

基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法

梁鑫¹, 侯精明¹, 王添¹, 李东来¹, 陈光照¹, 陈瑜², 吕佳豪¹, 高徐军^{1,3}, 刘园³

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:为了解决城市洪涝模拟精细地形数据难以获取的问题,提出了一种考虑管网数据、道路数据和建筑物数据等多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法。以唐山市龙王庙河周边区域作为实例验证研究区域,基于该方法构建的DEM建立了研究区域城市雨洪模型(GAST-SWMM耦合模型),并对两场降雨条件下的雨洪过程进行了模拟,模拟得到的积水位置与实际积水位置相吻合,其中一场降雨条件下两处水位的纳什效率系数分别达到0.92和0.87,水位峰值相对误差为3.35%和3.63%,验证了方法的有效性,表明采用该方法构建的DEM能够较好地反映研究区域的地形特征,可满足城市洪涝模拟的精度要求。

关键词:城市洪涝模拟;地形构建;数字高程模型;数据融合;城市雨洪模型

中图分类号:TV122⁺.9;P333.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2024)06-0056-08

A method for constructing high-precision terrain for urban flood simulation based on multi-source data fusion// LIANG Xin¹, HOU Jingming¹, WANG Tian¹, LI Donglai¹, CHEN Guangzhao¹, CHEN Yu², LYU Jiahao¹, GAO Xujun^{1,3}, LIU Yuan³ (1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China; 3. POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: To address the challenge of obtaining high-resolution topographic data for urban flood simulation, a method for constructing high-precision terrain was proposed by integrating multi-source data, including drainage network data, road data, and building data. Taking the area surrounding the Longwangmiao River in Tangshan City as a case study validation area, an urban stormwater model (GAST-SWMM coupled model) was developed based on the digital elevation model (DEM) constructed by the proposed method, and was used to simulate the stormwater processes under two different rainfall events. The simulated waterlogging positions closely match the actual ones. For one of the rainfall events, the Nash-Sutcliffe efficiencies for the water levels at two manholes reach 0.92 and 0.87, respectively, with relative peak water level errors of 3.35% and 3.63%. These verify the effectiveness of the proposed method, indicating that the DEM constructed using this method can accurately reflect the topographic features of the study area and meet the accuracy requirements for urban flood simulations.

Key words: urban flood simulation; terrain construction; digital elevation model; data fusion; urban stormwater model

在全球气候变化加剧及城市化速度不断加快的双重因素影响下,城市洪涝发生频次不断增大,严重阻碍了城市的健康发展,并且威胁人民的生命财产安全^[1-2]。因此,准确模拟和预报城市洪涝是减少洪涝灾害损失的重要途径之一^[3-4]。数字高程模型(digital elevation model, DEM)是城市雨洪水动力模型最重要的输入文件之一,DEM以数字图像的形式

表示地球表面高程,其中每个像素数据包含像素中心点的高程值,描述了研究区域地形的空间分布,可用于提取区域坡度、坡向和水流方向等参数^[5]。地形特征对地表径流过程有显著影响,DEM分辨率会影响城市雨洪水动力模型的模拟性能,DEM分辨率越高,反映的地形特征越准确,模拟准确性越高^[6]。城市区域由于建筑林立且密集,下穿隧道和立交桥

基金项目:国家自然科学基金项目(52079106);中德合作交流项目(M-0427);中国电力建设股份有限公司重点科技项目(D-ZDXM-2022-41)

作者简介:梁鑫(1998—),男,硕士研究生,主要从事城市水力学研究。E-mail:1135929548@qq.com

通信作者:侯精明(1982—)男,教授,博士,主要从事地表水及其附随过程数值模型研究。E-mail:jingming.hou@xaut.edu.cn

众多,需要采用高精度 DEM 数据才能良好表征水流在城市区域的流动过程,因此 DEM 数据的质量严重制约着城市雨洪水动力模型模拟准确性的提高。

目前能简易获取的卫星 DEM 数据多为 30 m 网格,该精度网格不能准确反映城市的复杂垂向高程变化过程。无人机载激光雷达扫描技术可以获得满足模拟精度要求的 DEM 数据^[7],如程涛等^[8]利用无人机倾斜摄影技术获取精细化地表信息并据此建立了洪涝模型开展洪涝研究,但用于较大面积城市成本过高^[9]。为此,学者将研究重心放在 DEM 重构方法上,Liu 等^[10]采用单基线和多基线 InSAR 技术进行 DEM 重构以提高 DEM 的精度;Buscema 等^[11]提出了改进版泰勒插值算法以提高 DEM 构建效率,同时引入新的人工神经网络——Conic Net 进行插值提高 DEM 的精度;马勇勇^[12]以河段及流域为研究对象进行地形数据重构并探究了流域雨洪模型模拟适宜分辨率;张宏鸣等^[13]利用深层残差网格法针对起伏特征明显的山区进行 DEM 重构,为获取高分辨率 DEM 提供了新的思路。前人的研究大多集中在流域或河道等研究区域^[14-15],该精度网格无法精确反映建筑密集的城区地形特征,因此本文提出一种基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法(以下简称“多源数据融合方法”),可较全面模拟城市发生洪涝时的积水情况,可为相关人员获取城市洪涝模拟所需 DEM 数据提供一种新方法。

