

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.002

基于分布式水文水动力耦合模型的秦淮河流域洪水模拟

王雨洁,李致家,姚成,牛颢然

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:为更准确地模拟秦淮河流域洪水演进情况,采用松散耦合方法,结合水文、水动力过程,构建了分布式水文模型与一维、二维水动力耦合模型,该模型在上游采用网格新安江模型,下游则结合一维与二维水动力模型模拟复杂水流动态,在河道采用一维模型,在主要城区采用二维模型进行模拟,形成全流域的分布式水文水动力耦合模型。验证结果表明:该模型能够有效模拟 2015—2020 年间的 5 场洪水,模拟结果的平均纳什效率系数达 0.932,验证了模型的高精度与可靠性。以 20200713 号洪水为例模拟了下游南京市城区的淹没情况,发现秦淮河下游城区多处区域(如郑淮路、凤凰东街、武定门闸区域等)存在显著淹没风险,最大淹没水深均超过 0.5 m。

关键词:水文水动力耦合模型;洪水淹没模拟;网格新安江模型;秦淮河流域

中图分类号:TV122⁺.2

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)02-0011-08

Flood simulation in the Qinhuai River Basin based on a coupled distributed hydrological and hydrodynamic model

WANG Yujie, LI Zhijia, YAO Cheng, NIU Haoran

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To more accurately simulate flood propagation in the Qinhuai River Basin, a loose coupling approach was employed to integrate hydrological processes with one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) hydrodynamic processes. A coupled distributed hydrological-hydrodynamic model was developed by combining the grid-Xin'anjiang model for upstream hydrological simulation with 1D and 2D hydrodynamic models to simulate downstream flow dynamics. Specifically, a 1D model was applied to river channels, while a 2D model was utilized to simulate flood inundation in complex urban environments. This study proposes a comprehensive distributed hydrological-hydrodynamic coupling model that effectively represents the entire basin's behavior. The results demonstrate that the model effectively simulates five flood events from 2015 to 2020, achieving an average Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient of 0.932, indicating high accuracy and reliability. As a case study, the 20200713 flood event was analyzed, revealing critical flood risks in areas such as Zhenghuai Road, Fenghuang East Street, and the Wudingmen Sluice area with maximum inundation depths exceeding 0.5 meters.

Key words: hydrological-hydrodynamic coupling model; flood inundation simulation; grid-Xin'anjiang model; the Qinhuai River Basin

秦淮河流域地处长江流域下游南京段南岸,上游区域以山地为主,水流汇集速度较快,下游河段则汇入长江,呈现感潮特性^[1-2]。此外,由于下游段设置了武定门闸和秦淮新河闸,因此该区域的河流水位还受到闸坝调度的影响。此类流域的洪水模拟对防汛工作的科学部署与有效实施具有指导意义。

集总式水文模型,如新安江模型^[3-4]、SWMM 模型^[5]等采用单位线法、马斯京根法^[6]等汇流计算方法,很

基金项目:江苏省水利科技项目(2022002);国家自然科学基金项目(52079035)

作者简介:王雨洁(1999—),女,硕士研究生,主要从事水文预报研究。E-mail:yvjiewang@foxmail.com

通信作者:李致家(1962—),男,教授,博士,主要从事水文预报研究。E-mail:zjli@hhu.edu.cn

引用本文: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.

难考虑下垫面特征要素;分布式水文模型,如 SWAT 模型^[7]、网格新安江模型^[8-9]、VIC 模型^[10-11]、TOPKAPI 模型^[12-14]等虽然考虑了下垫面的空间异质性,但在汇流计算中采用马斯京根法、运动波法、线性水库等算法,无法模拟河道水流的复杂动态和回水效应。秦淮河流域下游水流运动状态复杂,受河流上游来水与潮汐、闸门之间的相互作用的影响,采用单一水文模型无法有效应对复杂的水力条件,需要结合水动力模型才能更好地应对。

一维水动力模型适用于河道水流模拟^[15-16],二维水动力模型能捕捉洪水溢出后的横向扩散^[17-18]和城区的洪水动态,包括淹没范围和深度。二维水动力模型需对模拟区域进行网格划分,这类模型算法尽管复杂,但在小范围区域中能够精确模拟时空淹没情况。例如;Montanari 等^[19]对 Alzette 河进行降雨径流模型和一维水动力耦合模拟;De Arruda Gomes 等^[20]将水文模型、水库调度模型以及水动力模型进行串联耦合,模拟了巴西东北部 Capibaribe 流域对极端事件的水文响应;邓成等^[21]将 SWMM 模型和 LISFLOOD-FP 模型耦合,对深圳市小范围重点区域进行了城市内涝模拟。因此,将水文模型与水动力模型进行耦合以发挥各自优势,可在保证水动力模型模拟精度的同时,提升计算效率^[22]。

为更全面和精确地模拟秦淮河流域的洪水演进过程,本文将分布式水文模型与一维、二维水动力模型进行耦合,并采用了上游、下游差异化模拟的策略:上游地形以山地丘陵为主,复杂多变,采用网格新安江模型进行模拟;下游水动力特征复杂,河道部分构建一维水动力模型,模拟受潮汐、闸门影响的洪水演进过程,同时下游 704.47 km² 陆域,引入二维水动力模型进行模拟,并考虑了洪水在河道与洪泛区之间的交互情况。构建全流域模型时,综合考虑整个秦淮河流域水文水动力连续性,将上游水文模拟结果作为下游水动力模型的边界条件输入,通过这种松散耦合方式,将水文过程与一维、二维水动力过程有效集成,形成一个综合的水文水动力耦合模型。

