

复杂联围内涝防治规划中雨洪模拟精度提升研究

刘曾美¹, 曹钰帆², 黎智良³, 阎苗渊³, 赵平³

(1. 华南理工大学土木与交通学院水利水电工程系, 广东 广州 510640; 2. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510611; 3. 中山市水利水电勘测设计咨询有限公司, 广东 中山 528400)

摘要: 针对雨洪模型结构应与实际物理现象较好吻合, 以保障内涝防治规划中雨洪模拟结果的准确性, 提出了一套提升复杂联围雨洪模拟精度的方法。通过剖析复杂联围的排涝模式, 揭示复杂联围的排涝特点及联围内部片区涝水排除特点, 分析片区不同地形的产汇流特性及其适宜的模拟方法, 并提出了复杂联围的雨洪模型构建方法和建模步骤。以粤港澳大湾区的中(山)珠(海)联围为例, 开展复杂联围雨洪模型构建的实证研究。结果表明: 构建的模型结构与实际雨洪过程相吻合, 模型精度较高, 并在率定测试中表现稳定, 平均纳什效率系数比其他未遵循联围排涝过程的模型结构高出0.05~0.61。

关键词: 复杂联围; 雨洪模拟; 排涝模式; 水文模型; 水动力模型; 中珠联围

中图分类号: TU992; TV871 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)01-0064-12

Study on accuracy improvement of stormwater simulation in waterlogging control planning for complex integrated embankment// LIU Zengmei¹, CAO Yufan², LI Zhiliang³, YAN Miaoyuan³, ZHAO Ping³ (1. Department of Water Conservancy and Hydropower Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Company Limited, Guangzhou 510611, China; 3. Zhongshan Water Resources and Hydropower Survey Design Consulting Co., Ltd., Zhongshan 528400, China)

Abstract: In order to ensure that the structure of the stormwater model is well aligned with the actual physical phenomena, thereby guaranteeing the accuracy of the stormwater simulation results in flood prevention planning, a set of methods for improving the accuracy of complex integrated embankment stormwater simulation is proposed. The drainage patterns of complex integrated embankment are analyzed, revealing the drainage characteristics of complex integrated embankment and the features of floodwater discharge within the internal areas of the integrated embankment. The runoff characteristics of different terrains in the areas and their suitable simulation methods are also examined. Based on these analyses, a method and steps for constructing a stormwater model for complex integrated embankment are proposed. Taking the Zhongshan-Zhuhai integrated embankment in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as an example, an empirical study on the construction of a complex integrated embankment stormwater model is conducted. The results show that the constructed model structure is consistent with the actual stormwater process, with high precision and stable performance in calibration and testing. The average Nash-Sutcliffe efficiency coefficient is 0.05 to 0.61 higher than that of other model structures that do not follow the drainage process of the integrated embankment.

Key words: complex integrated embankment; simulation of stormwater; drainage mode; hydrological model; hydrodynamic model; the Zhongshan-Zhuhai integrated embankment

联围是我国东南沿海区域对以堤防围成环形防洪潮区域的简称(在江淮一带称为“圩垸”)。联围因其所处地理位置降水量多,降雨强度大,且其内网河区地势低平,暴雨涝水外排常受到承泄区洪潮水位顶托,极易遭受严重的内涝灾害。粤港澳大湾区经济发达,且具备极强发展潜力,但境内联围众多,不仅是我国城镇内涝的高发区,还是全球洪涝灾害风险最高的区域之一^[1]。《粤港澳大湾区发展规

划纲要》明确要求完善防灾减灾体系,以有效解决城市内涝问题。

联围的内涝防治规划中,采用“平湖法”确定闸泵群等工程的总规模,采用“雨洪模拟法(非恒定流数学模型)”模拟联围内水网、水闸、泵站的排涝调蓄过程,这两种方法互为补充、相互验证^[2],以确定联围内闸泵的布局与规模,以及内河涌的最高运行水位和所需堤顶高程。通常采用雨洪模拟法分析涝

基金项目:广东省水利科技创新项目(2016-27)

作者简介:刘曾美(1970—),女,副教授,博士,主要从事洪涝灾害防治和水利综合规划研究。E-mail:liuzm@scut.edu.cn

区暴雨与承泄区水位遭遇组合下联围采取各种排涝格局、不同防治措施、不同工况下的雨洪模拟结果。雨洪模拟的准确性直接关系着内涝防治规划设计方案的合理性和有效性。联围内部通常配置了大量的径流调控设施如水闸/涵闸、泵站、调蓄湖等,对联围排涝过程进行人为控制。在构建联围雨洪模型时,模型的结构和参数必须尽可能反映联围的产汇流机制和水流运动特点,模拟结果才可能与实际情况吻合较好^[3]。然而下垫面情况复杂的联围雨洪模拟的准确性难以把控,首先是复杂联围的排涝模式复杂,河网排涝过程受多级闸泵调度所约束,其次是复杂联围的地形条件复杂,围内多种地形交错结合使片区产汇流需要区别地形地类进行计算。两者结合,使复杂联围雨洪模拟的准确性成为难点。

目前雨洪模拟技术在城镇洪涝防治规划设计中得到了广泛应用, Qi 等^[4]综合介绍了在国外城市雨洪模拟中水文模型、水动力模型及其简化模型的诸多应用案例; Zahura 等^[5]介绍了将基于机器学习构建的代理模型用于雨洪模拟的技术; 徐宗学等^[6]总结了我国城市雨洪模拟的原理、模型、技术特点; 赖成光等^[7-8]开展了雨洪模型在国内城镇的应用研究。联围的雨洪模拟是基于城镇雨洪模拟发展而来的,但因是流域尺度,在水文模拟中既要考虑不同地类的影响^[9-10],又要考虑地形对产汇流的影响^[11-12],还要考虑到联围排涝过程中的水流运动过程明显有别于常规城镇地区。但在目前联围雨洪模拟研究中,尚未考虑不同产水汇入河网排涝的过程差异,或考虑联围多级闸泵排涝对水流运动的影响方面的研究,如薛娇等^[13-14]建立中珠联围雨洪模型时将平原、山区分区产流分别以集中出流、旁侧出流的方式汇入一维河道; 付晓花等^[15-17]通过设置圩区内虚拟河道与河网连接,并在其上设置可控建筑物模拟涝水排出过程。复杂联围具有独特的排涝模式及多地形复合的下垫面条件,雨洪模型的结构应尽可能反映复杂联围的这些特点。为提升复杂联围雨洪模拟的精度,需对这些问题展开进一步研究。

本文通过剖析复杂联围的排涝模式,揭示复杂联围中各类片区降雨从产流阶段到汇入河网排涝阶段间的水流运动规律,梳理不同地形产汇流过程的区别以及现有成熟的雨洪模拟方法,在此基础上提出复杂联围的水文水动力耦合模型框架和建模步骤,并以大湾区中(山)珠(海)联围(以下简称“中珠联围”)为研究实例,开展复杂联围雨洪模型构建的实证研究,且与其他不遵循联围排涝过程而构建的模型对比,以说明按本文提出的模型框架构建的复杂联围雨洪模型具有更高的准确性。

1 复杂联围的排涝模式

位于珠江三角洲流域下游及入海口处的地区,内河网密布,易受上游洪水及潮水的影响,为了减小因防洪战线太长而带来的防洪压力,20世纪50年代起这些地区开始进行大规模的联围筑闸工程。联围筑闸工程简化了河系,排除了外部洪水威胁,但暴雨在联围内部产生的涝水仍是隐患。为进一步解决内涝问题,逐步发展出以闸泵联排方式为主、从单级排涝转为多级排涝的联围排涝模式,在雨洪过程中形成有别于其他流域类型的复杂水流运动。

