

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.03.010

# 基于太湖流域模型的城市内涝过程高效模拟

王船海<sup>1,2</sup>, 郑世威<sup>1,2</sup>, 李小宁<sup>1,2</sup>, 陈凯<sup>3</sup>, 翟月<sup>3</sup>, 华晨<sup>4</sup>, 汪姗<sup>4</sup>, 陈钢<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;  
3. 南京慧水软件科技有限公司, 江苏 南京 210036; 4. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213022)

**摘要:** 城市内涝的高效模拟对于降低内涝灾害影响、制定防灾减灾措施具有极其重要的意义。本文提出了基于雨篦子耦合地表与管网的城市降雨-产汇流-内涝全过程高效模拟方法, 结合常州市双桥浜城市产汇流与内涝试验基地监测数据, 分别构建了基于高效模拟算法和二维水动力算法的城市内涝模型。根据监测数据对所构建的模型进行了率定与验证, 并分析对比了2种算法在不同降雨事件中的精度与可靠性。结果表明: 太湖流域模型中基于雨篦子的城市水文特征单元高效模拟方法能够较为真实地反映城市内涝的具体特征, 且在模型参数一致的前提下, 其计算效率约为二维水动力算法的780~1275倍, 能够对城市内涝情况进行快速模拟。

**关键词:** 城市内涝; 太湖流域模型; 汇水单元; 高效模拟; 试验监测

**中图分类号:** TV124; P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2022)03-0462-12

随着城镇化快速推进, 目前中国已全面形成了“两横三纵”城镇化战略格局, 布局了19个国家级城市群, 预计到2025年中国城镇化人口比例达到65%<sup>[1]</sup>。高度城镇化地区水文特征单元众多, 河流水系水文、水动力条件复杂, 河流水系连通工程、防洪排涝工程调度等人类活动影响强烈, 诸多问题交织导致内涝模拟的难度极大。因此, 建立高效、准确、稳定的城市内涝模型对于确定内涝风险、采取调控措施、降低灾害损失具有重要的意义<sup>[2-4]</sup>。

城市内涝模拟方法主要包括水文学方法、水动力学方法和水文-水动力耦合的方法3大类<sup>[5-6]</sup>。国内外研究者根据实测降雨—径流数据比较了水文学方法, 发现城市雨水地表汇流模型的非线性水库法最优<sup>[7-8]</sup>, 然而其只能计算研究区域的出流流量而未能模拟内涝积水分布的具体过程; 水动力学方法主要通过求解二维浅水方程组模拟地表漫流以及通过一维圣维南方程求解管道流量来模拟城市内涝情况<sup>[9]</sup>, 受计算效率限制在较大区域城市的内涝模拟中应用较少; 水文-水动力耦合模型采用水文学方法计算子汇水区的产汇流, 采用水动力学方法计算管网汇流和地表漫流, 该方法主要通过泰森多边形划分子汇水区, 难以描述子汇水区的非均匀性, 多用于模拟雨水井冒水时的内涝情况而忽视了道路行洪现象, 也难以模拟内涝发生的全过程<sup>[10]</sup>。

在城市内涝水文学模拟方法上, 国内外研究者主要基于数字高程模型(DEM)提出计算积水淹没范围的不同方法。Chen等<sup>[11]</sup>结合降雨—产流模块和基于地理信息系统(GIS)的内涝模块来模拟城市内涝, 但GUFIM模型未能模拟管网汇流过程, 而是将产流量直接作为内涝模块的输入条件来模拟内涝分布; Thyrsoe等<sup>[12]</sup>开发了基于GIS计算生成积水淹没路径的城市内涝灾害评估模型FloodStroem, 相较于MIKE Flood, 模型低估了上游内涝而高估了下游内涝情况。城市内涝水文学模拟方法在模拟内涝出现、扩散以及消退过程中存在缺陷, 很难模拟内涝的全过程。基于二维浅水方程组的地表漫流水动力模型主要包括LISFLOOD-FP、CityCAT、HiPMS以及FullSWOF\_2D等<sup>[9,13-15]</sup>。这些模型通过求解二维浅水方程组的完整或者简化形式来描

收稿日期: 2021-12-27; 网络出版日期: 2022-05-19

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220518.1358.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3000104); 国家自然科学基金资助项目(U2040209)

作者简介: 王船海(1963—), 男, 江苏南通人, 教授, 主要从事数字流域理论方法与系统开发方面研究。

E-mail: chwang@hhu.edu.cn

通信作者: 陈钢, E-mail: gangchen@hhu.edu.cn

述径流在地表上的分布和运动情况, 对 DEM 的精度以及计算成本要求很高。

从 20 世纪 60 年代开始, 发达国家就开始了水文-水动力耦合的城市内涝模型开发, 常见的城市内涝模型主要包括美国环保部开发的都市雨水管理模型 SWMM (Storm Water Management Model) 及其二次开发模型<sup>[16]</sup>。例如, 国外常用模型 PCSWMM、InfoWorks ICM、MIKE Flood<sup>[17-18]</sup> 和国内自主开发的 DigitalWater、IFMS Urban 及 IHUM<sup>[19-21]</sup> 等。黄国如等<sup>[21]</sup> 以 SWMM 模型与自主研发的二维模型为基础, 提出通过水平和垂直方向连接构建的水文-水动力耦合模型, 并将模拟结果与 InfoWorks ICM 进行了比较; Ma 等<sup>[22]</sup> 通过 SWMM 模型参数的实时校正实现了城市内涝的动态模拟; 王兆礼等<sup>[23]</sup> 基于 SWMM 和 TELEMAC-2D 模型构建一种新的耦合模型 TSWM, 在复杂城区内涝模拟方面具有良好的适用性和较高的模拟精度; Leandro 和 Martins<sup>[24]</sup> 应用 DLL 方法耦合了二维地表漫流模型 P-DWAVE 和一维管网模型 SWMM, 实现水文-水动力模型的耦合。模型的时效性和精细度是评估模型适用性的 2 个标准, 然而这 2 个标准往往相互冲突<sup>[25]</sup>。SWMM 模型在子汇水区概化的过程中往往忽视真实的地形情况以及子汇区内下垫面的非均匀性而增大模型的不确定性; 模型中未能实现管网、河道与地面的耦合因而不具备模拟城市内涝全过程的能力, 目前主要用于城市管网排水能力评估和模拟由于管道排水能力不足引起的雨水井冒水而导致城市内涝的情况。

