

# 基于耦合水动力模型的广州市东濠涌流域洪涝模拟

罗海婉<sup>1</sup>, 陈文杰<sup>1</sup>, 李志威<sup>2</sup>, 潘健<sup>1</sup>, 高强<sup>2</sup>, 黄国如<sup>1,3,4</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 广州市水务科学研究所 广东 广州 510220;  
3. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 4. 广东省水利工程安全与绿色  
水利工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

**摘要:** 东濠涌流域位于广州市中心城区越秀区内, 调研分析流域内积水点淹没成因与利用数值模拟方法研究该城市流域洪涝过程并获得一定可靠性和精度的洪涝水情信息, 可为相关部门抢险救灾决策提供理论参考和科学依据。根据城市洪涝过程的水文水力学方法原理, 以 SWMM 作为一维模型基础, 采用动态链接库文件 (DLL) 方法耦合二维水动力模型, 通过侧向、正向和垂向的连接构建耦合水动力模型, 以东濠涌流域为研究区域构建基于耦合水动力模型的东濠涌流域洪涝模型并选用两场实测降雨对模型进行模拟分析。结果表明: 模型在一维排水系统的排水能力与二维地表积水的模拟均具有较好的精度和可靠性。该耦合水动力模型在东濠涌流域的应用进一步证明了耦合模型连接算法的合理性和可行性, 对城市洪涝模拟分析有较好的应用价值。

**关键词:** 城市洪涝; 耦合水动力模型; 数值模拟; 东濠涌流域

中图分类号: TV122; TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0046-07

## Flood simulation of Donghaochong Basin in Guangzhou City based on coupled hydrodynamic model

LUO Haiwan<sup>1</sup>, CHEN Wenjie<sup>1</sup>, LI Zhiwei<sup>2</sup>, PAN Jian<sup>1</sup>, GAO Qiang<sup>2</sup>, HUANG Guoru<sup>1,3,4</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;  
2. Guangzhou Water Science Research Institute, Guangzhou 510220, China; 3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 4. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Donghaochong Basin is located in Yuexiu District, the centre of Guangzhou City. Through investigation and analysis of the causes of inundation at water points in the river basin and the use of numerical modeling, this paper studied urban basin flood process and obtained flood information with certain reliability and accuracy, providing theoretical reference and scientific basis for decision making concerning disaster relief by related departments. According to the principles of hydrologic hydraulics about the process of urban flood, the SWMM was taken as one-dimensional (1D) model, the two-dimensional (2D) hydrodynamic model was coupled through DLL, and the coupled hydrodynamic model was constructed through the connection of horizontal and vertical direction. The flood model of Donghaochong Basin based on the coupled hydrodynamic model was constructed. Two measured rainfall events were simulated and analyzed, and it turned out that the flood model had good accuracy and reliability in the simulation of 1D drainage system and 2D surface waterlogging. The application of the coupled hydrodynamic model in Donghaochong Basin further proved the rationality and feasibility of the coupling model connection algorithm, showing great application value in urban flood simulation and analysis.

**Key words:** urban flooding; coupled hydrodynamic model; numerical modeling; Donghaochong Basin

收稿日期: 2019-02-21; 修回日期: 2019-03-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502704); 广东省水利科技创新项目(2016-32); 国家自然科学基金项目(51739011、51879108); 广州市科技计划项目(201803030021)

作者简介: 罗海婉(1994-), 女, 广东清远人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。

通讯作者: 黄国如(1969-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。

## 1 研究背景

模拟和预报城市洪涝是防洪减灾的重要基础,也是当今城市水文学研究的热点课题<sup>[1-3]</sup>。国内外研究学者对城市区域的产汇流特性和洪水计算方法做了大量研究并与计算机技术结合,基于现有的水文水动力知识基础,利用计算机技术建立数值模型对城市洪涝过程的地表产汇流、管道汇流、河道行洪和地表淹没进行模拟和计算,分析淹没区域和水流水位等情况,可为城市防洪排涝、抢险救灾等提供决策依据<sup>[4-5]</sup>。

