

面向计算时效的高密度城市暴雨洪涝管网降维模拟技术

袁寄望^{1,2}, 陈文龙¹, 赵铜铁钢², 张大伟¹, 李岚斌¹

(1. 水利部珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275)

摘要:针对高密度城市暴雨洪涝数值模拟精度与计算效率的突出矛盾,基于短历时强降水特点、快速产汇流特性以及精细化模拟的局限性和实际需求等现状,从整个流域系统出发,根据水量平衡和管道过流能力等效原理,对管网进行降维概化处理,给出了等效管道参数的计算方法,并以广州市猎德涌流域为例,采用实测内涝淹没水深、位置和检查井、河道的水位过程评估模型适用性。结果表明:基于管网降维概化的耦合模型模拟的猎德涌流域河道、检查井的水位动态变化过程的纳什效率系数均大于0.7,提出的管网降维概化方法合理;地表淹没水深的相对误差为8.93%,绝对误差为0.05 m,模拟速度较基于管网现状耦合模型提高了57%;基于管网降维概化的耦合模型模拟结果与实际情况较为吻合,能够较好地反映城市洪涝演进过程,具有良好的准确性和高效性。

关键词:高密度城市;暴雨洪涝;等效过流能力;管网降维模型;猎德涌流域

中图分类号:TV124

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)06-0069-09

Dimension reduction simulation technology of pipeline network in rainstorm floods of high-density city for computational timeliness//YUAN Jiwang^{1,2}, CHEN Wenlong¹, ZHAO Tongtiegang², ZHANG Dawei¹, LI Lanbin¹ (1. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China; 2. Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In view of the prominent contradiction between the accuracy and calculation efficiency of the numerical simulation of rainstorm floods in high-density cities, based on the characteristics of short-term heavy rainfall, the characteristics of rapid runoff generation and concentration, the limitations and actual needs of refined simulation and other current situations, starting from the whole basin system, according to the principle of water balance and the equivalent flow capacity of the pipeline, the dimension reduction generalization of the pipeline network was carried out, and the calculation method of the equivalent pipeline parameters was given. Taking the Liedechong River Basin, Guangzhou City, as an example and the applicability of the model was evaluated by using the measured waterlogging submergence depth, location, and the process water level of the manholes and river channels. The results show that the Nash efficiency coefficients of the coupled model based on pipeline network dimensionality reduction generalization in simulating the dynamic changes of water levels in river channels and manhole of the Liedechong River Basin are all greater than 0.7. The proposed pipe network dimensionality reduction generalization method is reasonable. The relative error of surface inundation depth is 8.93%, and the absolute error is 0.05 m. The simulation speed has increased by 57% compared to the coupling model based on the current situation of the pipeline network. The simulation results of the coupled model based on pipeline network dimensionality reduction generalization are in good agreement with the actual situation, and can better reflect the evolution process of urban floods, with high accuracy and efficiency.

Key words: high-density city; rainstorm flood; equivalent flow capacity; pipeline network dimension reduction model; Liedechong River Basin

随着全球气候变暖加剧和城市化进程不断推进,城市热岛和雨岛效应逐渐增强^[1-2]。极端暴雨频发,强度增加,同时天然雨洪调蓄功能减弱,地表径

流系数和径流量增大^[3],防洪排涝能力不足,导致城市洪涝灾害问题日益严峻。例如,2016年武汉“7·6”暴雨^[4]、2020年广州“5·22”暴雨^[5]、

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001000)

作者简介:袁寄望(1992—),女,博士,主要从事城市暴雨洪涝模拟研究。E-mail:yjw_2019060339@163.com

通信作者:陈文龙(1977—),男,正高级工程师,硕士,主要从事城市洪涝灾害防治研究。E-mail:longyanclw@163.com

2021年郑州“7·20”暴雨^[6]。其中,高密度人口、经济的粤港澳大湾区洪涝灾害尤为凸显,严重影响了社会公共安全和经济发展^[7-9]。面对城市洪涝灾害特点的不断变化,如何快速把握城市洪涝特性的发展趋势,是社会各界专家亟须解决的问题。洪涝数值模拟作为预测分析城市洪涝风险的有效措施,为雨洪控制工作和应急决策提供了重要的支撑,目前城市暴雨洪涝模拟相关的原理、模型和应用等方面已有大量研究^[10-13]。城市暴雨洪涝模拟的精度与效率是模拟中的关键问题,为平衡计算时间和计算精度,学者采取了多种技术手段,而多尺度数值模拟是一种常用方法。侯精明等^[14]建立了一套具有层次拓扑关系的结构化非均匀网格划分模型,并与基于GPU加速的高分辨率数值模型相结合模拟地表水流动过程。张红萍等^[15]提出了一种城市暴雨洪涝多尺度分层嵌套模拟技术,该模型是在地表二维模型精细网格的基础上,叠加大尺度计算单元,实现分层嵌套,实时切换。许继军等^[16]采用两种不同尺度分布式水文模型之间的空间嵌套方法模拟了大流域水文过程,该方法实质上是一种多尺度网格嵌套技术。周建中等^[17]构建了一种具有层次拓扑关系的自适应网格模型,模拟了水库溃坝洪水演进,认为该模型计算时间更短,精度较高。Nash等^[18]自主研发了一种多尺度网格嵌套的水动力模型,用于模拟由外部洪水造成的洪涝淹没演进,结果表明其提出的模型具有较好的模拟效果。Hénonin等^[19]提出了不同尺度的网格嵌套技术,对2012年北京市暴雨洪涝过程进行模拟,认为对整个地区采用10m网格能够快速获取区域淹没情况。上述多尺度耦合或网格嵌套技术在一定程度上能够缓解城市暴雨洪涝模拟过程中计算精度对计算效率带来的压力,但模型计算效率仍然有较大的提升潜力。