本文基于太湖流域模型中的高效模拟算法和二维水动力算法建立试验基地城市内涝模型, 并根据监测数据对模型进行率定和验证; 通过深入分析试验基地降雨事件下内涝模拟的精度与可靠性, 对城市内涝高效模拟方法的适用性进行评估。

## 1 模型原理

太湖流域模型是以太湖流域为原型案例构建的一个从山丘区到平原区的多要素、多尺度、多过程的完整水循环精细化模型<sup>[26-30]</sup>, 历经 40 多年的开发研制, 已形成完整的模型理论与架构体系, 是完全自主研发的, 能解决不同复杂下垫面水循环、水质、泥沙问题的一体化模型软件。太湖流域模型提出了分布式架构体系与水文特征单元的新概念, 将流域内产汇流机理相同的区域分别概化为山丘区子流域及坡面单元、山丘区河道单元、平原区坡面单元、平原区河道单元、闸坝工程单元等<sup>[31]</sup>, 针对每类水文特征单元采用最合适的模型算法进行模拟, 对各种类型水文特征单元进行耦合, 使其能够成为一个完整的模型体系。

### 1.1 城市水文特征单元概化

由于受到道路与建筑的阻隔, 城市内涝主要呈现斑块化、局域化的特点, 太湖流域模型中以雨篦子为核心构建排水管网水动力模型体系。如图 1 所示, 研究区域结合 DEM 与雨篦子分布情况进行汇水区划分, 每个汇水区作为一个基本单元, 包括区域产流单元、调蓄单元、雨篦子、管道等要素。在产流阶段按照水体、

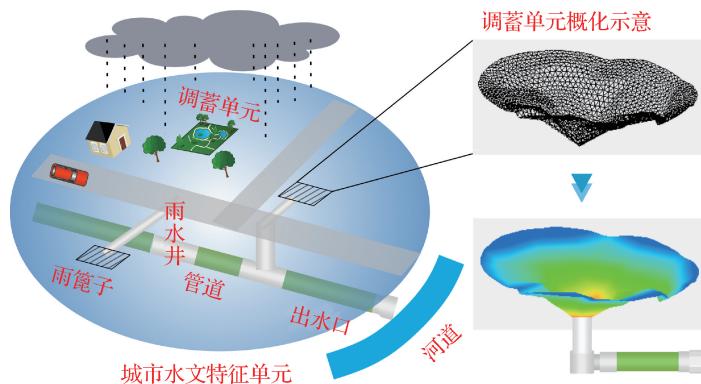


图 1 基于雨篦子的城市水文特征单元概化

Fig. 1 Conceptualization of urban hydrologic unit based on grate inlet

绿地、建筑以及道路和广场 4 种下垫面类型进行产流模拟,采用单位线方法模拟城市水文特征单元内的汇流过程,径流经过坡面汇流过程后通过雨篦子进入管道,进而流向下游管道或河道。

## 1.2 城市内涝模拟

与 SWMM 模型不同,太湖流域模型中根据地形将调蓄单元概化为蓄水面积随水位变化的节点,因此,可以根据调蓄单元内的水位计算积水淹没深度和空间分布。降雨后地表产生径流汇集到调蓄单元出口并通过雨篦子进入管道,当管道排水能力不足或者雨水井冒水时调蓄单元内积水增加,进而模拟实际的内涝情景。城市水文特征单元中调蓄单元、雨篦子以及管道的耦合概化方法如图 2(a)所示,根据水量平衡公式计算调蓄单元内的水量变化:

$$q_0 - Q = \frac{\int_{Z_{v0}}^{Z_v} A_s(Z) dZ}{dt} \quad (1)$$

式中:  $q_0$  为降雨产流,  $m^3/s$ ;  $Q$  为雨篦子过流量,  $m^3/s$ ;  $A_s(Z)$  为随水位变化的调蓄单元面积,  $m^2$ ;  $Z_v$ 、 $Z_{v0}$  为调蓄单元的计算水位与初始水位,  $m$ 。

太湖流域模型中雨篦子的过流能力计算分为 3 种不同的情况<sup>[32]</sup>:当地面水深较浅未完全淹没雨篦子时采用堰流公式(式(2))计算,如图 2(c)所示;当地面水深增加将雨篦子完全淹没后采用孔口流量公式(式(3)、式(4))计算,如图 2(d)和图 2(e)所示。

$$Q = CL \sqrt{2g} h^{1.5} \quad (2)$$

$$Q = CA_m \sqrt{2g(H + h - H_p)} \quad (3)$$

$$Q = CA_m \sqrt{2g(H_p - H - h)} \quad (4)$$

式中:  $C$  为雨篦子过流常数;  $L$  为雨篦子过流长度,  $m$ ;  $g$  为当地重力加速度,  $m/s^2$ ;  $A_m$  为雨篦子过流面积,  $m^2$ ;  $H$  为雨水井深度,  $m$ ;  $h$  为地表积水深度,  $m$ ;  $H_p$  为雨水井水深,  $m$ 。

通过对雨篦子过流量公式做线性化处理<sup>[33]</sup>,可得雨篦子过流量与调蓄单元计算水位以及排水管道水位( $Z_p$ )的关系如式(5)所示,其中  $\alpha$ 、 $\beta$  为相关系数,  $\theta$  为余项。

$$Q = \alpha Z_v + \beta Z_p + \theta \quad (5)$$

将式(1)改写差分形式,并与式(5)联立消去  $Z_v$  可得雨篦子过流量与管道水位之间的关系:

$$Q = \alpha_w Z_p + \beta_w \quad (6)$$

其中:

$$\alpha_w = \frac{A_s \beta}{A_s + \alpha \Delta t} \quad \beta_w = \frac{\alpha q_0 \Delta t + \alpha A_s Z_{v0} + A_s \theta}{A_s + \alpha \Delta t} \quad (7)$$

式中:  $\Delta t$  为时段长度,即计算时间步长,  $s$ 。

由式(6)可知,若管道水位已知,即可求出雨篦子过流量。太湖流域模型中管网计算过程为:通过边界条件得出管道各断面的追赶关系,进而表达为与管网节点水位的关系,节点的水力要素通过联解得出后,回代求出各管道断面的水位和流量。太湖流域模型中针对城市排水管网系统的明满流共存这一计算难点,从一维圣维南方程组的物理意义出发,推导了适用于有压管流的方程组表达形式,提出了当量宽度的概念和计算方法,修正了 Preissmann 窄缝法中的窄缝宽度公式,进而统一了明渠和有压 2 种情况下的方程组,实现了对明满过渡流的有效数值模拟<sup>[34]</sup>。

