

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.15.019

基于扩散波方法的管网排水过程数值模拟

杨东¹, 侯精明¹, 李东来¹, 同玉¹, 黄绵松², 邓朝显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. 北京首创股份有限公司, 北京 100028; 3. 陕西省西咸新区沣西新城开发建设<集团>有限公司 海绵城市技术中心, 陕西 西安 712000)

摘要: 基于扩散波方法,构建了一套排水管网水动力模型,并与已开发的高分辨率城市地表水文水动力模型进行了耦合。以理想排水管网和陕西省西咸新区沣西新城某小区实际排水管网的排涝过程验证模型,并模拟城市暴雨致涝过程。结果表明:理想算例中,该模型与SWMM模拟排水口流量过程高度吻合;实际算例中,与实测排水口流量过程对比,该模型的Nash-Sutcliffe效率系数分别为0.74、0.72、0.93和0.71,大于SWMM模型的0.62、0.66、0.73与0.65。在模拟研究区内涝积水过程时,计算数据与实测数据吻合度高,内涝积水点均实现精确模拟。

关键词: 城市雨洪; 排水管网模型; 扩散波; 水动力方法; 防洪排涝

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)15-0113-08

Numerical Simulation of Pipe Network Drainage Process Based on Diffusion Wave Method

YANG Dong¹, HOU Jing-ming¹, LI Dong-lai¹, TONG Yu¹, HUANG Mian-song², DENG Chao-xian³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100028, China; 3. Technology Research Center for Sponge City, Fengxi New City Development and Construction <Group> Co. Ltd. of Shaanxi Xixian New Area, Xi'an 712000, China)

Abstract: A set of hydrodynamic models of drainage pipe network was constructed based on diffusion wave method, and it was coupled with a developed high-resolution hydrodynamic model of urban surface. The model was verified by an ideal drainage pipe network and an actual drainage pipe network of a residential area in Fengxi New City of Xixian New Area, and the process of waterlogging caused by urban rainstorm was simulated. The model was highly consistent with discharge flow process simulated by SWMM in the ideal example. In the actual example and compared with the measured discharge flow process, the Nash-Sutcliffe coefficients of this model was 0.74, 0.72, 0.93 and 0.71, respectively, which were larger than those of SWMM model (0.62, 0.66, 0.73 and 0.65). When simulating the waterlogging process in the study area, the calculated data had a high degree of coincidence with the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402704); 陕西省水利科技项目(2017slkj-14); 陕西省国际科技合作交流计划项目(2017KW-014); 固原海绵城市建设示范区海绵效果数值模拟项目(104-441218018)

通信作者: 侯精明 E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

measured data, and the waterlogging points could be accurately simulated.

Key words: urban stormwater; drainage pipe network model; diffusion wave; hydrodynamic method; flood control and drainage

随着全球气候剧变、极端暴雨发生概率增加以及我国城镇化快速发展^[1-2],内涝灾害频发,造成了难以衡量的损失。如2012年北京“7·21”特大暴雨、2016年西安“7·24”暴雨。通过建立城市排水管网模型,模拟城市地表产汇流以及排水管网排水过程,对于解决城市内涝问题具有重要意义。

目前有多种模型可以模拟城市排水管网排水过程,如由美国环境保护署开发的SWMM模型^[3],采用恒定流、运动波和动力波3种方法对城市排水系统进行模拟;丛翔宇等^[4]使用SWMM模型得到了不同降雨条件下区域排水系统的运行情况以及道路区域积水情况;清华大学规划院以SWMM模型为基础,自主研发了城市水资源管理模型(DigitalWater模型)^[5],建立了城市排水系统数字化平台。又如丹麦水资源及水环境研究所开发的MIKE模型,可采用隐式有限差分法求解一维水流问题来模拟管网排水过程;谢家强等^[6]使用MIKE URBAN模拟了上海中心城区的排水系统汇流过程,为其他城市排水管网的改造与评估提供了借鉴;李虎成等^[7]使用MIKE模型评估了巢湖市排水防涝风险状况。

