

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2026.02.013

虚拟水池网-SWMM 耦合的城市洪涝高效模拟方法

黄 源^{1,2}, 周 俊¹, 郑飞飞³, 熊俊熠¹, 张 钊¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 针对城市洪涝模拟中计算效率与模拟精度难以兼顾的问题, 提出一种基于虚拟水池网与 SWMM 耦合的新方法 (StoSWMM)。该方法在 SWMM 框架内以子汇水区为单位构建虚拟水池网络, 利用堰结构实现地表及地表-管网之间的双向水量交换, 并基于虚拟水池水位与 DEM 高程差快速推算地表积水水深, 实现洪涝全过程模拟。以河海大学江宁校区为研究区, 将 StoSWMM 与二维水动力模型 (2DHM) 及基于检查井溢流的耦合水文水动力模型 (CHHM) 进行对比分析。结果显示, 在本研究区与设定降雨情景下, StoSWMM 在地表淹没范围、最大积水深度及积水演变过程的整体刻画方面与 2DHM 表现出较好的一致性; 在最大水深超过 0.3 m 的区域, 其空间相关系数为 0.86~0.93, 而 CHHM 为 0.07~0.30, 体现了不同模型在地表积水刻画机制和空间概化方式上的差异。在同等硬件条件下, StoSWMM 可实现秒级运算, 耗时约为 CHHM 的 1/40、2DHM 的 1/300。该方法完全依托开源 SWMM 平台, 在保持物理一致性的同时具备较高的计算效率, 可为城市洪涝快速模拟与情景分析提供轻量化建模途径。

关键词: 洪涝模拟; 城市洪涝模型; SWMM; 虚拟水池网; 计算效率

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2026)02-0349-13

城市洪涝是全球城市化进程中最具挑战性的环境灾害之一, 在气候变化背景下其频率和强度持续攀升^[1]。2021 年郑州“7·20”特大暴雨、2024 年广东暴雨、2025 年北京“7·24”暴雨等事件, 对城市安全与治理能力提出严峻考验^[2]。在此形势下, 发展兼顾计算效率与物理可靠性的城市洪涝模拟方法已成为城市防洪减灾与风险管理领域的重要研究方向。

围绕城市洪涝模拟问题, 国内外学者从物理机制、数据驱动及二者融合的“双驱动”等不同路径开展了大量研究^[3-4]。基于物理机制的模型通过水文与水动力方程刻画产汇流过程, 典型模型包括水文学模型、水文-水动力耦合模型 (如 SWMM) 以及二维水动力模型 (如 GAST、MIKE FLOOD、InfoWorks ICM 等)^[5]。物理模型具有可解释性强、适用性广等优势, 但高精度二维水动力模拟计算成本巨大, 在大尺度或实时预测中难以满足效率要求^[6-7]。尽管 GPU 加速^[8]、自适应网格^[9]、多尺度分层嵌套^[10]等技术可一定程度提升效率, 其工程化应用仍受限于硬件和复杂度^[11]。基于数据驱动的模型 (如随机森林、卷积神经网络、长短期记忆网络等) 通过学习历史数据可实现淹没范围和积水深度的快速估算, 在效率上具有明显优势, 但其高度依赖训练样本质量, 缺乏物理约束与可解释性, 对极端事件和新区域的适应性不足^[12-14]。近年来, 物理机制模型与数据驱动方法的结合逐渐成为城市洪涝模拟的发展趋势。此类物理-数据“双驱动”框架在物理方程约束下利用机器学习进行参数校正或替代计算, 可在一定程度上同时提升模拟精度与计算效率^[15-16]。然而, 受训练样本、物理母模型及应用场景差异等因素制约, 双驱动模型的稳定性与适用性仍存在不确定性^[16], 尤其对于资料稀缺区、不同城市形态及极端事件情景。因此, 从当前发展阶段来看, 物理、数据驱动及双驱动模型在“精度-效率-普适性”之间仍

收稿日期: 2025-10-09; 修回日期: 2026-01-08; 接受日期: 2026-01-09; 网络出版日期: 2026-01-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YF3208901); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (226-2025-00245)

作者简介: 黄源 (1989—), 男, 河南南阳人, 副教授, 博士, 主要从事城市洪涝防控及供排水系统运行调控方面研究。

E-mail: huangyuan@hhu.edu.cn

通信作者: 郑飞飞, E-mail: feifeizheng@zju.edu.cn

难以完全兼顾。

为在工程实践中权衡精度与效率，研究者提出了若干折中策略，如基于检查井溢流的耦合水文水动力（SWMM 与 MIKE FLOOD/LISFLOOD-FP 的单向或双向耦合）^[17-19]，其通过仅在溢流发生时触发地表二维模拟以降低计算量。这类方法一定程度上兼顾了效率与地表积水刻画，但忽略了溢流前地表积水演变及无管网区域的洼地蓄水，存在一定偏差。其他研究尝试采用基于 GIS/DEM 的快速积水估算，或在 SWMM 框架中引入道路与洼地单元构建“双排水系统”^[20-21]，虽改善了局部积水表达，但在跨尺度应用、复杂汇流路径及地表-管网双向交互刻画方面仍显不足。总体而言，现有工程化折中方法在地表-管网双向交互刻画和效率-精度平衡方面仍存在关键缺口，尤其难以兼顾物理一致性和计算效率。

针对上述问题，本文提出一种基于虚拟水池网络与 SWMM 耦合的城市洪涝模拟新方法（StoSWMM），并以河海大学江宁校区为研究区，通过与地表二维水动力模型（2DHM）和基于检查井溢流的耦合水文水动力模型（CHHM）对比分析，探讨该方法在城市洪涝快速模拟中的适用性。

1 模型原理与方法

1.1 基本原理

传统的 SWMM 在城市雨洪管理中应用广泛，能够较好地表征降雨入渗、蒸发、地表径流及管网水动力过程。然而，其计算框架本质上是“一维汇流-一维管网”的结构，与真实的城市洪涝过程存在明显差异，见图 1 (a)和图 1(b)：①SWMM 通常假设子汇水区径流仅能单向排入相邻子汇水区或直接进入检查井或雨水篦，缺乏地表水在洼地与道路之间的动态积聚与交换过程；②地表与管网交互被简化为单向入流，未能反映检查井溢流与地表回流的双向机制；③在空间尺度上，SWMM 的积水表征局限于节点，难以反映远离检查井区域的淹没演变。这些差异导致 SWMM 难以直接反映积水点的淹没时间与范围，导致洪涝预警与风险评估结果不够直观。