太湖流域模型中的城市水文特征单元也可以通过求解二维浅水方程组来模拟地表内涝积水情况<sup>[35]</sup>。如图 2(b) ( $q_{0i}$  为二维网格单元中每个网格单元的流量,  $m^3/s$ )所示,将每个网格视作节点,通过地表产流模块计算出网格节点内的产流流量,然后通过求解二维浅水方程模拟地表径流汇流到雨篦子并进入雨水管的过程。与高效模拟方法类似,雨篦子过流量与相邻二维网格水位( $Z_{cell}$ )以及管道水位的关系如式(8)所示。

$$Q = \alpha Z_{cell} + \beta Z_p + \theta \quad (8)$$

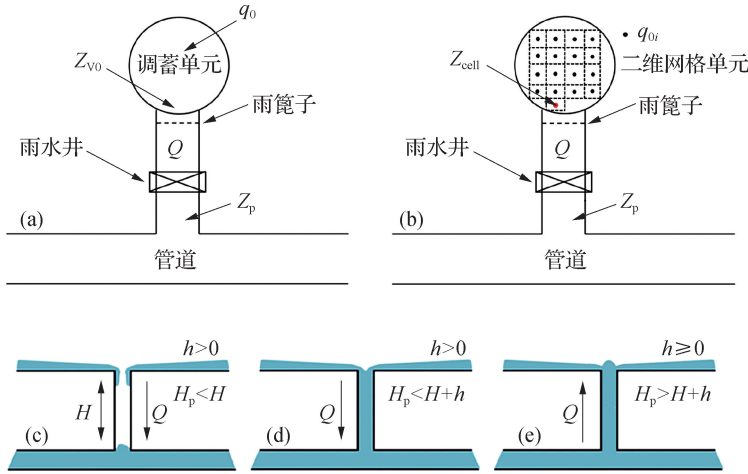


图2 调蓄单元、二维网格单元、雨篦子以及管道耦合概化

Fig.2 Conceptualization of storage unit, two-dimensional cell unit, grate inlet and pipe coupling

采用与式(6)类似的处理方式, 得到  $Q$  与  $Z_p$  之间的关系; 随后采用直角坐标系下矩形网格的控制体积法对浅水方程组进行数值离散, 得到二维相邻网格节点之间的交换流量与网格节点内水位的线性关系; 分别对连续性方程和动量方程组进行离散来构建待求解的线性矩阵; 联立构建的求解矩阵和上下游边界条件即可得到 1 组完备的线性方程组, 随后通过矩阵追赶法求解联立的矩阵, 最终求得每个网格内的水位值<sup>[36]</sup>。

## 2 研究区域与数据

双桥浜城市产汇流与内涝试验基地位于江苏省常州市(31°48'04" N, 119°57'06" E)中北部, 属太湖流域武澄锡虞区较为典型的城市小区。研究区内地势平坦, 略呈西北高、东南低之势, 地面高程为 -1.13 ~ 12.35 m(1985 国家高程基准), 研究区域总面积约为 1.62 km<sup>2</sup>, 如图 3(a) 所示。双桥浜河道由北南方向贯

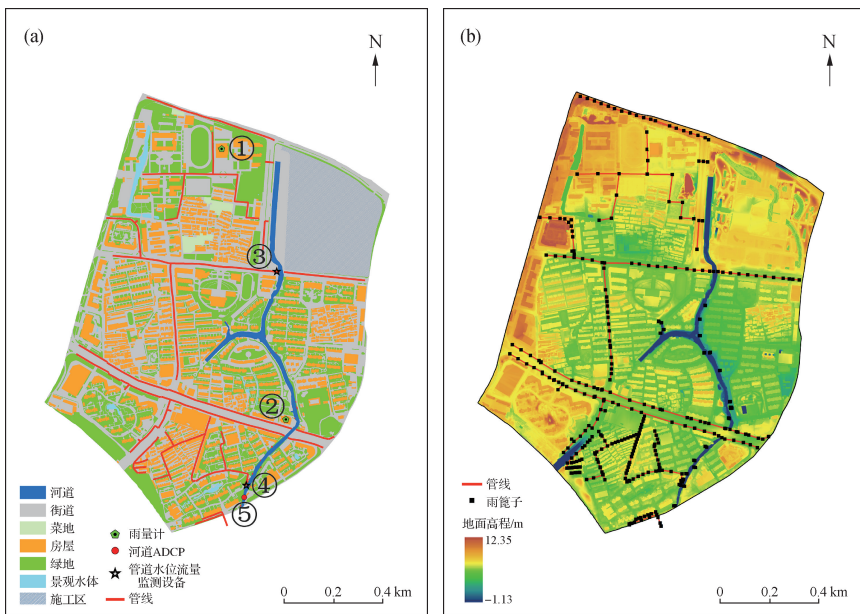


图3 试验基地基础信息

Fig.3 Basic information of experimental site

穿试验基地,并在润德半岛附近分成2支,河道总长1.91 km(其中西支0.27 km),河道宽约20.0 m,水面面积约3.82 hm<sup>2</sup>,下游出口汇入北塘河处建有泵站,设计流量为4.0 m<sup>3</sup>/s。

双桥浜试验基地的基础数据包括下垫面数据、管网数据和地面高程数据等。研究区域地面高程概况如图3(b)所示,分辨率为0.5 m。从地面高程和管网分布可以看出研究区域相对封闭且不受客水的影响,便于进行内涝模拟分析。现有2个HOBO雨量计用于监测区域内的降雨数据,其位置如图3(a)中①与②所示;由于研究区域内管网与河道之间的耦合模拟十分重要,因此,分别在红莲桥管网入河口处(图3(a)中入河口③)与盛世名门管网入河口处(图3(a)中入河口④)设置了管道水位流量监测设备,用于监测2处管道入河口的水位、流量数据;此外,还设有1套ADCP河道自动测流装置,监测双桥浜出口处水位数据,其位置如图3(a)中⑤所示。

### 3 模型建立与率定验证

#### 3.1 城市内涝模型建立

如图4(a)所示,根据土地利用信息网格化研究区域,网格分辨率为6 m,网格数总共为44 323个。如图4(b)所示,该研究区共概化308个雨篦子、294段管道以及3条河道,图4(b)圈中为与河道连接的管道断面。根据每个网格的地表高程值使用城市水文特征单元自动划分功能为每个雨篦子分配对应的汇水区,如图4(c)所示,其中不同颜色的色块表示不同雨篦子对应的汇水区,无色块处表示该地区产流通过沿河短管(长度<50 m)就近直接流入河道。