本文针对珠三角地区复杂联围在排涝过程中所展现出的共性问题进行归纳分析,提炼复杂联围的排涝模式。

1.1 复杂联围的排涝特点

复杂联围通常包括不同土地利用类型,如城镇、农田、林地等,而各种土地利用类型的治涝要求和治理标准各不相同,通常需要分地块、分片区进行内涝防治。从排涝模式来看,复杂联围通常需要两级排涝。因为在实际排涝过程中,只有紧邻联围外承泄区的片区可直接将暴雨涝水排出至联围外,其他片区需先将暴雨涝水经由片区涝水排除系统排入联围内河网(称为二级排涝),再由联围涝水外排系统将联围内河网中的涝水排出至联围外的承泄区(称为一级排涝),如图1所示。从排水角度,二级排涝是将片区涝水排入联围一级内河网的一个通道,联围一级内河网是片区涝水排除系统的接纳体;一级排涝是将一级内河网的暴雨涝水通过联围涝水外排系统排至联围外承泄区,一级内河网既承接片区涝水,又通过闸泵直接向联围外部承泄区排涝,是水文产流过程与水动力排涝过程的重要衔接点。

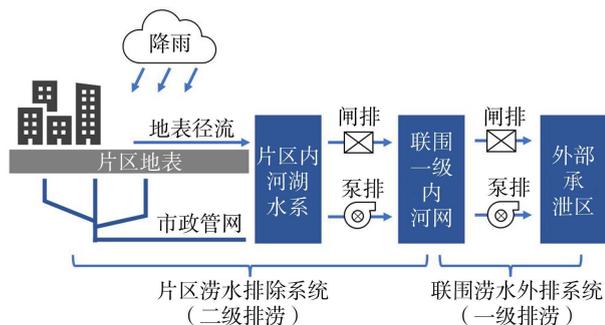


图1 复杂联围的排涝模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of drainage pattern in complex integrated embankment

从排涝方式来看,每级排涝过程都受到闸、泵控制,排涝能力受闸内外水位差与泵站容量控制。联围的承泄区水位有显著的潮涨潮落过程,涝水外排可以利用潮汐这一特点,在涨潮时关闸滞洪、

落潮时开闸排涝,即当联围内水位高于外面承泄区水位时,通过开启外排水闸以抢排涝水(俗称抢排)。因此,联围治涝规划应充分挖掘和利用联围的调蓄能力以尽可能实现闸门自排,在无法自排时才辅以泵站抽排,从而减小泵站建设规模^[18]。联围内的暴雨涝水最终通过各级排涝闸泵逐级排至联围外的承泄区(排涝方式为自排、抽排或闸泵联排)。

1.2 联围内部片区涝水排除特点

由图1可见,各片区暴雨产生的涝水需先排至一级内河网,但如何排至一级内河网则主要受地类和地形条件的影响。不同土地利用类型(如农田、城镇建设用地)的治涝标准不同,所需排涝设施规模也就不同,甚至排涝方式也不相同;而地形条件直接关系到排涝类型,包括涝水自排、排涝泵站辅助抽排或完全抽排^[18]。按照地形条件对片区进行分类,可分为坡地片区、平原片区及混合片区。对各类片区的涝水排除过程进行分类探讨:①坡地片区排水主要由重力作用主导,片区涝水可自排入一级内河网。②平原片区产流常常不能自排入一级内河网,需要通过泵站抽排。若平原片区内完全城镇化或部分城镇化,则二级排涝需经过两级排涝才能将暴雨涝水排入一级内河网。首先需将城镇街道等小区域的水通过市政排水管渠系统和综合防涝系统汇集后自排或通过泵站抽排至城镇内河网(紧贴外围大水体的区块可直接排到外围),再将汇入城镇内河网的暴雨涝水经过城镇内河网调蓄后自排或通过泵站抽排至片区外的一级内河网,前者属于市政排水范畴,后者属于水利排涝范畴^[19](图2)。③混合片区是由上部坡地与下部平原混合成的片区,坡地产水将以地表漫流的方式进入平原,与平原自身地表径流混合后,经过二级闸泵调控排涝进入一级内河网。混合片区多见于未规划的联围中。在联围排涝规划中,通常会建设截洪沟将混合片区的坡地径流直接引入一级内河网,以减轻平原片区的洪水压力,减小排涝设施规模,于是混合片区便被截洪沟分解

为坡地片区和平原片区。

2 片区内部产汇流特性及雨洪模拟方法

不同类型的下垫面具有不同的产流汇流特点,而地形是影响区域降水、气温、土壤和土地利用空间分布的主导因子^[20],也是影响产汇流机制的首要因子。联围内部可能存在不同地形交错结合,只有针对不同的地形采用符合地类特点的产汇流计算方法,才能确保雨洪模拟的准确性。根据复杂联围排涝模式中对地形的区分,将地形作为片区产汇流机制的关键区分属性,总结坡地与平原地形的产流汇流特点,给出适合不同地形的产汇流模拟方法。

2.1 坡地片区产汇流特性及数值模拟方法

目前坡地片区的开发率远低于平原片区,这意味着山坡地区内保留大量的天然地表,维持原有的产汇流机制。坡地产汇流具有以下特点:①地形的相对坡度较大,具有比平原片区更为明显的汇流路径;②坡面产汇流受水文连通机制影响,下垫面对水流的影响比平原片区更为复杂敏感^[21]。坡地水文连通是指当降水量超过一定阈值后,土壤表面及内部的快速输水通道被打通,整个坡面的产汇流陡然加速,使得坡面出流对暴雨事件的响应具有高度非线性关系,并存在阈值现象^[22],这类间断性的“山坡水文连通”机制使霍顿产流模式不能完全概化坡地产流全程。基于阈值现象,有学者提出蓄满产流理论^[23],认为阈值现象是由于包气带缺水导致。在包气带缺水问题得到解决或者包气带含水量达到田间持水量后产生地表径流^[24]。Dunn等^[25]随后提出变动源面积(variable source areas, VSA)产流理论,认为达到阈值后产生的饱和和坡面流是洪水的主要来源,动态变化的饱和带与沟谷、间歇性河道为水流提供了连通山坡及河道的快速通道。VSA理论可表达为蓄满产流中的局部产流问题,是对流域内不同片区存在包气带含水量差异或降雨强度差异的进一步解析。

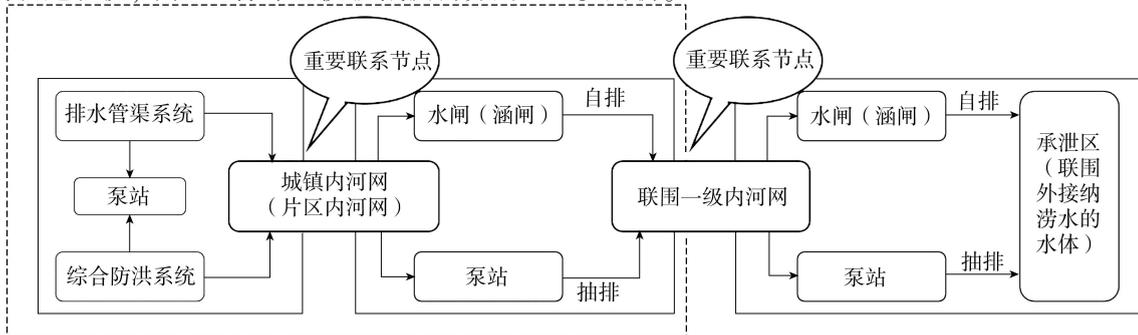


图2 联围内片区城镇用地的排涝模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of drainage pattern in urban area within integrated embankment