1 研究方法

1.1 网格新安江模型

网格新安江模型将流域离散成均匀的网格单元,网格内部的土壤类型、植被分布等下垫面特征以及降雨情况一致。模型采用 3 层蒸发机制,以蓄满产流的方式计算产流过程,并充分考虑了植被冠层对降水的截留作用。随后,基于自由水蓄水库的构造原理,将水流划分为地表径流、壤中流以及地下径流。汇流计算采用逐网格的马斯京根法将各水源演算至流域出口^[23]。通过 DEM 数据提取地形数据并获得网格演算次序。本文以前埠村(秦)水文站作为分界点将秦淮河流域分为上、下游,其中上游部分采用网格新安江模型模拟。

1.2 一维水动力模型

一维水动力模型基于一维非恒定圣维南方程组求解:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B_T \frac{\partial Z}{\partial t} = q_L \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = q_L \left(v_x - \frac{Q}{A} \right) \quad (2)$$

式中: x 为流程; t 为时间; Q 为流量; Z 为水位; B_T 为调蓄宽度; q_L 为旁侧入流; α 为动量校正系数; A 为过水断面面积; g 为重力加速度; K 为流量模数; v_x 为旁侧入流沿水流方向的速度分量。

采用 Preissmann 四点隐式差分格式对式(1)(2)进行离散^[24],得到任意断面 j 及断面 $j+1$ 间的差分方程:

$$\begin{cases} Q_{j+1} - Q_j + C_j Z_{j+1} + C_j Z_j = D_j \\ E_j Q_j + G_j Q_{j+1} + F_j Z_{j+1} - F_j Z_j = \varphi_j \end{cases} \quad (3)$$

式中 C_j 、 D_j 、 E_j 、 G_j 、 F_j 、 φ_j 均为系数,由初值推求。

秦淮河下游水系呈树状,采用双追赶法计算。假定 $C1$ 、 $C1+1$ 、 \dots 、 $C2$ 为河道断面编号,则该河道有 $C2-C1$ 个河段,有 $2(C2-C1+1)$ 个未知变量,以河道的首、末断面水位 Z_{C1} 和 Z_{C2} 为基本未知量,令

$$Q_j = \alpha_j + \beta_j Z_j + \zeta_j Z_{C2} \quad (4)$$

式中 α_j 、 β_j 、 ζ_j 为系数。则首、末断面流量分别为

$$\begin{cases} Q_{C1} = \alpha_{C1} + \beta_{C1} Z_{C1} + \zeta_{C1} Z_{C2} \\ Q_{C2} = \theta_{C2} + \eta_{C2} Z_{C2} + \gamma_{C2} Z_{C1} \end{cases} \quad (5)$$

任意中间断面水位 Z_j 为

$$Z_j = \frac{\theta_j - \alpha_j + \gamma_j Z_{C1} - \zeta_j Z_{C2}}{\beta_j - \eta_j} \quad (j = C1 + 1, \dots, C2 - 1) \quad (6)$$

式中系数 $\alpha_j, \beta_j, \zeta_j, \theta_j, \gamma_j, \eta_j$ 可由式(3)系数推求。求得首、末节点水位后,代入式(6)后得 Z_j ,再代入式(4)可得断面流量 Q_j 。

河网水系存在诸多节点,需要依据水量平衡方程,构建节点水位方程:

$$\sum_{k=1}^m Q_{ik} = A_i \frac{\Delta Z_i}{\Delta t} \quad (7)$$

式中: Q_{ik} 为汇入节点 i 的河道 k 流量; m 为汇入节点 i 的河道总数; A_i 为节点 i 的蓄水面积; Z_i 为节点 i 的水位。将式(5)代入式(7)可得节点 i 的水位 Z_i , 以及与节点 i 相邻的所有节点水位 $Z_n (n=1, 2, \dots, m)$, 可构建未知变量为 Z_i 和 Z_n 的方程。将所有节点水位方程联立,通过松弛迭代法求解。

1.3 二维水动力模型

二维水动力模型控制方程为二维浅水方程^[25],其矢量表达式如下:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} = \mathbf{b} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2 h + \frac{gh^2}{2} \\ uwh \end{bmatrix} \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} vh \\ uwh \\ v^2 h + \frac{gh^2}{2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} q_w \\ gh(s_{0x} - s_{fx}) + q_w u \\ gh(s_{0y} - s_{fy}) + q_w v \end{bmatrix}$$

式中: \mathbf{q} 为变量矢量; \mathbf{f}, \mathbf{g} 分别为 x, y 方向上的通量矢量; \mathbf{b} 为源汇项; q_w 为净雨深; s_{0x}, s_{0y} 为底坡源项; s_{fx}, s_{fy} 为摩阻力源项; h 为水深; u 为 x 方向上的流速分量; v 为 y 向流速分量。

