

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2025040

肖程之, 张丽伟, 臧文斌, 等. 天津市北四河水系防洪调度一体化模型建设[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(2): 1-6. XIAO Chengzhi, ZHANG Liwei, ZANG Wenbin, et al. Development of an integrated flood model for the North Four Rivers system in Tianjin City[J]. China Flood & Drought Management, 2025, 35(2): 1-6. (in Chinese)

天津市北四河水系防洪调度一体化模型建设

肖程之^{1,2} 张丽伟³ 臧文斌^{1,4} 徐 珊^{1,4} 李 敏^{1,4} 谷 仟^{1,4} 许惠敏^{1,4}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京100038; 2. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津300350;
3. 天津市水务工程运行调度中心, 天津300074;
4. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心), 北京100038)

摘 要: 在平原河网区域, 产汇流效果减弱会导致水文模型失效, 而大范围二维水动力模型虽然精度较高, 但存在建模成本高、计算效率低下等问题。为了准确模拟平原地区洪涝水的产汇流过程, 通过构建河道一维水动力模型、蓄滞洪区二维模型及防洪排涝工程调度模型, 并建立各模型之间的物理耦合关系, 形成天津市北四河水系防洪调度一体化模型, 实现了高效且精确的模拟。该模型在蓄滞洪区内采用二维地表水动力模型建模, 在蓄滞洪区以外区域通过“水文模型—排涝单元—泵站—河道”的方式进行计算, 既可在中小洪水期间准确模拟河道水力要素, 也能在超标准洪水来临时有效模拟蓄滞洪区内洪水演进情况。该模型为复杂河网地区提供了一个有效可行的水动力模型建模思路。

关键词: 防洪调度; 洪水模型; 天津市; 北四河水系

中图分类号: TV877

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2025)02-01-06

0 引 言

平原河网地区存在水系复杂, 圩区众多, 河道纵横交错, 比降平缓, 水流速度缓慢且流向不定等问题, 河道内水力要素变化受到外江水位或潮位、补水路径和闸控方式等多重因素影响, 加之区域内闸泵设施众多, 进一步增加了水动力模型构建的复杂性^[1-3]。而平原河网地区一旦发生洪水, 可能引发大面积洪涝灾害, 造成严重的经济损失。因此, 准确计算平原河网的水力要素, 对提升区域防洪减灾能力、水资源高效利用、生态环境治理及促进地区可持续发展具有重要意义^[4-6]。

本文以天津市北四河水系为研究对象, 考虑平原地区河网、闸—坝—泵等防洪排涝工程建筑物、蓄滞洪区内地

形及下垫面等因素, 提出了一种平原河网地区水动力模型构建方法。并采用 IFMS(Integrated Flood Modeling System)洪水分析软件, 构建了具有防洪排涝调度功能的一二维耦合水动力模型, 实现了平原河网地区的河道洪水演进、防洪排涝工程调度与蓄滞洪区运用的联合快速计算^[7-8]。

1 区域概况

1.1 建模范围

模型建设范围为北四河水系临近天津市上游关键防洪枢纽以下的流域范围, 具体包含邱庄水库、于桥水库、海子水库以下蓟运河水系, 密云水库、怀柔水库以下潮白河水系, 北关枢纽以下北运河水系, 卢沟桥枢纽以下永定河水系(图1)。

收稿日期: 2025-01-20

第一作者信息: 肖程之, 男, 博士研究生, E-mail: xiaochengzhi@edu.iwhr.com。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFC3209202); 天津市防洪调度应急指挥平台建设项目(JZ120205A0042024)。