山坡水文学的发展引导着水文模型的开发,目前大多数水文模型的主要适用对象仍是山地产汇流过程。除早期经验模型以外,水文模型发展出集总式和分布式两个方向,前者有基于 VSA 理论的 TOPMODEL^[26] 以及基于蓄满产流理论的新安江模型^[23],后者则有物理分布式模型典型代表 SHE (system hydrologic European)^[27-28]。国内新安江模型的应用最为广泛,湿润地区多采用蓄满产流模式进行模拟计算^[29],半湿润和干旱地区则采用基于混合产流模式的新安江模型^[30-31]。

除此之外,坡地产汇流存在明显的尺度效应^[32],目前的产汇流基础理论和研究主要针对单次降雨事件下小区块和山坡尺度的产汇流^[33],在进行大流域建模时,应该以坡地为单元划分子流域,进行产汇流计算并逐个确定汇流出口。对于坡地片区而言,采用子流域单元法不仅能根据各计算单元间的水文过程相对独立性来刻画流域产汇流机制,还能大幅减少计算单元数量。

2.2 平原片区产汇流特性及数值模拟方法

平原产汇流机制与坡地相似,同样可归纳为蓄满产流与超渗产流问题,但也具有平原独有的特点。与坡地相比,平原受人类活动影响程度更高,更容易出现多种下垫面类型复合交错的格局,不同土地利用类型的产流能力可能截然不同,如田地、水域的滞水能力显然比不透水地面高得多,极大增加了模拟难度。此外,平原片区的汇流方向并不明确,首先是地形高差较小,基于高程栅格进行汇流分析,在遇到平坦地形时会出现条带状的汇水分区,与实际情况显然不同;其次,目前数字高程模型的精度基本无法反映米级以下的微地形,对于一些排水沟、暗渠等足以影响区域汇流的小型人工设施基本无法在雨洪模拟中考虑,以上两点都将直接影响产汇流结果的正确性。

城镇扩展方向更倾向于平坦地貌,平原地区的雨洪模拟一直是研究热点,但汇流过程模拟的困难性,使现有的平原产汇流计算方法仍以经验模型、概念性模型为主,通过划分子汇水区进行计算。其中,不透水面产流基本采用“降水量扣除填洼、截留、蒸发等损失量等于净径流”的模式,透水面产流多采用 SCS 曲线法^[34-35]、径流系数法^[36]、Horton 下渗曲线法^[37]等经验方法进行计算,而汇流过程多采用水文水动力耦合计算的模式,水文方法如等流时限法、非线性水库法等,均是将于汇水区当作黑箱系统,将径流输出接入定义的汇流出口,如雨水算子、河道等,再通过水动力计算水流在管网或河道内的运动过程,

若还需精细模拟二维地表淹没情况,则需要将管网或河岸的向外漫流过程作为边界耦合二维水动力模型。

3 复杂联围雨洪模型构建方法与主要步骤

3.1 构建方法

联围雨洪模型的结构应尽可能反映联围的产汇流机制和排涝过程。通过对复杂联围排涝模式的剖析,联围雨洪过程可大致分为 3 个阶段:片区内部产汇流过程;不同片区涝水排入一级内河网的过程;一级内河网的外排涝水过程。而雨洪模型也应从水文模块、耦合衔接、水动力模块 3 部分对应还原联围雨洪过程。因此,复杂联围雨洪模型构建方法如下:

a. 水文部分。根据坡地或平原两类片区的产汇流特性差异,为不同的片区选择适宜的计算模型。坡地片区计算得到汇流出口处流量过程;平原片区计算得到地表产水过程;而混合片区内,同样分出坡地、平原部分进行计算,区别在于坡地部分水文计算结果为与平原部分交界处一维形式的地表漫流过程。

b. 水文、水动力耦合过程。根据不同片区产水汇入河网方式,将坡地水文产流按汇流出口位置作为河道上边界或是侧向点源入流,而平原片区产流不直接计入一级内河网,闸泵排涝区域将平原产流计入闸泵前二级河道,经调度排出,将地形汇流自排区域的产流作为地表净径流汇流后再排至一级内河网,对具备排水管网基础的城镇片区,其产流计入管网模型;对混合片区内平原部分的处理与平原片区一致,将坡地部分的水文结果作为平原区域边界入流,若后续规划将坡地产水截流至一级河网,则将其作为坡地片区考虑(图 3 中虚线箭头)。

c. 水动力部分。对主体是以一级内河涌为主的各级河网排涝过程以及平原区域的地表水流过程,选择采用一二维模型耦合形式,若存在有排水管网基础的片区,还需考虑管网与一二维模型间的连接。

平原区域的排涝过程是单向的,坡地区域内水流方向主要受地形影响,也可以视为单向的,这为水文模块与水动力模块提供了单向、松散耦合的基础,以一级内河网作为耦合节点,将水文模块计算结果作为边界条件计入水动力模型中。根据这样的思路,提出复杂联围地区的水文水动力模型构建框架,如图 3 所示。

3.2 主要步骤

a. 厘清排涝格局,梳理一级内河涌。根据联通情况对联围水系进行分类,把开启外排水闸与联围外部承泄区直接联通的河涌水系称为一级内河网,

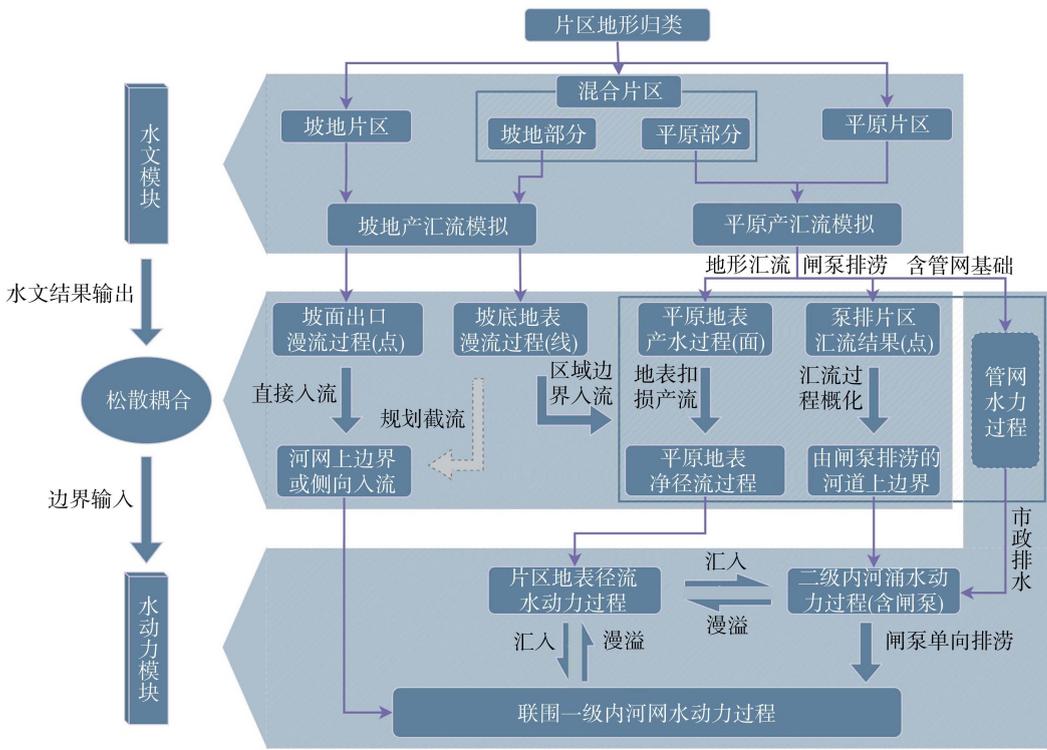


图3 复杂联围地区水文水动力模型结构

Fig. 3 Structure of hydrological and hydrodynamic model for complex integrated embankment

