

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.03.009

城市洪涝模拟应用场景及相应技术策略

张红萍¹, 李敏¹, 贺瑞敏², 臧文斌¹, 刘舒¹, 胡春宏³

(1. 中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究中心, 北京 100038; 2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029; 3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 城市洪涝模拟是当前国内外城市防洪减灾领域研究的热点。现有城市洪涝模拟方面的评述, 主要依据城市洪涝过程或模拟计算方法进行分类讨论, 缺乏基于应用需求的视角。随着应用需求日益深入, 城市洪涝模拟应用场景日趋多样化和复杂化, 不同模拟应用场景下, 所关注的洪涝过程不同, 采用的技术策略及其重点和难点也不同, 脱离模拟应用场景很难辨析这些不同。依据模拟对象和关注变量, 归纳总结出城市洪涝模拟的3种典型应用场景, 即城市外洪模拟、城市雨洪模拟、城市内涝模拟; 针对这3种典型模拟应用场景, 分析相应的城市洪水演进模型、城市雨洪模型、半分布式暴雨内涝模型、全分布式暴雨内涝模型等4类模拟技术策略; 辨析在不同模拟应用场景和技术策略下, 不同模拟技术的组合方式及其特点与难点, 以期从应用需求的角度对城市洪涝模拟技术进行全面的梳理, 为城市洪涝模拟应用和研究提供一个新的视角。

关键词: 城市洪涝; 应用场景; 技术策略; 雨洪模拟; 暴雨内涝模拟; 半分布式模型; 全分布式模型

中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2022)03-0452-10

伴随着全球气候变化和快速城市化, 城市洪涝灾害引起了世界范围的广泛关注^[1-3]。城市洪涝模拟在城市雨洪规划和洪涝灾害风险评估及预报预警等方面, 发挥着越来越重要的支撑作用, 相关研究和应用日益广泛和深入。近一二十年来, 信息采集技术和计算能力的飞速发展, 进一步推动了城市洪涝模拟技术的快速发展。现有城市洪涝模拟方面的评述, 主要有2类。一类是依据城市雨洪过程, 分别对降雨产流、地表汇流、管网汇流等关键环节进行讨论, 例如, 胡伟贤等^[4]和臧文斌等^[5]分别做过这类评述。第二类是依据模拟计算方法对模型进行分类讨论。例如, Guo等^[6]将模型分成分管模型、基于浅水动力学的模型、基于水文地貌法的模型以及其他模型并分别进行评述; Qi等^[7]将模型分为水文模型、水动力模型和简化模型并分别进行评述; 徐宗学和叶陈雷^[8]从城市水循环特征与水文模型、城市洪涝过程与水动力模型、水文水动力耦合模型等3个角度进行评述。可以看出, 现有的评述, 主要依据城市洪涝过程或模拟计算方法进行分类讨论, 缺乏应用需求的视角。一方面, 随着应用需求的日益深化, 城市洪涝模拟应用场景日趋多样化和复杂化, 常常需要多过程、多方法的组合应用。不同应用场景下, 关注的过程不同, 采取的模拟技术及其耦合方式不尽相同, 应用的重点和难点也存在差别。另一方面, 很多模型软件平台功能也日趋综合化, 常常包含多个模块, 不同模块可以相互组合以满足不同的应用需求, 甚至还存在不同模型之间的组合应用。可以说, 脱离具体的模拟应用场景, 很难辨析这些不同过程、不同方法、不同模块或不同模型之间的组合方式及应用的重点和难点。

本文尝试从城市洪涝模拟应用需求出发, 归纳总结城市洪涝模拟的典型应用场景, 并基于典型应用场景, 分析相应的模拟技术策略及其特点, 以期从应用需求的角度对城市洪涝模拟技术进行梳理, 进而为城市洪涝模拟应用及相关研究提供一个全新的视角。

收稿日期: 2021-12-31; 网络出版日期: 2022-05-16

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220516.0951.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2240203); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(WH0145B032024)

作者简介: 张红萍(1976—), 女, 湖北红安人, 正高级工程师, 博士, 主要从事防洪减灾及城市洪涝模拟方面的研究。

E-mail: hpzhang@iwhr.com

通信作者: 胡春宏, E-mail: huch@iwhr.com

1 城市洪涝模拟典型应用场景

城市洪涝模拟应用场景种类繁多。本文尝试根据模拟的对象(即模拟的洪水来源)和模拟关注的变量来对其分类,因为这两者分别对应于模拟的输入和输出,由应用需求决定,并最大程度决定所采用的技术策略。根据模拟对象,城市洪涝模拟可以分为两大类:第一类是对城市外来洪水造成的淹没过程进行模拟,称为城市外洪模拟;第二类是对城市本地降雨造成的洪涝过程进行模拟。根据模拟所关注的变量,第二类模拟又可分为雨洪模拟和内涝模拟,前者重点关注出口断面径流过程和管渠内水动力特征;后者不仅关注出口断面径流过程和管渠内水动力特征,而且重点关注地表洪涝淹没过程。因此,根据模拟的对象和模拟关注的变量,城市洪涝模拟可以分为城市外洪模拟、城市雨洪模拟、城市内涝模拟3种典型应用场景,如表1所示。