城市洪涝模型可分为一维模型、二维模型和一二维耦合模型3种。一维、二维模型均可对城市洪涝过程进行水文水动力过程模拟,但一维、二维模型均有各自的优势与局限性,前者计算效率较高但不具备模拟洪水在地表演进过程的能力<sup>[6]</sup>,后者可模拟二维地表水流却不具备模拟地下管网汇流过程能力<sup>[7]</sup>。因此,将一维、二维模型进行耦合可克服两者的缺点、发挥两者的优势<sup>[8-9]</sup>。目前,常用于一二维城市流域洪涝模拟的模型有华霖富水力研究有限公司(Wallingford)的Infoworks、丹麦水利研究所(DHI)的MIKE URBAN等<sup>[10-11]</sup>,以上两个模型均为使用成本较高的商业软件。随着国内外学者的研究,近年来一维、二维耦合模型有了较大的发展。Schmitt等<sup>[12]</sup>通过耦合一、二维模型研究城市洪水特征。耿艳芬<sup>[13]</sup>基于水动力学方程组,建立可准确模拟城市流域地下管网模拟与地面淹没模拟的一、二维模型及其耦合模型。Seyoum等<sup>[14]</sup>将SWMM模型与自主开发的二维地表模型耦合,克服了地表和地下管网水流交换的困难,实现了真正意义上的一、二维水流交换。李传奇等<sup>[15]</sup>基于一维非恒定流方程与二维自由水面流动模型构建一二维水动力耦合模型,并应用于济南市地区洪水模拟中。陈鹏宇<sup>[16]</sup>基于SWMM与自主开发的二维漫流模型,构建城市流域洪涝一维、二维耦合模型系统,并通过济南市洪涝算例验证模型。栾慕等<sup>[17]</sup>构建SWMM-MIKE11耦合模型,对桐庐县的管网排水能力和城市内涝风险进行了评估。王庆平等<sup>[18]</sup>对一、二维水动力模型进行耦合并改进,应用于山区半山区流域的洪涝灾害预警。

由上可知,将一维、二维水动力模型耦合可充分发挥两者的优势,对一维水动力模型进行二次开发也是研究城市洪涝模拟问题的首选技术路线<sup>[19]</sup>,本文将一维模型SWMM(Storm Water Management

Model)与二维水动力模型进行耦合构建耦合水动力模型,克服SWMM无法模拟地面水流淹没与流动的局限性,将验证后的模型应用于广州市东濠涌流域的洪涝过程模拟并分析该模型在城市流域的适用性,取得的模拟结果表明模型可靠性和精度较好。

## 2 研究区域概况及积水原因

东濠涌是珠江广州段主要河涌之一,总长约4.4 km,发源于白云山麓湖,流经越秀区汇入珠江。东濠涌流域水系主要由麓湖、东濠涌和新河涌组成,全流域面积12.4 km<sup>2</sup>。麓湖的洪水和流域的暴雨实行错峰泄洪,东濠涌流域防洪排涝主要依靠东濠涌及其支涌新河涌两条河道和地下排水管网,因此根据研究区域实际汇流情况对东濠涌流域边界进行调整,扣除麓湖及其汇水面积后,东濠涌流域总面积为10.3 km<sup>2</sup>,如图1所示。

近几十年的社会发展中,广州市的土地利用复杂性不断上升<sup>[20]</sup>,城市化的快速进程使城市的水循环、水生态和水安全受到一定影响。近年来广州市区年降雨量逐年增加,暴雨中心逐渐向市中心转移,降雨时段更为集中、空间分布不均匀,广州市的暴雨洪涝问题越发严重<sup>[21]</sup>。城市暴雨洪涝问题是由多种因素共同作用而产生的灾害现象<sup>[22]</sup>,东濠涌流域位于广州市典型老城区越秀区内,具有截污、防洪、排涝等功能。降雨期间,流域内地面径流通过地下管道、地表汇流进入东濠涌。因近年来流域内建筑物密度变大,管网规划混乱且设计标准偏低等因素,加以东濠涌断面宽度变小、河道淤积情况严重等原因,造成河涌过流能力下降,无法满足日益上升的防洪排涝要求,流域内溢流污染和积水问题严峻。当降雨量较大时,东濠涌流域局部地区容易产生积水淹没现象,轻则影响居民的日常生活,重则造成经济损失。通过相关部门提供的信息整理与实地调研,调查积水点的分布并分析其成因,流域内积水点分布与成因分别如图1、表1所示。

## 3 耦合水动力模型

本文所构建的耦合水动力模型的一维管道模型基础是美国环保署(EPA)资助下研发的SWMM,其广泛应用于城市区域和非城市区域的排水系统的规划、分析和设计<sup>[6,23]</sup>。SWMM的局限性在于无法模拟二维地表积水的流动,但其模型代码开源易于实现模型耦合。SWMM提供恒定流法、运动波法和动力波法3种方法用于管道流量传输计算,本模型计