图1 天津市北四河水系防洪调度一体化模型建设范围

1.2 区域概况

北四河水系历经多年治理,依托流域防洪体系,基本建成了以一二级河道、大中型水库、蓄滞洪区、河堤为骨架的水灾害防御体系。北四河水系包括永定河、北运河、潮白河和蓟运河,其中北运河、潮白河和蓟运河统称为北三河水系。北三河水系流域面积为 35 808 km²,3 条主要河流通过人工河道连接,分别是运潮减河、青龙湾减河和引沟入潮等^[9]。天津市境内的北三河水系防洪工程体系包括四大蓄滞洪区:大黄堡洼、黄庄洼、青甸洼和盛庄洼;控制性水闸枢纽有筐儿港枢纽、里自沽闸、宁车沽闸、九王庄闸、辛撞闸和蓟运河闸;境外临近的控制枢纽为北关枢纽和吴村闸枢纽;此外,还包括于桥水库和杨庄水库两座大中型水库^[10-11]。

研究区域内永定河分为卢沟桥至梁各庄段、永定河泛区和永定新河 3 段^[12]。卢沟桥至梁各庄段河道全长约 57 km,两岸设有堤防,堤防多为沙质,河道险工较多,抗洪能力较弱^[13]。永定河泛区范围自梁各庄至屈家店枢纽,河道全长约 67 km,纵坡呈现上、下段陡峭,中段平缓的特

点,左右大堤堤距一般为 6~7 km,最宽处可达 15 km,总面积约 500 km²。永定新河全长约 62 km,为以深槽行洪为主的复式河槽,大张庄以上为三堤两河,其中永定新河宽 300 m,新引河宽 200 m;大张庄以下河宽 500~600 m。区域内永定河水系的重要水闸枢纽包括屈家店枢纽和永定新河防潮闸,境外临近控制枢纽为卢沟桥枢纽,永定河系的蓄滞洪区则包括永定河泛区、三角淀、淀北、七里海 4 处^[14-15]。

2 模型建设思路

针对天津市北四河水系平原河网水系交叉连通性强、自排与强排并存等突出特点,本文以河道的一维水动力建模为基础框架,建立水闸调度、橡胶坝调度、泵站调度与河道水动力模型的耦合关系,并进一步关联了水文模型。此外,对于需要启用蓄滞洪区的洪水情景,还构建了蓄滞洪区二维模型模拟蓄滞洪区的启用、进洪过程及退洪过程。天津市北四河水系防洪调度一体化模型建设思路如图 2 所示。

