

基于暴雨内涝模型的天津市西青区中小河流暴雨洪涝灾害评估

陈靖^{1,2} 高强² 李培彦¹ 解以扬¹ 王秀俊² 刘志杰² 韩玥²

(1 天津市气象科学研究所,天津 300074; 2 天津市西青区气象局,天津 300380)

摘要 利用 ARCGIS 对天津市西青区的高精度地理信息数据、排水设施和排水方式进行预处理,以西青区下垫面和明渠河道的水流运动为模拟对象,建立天津市西青区中小河流暴雨洪涝仿真模型。以区内 14 条二级河道的水位变化作为模型的动态侧边界条件,针对 2016 年 7 月 20 日的大暴雨过程,设计了 4 个模拟方案,对河道高水位及暴雨造成的洪涝淹没过程进行评估,并将模拟结果与实际调查内涝灾情进行对比,结果表明,模型可以较客观地反映暴雨和河道水位变化对城镇造成的内涝灾害情况。

关键词 暴雨;中小河流洪涝;内涝

中图分类号: P429 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20180041 **文献标识码:** A

引言

天津历史上曾经多次发生过水灾,自东汉永兴元年(公元 153 年)有洪涝记载以来至 2000 年的 1848 年中,天津共发生由暴雨引发的洪水和雨涝灾害 428 年,是各种气象灾害中最多的灾害事件,而且洪水、雨涝受灾人数之多,灾害范围之大,经济损失之惨重也居各种气象灾害之首^[1-3]。

近年来,随着全球气候异常,极端天气事件所引发的暴雨洪涝等气象灾害频繁发生。2012 年“7·25”暴雨造成天津大面积内涝,此次暴雨造成车辆损失 5563 起,估损 2000 余万元,企业和家财险损失 338 起,估损 7000 余万元;2016 年“7·20”暴雨造成天津全市严重内涝灾害,全市受灾人口 142869 人,农作物受灾面积 23610.99 hm²,其中成灾面积 21243.03 hm²,绝收面积 148.34 hm²,全市共倒塌房屋 28 间,严重损坏房屋 114 间,暴雨洪涝灾害共造成直接经济损失 25007.85 万元,其中农业损失 22209.58 万元。

天津处于著名的季风气候区内,全年降水集中在 4—9 月的夏半年内,而且这些降水中的主要部分往往是由几次暴雨造成的,很容易引发大规模的河

水暴涨,发生水患。天津地处海河下游,有九河下梢之称,上游来水面积大,而入海口小,排水不畅。如果没有良好的水利设施,极易引发洪涝、河堤决口、海水倒灌等灾害^[1]。天津市西青区位于天津市近郊,处于城市化进程中,地貌属于海积冲积平原类型,是世界上少见的典型低平原,加上众多的灌溉大渠,构成了西青区河网稠密、纵横交错的北方水乡景观。同时,西青区作为天津市的环城四区之一,还承担了市区部分排涝任务,汛期排涝任务更加艰巨。面对洪涝的威胁,开展天津市西青区中小河流暴雨洪涝模型研究,可为西青区防汛排涝起到产品参考作用,为汛期排涝提供科学依据。

中小河流的防汛排涝建设在城镇排水中起到至关重要的作用,河道高水位往往会造成洪涝灾害的发生或加重。在进行中小河流治理的同时,加强对中小河流的排涝管理,对其进行模拟试验,进而对暴雨洪涝灾害进行评估,对于城镇加强防汛排涝工作有重要指导意义。为了模拟洪涝淹没过程,欧美等国家研发了不同针对性的水文水利模型^[4-6]。目前国外常用的洪涝模型包括: FloodArea, HEC-HMS, DHI MIKE 等,其中,德国 Geomer 公司开发的 FloodArea 模型是基于 GIS 栅格数据构建二维

天津市气象局科研项目(201807ybmx04)、淮河流域气象开放研究基金(HRM201501)资助

作者简介:陈靖,男,1984 年生,硕士,主要从事城市内涝、数值预报研究工作,Email:cjj1_1@163.com

收稿日期:2018 年 1 月 19 日;定稿日期:2018 年 7 月 31 日

非恒定流的水动力模型;HEC-HMS 模型是一个半分布式的降雨径流模型,主要用于树状流域降雨径流过程的模拟;DHI MIKE 软件是丹麦水资源及水环境研究所(DHI)的产品,用于模拟河流、湖泊、河口等的水流运动,被广泛应用于洪涝风险评估中。以上模型需要大量精细的城市地理信息及管网信息,模型计算量大,计算时效往往不能满足洪涝灾害预警需求。