同理把开启次级排水闸与一级内河网直接联通的河涌称为二级内河涌,三级乃至四级内河涌以此类推,其中一级内河网将作为划分片区与确定水文水动力耦合方式的关键要素。

b. 划分水文模块计算子片区。根据一级内河涌将联围划分为多个片区,按地形归类为坡地片区、平原片区及混合片区。

c. 为各片区构建水文模型,不同地形的片区选择对应的产汇流计算方法,模拟得到各个片区产水结果。

d. 确定耦合衔接方式。根据各片区地形确定产水排入一级内河网的方式,从而得出将该片区水文结果松散耦合入河网水动力模型的位置。

e. 对一级内河网及平原片区、混合片区内平原部分构建一二维水动力模型,将各片区水文模块结果作为边界条件,按耦合位置计入水动力模型,模拟得到联围排涝过程。

4 实例研究

4.1 研究区概况

本文所选研究区为粤港澳大湾区内的中珠联围(图4),联围内包含中山市三乡、坦洲两镇与珠海市香洲区,扣除截洪面积后,实际集水面积达322.27 km²。中珠联围地形复杂且地势起伏较大,其中三乡、坦洲及珠海部分城区人口密集区域均处于中央低矮的平原上,而城镇周边又多山丘坡地,当

遭遇暴雨时,周边山洪倾泻而下,涝水又易受外水位顶托而难以及时排出,存在严重涝灾隐患^[38]。中珠联围内部水系错综复杂,包含茅湾涌、前山水道等主要河道64条,水域面积达843万m²。围内闸泵共计64个,其中外排水闸有7个(图4),没有外排泵站,且联围内河涌堤防较低,利用外排闸门抢排涝水时常常受到承泄区水位的顶托,因此中珠联围内涝灾害严重。

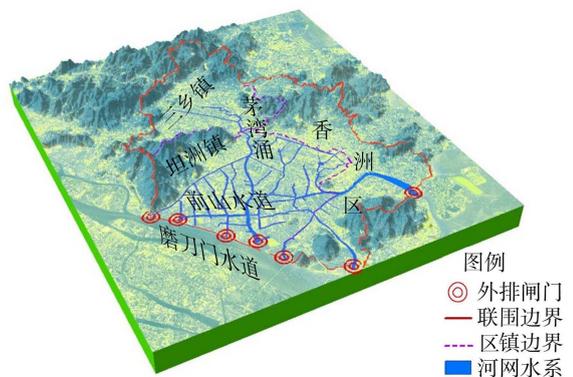


图4 中珠联围水系地势

Fig. 4 River system and topography of the Zhongshan-Zhuhai integrated embankment

城镇区治涝标准采用20年一遇最大24h暴雨不致灾,而以种植蔬菜、经济作物为主的农田,则按10年一遇最大24h设计暴雨1d排干,对外江水位选取5年一遇最高潮水位1.85 m^[39]。综合考虑中珠联围近10年发展历程,本文选择“20年一遇暴雨、

5年一遇潮位”作为模型模拟对比的基本情景,并根据模拟结果确定最不利遭遇情景为高潮位滞后雨峰5h。表1为中珠联围雨洪模型构建所需数据的情况。

表1 研究区域数据来源

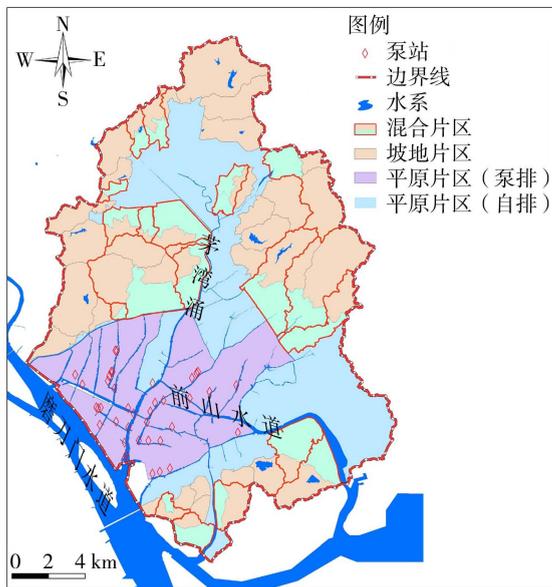
Table 1 Source of data in study area

数据类型	数据名称	数据来源
地理信息	数字高程模型	卫星影像地图、坦洲镇1:2000地形图
	研究区边界	ArcGIS水文分析工具
	研究区遥感影像	Esri World Imagery
	土地利用类型	ArcGIS Image Classification 工具
	土壤类型	世界土壤数据库
水文气象	降雨	大涌口、铁庐山、神湾、三乡、竹仙洞、正坑雨量站
	潮位	灯笼山潮位站
	水位	大涌口、马角、石角咀水闸遥测站
河道数据	河道中心线	卫星影像地图
	河道断面	实地测量数据
水工建筑物	闸门	
	泵站	《中山市三乡镇水利综合规划》 ^[38] 《中山市坦洲镇水利规划》 ^[39]
	水库	
	调蓄湖	

4.2 排涝格局梳理

根据联围的排涝特点和片区涝水的排除特点,梳理中珠联围现状下的各级河网水系。

中珠联围除7个外排水闸外,其余水闸均设置在由主要河道围成的片区内。现状排涝是以片区独立排涝为主,并未进一步设置多片区结合的排涝区块,因此将所有主要河道均作为一级内河涌,单个片区内受次级闸泵控制的河渠作为二级河道。可按地形进一步将由一级内河网分成的多个片区归类为:坡地片区、平原片区(泵排与自排)以及混合片区,



(a) 水文模块构建范围

如图5(a)所示。

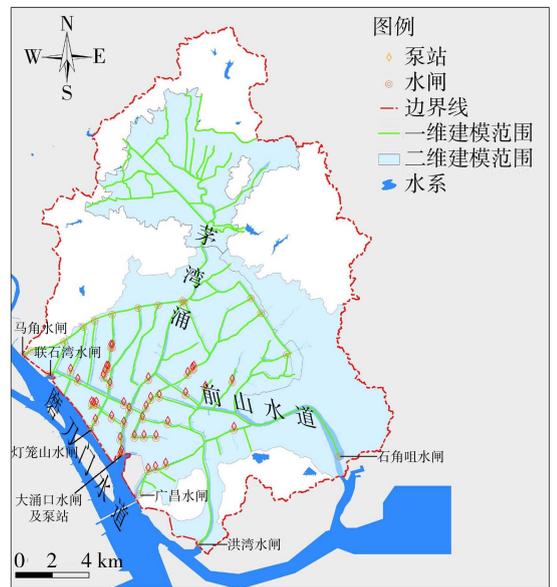
根据以上思路确定水文、水动力模块的构建内容:

a. 水文模块的构建。①坡地片区为三乡东、南、北向山区及坦洲南、北向山区,对DEM水文分析确定汇流路径后,以坡面为单元共划分子流域23个。②平原片区又按照排涝方式分为自排片区及泵排片区,具备闸泵排涝基础的片区主要集中于坦洲,共16个,三乡镇及珠海多为无闸泵的自排片区,不做进一步划分。③混合片区划有19个,其内部坡地与平原部分按坡度分开,如图5(a)所示,内部的平原部分均无闸泵基础,与河渠一起作为自排片区考虑。若后续对部分混合片区做排涝规划,修建闸泵或截洪渠等设施,则需对这部分片区重新划分。

b. 水动力模块的构建。水动力模块包括一维河道水动力模型及二维地表水动力模型。一维河网建模范围包括三乡镇内的茅湾涌流域、中珠排洪渠及下游坦洲镇内的前山河水系,主要一级河道46条,但16个平原泵排片区内排涝闸泵所在二级河道资料均缺失,故按影像地图设置概化二级河道38条,按闸宽与底坎高程确定概化矩形河道宽深。二维地表网格划分范围包括三乡坦洲中心及珠海部分平坦片区约202 km²,其中水域面积约8.43 km²。一维河道与二维地表间采用侧向连接方式耦合,闸泵等建筑物共计96个均在一维模型中,水动力模块构建内容见图5(b)。