但是以上模型并不能模拟高精度地形上地表产汇流过程,从而降低了管网排水过程模拟的准确性。为了解决上述问题,笔者构建了一套基于扩散波方法的排水管网模型,并与高效、高分辨率城市雨洪模型GAST^[8-10]进行耦合。GAST模型是一套能够适用于任何复杂网格的二阶算法,可以提高模拟的精度与计算效率。管网汇流模块通过堰流公式计算地表径流汇入雨水井的水量,并采用有限差分法求解扩散波方程计算管道流量。笔者应用GAST模型模拟了理想管网算例与西咸新区天福和园小区排水管网排水过程,对比相同输入条件下经率定验证的SWMM模型的模拟结果,量化比较了两模型模拟的排水口流量过程。

1 模型控制方程及其求解方法

本模型由地表产汇流模块与管网汇流模块耦合而成,能够输入反映微观地表特性的高分辨率地表高程数据,实现了高效、高精度雨洪过程计算,从而提高了计算地表径流汇入雨水井水量的准确性,可

以更加精确地模拟排水管网的排水过程。模型示意图见图1。

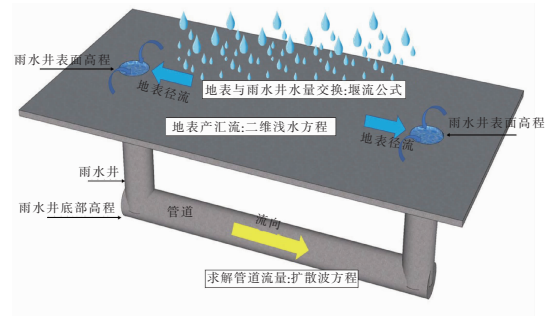


图1 管网排水过程示意

Fig. 1 Schematic diagram of pipe network drainage process

1.1 地表产汇流模块

1.1.1 控制方程

模型控制方程为服从静水压力分布假设的二维浅水方程(SWEs),不考虑运动黏性项、紊流黏性项、风应力和科氏力,二维非线性浅水方程守恒格式的矢量形式表示如下:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} = S \quad (1)$$

$$q = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$f = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$g = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S = \begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x - S_{fx} \\ -gh\partial z_b/\partial y - S_{fy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: x, y, t 为笛卡尔空间坐标和时间坐标; q 为变量矢量,包括水深 h 和单宽流量 q_x, q_y ; u 和 v 分别表示 x, y 方向上的流速; f 和 g 分别为 x, y 方向上的通量矢量; S 为源项矢量; z_b 为河床地面高程; i 为净雨; $S_{fx} = gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3}$, $S_{fy} = gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3}$, n 为曼宁系数。

1.1.2 数值方法介绍

地表产汇流过程通过动力波方法求解二维浅水方程,计算区域采用 Godunov 格式有限体积法进行空间离散。为了处理急变流和非连续问题^[11],计算单元界面上的质量通量和动量通量通过 HLLC 近似黎曼求解器计算。模型通过静水重构来修正干湿边界处负水深,并采用流速作为计算变量来替代单宽流量,将容易失稳的二阶格式在水深低于或流速高于一定值时切换为稳定的一阶计算格式^[12]。摩阻源项使用 Liang 和 Marche 改进的分裂点隐式法来提高计算稳定性,采用二阶显式 Runge Kutta 方法来保证时间积分的二阶精度^[13],同时引入图形处理器 (GPU) 加速计算技术,在不降低精度的条件下大幅提升计算速度^[14]。

1.2 管网汇流模块

1.2.1 控制方程

计算地表径流汇入雨水井水量所采用的堰流公式如下:

$$Q = mb\sqrt{2gh}^{3/2} \quad (6)$$

式中: Q 为地表径流汇入管网的流量; m 为流量系数; b 为雨水井宽度; g 为重力加速度; h 为雨水井处水深。

管网模块采用有限差分法求解扩散波方程计算管道流量,扩散波方程如下:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dq}{dt} + gA \frac{d\eta}{dx} + gAS_f = 0 \quad (8)$$

式中: A 为管道过水断面面积; q 为管道流量; x 为固定横截面沿流程的距离; t 为时间; g 为重力加速度; $d\eta/dx$ 为水力坡降; S_f 为摩阻比降, $S_f = Q|Q| \times n^2 / (A^2 \times R^{4/3})$ 。

1.2.2 管网排水模拟计算

管网汇流模块将管道内的水流按照非恒定流形式进行计算,通过堰流公式计算地表径流汇入雨水井的水量,通过求解扩散波方程计算管道流量,并且修正了雨水井水深出现负值的情况,可以准确、真实地反映排水系统的运行状态,管网模块的求解过程如下:

① 读取管网输入文件

首先读取输入文件,包括雨水井个数、坐标、大小、底部高程、顶部高程、所连接管道编号以及雨水

井类型(普通雨水井或排水口)、管道个数、管长、管径、进出口底部高程、进出口局部水头损失系数、管道糙率、所连雨水井编号等。并将雨水井流量、水深、管道入流与出流、水深等变量初值定义为 0。最后将管网数据与研究区域地表地形进行耦合,使雨水井所在网格可精确对应到研究区域相应的地表网格上。

② 计算地表径流汇入管网流量

计算地表径流汇入雨水井水量时需首先判断雨水井水深是否小于井深,若雨水井水深小于井深,通过堰流公式计算地表径流汇入雨水井的流量;若雨水井水深大于或等于井深,将会出现溢流现象,此工况下将由相邻雨水井的水力坡度计算溢流量。

③ 计算各管道流量

首先计算管道的水力坡度 ($J = d\eta/dx$)、管道过水断面面积 A 及湿周等,进而求出水力半径。当管道处于无压流(重力流)状态时,通过求解扩散波方程计算管道入流流量 q_{in}^n 和出流流量 q_{out}^n 。首先求出摩阻比降 $S_f = q_{out}^{n-1} |q_{out}^{n-1}| \times n^2 / (A^2 \times R^{4/3})$, 由于过水断面面积 A 、重力加速度 g 与时间步长 dt 已知,进而求出这一时间步长内的出流流量 $q_{out}^n = q_{out}^{n-1} - dt \times (gAS_f - gAJ)$, 同理求出管道入流流量 $q_{in}^n, q_{in}^{n-1}, q_{out}^{n-1}$ 为上一时间步长内的管道入流量与出流量。当管道处于有压流状态时,通过计算管道所连雨水井的水位差计算水力坡降,从而求出管道入流流量 q_{in}^n 和出流流量 q_{out}^n 。

④ 计算各节点水深

计算出地表径流汇入雨水井的流量 Q , 与其所连接管道的入流流量 q_{in}^n 和出流流量 q_{out}^n , 进而求出雨水井水深 $h^n = h^{n-1} + 4 \times (q + q_{in}^n - q_{out}^n) \times dt / A$, h^{n-1} 为上一时间步长内雨水井水深。当雨水井水深小于所连接管道的最小水深时,通过将管道入流量与出流量折减修正雨水井出现负水深的情况。

⑤ 计算各管道水深

当管道入流流量 q_{in}^n 和出流流量 q_{out}^n 已知时,可计算出这一时刻内管道过水断面面积 $A^n = A^{n-1} + (q_{in}^n - q_{out}^n) \times dt / L$, A^{n-1} 为上一时刻内管道过水断面面积, L 为管长,然后通过二分法用过水断面面积反算管道水深。

⑥ 更新管道与雨水井变量

将这一时刻的管道水深、流量与雨水井水深等

变量作为下一时刻的初始值, $q_{in}^{n-1} = q_{in}^n, q_{out}^{n-1} = q_{out}^n, h^{n-1} = h^n$ 。

2 模型验证

为评价模型性能及计算精度,模拟了理想算例和实际算例的管网排水过程,并将 GAST 模型和 SWMM 模型的模拟结果进行对比。采用 Nash - Sutcliffe 效率系数(NSE)作为模型率定与结果分析的评价指标,将 $NSE \geq 0.5$ 作为模型率定效果的最低要求^[15]。NSE 计算方法如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_i^{obs} - q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (q_i^{obs} - \bar{q}^{obs})^2} \quad (9)$$

式中: q_i^{sim} 为模拟流量序列; q_i^{obs} 为实测流量序列; \bar{q}^{obs} 为实测流量均值; N 为实测流量数据个数。

2.1 理想管网模拟

理想算例采用倒金字塔型地形作为汇流子流域,子流域长为 100 m、宽为 100 m、坡度为 0.05、分辨率为 1 m,共计 10 000 个方形网格单元,子流域中心有 1 个与管道连接的雨水井,可以将雨水排出,雨水井与管道初始水深为 0,管道曼宁系数取 0.013,管长为 50 m,如图 2 所示。地形最低处有 1 个雨水井,通过管网将水排出。构建的 SWMM 模型如图 3 所示。