采用有限体积法对式(8)进行离散:

$$\iint_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} d\omega = - \int_{\partial\Omega} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dL + \iint_{\Omega} \mathbf{b} d\omega \quad (9)$$

其中 $\mathbf{F} = [\mathbf{f}, \mathbf{g}]^T$
式中: \mathbf{n} 为 $\partial\Omega$ 的外法向单位向量; $d\omega, dL$ 分别为面积分和线积分微元。

单元均值 \mathbf{q} 为一阶精度,将其假定为常数,式(9)可离散为

$$S \frac{d\mathbf{q}}{dt} = - \sum_{\alpha=1}^{\beta} \mathbf{F}_{n\alpha} L_{\alpha} + \mathbf{b}_* \quad (10)$$

其中 $\mathbf{F}_{n\alpha} = \cos\Phi \mathbf{f} + \sin\Phi \mathbf{g}$

式中: \mathbf{b}_* 为离散化后的源汇项; S 为 Ω 的面积; β 为单元的所有边界总数; L_{α} 为第 α 单元边的长度; $\mathbf{F}_{n\alpha}$ 为第 α 单元边法向通量,下文记为 \mathbf{F}_n ; Φ 为法向通量 \mathbf{n} 与 x 轴的夹角。

\mathbf{f}, \mathbf{g} 具有坐标变换旋转不变性:

$$\mathbf{T}(\Phi) \mathbf{F}_n = \mathbf{f}[\mathbf{T}(\Phi) \mathbf{q}] = \mathbf{f}(\bar{\mathbf{q}}) \quad (11)$$

式中 $\mathbf{T}(\Phi)$ 为坐标变换矩阵,表示将坐标系旋转角度 Φ 。

综上,二维问题转换为一系列局部一维问题求解。两邻近格点有存在 \mathbf{q} 差异的可能性,因此公共边可能存在不连续,本文采用 osher 格式对通量 $\mathbf{f}(\bar{\mathbf{q}})$ 进行数值求解,以达到解二维浅水方程的目的。

1.4 一维、二维水动力模型耦合

一维河道水动力与二维陆面网格之间存在流量交换,本文将一维、二维交互处假设为一个宽顶堰,交互

问题简化为堰流模型求解。如图1所示,当河道水位高于虚设堰顶以及陆面网格时,水流将从河道流经虚设堰顶,漫向陆面网格,反之则是陆面网格流向河道。河道水位和对应断面交互网格水位高程两者中至少有一个大于虚设堰顶时,会发生一维、二维水动力模型间的水量交互。

宽顶堰过闸流量(Q_z)为

$$Q_z = \delta \varepsilon m_z b_z \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

式中: δ 为堰流淹没系数; ε 为堰流侧收缩系数; m_z 为流量系数; b_z 为闸孔总净宽; H 为宽顶堰闸上水头。

本文将过渡面处虚设堰产生的水位流量作为一维水动力模型和二维水动力模型的额外流量边界,一维水动力模型作为旁侧入流处理。如图2所示,在交互河段虚设与上游断面 C_j 形状、初始条件一致的且间距为0的新断面 $C_{j'}$,在 $C_{j'}$ 处集中旁侧入流(Q_t)汇入。

断面 j' 处的连接方程为

$$\begin{cases} Z_j = Z_{j'} \\ Q_j + Q_t = Q_{j'} \end{cases} \quad (13)$$

二维水动力模型的时间步长通常与一维水动力模型不同,二维的时间步长通常以秒为单位,一维则选择以小时为步长,一维、二维耦合模型计算选取二者时间步长较小者进行统一计算。

2 研究区域及研究数据

秦淮河流域位于长江南京段南岸,是长江下游的一条支流,流域面积 $2\,631\text{ km}^2$,呈蒲扇形状,长宽各约 50 km 。流域地形以丘陵山区为主,占 80% ,低洼圩区占 20% 。秦淮河上游有溧水河、句容河两源,汇合于江宁区西北村后北流过东山镇、上坊门入南京市。河流总长 110 km ,共有 16 条支流,其中句容河、溧水河流域面积最大,占全流域面积的 74% 。气候属北亚热带季风性气候,四季分明,雨水充沛,常年季风盛行,夏季盛行东南风,冬季盛行西北风^[26]。多年平均降水量为 $1\,026.4\text{ mm}$,年际和季节间降水差异较大,常有连日阴雨。上游地势较高,水流迅速,形成山头;而到达下游平原或低洼地区时,地势较低,水流缓慢,形成潮水,在地貌上呈现出头高尾低的形态。上游地貌以山区为主,汇流迅速;下游汇入长江,形成感潮河段,既受到上游洪水的冲击,又受到潮位的制约。此外,下游河段还受到武定门闸和秦淮新河闸的闸坝调度影响,进一步增加了流域水情的复杂性。秦淮河流域概况如图3所示。

本文整理了2015—2020年的秦淮河流域日降水数据、日蒸发数据,11场洪水的时段降水以及前埠村(秦)站径流量资料,东山镇、秦淮新河闸、武定门闸逐时水位资料,秦淮河流域下游部分89个断面实测流量。南京市潜在淹没区数据集(2020年),来自国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。