1 多源数据融合方法

1.1 DEM 构建方法

传统的地形构建方法为先采集研究区内离散点数据,然后利用这些数据统一插值直接生成 DEM^[9],该方法较依赖于离散点的密度和数据质量,当控制点密度不够和质量不高时,构建的 DEM 与实际地形会有较大的误差。此外,传统的地形构建方法通常是对地形进行平滑处理,无法准确反映城市复杂地形中的建筑物,本文提出的多源数据融合方法考虑了不同土地利用类型、离散高程点数据和管网数据,是多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法。

当区域内发生洪涝时,地表道路是水流重要的运移通道,也是形成洪涝积水的重点位置,而建筑物密度高是城市的显著特征,因此构建城市区域 DEM 时,将研究区域划分为道路、建筑物及其他区域 3 种土地利用类型。目前常用的插值算法有 IDW、Spline、Kriging 等,Kriging 算法是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法。Kriging 算法是典型的

地统计学算法,被广泛应用于地理科学、环境科学、大气科学等领域^[16]。Kriging 算法考虑了地统计学的思想,需要通过半方差函数来获取未知点计算所需要的权重,其权重大小取决于空间协方差的大小,并且考虑了点之间空间分布特性,这使得在一般情况下插值效果要好于单纯基于距离来定义 IDW 算法^[17],因此本文采用 Kriging 算法对不同区域进行 DEM 插值。

道路范围内的地形质量会严重影响模型模拟效果,故进行道路插值时应尽可能加密高程点的密度从而提高插值结果的精度,由于管网节点皆位于道路范围内,可利用节点的井底高程和埋深推算节点所在位置的地面高程从而加密高程点。因此进行道路地形构建时应融合管网数据,筛选道路范围内的高程点,基于此扩充后的数据进行插值并依照道路范围进行裁剪。节点高程计算公式为

$$Z_b = Z_e + h_{\max} \quad (1)$$

式中: Z_b 为节点的地面高程; Z_e 为节点的井底高程; $h_{\max}$ 为节点的最大埋深。

城市雨洪模型在进行二维地表模拟计算时,建筑物在模型中主要起阻挡水流流动的作用,故构建建筑物范围内地形时,应在建筑物所在位置统一升高高程以起阻挡水流流动的作用,然后将研究区内所有高程点及管网节点数据融合进行统一插值,得到研究区域的低精度 DEM 数据;而后按照道路、建筑物的顺序将已构建的地形叠加到研究区低精度 DEM 数据上,从而得到研究区高精度 DEM 数据。该方法能反映城市区域内垂直突变的地形,可较好地构建道路真实地形,构建方法如图 1 所示。

1.2 水动力模型

水动力模型采用耦合了暴雨洪水管理模型(storm water management model,SWMM)管网模块和显卡加速的地表水及其伴随输移过程模型(GPU accelerated surface water flow and transport model, GAST)的一二维耦合模型,该模型的输入数据包括降水量、DEM 数据、下渗速率、曼宁系数、土地利用类型数据、管网数据等。该模型基于高分辨率数据,在模拟复杂的城市地表水流中得到广泛应用^[18]。

1.2.1 SWMM

SWMM 由美国环境保护署(EPA)开发,可选择动力波方法求解一维圣维南方程对管网水流进行求解,可以模拟管道逆流、明满流交替运动、水位顶托、进口和出口损失等各种复杂流态和复杂工况^[19-22]。本文采用该模型对管道水流进行求解,其控制方程如下:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

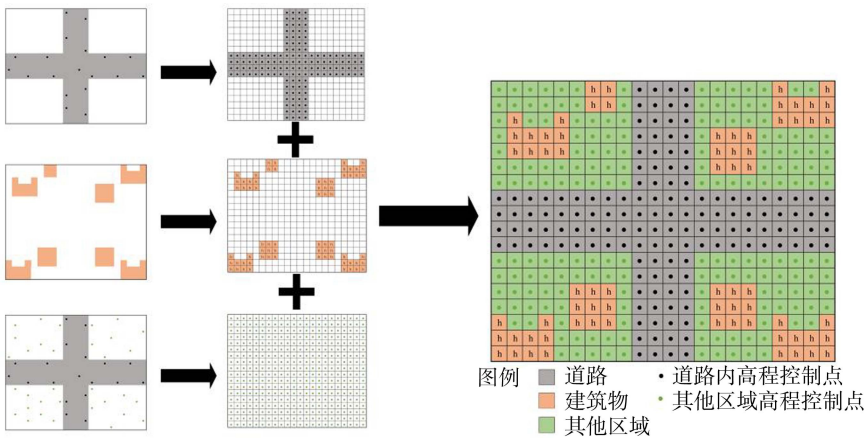


图1 多源数据融合的地形构建方法示意图

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f = 0 \quad (3)$$

式中: Q 为管道流量, m^3/s ; A 为断面面积, m^2 ; x 为断面沿程距离, m ; t 为时间, s ; H 为管道水深, m ; S_f 为管道摩阻比降; g 为重力加速度。