考虑到高密度城市的降雨历时短、雨强大、致灾快,精细化数值模拟受限于基础数据的可获得性和可靠性以及内涝等级划分上淹没水深阈值跨度大等现实情况,数值模拟技术在满足模拟精度实际应用需求的基础上,更应该关注模拟的时效性。由于地表模型和管网模型是影响计算效率的两个主要模块,网格过细和管网过密虽能提高模拟精度,但对模型计算效率和结果展示带来巨大压力。因此,本文为兼顾模拟精度和计算效率的两方面要求,根据地表水动力模型和管网模型的计算原理与特点,通过网格空间嵌套和管网降维概化模式建立耦合模型,在广州市猎德涌流域进行实例应用,评估模型适用性,以期城市暴雨洪涝的快速预报提供技术支撑。

1 模型概化模式和构建方法

1.1 流域系统概化模式

基于高密度城市降雨历时短、致灾快的特点以及模型精度的实际需求,暴雨洪涝模拟应以“精度适需、计算高效”为核心的构建原则。为缓解数值模拟精度与计算效率、数据源可获得性与可靠性之间的突出矛盾,本文针对一个完整流域的水文水动力耦合模型包含的计算部分,综合不同计算部分的原理与特点,通过线-面结合的概化模式实现多目标的计算。其中,线-面概化模式体现在流域系统产汇流不同环节的概化。对于地表(面)坡面产汇流部分,地表网格是精细化水文产流和水动力学地表精细化汇流计算的基本单元;对于管道(线)汇流计算部分,支管汇水区和干管汇水区是水文产汇流计算的基本单元。网格粗细、管道段的多少决定模型的计算精度,同时影响模型的计算量,本文提出线-面结合的概化方法,根据模拟区域、关注对象对精细化程度要求,采取计算单元网格粗中有细、管网疏中有密的建模方式,合理减少模型计算量,提高计算效率。

基于陈文龙等^[20]提出的“流域树”概念,以流域为单元,依据地形、城市海绵、地下排水管网分布情况进行排水分区。地势较高或排水能力较强的区域不易发生内涝,这类风险较小的区域是重要的水文响应单元,但不需要精细化的水动力模拟计算。该类区域采用粗网格离散进行降雨产汇流计算,同时根据管网的联通性和水流流向,对管网模型进行降维概化处理。降维概化包括两方面:一是根据管道进出口水量平衡原理,在下垫面条件相同的汇水区域减少管道数量;二是根据过流能力等效原理,当排水片区出现多种下垫面类型时,将相同下垫面汇水区的几根并行管道合并为一根,然后再将合并管道进行串联。局部低洼处或排水排涝系统超载处为模型重点关注区域,保持管网现状,在有条件的情况下,尽可能细化、校准管网数据,并采用细网格进行精细化地表面积水淹没模拟。从精细解算和高效建模的角度出发,通过不同处理方式的共同作用,在保证模拟精度需求的基础上,提高模型计算效率。流域结构及管网概化示意图如图1所示。

1.2 模型组成

以MIKE模型为基础,基于模型之间实质的物理过程和机制的水流交换方式,构建水文水动力耦合模型,该模型包括地表模型、管网模型、河道模型等模块。其中,管网模型包含了降雨径流模块,可以提供连续水文模型计算降雨入渗过程。

水文模型用于降雨产流计算和坡面汇流计算。

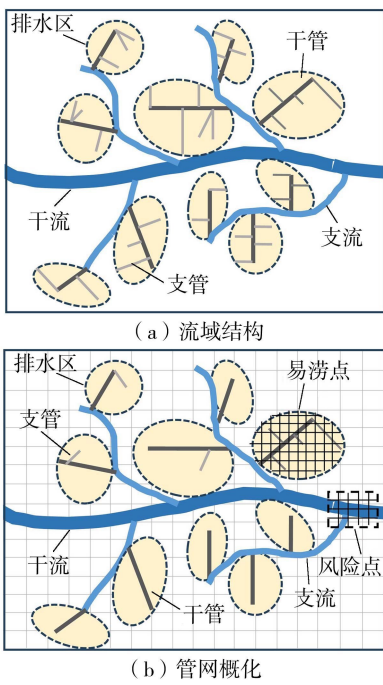


图 1 流域结构及管网概化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of watershed structure and pipeline network

其中,降雨产流是指降雨经过蒸发、植物截留、填洼、下渗等损失转化为净雨量的过程,产流计算采用 Horton 下渗曲线法;坡面汇流计算是基于运动波演算的非线性水库法。水文模型模拟得到的径流过程为管网模型提供边界条件。降雨径流模块中的动力波模型考虑了下渗因素,物理机制明确,具有较高的可靠性和准确度。

地表模型用来模拟平面二维自由表面流,可以准确模拟城市地表的水流变化,淹没过程计算采用 Navier-Stokes 方程的二维简化形式,即浅水方程组^[21],计算水流的运动状态。一维管网或河道模型主要通过圣维南方程组^[22]计算水流的运动状态,即质量守恒方程和动量守恒方程,采用六点隐式格式有限差分数值求解,适用于有压流和自由水面的垂向均匀流计算。地表的水流运动、管网和河道汇流模拟均为水动力学方法。

耦合模型指地表模型、管网模型、河网模型之间的相互耦合。其中,地表模型与管网模型之间仅通过节点进行水流交换,采用堰流和孔口出流公式计算;地表模型与河网模型之间的耦合用以计算地表与河道之间的水流交换,根据耦合位置和耦合处水流方向,采用互为提供边界法或宽顶堰流公式计算;管网模型与河网模型之间通过排水口进行水流交换,两者互为边界条件。