在高效内涝模型基础上添加该研究区域的二维模型要素,同样设置研究区域二维网格分辨率为6 m,在每个雨篦子处将其对应的管道断面与网格建立雨水排水口联系,得到该研究区域的二维水动力内涝模型。二维水动力内涝模型除地表漫流计算方法与高效内涝模拟模型不同外,其余模型设置均与高效内涝模拟模型采用同1套参数设置。

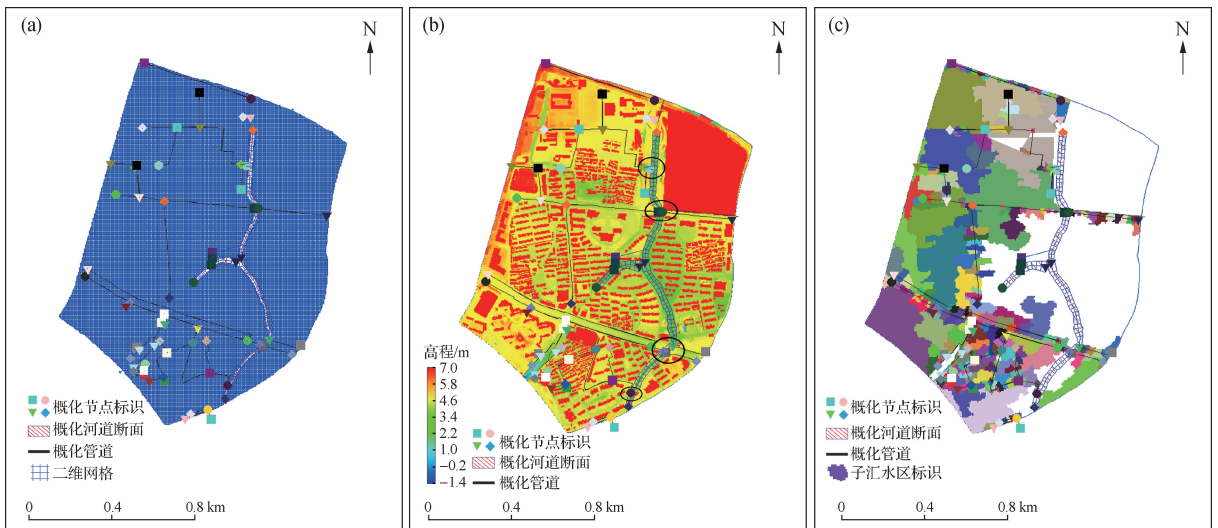


图4 城市内涝模拟模型信息

Fig. 4 Basic information of urban flood inundation model

#### 3.2 模型率定和验证

选取红莲桥处入河口管道水位、盛世名门内管道入河口管道水位和流量进行率定与验证。其中,选取3个降雨事件(20200711、20200720和20200915)进行模型率定,选取2个降雨事件(20200705和20200706)进

行模型的验证。通过纳什系数( $E_{NS}$ )、相对总径流量误差( $E_{RR}, \%$ )、相对流量峰值误差( $E_{RP}, \%$ )以及峰值时间误差( $E_{PT}, \text{min}$ )4个指标评价模型率定与验证结果。表1统计了用于率定和验证的降雨事件特征, 降雨量范围为5.2~74.2 mm, 降雨历时最短为145 min、最长为320 min。其中, 用于率定的降雨事件中包括1场前峰型降雨和2场后峰型降雨, 用于验证的降雨事件中有1场前峰型降雨和1场后峰型降雨。总体而言, 选取用于率定和验证的降雨事件雨量大小、历时长短和雨型分布较为合理, 能够满足模型率定和验证的需求。

表1 率定和验证降雨事件特征统计

Table 1 Characteristics of validation and calibration rainfall events

降雨事件		降雨量/mm	降雨历时/min	峰值时间/min	峰现比例	峰值强度/( $\text{min} \cdot \text{h}^{-1}$ )
20200711	率定	74.2	320	210	0.66	58.8
20200720	率定	16.1	250	230	0.92	12.0
20200915	率定	5.2	145	50	0.34	3.6
20200705	验证	34.6	155	95	0.61	72.0
20200706	验证	22.3	245	30	0.12	31.2

## 4 结果分析与方法比较

### 4.1 率定和验证结果

监测区域内2处入河口平时均处在淹没状态, 入河口内的水位会随着河道水位变化而同步变化。河道下游泵站会周期性开启进行阶段性抽水, 导致该河道水位呈现周期性的起伏变化, 同时引起管道入河口处的流量波动和水位的同步变化。因此, 在没有降雨时, 管道入河口处的水位和流量受到河道水位变化影响呈现一定的起伏波动; 当降雨时, 管道入河口处的水位和流量变化受河道水位变化与降雨同时影响。20200706场次与20200711场次降雨盛世名门管道入河口断面处的模拟结果如图5所示。