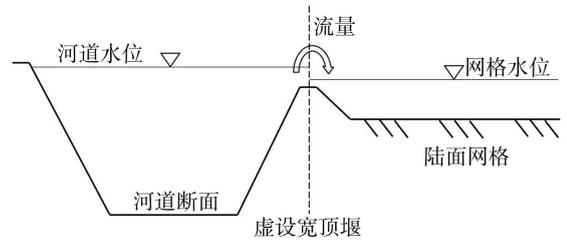


图1 一维、二维水动力模型水流交互示意图

Fig.1 Schematic diagram of water flow interaction between one- and two-dimensional hydrodynamics models

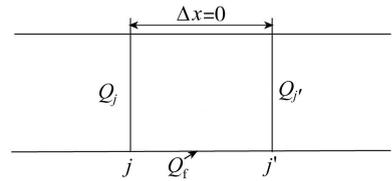


图2 旁侧入流处理方法

Fig.2 Treatment method for lateral inflow

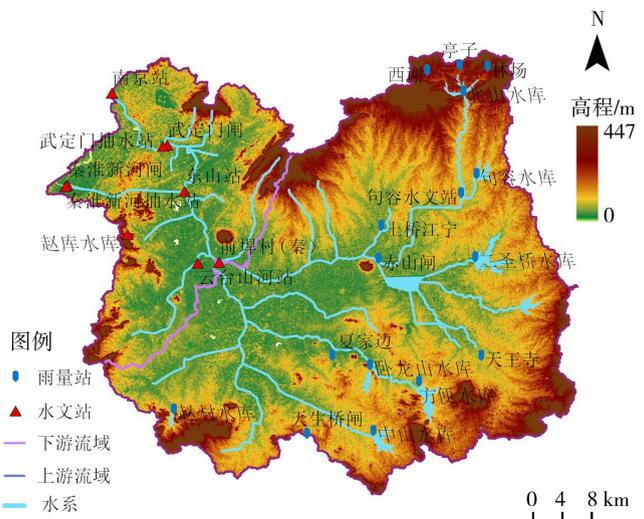


图3 秦淮河流域概况

Fig.3 Overview of Qinhuai River Basin

3 模型构建与模拟结果分析

3.1 网格新安江模型

以前埠村(秦)站为分界点,上游区域构建网格新安江模型,DEM 网格大小 1 km×1 km,以洪号 20150602 至洪号 20200627 共计 10 场洪水为率定期,洪号 20200713 共计 1 场洪水用于验证。模型敏感参数率定结果如下:蒸散发折算系数(k)取 1,地下水消退系数(CG)取 0.9,壤中流消退系数(CI)取 0.85,地表水消退系数取 0.9,河网消退系数(CS-HM)取 0.98,上层张力水容量占比(LUM)取 0.16,下层张力水容量占比(LLM)取 0.5,模拟结果见表 1。

表 1 模拟结果特征值统计

Table 1 Statistical characteristics of simulation results

洪号	径流深			洪峰流量		
	实测值/mm	计算值/mm	相对误差/%	实测值/(m ³ /s)	模拟值/(m ³ /s)	相对误差/%
20150602	65.0	83.6	28.5	695	659	-5.2
20150614	109.5	91.8	-16.2	939	923	-1.7
20150623	236.3	278.8	18.0	939	688	-26.7
20160701	329.6	378.1	14.7	1200	1230	2.5
20170609	92.7	111.2	19.9	976	881	-9.7
20170923	58.9	64.7	10.0	577	535	-7.3
20180705	61.3	71.8	17.1	451	424	-6.0
20180815	58.5	71.5	22.2	659	708	7.4
20200612	88.2	97.0	10.0	724	701	-3.2
20200627	59.0	57.8	-2.0	562	660	17.4
20200713	133.8	121.9	-8.8	688	649	-5.7

由表 1 可知,前埠村(秦)站以上流域率定期 10 场洪水径流深合格率达 82%,洪峰流量合格率达 90%;验证期 1 场洪水,径流深与洪峰合格率均达 100%。根据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,率定期与验证期 11 场洪水径流深合格率达乙等预报精度要求,洪峰合格率达甲等预报精度要求,平均合格率达乙等精度。综上,网格新安江模型模拟的前埠村(秦)站径流过程可作为一维、二维耦合水动力模型的上边界条件。

3.2 一维、二维耦合水动力模型

在前埠村(秦)站以下流域构建水动力模型,一维水动力模型以前埠村(秦)站以下秦淮河、秦淮新河、云台山河和牛首山河为建模范围,设 89 个计算断面,并将其概化为梯形,秦淮河干流糙率取 0.024,秦淮新河取 0.022,其余支流取 0.021,以网格新安江的模拟的径流过程为上边界流量过程,此外还包括牛首山河、云台山河两个上边界,以流域出口南京站、下三关站潮位作为下边界。下游水系建有秦淮新河闸、武定门闸两个闸门,根据不同调度情况分为关闸、自由出流和淹没出流 3 种情况。同时考虑百家湖和九龙湖的调蓄作用,河网概化如图 4 所示。

二维水动力模型以下游流域城区部分为建模范围,总计 704.47 km²,剖分为边长为 100 m 左右的非结构化三角网格,总计 126241 个网格。网格糙率根据中国年度土地覆盖数据集(annual China land cover dataset, CLCD)2015 年的土地覆盖类型数据赋予对应的数值,下游土地覆盖情况如图 5。具体取值规则如下:农田的糙率取 0.08,森林取 0.8,草地取 0.05 水面取 0.025,裸地取 0.04,不透水层取 0.025。净雨量采用反距离加权法计算,初渗参数与稳渗参数设为 0,在闸门处设置一个二维交互节点。