1.3 管网模型降维概化

1.3.1 管道水量平衡原理

以支流中一条支管为例,管网降维前后的连接

方式如图 2(a)所示,其中 N_1, N_2, \dots, N_n 为第 1、2、 \dots, n 个节点,管网通过节点与地表进行水流交换。管网降维概化方法适用范围为非重点关注区域,表明该区域节点不发生溢流或溢流量较少,可将存在少量溢流的节点近似等效为无溢流现象。因此,在一个完整的排水系统中,设第 1 个管道出流量为 Q_{12} ,第 2 个管道出流量 Q_{23} 应为 Q_{12} 与 N_2 汇流量 q_{N_2} 之和,则第 n 个节点处的流量应等于 N_1, N_2, \dots, N_n 的流量之和。将管网进行降维概化后,由于保证 N_1, N_2, \dots, N_n 的汇水区面积不变,第 n 个节点处的流量不发生变化,管网入流量与出流量也相等,管网模型降维前后同一管道的水流总体上处于平衡状态,如图 2(b)所示。管道流量平衡公式为

$$q_{N_1} + q_{N_2} + \dots + q_{N_n} = Q_{bn} = Q_{an} \quad (1)$$

式中: $q_{N_1}, q_{N_2}, \dots, q_{N_n}$ 分别为对应节点的汇流量; Q_{bn} 为管网现状模型第 n 个节点处入流量; Q_{an} 为管网降维模型第 n 个节点处入流量。

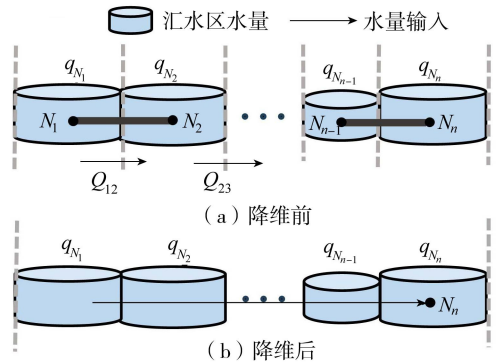


图 2 管网模型降维前后水量平衡示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water balance of pipeline network model before and after dimensionality reduction

1.3.2 管道过流能力等效原理

实际工程背景下,为减少管网模型的计算量,还可采用等效过流法将多根并行管道简化为单根管道,对并行管道进行等效过流能力建模,从而将复杂的枝状管网或环状管网概化为简单管网,如图 3 所示。管道过流等效降维是一种连续体的近似法,将其各个管道的收水能力合并为一根管道的收水能力。通过建立管道等效模型,合理表征多个并行管道的过流能力、管道中水流的运动状态等其他条件,合并后的管道参数即为等效管道参数。等效管道参数基于连续性方程、能量方程、水头损失理论,通过水力计算确定^[23]。合并管道过流能力为多个并行管道过流能力之和,单根并行管道与合并管道的粗糙系数、局部水头损失系数均相等,根据地形数据,确定合并管道的进水口高程和出水口高程,再根据并行管道的位置分布情况以及并行管道长度,进一步确定合并管道长度,最后确定管道直径。并行管

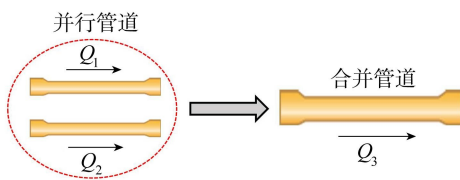


图3 管道过流能力等效降维示意图

Fig.3 Equivalent dimension reduction diagram of pipeline flow capacity

道过流能力的计算公式为

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\sum \lambda l/d + \sum \zeta}} A \sqrt{2gz_0} \quad (2)$$

其中 $\lambda = 8g/C^2$ $\sum \zeta = \zeta_{\text{进口}} + \zeta_{\text{出口}}$

式中: λ 为沿程水头损失系数; C 为谢才系数; l 为管道长度; d 为管径; ζ 为局部水头损失系数, $\zeta_{\text{进口}} = 0.5, \zeta_{\text{出口}} = 1.0$; A 为管道截面过流面积; z_0 为作用水头; g 为重力加速度。

1.4 模型构建方法

a. 根据历史上实际地表积水淹没情况或河道行洪能力不足区域,确定洪涝淹没易发生点位,针对这类区域,将地表二维模型的计算网格离散成细网格,进行高分辨率计算;其他非积水淹没区采用大尺度单元进行地表降雨产汇流计算。

b. 综合考虑地表地形、下垫面类型、建筑物位置分布以及排水关系等,合理缩减非淹没区域地下排水支管数量,对管网进行降维概化。一方面保证删减处所保留节点的地表产汇流面积与删减前一致,即保证同一节点的入水量、出流量不发生变化;另一方面保障并行管道与合并管道的过流能力相同。针对洪涝淹没易发生区域,不进行降维处理,维持管网分布现状。

c. 利用空间衔接方法,构建粗网格和细网格之间的拓扑关系,并将地表二维模型与管网模型进行垂向连接,地表模型与河网模型进行水平连接(正向连接和侧向连接),管网模型与河网模型进行中连接。

构建水文水动力耦合模型,能够实现地表模型、管网模型、河网模型之间的相互耦合。根据粗网格与细网格之间的拓扑关系,能够分析计算从而获得地表、地下排水管网和河道三者之间复杂的水流交换机制和交换水量。