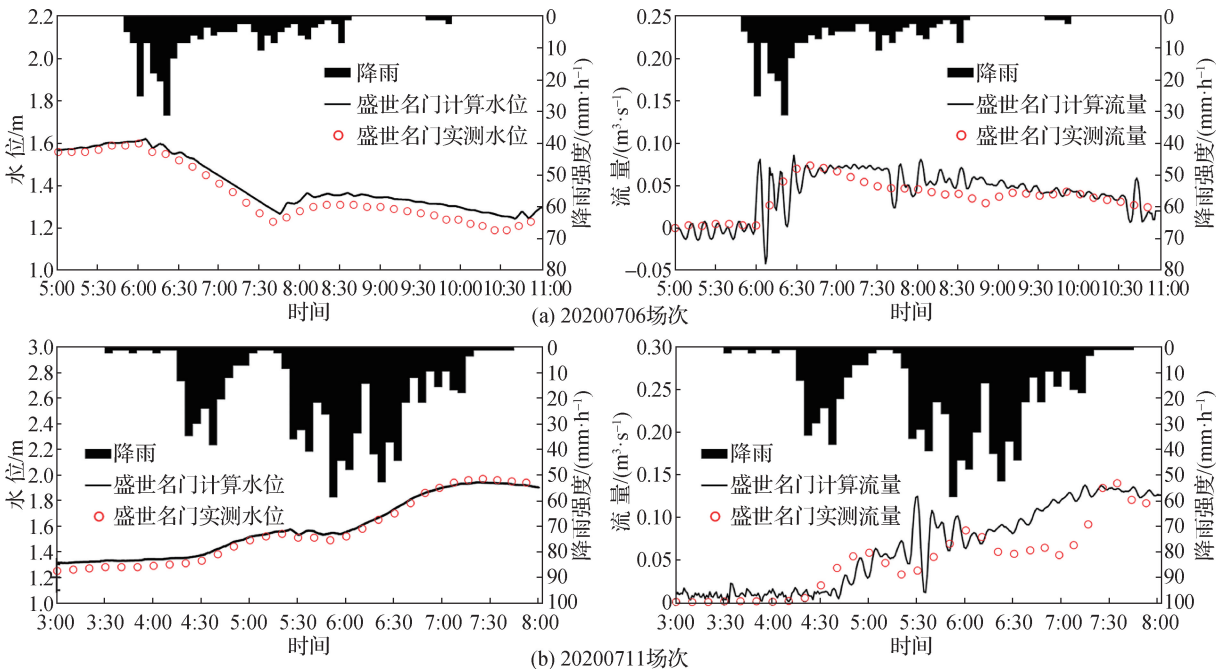


图5 20200706和20200711场次降雨模拟结果

Fig. 5 Simulation results of rainfall events for 20200706 and 20200711

可以看出,在 20200706 降雨事件中,盛世名门入河口处水位随着降雨过程先缓慢升高后逐渐降低,这是由于双桥浜泵站开启导致河道水位下降,盛世名门管道入河口处的水位也随之降低。图 5(a)也可以看出模型模拟的管道流量会出现负值,即往复流现象,这是由于入河口处的流量受到区域内降雨和河道水位顶托的共同作用。在 20200711 降雨事件中,盛世名门处入河口水位随着降雨而逐渐升高,由于此时双桥浜泵站未开启,盛世名门入河口流量主要受到降雨的影响。表 2 列出了 5 场降雨事件的水位率定和验证结果,5 场降雨盛世名门管道断面处的流量率定和验证结果如表 3 所示。

表 2 水位率定和验证结果

Table 2 Summary of water levels validation and calibration results

降雨场次	$E_{NS}$		$E_{RP}/\%$		$E_{PT}/\text{min}$		
	红莲桥	盛世名门	红莲桥	盛世名门	红莲桥	盛世名门	
20200711	率定	0.98	0.98	-1.51	-1.47	0	0
20200720	率定	0.94	0.91	-0.60	0.96	0	0
20200915	率定	0.88	0.85	2.06	1.42	10	0
20200705	验证	0.96	0.96	1.14	0.90	0	10
20200706	验证	0.89	0.85	1.29	0.06	0	0

表 3 盛世名门管道断面处流量率定和验证结果

Table 3 Flow rate validation and calibration results of Shengshimingmen pipe section

降雨场次	计算峰值流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	实测峰值流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$E_{RP}/\%$	$E_{PT}/\text{min}$	$E_{RR}/\%$	$E_{NS}$	
20200711	率定	0.134	0.140	-4.29	-10	27.12	0.69
20200720	率定	0.119	0.116	2.59	-10	-15.75	0.67
20200915	率定	0.047	0.070	-32.86	-10	-12.64	0.72
20200705	验证	0.108	0.103	4.85	-10	15.14	0.52
20200706	验证	0.073	0.074	-1.35	40	12.11	0.50

从各场次降雨模拟结果图可以看出,本次水位与流量模拟结果均较符合实测情况,其中水位模拟结果  $E_{NS}$  值均在 0.85 以上,但是通过流量模拟结果可知,部分流量模拟的结果  $E_{NS}$  值在 0.5 以上。分析原因可能为:

(1) 实测流量间隔为 10 min,模拟结果输出间隔为 5 s,因此,实测流量过程线相对比较平滑,然而中间时刻的流量波动却未能测得。

(2) 由于管道长期处于淹没状态,受河道水位波动影响而产生往复流,但监测设备并不能测量往复流量。

(3) 受河道顶托影响管道入河口的流量较小,容易导致相对流量峰值误差的绝对值偏大,以 20200705 场次降雨为例,计算流量峰值为  $0.108 \text{ m}^3/\text{s}$ ,实测流量峰值为  $0.103 \text{ m}^3/\text{s}$ ,两者流量峰值仅相差  $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ ,但是相对误差却达到了 4.85%。

#### 4.2 城市内涝模拟结果分析比较

论文选取了监测事件中降雨量较大的 2 场降雨进行基于太湖流域模型的城市内涝模拟方法分析,内涝分析事件包括 20200705 和 20200711 场次降雨。20200705 场次降雨量大致相当于常州市暴雨强度计算公式计算的一年一遇降雨量(39.9 mm);20200711 场次降雨量大致相当于常州市暴雨强度计算公式计算的 50 年一遇降雨量(72.3 mm)。图 6 显示了 20200705 和 20200711 场次中高效算法与二维算法模拟的每个网格内淹没水深( $d$ )的比较。图 6 中统计了每个网格内的淹没水深并做散点图,其中不同颜色表示数据点的密集程度。图

6(a)中, 20200705 场次事件的模拟中高效算法与二维算法的模拟最大淹没水深相关性系数( $R^2$ )为 0.14, 均方根误差( $E_{RMS}$ )为 0.06 m。图 6(b)中, 20200711 场次事件中高效算法与二维算法的模拟最大淹没水深  $R^2$  为 0.19,  $E_{RMS}$  为 0.09 m。由于 2 种方法计算原理不同, 二维算法会模拟降雨产流后的汇流过程, 而往往在汇流过程中的水深是比较小的, 因此, 在剔除水深小于 0.15 m 的数据点后, 20200705 场次的模拟结果中高效算法与二维算法的  $R^2$  为 0.53,  $E_{RMS}$  为 0.23 m; 20200711 场次的模拟结果中高效算法与二维算法的  $R^2$  为 0.43,  $E_{RMS}$  为 0.18 m。这也说明由于计算原理的不同, 高效算法和二维算法在小水深模拟时有一定的差别, 但 2 种方法模拟的淹没水深在大于 0.15 m 的区域一致性较高。