4.3 水文、水动力模拟方法选择

复杂联围地区水文水动力模型采用水文模块与



(b) 水动力模块构建范围(仅一级河道)

图5 水文、水动力模块构建范围

Fig. 5 Scope of hydrological and hydrodynamic module construction

水动力模块松散耦合的形式,水文模块与水动力模块单独运行,水文模块的结果将作为水动力模块的边界条件。

水文模块中,需要对坡地与平原片区应用不同的水文计算模型。坡地水文过程采用分布式水文模型进行模拟,其中,坡面流计算采用扩散波方程(圣维南方程简化形式),非饱和流计算采用土壤流体运动 Richards 方程的一维差分,饱和流计算采用达西公式的三维差分,蒸散发计算采用双层水量平衡法,利用水文模拟软件 MIKE SHE 构建;平原水文过程以城镇及平坦地区内部产汇流为主,结合集水区域土地利用情况合理选择径流系数和下渗扣损值,采用径流系数法与扣损法进行对比计算。

水动力模块应用目的主要是模拟平原地区的河流水动力过程及地表涝水淹没情况。采用一、二维模型紧密耦合形式建模,河道水动力计算采用一维圣维南方程,地表水动力计算采用二维浅水方程,利用水动力模拟软件 MIKE FLOOD 构建。

4.4 水文、水动力模块耦合衔接方式

中珠联雨洪模型水文、水动力模块松散耦合的基本衔接方式已在雨洪模型构建框架中说明,此处不再赘述。现对混合片区坡地与平原连接位置的选择,和闸泵排涝片区水文、水动力衔接方式进行论述。

4.4.1 混合区坡地水文与平原二维水动力耦合边界的选择

在混合片区中,若是片区内不具备汇流渠道,或与一级河道有一定距离,则坡地产水以地表漫流方式进入平原,坡地水文结果概化为二维模型的边界,此时坡地、平原两部分间的边界将按照汇水分区的边界划定,并且选择具有一定坡度位置,确保产流主要受重力影响,在两个模型间尽可能保持单向流动。确定松散耦合位置后,在 MIKE SHE 中输出对应位置网格的流量过程,并以一维时间序列输入 MIKE21 中。考虑到二维模型对地表径流的模拟并未考虑与壤中流的水量交换,因此仅将坡地产流结果中的坡面流作为水动力模型的地表净径流输入(图6)。

4.4.2 平原泵排片区水文、水动力耦合边界处理

泵排片区内部汇流途径相对固定,降雨后产流通过各种渠道汇至片区排涝闸泵所在二级河道,再由闸泵调度统一排入一级内河网,因此可认为这类片区的汇流出口基本固定为闸泵布设位置^[40]。在水动力模块中已按影像地图设置概化二级河道,将片区产汇流计算结果作为二级河道的上边界条件,片区产水可经由闸泵调度进入一级河道排出,或是通过侧向连接漫溢至片区地表,形成水文模型与二维水动力模型的间接耦合(图7)。

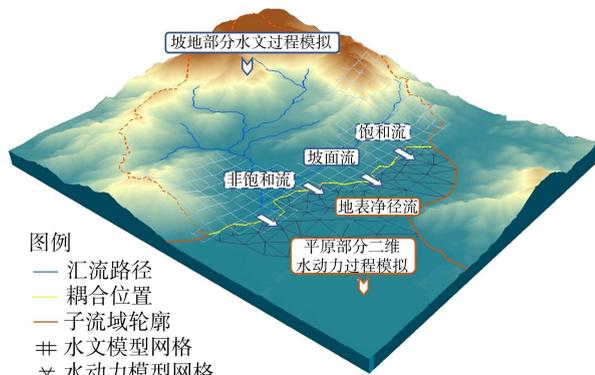


图6 混合区坡地水文与平原二维水动力耦合边界示例
Fig.6 Example of coupled hydrological and two-dimensional hydrodynamic boundaries in mixed slope and plain areas

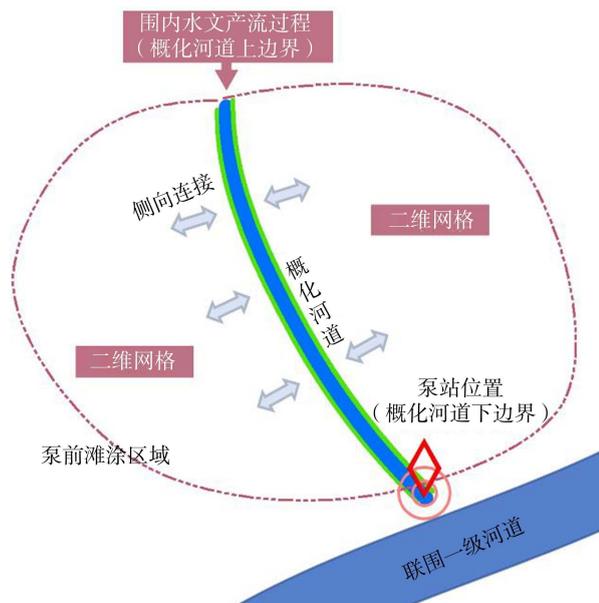


图7 闸泵排涝片区水文、水动力模型耦合示意图
Fig.7 Schematic diagram of coupled hydrological and hydrodynamic model for pump-gate flood control area

4.5 模型率定与验证

本模型采用2018—2021年间茅湾涌及前山河流域的4场典型暴雨及相应的实测水位进行率定验证,模型测试采用2021-10-08场次降雨。降雨数据来自古鹤、田心、龙潭、妈坑、大涌口、铁炉山6个站点,采用泰森多边形法确定流域面降雨过程;下边界潮位数据来自石角咀、大涌口、灯笼湾、联石湾出口处一级水闸的闸外水位,洪湾涌、广昌涌、马角水位边界采用邻近水位过程均值。在模拟过程中,闸门调度规则均为外水位高于内水位时关闸抽排,外水位低于内水位时开闸自排;泵站调度规则均为闸内水位高于开启水位后保持最大流量。

经率定与验证后,水动力模型内全局河床糙率 $M=34$,二维模型中地表曼宁系数为:裸地45.5、林地3.0、草地6.7、城镇用地76.9、水域(水田)30.0、耕地6.7。山地水文模块地表糙率与二维模型相

同,滞蓄水深为:水域(水田)200 mm、森林 100 mm,平原水文模块扣损系数(20 年一遇标准)为:水域(水田)0、林地 4.3 mm/h、草地 3.8 mm/h、城镇用地

1.6 mm/h、耕地 4.4 mm/h。表 2 给出了 11 个监测点的最高水位的实测、模拟值对比情况,图 8 展示了其中 4 个监测点的拟合过程。从模拟结果来看,验