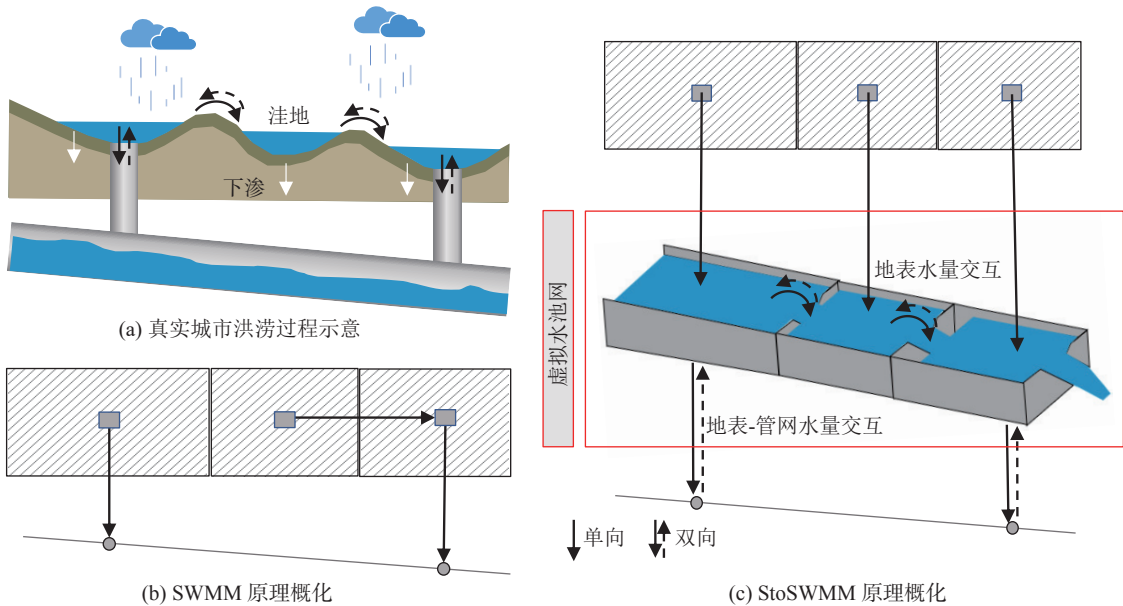


图 1 StoSWMM 基本原理

Fig. 1 Fundamental principles of the StoSWMM

为弥补上述不足，本文引入虚拟水池概念，提出一种基于虚拟水池网络与 SWMM 耦合的城市洪涝模拟新方法，通过构建虚拟水池网络显式表达地表积水的蓄积与交换过程，弥补其与真实洪涝过程之间的差距(图 1

(c)). 基本思路是:将研究区各子汇水区视作独立蓄水单元,构建与之对应的虚拟水池;通过三角堰连接相邻水池,形成可反映地表积水演变的虚拟水池网;对于含有检查井的子汇水区,利用横截堰建立虚拟水池与管网的双向水量交换,使得管网溢流可回补地表,而地表积水也可排入管网。

StoSWMM 延续了 SWMM 传统的产流机制,但显著改进了汇流方式。地表径流首先进入对应虚拟水池,再通过堰结构在虚拟水池间或虚拟水池和管网间进行交换,实现降雨径流—地表积水—管网排水的全过程模拟。与传统 SWMM 的“节点溢流”模式相比,StoSWMM 更贴近城市复杂地表与管网的耦合特征,为洪涝空间分布与时序演变的高效表征提供了新途径。

1.2 模型构建方法

基于上述基本原理,StoSWMM 的构建过程主要包括 4 个步骤:①建立传统 SWMM,完成子汇水区划分与管网系统建模(无需构建子汇水区之间及与管网节点的连接);②在每个子汇水区内设置对应的虚拟水池单元,作为子汇水区出口,用以表征地表径流的蓄积过程;③通过三角堰连接相邻虚拟水池,形成能够反映地表汇流与积水演变的虚拟水池网络;④利用横截堰将包含检查井节点的虚拟水池与检查井相连,实现虚拟水池与管网之间的双向水量交换。

需强调的是,虚拟水池、三角堰和横截堰均为 SWMM 的原生组件,因而 StoSWMM 能够完全依托 SWMM 架构实现,无需依赖外部模型,具有轻量化和可移植性的优势。其关键在于利用 DEM 数据提取子汇水区形态及邻接关系等信息,并将其参数化为虚拟水池与堰的属性,再通过修改 SWMM 输入文件(INP)嵌入模型结构。最终,StoSWMM 在 SWMM 框架内即可实现降雨、地表产汇流、管网排水及洪涝积水的全过程模拟。

1.2.1 传统 SWMM 构建

SWMM 的建立过程与常规方法一致,此处不再赘述。需要注意的是,在子汇水区划分时,为确保积水模拟的准确性,每个子汇水区应尽量仅包含 1 个洼地点,以避免多个洼地并存导致虚拟水池蓄排模拟的偏差。为此,本文采用“水文分析-泰森多边形”相结合的方法^[22]:首先结合研究区地形特征与排水管道分布,利用水文分析工具初步划定较大的子流域;随后在各子流域内部,根据检查井节点的空间分布,采用泰森多边形法进一步细分,以使每个检查井节点对应 1 个子汇水区。该子汇水区划分方式综合考虑自然地形与排水系统布局,在模拟精度与计算效率之间取得合理折中,使所得子汇水区更符合实际城市汇水单元的水文特征,并契合 StoSWMM 的快速模拟定位。

1.2.2 子汇水区的虚拟水池构建

在 StoSWMM 中,每个子汇水区被视为一个独立的蓄水单元,并构建虚拟水池与之对应。子汇水区与虚拟水池之间的一一映射关系,确保模型能够基于真实地形汇水单元来描述地表径流的蓄积和交换过程,从而保证虚拟水池网络的物理一致性。虚拟水池的关键参数为蓄水深度—面积曲线,其提取过程如下:首先,从研究区 DEM 中裁剪出各子汇水区对应的高程数据,以最低点高程作为虚拟水池底高;随后,利用 GIS 的空间分析工具提取子汇水区在不同水深条件下的有效积水面积,从而形成深度—面积曲线。该曲线能够反映真实洼地不同水位下的蓄水能力,是实现地表蓄水与积水演变模拟的核心参数。需要说明的是,虚拟水池的空间尺度与参数完全由子汇水区的真实地形特征确定,确保模型在概化地表蓄水过程的同时保持物理一致性。

1.2.3 基于三角堰的虚拟水池网构建

实际降雨汇流过程中,相邻子汇水区的交接面常为地表径流交换的重要通道。为实现这一机制,在对应的虚拟水池之间设置堰组件作为连接。考虑到水量交换通常从交接面的最低点开始,且随水深增加过流面积逐渐扩大,该过程与三角堰的过流规律高度一致,因此采用三角堰进行概化。具体方法为:利用 GIS 中的插