1.2.2 GAST 模型

GAST 模型控制方程为浅水方程, 该方程服从静水压力分布假设, 其对应的二维非线性浅水方程守恒格式的矢量形式可见文献[23]。

GAST 模型采用 Godunov 有限体积法和二阶 MUSCL(守恒律单调迎风格式)算法, 可以保持物质守恒, 解决不连续问题; 水通量和动量通量由 HLLC (Harten-Lax-van Leer-Contact) 近似黎曼解算器计算, 通过新的斜率通量方法处理斜率源项, 以应用于任何复杂的网格; 摩擦源项通过半隐式方法计算, 采用两阶段显式龙格-库塔时间积分方案计算每个时间步长的流动变量, 同时引入了 GPU 加速技术提高模型计算效率[24]。

1.2.3 GAST 模型与 SWMM 的耦合方法

降雨首先直接作用于二维地表网格, 经下渗后剩余水量在地表进行产汇流模拟计算。当二维地表中的水体进入一维模型中节点所对应的网格时, 会在每个节点处判断地表水位与一维模型中节点水位关系, 进行双向动态的水量交换计算。因此, 二维地表水流与一维管网进行水量交换是 GAST 模型与 SWMM 进行耦合的关键, 水量交换分为一维管网模型与二维地表模型耦合和一维河网模型与二维地表模型耦合两种情况。

a. 一维管网模型与二维地表模型耦合方法。对于排水管网与二维地表进行水量交换(入流或溢流)情况, 本文采用在地表雨水井节点处与地下管网进行垂向耦合。将研究区内管网节点水位记为 Z_j , 与该节点所对应的地表网格水位记为 Z_d , 地表网格高程记为 Z_c , 则地表与地下管网的水量交换可分

为 3 种情形, 如图 2 所示。①当 $Z_c < Z_d < Z_j$ 时, 排水管网水流从该节点溢流至地表; ②当 $Z_c < Z_j < Z_d$ 时, 地表水流通过节点进入排水管网; ③当 $Z_j < Z_c < Z_d$ 时, 地表水流也会通过节点进入排水管网。在第一、第二种情况本文采用孔流公式计算交换水量, 第三种情况采用堰流公式计算交换水量[25]。

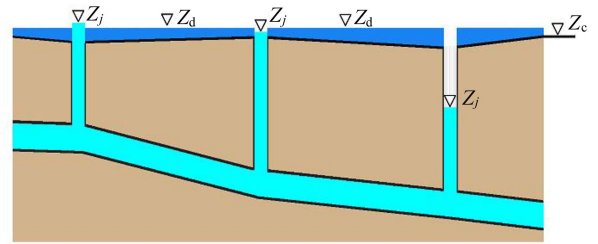


图2 节点与地表耦合示意图

b. 一维河网模型与二维地表模型耦合方法。河道与地表的耦合为水平方向, 包括正向连接和侧向连接两种方式, 如图 3 所示。在正向连接中, 河道首末断面与地表进行耦合, 将河道末断面的流量结果作为地表模型的边界条件, 然后均匀分配到与河道相连的二维网格中进行迭代计算。而在侧向连接中, 河道由多个断面控制, 每个断面控制其所在区域的水量交换。将河道节点水位与其控制的河道单元周边二维网格水位进行对比时, 如果河道断面水位高于地表水位, 水流从河道流向地表; 如果河道断面水位低于地表水位, 水流从地表流向河道; 如果两者相等, 则水体不发生交换。在侧向连接中, 采用堰流

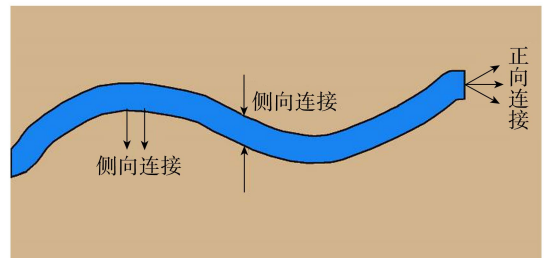


图3 一维河网模型与二维地表模型耦合示意图

公式计算交换水量。

2 实例验证

2.1 研究区概况及基础数据

唐山市位于河北省东部,地处环渤海湾中心地带($38^{\circ}55'N\sim 40^{\circ}28'N$, $117^{\circ}31'E\sim 119^{\circ}19'E$),南临渤海,北依燕山,毗邻京津,为华北与东北通道的咽喉要地。作为京津唐工业基地中心城市和京津冀城市群东北部副中心城市,唐山市在区域发展中具有重要的地位^[26]。研究区位于唐山市路北区龙王庙河周边,面积约 30.22 km^2 ,该区域内建筑物密集,地表特征复杂,属于典型的易涝区域。

研究采用的管网数据来自唐山市城市管理局提供的管网普查数据;土地利用类型数据、降雨数据及管网水位等数据来源于唐山市住房和城乡建设局;河道的控制断面数据通过测量得到;遥感影像数据来源于谷歌地图,如图 4 所示。