算考虑回水、蓄变、有压流、逆流等情况,采用动力波法进行求解,即完整求解圣维南方程以求得管道流量。圣维南方程包括连续方程和动量方程,如公式(1)、(2)所示:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = S_0 - S_f \quad (2)$$

式中:  $Q$  为流量,  $m^3/s$ ;  $A$  为过水断面面积,  $m^2$ ;  $x$  为距离,  $m$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $H$  为静压水头,  $m$ ;  $v$  为平均流速,  $m/s$ ;  $g$  为重力加速度, 可取  $9.8 m/s^2$ ;  $S_0$  为重力项;  $S_f$  为摩擦力。



图1 东濠涌流域边界和积水点分布图

表1 研究区积水点位置及其成因分析

序号	积水地点	积水原因
1	麓景路与麓湖西路路口	麓湖路高尔夫山水倾泄,排水口被树叶等杂物堵塞
2	下塘西路20号前	短时间降水量大,排水口被树叶等杂物堵塞
3	童心路铁路桥底	地势低洼,小北水闸开启不及时
4	朱子寮	地势低洼,东濠涌水位顶托,造成水浸
5	黄华路	地势低洼,东濠涌水位顶托,造成水浸
6	北横街	东濠涌放水泄洪顶托
7	东川路东成北街	水位顶托,地势低洼,排水不及
8	长兴直街祖庙前片区	水位顶托,地势低洼,排水不及
9	横枝岗肿瘤医院周边	短时间降水量大,排水口被树叶等杂物堵塞
10	恒福路155号	短时雨量大,排水口被树叶等杂物堵塞
11	淘金北路铁路桥底	地势低洼,两支排水管汇水处,东濠涌、孖鱼岗渠箱水位顶托,造成水浸
12	环市东路光明路16号	短时雨量大,排水口被树叶等杂物堵塞
13	环市路庄立立交	地势低洼,孖鱼岗渠箱水位顶托,造成水浸
14	农林下路广发银行	水位顶托,排水设施不完善
15	农林下路	地势低洼,排水管径小,孖子涌渠箱水位顶托,造成水浸
16	寺贝通津	水位顶托,地势低洼,排水不及

本文所构建的耦合水动力模型的二维模型基于二维浅水方程,如公式(3)所示。结合 Godunov 型有限体积方法、隐式双时间步方法以及 HLLC 格式黎曼近似求解器等,建立一个高效、稳定、时空均具有二阶精度的二维非恒定流水动力学模型,改进后控制方程如式公(4)所示。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S \quad (3)$$

$$\text{其中: } U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{g(h^2 - b^2)}{2} \\ huv \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{g(h^2 - b^2)}{2} \end{bmatrix},$$

$$S = S_b + S_f = \begin{bmatrix} 0 \\ g(h+b)S_{ox} - ghS_{fx} \\ g(h+b)S_{oy} - ghS_{fy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $h$  为水深,  $m$ ;  $u$  和  $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向平均流速,  $m/s$ ;  $b$  为水底高程,  $m$ ;  $S_{ox}$  和  $S_{oy}$  分别为底坡源项  $S_b$  在  $x$ 、 $y$  方向的分量;  $S_{fx}$  和  $S_{fy}$  分别为  $S_f$  摩擦阻源项在  $x$ 、 $y$  方向分量。

双时间步法具有计算效率高、稳定性好等优点,

自提出后便得到广泛的应用<sup>[24-28]</sup>,本文将此算法应用于二维水动力模型并建立隐式高效的有限体积法模型,可优化模型计算效率与稳定性。二维水动力模型构建完成后,利用恒定流算例、Stocker 和 Malpasset 溃坝算例、斜水跃算例,对该模型处理恒定流、间断流、实际地形等模拟能力进行检验与验证,并将隐式双时间步法结果与显式方法结果进行对比,对比结果表明隐式双时间步法的计算耗时和稳定性明显优于显式方法<sup>[29]</sup>。模型具有处理实际洪水的能力以及良好的计算精度,能够应用于城市洪涝数值模拟计算<sup>[30]</sup>。

本文的耦合水动力模型以 SWMM 为一维模型基础,通过动态链接库文件(DLL)方式耦合二维模型。为建立一维模型和二维模型在水平和垂向方向上的连接,分别采用经验公式、相互提供边界条件、堰流公式和孔口流量公式的方式建立地表侧向连接、正向连接和垂向连接,并在每个连接方向上采用理想算例对连接方式进行分析与校验,计算结果表明模型水量守恒、计算结果精度良好,连接方式合理可行,能很好地预测城市洪涝的发生过程<sup>[31]</sup>。耦合模型结构示意图如图 2 所示。