值形状工具从研究区 DEM 中提取任意 2 个相邻子汇水区的交接剖面,并将其简化为三角堰,提取最低点高程、最大高差及水平长度,分别作为堰底高程、堰高和堰顶宽度。通过三角堰连接相邻虚拟水池,可在子汇水区尺度上刻画地表径流在洼地之间的动态交换过程,形成覆盖全区的虚拟水池网络。

1.2.4 基于横截堰的地表-管网水量交互

虚拟水池网可显式刻画地表蓄水与子汇水区之间的水平汇流过程,而地表-管网之间的垂向交换则通过 SWMM 内置的横截堰来实现。横截堰是 SWMM 中用于描述越顶溢流或淹没流的标准水力单元,其流量计算采用自由堰流或淹没堰流公式,由 SWMM 内核自动选择^[23]。StoSWMM 中,横截堰将虚拟水池与检查井节点相连,其堰顶高程设为检查井处地面高程、堰宽设为井口周长,从而模拟城市洪涝过程中典型的双向水量交换机制:当虚拟水池水位超过堰顶并高于检查井水位时,地表积水排入管网(图 2(a)和图 2(b));当检查井水位升高并超过堰顶时,则管网水溢流回到地表(图 2(c)和图 2(d))。根据上下游水位与堰顶高程的相对关系,横截堰在模型中自动切换为自由堰流或淹没堰流,计算公式如下:

当 $H_1 > Z_{\text{gnd}} \geq H_2$ 时,为自由堰流:

$$Q = C_w L_e (H_1 - Z_{\text{gnd}})^{1.5} \quad (1)$$

当 $H_1 > H_2 > Z_{\text{gnd}}$ 时,为淹没堰流:

$$Q = f_s C_w L_e (H_1 - Z_{\text{gnd}})^{1.5} \quad (2)$$

式中: Q 为横截堰流量, m^3/s ; H_1 和 H_2 分别为堰的上游侧和下游侧水位, m ; Z_{gnd} 为检查井处地面高程, m ; C_w 为堰流系数, $\text{m}^{1/2}/\text{s}$; L_e 为有效堰长度(即井口周长), m ; $f_s = [1 - (H_2/H_1)^{1.5}]^{0.385}$, 为淹没堰流相对自由堰流的修正系数。当虚拟水池水位高于检查井水位时, H_1 为虚拟水池水位, H_2 为检查井水位;反之亦然。

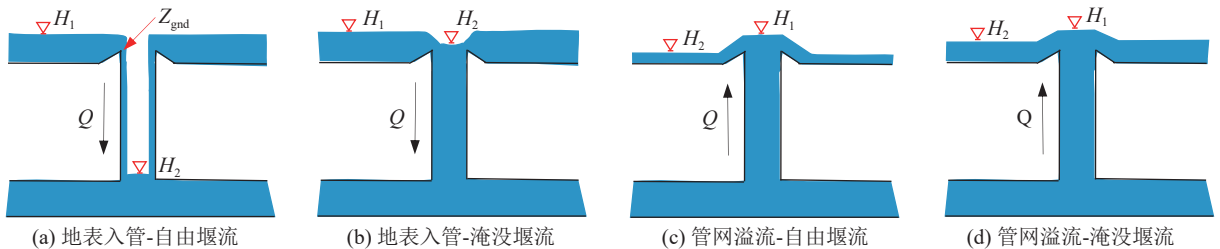


图 2 地表-管网水量双向交互过程

Fig. 2 Bidirectional water exchange between surface and drainage system

1.2.5 地表积水计算方法

在 StoSWMM 中,地表积水过程不依赖二维水动力模型,而是基于虚拟水池水位与 DEM 的高程差快速推算得到。虚拟水池水位表示子汇水区最低点的积水深度,而子汇水区任意位置的积水深度可由局部地形决定,计算方式如下:

$$H_i = \max(0, H_{\text{sto}} + Z_{\text{min}} - Z_i) \quad (3)$$

式中: H_i 为空间点 i 的水深, m ; H_{sto} 为虚拟水池水深, m ; Z_{min} 为子汇水区最低点地面高程, m ; Z_i 为空间点 i 的地面高程, m 。

结合虚拟水池网络的动态水位变化,StoSWMM 可高效获取地表积水范围与深度演变,是本方法区别于传统 SWMM 的核心优势之一。需要说明的是,随着子汇水区尺度减小,虚拟水池对局部地形的概化程度提高,空间差值误差相应减弱;但子汇水区数量增多会明显增加计算量,因此本文采用的子汇水区尺度是在精度与效率之间取得的折中选择。

1.3 其他常用城市洪涝模拟方法

当前,城市洪涝模拟方法众多,不同模型在空间显式性、计算效率和适用场景上差异明显^[6]。为凸显本文提出的 StoSWMM 物理模型的性能特点,选取 2 类物理机制明确且具有代表性的物理模型作为对比对象:2DHM 和 CHHM。这 2 类模型在主流模拟软件(如 InfoWorks ICM、MIKE FLOOD 等)中被广泛采用,是当前城市洪涝模拟的主流物理建模方法^[1,6]。

1.3.1 地表二维水动力模型

2DHM 方法基于浅水方程,直接在高分辨率 DEM 上模拟降雨径流的汇流与积水过程,并与一维管网水力模型耦合,通过检查井实现双向水量交换,能够精细刻画复杂下垫面条件下的洪涝演变^[1,10]。然而,2DHM 对高精度地形数据依赖性强,计算规模庞大,难以适用于大范围区域或实时预警场景^[24]。考虑到 2DHM 具备较为完整且严格的物理机制,本文将其视为基准模型。

1.3.2 基于检查井溢流的耦合水文水动力模型

为兼顾效率与精度,CHHM 方法提出分阶段的耦合思路^[18-19]:在整个降雨过程中,采用一维或半分布式水文水动力模型(如 SWMM)快速模拟地表产汇流与管网汇流过程;当节点水位超过地面高程产生溢流后,再调用地表二维水动力模型对溢流区的积水演变过程进行精细化模拟。该方法通过在节点非溢流阶段减少二维模型的调用,降低了计算负担,在大尺度区域内具备较高效率。但其不足在于难以准确刻画溢流发生前的积水演变过程,限制了其在局部精细化洪涝分析中的应用。

2 应用案例

2.1 研究区概况

研究区域位于江苏省南京市河海大学江宁校区,整体地势呈北高南低格局。该区域与周边区域由将军大道、佛城西路和康厚街 3 条主干道路隔开,形成了相对独立的汇水单元(图 3(a))。研究区总汇水面积约为 0.72 km²,雨水管网主要沿道路网布设,总长约 4.31 km,整体分为东西 2 部分。西侧管网覆盖范围广,是校区的主要排水通道,其排口位于南门外西侧排水沟;东侧管网规模较小,通过 2 个排口将雨水排入市政雨水干管。为获取下垫面信息,利用 GIS 的聚类非监督分类方法从卫星图像中提取土地利用类型,主要包括绿地、裸地、建筑、道路和湖泊 5 类(图 3(b))。此外,为保证高程数据精度,采用实时差分定位(RTK)设备在研究区共采集了 9 740 个高程点,通过 GIS 的 3D 分析工具构建不规则三角网(TIN)数据,并进一步生成分辨率为 1 m×1 m 的高精度 DEM,为洪涝模拟提供了可靠的地形基础(图 3(c))。