表 2 各站点最高水位的实测、模拟值

单位:m

Table 2 Measured and simulated values of maximum water level at various stations

unit:m

水位站点	2018-06-07		2018-08-28		2020-06-07		2021-10-08		平均误差
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值	
文阁	1.87	1.93	2.84	2.81	1.38	1.36	2.81	2.66	0.07
鸦岗运河	2.42	2.53	2.56	2.63	1.41	1.37	2.46	2.50	0.06
新圩四队	2.08	2.16	2.31	2.38	1.44	1.40	2.37	2.41	0.06
新圩八队	1.98	2.02	1.93	2.01	1.43	1.38	1.93	1.97	0.05
安阜	1.56	1.37	1.32	1.07	1.44	1.30	1.66	1.64	0.16
坦洲	1.56	1.38	1.27	1.15	1.44	1.36	1.65	1.73	0.12
咸围	1.71	1.68	1.67	1.51	1.44	1.43	2.11	2.09	0.06
永一节制闸	1.57	1.36	1.22	1.05	1.45	1.34	1.60	1.58	0.13
龙塘	1.66	1.55	1.49	1.46	1.44	1.38	1.86	1.84	0.06
永二涌	1.93	1.81	1.82	1.82	1.79	1.64	2.29	2.18	0.13
南沙涌	1.45	1.24	1.16	0.95	1.44	1.34	1.68	1.68	0.17

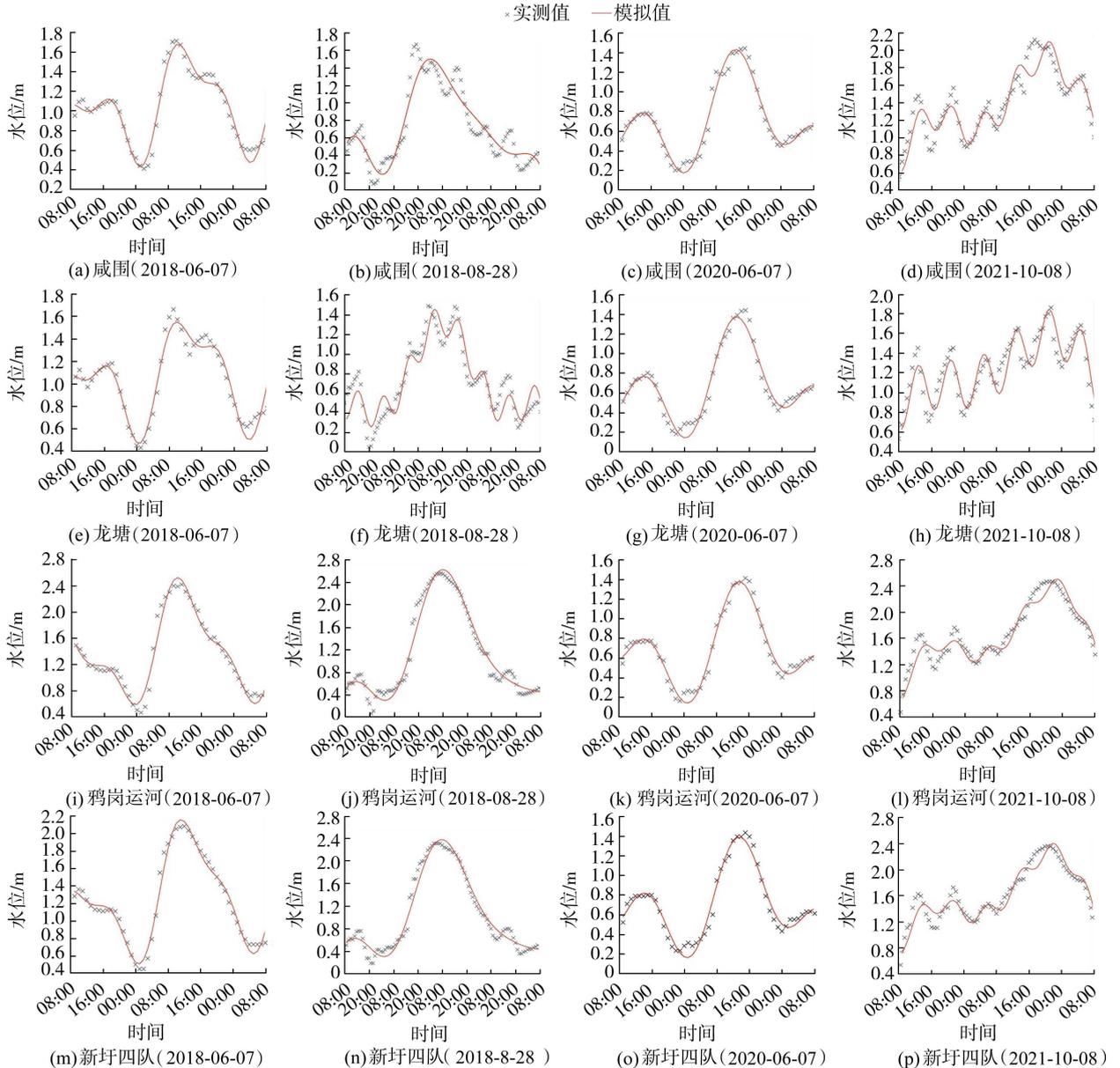


图 8 部分站点率定验证结果

Fig. 8 Calibration and validation results for some stations

证场次 11 个监测点处水位模拟结果与实测水位误差基本不超过 10 cm, 满足 SL 104—2015《水利工程水利计算规范》中潮位峰谷值误差不大于 10~20 cm 的要求, 可以认为模型精度足够。

4.6 排涝情景模拟

中珠联围城镇地区排涝标准为遭遇 20 年一遇暴雨排干, 对遭遇 20 年一遇设计降雨情景进行模拟, 得到的内涝淹没范围见图 9。由图 9 可以看出, 中珠联围目前的防涝格局仍存在较大的内涝隐患, 三乡西北部城区、新圩及坦洲西南侧均出现了较大面积的内涝淹没情况, 坦洲东北侧城区也出现大量内涝黑点。根据中山市三乡镇、坦洲镇的水利规划, 三乡镇以坡地为主, 城区周围产生的外源性山洪是涝灾频发的主要原因, 宜采用截洪沟高水高排或建设蓄水设施就地滞蓄山洪, 这样既可以控制山洪进入三乡中心城区, 又能减轻下游坦洲及珠海片的排涝压力; 坦洲镇是典型的平原感潮河网地区, 涝灾往往出现在联围的外潮位顶托而内部排涝能力不足情景下, 这就宜重新规划排涝布局, 做好高水高排、低水抽排的分区分区排涝方案, 保护城镇区域不受外围洪水倒灌影响。

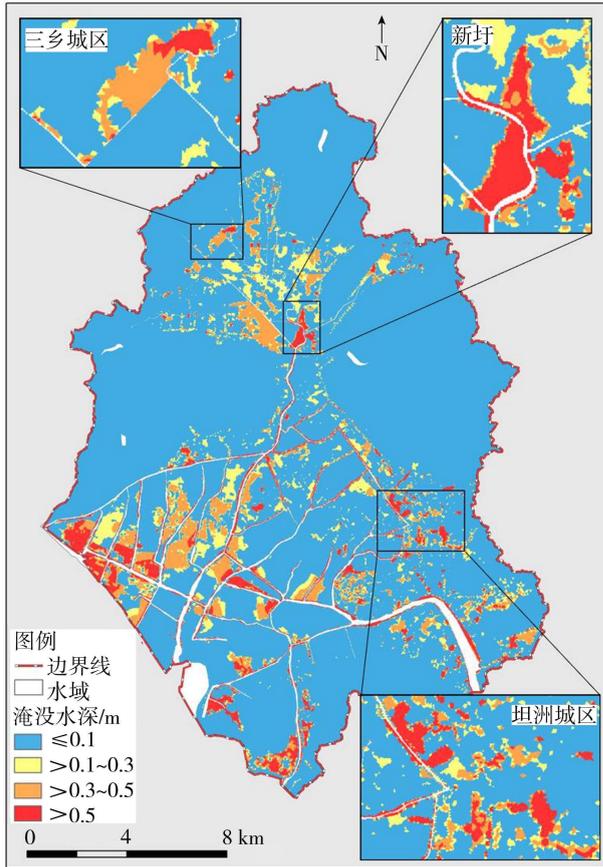


图 9 内涝淹没范围图(20 年一遇暴雨遭遇 5 年一遇潮位)
Fig. 9 Inundation range of waterlogging (20-year return period storm encountering 5-year return period tide level)