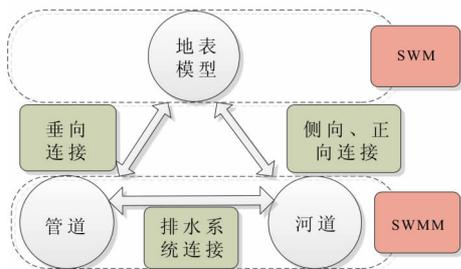


图 2 模型耦合结构示意图

多,因此需根据构建城市雨洪模型的需要对排水系统进行概化,将雨水篦子、个别短管道等对模型计算精度和可靠性有影响的管网排除。此外,河道有较大的行洪作用,是一维排水模型的重要组成部分,因此需对河道断面数据进行整理和概化。完成上述概化工作后,提取管网和河道信息并构建排水系统数据库,整理、分析、检查和修正管道和河道的数据,最终简化为 3 928 条管道、河道以及 3 471 个检查井,如图 3 所示。

(2)子汇水区划分及其数据提取。东濠涌流域面积约 10.3 km<sup>2</sup>,检查井和管线数量较多,实际产汇流过程复杂,手动划分子汇水区的工作量较大,故需利用 GIS 通过地形数据初步提取分水岭,再结合检查井的位置采用泰森多边形法划分子汇水区,利用 Arc GIS 空间分析功能,计算子汇水区的面积、坡度、不透水率等模型构建所需特征值并构建子汇水区数据库,最终共划分 7 700 个子汇水区,如图 3 所示。



图 3 研究区域一维模型结构图

## 4 东濠涌流域洪涝模型构建

### 4.1 一维模型构建

本文的一二维耦合模型的一维模型基础为 SWMM,因此一维排水模型的构建主要包括以下几个步骤:

(1)地下管网和河道数据的处理。CAD 图中的地下管网系统较复杂,检查井、管道和河道种类较

(3)模型参数设置。模型运行还需设置模型运行参数,如透水区曼宁系数、不透水区曼宁系数及霍顿产流参数等,则需根据 SWMM 使用手册和邻近地区相关研究成果确定<sup>[32-33]</sup>,一维模型参数取值如表 2 所示。

表 2 一维模型参数取值

模型	管道参数	子汇水区不确定性参数					下渗参数			
		不透水区曼宁系数	透水区曼宁系数	不透水区注蓄深/mm	透水区注蓄深/mm	不透水区中无注不透水面积比例/%	最大下渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	最小下渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	渗透衰减系数/(1·h <sup>-1</sup> )	
动力波法	霍顿模型	0.013	0.011	0.24	2.5	5	25	78.1	3.302	3.35

## 4.2 一维、二维模型耦合

一维、二维模型耦合主要分成以下几个步骤:

(1)确定二维模拟研究范围。根据东濠涌流域的实际情况对研究区域进行分析,在数据允许的范围内容尽量与一维排水模型保持一致,因此二维模型构建的范围与一维模型范围相同,均为东濠涌流域,见图1所示。

(2)地表建筑物及河道概化。东濠涌流域为高度城市化的区域,流域内建筑密集,建筑物在实际中对水流有阻挡作用,在模型中的处理思路有两种,一是将建筑物高程抬高到一定的高程,使其在模拟时不出现积水;二是在模拟范围中排除建筑物而进行模拟。本研究采用第二种方法,根据土地利用分布图划出建筑物轮廓并在模拟范围中将建筑物排除在外,只考虑建筑物对水流的阻挡作用,不考虑建筑物内部淹没作用。此外,河道作为重要的泄洪通道,实际中不可积水,因此也将河道排除在二维模型模拟范围之外,建筑物及河道的分布如图4所示。

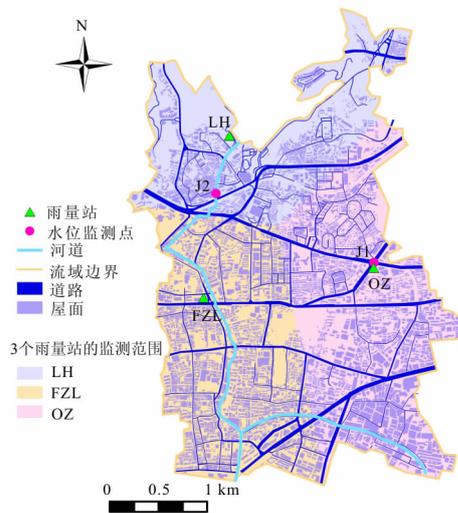


图4 研究区域建筑物、河道分布与监测点布置图

(3)边界条件确定。由于东濠涌流域为闭合的城市流域,本研究设置二维模型的边界为固边界,雨水只能通过地下管网和东濠涌排到流域外。此外,流域内存在需要进行侧向耦合的河道,须对耦合边界进行标记,便于模型识别耦合边界。