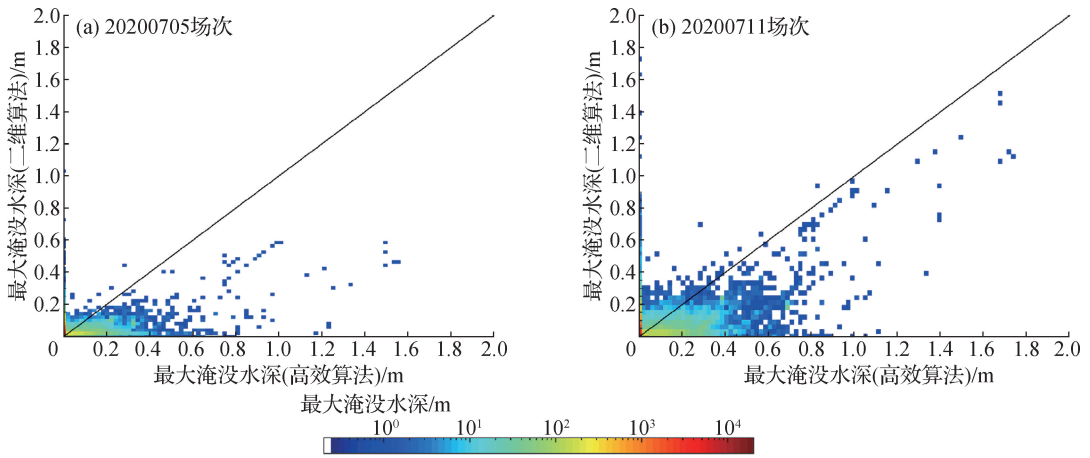


图 6 20200705 和 20200711 场次高效算法与二维算法最大淹没水深对比

Fig. 6 Comparison of simulated water depth in 20200705 and 20200711 events

图 7 显示的是场次 20200711 中高效算法与二维算法的最大淹没水深分布情况。通过对比 2 种算法模拟水深的分布情况可以看出: 研究范围内的区域 I、区域 II、区域 III 和区域 IV 对应的模拟结果较为相近, 其

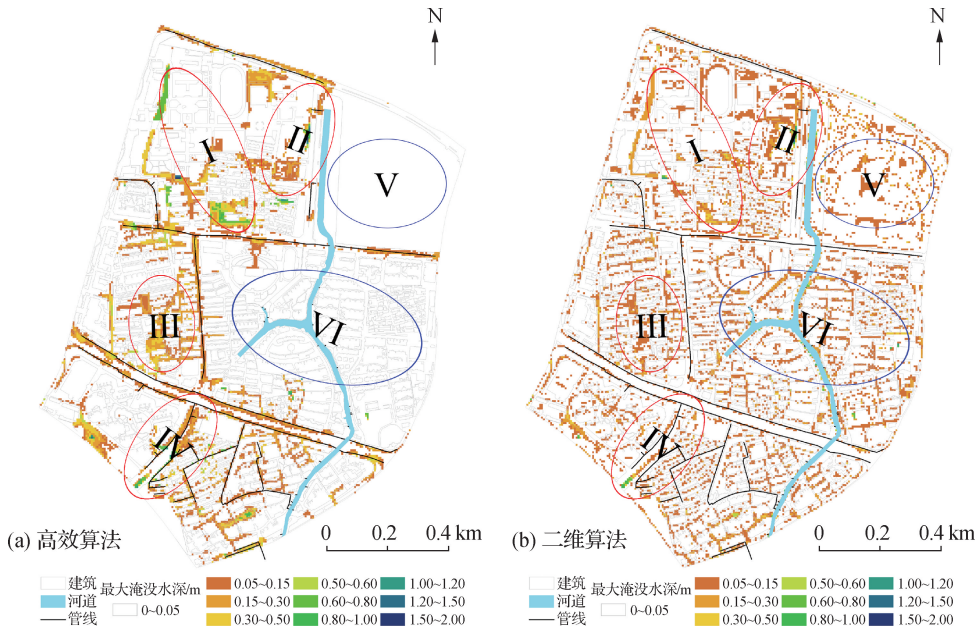


图 7 20200711 场次最大淹没水深分布模拟结果

Fig. 7 Distribution of simulated water depth in 20200711 events

中, 区域Ⅱ和区域Ⅳ为2座下凹式立交桥的桥区, 淹没面积比较大, 淹没深度模拟结果也相近; 区域Ⅰ为城中村和小学, 城中村地势低洼加之内部缺少排水设施, 学校内产生径流很难排入附近管网而排到城中村区域, 因而造成区域Ⅰ内的淹没水深较大, 这也与事后内涝调研结果相符; 区域Ⅲ为住宅区域, 内部下垫面硬化程度较高, 径流系数过大加上排水管网能力较低, 导致此区域内的淹没水深较大。结合图6和图7可以发现, 在相同位置高效算法模拟的水深一般会大于二维算法的模拟淹没水深。这是由于二维算法中模拟了地表漫流过程, 地表水深的分布较为分散, 而高效算法中只模拟地表积水的分布, 因此, 高效算法模拟的地表淹没水深较为集中且一般会大于二维算法模拟的地表淹没水深。

图7中区域Ⅴ和区域Ⅳ高效算法和二维算法结果的不同主要是由于区域靠近河道, 区域内产生的径流通过很多沿河道的小支管(长度 $< 50$  m)直接排入河道中。在这种情况下, 高效算法中区域Ⅴ和区域Ⅵ产生的径流直接进入河道, 因而很少积水; 二维算法则会模拟降雨产流后通过地表漫流进入支管和河道的过程。因此, 高效算法中区域Ⅴ和区域Ⅵ内基本上 $d < 0.05$  m, 二维算法中的大部分 $0.05 \leq d \leq 0.15$  m。

表4分类总结了20200705和20200711场次降雨事件中淹没水深的模拟结果, 并针对高效算法和二维算法的模拟水深进行了对比。表4中可以看出高效算法和二维算法的不同淹没水深统计面积非常接近, 20200705场次中2种方法不同水深面积 $R^2$ 为0.99,  $E_{\text{RMS}}$ 为2.95 m; 20200711场次中2种方法不同水深面积的 $R^2$ 为0.99,  $E_{\text{RMS}}$ 为4.99 m。总体而言, 高效算法和二维算法模拟的城市内涝中不同淹没水深范围的结果是非常接近的。表4中统计了不同淹没水深范围的斑块数用以计算不同淹没水深范围的破碎度即分散情况。可以看出, 二维算法的模拟结果破碎度总是大于高效算法的模拟结果, 这也体现了城市内涝往往呈现分散化、斑块化以及局域性的特征。

