

魏军,魏铁鑫,陈莎,等.基于GIS的石家庄市暴雨内涝数学模型与应用[J].干旱气象,2018,36(4):701-708. [WEI Jun, WEI Tiexin, CHEN Sha, et al. Application of the Mathematical Model of Rainstorm Waterlogging in Shijiazhuang City Based on GIS[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(4):701-708], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-04-0701

基于GIS的石家庄市暴雨内涝数学模型与应用

魏军,魏铁鑫,陈莎,彭相瑜,赵亮

(河北省气象灾害防御中心,河北 石家庄 050021)

摘要:利用石家庄市高精度城市地理信息、排水工程设施、河道地形、气象降水等基础数据,基于天津城市内涝模型技术,构建了石家庄市暴雨内涝数学模型。同时在原有工作基础上,对模型网格概化方式和计算模式加以改进,将城市河网、路网、管网和社区的计算网格分层划分,形成分区、分层和立体多重的内涝计算模式。选取典型暴雨两个例对模型的模拟效果进行验证,结果表明城区最大积水落区预报成功率达70%以上,模拟的积水深度误差主要分布在0.2 m以内。此外,基于WEBGIS技术开发的石家庄城市内涝监测预警平台,进一步增强了模型的表现力。

关键词:暴雨;城市内涝;数学模型;石家庄市

文章编号:1006-7639(2018)04-0701-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-04-0701

中图分类号:P333.2

文献标志码:A

引言

近年来,随着全球性的气候变暖以及城市化进程的不断加快,我国多个城市频繁遭遇极端强降水袭击,往往引发严重内涝,其严重制约社会经济发展的同时,也给人民群众生产生活及生命财产安全带来较大危害,已成为影响城市公共安全的重要因素^[1-2]。因此,如何利用内涝数学模型开展城市积水预测预报,提升城市内涝灾害风险预警服务能力,最大程度地减轻内涝灾害损失,促进经济社会发展,已经成为加强城市气象灾害防御工作的重要抓手和当务之急。

为减少城市内涝带来的危害,许多欧美发达国家在经验累积的基础上,已研究开发了一些具有不同针对性的水力水文模型,如美国的雨洪管理模型(SWMM)、水文计算模型(HSP)和蓄水、处理与溢流模型(STORM)、英国沃林福特(WALLINFORD)模型以及丹麦水资源及水环境研究所(DHI)研发的MIKE模型软件等,对城市排水系统的数学模拟具有很强的计算功能,表现出良好的适用性^[3-7]。相较而言,国内在城市暴雨内涝模型研究方面相对国外起步虽晚,但发展迅速,目前也取得了一定的成

果。岑国平^[8]在20世纪90年代初建立了我国首个完整的城市雨水径流计算模型(SSCM),实现对城市雨水比较精确的模拟;之后徐向阳^[9]提出了适合于平原城市的城市雨洪数学模型,实现对城市地表、管网、河网各节点水位与流量过程的模拟计算功能。21世纪初,中国水科院和天津市气象科学研究所合作,以水动力学理论为基础,以城市地表水流运动为研究对象,研制了天津市城区沥涝仿真模型^[10],在此模型基础上,解以扬等^[11]考虑到不同城市下垫面地形地貌特征的多样性,改进了其对地表的网格概化方式,提高了该模型的适用性和可推广性。基于天津城市内涝模型技术,南昌、武汉、上海、莆田、廊坊等多地构建了本地化的城市内涝数学模型,并在实际业务中加以应用,取得良好的服务效果^[12-16]。

石家庄作为河北省省会城市,近年来由于城市化进程不断加快,不透水面面积增加,雨水渗透减少,再加上城市排水管网系统设计标准偏低,城市经济和人口的暴露量逐年增大,每年受到内涝灾害影响较为严重,常常造成很大的经济损失。据统计,石家庄中心城区易积水点多达40余处,最大积水深度达3 m,最长积水历时20 h,2015年8月30日、2016年7月19—20日的降水都曾给石家庄市造成大面