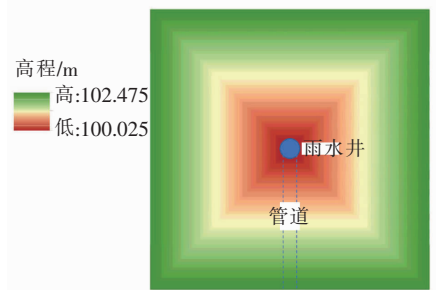


图2 理想地形示意

Fig. 2 Ideal topography

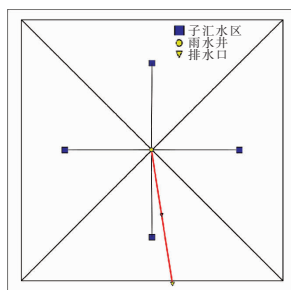


图3 SWMM 模型示意

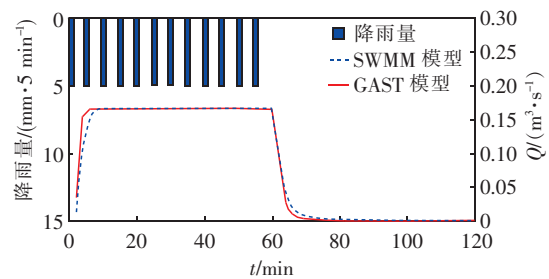
Fig. 3 Schematic diagram of SWMM model

2.1.1 模型设置

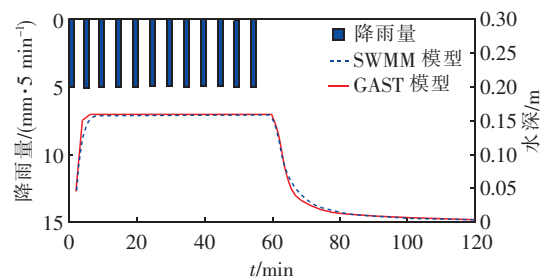
模型输入资料包括降雨、地形及管网数据。降雨强度为 60 mm/h,均匀降雨,降雨历时为 3 600 s,模拟时长为 14 400 s。整个流域下渗为 0,流域 4 个方向皆为闭边界,子流域曼宁系数取值 0.02。

2.1.2 模拟结果对比与分析

理想算例排水口流量过程以及水深对比见图 4。可以看出,GAST 模型与 SWMM 模型模拟排水口流量过程线高度吻合。经计算可得,相比于 SWMM 模型,GAST 模型模拟结果的 NSE 为 0.97,均方根误差(RMSE)为 0.006 8,小于 SWMM 模拟值 RMSE 的一半(0.040 7)。



a. 排水口流量过程及对比



b. 排水口水深变化

图4 理想算例管网排水口模拟流量过程及对比

Fig. 4 Flow process and comparison of ideal pipe network discharge port

2.2 西咸新区某小区实际管网模拟

2.2.1 研究区域概况

研究区域为沣西新城天福和园小区,该小区位于沣西新城天府路以南、兴信路以西、咸户路以东、天雄西路以北。研究区内布设有透水铺装和雨水花园两种低影响开发措施,并安装有流量监测仪器和微气象站,监测数据完善。

① 降雨资料

选用 2017 年 9 月 9 日和 9 月 16 日 2 场实测降雨数据对 SWMM 模型进行参数率定,选用 2017 年 8 月 20 日及 2018 年 7 月 31 日、8 月 7 日、9 月 15 日 4 场实测降雨数据对 GAST 模型与 SWMM 模型进行

验证。

② 管网数据及地形数据

管网资料来源于沔西新城管理委员会,降雨数据采用天福和园内微气象站的实测降雨数据,流量数据采用该区监测仪器的实际监测数据。地形资料通过无人机载激光雷达航测获取,分辨率为1 m,管网布置及地形数据分别见图5和图6。