(4)网格划分。二维模型网格划分的最大尺寸为  $100 \text{ m}^2$ ,在建筑物密集区域、道路区域等重要区域的网格根据建筑物边界和道路边界自动加密,网格最小尺寸可达  $0.1 \text{ m}^2$ 。以上的网格划分方法既可提高了道路、建筑物等重要区域的计算精度,又保证了模型整体的计算效率。

(5)构建地表高程模型。建立二维模型须引入地面高程模型并将地面高程赋值到划分好的网格之中。本模型的高程点数据由地形图、管网图等包含地形信息的资料中获取,因此高程点数据较为密集,容易出现高程点缺失或错误等高程误差现象,造成局部地区坡度变化过大影响模拟结果的可靠性和精度。研究区域内部高程范围较大,须利用 Arc GIS 的 3D 分析功能建立 TIN 模型,对高程误差点进行修正。

## 5 结果与分析

为提高模型的精度和可靠性,本文选取东濠涌流域内所布置的雨量站监测所得的实测降雨数据、检查井变化过程、地表淹没水深等实际情况对东濠涌流域洪涝模型参数进行率定和验证。通过整理雨量站监测资料、检查井监测和水深调研数据,本文选定两场实测降雨场次,即采用 20170715 场次实测降雨进行模拟,根据该场暴雨造成检查井水位变化数据对东濠涌模型进行参数率定并采用 20170905 场次实测降雨验证该模型。

### 5.1 实测降雨数据

东濠涌流域范围较大,内含 3 个雨量站。由于降雨在时空上具有较大的不均匀性,因此在具备多个雨量站的流域内,常采用泰森多边形对流域进行划分<sup>[34-35]</sup>。本文根据雨量站所在位置,采用泰森多边形法将东濠涌流域划分 3 个雨量站的监测区域,雨量站的详细信息如表 3 所示。检查井监测点布置、雨量站布置及其监测区域如图 4 所示。

表3 雨量站信息表

雨量站名称	安装位置	监测时段
FZL	法政路	2017-06 - 2018-04
LH	麓湖	2017-06 - 2018-04
OZ	区庄立交	2017-06 - 2018-04

通过整理雨量站的降雨数据,选出 20170715 (18:24 - 18:44)、20170905 (13:01 - 14:00) 两场实测降雨用于模型的参数率定及验证,两场实测降雨的降雨过程见图 5(a)、5(b) 所示。

### 5.2 实测降雨模拟结果分析

本文所构建的耦合水动力模型可模拟地下管网一维水力特征值、子汇水区蒸发和下渗等水文特征值以及二维地面积水深度和流速等水力特征值等一系列城市洪涝过程特征值的变化过程。由于

20170715 场次降雨历时较短、降雨强度较小,流域内检查井几乎不发生溢流,即无法利用地表淹没范围及最大淹没水深数据与模型结果进行对比,因此 20170715 场次降雨选取 2 个检查井内液位计实测水位与模型模拟水位进行对比研究,检查井分别是位于区庄立交附近的 J1 和位于麓景路与恒安路路口附近的 J2。以 20170715 场次降雨数据输入模型进行模拟,模拟结果显示流域内仅小部分区域发生内涝,与实际情况相符。检查井的实测水位与模拟水位变化过程如图 6(a)、6(b),由图 6 可知本文所构建的东濠涌流域洪涝模型的一维模拟结果与实测数据较相符。