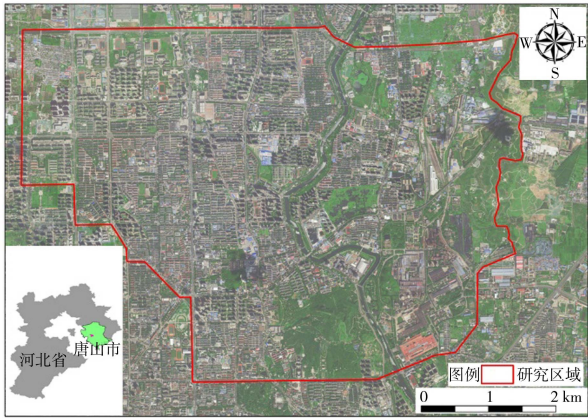
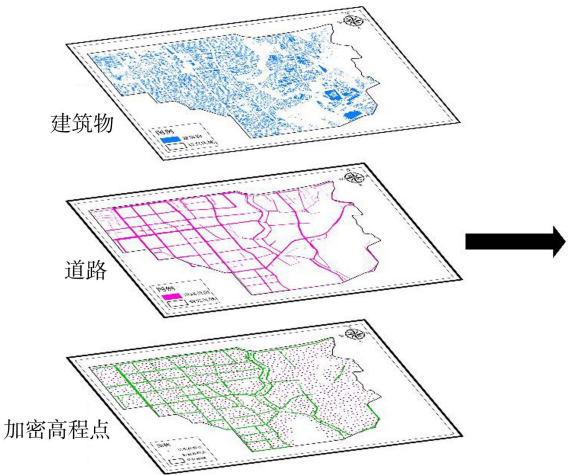


图 4 研究区遥感影像

2.2 DEM 构建

为保证二维地表模型计算效率并提高模拟结果准确性,构建研究区 5 m 分辨率的 DEM 进行分析。

a. 高程点加密。由于区域内初始高程控制点



相距为 $30\sim 50\text{ m}$,故先融合管网节点数据对高程控制点进行加密,以获得更密集的高程点数据。

b. 道路区域 DEM 数据生成。筛选出道路范围内及距离道路一个网格宽度半径内的高程控制点数据,基于这些道路高程控制点,使用 Kriging 算法进行插值,并根据道路范围进行裁剪,得到道路的 DEM_{road}。

c. 建筑区域 DEM 数据生成。研究区内建筑物 DEM 采用对建筑物范围内网格统一赋值高于地表某一高程的方法进行构建,考虑研究区整体高程数据,将建筑物高程统一设定为 50 m ,得到建筑物的 DEM_{building}。

d. 多源数据融合处理。根据加密后的高程数据统一进行插值计算,得到整个研究区的 DEM_{all}。最后按照 DEM_{building}、DEM_{road} 的先后顺序依次镶嵌到 DEM_{all} 中,就得到研究区的 DEM,数据为 $1488\text{ 行}\times 1056\text{ 列}$,共 $1\,571\,328$ 个网格,如图 5 所示。

为评估本文多源数据融合方法的优越性,采用传统方法对管网数据加密后的高程点直接进行插值形成研究区 5 m 分辨率 DEM 进行对比分析。如图 6 所示,通过传统插值方法生成的 DEM 数据未能准确反映研究区内建筑和道路的实际高程情况及两者之间的界线。此外,传统插值方法生成的 DEM 数据中存在多处局部异常低值点,这在地表产汇流计算时会对城市雨洪模型造成显著影响,进而影响模型计算结果的准确性。

2.3 雨洪模型构建

根据土地利用类型数据,将研究区分为 8 种土地利用类型,分别为道路、城镇农村住宅、水域、林地、不透水地面、草地、耕地、公园与绿地,土地利用类型分布见图 7。因建筑物和道路的排水能力由排水管网决定,故将水域、建筑物和道路的稳定下渗率设定为 0。不同土地利用类型所对应的下渗率和曼