2 实例应用

2.1 研究区概况

研究区为位于广东省广州市天河区中轴线东侧的猎德涌流域,该流域属人口密集城区,易受强降雨和珠江水位顶托影响,常发生内涝。流域集雨面积

16 km²,河涌全长 6.35 km,河道比降 2.02%,流域地势呈北高南低,地面高程为 8~16 m。研究区上游、中游和下游分别设置 5 个水位监测点,以监测河道流量、水位情况,研究区流域范围以及监测点位置如图 4 所示。

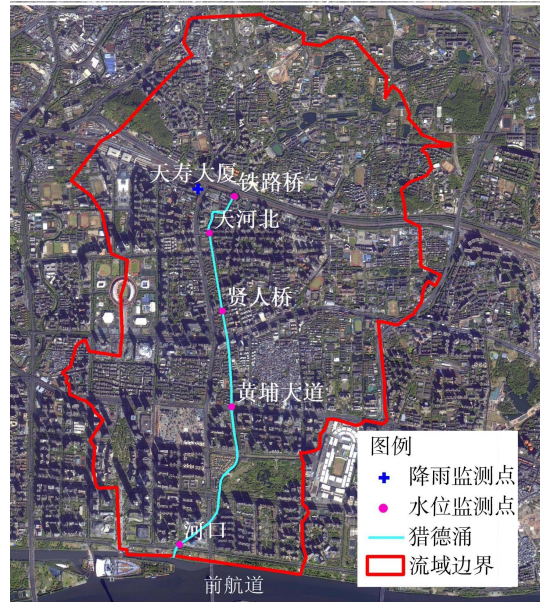


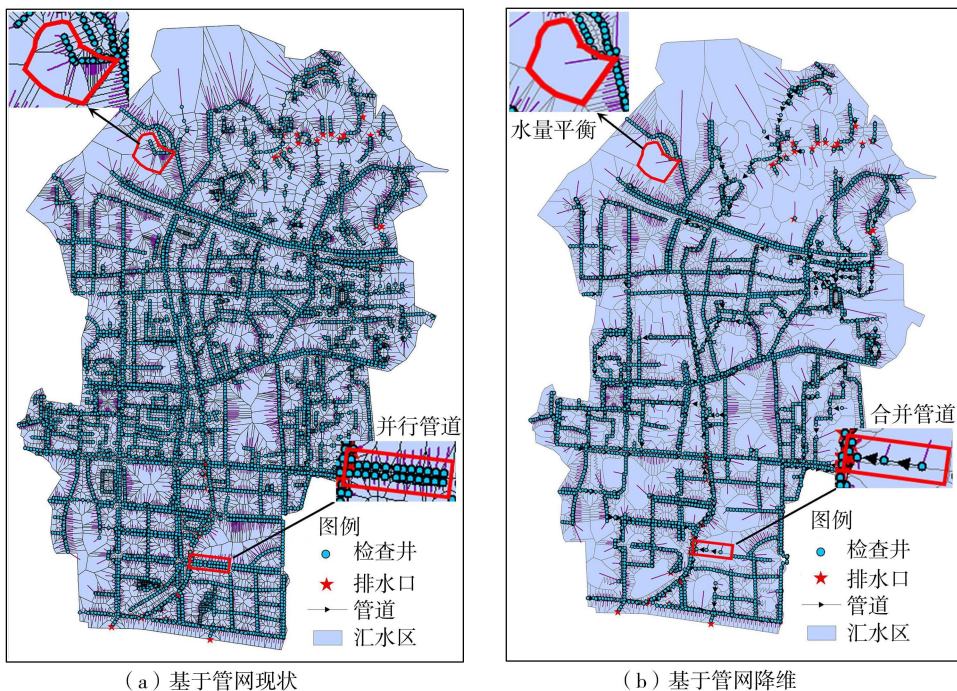
图4 猎德涌流域范围及监测点位置

Fig.4 Scope of the Liedechong River Basin and location of monitoring points

2.2 研究区模型建立

2.2.1 耦合模型概化

构建猎德涌流域水文水动力耦合模型,其中,二维地表模型采用 4 m×4 m 网格,网格区域不包括建筑物、水库、河道等,共计 744340 个网格。网格高程根据 1 m 精度 DEM 数据取值,基于 2020 年遥感影响数据获取土地利用类型以及建筑物轮廓。一维管网模型将整个研究区划分为 9753 个子汇水区,含 9961 条管道、9753 个检查井、67 个排水口。一维河网模型包括 84 个河道断面。基于管网分布现状的模型概化情况如图 5(a) 所示。在上述管网模型的基础上,综合考虑地形、土地利用类型和管道分布情况,依据水量平衡和管道过流能力等效原理。针对同一节点,保障其产汇流区域面积与图 5(a) 相同,保证合并管道和并行管道的过流能力相等,对非淹没区域管网进行合理降维概化,地表模型中该区域仍然采用 4 m×4 m 网格。易涝处是模型重点关注区域,对管网分布不做处理,同时对该区域进行细网格划分,然后根据空间重叠关系,将粗网格与细网格进行嵌套。网格数量共计 807430 个,降维后的管道为 5953 条。基于管网降维的模型概化情况如图 5(b) 所示。



(a) 基于管网现状

(b) 基于管网降维

图5 猎德涌流域模型概化情况

Fig. 5 Model generalization situation of the Liedechong River Basin

2.3 模型参数率定及验证

基于管网现状构建的耦合模型,输入实测降雨资料模拟河道水位过程和易涝点积水情况,与实测数据对比进行模型参数率定和验证。选取两场降雨分别作为模型的率定期和验证期,2022年6月9日07:05至09:05降雨历时为2h,最大降雨强度29mm/h,仅造成了极小程度的内涝淹没,利用该场降雨过程对位于猎德涌中上游贤人桥断面的水位变化过程和内涝淹没位置进行模拟,进而对模型参数进行率定;2022年5月12日16:20至18:20降雨历时为2h,最大降雨强度35mm/h,内涝点的淹没程度相对明显,利用该场降雨过程对贤人桥断面的水位变化过程以及内涝淹没位置、水深进行模拟,进而对模型模拟效果进行验证。