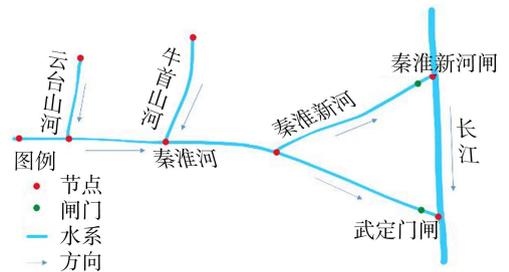


图 4 秦淮河下游水系概化图

Fig. 4 Schematic diagram of the downstream water system of Qinhuai River

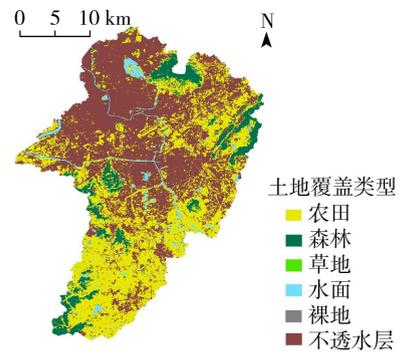


图 5 下游流域土地覆盖类型

Fig. 5 Land cover types of downstream

东电站位于秦淮新河和老秦淮河交汇处,是干流防洪代表站之一,其水位是整个水系防洪调度的主要依据之一,以一维、二维耦合水动力模型模拟该站所在57号断面5场洪水的水位过程,结果如图6和表2所示。

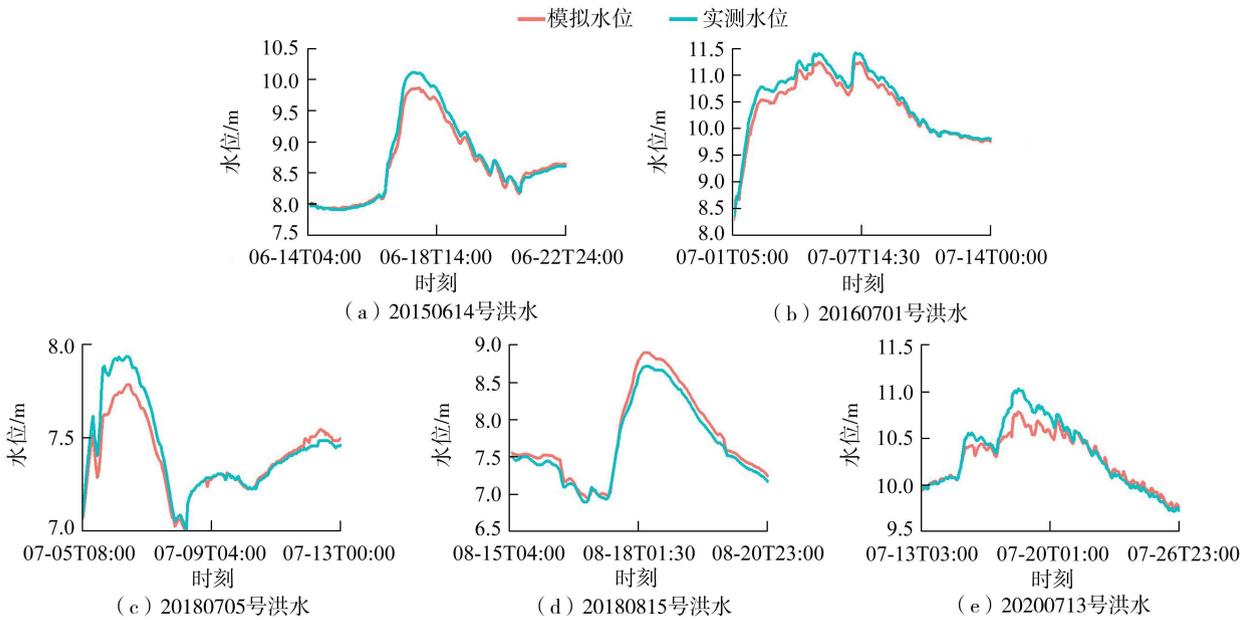


图6 东电站水位过程线

Fig. 6 Water level process at Dongshan station

一维、二维耦合水动力模型模拟的5场洪水过程洪峰水深相对误差均小于3%,其中20150614、20160701、20180705、20200713洪水洪峰水位均低于实测水位,洪号20180815模拟洪峰水位则高于实测洪峰。洪峰水深误差会受到水文模型模拟误差影响,因此其与前埠村(秦)站模拟洪峰流量误差趋势一致。5场洪峰水位平均纳什效率系数可达0.932,水位模拟过程与实际过程吻合较好,因此可在一定程度上保证本文模型的淹没模拟精度。

表2 东电站洪峰水深模拟结果

Table 2 Simulation results of peak flood depth at Dongshan station

洪号	模拟洪峰水深/m	实测洪峰水深/m	相对误差/%	纳什效率系数
20150614	8.18	8.42	-2.85	0.971
20160701	9.55	9.71	-1.65	0.949
20180705	6.09	6.24	-2.40	0.870
20180815	7.20	7.02	2.56	0.968
20200713	9.09	9.34	-2.68	0.901