表1 城市洪涝模拟典型应用场景
Table 1 Typical application scenarios of urban flood modeling

应用场景	应用需求	模拟对象	关注变量
城市外洪模拟	对城市外来洪水造成的淹没过程进行模拟,一般用于城市外来洪水风险评估	外来洪水	重点关注地表淹没水深、流速和时间等特征变量
城市雨洪模拟	对城市本地降雨造成的出口断面或管渠内的洪水过程进行模拟,主要用于城市雨洪工程的规划和运行管理	本地降雨	重点关注关键断面径流过程和排水管渠内的水头、流速等水动力特征变量
城市内涝模拟	对城市本地强降雨造成的管渠洪水过程以及地表淹没过程进行模拟,主要用于城市内涝风险评估及预警预报	本地降雨	关注出口断面径流过程和管渠内的水头、流速等水动力特征,同时重点关注地表淹没水深、流速和时间等特征变量

2 相应技术策略

2.1 城市外洪模拟

城市外来洪水,一般指江河湖海洪水或潮水突破堤岸造成城市淹没的过程。这类洪水的特征是洪水总量较大,演进速度快,洪水从堤岸漫溢或溃口处向前演进,存在明显的洪水前锋线。这类洪水模拟重点关注地表淹没水深、流速和时间等水动力特征变量,因此,技术策略上一般采用地表二维或地表二维与河道一维耦合的水动力学模型,这类用于城市外来洪水演进模拟的模型通常称为洪水演进模型^[9]。江河湖海洪水或潮水引起的城市洪水演进模拟,就城市内部而言,均可以概化成图1所示的形式。从江河湖海进入城市的洪水,常作为边界入流过程加入城市洪水演进模型中,有时耦合溃口演变模型或近海波浪模型等外部模型^[9-10]以实时计算入流过程。

洪水演进模型,基于一维或二维浅水方程组数值解,属于浅水动力学研究范畴,最早主要用于河道及洪泛区的洪水演进过程的模拟,相关技术发展起步较早,应用相对成熟。国外成熟的商业化洪水演进模型有MIKE11、MIKE21、HEC-RAS、TUFLOW等^[11-14],还有一些文献经常报道的模型如LISFLOOD、TRENT、SOBEK、JSFLOW等^[15-18]。国内自20世纪90年代以来,众多学者先后自主研发了一维、二维及其耦合的洪水演进模型^[19-22]。

城市洪水演进模型,是在上述河道及洪泛区洪水演进模型的基础上发展而来的。如前所述,城市外来洪水,尤其是堤坝溃决引起的洪水或风暴潮引起的海水入侵,洪水总量较大,演进速度快,因此,这类洪水模拟采用的网格尺度一般在10 m到百米量级甚至更大,对城市下垫面特性的处理也相对简略,早期甚至忽略城市下垫面特性,将城市当作一般洪泛区分进行模拟^[23]。随着研究的深入,逐步开始采用加大糙率法、容积率法等来模拟建筑物的阻水作用^[24]。另外,城市地下管网、土壤入渗等过程的影响较小,常忽略不计。

2.2 城市雨洪模拟

城市雨洪模拟主要用于城市雨洪工程规划和运行管理。城市雨洪工程,既包括传统的城市雨水管网和排水河渠,也包括近年来兴起的低影响开发技术^[25]或称海绵措施^[26-27]。这类模拟的对象是本地降雨,重点关注出口断面径流过程和管渠内的水位/水头、流速等水动力特征变量,因此,技术策略上一般采用降雨产汇流模型耦合管渠汇流模型,概化形式如图2所示。具体来说,这类模拟应用,首先将模拟区域划分成若干子流域或子汇水区,在每个子流域上应用降雨产汇流模型,得到子流域出口径流过程,然后将该径流过程加入排水管渠模型,再由管渠模型进行汇流演算。这类用于城市雨洪模拟的模型通常称为城市雨洪模型^[4,28]或城市降雨径流模型^[29]。这类模拟的本质是城市下垫面条件下的降雨产汇流模拟,早期属于水文学研究范畴。由于降雨产汇流以子流域为计算单元,这类模型可以称为半分布式模型^[30-31]。

根据上述技术策略,城市雨洪模型一般包括子流域降雨产汇流和管渠汇流等主要模块。其中,子流域降雨产汇流的理论和计算方法与流域水文模型中有关理论和方法一脉相承,不同的是,城市雨洪模拟需要考虑城市不透水面积的影响,每个子流域常划分成透水区和不透水区2种地类或更多地类^[29,32]。另外,城市雨洪模拟一般针对场次降雨,壤中流和地下径流影响相对较小,因此模拟重点关注地表径流,一般忽略壤中流和地下径流。管渠汇流,一般包含管网汇流和河渠汇流2个过程,简便起见,将两者合称管渠汇流。有些城市雨洪模型的管渠汇流模块,如SWMM模型^[33],可以同时兼顾管网水流和河网水流的模拟,也有很多模型将两者分开考虑。早期的管渠汇流演算仍然沿用水文学汇流演算方法^[34-35],随着技术的发展,当前普遍采用明满统一的一维水动力学模型^[36-37]。