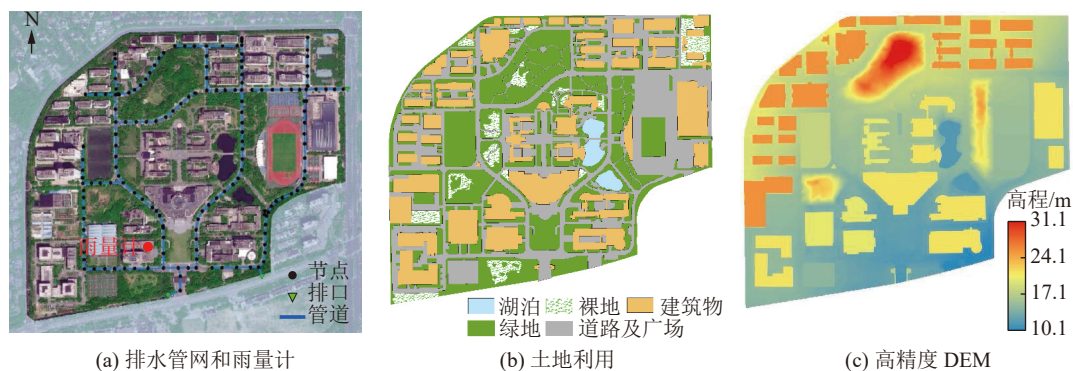


图3 研究区域概况

Fig. 3 Overview of the study area

2.2 降雨事件

在研究区南侧建筑屋顶上布设 1 台在线雨量计(图 3(a))，获取 1min 分辨率的降雨监测数据。为验证本文所提 StoSWMM 的实用性，选取了 2 类典型降雨事件(图 4)进行模拟分析：一类为 2023 年 7 月 17 日和 8 月 22 日 2 场实测暴雨事件，这 2 场降雨均具有较大的总雨量及多峰值特点，能够充分反映真实气候条件下的降雨变化特征及下垫面响应；另一类为重现期分别为 10 a 和 50 a 的短历时设计暴雨，目前在城市排水模拟研究中应用广泛，更适用于检验模型在应对高强度、突发性事件时的稳定性与适用性。二者结合使用，可在常见与极端情景下对模型适用性和鲁棒性进行全面评估。其中，设计降雨依据 2014 年修订的南京市暴雨强度公式(式(4))计算，可反映近年来土地利用和气候等变化对短历时降雨的影响。

$$i=\frac{64.3+53.8lgP}{(t+32.9)^{1.011}} \tag{4}$$

式中： i 为降雨强度，mm/min； P 为重现期，a； t 为降雨历时，min。设计雨型采用内涝风险评估中常用的芝加哥雨型，雨峰系数取 0.4，时间间隔为 1 min，降雨总历时为 120 min。

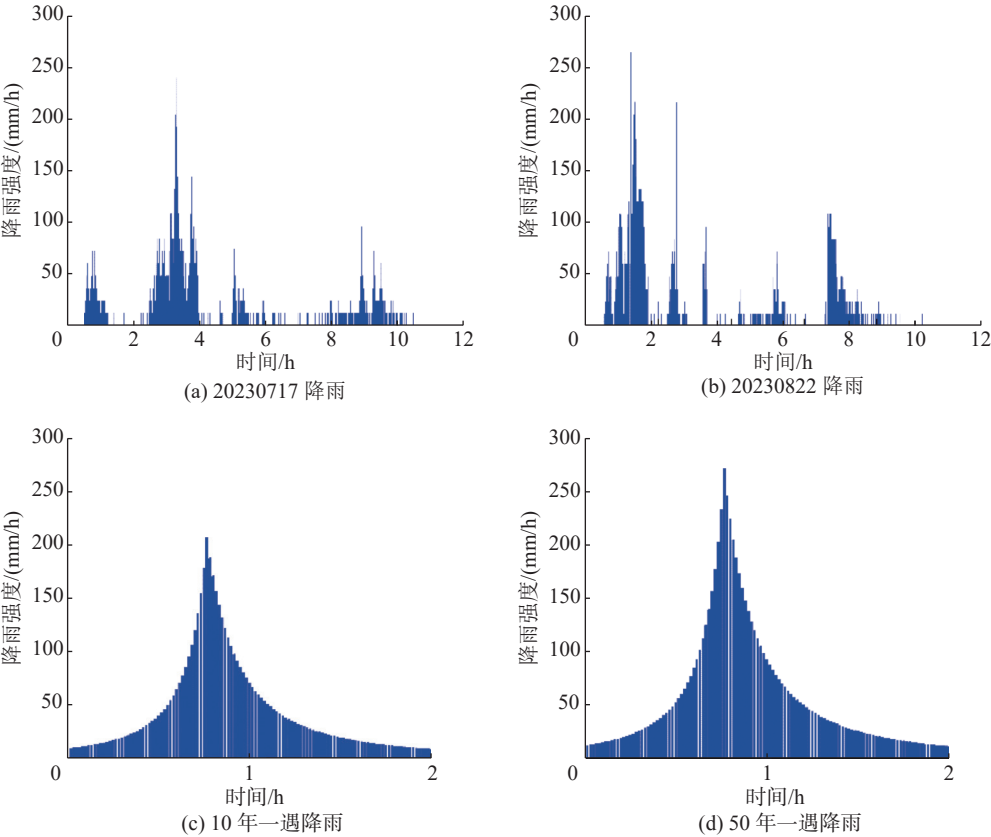


图 4 降雨事件
Fig. 4 Rainfall events

2.3 模型构建

2.3.1 StoSWMM 的构建

基于研究区管网资料、下垫面土地利用类型和高程数据，利用 SWMM5.2 构建传统管网模型。模型包括 160 个检查井节点、161 根管道和 3 个自由排口。汇水区划分采用“水文分析-泰森多边形”相结合的方法，将研究区划分为 224 个子汇水区，如图 5(a)所示。