针对图 9 的淹没情况提出治涝方案, 模型结构需根据规划的排涝布局重新确定一级内河涌及片区类型, 重新构建雨洪模型进行模拟计算。排涝布局重新规划后, 不仅截流后的区域汇流方式与倾泄点位置发生改变, 河道及闸泵在排涝中的级别也会调整, 若需要进一步对规划方案进行模拟评估, 则要重新确定一级内河涌及片区类型, 确定新的模型结构来反映规划后的排涝过程, 从而确保雨洪模拟的精确性。

4.7 不同结构的联围雨洪模拟效果对比

雨洪模拟本质是通过雨洪模型结构和参数对计算公式的耦合, 来模拟降雨径流形成的洪水情景。雨洪模型的结构和参数必须尽可能反映当地产汇流机制和洪水运动特点, 这样才有可能使模拟结果与实际发生的现象较好吻合。在模型率定验证中, 只有联围雨洪模型结构正确, 根据实测数据率定出的结果才有可能向着实际物理参数逼近, 反之则可能由于率定用的雨洪场次较少而出现“异参同效”的伪高精度结果, 在洪水预报应用中出现模拟精度波动问题。

为进行对比分析, 现以不遵循排涝模式的不同模型结构对中珠联围现状排涝格局进行建模, 以全流域内共计 11 个监测点水位过程为对比数据, 并以平均纳什效率系数评判拟合优度, 对比分析结果见表 3。

表 3 不同建模方式下模型精度对比

Table 3 Comparison of model accuracy under different model construction methods

序号	建模方法	平均纳什效率系数	
		率定场次	测试场次
1	本文采用的复杂联围水文水动力模型	0.84	0.81
2	坡地、平原片区产流分别以集中入流、沿岸均匀入流两种方式就近计入河道	0.75	0.76
3	片区产水按 DEM 水文分析结果计入河道, 未考虑片区二级闸泵排涝调度	0.80	0.20
4	片区产水按 DEM 水文分析结果计入河道, 仅一维水动力与水文模型耦合	0.60	0.45

由表 3 可以看出, 当以不考虑闸泵排涝过程或不考虑片区产流汇入河道过程的方式建立雨洪模型时, 率定结果基本能够满足需求, 但在测试环节或实际使用过程中, 模型拟合优度不能得到保证, 其中部分点位的纳什效率系数甚至为负数, 这就是伪精度; 基于联围排涝模式构建的雨洪模型率定验证成果较好, 测试场次的精度也比较稳定, 平均纳什效率系数高于其他组别 0.05~0.61, 可以认为这样的建模方式真正具有更好的预测精度。

5 结 论

在复杂联围的雨洪模拟中,需要根据联围排涝模式设置水文、水动力模块间的耦合方式,本文对复杂联围的排涝模式进行剖析,分地形应用适宜方法更精确地确定片区产汇流过程,以进一步提升雨洪模拟准确性。本文研究得到以下结论:

a. 在构建联围雨洪模型时,雨洪模型的结构应尽可能反映联围的产汇流机制和排涝过程。不同地形片区产汇流过程的区分模拟、不同地形片区产水汇入河网的方式、河网分级排涝过程,分别对应着雨洪模拟中水文模块、水文与水动力耦合方式、水动力模块的构建。

b. 反映联围排涝模式的雨洪模型结构在模拟精度上明显优于其他常规方法构建的雨洪模型。对比率定场次与测试场次的纳什效率系数,可看出联围雨洪模型在率定与测试场次中精度稳定,测试场次的平均纳什效率系数高于其他组别 0.05~0.61,说明考虑片区排涝模式及不同地形产汇流过程差异的建模方法对联围雨洪模拟精度有正向贡献。

c. 在构建联围雨洪模型的过程中,梳理河道在排涝中的层级,可清晰地划分河道对应的集水范围,更好地控制排涝中河道过流过程以及所需的排水能力。

d. 联围雨洪模拟有别于常规流域雨洪模拟的关键点包括:①不同片区产水汇入河网的方式,坡地仍按地形汇流为主,而联围内占比高的平坦地表则尤其需要关注片区产流的倾泄点位置,除部分仍以自然汇流为主的未开放区域外,城建片区不论是以管网排涝为主或是由区域边缘的泵站抽排涝水,倾泄点位置与流量过程都与天然地表排水情景相去甚远,需要在雨洪模拟中专门设置,不能简单概化。②联围区域的“逐级向外、单向排涝”的排涝过程,水系上诸多的闸门、泵站相互配合,将联围水网中相对无序的水流逐级单向地向外排出,闸门、泵站具备承担水流控制及提供动力的作用,这可能使得河道内的排涝水位、流量与天然状态下的排涝水位、流量出现较大差别,对安全性评估以及水利设施设计研讨阶段等工作产生较大影响。可见,联围雨洪模型的结构应更注重对产流、汇流、河道排涝过程中水流过程的刻画,使之与联围实际排涝过程相符,这是提升模拟精度的关键。

参考文献:

[1] HALLEGATTE S, GREEN C, NICHOLLS R J, et al. Future flood losses in major coastal cities [J]. Nature

Climate Change, 2013, 3(9): 802-806.

- [2] 李媛媛,杨辉辉,何俊. 珠三角平原河网区洪涝“联排联调”工程设计关键技术研究 [J]. 水利规划与设计, 2021(11):65-69. (LI Yuanyuan, YANG Huihui, HE Jun. Research on key technologies of flood control and drainage “Joint Discharge and Joint Regulation” engineering design in the Pearl River Delta plain river network area [J]. Water Resources Planning and Design, 2021(11):65-69. (in Chinese))
- [3] 芮孝芳. 论流域水文模型 [J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 1-7. (RU Xiaofang. Discussion of watershed hydrological model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4): 1-7. (in Chinese)).
- [4] QI W, MA C, XU H, et al. A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies [J]. Natural Hazards, 2021, 108: 31-62.
- [5] ZAHURA F T, GOODALL J L. Predicting combined tidal and pluvial flood inundation using a machine learning surrogate model [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 41: 101087.
- [6] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望 [J]. 水利学报, 2021, 52(4): 381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [7] 赖成光,廖耀星,王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 101-108. (LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli, et al. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 101-108. (in Chinese))
- [8] 王兆礼,陈昱宏,赖成光,等. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟 [J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang, et al. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124. (in Chinese))
- [9] 王船海,王娟,程文辉,等. 平原区产汇流模拟 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(6): 627-632. (WANG Chuanhai, WANG Juan, CHENG Wenhui, et al. Numerical simulation of runoff yield and confluence in plain area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(6): 627-632. (in Chinese))
- [10] 李国一,刘家宏. 基于 TELEMAC-2D 模型的深圳洪涝风险评估 [J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 58-64. (LI Guoyi, LIU Jiahong. Flood risk assessment of Shenzhen City based on TELEMAC-2D model [J]. Water Resources