水文参数包括初始损失、霍顿下渗能力、霍顿指数、糙率和径流系数。初始损失的取值范围参考相关文献和经验值^[24-26];霍顿下渗能力结合林地、草地土壤入渗曲线和相关研究^[27-28]综合取值;衰减系数通过模型手册和文献^[24,29]确定取值;糙率依据GB50014—

2006《室外排水设计规范》进行取值。通过对模型率定,得到模型主要参数值,结果如表1所示。模型中管道和河道的糙率取值分别为0.013和0.030。

图6和图7分别为研究区淹没水深分布和贤人桥断面水位变化实测与模拟结果对比。由图6可见,淹没位置与实际发生的情况基本相同,尤其是严重易涝点与实际完全吻合,模拟淹没水深和实际淹没水深的相对误差为10.8%,绝对误差为0.06m,可见模型参数具有一定的准确性。利用纳什效率系数(E_{NS})对模型模拟结果进行评估,一般认为当 $E_{NS} > 0.6$ 时,模型具有良好的精度^[30]。由图7可见,实测水位过程与模拟水位过程曲线吻合较好, E_{NS} 为0.892,满足性能标准,表明模拟结果较好。综上所述,建立的模型能够准确反映研究区内涝淹没和河道水位情况,具有一定的可靠性,可应用于猎德涌流域城市洪涝的模拟研究。

2.4 结果与分析

2.4.1 河道水位

模拟时间自2022年4月23日19:00至21:00,

表1 模型主要参数

Table 1 Main parameters of model

土地利用类型	面积占比/%	糙率	径流系数	初始损失/mm	最大下渗率/(mm/d)	最小下渗率/(mm/d)	衰减系数/h ⁻¹
建筑用地	40.53	0.012	0.85	1.5	0	0	0
道路	21.82	0.011	0.90	7.0	0	0	0
水泥地	16.08	0.011	0.90	7.0	0	0	0
绿地	19.41	0.250	0.20	12.5	342.13	40.46	3.64
裸地	0.11	0.120	0.25	12.5	100.15	25.13	3.04
河湖库塘	1.96		1				

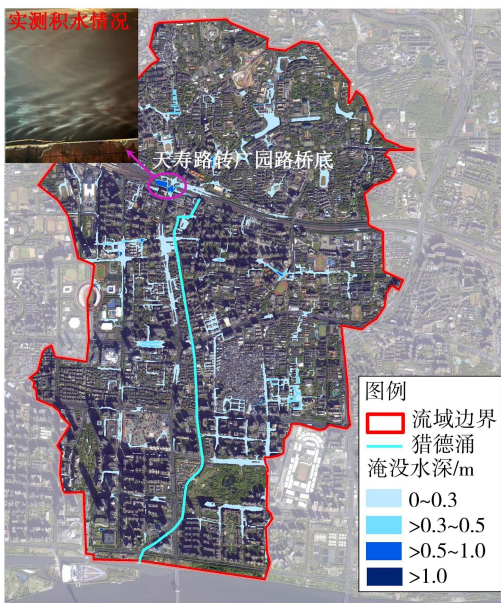


图6 猎德涌流域淹没水深分布实测与模拟结果对比
Fig. 6 Comparison of measured and simulated results of submerged water depth distribution in the Liedechong River Basin

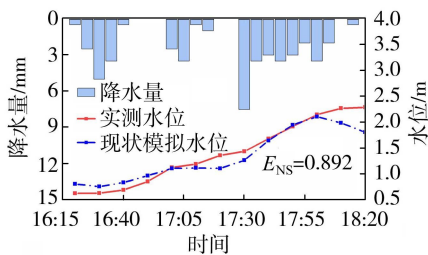


图7 贤人桥断面水位变化实测与模拟结果对比
Fig. 7 Comparison of measured and simulated results of water level changes in Xianrenqiao Section

持续时间为2 h。沿河道水流方向,选取天河北、贤人桥和黄埔大道3处断面水位变化过程作为研究对象。基于管网现状和管网降维模拟的河道水位变化过程如图8所示。由图8可见,基于管网现状和基于管网降维两种模型模拟的河道水位与实测河道水位变化过程均具有较好一致性, E_{NS} 均大于0.7,基

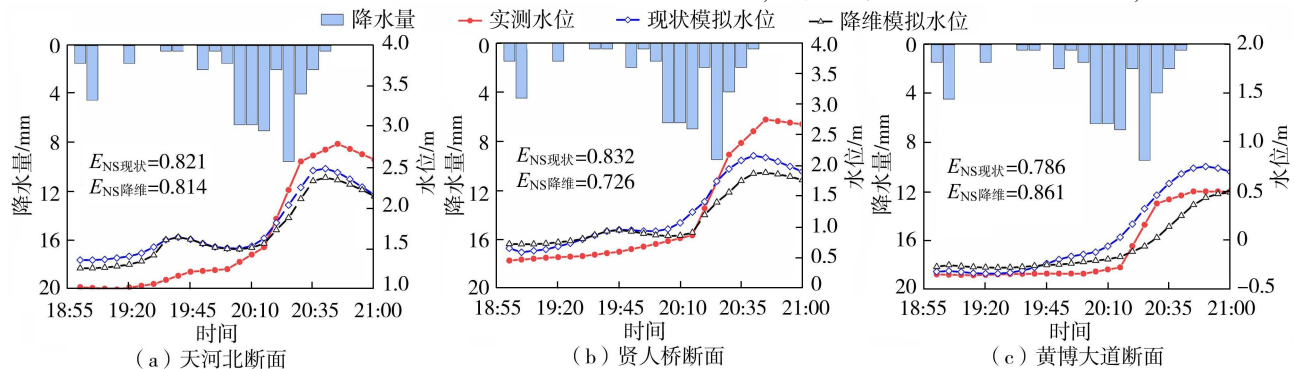


图8 3处断面河道水位变化过程
Fig. 8 Water level change process of river channel in three sections