表4 不同淹没水深高效模拟与二维模拟算法结果总结

Table 4 Summary of simulation results for efficient and two-dimensional methods

$d/\text{m}$	面积/ $\text{hm}^2$				斑块数/个				破碎度/ $\text{hm}^{-2}$			
	20200705		20200711		20200705		20200711		20200705		20200711	
	高效算法	二维算法	高效算法	二维算法	高效算法	二维算法	高效算法	二维算法	高效算法	二维算法	高效算法	二维算法
[0, 0.15)	153.66	158.38	147.02	152.53	454	1855	588	1814	2.95	11.71	4.00	11.89
[0.15, 0.30)	4.11	0.97	7.55	5.89	270	206	418	754	65.67	212.72	55.37	128.02
[0.30, 0.50)	1.33	0.16	3.46	0.75	107	33	217	140	80.33	208.33	62.72	186.07
[0.50, 0.60)	0.17	0.05	0.53	0.12	26	9	72	28	157.00	178.57	136.99	228.76
[0.60, 0.80)	0.17	0	0.77	0.14	25	1	52	26	144.68	277.78	67.50	180.56
[0.80, 1.00)	0.08	0	0.15	0.07	9	0	15	15	119.05	-	96.90	219.30
[1.00, 1.20)	0.01	0	0.04	0.03	3	1	9	4	277.78	277.78	227.27	158.73
[1.20, 1.50)	0.03	0	0.03	0.01	5	0	4	3	198.41	-	158.73	208.33
[1.50, 2.00]	0.01	0	0.02	0.01	3	0	2	3	277.78	-	111.11	277.78

5场降雨事件模拟均通过笔记本电脑计算完成, 建模型中高效算法和二维算法共用同一套网格, 网格大小为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ , 研究区域内总共网格数目为44 323个, 电脑CPU为Core i5-6300HQ, 内存为8 GB 2 133 MHz。表5统计对比5场降雨事件中的高效算法和二维算法所用的时间, 可以发现在模拟相同历时的降雨事件时二维算法所需要的时间是高效算法的780~1 275倍, 高效算法具有更高的时效性, 而二维算法的计算效率较低。二维算法中计算耗时往往是模拟历时的2.17~2.83倍, 即计算耗时/模拟历时大于1, 因此在计算机硬件水平一般的情况下很难及时输出城市内涝模拟的结果; 高效算法中计算耗时/模拟历时远远小于1, 说明高效算法能够实现真正的城市内涝快速模拟。

表5 各个事件模拟时效性统计

Table 5 Summary of simulation timeliness results for every event

降雨场次	模拟历时/min	计算耗时/min		计算耗时/模拟历时		计算耗时比较 (二维算法/高效算法)
		二维算法	高效算法	二维算法	高效算法	
20200705	180.0	510.0	0.40	2.83	$2.22 \times 10^{-3}$	1 275.0
20200706	360.0	780.0	1.00	2.17	$2.78 \times 10^{-3}$	780.0
20200711	360.0	830.0	0.72	2.31	$2.00 \times 10^{-3}$	1 152.8
20200720	300.0	710.0	0.63	2.37	$2.10 \times 10^{-3}$	1 127.0
20200915	210.0	528.0	0.47	2.51	$2.24 \times 10^{-3}$	1 123.4

## 5 结 论

基于自主研发的太湖流域模型中城市水文特征单元概念,以常州市双桥浜城市产汇流与内涝试验基地为对象,分别构建了城市内涝高效模型和城市内涝二维水动力模型。选用5场实测降雨事件对模型进行率定和验证,对两者的模拟结果与实测资料进行了对比分析,主要结论如下:

(1) 2种方法管道水位与流量模拟结果与实际情况较为吻合,均具有良好的精度和可靠性,可应用于城市地区内涝模拟。

(2) 比较两者内涝模拟结果发现由于受到城市道路、建筑等阻隔作用,城市内涝区域呈现斑块化和破碎化的特点而非平原区洪涝的连续一致。此外,城市内涝主要发生在局部低洼处,内涝积水的流动性不强,这也从侧面验证了城市内涝高效模型中城市水文特征单元的概化符合实际情况。

(3) 通过对城市内涝高效模型与二维水动力模型的时效性进行对比分析,在两者的模拟结果较为接近的情况下,城市内涝高效模型的时效性远远高于城市内涝二维水动力模型,可适用于大范围区域城市内涝模拟。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13)[2021-09-10]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm). (The Outline of the 14th Five-Year plan for National Economic and Social Development of the Long-Range Objectives Through the Year 2035 of P. R. China[EB/OL]. (2021-03-13)[2021-09-10]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm). (in Chinese))
- [2] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等.中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J].水科学进展,2020,31(5):713-724. (XU Z X, CHEN H, REN M F, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese))
- [3] 王浩,梅超,刘家宏.海绵城市系统构建模式[J].水利学报,2017,48(9):1009-1014,1022. (WANG H, MEI C, LIU J H. Systematic construction pattern of the sponge city[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1009-1014, 1022. (in Chinese))
- [4] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等.中国城市洪涝问题及成因分析[J].水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG J Y, WANG Y T, HE R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [5] 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. (HU W X, HE W H, HUANG G R, et al. Review of urban storm water simulation techniques[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 137-144. (in Chinese))
- [6] 夏军,张印,梁昌梅,等.城市雨洪模型研究综述[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(2):95-105. (XIA J, ZHANG Y, LIANG C M, et al. Review on urban storm water models[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(2): 95-