天津城市暴雨内涝模型是天津气象科研所完全自主研发的一套基于水动力学的模型^[7-9]。模型以高精度地理信息及排水管网信息为基础建立无结构不规则计算域,以城市地表和明渠河道水流运动为主要模拟对象,在全国气象部门广泛应用。本文以天津市西青区作为模型的计算域,以西青区下垫面和明渠河道的水流运动为模拟对象,以历史自动站雨量数据作为降水边界条件,将河道水位的变化作为模型的动态侧边界条件,对河道高水位及暴雨造成的洪涝淹没过程进行评估^[10-13]。

1 自然地理特征

天津市西青区位于天津市西南部,是天津市环城四区之一,38°51'~39°11'N,116°53'~117°20'E,南北长48 km,东西宽11 km,全区总面积570.8 km²,下辖3街7镇。西青区属暖温带半湿润大陆季风气候区,其特点是干湿季节分明,寒暑交替明显。全年自

然降水总量586.1 mm,其中夏季443.2 mm;地势西高东低,地面高程渐次在海拔5.0~3.0 m之间,洼地为2.0 m左右;区域内河道沟渠纵横,坑塘洼淀密布,境内有一级河道3条,即中亭河、子牙河、独流减河(模型边界,不在模拟范围内),二级河道14条,用水河5条,排水河4条,排污河1条;东南部有区级中型水库一座,即鸭淀水库。

2 中小河流暴雨洪涝模型计算域设计

中小河流暴雨洪涝模型的计算域包括西青区全境,以平原为主。由于区内河道众多,下垫面类型复杂,城镇、农田、坑塘、林地等相互交错,因此采用无结构、不规则模型计算域^[10-11]。

模型计算域网格6537个,其中河道型网格67个,用于描述东西走向的一级河道子牙河、中亭河;湖泊型网格645个,用于描述区域内密集分布的坑塘、水库等。设计通道14226个,通道即是行水通道,起到两个网格间的水量交换作用,模型在通道上计算流量,其中特殊通道1714个,用于描述区域内14条二级河道。节点7389个,用于定位网格、通道的拓扑关系(图1)。

西青区处于城市化的进程中,下垫面属性复杂,城区、农田、林地、坑塘等纵横交错,在设计模型计算域时,还要充分考虑到不同下垫面属性的因素。根据网格糙率和网格的建筑面积修正率,来反映不同

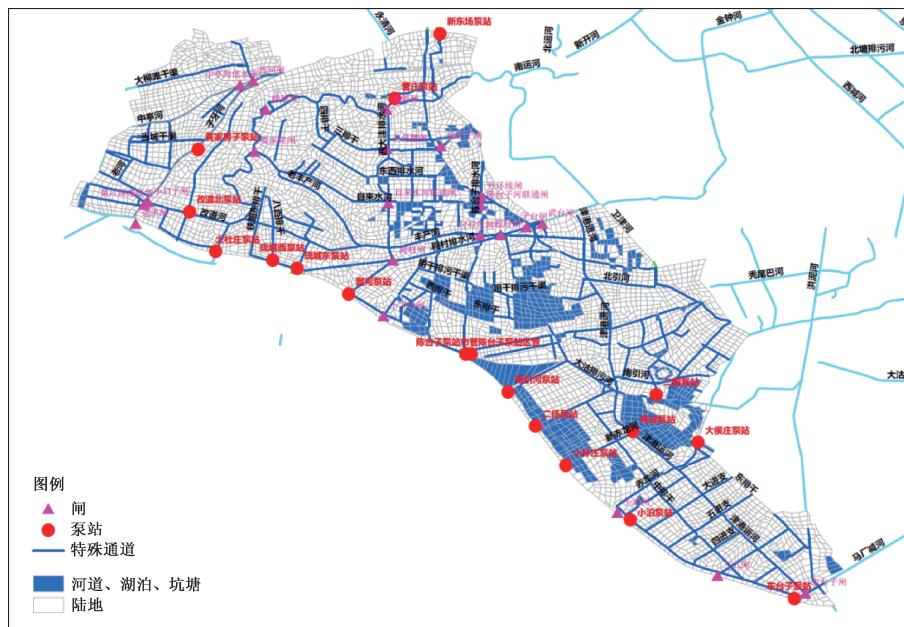


图 1 西青区中小河流暴雨洪涝模型计算域

下垫面的水流阻力影响和径流系数。其中,网格糙率根据经验值,按网格内所含的地物特征按表1赋值。网格的建筑面积修正率根据网格内房屋所占网格面积的比例赋值,取值范围0~100。