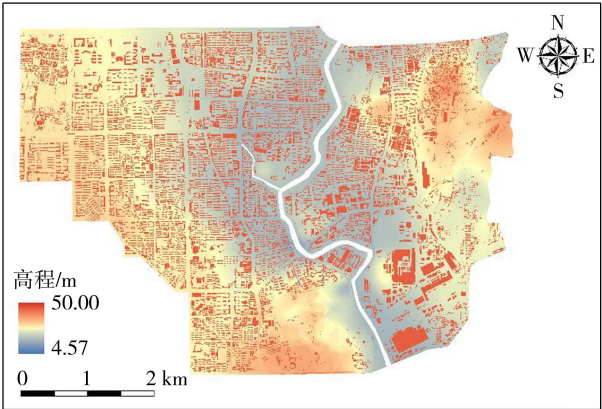


图 5 基于多源数据融合方法得到的研究区 DEM

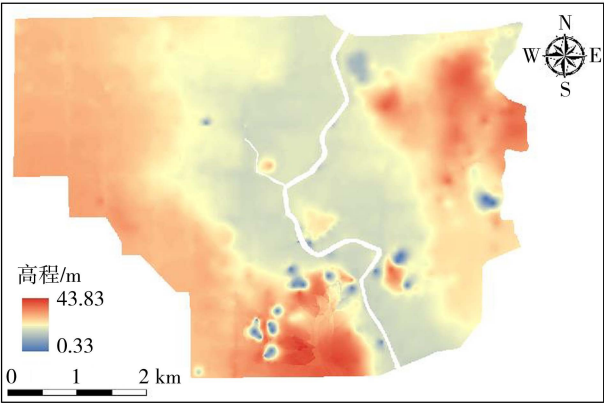


图 6 基于传统插值方法生成的研究区 DEM

宁系数不同,依据文献[27-30]确定其他土地利用类型的稳定下渗率和曼宁系数,取值结果见表 1。

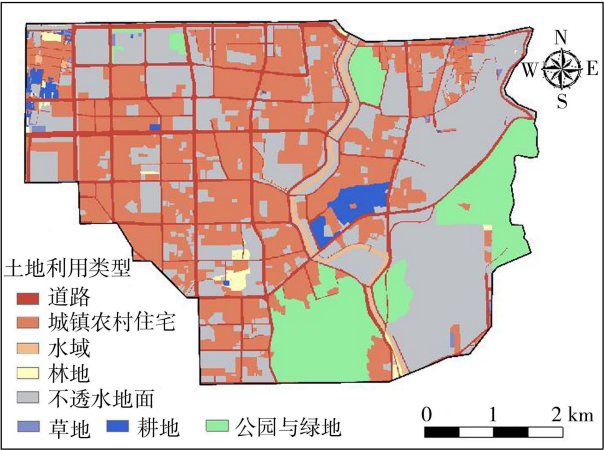


图 7 研究区不同土地利用类型分布

表 1 研究区不同土地利用类型稳定下渗率和曼宁系数取值

土地利用类型	曼宁系数	稳定下渗率/(mm/h)
道路	0.013	0
城镇农村住宅	0.013	11.44
水域	0.025	0
林地	0.060	58.80
不透水地面	0.013	0
草地	0.110	16.80
耕地	0.045	63.00
公园与绿地	0.100	90.00

依据管网普查数据和河道勘测数据构建研究区一维模型,一维模型中包含河道和排水管网两部分,排水管网模型中共有 2261 个节点、2267 段雨水管,研究区内河道两岸排水管网中的水体排入河道;河道模型中共有 55 个控制断面,龙王庙河排入陡河,陡河下游设置 1 个出水口,一维模型如图 8 所示。

为保证模拟稳定性,将二维地表模型的库朗数设置为 0.5。二维地表初始时刻无积水,边界为开放边界,允许自由流出;一维模型中排水管网模型无初始水深,河道模型内橡胶坝均半塌坝状态,河道初始水位与河道内坝体高度等高,坝体高程信息见表 2。

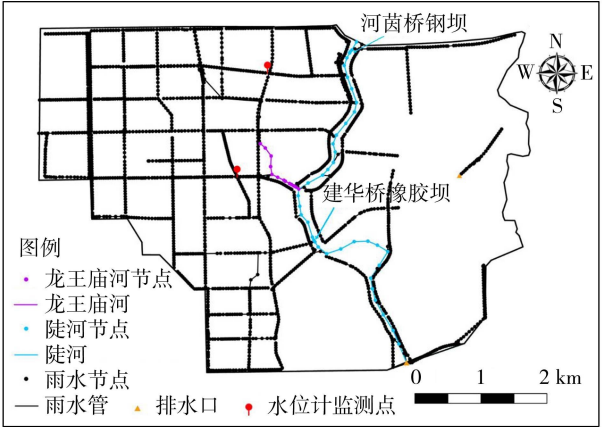


图 8 一维模型示意图

表 2 河道内坝体高程信息 单位:m

坝体名称	塌坝后水位	半塌坝水位 (汛期常规水位)	不塌坝水位 (冬季常规水位)
河茵桥钢坝	16.2	15.4	14.4
建华桥橡胶坝	15.1	14.3	13.2

2.4 结果与分析

为了验证本文提出的多源数据融合方法的合理性,选择研究区 2021 年 6 月 29 日和 2022 年 8 月 18 日两场降雨(20210629 和 20220818)进行验证。这两场降雨的时长分别为 12 h 和 20 h,总降水量分别为 113.3 mm 和 200.4 mm,最大雨强分别为 37.2 mm/h 和 96.0 mm/h,两者的时间分辨率分别为 1 h 和 5 min,降雨过程如图 9 所示。采用纳什效率系数和相对误差作为评价指标来衡量模拟结果与实测数据之间的吻合程度。