城市雨洪模型发展历史悠久。国外已有多款成熟的的城市雨洪模型,如SWMM、MIKE URBAN、Wallingford ICM等^[38-40]。国内岑国平^[41]、张小娜等^[35]、Hu等^[42]也研制了这类模型。这类子流域降雨产汇流模型耦合管渠汇流模型的半分布式城市雨洪模型,建模过程相对简单,对数据依赖度低,计算速度快,能有效满足城市雨洪工程规划和运行管理应用需求,是当前城市雨洪模拟中普遍采用的技术策略。

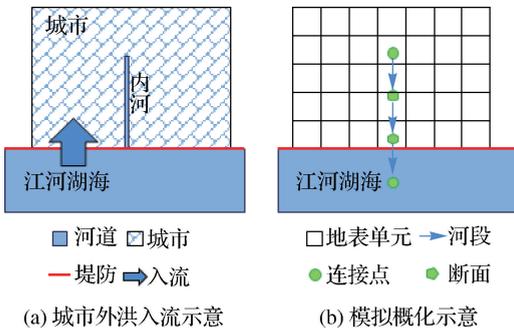


图1 城市外洪模拟概化示意

Fig. 1 Schematic for urban fluvial flood modeling

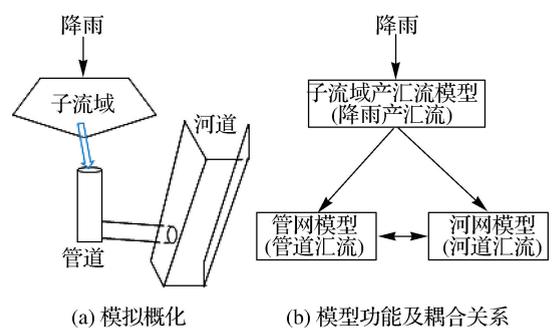


图2 城市雨洪模拟概化示意

Fig. 2 Schematic for urban stormwater modeling

2.3 城市内涝模拟

城市内涝模拟,主要用于城市内涝风险评估及预警预报等。引发城市内涝的一般是强降雨过程或称暴雨过程,因此,这类模拟也常称为暴雨内涝模拟或暴雨洪涝模拟等^[8,43-45],用于城市暴雨内涝模拟的模型称为暴雨内涝模型或暴雨洪涝模型^[46-48]。城市内涝模拟的对象也是本地降雨,本质上仍是城市下垫面条件下的降雨产汇流模拟,但与城市雨洪模拟不同的是,这类模拟不仅关注出口断面径流过程和管渠内水动力特征,而且重点关注地表甚至地下空间的洪涝淹没情况,因此,所采取的技术策略,存在明显不同。根据降雨产汇流模式的不同,当前城市暴雨内涝模拟存在半分布模式和全分布模式2种典型技术策略。

2.3.1 半分布模式

半分布模式一般包括子流域产汇流、管渠汇流和地表淹没等主要模块,各模块及其耦合方式可概化成如

图3所示形式。这类模拟应用的基本思路是: 首先将模拟区域划分成若干子流域, 并在子流域上计算降雨产汇流, 子流域出口径流加入排水管渠模型中, 由管渠模型进行汇流演算; 当且仅当排水管渠超载时, 驱动地表模型, 并将管渠超载水量作为点源加入地表模型, 再由地表模型完成地表洪涝淹没模拟。由于降雨产汇流以子流域为计算单元, 这类模型也可以称为半分布式暴雨内涝模型。

可以看出, 半分布式暴雨内涝模型, 实质是将传统城市雨洪模型与洪水演进模型直接耦合应用的一类模拟技术策略。其中, 子流域降雨产汇流和管渠汇流与前述城市雨洪模型完全相同, 无需赘述。地表淹没模型与前述洪水演进模型的技术原理完全相同, 但在应用技巧和难点上存在差别。这类模拟应用中, 地表洪水来源为管渠超载溢流, 洪量和流速一般相对较小, 洪水演进受局部地形影响显著, 因此要求地表网格尺度更小, 通常需要达到 10 m 量级甚至以下^[49]。同时, 由于地表建筑物尺度往往大于网格尺度, 加大糙率法或容积率法等建筑物处理方法难以适用, 通常采用挖空法或拔高法等方法^[50]。地表与管网之间的耦合, 是这类模拟应用和研究的重点, 两者之间以检查井为耦合连接点, 且存在单向和双向 2 种耦合模式^[51-53]。

这类半分布模式将已有成熟技术直接耦合应用, 技术路线相对成熟, 对管网数据的依赖度较低, 是当前国内外城市暴雨内涝模拟中最为普遍的模式。其中, 最典型的模式是将已有成熟的城市雨洪模型与洪水演进模型耦合应用, 例如, SWMM 与 TUFLOW 耦合^[54]、MIKE FLOOD 平台中的 MIKE Urban 与 MIKE 21 及 MIKE11 耦合^[55]、Infoworks ICM 平台中的降雨产汇流模型和管渠模型与地表模型的耦合^[56]等。另外, 由于 SWMM 模型开源便利性, 相当多的学者将 SWMM 模型与自主研发的地表二维模型进行耦合应用。例如, Hsu 等^[57]将 SWMM 模型与一个扩散波模型耦合; 黄国如等^[58]将 SWMM 模型与自主研发的地表二维水力模型耦合。