表1 网格糙率赋值

下垫面属性	糙率
空地	0.035
稻田	0.050
旱地	0.060
树丛	0.065
村庄	0.070
城镇	0.080
坑塘	0.030
水面	0.025

3 中小河流暴雨洪涝模型

3.1 模型的基本原理

模型主要模拟对象为西青区各街镇地表和明渠河道的水流运动,以平面二维非恒定流方程作为基本控制方程。同时,采用一维明渠非恒定流方程的算法,模拟小型沟渠和二级河道构成的特殊通道的水流运动^[7-9]。

3.1.1 二维非恒定流基本方程

$$\text{连续方程: } \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{动量方程: } & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial x} \\ & + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

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

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,由有效降雨量和排水强度两项组成; M, N 分别为 x, y 方向上的单宽流量,且 $M = Hu, N = Hv$; u, 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。

3.1.2 一维非恒定流基本控制方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial l} = -gAS_f \quad (4)$$

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:

$$S_f = \frac{U^2 n^2}{R^{4/3}} = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \quad (5)$$

3.2 模型分类处理

3.2.1 排水设施的概化

排水系统,包括排水调度原则以及排水设施等,对城镇的排涝起到了至关重要的作用。西青区现有区属国有泵站18座,总设计能力为245 m³/s。其按照河道分布情况为:独流减河左岸有10座,分别是大杜庄泵站(13 m³/s)、琉璃河泵站(4 m³/s)、琉璃河东泵站(10 m³/s)、宽河泵站(46 m³/s)、小孙庄泵站(24 m³/s)、二扬泵站(8 m³/s)、南引河泵站(30 m³/s)、小泊泵站(6 m³/s)、陈台子泵站(8 m³/s)、东台子泵站(15 m³/s);子牙河沿线有2座,分别为黄家房子泵站(10 m³/s)、新东场泵站(8 m³/s);南运河沿线有2座,分别是曹庄子泵站(15 m³/s)、改道北泵站(4 m³/s);大沽排水河沿线有3座,分别为污水泵站(16 m³/s)、二期泵站(10 m³/s)、大侯庄泵站(8 m³/s);津港运河沿线有1座,为鸭淀水库一站(10 m³/s)。重要水闸主要有子牙河右岸的小口子闸、独流减河左岸的三八闸、小泊闸和小卞庄闸等水闸(图1)。

在模型中,将各类泵站、水闸概化在排水设施中,建立了泵站、水闸与通道、节点、特殊通道的拓扑关系。同时,设置了泵站、水闸的排水方向、开关,并给出了泵站的流量及闸门宽度。泵站、闸门的开启根据当地排水运作来控制,其中闸门的排水量 Q_z 采用下式计算^[10-12]:

$$Q_z = 0.61 \sqrt{2g |Z_1 - Z_2|} \times 2dt \quad (6)$$

式中, Q_z 为闸门的排水量, Z_1 和 Z_2 为闸上和闸下的水位, g 为重力加速度, dt 为时间步长。

3.2.2 二级河道调度预案

根据《西青区重要二级河道调度分预案》,按照“轻重缓急、统筹兼顾”的基本原则,划定除涝分区,采取分区、分河段控制水位,同时采取防御与疏导相结合,工程措施与非工程措施相结合的办法,保障城区和主要建筑的安全,兼顾雨洪资源利用。

(1)全区二级河道水源由区防办统一调度,各河道汛期均保持低水位运行状态,始终将水位控制在汛限水位以下。为充分利用雨水资源,在区防办的统一调度下鸭淀水库可引调雨水,发挥以蓄代排作用。

(2)镇、村与农业生产发生排水矛盾时,优先考虑城镇、村庄的排水。

(3) 大沽排水河排水调度原则,在保障市区及本区安全的情况下安排排水,尽最大可能减轻津南区段的压力。

二级河道在城市排涝中起到至关重要的作用,当二级河道水位达到或超过汛限控制水位时,会对城市的排水造成影响,引起内涝的发生。当水位一旦到达或接近相应控制水位时,各有关单位须立即启用闸涵、泵站降低河道水位,确保防汛除涝安全。14 条二级河道汛限控制水位见表 2。