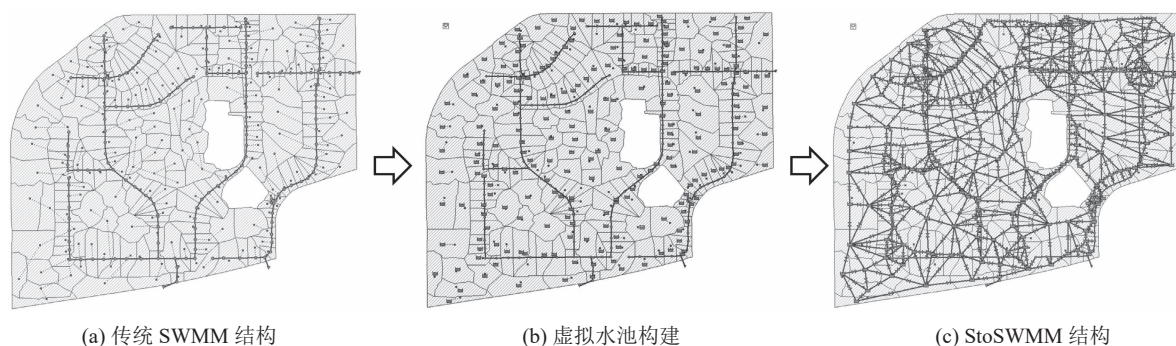


图5 StoSWMM 的建立

Fig. 5 Construction of the StoSWMM

在此基础上,为每个子汇水区构建虚拟水池。根据子汇水区的分布,从DEM数据中提取其最低点作为虚拟水池底高;以特定步长(本文取2 cm)逐步增加水深直至最高点,提取相应水深下的淹没面积,生成该子汇水区的蓄水深度—面积曲线。据此可为每个子汇水区建立对应的虚拟水池,并将其产汇流汇入虚拟水池,见图5(b)。

进一步,构建虚拟水池网。根据子汇水区的空间分布识别出336条子汇水区相交线,结合DEM提取相交剖面并概化为三角堰,得到堰底高程、堰高和堰顶宽度等参数。本文假设存在水流通路的虚拟水池间水量交换不受阻碍(即高水位水池的积水可迅速流动至低水位水池),因此将三角堰的流量系数设为较大值(本文统一设为5)。若三角堰的堰底高程高于虚拟水池水位(如因建筑、挡墙或明显地形突变),则其不会开启,水量交换也不会发生,从而自然反映地形阻碍效应。

对于含检查井的子汇水区,还需建立横截堰实现虚拟水池与管网节点间的双向水量交换。横截堰的底高和堰顶宽度取自检查井地面高程和周长。本研究检查井面积采用SWMM默认的 1.167m^2 ,横截堰的堰流系数参考文献[3]取1。最终得到集成虚拟水池网与横截堰的StoSWMM结构(图5(c))。

StoSWMM的地表产汇流计算采用SWMM架构中常用的Horton下渗模型和非线性水库模型,管网水力计算采用基于一维圣维南方程的动态波法。子汇水区参数包括几何参数和经验参数,其中平均坡度、不透水率、特征宽度等几何参数通过空间统计分析得出。平均坡度通过研究区DEM计算并结合子汇水区边界由GIS区域分析模块统计得到;平均不透水率由下垫面的土地利用图计算,将绿地与裸地视为透水区,道路与建筑物视为不透水区;特征宽度简化设置为子汇水区面积的平方根(假设形状为正方形)。经验参数包括子汇水区的洼蓄量与糙率等。由于虚拟水池已能表征实际积水情况,故子汇水区透水区与不透水区的洼蓄量均设为0,洼蓄过程在虚拟水池中体现。其他经验性参数参考SWMM模型手册及文献[25],见表1。

2.3.2 2DHM 构建

2DHM通过二维网格单元直接计算地表产流及积水演变过程,能够精细刻画降雨径流的空间分布与流动路径。为保证与StoSWMM具有可比性,2DHM在参数设置上保持一致。具体地,2DHM采用与StoSWMM一致的汇水区范围,将地表划分为二维网格单元,并为每个单元分配下垫面属性及产汇流参数;边界设置为垂直墙以避免水量溢出。网格划分采用非规则网格,最小网格为 5m^2 ,总网格数为32 525。对于透水地表(绿地、裸地),采用Horton下渗模型计算产流过程;对于不透水地表(道路、建筑),径流系数固定为1,即假定完全产流。所有相应参数取值与表1相同。地下管网部分与StoSWMM保持一致,包括管道拓扑、管径、曼宁糙率及节点分布。检查井作为地表与管网之间水量交换的接口,采用同样的横截堰组件来计算双向流量,参数设置与StoSWMM一致。通过以上设置,2DHM可精细模拟整个研究区的地表积水演变过程,为StoSWMM提供高精度的参考基准。本文采用InfoWorks ICM软件实现2DHM的构建与计算。

表 1 StoSWMM 经验参数取值
Table 1 Empirical parameter settings for the StoSWMM

模块	参数名称	参数含义及单位	取值范围	取值
子汇水区	N-imperv	不透水区曼宁系数	0.011 ~ 0.024	0.018
	N-perv	透水区曼宁系数	0.06 ~ 0.80	0.2
	MaxRate	最大入渗率/(mm/h)	25 ~ 80	50
Horton模型	MinRate	最小入渗率/(mm/h)	0 ~ 10	5
	Decay	衰减系数/h ⁻¹	2 ~ 7	5
管道	Con-roughness	管道曼宁系数	0.011 ~ 0.022	0.013

2.3.3 CHHM 构建

同样地，为保证与 StoSWMM 和 2DHM 的可比性，CHHM 的参数设置也保持一致。整体上，CHHM 采用与 SWMM 相同的方法计算地表产汇流及管网汇流；只有当节点水位超过地面高程产生溢流时，激活地表二维水力模块对溢流区域进行精细化积水模拟。子汇水区由透水区(绿地、裸地)和不透水区(道路、建筑)组成，其参数与 StoSWMM 和 2DHM 保持一致(表 1)。二维网格划分、地下管网及检查井参数亦保持一致，但二维网格不直接接受降雨输入，其计算只考虑节点溢流量作为输入。同时，二维水力模块与溢流节点的交互同样采用横截堰实现，参数设置与 StoSWMM 和 2DHM 一致。本文同样采用 InfoWorks ICM 软件完成 CHHM 的构建与计算，其中地表二维网格划分与 2DHM 完全相同。

3 结果分析与讨论

3.1 地表淹没结果对比

为便于 3 种模型在统一空间尺度上进行直接对比，StoSWMM 的模拟结果在完成子汇水区尺度的计算后，投影到与 2DHM 和 CHHM 相同的地表网格上。图 6 给出了 4 场降雨情景下 3 种模型模拟得到的最大积水淹没分布结果。从整体结果看，以 2DHM 模拟结果为基准，StoSWMM 和 CHHM 均能较好地再现研究区域的淹没格局，尤其是淹没最严重的区域 I。该区域整体地势较低，为排水系统的主要出口。然而，在局部区域 II 和 III 处，不同模型在淹没范围与水深分布上表现出一定差异，见图 6 中不同模型的并列结果展示。由于这 2 处区域管网缺失且远离周边检查井，CHHM 的模拟效果相对受限。相反，StoSWMM 依托虚拟水池网络能够捕捉全域的积水演变，在管网缺失区域的模拟结果仍与 2DHM 接近。但需注意，StoSWMM 通过空间差值实现地表水深换算，未能完全体现真实的地表汇流过程，导致沿道路存在一定的非连续性积水现象。总体而言，StoSWMM 在全域积水空间分布特征的刻画上与 2DHM 差异较小，而 CHHM 在管网缺失及远离检查井区域的适用性有限。