105. (in Chinese))
- [7] KIDD C. Rainfall-runoff processes over urban surfaces[C]// Proceedings of An International Workshop. Wallingford: IH, 1978.
- [8] 任伯帜, 邓仁建. 城市地表雨水汇流特性及计算方法分析[J]. 中国给水排水, 2006, 22(14): 39-42. (REN B Z, DENG R J. Analyses of properties and calculation methods of urban surface rainwater conflux[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(14): 39-42. (in Chinese))
- [9] XIA X L, LIANG Q H, MING X D. A full-scale fluvial flood modelling framework based on a high-performance integrated hydrodynamic modelling system (HiPIMS) [J]. Advances in Water Resources, 2019, 132: 103392.
- [10] LEANDRO J, CHEN A S, DJORDJEVIĆ S, et al. Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(6): 495-504.
- [11] CHEN J, HILL A A, URBANO L D. A GIS-based model for urban flood inundation[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(1/2): 184-192.
- [12] THRYSSØE C, BALSTRØM T, BORUP M, et al. FloodStroom: a fast dynamic GIS-based urban flood and damage model[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126521.
- [13] BATES P D, HORRITT M S, FEWTRELL T J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(1/2): 33-45.
- [14] GLENIS V, KUTIJA V, KILSBY C G. A fully hydrodynamic urban flood modelling system representing buildings, green space and interventions[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 109: 272-292.
- [15] ABILY M, BERTRAND N, DELESTRE O, et al. Spatial global sensitivity analysis of high resolution classified topographic data use in 2D urban flood modelling[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 77: 183-195.
- [16] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual, version 5.0 [M]. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.
- [17] ABDELRAHMAN Y T, GROUP E C, MOUSTAFA A M E, et al. Simulating flood urban drainage networks through 1D/2D model analysis[J]. Journal of Water Management Modeling, 2018, 26(C454): 1-7.
- [18] ZOPPOU C. Review of urban storm water models[J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16(3): 195-231.
- [19] 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型[J]. 中国给水排水, 2008, 24(7): 88-91. (ZHAO D Q, CHEN J N, TONG Q Y, et al. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(7): 88-91. (in Chinese))
- [20] 喻海军, 马建明, 张大伟, 等. IFMS Urban 软件在城市洪水风险图编制中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(7): 13-17. (YU H J, MA J M, ZHANG D W, et al. Application of IFMS urban software in urban flood risk mapping[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(7): 13-17. (in Chinese))
- [21] 黄国如, 陈文杰, 喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 334-344. (HUANG G R, CHEN W J, YU H J. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 334-344. (in Chinese))
- [22] MA B Y, WU Z N, HU C H, et al. Process-oriented SWMM real-time correction and urban flood dynamic simulation[J]. Journal of Hydrology, 2022, 605: 127269.
- [23] 王兆礼, 陈昱宏, 赖成光. 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 Z L, CHEN Y H, LAI C G. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124. (in Chinese))
- [24] LEANDRO J, MARTINS R. A methodology for linking 2D overland flow models with the sewer network model SWMM 5.1 based on dynamic link libraries[J]. Water Science and Technology, 2016, 73(12): 3017-3026.
- [25] APEL H, ARONICA G T, KREIBICH H, et al. Flood risk analyses: how detailed do we need to be? [J]. Natural Hazards, 2009, 49(1): 79-98.
- [26] 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. (CHENG W H, WANG C H, ZHU Y. Taihu Basin model[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2006. (in Chinese))
- [27] WANG C H, HUA W J, CHEN G, et al. Distributed-framework basin modeling system: I: overview and model coupling[J]. Water, 2021, 13(5): 678.

- [28] CHEN G, HUA W J, FANG X, et al. Distributed-framework basin modeling system; II: hydrologic modeling system[J]. *Water*, 2021, 13(5): 744.
- [29] LI X N, WANG C H, CHEN G, et al. Distributed-framework basin modeling system; III: hydraulic modeling system[J]. *Water*, 2021, 13(5): 649.
- [30] CHEN G, WANG C H, FANG X, et al. Distributed-framework basin modeling system; IV: application in Taihu Lake basin[J]. *Water*, 2021, 13(5): 611.
- [31] 王船海. 数字流域二元结构体系与原型实现[D]. 南京: 河海大学, 2007. (WANG C H. Dual-structured system and prototype implementation of digital basin[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [32] FERNÁNDEZ-PATO J, GARCÍA-NAVARRO P. Development of a new simulation tool coupling a 2D finite volume overland flow model and a drainage network model[J]. *Geosciences*, 2018, 8(8): 288.
- [33] 吴朱昊. 基于流域河网水动力模型耦合的 SWMM 模型优化研究[D]. 南京: 河海大学, 2014. (WU Z H. Optimization of SWMM model based on hydrodynamic model coupling of watershed and river network [D]. Nanjing: Hohai University, 2014. (in Chinese))
- [34] 柳园园, 王船海, 吴朱昊, 等. 城市排水管网明满交替非恒定流数学模型的研究[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2016, 31(2): 210-219. (LIU Y Y, WANG C H, WU Z H, et al. Study on free-surface-pressurized flow mathematical model for urban drainage networks[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2016, 31(2): 210-219. (in Chinese))
- [35] 王船海, 李光焱. 流域洪水模拟[J]. *水利学报*, 1996, 27(3): 44-50. (WANG C H, LI G C. The modelling of basin flood [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 27(3): 44-50. (in Chinese))
- [36] 王船海, 向小华. 通用河网二维水流模拟模式研究[J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 516-522. (WANG C H, XIANG X H. Generic 2-D river network numerical model[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4): 516-522. (in Chinese))

## Efficient simulation of urban flood inundation based on Taihu Lake basin model\*

WANG Chuanhai<sup>1,2</sup>, ZHENG Shiwei<sup>1,2</sup>, LI Xiaoning<sup>1,2</sup>, CHEN Kai<sup>3</sup>, ZHAI Yue<sup>3</sup>, HUA Chen<sup>4</sup>,  
WANG Shan<sup>4</sup>, CHEN Gang<sup>1,2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*;  
2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Nanjing Huishui Software Technology Co., Ltd, Nanjing 210036, China*; 4. *Changzhou Branch of Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Changzhou 213022, China*)

**Abstract:** The effective simulation of urban flood inundation is crucial for mitigating the effects of flooding and devising disaster prevention and mitigation measures. In this study, an efficient simulation method based on grate-inlet linking overland and pipe flow was proposed for the whole process of urban rainfall-runoff-flood inundation. On the basis of monitoring data from the Shuangqiaobang urban runoff and flood inundation experimental site, urban flood inundation models based on an efficient simulation algorithm and a two-dimensional hydrodynamic algorithm were calibrated and validated. The accuracy and reliability of the two methods were analyzed and compared in different rainfall events. The results show that the efficient simulation method based on the grate-inlet urban hydrological feature unit in the Taihu Lake basin model could reflect the specific characteristics of urban flooding more accurately. The computational efficiency is approximately 780—1 275 times than that of the two-dimensional hydrodynamic algorithm. Overall, it can simulate urban flooding with the same settings much more quickly.

**Key words:** urban flood inundation; Taihu Lake basin model; urban hydrological feature unit; efficient simulation; experimental monitoring

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFC3000104) and the National Natural Science Foundation of China (No. U2040209).