yin,ZENG Xianmin,LI Wei,et al. Research on flood simulation and forecast application in the Sanjiang Basin on hydrological and hydrodynamic coupling model[J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology,2024(2):23-27. (in Chinese))

[15] 向小华,吴晓玲,牛帅,等. 通量差分裂方法在一维河网模型中的应用[J]. 水科学进展,2013,24(6):894-900. (XIANG Xiaohua,WU Xiaoling,NIU Shuai,et al. An application of flux difference splitting scheme in river-network model[J]. Advances in Water Science,2013,24(6):894-900. (in Chinese))

[16] 韩超,梅青,刘曙光,等. 平原感潮河网水文水动力耦合模型的研究与应用[J]. 水动力学研究与进展,2014,29(6):706-712. (HAN Chao,MEI Qing,LIU Shuguang,et al. Research and application on a coupled hydrological and hydrodynamic model in plain tidal river network[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2014,29(6):706-712. (in Chinese))

[17] 李彬权,陈丞,肖洋,等. 平原圩区复合下垫面水文水动力耦合模型[J]. 水科学进展,2024,35(5):805-816. (LI Binqun, CHEN Cheng,XIAO Yang,et al. A hydrological and hydrodynamic coupling model in polder areas with a complex underlying surface[J]. Advances in Water Science,2024,35(5):805-816. (in Chinese))

[18] 罗志洁,刘海生,杜世鹏. 基于圩区产流与调蓄的大型平原河网水文水动力耦合模型研究[J]. 水电能源科学,2024,42(1):14-17. (LUO Zhijie,LIU Haisheng,DU Shipeng. Study on hydrology hydrodynamic coupling model of large plain river network based on runoff generation and regulation in Polder Area[J]. Water Resources and Power,2024,42(1):14-17. (in Chinese))

[19] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):13-19. (LI Zhijia,ZHANG Xinyuan,BAI Yunpeng,et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(5):13-19. (in Chinese))

[20] CHENG Xinyue,WANG Hao,CHEN Bin,et al. Comparative analysis of flood prevention and control at LID facilities with runoff and flooding as control objectives based on InfoWorks ICM[J]. Water,2024,16(3):374.

[21] WARREN I R,BACH H K. MIKE21: A modelling system for estuaries, coastal waters and seas[J]. Environmental Software, 1992,7(4):229-240.

[22] 汪昊燃,王容,黄鹏年,等. 水文水力学结合的秦淮河流域洪水模拟与实时校正[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023, 51(3):25-30. (WANG Haoran,WANG Rong,HUANG Pengnian,et al. Research on flood simulation and real-time correction of Qinhuai River Basin combined with hydrology and hydraulics[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3): 25-30. (in Chinese))

[23] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展,2024, 44(6):41-47. (HOU Jun,CHEN Cheng,ZHENG Yulei,et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6): 41-47. (in Chinese))

[24] 王雨洁,李致家,姚成,等. 基于分布式水文水动力耦合模型的秦淮河流域洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025,53(2):11-18. (WANG Yujie,LI Zhijia,YAO Cheng,et al. Flood simulation in the Qinhuai River Basin based on a coupled distributed hydrological and hydrodynamic model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2025,53(2):11-18. (in Chinese))

[25] LIU Zhanyan,ZHANG Hongbin,LIANG Qihua. A coupled hydrological and hydrodynamic model for flood simulation[J]. Hydrology Research,2019,50(2):589-606.

[26] SHEN Yanxia,XU Zhaoming,ZHOU Qi,et al. A direct two-way coupling of the hydrologic and 1D-2D hydrodynamic models for watershed flood simulation[J]. Journal of Hydrology,2024,639:131606.

[27] 程文辉,王船海,朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京:河海大学出版社,2006:180.

[28] 王船海,郑世威,李小宁,等. 基于太湖流域模型的城市内涝过程高效模拟[J]. 水科学进展,2022,33(3):462-473. (WANG Chuanhai,ZHENG Shiwei,LI Xiaoning,et al. Efficient simulation of urban flood inundation based on Taihu Lake Basin model[J]. Advances in Water Science,2022,33(3):462-473. (in Chinese))

[29] WANG Chuanhai, HUA Wenjuan, CHEN Gang, et al. Distributed-framework basin modeling system: I. Overview and model coupling[J]. Water,2021,13(5):678.

[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(5):13-19. (in Chinese))

[5] 盛金保,李宏恩,盛韬桢. 我国水库溃坝及其生命损失统计分析[J]. 水利水运工程学报,2023(1):1-15. (SHENG Jinbao, LI Hongen,SHENG Taozhen. Statistical analysis of dam failure and its loss of life in China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(1):1-15. (in Chinese))

[6] ZHONG Qiming,CHEN Shengshui,DENG Zhao. Numerical model for homogeneous cohesive dam breaching due to overtopping failure[J]. Journal of Mountain Science,2017,14(3):571-580.