进一步将 StoSWMM 与 CHHM 的地表网格点最大水深结果与 2DHM 模拟结果进行比较(图 7)。结果显示，在不同降雨情景下，StoSWMM 与 2DHM 在最大水深空间分布的整体刻画上差异较小，而 CHHM 在部分区域存在一定离散特征。从统计结果来看，StoSWMM 与 2DHM 的相关系数(R^2)为 0.78 ~ 0.86，而 CHHM 为 0.51 ~ 0.72。针对最大水深大于 0.3 m 的地表网格点进行统计发现，StoSWMM 与 2DHM 的相关性进一步提高(R^2 为 0.86 ~ 0.93)，而 CHHM 在该类区域的相关性降低(R^2 为 0.07 ~ 0.30)。这一差异主要与模型对地表积水形成机制的处理方式有关：CHHM 以节点溢流作为触发条件，难以反映远离检查井或管网缺失区域的积水演变；而 StoSWMM 通过虚拟水池网络显式描述子汇水区尺度的蓄水与交换过程，在机制层面上能够补充上述不足。

此外，选取 20230717 降雨和 50 年一遇降雨情境下区域 I 的 P1(最大水深点)和 P2(水深较大点)以及区域



图 6 不同降雨情景下 3 种模型的最大积水淹没分布结果

Fig. 6 Maximum inundation distribution results of the three models under different rainfall scenarios

II 的 P3(局部洼地区域)进行积水过程对比(图 8)，点位位置见图 6(a)。可以看出，StoSWMM 在 3 个点位的模拟结果均与 2DHM 拟合良好，纳什效率系数(E_{NS})为 0.89~0.98，能够较好地再现积水过程的动态变化；而 CHHM 的模拟效果相对较差，特别是在 20230717 场次实测降雨下，P1 和 P2 处的 E_{NS} 仅分别为 0.36 和 0.23，在管网缺失的洼地 P3 处更是无法再现积水过程。值得注意的是，虽然 CHHM 在 P1 和 P2 处对积水峰值的估计相

对准确，但其积水启动时间明显滞后于 StoSWMM 与 2DHM。这一偏差源于 CHHM 将“节点溢流”作为地表淹没的触发条件，与实际产汇流机理存在差异，导致预警失效。相比之下，StoSWMM 依托虚拟水池网络结构，能够在产流形成后更早地模拟低洼区的积水演变，更符合真实的城市洪涝过程。

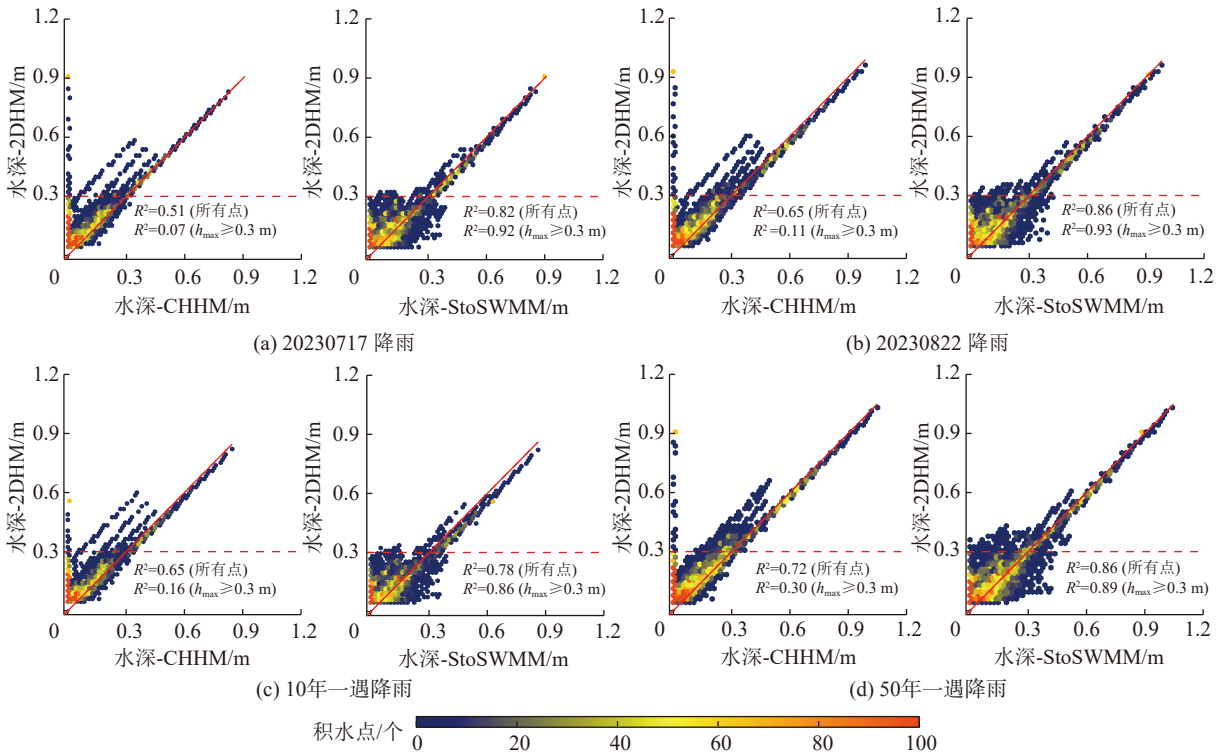


图 7 不同降雨情景下地表网格最大积水水深对比

Fig. 7 Comparison of maximum surface inundation depths of grid cells under different rainfall scenarios