表 2 二级河道汛限控制水位

二级河道名称	汛限控制水位/m
大沽排水河	1.3
南运河	1.3
西大洼排水河	1.0
自来水河	1.0
丰产河	0.8
陈台子排水河	1.2
南引河、卫津河、总排河、中引河	1.0
程村排水河	1.0
新赤龙河	1.15
津港运河(北)	1.25
津港运河(南)	1.3

3.3 2016 年“7·20”大暴雨过程的面雨量计算

受低涡系统控制,2016 年 7 月 20 日 00:00—20:00,天津市西青区各街镇普遍出现大暴雨天气^[14]。全区各区域自动站累计雨量均超过了 100 mm,其中最大雨量出现在杨柳青镇,为 288.6 mm,达到

特大暴雨级别。采用曲面插值方法^[15]对自动站雨量进行加工,转化为模型面雨量(图 2),作为模型的降水初值边界条件。

4 典型个例的评估试验

“7·20”大暴雨天气过程波及全区,对城市积水、河道水位和农田渍涝等造成一定的影响。西青区农田积水面积 $0.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$,积水深度 5~50 cm;温室倒塌 33 个,裂 9 个;畜牧、水产各有 1 个养殖场电路受损;1 个养殖场厂区进口墙头倒塌。

选择此次大暴雨过程作为典型个例,以二级河道水位作为模型侧边界条件,开展二级河道水位变化对城市内涝造成的影响开展评估试验研究。

4.1 灾情调查

在“7·20”大暴雨影响期间,选取了 4 个积水调查点,其中城镇社区一处(兴旺里社区)、农村聚集点一处(东兰坨村)、经济开发区一处(西青经济开发区)、道路涵洞一处(西青道陈塘铁路涵洞),调查点分布如图 3 所示,调查得到积水实况见表 3。

4.2 评估方案设计

为了评估模型对中小河流暴雨内涝模拟的效果,本项目针对二级河道初始水位,设计了 4 种情景试验:

方案 1(一般情况): 区域内所有二级河道的水位在汛限控制水位以下 0.1 m。

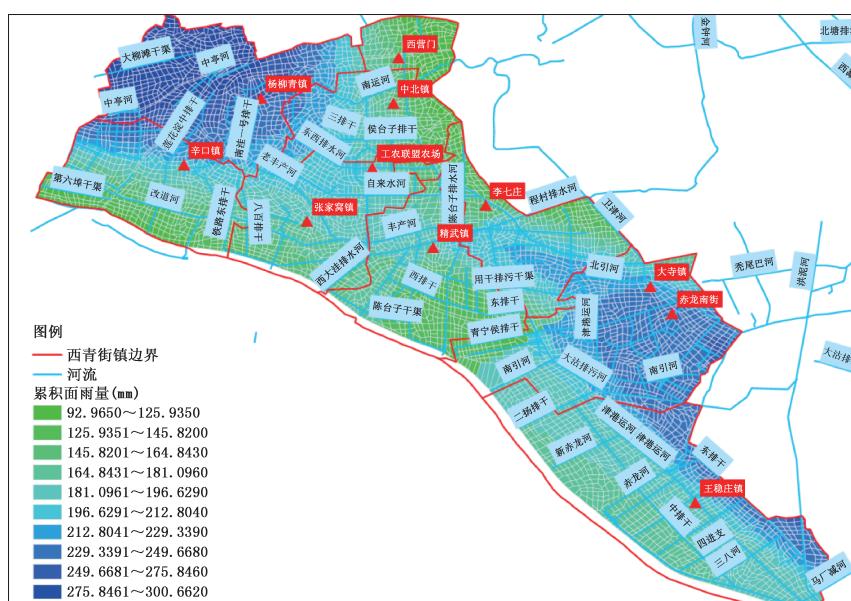


图 2 2016 年 7 月 20 日 00:00 至 2016 年 7 月 20 日 20:00(北京时)累计面雨量

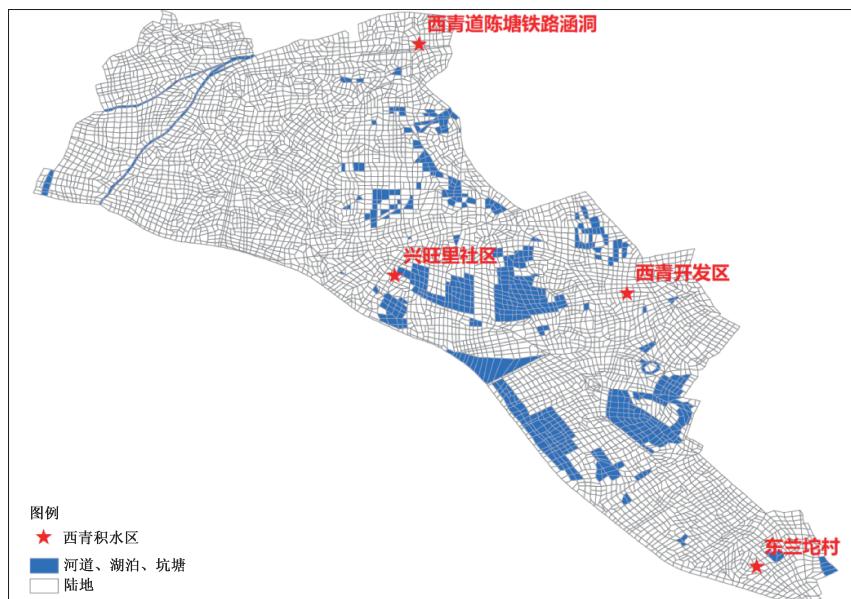


图3 积水调查点在模型计算区域内的分布

表3 “7·20”大暴雨影响期间西青区积水分布调查

序号	调查点	经度/(°E)	纬度/(°N)	积水分布描述
1	兴旺里社区	117.087	39.021	小区内最大水深达到 40 cm
2	东兰坨村	117.297	38.854	村内道路被淹,房屋进水,最大水深达到 60 cm
3	西青经济开发区	117.221	39.012	部分工厂进水,导致停产,最大水深 65 cm
4	西青道陈塘铁路涵洞	117.102	39.157	涵洞断交,淹没深度超过 2 m

方案2(达到汛限控制水位):考虑在泵站全力排水的情况下,导致区域内所有二级河道的水位达到汛限控制水位。

方案3(超汛限控制水位0.5 m):考虑到上游客水会造成河道水位升高,将区域内所有二级河道的水位设置为超过汛限控制水位0.5 m。

方案4(超汛限控制水位1.0 m):考虑极端情况下,区域内所有二级河道的水位超过汛限控制水位1.0 m。

以上方案中,方案1与此次过程的实际情况相对接近。

4.3 模拟效果评估

4.3.1 总体积水评估

针对4个模拟方案,利用模型进行模拟试验,模

拟过程中,排水设施全部开启,最终模拟结果见表4和图4。其中,表4给出了积水深度到达0.1 m以上的总面积、最大积水深度以及不同等级的积水深度的面积。从表4和图4中可以看出,当河道水位低于汛限控制水位或者达到汛限控制水位时,淹没范围和淹没深度变化不大,这是由于排水设施都可以顺利开启,河道水位对排水影响不大。随着河道水位超过汛限控制水位,模拟的淹没范围和淹没深度都有较大的变化,尤其当河道水位超过警戒水位2 m时,最大积水深度达到4.82 m,积水深度大于0.8 m的淹没范围达到19.78 km²。河道水位的升高,严重影响了泵、闸的排水效果,导致大面积、高等级的内涝发生。

表4 4个模拟方案总体积水评估效果

试验方案	积水面积		最大积水深度		积水面积/km ²		
	km ²	m	0.1~0.25 m	0.25~0.5 m	0.5~0.8 m	>0.8 m	
方案1	79.26	2.528	46.58	24.45	6.35	1.89	
方案2	79.27	2.528	46.58	24.39	6.39	1.89	
方案3	91.59	3.879	48.80	30.81	8.70	3.28	
方案4	113.40	4.820	42.92	35.03	15.68	19.78	