收稿日期:2018-03-22;改回日期:2018-05-21

基金项目:河北省气象局科研项目(17ky05)资助

作者简介:魏军(1987—),男,江苏泗阳人,工程师,主要从事气象灾害研究。E-mail:weijun052700@126.com。

积内涝灾害。因此,为更好地开展石家庄城市内涝风险预警评估工作,本文基于天津城市内涝模型技术,充分考虑石家庄市防汛工作的特点和需求,结合石家庄市的地理特征,以城市地表和明渠河道的水流运动作为模拟对象,构建石家庄城市暴雨内涝数学模型,开展城市积水过程的模拟研究。同时针对原有基础内涝模型存在的问题,对模型网格概化方式和计算模式进行改进,将城市河网、路网、管网和社区的计算网格分层划分,形成分区分层和立体多重的内涝计算模式,以期提高模型模拟精度。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

石家庄市地处中纬欧亚大陆东岸,属暖温带半湿润季风性气候,西部是太行山区,东部是滹沱河冲积平原,受地理位置和地理环境的影响,全年降水分布不均,年平均降水量为 546.0 mm,主要集中在 7、8 月份,常以暴雨形式出现。由于市域西部山区多由古代灰岩和变质岩系组成,山前丘陵多为单面山地,地面切割强烈,山体相对较高,谷底狭窄,极易形成泥石流和局部山洪灾害。而东部平原区域地势平缓,落差较小,当降水随河流由山区进入平原,流速由急变缓,往往导致河水宣泄不畅,增加市中心城区防洪排涝压力,容易造成城市内涝灾害^[17]。

本文内涝模拟区域范围的西部、南部和东部以石家庄主城区三环路为界,北部以古城路为界,包括石家庄市桥西区、裕华区、新华区、长安区和高新开发区的局部,总面积约为 320 km²。区域内自然地形呈西高东低分布,海拔标高为 33 ~ 82 m,但总体地势较为平坦,平均坡度为千分之一。境内主要道路包括石太铁路、石德铁路、京广铁路、307 国道、107 国道、石黄高速、石太高速等,主要明渠河道有民心河、石津干渠、环城水系、南栗明渠、总退水渠、南水北调工程水系等(图 1)。

1.2 资料与来源

资料包括石家庄中心城区高精度基础地理信息、排水工程设施信息、河道地形信息、历史水深数据、气象降水数据等。其中模型构建所需的基础地理信息数据由石家庄市地理信息局提供,包含了 1:1000 的石家庄市土地利用分类、行政区划、地形高程点等信息;排水工程设施信息和河道地形信息主要由石家庄市城乡规划设计研究院及市政部门提供,包括排水管网管径、泵站排水能力等信息;历史水深数据主要来源于石家庄市排水管理处;气象降水数据则来源于河北省气象信息中心。



图 1 研究区主要道路和水系分布

Fig. 1 Distribution of main roads and water system in Shijiazhuang

2 城市内涝模型构建

2.1 模型网格划分

本文构建的城市内涝数学模型的主要模拟对象为石家庄中心城区的地表与明渠河道水流运动,同时考虑到研究区下垫面的地形地貌特征,采用无结构不规则网格进行模型计算区域划分。网格设计时需要充分考虑城市地形地貌特征和积水区的分布情况,如城市的重点服务区和易积水片区采用较密的网格划分,在城市边郊和不易积水区域采用较为稀疏的网格进行划分,且单一网格内的下垫面属性尽可能相同。网格的边数最多不超过 6 边,网格各边定义成通道,承担网格间水量交换的作用,其法线方向可为任意方向[图 2(a)]。按照有限体积法,取单元网格为控制体,在网格中心处计算水位 H ,在网格周边通道的中点处计算流量 Q ,水位、流量分别具有网格和通道平均值的含义,在时间上采取时间交错计算方式[图 2(b)]。

针对建模区域地道桥、涵洞、暗河较多等情况,原有基础内涝模型仅考虑单一类型网格的积水,将道路和管网等均概化到同一个网格中,对于道路积水、河道水位均未有较好体现,本文在模型网格划分时采用立体多重和分区、分层方式对模型加以改进。立体多重指在同一平面位置上布设多重网格,解决地道桥、涵洞、暗河等网格单元立体层面的水体汇流和积水问题;分区是指将网格按路网、社区和河网划分,各区自成体系,实现逐区计算;分层是指管网层、地表层、雨量层等独立计算。