[7] ZHONG Qiming,CHEN Shengshui,FU Zhongzhi,et al. New empirical model for breaching of earth-rock dams[J]. Natural Hazards Review,2020,21(2):06020002.

[8] 杨蒙,钟启明,林忠,等. 沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝试验与溃坝过程数值模拟[J]. 岩土工程学报,2024,46(7):1534-1540. (YANG Meng,ZHONG Qiming,LIN Zhong,et al. Model tests and numerical simulation of overtopping-induced breach process of asphalt concrete core dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(7):1534-1540. (in Chinese))

[9] 李炎隆,邱文,王琳,等. 混凝土面板砂砾石坝漫顶溃坝数值模拟[J]. 应用力学学报,2023,40(1):96-106. (LI Yanlong, QIU Wen,WANG Lin,et al. Numerical simulation for concrete-face sand-gravel dam breaching due to overtopping[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2023,40(1):96-106. (in Chinese))

[10] 贺娟,王晓松. 基于 HEC-RAS 及 HEC-GeoRAS 的溃坝洪水分析[J]. 水利水运工程学报,2015(6):112-116. (HE Juan, WANG Xiaosong. Analysis of dam-break flood based on HEC-RAS and HEC-GeoRAS[J]. Hydro-Science and Engineering,2015 (6):112-116. (in Chinese))

[11] WANG Junna,ZHANG Zhonglong,GREIMANN B,et al. Application and evaluation of the HEC-RAS-riparian vegetation simulation module to the Sacramento River[J]. Ecological Modelling,2018,368:158-168.

[12] BRUNNER G W. HEC-RAS river analysis system;hydraulic reference manual version 6. 0[M]. Davis;Hydrologic Engineering Center of US Army Corps of Engineers,2021.

[13] 宁聪,傅志敏,王志刚. HEC-RAS 模型在二维溃坝洪水研究中的应用[J]. 水利水运工程学报,2019(2):86-92. (NING Cong,FU Zhimin,WANG Zhigang. Application of HEC-RAS for the research of 2D dam-break flood[J]. Hydro-Science and Engineering,2019(2):86-92. (in Chinese))

[14] BRUNNER G W. HEC-RAS river analysis system;HEC-RAS 2D user's manual[M]. Davis;Hydrologic Engineering Center of US Army Corps of Engineers,2024.

[15] 陈生水,曹伟,霍家平,等. 混凝土面板砂砾石坝漫顶溃决过程数值模拟[J]. 岩土工程学报,2012,34(7):1169-1175. (CHEN Shengshui,CAO Wei,HUO Jiaping,et al. Numerical simulation for overtopping-induced break process of concrete-faced sandy gravel dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(7):1169-1175. (in Chinese))

[16] 周克发. 溃坝生命损失分析方法研究[D]. 南京:南京水利科学研究院,2006.

[17] 李雷,王仁钟,盛金保,等. 大坝风险评价与风险管理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:20-21.

[18] 周克发,李雷,盛金保. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究[J]. 安全与环境学报,2007,7(3):145-149. (ZHOU Kefa,LI Lei,SHENG Jinbao. Evaluation model of loss of life due to dam breach in China[J]. Journal of Safety and Environment,2007,7 (3):145-149. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-16 编辑:刘晓艳)

.....

(上接第 37 页)

[30] CHEN Gang,HUA Wenjuan,FANG Xing,et al. Distributed-framework basin modeling system;II. Hydrologic modeling system [J]. Water,2021,13(5):744.

[31] LI Xiaoning,WANG Chuanhai,CHEN Gang,et al. Distributed-framework basin modeling system;Ⅲ. Hydraulic modeling system [J]. Water,2021,13(5):649.

[32] CHEN Gang,WANG Chuanhai,FANG Xing,et al. Distributed-framework basin modeling system;IV. Application in Taihu Basin [J]. Water,2021,13(5):611.

[33] ZHAO Pengxuan,WANG Chuanhai,WU Jinning,et al. Simulation and application of water environment in highly urbanized areas;a case study in Taihu Lake Basin[J]. Hydrology,2024,11(2):20.

[34] 刘美丽,姚鹏,湛忠宇,等. 滁河流域降水量变化特征分析[J]. 江苏水利,2023(7):36-39. (LIU Meili,YAO Peng,ZHAN Zhongyu,et al. Spatio-temporal analysis of precipitation in analysis of precipitation variation characteristics in the Chuhe River Basin[J]. Jiangsu Water Resources,2023(7):36-39. (in Chinese))

(收稿日期:2024-12-17 编辑:刘晓艳)