然而, 这类半分布模式物理机制上存在一定的不足。首先, 这类模式将降雨产汇流过程和地表洪涝过程分成 2 个相互独立的过程, 且地表洪水来源为管渠溢流, 因此, 只能模拟管渠漫溢造成的地表洪涝淹没过程。实际上, 暴雨引起的城市地表洪涝淹没不仅仅是由管渠漫溢造成的, 尤其是在超标准强降雨条件下, 降雨产汇流过程与地表洪涝淹没过程常常混合交织、难以分割。其次, 城市排水系统中, 雨水口和检查井的功能是不同的^[59], 而这类半分布式模拟应用中常忽略雨水口, 各模块之间基于检查井进行耦合连接, 与实际情况并不完全相符。最后, 城市下垫面及汇流关系复杂, 子流域的划分存在较大的主观性, 也是这类模拟应用的不确定性因素之一。

2.3.2 全分布模式

全分布模式一般包括地表模型和管渠模型等主要模块, 各模块及其耦合方式可概化成如图4所示形式。这类模型的基本原理是, 在地表二维水动力学模型的基础上, 将降雨及损失强度等作为源项加入二维浅水方程组中, 由地表模型同时完成地表径流演算和洪涝淹没计算, 且地表与管渠进行双向耦合。这类模型直接利用地表网格(或称栅格)作为降雨产汇流计算单元, 因此可以称为全分布式暴雨内涝模型^[30-31]。

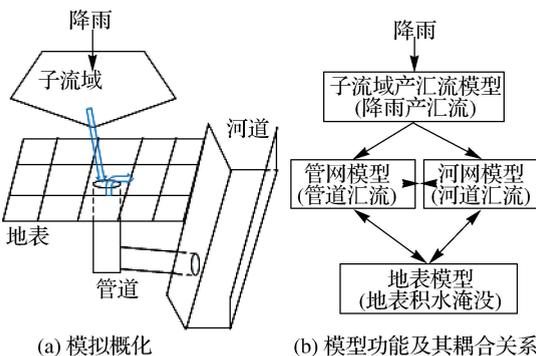


图3 半分布式暴雨内涝模拟概化示意

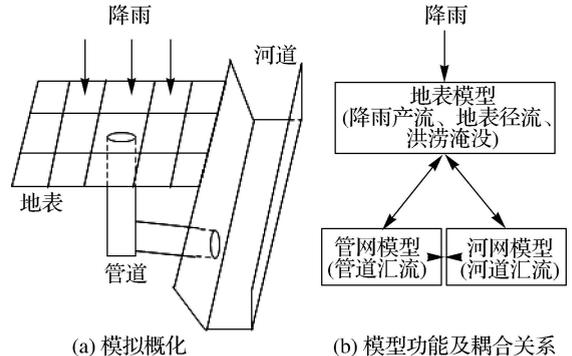


图4 全分布式暴雨内涝模拟概化示意

Fig.3 Schematic for semi-distributed urban pluvial flood modeling Fig.4 Schematic for fully distributed urban pluvial flood modeling

全分布式暴雨内涝模型中,地表网格既是降雨产汇流计算单元,也是地表洪涝淹没计算单元,因此,降雨产汇流过程和地表洪涝淹没过程统一,这与降雨形成地表径流及洪涝淹没的实际过程相符,较半分布式暴雨内涝模型具有更明确的物理机制。国内程晓陶等^[60]早在20世纪90年代就开始应用二维水动力学模型对城市暴雨内涝风险进行研究。近一二十年,随着高精度数据采集技术及计算能力的飞速发展,这类全分布式模型引起了越来越多的研究兴趣。国外已有这类商业化的模型FLO-2D及其应用案例^[61-62]。国内众多学者对这类模型进行了研究^[31,63],Zhang等^[59]和王静等^[64]在程晓陶等^[60]基础上发展了这类模型并已应用于国内多个城市。这类全分布模式依然存在诸多技术难点,归纳几点如下。

(1) 这类全分布模式中,地表模型同时承担地表径流模拟和洪涝淹没模拟的功能,这两者受局部地形影响更加显著,因此要求网格尺度更加精细,通常需要达到5 m甚至以下。这对数据条件和计算能力都是巨大的挑战,成为制约其实际应用的一个关键瓶颈。

(2) 基于网格单元的产流模式,还有待更多深入研究。现有的城市降雨产流理论和方法,都是以子流域为计算单元,空间尺度远大于地表网格单元。这些较大尺度上的理论和方法以及有关的经验参数,移植到米级尺度的地表网格单元上,空间尺度效应还有待更多检验。另外,现有大多数应用和研究中,一般以净雨强度作为地表模型的输入,实际上是简化了地表水量损失过程。