根据上述网格设计原则,利用高精度城市地理信息数据,最终划分得到建模区域内河道型网格 545 个,道路型网格 3 169 个,社区型网格 11 055 个,如图 3 所示。最后按照网格所含地物特征及房屋

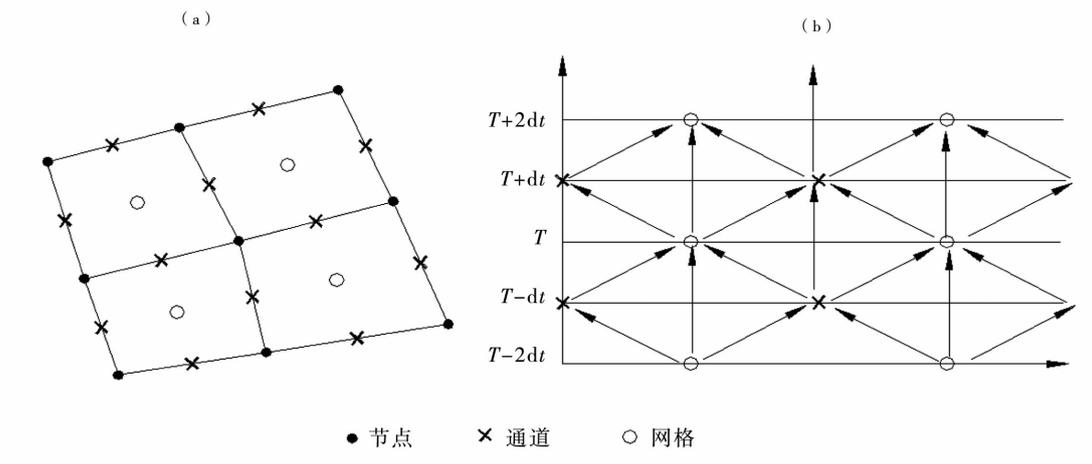


图2 H 和 Q 的空间布置方式(a)及时间交错计算方式(b)
 Fig.2 Spatial arrangement (a) and time staggered computational schemes (b) of H and Q