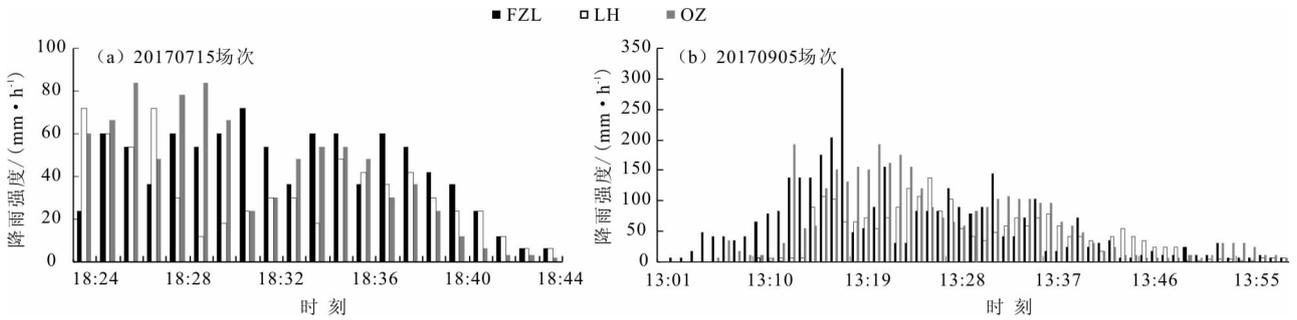


图 5 实测降雨过程图

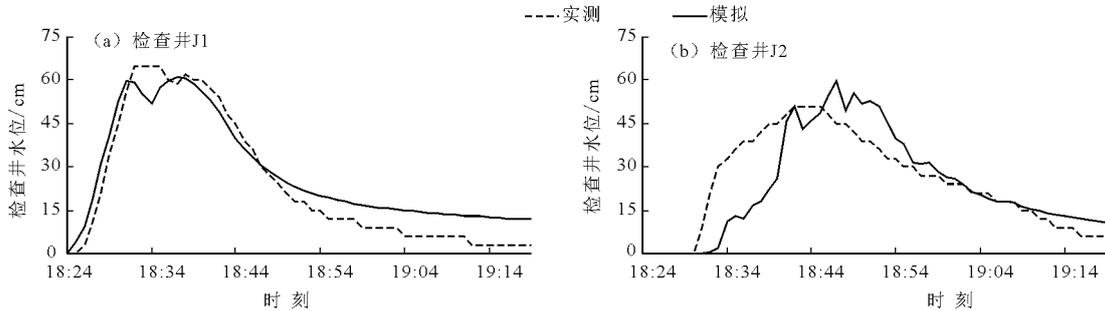


图 6 20170715 场次降雨中检查井 J1 和 J2 水位变化过程

与 20170715 场次降雨不同,20170905 场次降雨历时较长且降雨强度较大,流域内较多检查井产生溢流进而发生淹没现象,但检查井内的液位计只能测得检查井地面以下的水位,无法测得检查井溢流后地表淹没深度,即无法利用检查井实测水位与模拟水位结果进行比较。因此 20170905 场次降雨选取该场次暴雨下调研所得的主要受淹街道的最大淹没深度与模拟所得最大淹没深度进行比较。以 20170905 场次降雨数据输入模型进行模拟,模拟结果显示流域较大范围发生淹没现象,与实际情况相符。统计本场次降雨受淹街道的调研结果与模拟结果并进行对比分析,如表 4 所示。由表 4 可看出,模拟结果总体比调研结果偏大,这可能是由于在二维地表建筑物概化时,将建筑物排除在模拟范围之内,忽略了地表水流对建筑物的实际淹没,致使模拟水位比实际调研水位偏大。但两者差值较小,因此可说明本文所构建的东濠涌洪涝模型的二维模拟结果与实测数据较为相符。

选用两场实测降雨作为降雨情景对所构建的东

濠涌洪涝模型进行模拟,通过两场降雨的实测水位、调研淹没深度与模拟结果进行对比分析,可发现无论在检查井的水位变化过程还是地表淹没的范围和深度上,模型模拟的结果与实际情况较为相符,能够反映出在降雨过程中东濠涌流域的一维排水系统的运行状态和二维地表淹没情况,可认为该模型在洪涝过程模拟上具有良好的精度和可靠性。

表 4 20170905 场次降雨调研淹没深度与模拟结果

街道名称	调研最大深度/m	模拟最大深度/m	误差/m
北横街	0.2	0.25	-0.05
黄华路	0.4	0.52	-0.12
麓景路与麓湖西路路口	0.3	0.21	0.09
横枝岗肿瘤医院周边	0.4	0.48	-0.08
农林下路广发银行	0.5	0.62	-0.12
农林下路	0.4	0.66	-0.26

## 6 结 论

(1)以 SWMM 为一维模型基础,采用动态链接

库文件方式耦合基于二维浅水方程的二维水动力模型,对一维模型和二维模型进行侧向、正向和垂向的连接,完成具有一维管道和检查井水力模拟、子汇水区水文模拟、二维积水模拟等水文水力特征值的耦合水动力模型的构建。

(2)基于耦合水动力模型构建东濠涌流域洪涝模型,选用两场实测降雨进行模拟分析,结果表明模拟所得的检查井水深变化、地表积水的范围及其深度等结果与实际情况较为吻合,可见本文构建的东濠涌流域洪涝模型具有较好的精度和可靠性。

(3)耦合水动力模型在东濠涌流域应用效果较好,进一步证明了该耦合模型连接算法的合理性和可行性。可应用于城市地区洪涝数值模拟计算,模拟得到的结果可为城市洪涝灾情进行预警预报,为相关部门防洪抢险提供科学依据。

#### 参考文献:

[1] 宋晓猛,张建云,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展,2014,25(5):752-764.