(3) 不同水动力学模型在地表径流模拟中的适用性也有待进一步比较研究。动力波模型在溃坝洪水演进模拟中具有激波捕捉的优势,在地表径流模拟研究中也取得了较好的效果^[65-66]。但降雨引起的地表径流属于薄层低速水流,干湿边界问题在空间和时间上广泛存在,削弱了动力波模型的优势。而且动力波模型计算时间成本高,实际应用仍然存在较大难度。比较而言,扩散波等简化模型在地表径流模拟中不仅具有相当的精度,且计算速度快、稳定性好,因而表现依然活跃。

(4) 地表与管网之间的耦合仍然是这类模拟的重点和难点。如前所述,半分布模式中各模块之间以检查井为耦合连接点;而全分布模式中,由于降雨完全分布于地表网格上,理论上要求地表与管网之间的耦合需要精细到雨水口,这对管网数据条件和雨水口水流计算精度均提出了更高的要求,还有待更多更精细的研究。

(5) 全分布模式中,建筑物的处理需要更多的技巧。在前述外洪演进模拟或管渠溢流淹没演进模拟中,一般只考虑建筑物阻水作用。在全分布式模式中,建筑物不仅是阻水障碍物,也是降雨产汇流单元,且大多数城市建筑物有专门的雨水收集系统,因此不能简单地应用挖空法或拔高法。

3 结论与展望

城市洪涝模拟采取何种技术策略,取决于模拟对象的特性和模拟关注的变量,同时还需要综合考虑数据条件和计算能力等多方面的因素。城市外洪模拟一般采用二维或一二维耦合的水动力学洪水演进模型。城市雨洪模拟一般采用子流域降雨产汇流模型耦合管渠汇流模型的城市雨洪模型。城市内涝模拟存在半分布模式和全分布模式2种技术策略,且两者均存在不同的技术难点,是当前城市洪涝模拟研究的重点和热点。

从发展路径看,上述典型应用场景和技术策略的发展存在一个由分到合的过程。具体的,城市外洪模拟受水动力学发展驱动,城市雨洪模拟受水文学发展驱动,两者最初独立发展,几无交集。随着技术的发展,城市雨洪模拟中管渠汇流从最初的水文学方法逐步发展成水动力学方法;洪水演进模型所采用的地表二维水动力学方法逐步用于降雨径流模拟。近一二十年,城市内涝模拟的兴起进一步推动了水文学方法和水动力学方法的交叉应用,水动力学方法在汇流演算方面逐步发挥主力作用,但降雨产流仍然离不开水文学的理论和方法,尤其是在全分布模式中,水文学方法和水动力学方法已经高度融合到同一地表网格单元上,两者相互补充、缺一不可。因此,不宜再以学科方法或计算方法来分类讨论城市暴雨内涝模型。

对比可以看出,不同应用场景和不同的技术策略中,同一模拟技术应用的重点和难点不同。城市外洪模拟和内涝模拟中都采用地表二维水动力学模型,但由于模拟的洪水来源及特性不同,地表模型的网格尺度和

建筑物的处理技巧存在差别;全分布式暴雨内涝模拟中地表模型的干湿边界问题更加突出。在城市雨洪模拟和内涝模拟中都涉及降雨产汇流模拟,但存在子流域和地表网格2种不同的计算单元,且两者存在不同的技术难点。另外,对同一洪涝过程,不同技术策略下概化方式也存在不同,半分布模式将暴雨内涝概化为4个关键过程,全分布模式将其概化为3个关键过程。因此,只有结合具体的模拟应用场景和技术策略,才能更好地辨析不同模型和不同模拟技术的特点和难点。

除了上述3种典型的模拟应用场景外,实际应用中还存在很多混合模拟,如城市外河洪水与本地降雨遭遇的混合模拟、沿海城市风暴潮引起的本地强降雨与海水入侵的混合模拟等。这些混合模拟一般是将上述典型技术策略进行再组合应用。除了上述基于水文、水动力方法的模拟技术策略外,还有一些基于快速模型的模拟技术策略,以及近年来出现的基于人工智能和大数据驱动的全新模拟技术策略,值得关注。

城市洪涝模拟研究方兴未艾,在以下3个方面亟待更多的关注和长足的发展。

(1) 亟需构建高质量基础数据库。客观讲,中国大多数城市现有的基础数据距离精细化模拟需求还有较大的差距。如地表数据对局部微地形表达不足,商业区和居民区的管网数据难以收集,已有的数据也存在多源数据坐标系不统一、关键属性值缺失等问题,严重制约了城市洪涝模拟实际应用效果。迫切需要建立相应的数据标准,完善数据内容,提升数据质量,构建高质量基础数据库。

(2) 大力发展高性能计算技术。城市洪涝模拟尤其是暴雨内涝模拟计算量巨大,迫切需要提升计算效率。当前对单一过程的并行加速计算已经取得了一定的进展,但能够同时耦合多过程并考虑复杂工程调度的并行计算距离实际应用还有较长的路。发展高性能计算是未来城市洪涝模拟应用的关键支撑技术。

(3) 关于模型的检验和验证。当前由于缺乏可靠的实测数据,城市洪涝模拟的验证仍然是一个难题。近年来,已有一些研究利用视频图像等途径获取城市洪水淹没信息,但数量和质量仍然难以满足应用需求。需要不断发展新的监测技术和手段,开展更多的现场监测和物理试验,收集可靠的实测数据,不断检验和验证城市洪涝模拟模型。

致谢: 本文得到了美国克拉克森大学的吴伟明教授、中国水利水电科学研究院程晓陶正高级工程师和柴福鑫正高级工程师、西安理工大学侯精明教授等的指导和帮助,特此感谢!