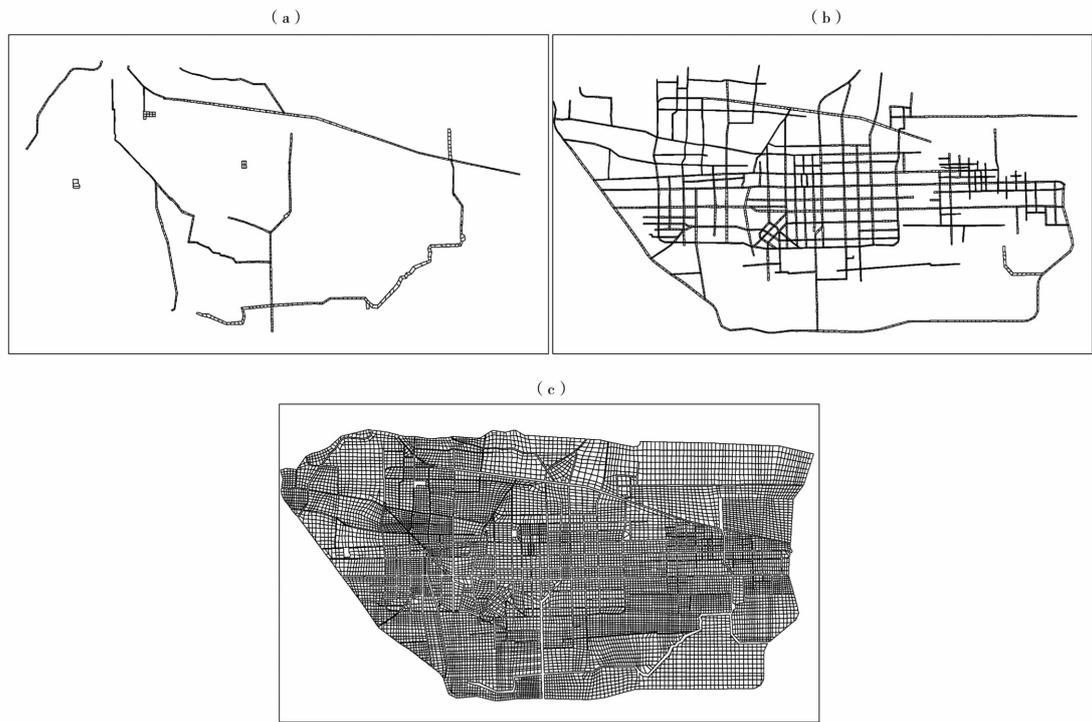


图3 研究区城市内涝模型网格划分
 (a)河道型,(b)道路型,(c)社区型
 Fig.3 Division of river grids (a), road grids (b) and community grids (c) of the urban waterlogging model in the study area

面积所占比例赋值相应的网格糙率和建筑面积修正率。

2.2 模型计算方法

数学模型运用有限体积法的思想,将气象降水数据作为模型的降水初值和边界条件,以平面二维非恒定流的基本控制方程为骨架,同时针对小于离散网格尺度的排水渠涌或河道,在二维模

型中结合了一维明渠非恒定流方程的算法,计算地下排水管网内的水流,用连续方程的源汇项控制地下排水管网与地面的水量交换,对漫堤等采用宽顶溢流公式计算水流。图4为改进后的城市内涝模型积涝计算流程图,其中包含了面雨量插值,路网、河网、社区和管网汇流模拟与泵站排水或管网自流3个程序块。

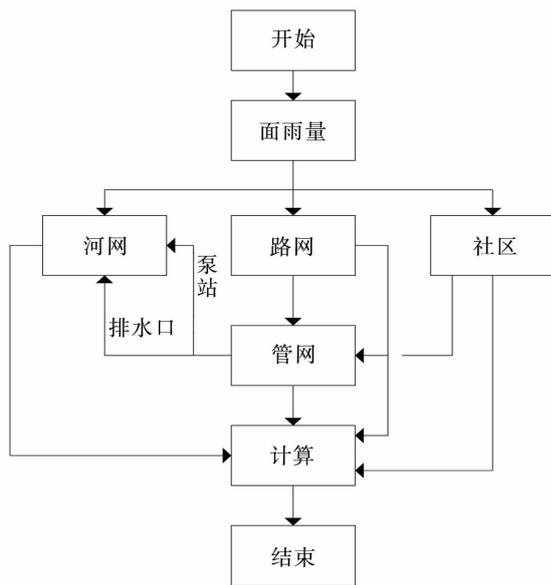


图4 城市内涝模型计算流程示意图
Fig.4 Schematic diagram of calculation processes of the urban waterlogging model

2.2.1 面雨量插值

将自动雨量站降雨资料转换为无结构不规则网格的面雨量,必须经过插值处理,才能作为模型的降雨边界条件。本文采用二次曲面插值法计算面雨量。

设雨量观测站的个数为 N 。对计算区域内任意位置 (x, y) , 可以选取与之最近的 $n (n \leq N)$ 个观测点, 由这 n 个观测点的实测降雨量 q_1, q_2, \dots, q_n , 用最小二乘法拟合一个二次曲面, 该位置 (x, y) 的降雨量可以由这个二次曲面来确定。具体方法如下:

设二次曲面方程为:

$$q(x, y) = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6 \quad (1)$$

n 点的误差和为:

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q - q_i)^2} \quad (2)$$

由最小二乘法原理, 要使 n 点的误差和 R 最小, 则有:

$$\frac{\partial R}{\partial a_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

由式(3)求出 $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 再代入(1)中, 求出点 (x, y) 的插值降雨量 q 。

2.2.2 基本控制方程

(1) 二维非恒定流基本方程式为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (4)$$

动量方程式为:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \quad (6)$$

式中: H 为水深; Z 为水位, $Z = Z_0 + H$, Z_0 为底高程; q 为源汇项, 包括有效降雨量和排水强度两项; M, N 分别为 x, y 方向上的单宽流量, 且 $M = Hu, N = Hv$, u 和 v 分别为流速在 x, y 方向上的分量; n 为糙率; g 为重力加速度。