于管网降维模型模拟的河道水位过程略低于基于管网现状模型的模拟结果。此外,在河道快速涨水阶段,除了黄埔大道断面外,两种模型模拟的水位过程均比实测过程小,经现场勘察,原因是中上游河道两侧还存在未被统计的其他应急管网排水措施。

2.4.2 检查井水位

图9为位于主干管道上2个检查井的水位变化过程。由图9可见,两种模型模拟的水位过程具有较好的一致性, E_{NS} 均大于0.7。基于管网降维模型模拟的动态水位均小于基于管网现状模型的模拟结果,1号检查井和2号检查井的最大水位分别降低了7.55%、4.09%。分析原因认为,支管数量减少,但产汇流区域未发生改变,地表雨水汇流路径增大,增加径流时长,且水流分散度也有所增大,从而削减了管道流量峰值以及雨水出口流量峰值。虽然管网降维概化模型中管道数量减少,会减少管内产生的水头损失,但根据两种模型的模拟结果,管内减少的水头损失对检查井水位的影响不明显。

2.4.3 内涝淹没水深

图10为基于管网现状与基于管网降维两种模型模拟的淹没水深分布。由图10可见,从积水面积来看,相比基于管网现状模型,基于管网降维模型模拟的溢流区域面积明显减少。这是由于管网降维概化模型削减了管道流量峰值,而MIKE模型只有在管网排水能力不足发生溢流现象时,才能发生地表淹没情况,因此导致淹没区域小于基于管网现状模型模拟的淹没范围。但减少的区域均属于内涝积水低危险等级区域,为非重点关注区域。对于严重的内涝积水区,两种模型模拟结果相同,均出现在同一位置,且内涝淹没位置、淹没范围与实际淹没点基本吻合。从淹没程度来看,基于管网现状模型模拟的最大积水深度为0.59 m,与实测值相对误差为5.36%,绝对误差为0.03 m,模拟峰现时间为20:35。基于管网降维模型模拟的最大积水深度为0.51 m,与实测值相对误差为8.93%,绝对误差为