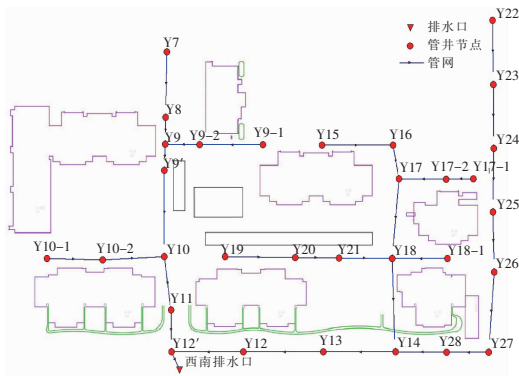


图5 研究区域管网布置

Fig. 5 Layout of pipe network in study area

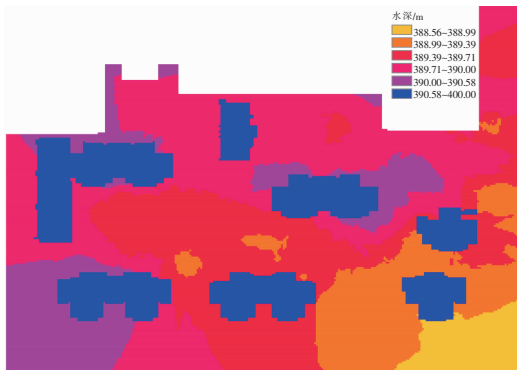


图6 研究区域地形数据

Fig. 6 Topographic data of study area

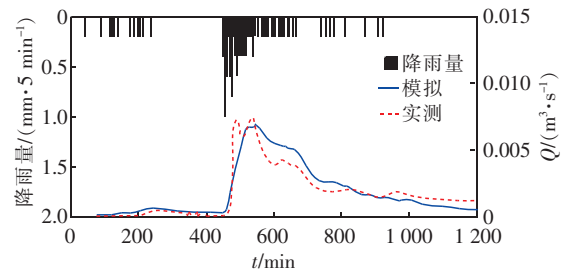
2.2.2 SWMM模型的构建

① SWMM模型的构建

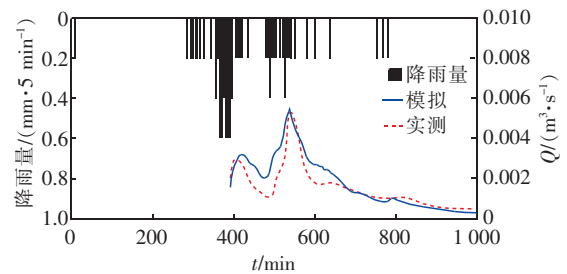
研究区域面积为36 700 m²,小区西南排水口安装有流量液位监测仪,故建立西南排水口所连接的管网及管网服务的汇水分区模型。模型首先将研究区域划分成若干个子汇水分区,对管网进行概化,再根据实际地形选择合适的流向,经产汇流过程及管网排水过程,最后在出口处进行监测。根据管网布置、LID布置及实际地形构建SWMM模型。模型共有71个子汇水分区、31个节点、31段雨水管网和1个出口。

② 参数率定

采用沔西新城2017年9月9日和9月16日2场实测降雨径流数据对SWMM模型参数进行率定,率定结果如图7所示。在2017年9月9日和9月16日实测降雨场次下,SWMM模型模拟结果的Nash-Sutcliffe效率系数分别为0.84与0.76,表现出良好的适用性。