(2) 一维非恒定流基本控制方程为:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial l} = -gAS_f \quad (7)$$

式中: Q 为截面流量; A 为计算断面的过水面积; S_f 为摩阻坡降, 由曼宁公式可得:

$$S_f = \frac{U^2 n^2}{R^{4/3}} = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}}$$

(3) 宽顶堰溢流公式:

$$Q^{T+dt} = \sigma_s m b \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (8)$$

式中: Q 为堰顶流量; m 为宽顶堰溢流系数; σ_s 为淹没系数; b 为堰宽, H 为堰顶上游水位。

2.3 城市排水系统与模型计算结合

按照城市道路的走向对地下排水管网进行概化, 同时根据排水能力实际给各管网单元赋值收水半径, 管网收水进入河网, 管网排水口与河段汇流口以水动力衔接。内涝模型计算通过调用收水半径系数控制区域收水范围和强度, 以距离倒数赋值权重用于确定排水半径内的汇流分布。

模型将闸门或排水泵站概化在相邻位置的通道上。在降雨过程中, 地面积水除去下渗部分以外均向管道内汇集, 管道沿各自系统汇合至出口处, 出口处由闸门、泵站或淹没出流管道向河道泻水, 形成“雨水, 地面积水, 管道汇水, 泵、闸、淹没出流管道排水, 河道汇水”的模拟过程, 如图5所示。

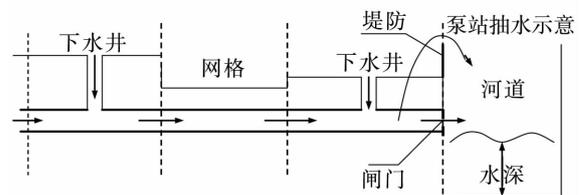


图5 闸门、泵站或淹没出流管道排水示意图
Fig.5 The drainage scheme of water gate, bumping station and submersed discharge pipe

泵站的排水量以市政排水部门提供的数据为主,可以根据实际排水运作方式对其进行干预。闸门是控制调节管网间、管网与河道间及河道间流量的衔接部位,其排水量按管网水量与自流口门的设计流量为条件进行调节。口门的排水量按照河道与管道的水位差进行调节,当河道水位高于管道水位时则会出现倒灌现象。

3 结果分析

3.1 典型个例验证

2016年7月19—20日石家庄市区出现了一次连续暴雨过程,其中暴雨主要集中在19日09:00(北京时,下同)至20日09:00,石家庄站24h降水量为284.3mm,小时雨强最大达34.0mm(图6),城区多处出现明显积水,部分路段出现断交情况,个别地道桥最大积水深度达到3m。利用所建立的石家庄市城市暴雨内涝数学模型,对此次过程造成的积涝程度进行验证计算,模拟时段为19日22:00至20日09:00,共历时12h。

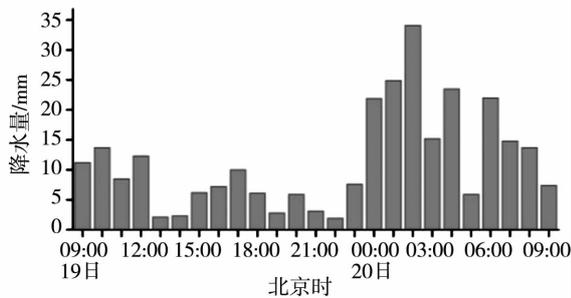


图6 石家庄站2016年7月19日09:00至20日09:00逐时降雨量变化

Fig. 6 Hourly change of precipitation from 09:00 BST July 19th to 09:00 BST July 20th in 2016 at Shijiazhuang station

图7为本次暴雨过程的最大水深模拟结果和通过实地内涝灾情普查获取的积涝实况分布。可以看出,模拟积水区的分布与实况分布较为接近。按照积涝普查实况和计算有无积水的标准,参照TS评分方法^[18],对最大水深落区模拟结果进行初步检验。结果表明,道路型网格积水模拟准确率为83%,空报率为10%,漏报率为7%;社区型网格积水模拟准确率为71%,空报率为18%,漏报率为11%。