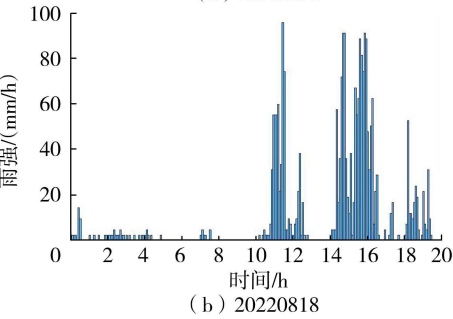
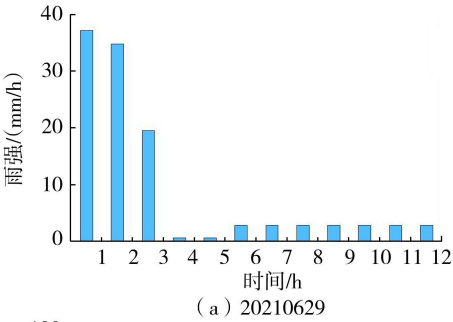


图 9 两场降雨过程

20210629 降雨条件下,地表最大水深出现在降雨开始后 2 h。如图 10 所示,建设北路与裕华西道交叉口(点位 1)、龙泽北路与长宁东道交叉口(点

位 2)、朝阳东道(点位 3)有明显的积水,这与实地记录的积水点相吻合。在 20220818 降雨条件下,地表最大水深出现在降雨开始后 16 h,分别使用多源数据融合方法和传统方法构建的研究区 DEM 数据进行模拟,得到的研究区域最大水深分布如图 11 所示。由图 11 可知,采用传统方法构建的 DEM 数据进行模拟产生了多处异常极大水深,且未能反映建筑物的阻水作用,导致积水散漫分布并进入建筑区。

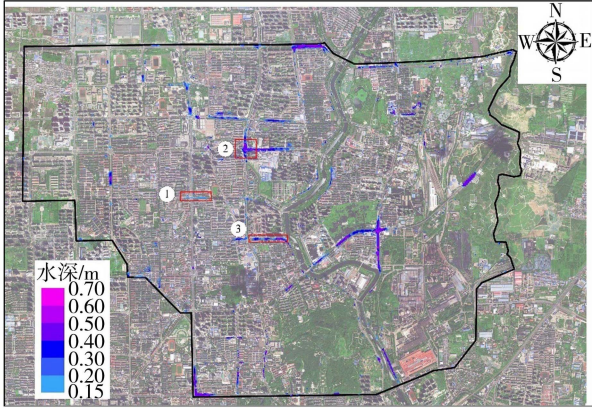
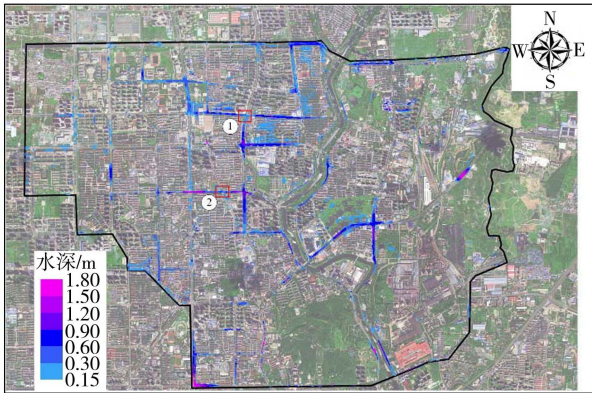
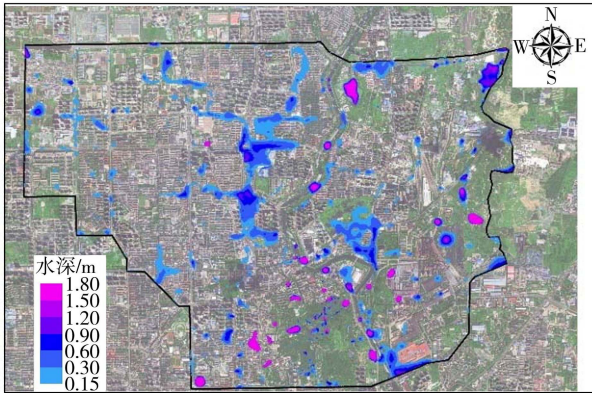


图 10 20210629 降雨最大水深分布



(a) 多源数据融合方法

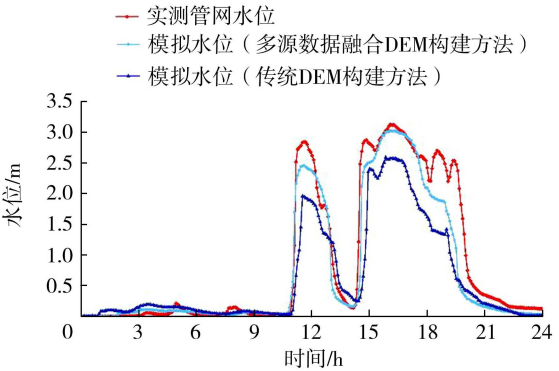


(b) 传统方法

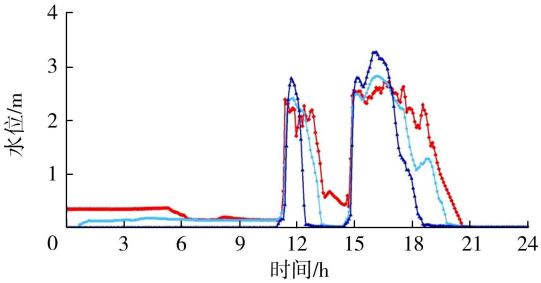
图 11 20220818 降雨最大水深分布

在 20220818 降雨条件下,龙富南道与龙泽北路交叉口(图 11(a)点位 1)、老唐丰路口(图 11(a)点位 2)管网水位变化过程通过水位计实测得到,水位检测的时间分辨率为 5 min,图 12 为实测结果与模拟结果的对比。结果表明,采用多源数据融合方法