a. 2017年9月9日降雨



b. 2017年9月16日降雨

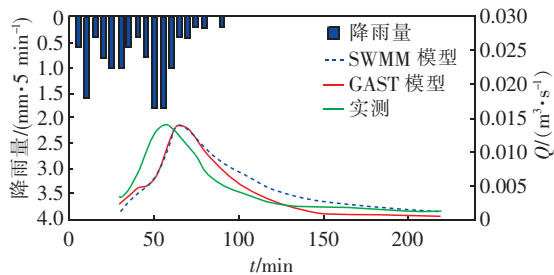
图7 SWMM模型参数率定排水口流量过程及对比

Fig. 7 SWMM model parameter calibration discharge flow process and comparison

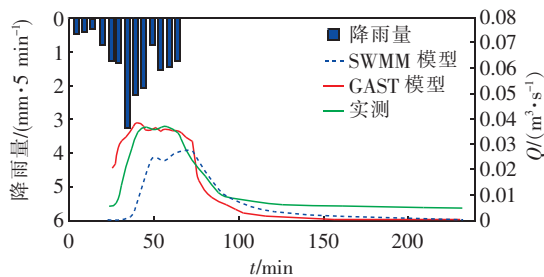
2.2.3 模拟结果对比与分析

应用两种模型模拟沔西新区天福和园小区的排水管网排水过程,在实测降雨条件下,排水口流量过程见图8。可以看出,在实测降雨场次下,GAST模型模拟结果的Nash-Sutcliffe效率系数分别为0.74、0.72、0.93、0.71,大于SWMM模型的0.62、0.66、0.73与0.65,可见所开发的模型可有效模拟市政管网排水过程。在4场实测降雨条件下,实测排水口流量峰值分别为0.013 98、0.037 43、0.011 80、0.003 55 m³/s,峰现时刻分别为0.97、0.77、0.72、1.35 h。GAST模型模拟流量峰值为0.014 00、0.038 50、0.011 91、0.003 71 m³/s,相对误差分别为0.14%、2.86%、0.93%、4.51%,峰现时刻分别为1.03、0.70、0.72、1.1 h,相对误差分别为6.19%、9.09%、0.18%、52.52%。SWMM模型模拟流量峰值分别为0.013 87、0.028 33、0.012 77、0.003 43 m³/s,相对误差分别为0.79%、24.31%、8.22%、3.38%,峰现时刻分别为1.07、1.20、0.67、

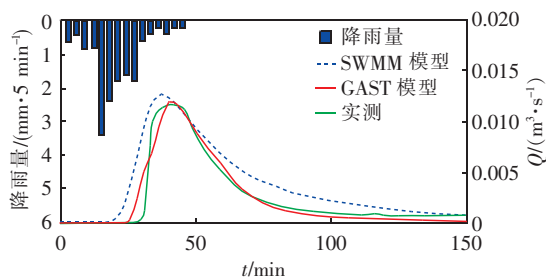
1.65 h, 相对误差分别为 10.31%、55.84%、6.94%、22.22%。



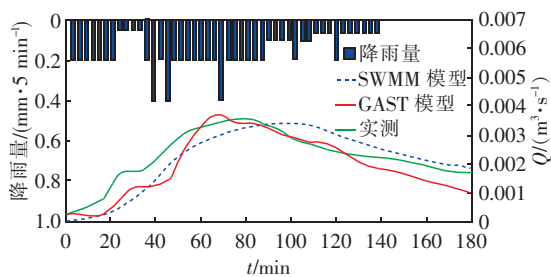
a. 2017年8月20日



b. 2018年7月31日



c. 2018年8月7日



d. 2018年9月15日

图8 两种模型排水口流量过程及对比

Fig. 8 Discharge flow process and comparison of two models

3 模型应用

3.1 研究区域概况及模型构建

模型输入资料分为降雨过程、地形数据、下渗资料及土地利用4部分。其中模型输入的降雨条件为2016年8月25日西咸新区云谷10号楼气象站实测

降雨数据。降雨历时7 h, 累计降雨量为66 mm, 双峰雨型, 降雨强度峰值出现于3.1 h, 具体降雨过程见图9, 降雨量统计间隔为10 min。

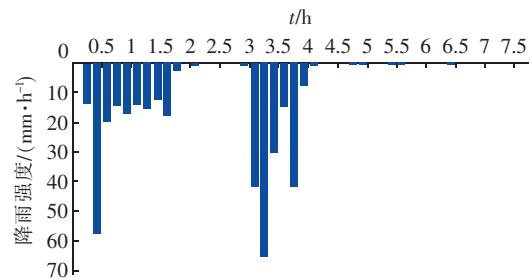


图9 2016年8月25日场次实测降雨过程

Fig. 9 Measured precipitation of rainfall event on August 25, 2016

由于地表形态对汇流过程有重要影响, 因此需要输入高精度的地表数据来尽可能多地代表城市的真实地形。本研究采用无人机载激光雷达技术对研究区域的地形进行测量, 得到并输入网格大小为2 m的DEM和DOM数据, 共 39.8×10^4 个平方格单元。得到的正投影图像和数字高程见图10。不同土地利用的稳定下渗率与曼宁糙率见文献[16]。