此外,通过石家庄市排水管理处提供的实测积水资料,对模型计算的最大积水深度精度进行验证。由表1可知,针对此次降水过程,石家庄市排水管理处提供的24处城区积水片(点)在模型中都有所体现,不存在漏报;实测积水深度与模拟最大水深的误差绝对值小于等于0.2m的有17处,占全部积水片(点)的70.8%,其中绝对误差小于0.1m的有9处,占全部的37.5%,总体上模拟结果与实际情况相符;有2处绝对误差超过1m,均集中在地道桥积水模拟上,可能与周边泵站及闸门是否按时开启有关,需对其相对应的网格参数进行进一步率定。

3.2 误差分析

通过上述模型验证试验,虽然整体上城市内涝模拟结果与实际情况基本一致,但也存在一定的计算误差。分析误差产生的原因,主要有以下几方面:

(1)城市下垫面网格概化误差。在模型网格设计时,虽然充分考虑地形地貌特征,单一网格属性本应尽可能相同,但由于石家庄城市下垫面的复杂性,划分网格时很难做到对每一个不同地物的区分。同时考虑到模型计算稳定性和时效性的要求,网格划分尺度不能过小,而网格高程通常取的是该区域的地势平均值,若网格尺度偏大,则无法较好地体现出网格内局部低洼点的实际积水状况。

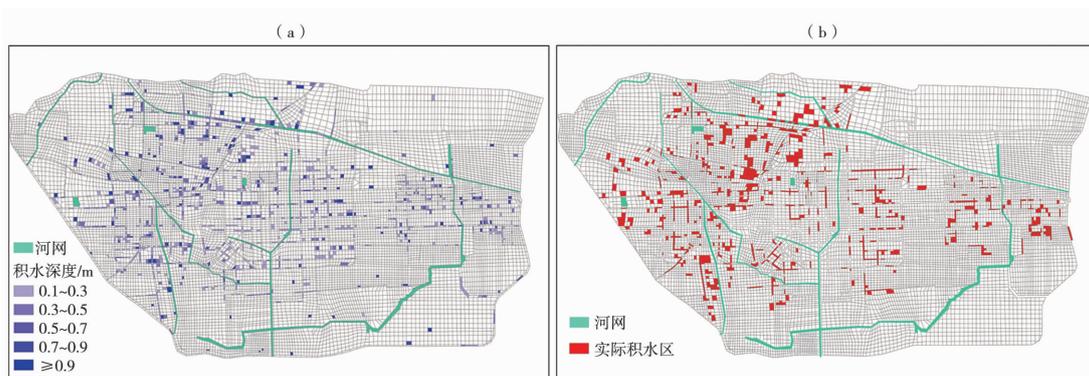


图7 2016年7月19—20日暴雨过程积水(单位:m)分布模拟(a)及实况(b)

Fig. 7 The simulated (a) and actual (b) distribution of water accumulation (Unit:m) during the rainstorm process from 19th to 20th July in 2016

表 1 2016 年 7 月 19—20 日积水点验证表

Tab. 1 The water point verification table from 19th to 20th July in 2016

单位:m

积水点	实测水深	模拟水深	绝对误差
中山东路(谈固大街—东二环)	0.40	0.35	0.05
中山东路(煤机街—测绘局)	0.50	0.21	0.29
中山东路(兴宁寺街—高速桥)	0.45	0.58	0.13
谈固大街(裕华路—中山路)	0.40	0.48	0.08
塔南翟营路口	0.53	0.72	0.19
东二环槐安路口以东 300 m 处	0.78	0.59	0.19
裕翔街(花卉市场—污水厂)	0.33	0.40	0.07
塔南建通路口	0.60	0.51	0.09
汇通路转盘周边	0.44	0.25	0.19
金利街汇通路口	0.58	0.50	0.08
107 国道(南二环—仓顺路)	0.65	0.24	0.41
南长街裕华路口	0.83	0.66	0.17
汇明路(民心河以西)	0.45	0.38	0.07
红旗大街(南二环以南)	0.55	0.38	0.17
清水街(南二环—汇明路)	0.35	0.03	0.32
新石中路中华大街口以西	0.50	0.45	0.05
泰华街北城路口东西向	0.75	0.55	0.20
裕华路(青园街—河北剧场)	0.33	0.04	0.29
体育北大街地道桥	0.50	0.68	0.18
胜利大街地道桥	3.50	2.40	1.10
建设大街地道桥	1.50	1.58	0.08
建华大街地道桥	1.10	1.19	0.09
和平路地道桥	2.00	0.83	1.17
红旗大街地道桥	0.80	0.52	0.28