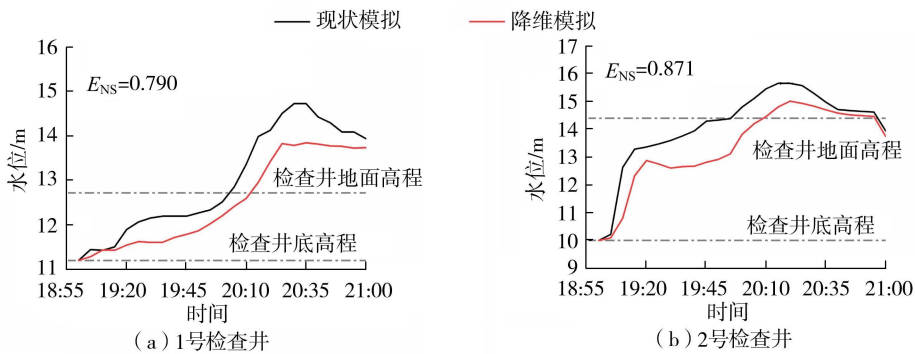


图9 主干管道检查井水位变化过程

Fig. 9 Water level change process in manholes of main pipeline

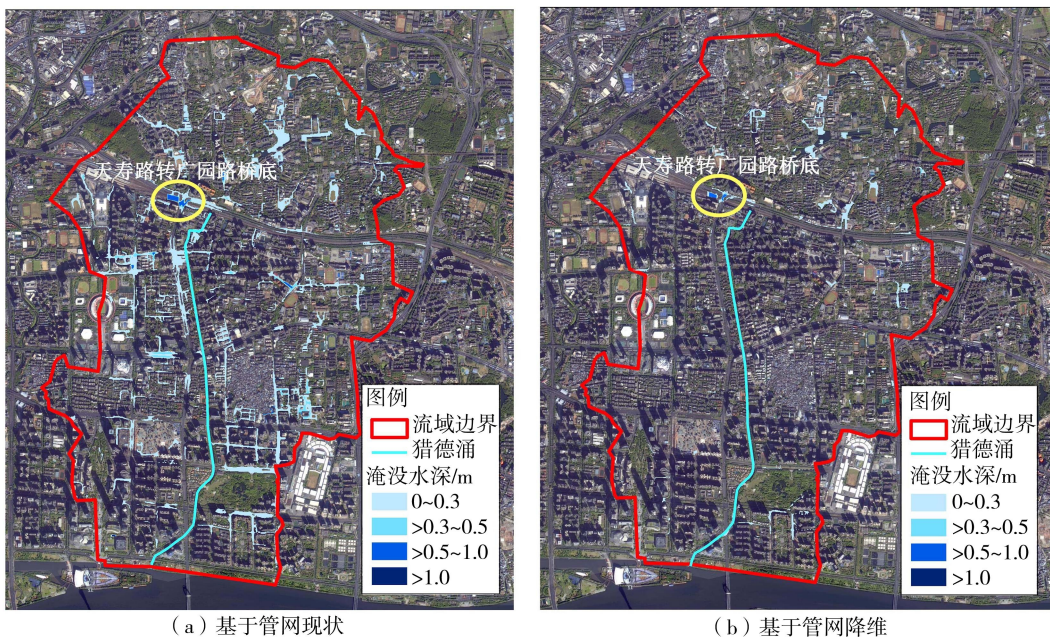


图10 两种模型模拟的淹没水深分布

Fig. 10 Distribution of submergence depth simulated by two models

0.05 m, 模拟峰现时间为 20:29。此外, 基于管网现状模型的计算总耗时为 35 min, 基于管网降维模型的计算总耗时为 15 min, 速度提高了 57%, 说明管网降维后雨水出流路径减小的计算时长远大于地表汇流路径增大产生的计算时长。结果表明, 基于管网降维模型能够较好地反映出重点关注区域的内涝积水情况, 同时可以大幅度提高计算效率。

3 结论

a. 采用线-面结合的概化模式, 以区域淹没程度作为判定依据, 根据研究区洪涝淹没发生处和非积水淹没处制定不同管网概化准则和网格嵌套方法, 对水力要素敏感区域提供完全管网数据覆盖, 而其余区域采取管网降维概化, 从而提高暴雨洪涝模型的实际适应性。

b. 管网降维前后的耦合模型模拟河道水位变化过程、检查井的水位变化过程具有较好的一致性,

E_{NS} 均大于 0.7。表明提出的基于水量平衡和管道过流能力等效原理对管道进行降维概化的处理方法具有合理性, 能够反映具有排水管道的城市洪涝演进过程。

c. 实例应用中, 管网降维概化的耦合模型模拟的河道水位动态变化过程、重点淹没位置以及淹没水深与实测情况基本吻合, 淹没水深的相对误差为 8.93%, 绝对误差为 0.05m, 模拟速度较基于管网现状模型模拟提高了 57%, 该模型具有良好的准确性和高效性。

参考文献:

- [1] BOU I, SAGRIS V, BURDUN I, et al. Estimating the expansion of urban areas and urban heat islands (UHI) in Ghana: a case study[J]. Natural Hazards, 2021, 105(2): 1299-1321.
- [2] 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛

- 的影响研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 69-77. (JI Chongping, LIU Weidong, XUAN Chunyi. Impact of urban growth on the heat island in Beijing [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1): 69-77. (in Chinese))
- [3] SHAO M Q, ZHAO G, KAO S C, et al. Quantifying the effects of urbanization on floods in a changing environment to promote water security: a case study of two adjacent basins in Texas [J]. Journal of Hydrology, 2020, 589: 125154.
- [4] 陈璟浩. 突发事件中的政务微博网络舆论引导能力研究:以 2016 武汉暴雨为例[J]. 情报探索, 2017(1): 44-49. (CHEN Jinghao. Study on governmental micro-blog's network public opinion guiding ability in emergency: case study of Wuhan rainstorm in 2016 [J]. Information Research, 2017(1): 44-49. (in Chinese))
- [5] 张欣, 张大伟, 陈琰. 广州“5·22”暴雨及暴雨洪水量级分析[J]. 广东水利水电, 2021(1): 26-30. (ZHANG Xin, ZHANG Dawei, CHEN Yan. Magnitude analysis of “5·22” rainstorm and rainstorm flood in Guangzhou [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2021(1): 26-30. (in Chinese))
- [6] 喻海军, 陈小兰, 刘昌军, 等. 郑州中心城区 2021 年“7·20”特大暴雨洪涝复盘模拟分析[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(5): 11-15. (YU Haijun, CHEN Xiaolan, LIU Changjun, et al. Retrospective simulation and analysis on “7·20” extreme rainstorm and flood in central urban area of Zhengzhou City [J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(5): 11-15. (in Chinese))
- [7] 张金良, 罗秋实, 王冰洁, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))
- [8] 王婷, 仇蕾, 汪志强, 等. 基于改进 DIIM 的洪涝灾害下供应链系统中断关联型损失评估研究[J]. 水利经济, 2023, 41(4): 88-93. (WANG Ting, QIU Lei, WANG Zhiqiang, et al. Research on economic loss assessment of supply chain disruption under flood disaster based on improved DIIM [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(4): 88-93. (in Chinese))
- [9] 张晨钰, 王伟, 黄莉, 等. 高度城镇化背景下深圳市易涝点驱动因子分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 35-45. (ZHANG Chenyu, WANG Wei, HUANG Li, et al. Analysis of driving factors for waterlogging points in Shenzhen City under high urbanization background [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 35-45. (in Chinese))
- [10] 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 Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [11] 傅春, 林国聪, 黄金燕, 等. 基于 MIKE 模型的湘阴县雨水管网健康度评价[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 103-110. (FU Chun, LIN Guocong, HUANG Jinyan, et al. Health degree evaluation of rainwater pipe network in Xiangyin County based on MIKE model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 103-110. (in Chinese))
- [12] 陈文龙, 徐宗学, 张印, 等. 高密度城市暴雨洪涝治理理论框架及其应用研究[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 769-778. (CHEN Wenlong, XU Zongxue, ZHANG Yin, et al. Theoretical framework and application of urban rainstorm flood control in high-density cities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 769-778. (in Chinese))
- [13] 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 Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, 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))
- [14] 侯精明, 王俊琿, 同玉, 等. 基于非均匀网格的高效高精度洪涝过程模拟[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 53-62. (HOU Jingming, WANG Junhui, TONG Yu, et al. High-efficient and high-precision flood process simulation based on the non-uniform grid [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 53-62. (in Chinese))
- [15] 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 Hongping, HAO Xiaoli, HU Changwei, 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))
- [16] 许继军, 杨大文, 丁金华, 等. 空间嵌套式流域水文模型的初步研究: 以三峡水库入库洪水预报为例[J]. 水利学报, 2007(增刊 1): 365-371. (XU Jijun, YANG Dawen, DING Jinhua, et al. Development of space-nested watershed hydrological model and its application to floods forecasting of Three Gorges reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(Sup1): 365-371. (in Chinese))
- [17] 周建中, 张华杰, 毕胜, 等. 自适应网格在复杂地形浅水方程求解中的应用[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 861-868. (ZHOU Jianzhong, ZHANG Huajie, BI Sheng, et al. An application of adaptive grid method to shallow water equations on complex topography [J]. Advances in Water