[2] 姜仁贵,韩浩,解建仓,等. 变化环境下城市暴雨洪涝研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(3):11-17.

[3] 韩浩,姜仁贵,解建仓,等. 基于文献计量的我国城市内涝研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(3):134-138.

[4] 潘安君,张书函,孟庆义,等. 北京城市雨洪管理初步构想[J]. 中国给水排水,2009,25(22):9-12.

[5] 朱冬冬,周念清,江思珉. 城市雨洪径流模型研究概述[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(3):132-137.

[6] 梅超,刘家宏,王浩,等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术,2017,48(5):33-42.

[7] MIGNOT E, PAQUIER A, HAIDER S. Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations [J]. Journal of Hydrology,2006,327(1-2):186-199.

[8] 张大伟,李丹勋,陈稚聪,等. 溃堤洪水的一维、二维耦合水动力模型及应用[J]. 水力发电学报,2010,29(2):149-154.

[9] 李春辉,徐国宾,苑希民,等. 河道与蓄滞洪区联合防洪数值模拟研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):139-144.

[10] 黄国如,王欣,黄维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学,2017,35(2):66-70+60.

[11] 谢家强,廖振良,顾献勇. 基于 MIKE URBAN 的中心城区内涝预测与评估——以上海市霍山-惠民系统为例[J]. 能源环境保护,2016,30(05):44-49+37.

[12] SCHMITT T, THOMAS M, ETRICH N. Analysis and

modeling of flooding in urban drainage systems[J]. Journal of Hydrology,2004,299(3-4):300-311.

[13] 耿艳芬. 城市雨洪的水动力耦合模型研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.

[14] SEYOUM S D, VOJINOVIC Z, PRICE R K, et al. Coupled 1D and noninertia 2D flood inundation model for simulation of urban flooding [J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2011,138(1):23-34.

[15] 李传奇,侯贵兵. 一维二维水动力模型耦合的城市洪水模拟[J]. 水利水电技术,2010,41(3):83-85+90.

[16] 陈鹏宇. 城市洪涝一维二维耦合模型与系统开发研究[D]. 济南:山东大学,2016.

[17] 栾慕,袁文秀,刘俊,等. 基于 SWMM - MIKE11 耦合模型的桐庐县内涝风险评估[J]. 水资源保护,2016,32(2):57-61.

[18] 王庆平,司伟,陈翔. 一二维耦合模型在半山区洪涝预报中的研究及应用[C]//探索“智慧水利”推动科技创新——2017(第五届)中国水利信息化技术论坛论文集. 2017.

[19] 范玉燕,汪诚文,喻海军. 基于一二维耦合水动力模型的海绵小区建设效果评估[J]. 水电能源科学,2018,36(12):16-20.

[20] 郭沛,杜世宏,薛达元,等. 快速城市化进程中广州市景观格局时空分异特征的研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2009,45(1):129-136.

[21] 郑杰元,黄国如,王质军,等. 广州市近年降雨时空变化规律分析[J]. 水电能源科学,2011,29(3):5-8+192.

[22] 黄国如. 城市暴雨内涝防控与海绵城市建设辨析[J]. 中国防汛抗旱,2018,28(2):8-14.

[23] 胡伟贤,何文华,黄国如,等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 水科学进展,2010,21(1):137-144.

[24] 汪洪波,孙明波,吴海燕,等. 超声速燃烧流的双时间步计算方法研究[J]. 国防科技大学学报,2010,32(3):1-6.

[25] ZHAO Yong, TAN H H, ZHANG Baili. A high-resolution characteristics-based implicit dual time-stepping VOF method for free surface flow simulation on unstructured grids [J]. Journal of Computational Physics,2002,183(1):233-273.

[26] JAMESON A. Time dependent calculations using multigrid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings [C]//AIAA 10th Computational Fluid Dynamics Conference. Honolulu: AIAA, 1991.