(2)排水管网参数化误差。内涝模型对城市排水系统的概化是基于其理想工作状态,而在排水系统实际运作中受人为因素影响很大,多数情况下工作状态无法满足模型先期设定条件,如模型在下穿式地道桥区域存在模拟积水绝对误差超过 1 m 以上的情况,除考虑地道桥周边泵站、闸门等排水设施是否及时开启外,下水道口被垃圾堵塞、排水管网老化、管道内淤泥沉积等因素也都会造成排水不畅,使得实际积水远大于模型计算结果。

(3)积水观测误差。模型网格单元的积水深度代表该网格覆盖范围内积水的平均深度,而城市内涝的发生通常是大面积的,实际水深测量时往往受限于人力、测量技术和方法等原因,实测数据的代表性有待验证。通常只在积涝较为严重的区域选择一个或几个点进行测量,测量地点不一定是积水最深的区域,测量时间也并不一定是积水最严重的时间,

最终使得区域内局部积水实况不能代表整个网格的积水深度。

(4)2016 年 7 月 19—20 日降雨过程是近 20 a 来石家庄市最强的降雨,用此次历史罕见的强降水过程检验本模型也有很大不足之处。

4 内涝模型的应用

针对当前石家庄城市暴雨内涝的服务需求,基于 WEBGIS 技术开发了石家庄城市内涝监测预警平台,由图 8 可见,通过将内涝模型可视化,将模型计算得到的面雨量和积水淹没等信息以直观形式反映在特定的地理位置上,实现了城区多源雨量监测、积水实况模拟及水深预报、历史数据动态查询与统计、内涝风险预警和服务产品发布等功能,为更好地开展城市内涝预报服务提供了及时、准确及可视的决策支持。



图8 石家庄市暴雨内涝数学模型社区积水的可视化显示

Fig. 8 The visualization of community water accumulation of the urban waterlogging mathematical model in Shijiazhuang

5 结论与讨论

(1) 基于天津城市内涝模型技术, 充分考虑石家庄市防汛工作的特点和需求, 结合石家庄市的地理特征, 以城市地表和明渠河道的水流运动为模拟对象, 以水动力基本方程为骨架, 应用有限体积法思想, 采用无结构不规则网格设计, 构建石家庄城市暴雨内涝数学模型。同时针对原有基础内涝模型存在的问题, 对模型网格概化方式和计算模式进行了改进, 将城市河网、路网和社区的计算网格分层划分, 自成体系, 逐区计算; 在同一平面位置上设计多重网格, 形成分区、分层和立体多重的内涝计算模式, 较好地解决了立体层面水体汇流和积水问题, 提高了模型模拟精度。

(2) 对2016年7月19日09:00至20日09:00石家庄市暴雨过程的积涝情况进行了数学模拟计算, 其模拟的积水范围、积水深度与实际积涝情况基本符合, 说明模型具有较强的实用性。

(3) 基于WEBGIS技术开发的石家庄城市内涝监测预警平台, 开展城市内涝相关预报预警服务, 增强了模型的表现力。

城市暴雨内涝已成为高频易发的城市典型灾害, 如何以高效、集约、针对性强的方式降低内涝风险, 快速精准地开展城市积涝风险决策气象服务, 已成为全国气象灾害防御部门持续推进的重点工作之一。而本文采用科学方法所建立的城市暴雨内涝数学模型, 可为研究和解决市区暴雨积水灾害、河道溃堤等防汛问题提供新途径, 能够更全面地预估汛期

降水过程中城市可能发生的积水情况并进行预警, 有效地指导城市防汛排涝工作。

所构建模型涉及气象学、水文学、水力学、河流动力学、给排水工程等多学科的知识, 属于多学科交叉、具有系统工程特征的数学模型。模型反映了降雨量分布、产汇流原理、地面流、河道明渠流、堰流、管网有压流、管道无压流、有压流到无压流过渡过程以及地面向管道中泄流或从管道向地面涌水现象等多种工程情况及其相互连接问题, 是一个复杂的微观流域模型。