参考文献:

- [1] 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))
- [2] BERNDTSSON R, BECKER P, PERSSON A, et al. Drivers of changing urban flood risk: a framework for action[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 240: 47-56.
- [3] 宋晓猛,张建云,贺瑞敏,等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 153-165. (SONG X M, ZHANG J Y, HE R M, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 153-165. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 臧文斌,赵雪,李敏,等. 城市洪涝模拟技术研究进展及发展趋势[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(11): 1-13. (ZANG W B, ZHAO X, LI M, et al. Research progress and development trend of urban flood simulation technology[J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30(11): 1-13. (in Chinese))
- [6] GUO K H, GUAN M F, YU D P. Urban surface water flood modelling: a comprehensive review of current models and future challenges[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(5): 2843-2860.
- [7] QI W C, MA C, XU H S, et al. A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies[J]. Natural Hazards, 2021, 108(1): 31-62.
- [8] 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))
- [9] 马利平, 侯精明, 张大伟, 等. 耦合溃口演变的二维洪水演进数值模型研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(10): 1253-1267. (MA L P, HOU J M, ZHANG D W, et al. Study on 2D numerical simulation coupling with breach evolution in flood propagation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(10): 1253-1267. (in Chinese))
- [10] SUH S W, KIM H J. Simulation of wave overtopping and inundation over a dike caused by typhoon chaba at marine city, Busan, Korea[J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 85: 711-715.
- [11] DHI. MIKE 1D, DHI simulation engine for 1D river and urban modelling, reference manual[M/OL]. [2021-09-01]. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Water_Resources/MIKE_1D_reference.pdf.
- [12] DHI. MIKE 21 Flow model FM, hydrodynamic and transport module, scientific documentation[M/OL]. [2021-09-20]. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/MIKE_21_Flow_FM_Scientific_Doc.pdf.
- [13] RANGARI V A, UMAMAHESH N V, BHATT C M. Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2-D[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2019, 5(4): 1839-1851.
- [14] BMT. TUFLOW classic/HPC user manual build 2018-03-AD[M/OL]. [2021-12-01]. https://downloads.tufLOW.com/_archive/TUFLOW/Releases/2018-03/TUFLOW%20Manual.2018-03.pdf.
- [15] BATES P D, de ROO A P J. A simple raster-based model for flood inundation simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 236(1/2): 54-77.
- [16] VILLANUEVA I, WRIGHT N G. Linking Riemann and storage cell models for flood prediction[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 2006, 159(1): 27-33.
- [17] DHONDIA J F, STELLING G S. Sobek one dimensional-two dimensional integrated hydraulic model for flood simulation-its capabilities and features explained[C]//LIONG, PHOON, BABOVIC. 6th International Conference on Hydroinformatics. Singapore: World Scientific, 2004: 1867-1874.
- [18] BRADBROOK K F, LANE S N, WALLER S G, et al. Two dimensional diffusion wave modelling of flood inundation using a simplified channel representation[J]. *International Journal of River Basin Management*, 2004, 2(3): 211-223.
- [19] 程晓陶, 杨磊, 陈喜军. 分蓄洪区洪水演进数值模型[J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(1): 34-40. (CHENG X T, YANG L, CHEN X J. Numerical model of flood propagation in detention basin[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(1): 34-40. (in Chinese))
- [20] 张大伟, 程晓陶, 黄金池, 等. 基于 Godunov 格式的溃坝水流数学模型[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 167-172. (ZHANG D W, CHENG X T, HUANG J C, et al. Numerical model for dam-break flow based on Godunov method[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 167-172. (in Chinese))
- [21] 张防修, 韩龙喜, 王明, 等. 主槽一维和滩地二维侧向耦合洪水演进模型[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 560-566. (ZHANG F X, HAN L X, WANG M, et al. Flood routing model with lateral coupling one-dimensional channel and two-dimensional floodplain simulation[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 560-566. (in Chinese))
- [22] 陈文龙, 宋利祥, 邢领航, 等. 一维-二维耦合的防洪保护区洪水演进数学模型[J]. *水科学进展*, 2014, 25(6): 848-855. (CHEN W L, SONG L X, XING L H, et al. A 1D-2D coupled mathematical model for numerical simulating of flood routine in flood protected zone[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 848-855. (in Chinese))
- [23] 黄金池, 何晓燕. 溃坝洪水的统一二维数学模型[J]. *水利学报*, 2006, 37(2): 222-226. (HUANG J C, HE X Y. Unified 2D numerical model for simulating dam break wave propagation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(2): 222-226. (in Chinese))
- [24] 周浩澜, 陈洋波. 城市化地面二维浅水模拟[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 407-412. (ZHOU H L, CHEN Y B. 2D shallow-water simulation for urbanized areas[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 407-412. (in Chinese))
- [25] 侯精明, 李东来, 王小军, 等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 45-55. (HOU J M, LI D L, WANG X J, et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 45-55. (in Chinese))
- [26] 张建云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 793-799. (ZHANG J Y, WANG Y T, HU Q F, et al. Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China[J]. *Advances in Wa-*