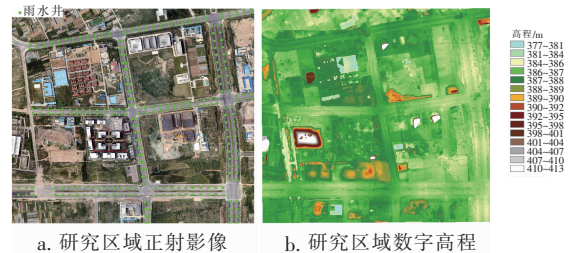


图10 研究区域正射影像和数字高程

Fig. 10 DOM and DEM of study area

3.2 结果分析

模拟计算时采用开边界, 边界无入流流入, 计算过程中库朗数采用0.5, 模拟降雨至7.5 h后的积水过程, 结果见图11。

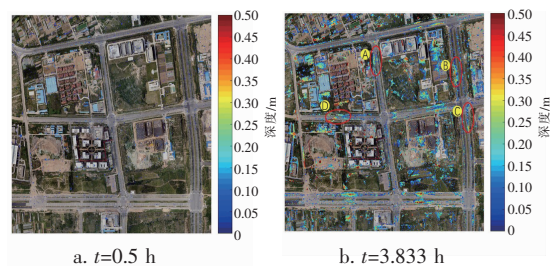


图11 研究区域内涝积水过程

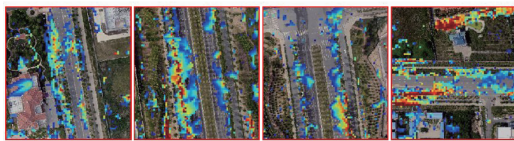
Fig. 11 Waterlogging process in study area

可以确定自 0.5 h 时已形成径流,且流量不断增加,降雨历时达到 3.833 h 时内涝积水达到峰值,标出了 4 处积水点与实际检测记录一致,其中 A、B、C、D 为典型积水点,与实测面积相近(见表 1 和图 12)。模拟结果的径流变化趋势与实际相符,模拟效果较好。因此,GAST 模型耦合管网排水模型能较好地服务于洪涝模拟与预测。

表 1 模拟积水面积与实际情况对比($t=3.833$ h)

Tab. 1 Comparison of simulated and measured waterlogging area with rainfall duration of 3.833 h

项 目	积水面积/ m^2		平均相对误差/%
	模拟	实测	
A 点	1 552	1 536	1.04
B 点	9 428	9 600	-1.79
C 点	3 704	3 720	-0.43
D 点	2 284	2 254	1.33



a. A 点 b. B 点 c. C 点 d. D 点

图 12 典型积水点模拟结果

Fig. 12 Simulation results of typical waterlogging points

4 结论

① 基于扩散波方法,构建了一套排水管网水动力模型,并与已开发的高分辨率城市地表水文水动力模型进行了耦合,可用来精细模拟含管网排水效果的城市雨洪过程。在理想算例下,该模型的 NSE 为 0.97,模拟结果高度吻合,精度较好。

② 在 4 场实测降雨条件下,采用该模型对西咸新区某小区降雨径流-排水过程进行模拟,与实测相比,模型模拟结果的 NSE 分别为 0.74、0.72、0.93、0.71,大于 SWMM 模型的 0.62、0.66、0.73、0.65,而且最大流量相对误差为 0.14%、2.86%、0.93% 与 4.51%。表明所构建的模型可以有效、稳定地模拟城市管网排水过程,而且精度较佳,适用性较好。

③ 通过对西咸新区沣西新城核心区进行模拟,并通过实测数据验证,可得该场降雨中 4 处典型内涝积水范围与实测积水范围相近,证实了该模型可适用于高精度大范围的城市雨洪过程模拟,可为城市规划建设及雨洪管理提供技术支持。

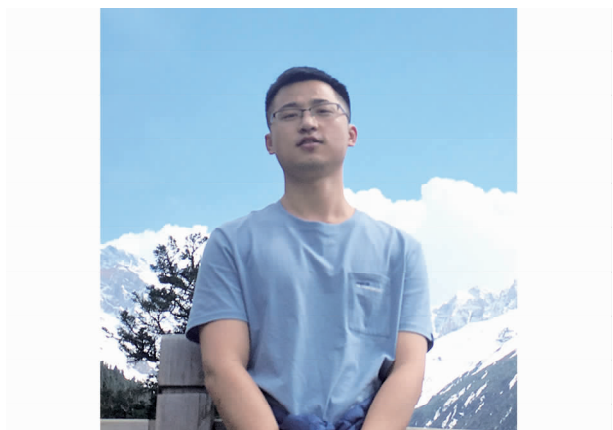
④ 鉴于该模型与地表径流过程耦合部分是通

过交换水量来实现的,直接耦合模拟会导致计算效率低下,后续将通过优化算法来实质性地提升分辨率地表水动力过程和管网水动力过程的耦合模拟效率。

参考文献:

- [1] 严登华,王浩,张建云,等. 生态海绵智慧流域建设——从状态改变到能力提升[J]. 水科学进展, 2017,28(2):302-310.
Yan Denghua, Wang Hao, Zhang Jianyun, et al. Construction of an ecological sponge-smart river basins: from changing status to improving capability [J]. Advances in Water Science, 2017,28(2):302-310 (in Chinese).
- [2] 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 Jianyun, Wang Yintang, He Ruimin, 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).
- [3] Gironás J, Roesner L A, Rossman L A, et al. A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM) [J]. Environmental Modelling & Software, 2010,25(6):813-814.
- [4] 丛翔宇,倪广恒,惠士博,等. 基于 SWMM 的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析[J]. 水利水电技术, 2006,37(4):64-67.
Cong Xiangyu, Ni Guangheng, Hui Shibo, et al. Simulative analysis on storm flood in typical urban region of Beijing based on SWMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(4): 64-67 (in Chinese).
- [5] 张杰. 基于 GIS 及 SWMM 的郑州市暴雨内涝研究[D]. 郑州:郑州大学,2012.
Zhang Jie. Research of Rainstorm Waterlogging of Zhengzhou City Based on GIS and SWMM [D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2012 (in Chinese).
- [6] 谢家强,廖振良,顾献勇. 基于 MIKE URBAN 的中心城区内涝预测与评估——以上海市霍山-惠民系统为例[J]. 能源环境保护, 2016,30(5):44-49,37.
Xie Jiaqiang, Liao Zhenliang, Gu Xianrong. Prediction and evaluation of waterlogging in highly urbanized areas based on MIKE URBAN: demonstrated on the example of Huoshan-Huimin drainage system in Shanghai [J]. Energy Environmental Protection, 2016,30(5):44-49,

- 37(in Chinese).
- [7] 李虎成,王天宇,王灵华,等. 基于 MIKE FLOOD 的典型滨湖城市排水防涝系统规划[J]. 中国农村水利水电,2017(4):77-80,85.
- Li Hucheng, Wang Tianyu, Wang Linghua, *et al.* Typical lakeside city drainage waterlogging system planning based on MIKE FLOOD [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(4):77-80,85(in Chinese).
- [8] Hou J M, Liang Q H, Simons F, *et al.* A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains[J]. Computers & Fluids, 2013, 82(17):132-147.
- [9] Hou J M, Liang Q H, Zhang H B, *et al.* An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 66:131-152.
- [10] 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 Hydropower, 2018, 37(9):8-18(in Chinese).
- [11] Smith L S, Liang Q H. Towards a generalised GPU/CPU shallow-flow modelling tool[J]. Computers & Fluids, 2013, 88:334-343.
- [12] Liang Q H, Smith L S. A high-performance integrated hydrodynamic modelling system for urban flood simulations[J]. Journal of Hydroinformatics, 2015, 17(4):518.
- [13] Hou J M, Simons F, Mahgoub M, *et al.* A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 257(15):126-149.
- [14] 张加乐. 基于 GPU 并行计算的非定常 Euler 方程算法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- Zhang Jiale. Numerical Studies of Unsteady Euler Equations Based on GPU Parallel Computing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012(in Chinese).
- [15] 包为民. 水文预报[M]. 3版. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- Bao Weimin. Hydrological Forecast [M]. 3rd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2006(in Chinese).
- [16] 侯精明,王润,李国栋,等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报,2018,37(3):40-49.
- Hou Jingming, Wang Run, Li Guodong, *et al.* High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3):40-49(in Chinese).



作者简介:杨东(1997-),男,陕西西安人,大学本科,研究方向为城市水利。

E-mail:841003445@qq.com

收稿日期:2019-08-26

节水优先、空间均衡、
系统治理、两手发力