[27] HELENBROOK B T, COWLES G W. Preconditioning for dual-time-stepping simulations of the shallow water equations including Coriolis and bed friction effects [J]. Journal of Computational Physics,2008,227(9):4425-4440.

(下转第65页)

(3)该模型的建立为生态清淤工程的效益评估提供了科学预测工具。在应用模型分析清淤的环境生态效应时,应充分开展沉积物-水界面物质交换实验获取准确的模型参数,提高模型预测分析的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 沈颜奕,陈星. 城市湖泊生态系统健康评价与修复研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):82-85+91.
- [2] 李子成,邓义祥,郑丙辉. 中国湖库营养状态现状调查分析[J]. 环境科学与技术,2012,35(S1):209-213.
- [3] Malecki L M, White J R, Reddy K R. Nitrogen and phosphorus flux rates from sediment in the lower St. Johns River estuary[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(4):15-45.
- [4] 薄涛,季民. 内源污染控制技术进展[J]. 生态环境学报,2017,26(3):514-521.
- [5] 钟继承,范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学,2007,19(1):1-10.
- [6] 单玉书,沈爱春,刘畅. 太湖底泥清淤疏浚问题探讨[J]. 中国水利,2018(23):11-13.
- [7] 原居林,沈锦玉,尹文林,等. 应用浮游植物群落结构及富营养化指数评价南太湖底泥疏浚效果[J]. 水生态学杂志,2010,31(1):14-17.
- [8] 王栋,孔繁翔,刘爱菊,等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响[J]. 湖泊科学,2005,17(3):263-268.
- [9] 徐媛,谢汝芹,卢蔚,等. 于桥水库富营养化评价及空间分布特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):1-6.

- [10] 龚春生,姚琪,范成新,等. 含内源污染平面二维水流-水质耦合模型[J]. 水利学报,2006,37(2):205-209+217.
- [11] 龚春生,姚琪,赵棣华,等. 浅水湖泊平面二维水流-水质-底泥污染模型研究[J]. 水科学进展,2006,17(4):496-501.
- [12] 窦国仁. 紊流力学[M]. 北京:人民教育出版社,1981.
- [13] 赖锡军,姜加虎,黄群,等. 鄱阳湖二维水动力和水质耦合数值模拟[J]. 湖泊科学,2011,23(6):893-902.
- [14] 谭维炎. 计算浅水动力学:有限体积法的应用[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [15] ZHAO D H, SHEN H W, TABIOS G Q, et al. Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins[J]. 1994,120(7):863-0.
- [16] 文帅龙,龚婉晴,吴涛,等. 于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量[J]. 环境科学,2018,39(5):2154-2164.
- [17] 姚重华. 废水处理计量学导论[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [18] 狄贞珍,张洪,单保庆. 太湖内源营养盐负荷状况及其对上覆水水质的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(12):3872-3882.
- [19] 吴芝瑛,虞左明,盛海燕,等. 杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应[J]. 湖泊科学,2008,20(3):277-284.
- [20] 吴芝瑛,吴洁,虞左明. 杭州西湖水生高等植物的恢复与水生生态修复[J]. 环境污染与防治,2005,27(1):38-40+46+2.
- [21] 刘洪波,朱梦玲,王精志,等. 水库水动力对水体富营养化影响[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):19-21.

(上接第52页)

- [28] ZHANG L, WANG Z. A block LU-SGS implicit dual time-stepping algorithm for hybrid dynamic meshes[J]. Computers & Fluids,2004,33(7):891-916.
- [29] 喻海军. 城市洪涝数值模拟技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- [30] 喻海军,黄国如,武传号. 双时间步法在二维浅水方程求解中的应用[J]. 水科学进展,2014,25(4):542-549.
- [31] CHEN Wenjie, HUANG Guoru, ZHANG Han, et al. Urban inundation response to rainstorm patterns with a coupled hydrodynamic model: A case study in Haidian Island, Chi-

- na[J]. Journal of Hydrology,2018,564:1022-1035.
- [32] 张明珠,麦叶鹏,孟庆强,等. 广州市东濠涌流域低影响开发措施雨洪控制效应评估[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):28-34.
- [33] 吴海春,黄国如. 基于PCSWMM模型的城市内涝风险评估[J]. 水资源保护,2016,32(5):11-16.
- [34] 张继国,谢平,龚艳冰,等. 降雨信息空间插值研究评述与展望[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(1):6-9+13.
- [35] 袁定波,艾萍,洪敏,等. 基于地理空间要素的雅砻江流域雨量估算[J]. 水科学进展,2018,29(6):779-787.