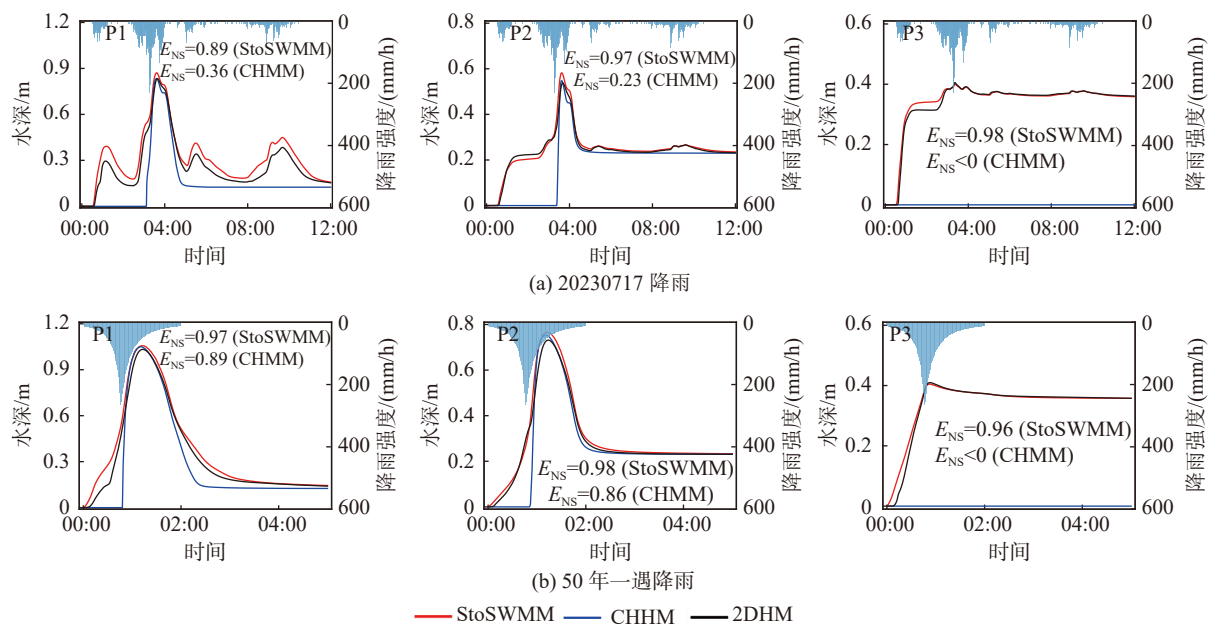


图 8 不同降雨情景下 P1、P2 和 P3 处积水过程对比

Fig. 8 Comparison of inundation processes at P1, P2, and P3 under different rainfall scenarios

3.2 模型计算效率对比

在一台配备 CPU 为 Core™ i9-12900KF (3.20 GHz)和 32.0 GB 内存的计算机上,对 4 场降雨事件分别进行了数值模拟。表 2 给出了 3 种模型的计算耗时对比结果。可以看出,在相同模拟历时下,CHHM 的计算时间约为 StoSWMM 的 40 倍以上,而 2DHM 则超过 StoSWMM 的 300 倍,计算效率差异较为明显。具体而言,StoSWMM 在 4 场降雨下的模拟耗时仅分别为 5、4、2 和 2 s,能够实现对不同降雨历时暴雨洪涝事件的秒级响应;相比之下,CHHM 和 2DHM 的计算效率明显偏低,难以满足快速预测与调度的需求。因此,StoSWMM 在本研究情景下兼顾了模拟结果一致性与计算效率,在城市洪涝快速模拟中表现出一定的应用潜力。

表 2 不同模型对各降雨事件的计算效率对比
Table 2 Comparison of computational efficiency of different models across rainfall events

降雨事件	模拟历时/min	计算耗时/s			计算效率提升/倍	
		StoSWMM	CHHM	2DHM	StoSWMM/CHHM	StoSWMM/2DHM
20230717	720	5	206	1 641	41	328
20230822	600	4	181	1 434	45	359
10年一遇	300	2	111	545	56	273
50年一遇	300	2	125	647	63	324

综上,StoSWMM 在保持较高精度的同时显著提升了计算效率,兼具时效性与适用性,能够为城市洪涝快速模拟与风险管理提供有效支撑。但需指出,StoSWMM 采用空间差值方法近似地表水动力过程,在局部地表积水分布上仍存在一定偏差;同时,本文主要通过多模型对照分析验证 StoSWMM 的建模思路与机制合理性,尚未引入系统的实测积水或溢流监测数据开展率定与验证,相关结论应限定在方法论与案例分析层面。未来研究可进一步引入改进的水动力参数化方案,并结合实测数据检验模型在真实洪涝场景中的适用性与可靠性,以提升模型在工程应用中的支撑能力。

4 结 论

本文针对城市洪涝模拟中计算效率与空间精度难以兼顾的问题,提出并构建了基于虚拟水池网与 SWMM 耦合的 StoSWMM,并以河海大学江宁校区的排水系统为研究对象,与物理机制较为明确的地表二维水动力模型和工程中常用的基于检查井溢流的耦合水文水动力模型进行了对比分析。主要结论如下:

- (1)在整体淹没格局刻画方面,StoSWMM 与 2DHM 的模拟结果表现出较好一致性,其网格水深相关系数为 0.78~0.86;在积水较为严重的区域(最大水深>0.3 m),相关性进一步提高至 0.86~0.93;受模型机制差异影响,CHHM 在管网缺失区域的积水演变刻画上表现出一定差异,其相关系数为 0.07~0.30。
- (2)在典型点位积水过程刻画方面,StoSWMM 与 2DHM 均能较好地反映积水启动及演变过程的时序特征;CHHM 在部分情景下对积水启动过程的响应相对滞后,尤其在管网缺失区域,体现了模型结构与假设条件对局部洼地积水过程刻画的影响。
- (3)在计算效率方面,StoSWMM 优势突出。在相同硬件条件下,StoSWMM 的计算耗时仅约为 CHHM 的 1/40、2DHM 的 1/300,具备秒级响应能力,在城市暴雨条件下展现出用于快速模拟与过程分析的潜在适用性。

参考文献:

[1] 宋利祥,徐宗学.城市暴雨内涝水文水动力耦合模型研究进展[J].北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(5):581-587.
(SONG L X, XU Z X. Coupled hydrologic-hydrodynamic model for urban rainstorm waterlogging simulation: recent advances[J]. Journal