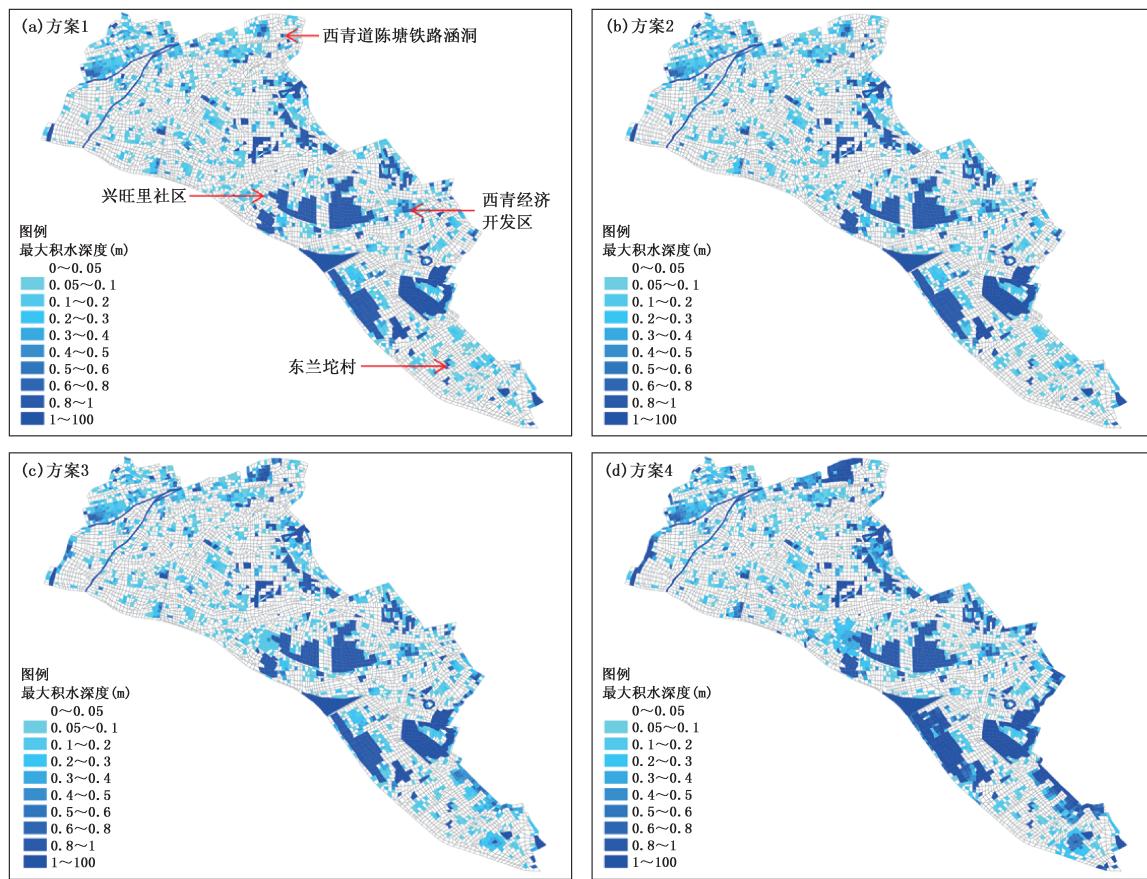


图 4 模型模拟的方案 1、2、3、4(a、b、c、d)的最大积水淹没深度分布

4.3.2 积水点模拟评估

将根据 4 个模拟方案模拟的积水调查点所在计算网格的淹没深度,与积水调查点实况进行对比,结果表明(表 5),方案 1、2 模拟结果与实际积水调查

最为接近,随着河道水位的升高,模拟的积水调查点的淹没深度也随之增大,河道水位的变化对内涝的发生起到至关重要的作用。

表 5 4 个模拟方案精细化评估效果

序号	调查点	实况积水	模拟积水			
			方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
1	兴旺里社区	0.4	0.35	0.35	0.45	0.67
2	东兰坨村	0.6	0.62	0.62	0.84	0.96
3	西青经济开发区	0.65	0.67	0.67	0.88	1.2
4	西青道陈塘铁路涵洞	2.0	2.21	2.21	3.43	4.56
	平均误差		0.05	0.05	0.49	0.94

5 结论

利用天津市西青区地理信息数据、排水设施数据,结合西青区重要二级河道调度分预案,建立了西青区中小河流暴雨洪涝灾害仿真模型。针对 2016 年“7·20”大暴雨造成的西青区大范围内涝灾害,设