构建的 DEM 模拟水深与实测水深相吻合,两处水位纳什效率系数分别达到 0.92 和 0.87,水位峰值相对误差分别为 3.35%和 3.63%;而采用传统方法构建的 DEM 模拟水深与实测水深之间存在较大差异,两处水位纳什效率系数分别为 0.77 和 0.43,水位峰值相对误差分别为 17.08%和 20.10%。可见采用多源数据融合方法构建研究区 DEM 较传统方法可提高模型计算精度,能显著提高纳什效率系数和降低相对误差;采用多源数据融合方法构建的 DEM 能够较好反映城市地形复杂特征,满足城市洪涝模拟的精度要求。



(a) 龙富南道与龙泽北路交叉口



(b) 老唐丰路口

图 12 20220818 降雨条件下模拟水位与实测水位对比

3 结 语

本文提出了一种基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法,可用于构建研究区域的高精度 DEM,基于此高精度 DEM 可建立城市雨洪模型。采用河北省唐山市龙王庙河周边区域 20210629 和 20220818 两场降雨进行了验证,结果表明,模型模拟结果与实际积水位置相吻合,在 20220818 降雨条件下,两个监测点的纳什效率系数分别达到 0.92 和 0.87,水位峰值相对误差为 3.35%和 3.63%,较传统方法模型计算精度得到显著提升,证明了多源数据融合方法能很好地构建出真实反映研究区域高程的 DEM,可为相关部门城市洪涝治理提供方法支持。

多源数据融合方法在城区尺度上能够较好构建研究区域的高分辨率地形,解决数据不充分的问题,

但对居民居住区内地形进行了适当概化,因此不宜在社区尺度上使用。该方法可提高道路和建筑区域的 DEM 精度,但对提高非道路和非建筑区域的 DEM 精度效果不理想,还需进一步探究提升这些区域 DEM 精度的有效方法,以更全面表征城区精细地表特征。此外,由于数据限制,无法将多源数据融合方法构建的 DEM 与研究区实测 DEM 数据进行对比来进一步验证方法的优越性,未来将在这一方面作进一步深入研究。

参考文献:

[1] 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))

[2] 乔贤玲,侯精明,张文晴,等. 社区尺度居民楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (5): 73-81. (QIAO Xianling, HOU Jingming, ZHANG Wenqing, et al. Community scale refined simulation of inundation process of houses and indoor property loss assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(5):73-81. (in Chinese))

[3] 潘鑫鑫,侯精明,陈光照,等. 基于 K 近邻和水动力模型的城市内涝快速预报[J]. 水资源保护,2023,39(3):91-100. (PAN Xinxin, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Rapid forecasting of urban waterlogging based on K -nearest neighbor and hydrodynamic model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 91-100. (in Chinese))

[4] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):33-39. (in Chinese))

[5] CRONEBORG L, SAITO K, MATERA M, et al. Digital elevation models [R]. Washington, D. C. : World Bank Group, 2015.

[6] 陈光照,侯精明,张阳维,等. 西咸新区降雨空间非一致性对内涝过程影响模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17 (4): 37-45. (CHEN Guangzhao, HOU Jingming, ZHANG Yangwei, et al. Effects of rainfall spatial inconsistency on flood inundation processes in the Xixian New Area[J]. South-to-North Water Transfers and Water

Science & Technology, 2019, 17 (4): 37-45. (in Chinese))

[7] 杨东,侯精明,张兆安,等. 无人机载激光雷达技术在洪涝过程模拟中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29 (8): 25-29. (YANG Dong, HOU Jingming, ZHANG Zhaoan, et al. Application of unmanned airborne lidar technology in flood process simulation[J]. China Flood & Drought Management,2019,29(8):25-29. (in Chinese))

[8] 程涛,黄本胜,邱静,等. 基于 UAV 精细化地表数据的城市洪涝模拟与分析:以济南市海绵城市示范区为例[J]. 水力发电学报,2021,40(5):110-124. (CHENG Tao, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Urban flood simulation and analysis using UAV-based refined surface data: case study for sponge city pilot area of Jinan City [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40 (5): 110-124. (in Chinese))

[9] 朱海金. 基于不同插值算法生成 DEM 及对地形因子影响的研究[D]. 福州:福州大学,2013.