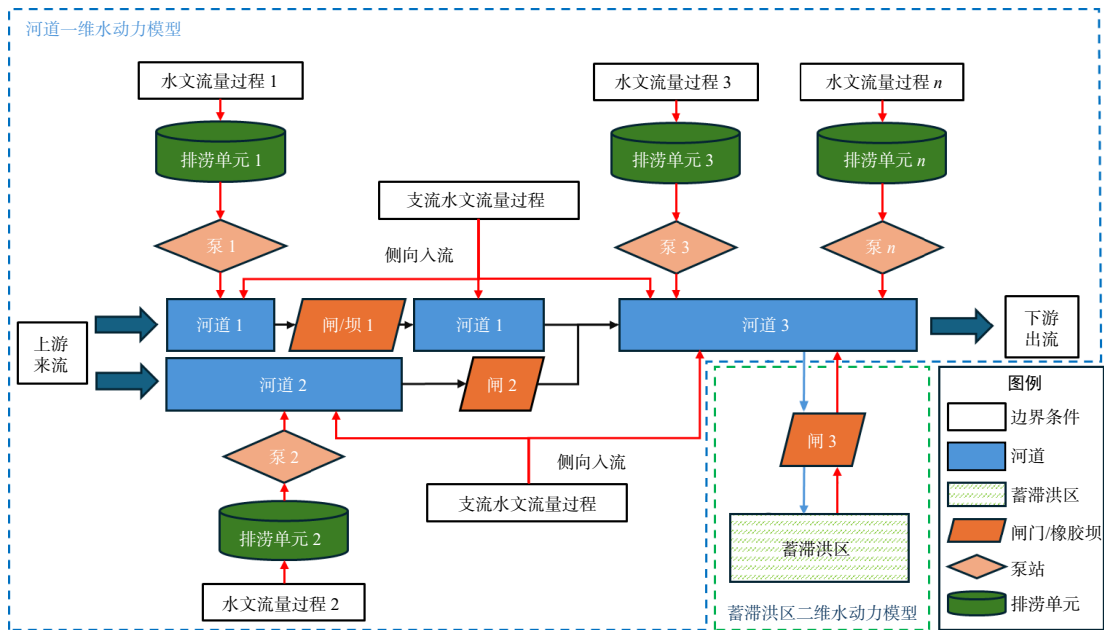


图 2 天津市北四河水系防洪调度一体化模型建设思路示意图

3 模型建设成果

本文通过构建河道一维水动力模型、蓄滞洪区二维水

动力模型及防洪排涝工程调度模型,并建立各模型之间物理耦合关系,形成了天津市北四河水系防洪调度一体化模型,建模技术路线如图 3 所示。

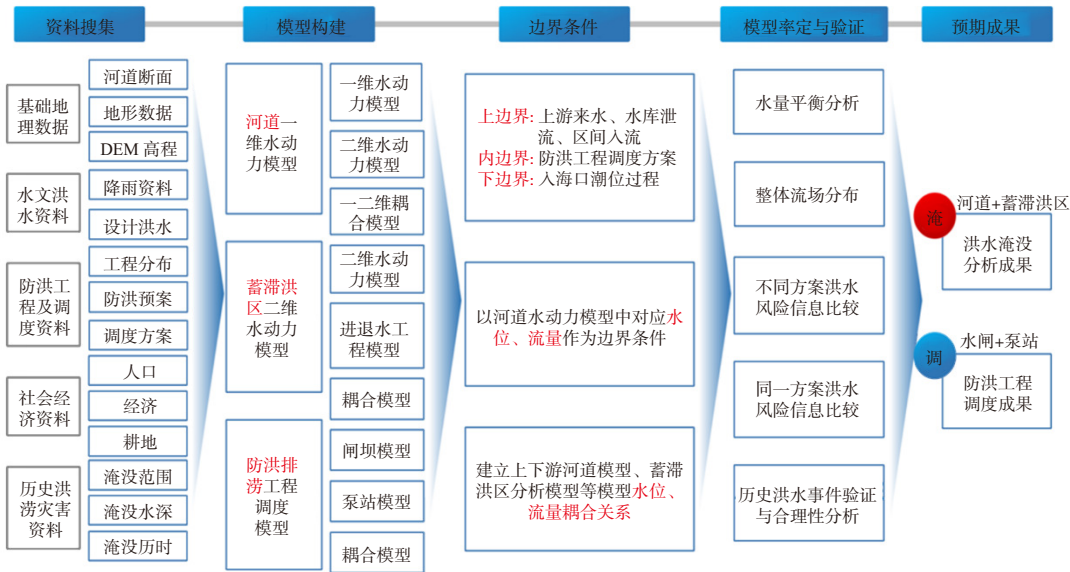


图 3 天津市北四河水系防洪调度一体化模型建设技术路线图

3.1 河道一维水动力模型

天津市北四河水系防洪调度一体化模型的河道一维水动力模型建模范围包括天津市境内主要行洪河道、境外上游临近防洪枢纽至市界的行洪河道。按河系划分,建模河道包括:①永定河水系,包括永定河(卢沟桥枢纽至屈家

店枢纽)、永定新河(含新引河)、北运河(筐儿港枢纽至屈家店枢纽)等;②北三河水系,包括北运河(北关枢纽至筐儿港枢纽)、运潮减河、青龙湾减河、潮白河(密云水库以下)、白河、潮河、怀河(怀柔水库以下)、沟河(海子水库以下)、还乡河(邱庄水库以下)、引沟入潮、潮白新河等。