20200713号洪水当年造成洪水橙色预警,模拟时间从2020年7月13号0:00至7月26日23:00,共计336个时段,该场次洪水东电站水位过程如图6(e)所示。实测径流深133.8mm,洪峰水位11.04m,峰现时间7月18日7:00即第128个时段,对其进行淹没分析。对126241个网格的水深进行统计可知,网格最大水深出现时刻集中在第102至106小时,即7月17号7:00至7月17日13:00;网格最大水深出现时刻均值为第132小时,即7月18号12:00,由于城区部分所占比重远超河道周边陆域,城区网格水深变化主要受降水的时空变化影响,因此网格最大水深出现时刻集中在第102至106小时。

由于河道水量交互影响,河道周围陆域部分网格会出现网格水量不断上涨的情况,此类网格最大水深出现时刻常在洪水末期。以位于秦淮新河闸上游右岸的3473号网格为例,如图7所示,网格水深从7月14日7:00(第30小时)的0.015m增长至7月15日13:00(第60小时)的0.30m,随后至7月19日14:00(第160小时)达0.69m后增速放缓,最终淹没水深达最大程度为0.78m。

下游水系7月26日23:00(第336小时)淹没范围如图8所示,秦淮河下游流域城区地势低洼处淹没明显,其

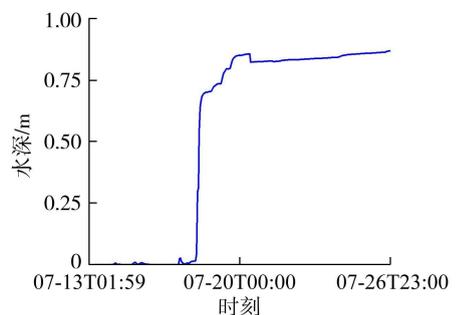


图7 3473号网格水深过程线

Fig. 7 Water depth process line of Grid No. 3473

中多处网格水深超 0.8 m,部分为实际水体,如莫愁湖、南湖等,另有异常值可能因高程均化误差引起。由于本文研究区域较大,对河道周围陆域采用分区分析:①区域 1 距秦淮河入江口 1.7 km 处,郑淮路、龙园东路、凤凰东街均发生淹没,其中郑淮路和凤凰东街沿岸大部分都出现了 0.60 m 以上的淹没情况,河岸最大淹没水深 0.69 m,洪水向城区漫延最大水深达 0.53 m;②区域 2 为老秦淮河武定门闸河段,左岸最大淹没水深 0.67 m,城区水深达 0.54 m,石杨路段水系状况复杂,多条支流在此交汇,易发生淹没;③区域 3 距秦淮新河入江口 5 km 处,即秦淮新河闸上下游范围内均有淹没发生,主要发生在西林北路、河滨南路、新河街,河岸最大淹没水深达 0.78 m;④区域 4 为与秦淮新河段距东山站 1.5 km 处,淹没发生在秦淮河大桥下游秦淮路部分,河岸最大淹没水深达 0.91 m,此部分河段右岸的滨水绿地公园,最大淹没水深 0.67 m。该区域为洪水提供了一定程度的拦截和蓄水作用,有效减缓了洪水对城市的冲击。

除重点分析的 4 个区域外,图 8 中的呈红色区域即模拟水深大于 0.60 m 的区域,均存在较高的淹没风险,主要集中于河道沿线及低洼地带,与下游南京市潜在淹没区范围(图 9)高度一致,说明本文模型的预测效果较为准确。例如,从前埠村(秦)站至东山站的河段,以及老秦淮河段的淹没范围,均在潜在淹没区内,这些区域易受洪水威胁,应为秦淮河下游的关键防汛区。为了提升这些重点防汛区域的抗洪能力,建议加固河岸堤坝以增强其防洪结构。同时,需要加强城区排水管网的建设与优化。借鉴滨水绿地公园的概念,通过建设相似设施,提高城市易涝区的洪水缓解能力,进而优化整体城市防洪体系,以降低洪涝事件对城区的潜在风险。

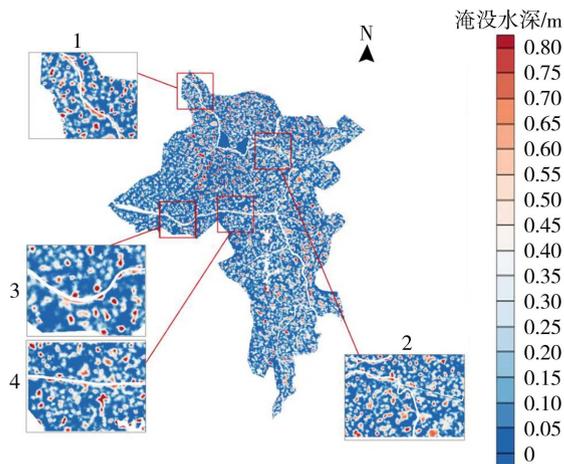


图 8 20200713 号洪水第 336 小时的淹没范围

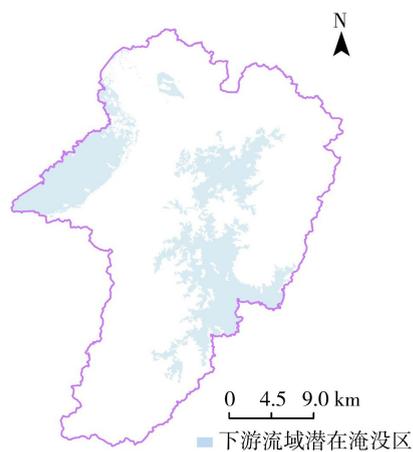


图 9 下游潜在淹没区

Fig. 8 Inundation area at 336th hour of the NO. 20200713 Flood Fig. 9 Potential inundation areas in the downstream