[10] LIU Shijie, TANG Hongcheng, FENG Yongjiu, et al. A comparative study of DEM reconstruction using the single-baseline and multibaseline InSAR techniques [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14:8512-8521.

[11] BUSCEMA P M, MASSINI G, FABRIZI M, et al. The ANNS approach to DEM reconstruction[J]. Computational Intelligence,2018,34(1):310-344.

[12] 马勇勇. 面向水动力模拟的河道地形重构及多分辨率数据融合方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2023.

[13] 张宏鸣,全凯,杨亚男,等. 基于深层残差网络的山区 DEM 超分辨率重构[J]. 农业机械学报,2021,52(1):178-184. (ZHANG Hongming, QUAN Kai, YANG Yanan, et al. Super-resolution reconstruction of DEM in mountain area based on deep residual network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52 (1): 178-184. (in Chinese))

[14] 侯精明,马勇勇,马利平,等. 无高精度地形资料地区溃坝洪水演进模拟研究:以金沙江叶巴滩-巴塘段为例[J]. 人民长江, 2020, 51 (1): 64-69. (HOU Jingming, MA Yongyong, MA Liping, et al. Simulation of dam break flood evolution for catchments without high-precision topographic data: case of section between Yebatan and Batang on Jinsha River[J]. Yangtze River,2020,51(1):64-69. (in Chinese))

[15] 孔乔,韩露,刘兴坡,等. 一种采用 SRTM DEM 重构河床数字地形的方法[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23 (3): 385-394. (KONG Qiao, HAN Lu, LIU Xingpo, et al. Methodology of digital riverbed reconstruction based on SRTM DEM data[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23 (3): 385-394. (in Chinese))

- [16] 周成宁. 随机和认知不确定性下基于代理模型的结构可靠性方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2021.
- [17] 靳国栋,刘衍聪,牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. 长春工业大学学报(自然科学版),2003,24(3):53-57. (JIN Guodong, LIU Yancong, NIU Wenjie. Comparison between inverse distance weighting method and Kriging[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2003,24(3):53-57. (in Chinese))
- [18] 侯精明,王俊辉,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))
- [19] 侯精明,董美君,李东来,等. 超标暴雨下城市雨水管网排水效果:以西安市沣西新城为例[J]. 地球科学与环境学报,2023,45(2):427-436. (HOU Jingming, DONG Meijun, LI Donglai, et al. Drainage effect of urban drainage-pipe network under extreme rainstorms: taking Fengxi New City in Xi'an City, China as an example[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2023,45(2):427-436. (in Chinese))
- [20] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall-runoff[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(4):1-5. (in Chinese))
- [21] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展,2019,39(6):56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(6):56-61. (in Chinese))
- [22] 周思斯,杜鹏飞,逢勇. 城市暴雨管理模型应用研究进展[J]. 水利水电科技进展,2014,34(6):89-97. (ZHOU Sisi, DU Pengfei, PANG Yong. Progress on application of storm water management model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(6):89-97. (in Chinese))
- [23] 齐文超,侯精明,刘家宏,等. 城市湖泊对地表径流致涝控制作用模拟研究[J]. 水力发电学报,2018,37(9):8-18. (QI Wenchao, HOU Jingming, LIU Jiahong, et al. Lake control on surface runoff causing urban flood inundation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018,37(9):8-18. (in Chinese))
- [24] 侯精明,李桂伊,李国栋,等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究[J]. 水力发电学报,2018,37(2):96-107. (HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018,37(2):96-107. (in Chinese))
- [25] 吕佳豪,侯精明,李东来,等. 城市排水管网排口水位变化对城市洪涝过程的影响[J]. 给水排水,2023,49(5):140-149. (LYU Jiahao, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Impacts of variation of drainage pipe network outlet water level on urban flood inundation[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023,49(5):140-149. (in Chinese))
- [26] 魏风华. 河北省唐山市地质灾害风险区划研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2006.
- [27] 戴子云,隋静轩,许蕊,等. 北京城市绿地土壤水分入渗性能研究[J]. 中国园林,2019,35(6):105-108. (DAI Ziyun, SUI Jingxuan, XU Rui, et al. Study on soil water infiltration in different urban green space in Beijing[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019,35(6):105-108. (in Chinese))
- [28] 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,2017,43(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,2017,43(9):115-119. (in Chinese))
- [29] 武敏,冯绍元,孙春燕,等. 北京市大兴区典型土壤水分入渗规律田间试验研究[J]. 中国农业大学学报,2009,14(4):98-102. (WU Min, FENG Shaoyuan, SUN Chunyan, et al. Field experimental study on soil infiltration process of Daxing District, Beijing[J]. Journal of China Agricultural University, 2009,14(4):98-102. (in Chinese))
- [30] 张爱军,岳艳杰,田龙,等. 冀北山地森林土壤水分物理性质和入渗规律研究[J]. 河北林果研究,2015,30(2):108-112. (ZHANG Aijun, YUE Yanjie, TIAN Long, et al. Study on water physical properties and infiltration law of forest soil in northern mountain of Hebei[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research,2015,30(2):108-112. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-23 编辑:熊水斌)