本文采用近3年实测断面或高分辨率(2 m分辨率)数字高程模型(DEM),构建河道一维水动力模型,建模河道总长度1 425.84 km。其中,天津市境内一级河道11条,二级河道11条,总长度953.28 km;天津市境外主要行洪河道11条,总长度472.56 km。天津市北四河水系一维河道示意图如图4所示。

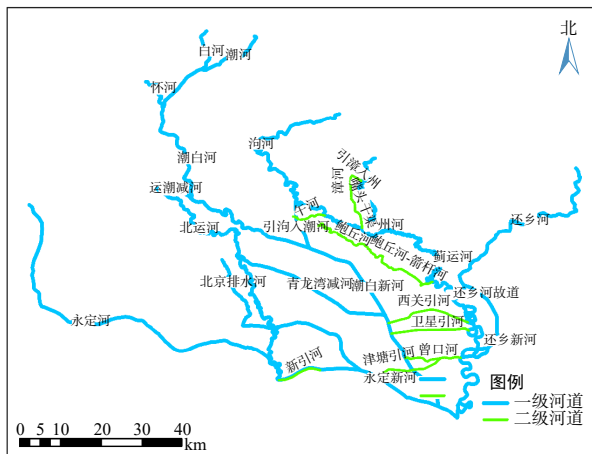


图4 天津市北四河水系一维河道示意图

3.2 蓄滞洪区二维水动力模型

天津市北四河水系防洪调度一体化模型的蓄滞洪区洪水分析模型建设范围包括青甸洼、盛庄洼、黄庄洼、大黄堡洼、永定河泛区、三角淀、淀北、七里海等8个蓄滞洪区。在逐一分析各蓄滞洪区安全区设置、围堤、导水建(构)筑物、阻水建(构)筑物、洪水演进特点的基础上,分别构建各蓄滞洪区二维水动力模型、进退水工程模型,蓄滞洪区二维水动力模型如图5所示。

此外,为同时满足河道与蓄滞洪区实时联合调度计算、蓄滞洪区进退洪淹没过程分析等需求,按照控制边长100~200 m分别剖分地表网格,共计7.5万个。采用天津

市2024年2 m精度DEM数据对网格高程赋值,并根据2021年Sentinel-1和Sentinel-2数据解译的10 m分辨率全球土地利用数据对网格糙率赋值。

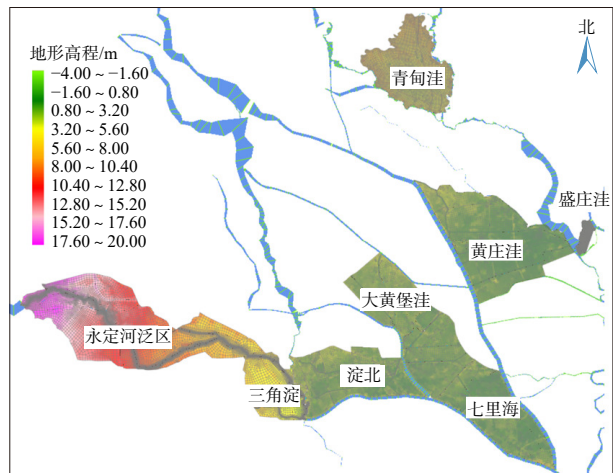


图5 天津市北四河水系蓄滞洪区二维水动力模型

3.3 防洪排涝工程调度模型

防洪工程调度模型由闸门调度、橡胶坝调度、泵站调度等模型构成,防洪排涝工程分布见图6。

(1)闸门调度。天津市北四河水系防洪调度一体化模型需建模水闸(或枢纽)共38座,其中具备防洪调度功能的水闸包括蓟运河防潮闸、宁车沽闸等共23座水闸,分布如图6(a)所示。水闸调度方式包括规程调度和开度控制、流量控制、水位控制调度等。