4 结 论

a. 构建的一维、二维耦合水动力模型模拟的 5 场洪水水位过程纳什效率系数平均达 0.932,具有较高的计算精度,在保证计算精度的同时,将上游山区的分布式水文模型结果作为输入,有效降低了计算压力,同时考虑了人工建筑物(如闸门等设施)的调控以及水力情况的复杂性。

b. 对 20200713 号洪水的淹没模拟表明,秦淮河下游城区多处区域(如郑淮路、凤凰东街、武定门闸区域等)存在显著淹没风险,最大淹没水深均超过 0.5 m。

c. 通过差异化模拟策略,耦合水文及水动力模型,相较于全流域水动力模型极大地缩短了模型响应时间,提升了响应速度。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 张轩,张行南,江唯佳,等. 秦淮河流域东山站水位预报研究[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 41-46. (ZHANG Xuan, ZHANG

- Xingnan,JIANG Weijia, et al. Study on water level forecast of Dongshan Station in Qinhuai River Basin[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):41-46. (in Chinese))
- [3] 龚珺夫,陈红兵,朱芳,等. 新安江模型在资料匮乏的长江中下游山区中小流域洪水预报应用[J]. 湖泊科学,2021,33(2):581-594. (GONG Junfu, CHEN Hongbing, ZHU Fang, et al. Application of Xin'anjiang Model in the flow prediction of ungauged small-and medium-sized catchments in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(2):581-594. (in Chinese))
- [4] 孙明坤,李致家,刘志雨,等. WRF-Hydro 模型与新安江模型在陈河流域的应用对比[J]. 湖泊科学,2020,32(3):850-864. (SUN Mingkun, LI Zhijia, LIU Zhiyu, et al. Application of WRF-Hydro modeling system in Chenhe Basin and comparison with Xin'anjiang model[J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(3):850-864. (in Chinese))
- [5] WANG T,ZHANG L L,ZHAI J Q, et al. Automatic calibration of SWMM parameters based on multi-objective optimisation model [J]. Journal of Hydroinformatics,2024,26(3):683-706.
- [6] 李致家,何蒙,闫凤翔,等. 河道洪水演算方法在淮河及滹沱河中游的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):95-101. (LI Zhijia, HE Meng, YAN Fengxiang, et al. Applications of channel flood routing methods in middle part of Huaihe River and Hutuo River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(2):95-101. (in Chinese))
- [7] 刘永伟,王文,刘元波,等. 基于 EnKF 法的径流数据同化对 SWAT 模型参数优化效果评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):1-10. (LIU Yongwei, WANG Wen, LIU Yuanbo, et al. Evaluation of the optimization effect of streamflow data assimilation on SWAT model parameters based on the EnKF approach[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(2):1-10. (in Chinese))
- [8] 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 a grid-based Xin'anjiang Model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2007,35(2):131-134. (in Chinese))
- [9] 姚成,李致家,张珂,等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on Grid-Xin'anjiang Model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):19-25. (in Chinese))
- [10] 邓鹏,黄鹏年. 基于 VIC 模型的淮河中上游地区水量空间分布研究[J]. 水电能源科学,2018,36(2):28-31. (DENG Peng, HUANG Pengnian. Water spatial distribution of upper reaches area of Huaihe River based on VIC model[J]. Water Resources and Power,2018,36(2):28-31. (in Chinese))
- [11] 吴志勇,郑宁,冒云,等. 基于 VIC 模型和地貌单位线的中小水库入库预报研究[J]. 水电能源科学,2017,35(10):21-24. (WU Zhiyong, ZHENG Ning, MAO Yun, et al. Inflow forecast for small and medium-sized reservoirs based on VIC and geomorphologic instantaneous unit hydrograph[J]. Water Resources and Power,2017,35(10):21-24. (in Chinese))
- [12] 李致家,王秀庆,吕雁翔,等. TOPKAPI 模型的应用及与新安江模型的比较研究[J]. 水力发电,2013,39(11):6-10. (LI Zhijia, WANG Xiuqing, LYU Yanxiang, et al. Application of TOPKAPI model and comparison with Xin'anjiang Model[J]. Water Power,2013,39(11):6-10. (in Chinese))
- [13] 刘玉环,李致家,刘志雨,等. 半湿润半干旱地区 TOPKAPI 模型的洪水模拟[J]. 水力发电,2016,42(1):18-22. (LIU Yuhuan, LI Zhijia, LIU Zhiyu, et al. TOPKAPI-based flood simulation in semi-humid and semi-arid regions[J]. Water Power,2016,42(1):18-22. (in Chinese))
- [14] 汤岭,王海军,李致家,等. 代理模型参数率定方法在 TOPKAPI 模型中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):21-28. (TANG Ling, WANG Haijun, LI Zhijia, et al. Application of surrogate modeling parameter calibration method in TOPKAPI model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(1):21-28. (in Chinese))
- [15] 向小华,吴晓玲,牛帅,等. 基于显式有限体积法的一维河网模型[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):6-9. (XIANG Xiaohua, WU Xiaoling, NIU Shuai, et al. Construction of one-dimensional river network model based on explicit finite volume method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(4):6-9. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):528-533. (in Chinese))

International Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 3(3): 353-359

- [11] BIERBAUMER A. Die dimensionierung des tunnelmauerwerks[M]. Leipzig: Engelmann, 1913.
- [12] 申政, 闵凡路, 柏煜新, 等. 砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 158-166. (SHEN Zheng, MIN Fanlu, BAI Yuxin, et al. Numerical simulation of passive failure of underwater shield tunnel excavation face in sandy soil layer[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 158-166. (in Chinese))
- [13] 耿哲, 袁大军, 金大龙, 等. 考虑松动区渐进破坏的隧道松动土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(8): 1754-1762. (GENG Zhe, YUAN Dajun, JIN Dalong, et al. Loose earth pressure of tunnels considering progressive failure of loosen zone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1754-1762. (in Chinese))
- [14] 张晓清. 深埋盾构隧道开挖面失稳机制及土压力分布模式研究[D]. 上海: 上海大学, 2018
- [15] 张孟喜, 戴治恒, 张晓清, 等. 考虑主应力轴偏转的深埋盾构隧道开挖面主动极限支护压力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2366-2376. (ZHANG Mengxi, DAI Zhiheng, ZHANG Xiaoqing, et al. A calculation method of active limit support pressure for deep shield tunnels considering principal stress axis rotation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2366-2376. (in Chinese))
- [16] 林庆涛. 空间土拱效应原理的研究与应用[D]. 北京: 北方工业大学, 2016
- [17] ADACHI T, KIMURA M, KISHIDA K. Experimental study on the distribution of earth pressure and surface settlement through three-dimensional trapdoor tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18: (2/3) 171-183.
- [18] 黎春林. 盾构开挖面三维曲面体破坏模型及支护力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2092-2102. (LI Chunlin. Curved solid failure model and calculation method of supporting pressure for shield tunnel excavation face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2092-2102. (in Chinese))
- [19] CHEN R P, TANG L J, YIN X S, et al. An improved 3D wedge-prism model for the face stability analysis of the shield tunnel in cohesionless soils[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(5): 683-692.

(收稿日期: 2024-04-16 编辑: 熊水斌)

(上接第18页)

- [18] 姚斯洋, 林妙丽, 陈诚, 等. 拟建鄱阳湖水利枢纽对湖区水环境容量的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 200-207. (YAO Siyang, LIN Miaoli, CHEN Cheng, et al. Impact of the scheduled Poyang Lake Hydraulic Project on water environment capacity in lake district[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 200-207. (in Chinese))
- [19] MONTANARI M, HOSTACHE R, MATGEN P, et al. Calibration and sequential updating of a coupled hydrologic-hydraulic model using remote sensing-derived water stages[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(3): 367-380.
- [20] DE ARRUDA GOMES M M, DE MELO VERÇOSA L F, CIRILO J A. Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation[J]. Natural Hazards, 2021, 108(3): 3121-3157.
- [21] 邓成, 夏军, 余敦先, 等. 基于水文水动力耦合模型的深圳市典型区域城市内涝模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(8): 912-921. (DENG Cheng, XIA Jun, SHE Dunxian, et al. Urban waterlogging simulation in a typical area in Shenzhen based on hydrological-hydrodynamic coupling model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(8): 912-921. (in Chinese))
- [22] 张婷, 徐彬鑫, 康爱卿, 等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 11-19. (ZHANG Ting, XU Binxin, KANG Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 11-19. (in Chinese))
- [23] 李致家, 姚成, 章玉霞, 等. 栅格型新安江模型的研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(2): 25-34. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Yuxia, et al. Study on Grid-Based Xin'anjiang Model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(2): 25-34. (in Chinese))
- [24] 胡庆云, 王船海. 圣维南方程组4点线性隐格式的稳定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 397-401. (HU Qingyun, WANG Chuanhai. Stability analysis of four-point linear implicit scheme of Saint-Venant equations[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(4): 397-401. (in Chinese))
- [25] 邹长军, 尹勇, 李海江, 等. 偏微分方程数值计算在虚拟现实中的应用与研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(8): 164-169. (ZOU Changjun, YIN Yong, LI Haijiang, et al. Application and research of numerical calculation of partial differential equations in virtual reality[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(8): 164-169. (in Chinese))
- [26] 王建群, 张显扬, 卢志华. 秦淮河流域数字水文模型及其应用[J]. 水利学报, 2004, 35(4): 42-47. (WANG Jianqun, ZHANG Xianyang, LU Zhihua. Digital hydrological model of Qinhuai River Basin and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(4): 42-47. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-05-17 编辑: 刘晓艳)