- ter Science, 2016, 27(6): 793-799. (in Chinese))
- [27] 刘家宏, 王佳, 王浩, 等. 海绵城市内涝防治系统的功能解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 611-618. (LIU J H, WANG J, WANG H, et al. Effectiveness of urban inundation control system in sponge city construction[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(4): 611-618. (in Chinese))
- [28] 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. (SONG X M, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: urban stormwater modeling and management[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 752-764. (in Chinese))
- [29] 王义成, JUNICHI Y. 城市降雨径流模型: 修正 RRL 法及其改进[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6): 19-23. (WANG Y C, JUNICHI Y. An urban rainfall-runoff model: modified RRL method and its improvement[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(6): 19-23. (in Chinese))
- [30] 吕允刚, 杨永辉, 樊静, 等. 从幼儿到成年的流域水文模型及典型模型比较[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1331-1337. (LYU Y G, YANG Y H, FAN J, et al. Development and comparison of catchment hydrological models: from infancy to maturity[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(5): 1331-1337. (in Chinese))
- [31] HOU J M, GUO K H, LIU F F, et al. Assessing slope forest effect on flood process caused by a short-duration storm in a small catchment[J]. Water, 2018, 10(9): 1256.
- [32] 刘家宏, 梅超, 向晨瑶, 等. 城市水文模型原理[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 1-5, 13. (LIU J H, MEI C, XIANG C Y, et al. Principles of urban hydrological model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 1-5, 13. (in Chinese))
- [33] ROSSMAN L A. Storm water management model reference manual volume II - hydraulics[M/OL]. [2021-12-20]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=PlooS9AS.pdf>.
- [34] 岑国平, 沈晋, 范荣生. 马斯京根法在雨水管道流量演算中的应用[J]. 西安理工大学学报, 1995, 11(4): 275-279. (CEN G P, SHEN J, FAN R S. The application of Muskingum method to storm sewers flow routing[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1995, 11(4): 275-279. (in Chinese))
- [35] 张小娜, 冯杰, 刘方贵. 城市雨水管网暴雨洪水计算模型研制及应用[J]. 水电能源科学, 2008, 26(5): 40-42, 103. (ZHANG X N, FENG J, LIU F G. Development and application of storm flood computation model for urban rain pipe network[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(5): 40-42, 103. (in Chinese))
- [36] 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))
- [37] 张大伟, 向立云, 姜晓明, 等. 基于 Godunov 格式的排水管网水流数值模拟[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 911-921. (ZHANG D W, XIANG L Y, JIANG X M, et al. Numerical simulation of drainage network flows based on Godunov scheme[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(6): 911-921. (in Chinese))
- [38] US EPA. Storm water management model[EB/OL]. [2021-12-20]. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.
- [39] TAN K M, SEOW W K, WANG C L, et al. Evaluation of performance of Active, Beautiful and Clean (ABC) on stormwater runoff management using MIKE URBAN: a case study in a residential estate in Singapore[J]. Urban Water Journal, 2019, 16(2): 156-162.
- [40] INNOVYZE. InfoWorks ICM: integrated catchment modeling[EB/OL]. [2021-12-20]. <https://www.innovyze.com/en-us/products/infoworks-icm>.
- [41] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. 水利学报, 1990, 21(10): 68-75. (CEN G P. A model to simulate stormwater runoff in urban area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 21(10): 68-75. (in Chinese))
- [42] HU C, XIA J, SHE D X, et al. A new urban hydrological model considering various land covers for flood simulation[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126833.
- [43] 曾鹏, 穆杰, 喻海军, 等. 成都市中心城区暴雨内涝模拟及内涝特征分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(3): 232-239. (ZENG P, MU J, YU H J, et al. Simulation and characteristics analysis of rainstorm waterlogging in downtown