鉴于目前模型模拟结果与实际积水情况之间仍存在一定的误差, 下一步将继续对内涝模型进行改进和完善。相信通过大量实测资料对模型参数进行调试和率定后, 该模型对于积水的模拟精度将得到进一步提高。

参考文献:

- [1] 李苗, 逯张禹, 胡志新. 面雨量在城市内涝预报中的应用试验[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(4): 19-25.
- [2] 张玮玮, 王颖, 许浩恩, 等. 阶段性动态风险评估方法在暴雨灾害风险评估中的应用[J]. 干旱气象, 2017, 35(4): 694-701.
- [3] 王永, 郝新宇, 季旭雄, 等. SWMM在山区城市排水规划中的应用[J]. 中国给水排水, 2012, 28(18): 80-86.
- [4] 李建勇. Infoworks ICM在城市排水系统分析中的应用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(8): 21-24.
- [5] LI D M, ZHANG H P, LI B F, et al. Basic theory and mathematical modeling of urban rainstorm water logging[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 16(1): 17-27.
- [6] MARK O, WEESAKUL S, APIRUMANEKUL C, et al. Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding[J]. Journal of Hy-

- drology, 2004, 299(3/4):284-299.
- [7] 黄琳煜, 李迷, 聂秋月, 等. 基于 MIKE FLOOD 的暴雨积涝模型在川沙地区的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3):127-133.
- [8] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. 水利学报, 1990(10):68-75.
- [9] 徐向阳. 平原城市雨洪过程模拟[J]. 水利学报, 1998(8):34-38.
- [10] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统[J]. 水利学报, 2000(11):342-421.
- [11] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3):384-390.
- [12] 黎健, 殷剑敏, 张瑛, 等. 南昌市城区暴雨积水的数值模拟[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(4):450-456.
- [13] 张萍萍, 王丽, 张宁. 武汉市城市积涝预警系统及其仿真模拟效果[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(1):71-88.
- [14] 房国良, 解以扬, 李培彦, 等. 上海城市暴雨积涝预警系统研究[J]. 大气科学研究与应用, 2010(2):32-41.
- [15] 陈婧, 解以扬, 张容焱, 等. 基于暴雨内涝模型的莆田沿海地区风暴潮灾害评估[J]. 气象科技, 2017, 45(2):390-397.
- [16] 王清川, 寿绍文, 张绍恢, 等. 河北省廊坊市城市积涝动态预报预警系统研制[J]. 干旱气象, 2013, 31(3):609-615.
- [17] 卞韬, 王丽荣, 李国翠, 等. 石家庄暴雨的气候特征和变化规律[J]. 干旱气象, 2009, 27(1):18-22.
- [18] 闫慧, 赵桂香, 董春卿, 等. 集合预报方法在山西暴雨预报中的应用试验[J]. 干旱气象, 2017, 35(2):321-329.

Application of the Mathematical Model of Rainstorm Waterlogging in Shijiazhuang City Based on GIS

WEI Jun, WEI Tiexin, CHEN Sha, PENG Xiangyu, ZHAO Liang

(Hebei Meteorological Disaster Prevention Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Based on the technology of urban waterlogging model in Tianjin, the mathematical model of rainstorm waterlogging in Shijiazhuang was constructed by using the basic data of high precision urban geographic information, drainage facilities, river topography, precipitation in Shijiazhuang. At the same time, on the basis of the original work, the generalization mode and computing mode of the model grid were improved, then the computational grids of urban river network, road network, pipe network and community were divided into layers. Finally, the zoning and multi-dimensional calculation mode of waterlogging was formed. A typical rainstorm example was used to verify the simulation results. The results show that the prediction success rate of urban maximum water accumulated area was more than 70%, and the error of simulated depth of water accumulation was mainly within 0.2 m. In addition, the Shijiazhuang urban waterlogging monitoring and warning platform based on WEBGIS technology has further enhanced the performance of the model.

Key words: rainstorm; urban waterlogging; mathematical model; Shijiazhuang city