(2)橡胶坝调度。天津市北四河水系防洪调度一体化模型涉及橡胶坝13座,其中八孔闸橡胶坝等具有防洪调度功能,橡胶坝分布如图6(b)所示。橡胶坝调度包括规程调度、水位调度、升降过程调度、控泄调度、主槽橡胶坝调度等多种方式。

(3)泵站调度。天津市北四河水系范围内涉及的泵站308座,其中纳入一体化模型具有防洪调度功能的重要

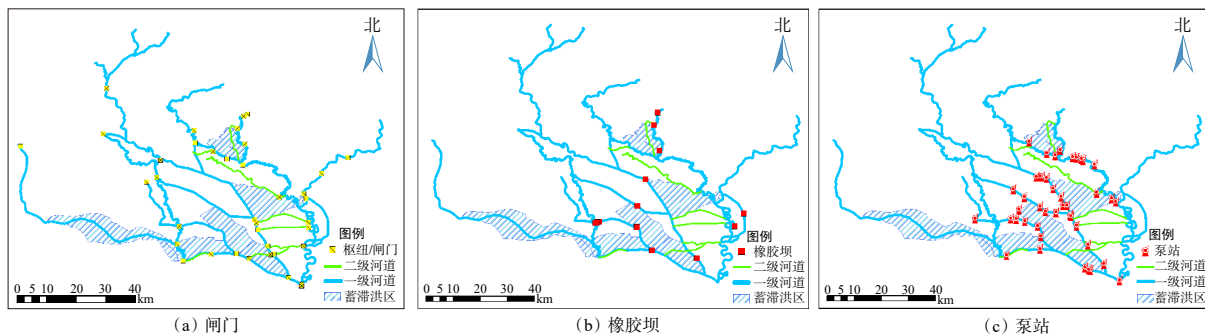


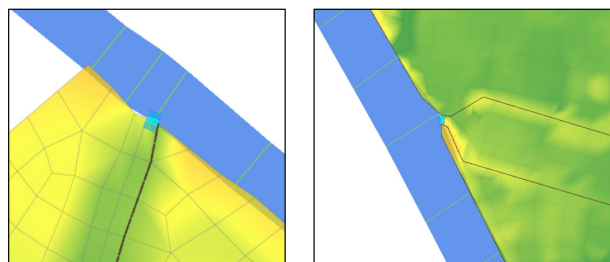
图6 防洪排涝工程分布

泵站(拟定流量大于 $10\text{ m}^3/\text{s}$)共46座,其分布如图6(c)所示。泵站调度包括预案调度、上下游水位启闭控制等调度方式。

3.4 模型耦合

3.4.1 河道一维水动力模型与蓄滞洪区二维水动力模型耦合

建立进(退)洪闸与其相连分洪(或退洪)河道的一维水动力模型的耦合关系,实现基于分洪口门的洪水调度分析。耦合方式是在蓄滞洪区的进洪、退洪口门位置,与河道一维水动力模型进行侧向耦合,并通过口门处的进退洪工程控制蓄滞洪区的启用和关闭(图7)。



(a) 狼儿窝引河分洪闸耦合 (b) 黄庄洼分洪闸耦合
图7 河道一维水动力模型与蓄滞洪区二维水动力模型耦合示意图

3.4.2 河道一维水动力模型与防洪排涝工程调度模型耦合

由于防洪排涝工程的调度将直接影响河道内洪水的演进过程,因此必须将防洪排涝工程调度模型与河道水动力模型进行有效耦合。耦合的主要方式是根据防洪排涝工程的位置与河道上下游断面相结合,在模型中进行合理设置。具体而言,防洪排涝工程的调度不仅要考虑工程本身的设计参数,还需结合上下游的水位变化,采用堰流或孔流公式计算过流流量,从而准确反映水流的变化。