计了 4 个试验方案,利用不同的河道水位作为模型的动态侧边界条件,评估河道水位变化对城镇洪涝灾害的影响。

(1)通过典型暴雨个例模拟试验,表明模型能够较客观地反映降水和河道水位共同作用的内涝灾害情况,为不同降雨情景下,河道水位变化对内涝灾害

的风险评估和风险区划奠定了基础,可为城镇防汛提供科学的参考依据。

(2)二级河道水位变化,对城镇的内涝灾害的发生起到至关重要的作用。当二级河道处于较高水位时,会对街镇排水产生不利的影响,进而造成或加重内涝灾害。

(3)本文只对4个积水调查点进行了检验,模拟效果较好。但是,模型计算范围内大部分的区域没有实际的灾情数据,导致无法验证模拟的效果。随着气象信息员队伍的扩大以及灾情直报系统的启用,洪涝灾情的实况数据会越来越丰富,根据不断丰富的淹没实况数据,进一步对模型进行调整,以期达到最好的模拟效果。

参考文献

- [1] 王宗信.中国气象灾害大典.天津卷[M].北京:气象出版社,2008;1—60.
- [2] 马亚玲.海河流域1917年和1939年洪涝灾害过程重建及对比分析[D].北京:北京师范大学,2016.
- [3] 方修琦,马亚玲,李屹凯,等.1917年海河流域洪涝灾害的社会响应过程[J].灾害学,2017,32(3):1-6.
- [4] Halwatura D, Najim M M M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment [J]. Environmental Modeling & Software, 2013, 46(6):155-162.
- [5] 谢五三,田红,卢燕宇,等.基于FloodArea模型的大通河流域暴雨洪涝灾害风险评估[J].暴雨灾害,2015, 34(4): 384-387.
- [6] 施露,董增川,付晓花,等. MikeFlood在中小河流洪涝风险分析中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2017, 45(4): 351-358.
- [7] 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.
- [8] 解以扬,韩素芹,由立宏,等.天津市暴雨内涝灾害风险分析[J].气象科学,2004,24(3):342-349.
- [9] Li Daming , Zhang Hongping. Basic theory and mathematical modeling of urban rainstorm water logging [J] .Journal of Hydrodynamics,2004, 16(1):17-27.
- [10] 肖启华,张建新,黄冬梅.城市风暴潮灾害快速评估的模糊决策方法[J].灾害学,2011,26(2):77-80.
- [11] 王建鹏,金丽娜,薛荣,等.基于加权综合法的西安城市内涝灾害区划分析[J].气象科技,2012,40(6):1056-1060.
- [12] 陈靖,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.
- [13] 段丽瑶,解以扬,陈靖,等.基于城市内涝仿真模型的天津风暴潮灾害评估[J].应用气象学报,2014,25(3):354-359.
- [14] 雷蕾,孙继松,何娜,等.“7.20”华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J].气象学报,2017,75(5):685-699.
- [15] 陈靖,解以扬,东高红,等.雷达雨量计联合估算降水在城市内涝模型中的应用[J].气象科技,2015,43(5):866-873.

Rainstorm and Flood Disaster Assessment of Small- and Medium-Sized Rivers in Xiqing District of Tianjin Based on Torrential Rain Waterlogging Simulation Model

Chen Jing^{1,2} Gao Qiang² Li Peiyan¹ Xie Yiyang¹ Wang Xiujun² Liu Zhijie² Han Yue²

(1 Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074; 2 Xiqing Meteorological Service, Tianjin 300380)

Abstract: According to the topography, geomorphology, middle and small rivers, drainage system of Xiqing District in Tianjin, a rainstorm and flood disaster simulation model of small- and medium-sized rivers in Xiqing District of Tianjin is established. The objects of the simulating model are the geomorphology and flow movement of open channels. Using the boundary condition of the model based on the dynamic water levels in 14 secondary rivers, an operational experiment for the risk assessment of flood and waterlog disasters in Xiqing District is carried out. The rainstorm and flood disaster simulation model is used in the experimental research for the rainstorm and flood disaster caused by the rainstorm on 20 July 2016. Four simulation schemes are designed to evaluate the waterlog process caused by the high water level and rainstorm. These simulation results are directly used in contrasting and assessing the actual disaster caused by the rainstorm on 20 July 2016. The experiment results indicate that the model can objectively reflect the waterlog disaster caused by the rainstorm and the river water level variation.

Keywords: Tianjin; rainstorm; river flood disaster; urban waterlog