- Protection, 2022, 38(5): 58-64. (in Chinese))
- [11] 关铜垒, 刘佳嘉, 周祖昊, 等. 考虑山区-平原区的分布式水文模型计算单元划分方法研究[J]. 水文, 2022, 42(5): 7-13. (GUAN Tonglei, LIU Jiajia, ZHOU Zuhao, et al. Research on the division method of calculation unit considering hill-plain area to distributed hydrological model [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(5): 7-13. (in Chinese))
- [12] CHEN G, WANG C, FANG X, et al. Distributed-framework basin modeling system: IV. application in Taihu Basin[J]. Water, 2021, 13(5): 611.
- [13] 薛娇, 廖小龙, 钟逸轩, 等. 珠江三角洲水文水动力耦合模型研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(2): 60-68. (XUE Jiao, LIAO Xiaolong, ZHONG Yixuan, et al. Study on coupling numerical model of hydrology and hydrodynamics for the Pearl River Delta [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(2): 60-68. (in Chinese))
- [14] 卢健涛, 王保华, 薛娇, 等. 基于 WebGIS 的中珠联围洪涝预报预警系统[J]. 水电能源科学, 2022, 40(9): 95-98, 189. (LU Jiantao, WANG Baohua, XUE Jiao, et al. A flood forecasting and early warning system in Zhongzhu Lianwei based on WebGIS [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(9): 95-98, 189. (in Chinese))
- [15] 付晓花, 董增川, 韩锐, 等. 复杂河网地区气候-水文-水动力耦合模型模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 162-169. (FU Xiaohua, DONG Zengcuan, HAN Rui, et al. Simulation of climate-hydrologic-hydrodynamic coupling model in complex river network area [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 162-169. (in Chinese))
- [16] HU Y, QIN T, DONG G, et al. Flood modeling in a composite system consisting of river channels, flood storage areas, floodplain areas, polder areas, and flood-control-protected areas[J]. Water, 2024, 16(6): 825.
- [17] 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, et al. 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))
- [18] 刘曾美, 吴俊校, 肖素芬. 感潮地区排涝分析计算方法和思路研究[J]. 人民珠江, 2009, 30(5): 8-11. (LIU Zengmei, WU Junxiao, XIAO Sufen. Study on analysis and calculation method of flood drainage in tide-sensing area [J]. Pearl River, 2009, 30(5): 8-11. (in Chinese))
- [19] 刘曾美, 熊腮敏, 雷勇, 等. 城镇内涝防治中市政排水与水利排涝的标准衔接研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 125-132. (LIU Zengmei, XIONG Saimin, LEI Yong, et al. Study on design standard matching between municipal drainage and water conservancy drainage in urban local flood control [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 125-132. (in Chinese))
- [20] 易路. 陆面水文模型 TOPX 的改进及其与区域气候模式 WRF 的耦合研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [21] 刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 等. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 112-122. (LU Jintao, HAN Xiaole, LIU Jianli, et al. Understanding of critical zone structures and hydrological connectivity: a review [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 112-122. (in Chinese))
- [22] MCDONNELL J J. Where does water go when it rains. Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(9): 1869-1875.
- [23] 赵人俊, 庄一鹄. 降雨径流关系的区域规律[J]. 华东水利学院学报(水文分册), 1963(增刊 2): 53-68. (ZHAO Renjun, ZHUANG Yiling. Regional regularity of rainfall runoff relationship [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1963(Sup2): 53-68. (in Chinese))
- [24] 芮孝芳. 产流模式的发现与发展[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 1-6. (RUI Xiaofang. The discovery and development of runoff formation models [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 1-6. (in Chinese))
- [25] DUNN T, BLACK R D. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed[J]. Water Resources Research, 1970, 6(5): 1296-1311.
- [26] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant[J]. Hydrological Sciences Journal, 1979, 24(1): 43-69.
- [27] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to the European hydrological system—systeme hydrologique Europeen, “ SHE ”, 1: history and philosophy of a physically-based, distributed modelling system[J]. Journal of Hydrology, 1986, 87(1/2): 45-59.
- [28] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to the European hydrological system—systeme hydrologique Europeen, “ SHE ”, 2: structure of a physically-based, distributed modelling system [J]. Journal of Hydrology, 1986, 87(1/2): 61-77.
- [29] 李致家, 姚成, 汪中华. 基于栅格的新安江模型的构建和应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 131-134. (LI Zhijia, YAO Cheng, WANG

- Zhonghua. Development and application of grid-based Xinanjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35 (2): 131-134. (in Chinese)
- [30] 刘昌军,周剑,文磊,等. 中小流域时空变源混合产流模型及参数区域化方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 99-114. (LIU Changjun, ZHOU Jian, WEN Lei, et al. Research on spatio-temporally-mixed runoff model and parameter regionalization for small and medium-sized catchments [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(1): 99-114. (in Chinese))
- [31] 王维,冯志伦,杨伟,等. 基于 SCE-UA 算法的新安江模型与垂向混合产流模型参数优化应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(3): 26-30. (WANG Wei, FENG Zhonglun, YANG Wei, et al. The application of SCE-UA algorithm to optimization of Xin' anjiang and vertically-mixed runoff model parameters[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(3): 26-30. (in Chinese))
- [32] FATICHI S, OR D, WALKO R, et al. Soil structure is an important omission in earth system models[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 522.
- [33] 陆文,唐家良,章熙锋,等. 山地流域水文模拟研究进展与展望[J]. 山地学报, 2020, 38(1): 50-61. (LU Wen, TANG Jialiang, ZHANG Xifeng, et al. Hydrological simulation in mountainous region: present state and perspectives[J]. Mountain Research, 2020, 38(1): 50-61. (in Chinese))
- [34] 刘家福,蒋卫国,占文凤,等. SCS 模型及其研究进展[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 120-124. (LIU Jiafu, JIANG Weiguo, ZHAN Wenfeng, et al. Processes of SCS model for hydrological simulation: a review [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(2): 120-124. (in Chinese))
- [35] 申红彬,徐宗学,曹兵,等. 分布式 SCS-CN 有效降雨修正模型建立及应用[J]. 水科学进展, 2023, 34(4): 553-561. (SHEN Hongbin, XU Zongxue, CAO Bing, et al. A distributed SCS-CN model with revised effective precipitation[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(4): 553-561. (in Chinese))
- [36] 邓培德. 城市雨水道设计洪峰径流系数法研究及数学模型法探讨[J]. 给水排水, 2014, 50(5): 108-112. (DENG Peide. Study on the flood -peak runoff coefficient method of urban storm water pipe design and mathematic model[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 50(5): 108-112. (in Chinese))
- [37] 陆海明,邹鹰,孙金华,等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 58-65. (LU Haiming, ZOU Yin, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexingiao experimental base based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 58-65. (in Chinese))
- [38] 刘曾美,谢建麟,黎智良,等. 中山市三乡镇水利综合规划[R]. 中山:中山市水利水电勘测设计咨询有限公司, 2014.
- [39] 刘曾美,谢建麟,黎智良,等. 中山市坦洲镇水利规划[R]. 广州:华南理工大学,2014.
- [40] 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))

(收稿日期:2024-08-09 编辑:彭桃英)

(上接第 34 页)

- [19] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(5): 46-55. (CHEN Xiaonan, JIN Yanguo, XU Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5):46-55. (in Chinese))
- [20] 郭旭宁,李云玲,唱彤,等. “荆楚安澜”现代水网建设思路与实施路径[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 1-7. (GUO Xuning, LI Yunling, CHANG Tong, et al. Construction thought and implementation pathway of “Jingchu’ anlan” modern water network [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 1-7. (in Chinese))
- [21] HONG Wuyang, GUO Renzhong, LI Xiaoming, et al. Measuring urban ecological network resilience: a disturbance scenario simulation method[J]. Cities, 2022, 131:104057.
- [22] HUANG Longyang, WANG Jing, CHENG Hongguang. Spatiotemporal changes in ecological network resilience in the Shandong Peninsula urban agglomeration[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 339: 130681.
- [23] 方国华,赵文萃,李鑫,等. 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 1-8. (FANG Guohua, ZHAO Wencui, LI Xin, et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu Section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 1-8. (in Chinese))

(收稿日期:2024-04-24 编辑:施业)