- Science, 2013, 24(6): 861-868. (in Chinese)
- [18] NASH S, HARTNETT M. Nested circulation modelling of inter-tidal zones: details of a nesting approach incorporating moving boundaries [J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60(6): 1479-1495.
- [19] HÉNONIN J, MA Hongtao, YANG Zhengyu, et al. Citywide multi-grid urban flood modelling: the July 2012 flood in Beijing [J]. *Urban Water Journal*, 2015, 12(1): 52-66.
- [20] 陈文龙, 徐宗学, 宋利祥, 等. 基于流域系统整体观的城市洪涝治理研究 [J]. *水利学报*, 2021, 52(6): 659-672. (CHEN Wenlong, XU Zongxue, SONG Lixiang, et al. Research on the control measures of pluvial and fluvial urban floods based on holistic view of watershed system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(6): 659-672. (in Chinese))
- [21] 黄国如, 陈志威, 曾博威. 城市洪涝模型及 CPU-GPU 异构并行计算技术研究进展 [J]. *水利学报*, 2023, 54(6): 654-665. (HUANG Guoru, CHEN Zhiwei, ZENG Bowei. Research progress of urban flood model and CPU-GPU heterogeneous parallel computing technology [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(6): 654-665. (in Chinese))
- [22] 胡昌伟. 太湖流域洪水风险模拟研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012.
- [23] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [24] 徐山川. 基于 GIS 的 SWMM 模型在洪雅县的应用研究: 以柳江古镇为例 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [25] FEDERATION W E. Design and construction of urban stormwater management systems [M]. Reston: American Society of Civil Engineers, 1992.
- [26] 任国源. 填洼损失量计算在海河流域洪水预报中的应用 [J]. *水利规划与设计*, 2014(9): 39-41. (REN Guoyuan. Application on calculation of filling loss amount in flood forecasting of Haihe River Basin [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2014(9): 39-41. (in Chinese))
- [27] 陶涛, 颜合想, 李树平, 等. 城市雨水管理模型中关键问题探讨 (二): 下渗模型 [J]. *给水排水*, 2017, 53(9): 115-119. (TAO Tao, YAN Hexiang, LI Shuping, et al. Discussion on key issues in urban rainwater management model (II): infiltration model [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(9): 115-119. (in Chinese))
- [28] 陈秋伶, 林凯荣, 陈文龙, 等. 多尺度海绵城市系统雨洪控制研究 [J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 862-875. (CHEN Qiuling, LIN Kairong, CHEN Wenlong, et al. Study on storm flood control in multi-scale sponge city system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7): 862-875. (in Chinese))
- [29] 马旭. 基于 Infoworks ICM 模型的典型城市内涝模拟及海绵减控效果研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [30] 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 Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 334-344. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-03-27 编辑: 王芳)

(上接第 37 页)

- [38] 陈申鹏. 深圳多年降水变化规律和雨岛效应分析 [J]. *气象科技进展*, 2019, 9(3): 166-170. (CHEN Shenpeng. Multi-year variation of precipitation and rain island effect in Shenzhen [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2019, 9(3): 166-170. (in Chinese))
- [39] 王磊之, 崔婷婷, 李笑天, 等. 降水变化条件下沿海地区暴雨-潮位遭遇联合风险 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 110-116. (WANG Leizhi, CUI Tingting, LI Xiaotian, et al. Joint risks of rainstorm and tidal level under varying precipitation conditions in coastal areas [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 110-116. (in Chinese))
- [40] YANG Fang, WANG Xinghan, ZHOU Xiaoxue, et al. Effects of urbanization on changes in precipitation extremes in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China [J]. *Water*, 2023, 15(19): 3438.
- [41] ZOU Xukai, REN Fumin. Changes in regional heavy rainfall events in China during 1961-2012 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(5): 704-714.
- [42] YU Xiaocheng, ZHOU Wen, ZHANG Yue. The decadal shift in TC-induced precipitation over China [J]. *Atmospheric Research*, 2022, 274: 106186.
- [43] DING Y H, CHAN J C L. The East Asian summer monsoon: an overview [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, 89(1): 117-142.
- [44] PARK C, SON S W, KIM H. Distinct features of atmospheric rivers in the early versus late East Asian summer monsoon and their impacts on monsoon rainfall [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(7): e2020JD033537.
- [45] 郭品文, 郎丽玲. ENSO 与中国东部夏季降水异常关系的年代际变化 [J]. *大气科学学报*, 2017, 40(4): 463-472. (GUO Pinwen, LANG Liling. Interdecadal variation of the relationship between ENSO and East-China summer rainfall [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2017, 40(4): 463-472. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-02-07 编辑: 王芳)