- area of Chengdu City[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2020, 18(3): 232-239. (in Chinese))
- [44] 李鹏, 徐宗学, 赵刚, 等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的城市暴雨内涝模拟: 以济南市为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1083-1092. (LI P, XU Z X, ZHAO G, et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: case study in Jinan City[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(6): 1083-1092. (in Chinese))
- [45] 刘伊萌, 杨赛霓, 王运涛, 等. 基于 CADDIES-2D 模型的北京城区暴雨洪涝模拟及验证分析[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(11): 107-110, 92. (LIU Y M, YANG S N, WANG Y T, et al. Flood simulation and verification in Beijing urban area based on CADDIES-2D model[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(11): 107-110, 92. (in Chinese))
- [46] 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 water logging simulation: recent advances[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2019, 55(5): 581-587. (in Chinese))
- [47] 陈靖, 李大鸣, 郝莹, 等. 分区层化立体多重天津城市暴雨内涝模型研究[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2019, 34(3): 367-376. (CHEN J, LI D M, HAO Y, et al. Study on a multi-level and modular model urban waterlogging model in Tianjin[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2019, 34(3): 367-376. (in Chinese))
- [48] 吴俊毅, 秦华鹏. 基于一二维耦合内涝模型的城市道路积水来源量化分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(4): 716-722. (WU J Y, QIN H P. Quantitative source analysis of waterlogging on urban roads based on a 1-D and 2-D coupling waterlogging model[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, 57(4): 716-722. (in Chinese))
- [49] HU R, FANG F, SALINAS P, et al. Unstructured mesh adaptivity for urban flooding modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 354-363.
- [50] SCHUBERT J E, SANDERS B F, SMITH M J, et al. Unstructured mesh generation and landcover-based resistance for hydrodynamic modeling of urban flooding[J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(12): 1603-1621.
- [51] YANG Y H, SUN L F, LI R N, et al. Linking a storm water management model to a novel two-dimensional model for urban pluvial flood modeling[J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2020, 11(4): 508-518.
- [52] CHANG T J, WANG C H, CHEN A S. A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 662-679.
- [53] 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.
- [54] PHILLIPS B C, YU S, THOMPSON G R, et al. 1D and 2D modelling of urban drainage systems using XP-SWMM and TUFLOW [C]//10th International Conference on Urban Drainage. [S.l.]: Copenhagen Denmark, 2005: 21-26.
- [55] CARDOSO M A, ALMEIDA M C, BRITO R S, et al. 1D/2D stormwater modelling to support urban flood risk management in estuarine areas: hazard assessment in the Dafundo case study[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2020, 13(4): e12663.
- [56] 黄国如, 罗海婉, 陈文杰, 等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. *水科学进展*, 2019, 30(5): 643-652. (HUANG G R, LUO H W, CHEN W J, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5): 643-652. (in Chinese))
- [57] HSU M H, CHEN S H, CHANG T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 234(1/2): 21-37.
- [58] 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))
- [59] ZHANG H P, WU W M, HU C H, et al. A distributed hydrodynamic model for urban storm flood risk assessment[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126513.
- [60] 程晓陶, 仇卫卫, 陈喜军. 深圳市洪涝灾害的数值模拟与分析[J]. *自然灾害学报*, 1995, 4(S1): 202-209. (CHENG X T, QIU J W, CHEN X J. Numerical simulation of flood hazard in Shenzhen City[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1995, 4(S1): 202-209. (in Chinese))
- [61] HE J, QIANG Y J, LUO H Y, et al. A stress test of urban system flooding upon extreme rainstorms in Hong Kong[J]. *Journal of*

Hydrology, 2021, 597: 125713.

- [62] FLO-2D SOFTWARE I. Flo-2D Pro version: two-dimensional flood routing model storm drain manual[M/OL]. [2021-12-20]. <https://flo-2d.com>.
- [63] 陈浩, 洪林, 梅超, 等. 基于 D8 算法的分布式城市雨洪模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(3): 335-340, 346. (CHEN H, HONG L, MEI C, et al. Distributed simulation of urban storm water based on D8 algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(3): 335-340, 346. (in Chinese))
- [64] 王静, 李娜, 程晓陶. 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1393-1400. (WANG J, LI N, CHENG X T. Improvement and application of numerical model for the simulation of flooding in urban area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1393-1400. (in Chinese))
- [65] CEA L, BLADÉ E. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications[J]. Water Resources Research, 2015, 51(7): 5464-5486.
- [66] XIA X L, LIANG Q H, MING X D, et al. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations[J]. Water Resources Research, 2017, 53(5): 3730-3759.

Application scenarios and corresponding technical strategies of urban flood modeling*

ZHANG Hongping¹, LI Min¹, HE Ruimin², ZANG Wenbin¹, LIU Shu¹, HU Chunhong³

(1. *Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 3. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: Urban flood modeling is a hot research topic in urban flood control and disaster mitigation around the world. Existing reviews on urban flood modeling are usually based on flooding process or calculation algorithms, but lacking a demand-oriented perspective. With the deepening demands on urban flood modeling, the application scenarios have become more and more complicated. Under various application scenarios, different processes are concerned, so new modeling technical strategies are needed, and different priorities and challenges are encountered. It is difficult to clarify these differences without considering the specific application scenario. According to modeling objectives and concerns, three typical application scenarios of urban flood modeling are deduced: modeling of urban fluvial/coastal floods, modeling of urban stormwater, and modeling of urban pluvial floods. Correspondingly, four technical strategies such as urban flood routing models, urban stormwater models, semi-distributed pluvial flood models and fully distributed pluvial flood models are developed specifically. Furthermore, different integrations of modeling technologies and their priorities, as well as the encountered challenges under different application scenarios and different technical strategies are also discussed. The present paper provides a comprehensive overview on urban flood modeling technologies from the viewpoint of application demands and hence provides a new perspective for urban flood modeling applications and researches.

Key words: urban flood; application scenario; technical strategy; urban stormwater modeling; pluvial flood modeling; semi-distributed model, fully distributed model

* The study is financially supported the National Natural Science Foundation of China (No. U2240203) and the Fundamental Research Funds of IWHR(No. WH0145B032024).