在防洪排涝工程调度的实施过程中,调度方式多种多样,主要包括规程调度、开度控制、流量控制等。这些调度方式根据不同的工况和需求,灵活调整防洪排涝工程的运行状态。如在规程调度下,按照预定的操作规程进行流量的调节;开度控制则通过调整闸门的开度来控制水流;流量控制根据流量的实时监测数据进行精确的流量调节,以确保防洪排涝效果最大化。

3.5 计算边界条件

本文通过现有水文模型模拟建模区域外的产汇流过程,并结合水动力模型的优势,精确刻画水力要素。其中水文模型为水动力模型提供计算边界,根据水文模型与水动力模型的关系可将计算边界条件划分为3类:①上游边界条件;②侧向入流边界;③排涝区域入流边界。其中,边界

条件①和②可直接嵌入模型,而针对边界条件③,通过构建排涝单元承接泵站所在子流域及上游区间的全部来水,再利用泵站将涝水排入河道内。

最终确定模型边界条件121处。其中边界条件①11处,包括上游控制性水库下泄流量及水文模型计算的流量过程。边界条件②80处,包括河道支流汇入及直接汇入主干河道的区间涝水,其中支流汇入边界61处,区间涝水边界19处。边界条件③共30处。出流边界有2处,包括永定新河入海口潮位过程及北运河进入天津市区三岔河口水位过程。北四河水系防洪调度一体化模型如图8所示。

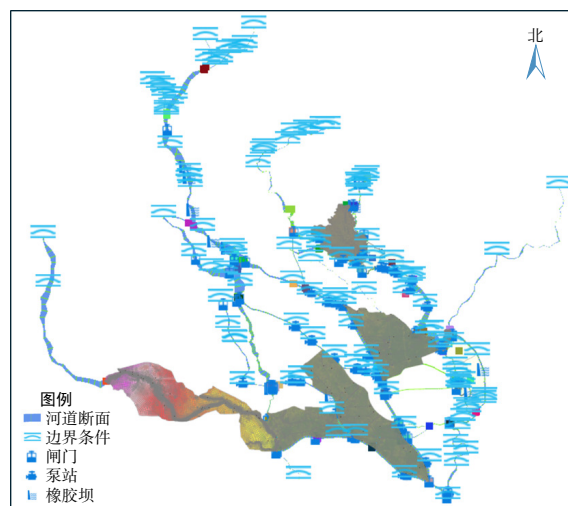


图8 天津市北四河水系防洪调度一体化模型

3.6 模型功能

通过集成多种模型,北四河水系防洪调度一体化模型能够满足不同场景的需求。对于中小型洪水,仅需结合水文模型、河道一维模型和防洪排涝工程调度模型,进行河道洪水过程演算,以实现实时模拟和调度。对于超标准洪水,则在河道一维模型与防洪排涝工程调度模型的基础上,进一步引入蓄滞洪区二维水动力模型,用于模拟河道洪水演进过程、蓄滞洪区启用过程及蓄滞洪区内洪水的演进过程,从而进一步满足支撑防洪调度的需求。

4 结 语

本文提出了一种适用于平原河网地区的水动力模型构建方法,并以天津市北四河水系为例,构建了北四河水系防洪调度一体化模型。该模型利用最新河道断面、高分辨地形等数据资料,基于水文水动力模型构建了包括闸

一坝一泵的北四河水系防洪调度一体化模型,有效克服了传统模型难以准确反映平原河网区域产汇流条件复杂、“自排”与“强排”并存、防洪调度工程类多量大等技术难点,真实再现了平原河网区域实际产流、“自排”“强排”、调度等复杂洪水过程。此外,河道一维水动力调度模型与蓄滞洪区二维模型的耦合,不仅保证了防洪调度模拟精度,还能够高效实现从中小洪水到大洪水、特大洪水的快速模拟,为流域一体化防洪调度决策提供了科学支持。