- of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 581-587. (in Chinese))
- [2] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (WANG Z Y, YAO C, DONG J L, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 17-22. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] SHEN Y X, JIANG C B. A comprehensive review of watershed flood simulation model[J]. *Natural Hazards*, 2023, 118(2): 875-902.
- [5] 赵刚, 徐宗学, 庞博, 等. 基于改进填洼模型的城市洪涝灾害计算方法[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 20-30. (ZHAO G, XU Z X, PANG B, et al. Estimation of urban flooding processes based on enhanced inundation model[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1): 20-30. (in Chinese))
- [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 Z X, YE C L. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [7] 李东来, 许钰, 侯精明, 等. 精细管网资料缺失城区雨洪过程近似模拟方法[J]. 水科学进展, 2024, 35(6): 960-971. (LI D L, XU Y, HOU J M, et al. Approximate simulation method for stormwater process in urban areas with missing data of fine pipe network[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(6): 960-971. (in Chinese))
- [8] HOU J, KANG Y, HU C, et al. A GPU-based numerical model coupling hydrodynamical and morphological processes[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2020, 35(4): 386-394.
- [9] HU R, FANG F, SALINAS P, et al. Numerical simulation of floods from multiple sources using an adaptive anisotropic unstructured mesh method[J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 123: 173-188.
- [10] 张红萍, 郝晓丽, 胡昌伟, 等. 城市暴雨洪涝多尺度分层嵌套模拟技术[J]. 水科学进展, 2023, 34(4): 510-519. (ZHANG H P, HAO X L, HU C W, et al. A hierarchically nested multi-scale modeling technique for urban pluvial floods[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(4): 510-519. (in Chinese))
- [11] 宋晓猛, 徐楠涛, 张建云, 等. 中国城市洪涝问题: 现状、成因与挑战[J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 357-373. (SONG X M, XU N T, ZHANG J Y, et al. Urban flooding in China: current status, causes and challenges[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3): 357-373. (in Chinese))
- [12] LIU C, HU C, ZHAO C, et al. Research on urban storm flood simulation by coupling K-means machine learning algorithm and GIS spatial analysis technology into SWMM model[J]. *Water Resources Management*, 2024, 38(6): 2059-2078.
- [13] 李建柱, 李磊菁, 冯平, 等. 基于深度学习的雷达降雨临近预报及洪水预报[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 673-684. (LI J Z, LI L J, FENG P, et al. Radar rainfall nowcasting and flood forecasting based on deep learning[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(5): 673-684. (in Chinese))
- [14] 周正正, 徐嘉言, 刘曙光, 等. 基于时空聚类的上海内涝积水时空分布规律[J]. 水科学进展, 2025, 36(2): 307-319. (ZHOU Z Z, XU J Y, LIU S G, et al. Spatiotemporal distribution patterns of urban waterlogging in Shanghai based on spatiotemporal clustering analysis[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(2): 307-319. (in Chinese))
- [15] 侯精明, 潘鑫鑫, 陈光照. 基于 AI 的洪涝过程快速模拟预报方法及应用[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(2): 1-7. (HOU J M, PAN X X, CHEN G Z. AI-driven rapid simulation and forecasting techniques for flooding processes and their practical application[J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(2): 1-7. (in Chinese))
- [16] YANG F, DING W, ZHAO J, et al. Rapid urban flood inundation forecasting using a physics-informed deep learning approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 643: 131998.
- [17] 廖如婷, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 109-117. (LIAO R T, XU Z X, YE C L, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen Drainage Area based on SWMM and InfoWorks ICM models[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 109-117. (in Chinese))
- [18] 王小杰, 夏军强, 李启杰, 等. 考虑不同水流交换模式的城市洪涝一维二维双向耦合模型[J]. 水科学进展, 2024, 35(2): 244-255. (WANG X J, XIA J Q, LI Q J, et al. Study on the bidirectional coupling 1-D and 2-D model of urban flood based on different flow exchange modes[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(2): 244-255. (in Chinese))
- [19] 李小宁, 郑世威, 李宥霖, 等. 基于地表-管道-河道耦合模拟的城市内涝风险评估[J]. 水科学进展, 2024, 35(5): 738-751. (LI X N, ZHENG S W, LI Y L, et al. Urban Flood risk assessment based on integrated simulation of surface-pipe-river[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(5): 738-751. (in Chinese))

- [20] 周倩倩, 苏炯恒, 梅胜, 等. 1D/1D 及 1D/2D 耦合水动力模型构建方法研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 21-25. (ZHOU Q Q, SU J H, MEI S, et al. Research on coupled 1D/1D and 1D/2D hydrodynamic model construction method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 21-25. (in Chinese))
- [21] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 晋城市片区洪涝过程响应分析与马路行洪模拟 [J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 176-186. (SHU X Y, XU Z X, YE C L, et al. Flooding/waterlogging process response analysis and road flooding simulation in urban area of Jincheng City[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 176-186. (in Chinese))
- [22] 王小杰, 夏军强, 董柏良, 等. 基于汇水区分级划分的城市洪涝模拟 [J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 196-207. (WANG X J, XIA J Q, DONG B L, et al. Simulation of urban flood using the SWMM with the hierarchical catchment partition method[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 196-207. (in Chinese))
- [23] ROSSMAN L A. Storm Water Management Model reference manual: volume II: hydraulics [R]. Washington, DC: U S Environmental Protection Agency, 2017: 114-123.
- [24] 王船海, 郑世威, 李小宁, 等. 基于太湖流域模型的城市内涝过程高效模拟 [J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 462-473. (WANG C H, ZHENG S W, LI X N, et al. Efficient simulation of urban flood inundation based on Taihu Lake Basin model[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 462-473. (in Chinese))
- [25] 何沛英, 郑炎辉, 何艳虎. 不同汇水面积下城市雨洪模型 SWMM 参数敏感性分析 [J]. 人民珠江, 2024, 45(7): 1-9. (HE P Y, ZHENG Y H, HE Y H. Urban flooding model SWMM parameter sensitivity analysis under different catchment areas[J]. Pearl River, 2024, 45(7): 1-9. (in Chinese))

An efficient urban flood simulation method integrating SWMM with a virtual storage network*

HUANG Yuan^{1,2}, ZHOU Jun¹, ZHENG Feifei³, XIONG Junyi¹, ZHANG Zhao¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic System of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To address the challenge of balancing computational efficiency and simulation accuracy in urban flood modeling, a new method coupling a virtual storage network with the Storm Water Management Model (SWMM), termed StoSWMM, is proposed. In this method, a virtual storage network is constructed within the SWMM framework using subcatchments as basic units. Bidirectional water exchange within the surface system and between the surface and drainage system is simulated through weir structures, while surface water depth is efficiently estimated based on the difference between virtual storage water levels and DEM elevations, enabling full-process flood simulation. The Jiangning Campus of Hohai University is selected as the study area, where StoSWMM is compared with a two-dimensional hydrodynamic model (2DHM) and a coupled hydrologic-hydrodynamic model based on nodal overflow (CHHM). Results indicate that, under the study area and designed rainfall scenarios, StoSWMM shows good agreement with 2DHM in terms of inundation extent, maximum water depth, and flood evolution. In areas with maximum water depths exceeding 0.3 m, spatial correlation coefficients range from 0.86 to 0.93, whereas those of CHHM range from 0.07 to 0.30, reflecting differences in surface inundation representation mechanisms and spatial conceptualization among the models. Under identical hardware conditions, StoSWMM achieves second-level computational performance, with runtimes approximately 1/40 of CHHM and 1/300 of 2DHM. Fully built upon the open-source SWMM platform, StoSWMM maintains physical consistency while achieving high computational efficiency, providing a lightweight modeling approach for rapid urban flood simulation and scenario analysis.

Key words: flood simulation; urban flood model; SWMM; virtual storage network; computational efficiency

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No.2023YFC3208901) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (No. 226-2025-00245).