参考文献

- [1] 王添,侯精明,栾广学,等.平原河网水动力优化调度与水环境改善的响应关系研究[J].水力发电学报,2024,43(8):98–111.
- [2] 丁玉娜.平原河网地区水文分析计算方法的研究[J].冶金丛刊,2019,4(20):233–234.
- [3] 乌景秀,刘国庆,范子武,等.复杂工程群调度下平原河网城市洪涝智能调度预案集研究与应用[J].中国防汛抗旱,2022,32(S1):187–191.
- [4] 金星,强超,高坤.大规模平原河网非恒定流模拟技术[J].水利建设与管理,2024,44(6):42–46.
- [5] 黄玄,刘国庆,刘思恩,等.平原河网城市极端暴雨洪涝风险数值模拟方法研究[J].中国防汛抗旱,2023,33(7):21–27,33.
- [6] 冯思军,乔荣,温志强.天津市农村防汛排涝问题与对策——从海河“23·7”流域性特大洪水谈起[J].中国水利,2023(17):42–46.
- [7] 马建明,喻海军.洪水分析软件 IFMS/Urban 特点及应用[J].中国水利,2017(5):74–75.
- [8] 乔明叶,周进.平原河网区“洪涝统筹”体系构建关键技术探讨[J].水利发展研究,2024,24(10):54–59.
- [9] 孙加东,李继明.提升天津市北三河系防洪规划标准及加强防洪工程建设的措施建议[J].中国水利,2021(3):31–33.
- [10] 夏岢,么男.天津市蓄滞洪区运用补偿工作实践与思考——以“海河23·7流域性特大洪水”实践为例[J/OL].中国防汛抗旱,(2024–12–19)[2025–01–10].<https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2024132>.
- [11] 张民升,秦茜.永定新河上下游闸群联合调度研究[J].海河水利,2020(3):25–28.
- [12] 王琪,李照.特大洪水条件下永定河左堤防洪风险分析与对策[J].水利发展研究,2024,24(11):70–76.
- [13] 刘勃,贺巍,李时雨,等.海河“23·7”流域性特大洪水永定河安全管理风险及对策[J].水科学与工程,2024(3):5–8.
- [14] 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.
- [15] 刘军梅,杨毅,郭金燕,等.海河“23·7”流域性特大洪水北京市永定河洪水调查分析及对设计洪水的建议[J].中国防汛抗旱,2024,34(1):52–57,63.

Development of an integrated flood model for the North Four Rivers system in Tianjin City

XIAO Chengzhi^{1,2}, ZHANG Liwei³, ZANG Wenbin^{1,4}, XU Shan^{1,4}, LI Min^{1,4}, GU Qian^{1,4}, XU Huimin^{1,4}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038;

2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350;

3. Tianjin Water Engineering Operation and Dispatching Center, Tianjin 300074;

4. Engineering and Technology Research Center for Flood Control, Drought Mitigation and Disaster Reduction (Flood and Drought Disaster Defense Center), Ministry of Water Resources, Beijing 100038)

Abstract: Flood control and waterlogging management in plain river network regions face significant challenges due to the weakened runoff generation and confluence processes, which limit the effectiveness of traditional hydrological models. Large-scale two-dimensional hydrodynamic models offer high accuracy but are hindered by high computational costs and low efficiency. To address these issues, this study develops an integrated flood regulation model for the north four rivers system in Tianjin city by coupling hydrological models, one-dimensional riverine hydrodynamic models, flooding and drainage models, and two-dimensional surface hydrodynamic models. The model employs a two-dimensional approach within flood detention areas to simulate water dynamics, while outside these areas, a structured framework of "hydrological model–drainage unit–pumping station–riverine" is used for calculations. This approach ensures accurate simulation of riverine hydraulic factors under small to medium flood scenarios and provides reliable predictions for flood routing in detention areas during extreme flood events. The proposed model offers an efficient and practical methodology for hydrodynamic modeling in complex river network systems.

Keywords: flood regulation; flooding modeling; Tianjin City; North Four Rivers system

编辑 张心怡