

陈靖,张容焱,解以扬,等.2020.基于城市暴雨内涝数学模型的福州市内涝灾害风险评估[J].暴雨灾害,39(1):89-95

CHEN Jing,ZHANG Rongyan, Xie Yiyang, et al. 2020. Risk assessment of rainstorm waterlogging disaster based on urban rainstorm waterlogging mathematical model in Fuzhou city [J].Torrential Rain and Disasters,39(1):89-95

基于城市暴雨内涝数学模型的福州市内涝灾害风险评估

陈靖¹,张容焱²,解以扬¹,李培彦¹,张长灿³,段丽瑶⁴

(1. 天津市气象科学研究所,天津 300074;2. 福建省气候中心,福建 350000;3. 福州市气象局,福建 3500004;
4. 天津市气象台,天津 3000742)

摘要:以福州市城区地表和明渠河道为主要模拟对象,结合福州市城区高精度地理信息、排水设施、排水运作方式等数据,建立福州城市暴雨内涝数学模型。利用该模型对福州市历史上3次典型降雨过程以及不同重现期降雨造成的城区内涝灾害进行模拟。对模型的模拟结果与实况积水进行评估表明,3次降雨过程的模拟与实况积水深度绝对误差小于10 cm的积水点分别占比为50%、78%、76%。模型对雨强较大的短时强降雨过程,模拟效果稍差,模拟积水比实况积水整体偏小;对长时间、雨强比较平均的降雨,整体模拟效果较好。利用模型对不同重现期降雨下福州市城区内涝灾害风险进行评估表明,模型能够客观反映不同重现期降雨过程下福州市城区内涝灾害风险分布。

关键词:暴雨内涝数学模型;内涝灾害;暴雨重现期;风险评估

中图分类号:P429 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.010

Risk assessment of rainstorm waterlogging disaster based on urban rainstorm waterlogging mathematical model in Fuzhou city

CHEN Jing¹, XIE Yiyang¹, ZHANG Rongyan², LI Peiyang¹, ZHANG Changcan³, DUAN Liyao⁴

(1. *Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074*; 2. *Fujian Province Municipal Climate Center, Fuzhou 350005*;
3. *Fuzhou Meteorological Bureau, Fuzhou 350005*; 4. *Tianjin Municipal Meteorological Observatory, Tianjin 300074*)

Abstract: According to high-precision geographic information, drainage facilities and drainage operation model of urban Fuzhou, the urban rainstorm waterlogging simulation model in Fuzhou was established. The Urban Rainstorm Waterlogging Simulation Model in Fuzhou was used to simulate the waterlogging disaster caused by three typical rainstorm types in Fuzhou history and rainfall cases with different return periods. The simulated and actual values of ponding water depth in three rainfall types were evaluated. The results show that the percentages of water accumulation points with the absolute error between simulated and actual water accumulation depth less than 10 cm were 50%, 78% and 76%, respectively, for the three rainfall types. This model is more capable of simulating accumulated water for the rainfall type of long duration and uniform rainfall intensity than for that of short-term heavy rainfall. The simulated accumulated water was less than the real accumulated water in the rainfall type of short-term heavy rainfall. The model was used to evaluate the risk of waterlogging in Fuzhou city under different rainfall recurrence periods. The results show that the model can objectively reflect the risk distribution of waterlogging in the urban area in Fuzhou under the rainfall in different reappearing periods.

Key words: mathematical model of rainstorm waterlogging; waterlogging disaster; rainstorm recurrence period; risk assessment

引言

福州位于中国东南沿海、福建省东部及闽江下游入海口,介于北纬25°15'—26°39',福州中心城区(包括鼓楼区、台江区、仓山区以及晋安区部分区域)位于河口盆地,地势平坦,内河纵横交错,年平均降雨

量在1 342~1 564 mm之间(戴志忠,2004)。福州市暴雨日数多、强度大、活动季节长,常导致严重的城市内涝,山洪暴发,引发山体崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害。20世纪90年代以来,随着城市化进程的加快,福州中心城区的不透水面积比例越来越大,地面径流增加,排水管道压力增大,导致内涝灾害频繁发生。同

收稿日期:2018-08-29;定稿日期:2019-02-08

资助项目:福建省气象局开放式气象科学研究基金项目(2014K03);天津市气象局科研项目(201807ybxm04);淮河流域气象开放研究基金(HRM201501)

第一作者:陈靖,主要从事城市内涝和数值预报研究工作。E-mail:cjj1_1@163.com

时,随着逐年城市规模的扩张,导致河道淤积、河床升高,排水通道被堵排水不畅,排涝能力下降,城区排水压力巨大,而城市地下排水工程和设施建设未能跟上城市发展的步伐(陈能志等,2008;徐奎和马超,2011;林芷欣和陈伟兴等,2015;张建云等,2016),使得城市内涝问题日益突出(张前东等,2018)。

利用暴雨内涝数学模型进行城市暴雨内涝灾害风险评估研究,在欧美、日本等发达国家已经很成熟,国外的很多城市暴雨径流模型在我国得到广泛应用。例如SWMM(storm water management model)模型(Rossmann,2008)是由美国环境保护署(The Environmental Protection Agency, EPA)开发的一个动态水文水动力模型,被广泛应用于城市暴雨洪水、雨污合流制管道、污水管道以及其他排水系统的规划、分析和设计;PCSWMM(Waters et al.,2003)是加拿大水力计算研究(Computational Hydraulics International, CHI)基于SWMM开发的水文水力学模型,其计算方法与SWMM基本一致,但是克服了SWMM一维水文水动力学模型的局限性,广泛应用于洪涝灾害风险分析、防洪排水系统设计、水体污染控制等方面;InfoWorks ICM(Integrated Catchment Management)(Chokshi,2013)是英国Wallingford软件公司开发的,用于完整模拟城市雨水循环过程,广泛应用于城市排水系统的评估和规划。中国的城市暴雨内涝模型起步较晚,但一些学者根据中国的地方排水体系和地形特征开发了城市暴雨内涝模型。岑国平(1990)研发的SSCM模型,是我国第一个完整的雨水管网径流计算和设计模型,主要应用于雨水管网系统设计以及城市雨洪的控制和污染防治;洪国平等(2018)利用基于GIS的二维水动力暴雨淹没模型,模拟了武汉城区短历时6个重现期暴雨内涝过程,并利用内涝点对模拟内涝区进行了验证,模拟效果较好;由天津市气象科学研究所和天津大学联合开发的城市暴雨内涝仿真模型(解以扬等,2005)根据不同城市地理信息及排水特点,采用无结构不规则的计算网格划分,以城市地表和明渠河道的水流运动为模拟对象,采用水动力数学方法模拟了城市内涝积水深度、淹没过程和范围。

以往城市暴雨内涝模型多用于排水管网的设计、暴雨内涝情景及产汇流特征的模拟,例如,李彦伟等(2010)通过SWMM模型模拟所选区域排水系统的运行情况,设计管网改造方案;张配亮(2007)基于PCSWMM模型建立了天津市暴雨径流的模拟模型,对城市暴雨径流的模拟取得较好的效果。而利用数学模型对城市暴雨内涝灾害风险直接进行评估的研究还较少。本文以天津城市暴雨内涝数学模型为基础,针对

福州市城区地形地貌、排水设施数据及防汛工作特点,建立福州市暴雨内涝数学模型,针对3次不同特点的降雨过程收集到的丰富积水信息,对模型进行检验,并根据检验结果对模型进行参数调整,在此基础上,根据不同重现期的降雨对福州城区内涝灾害风险进行评估。模型的计算时效可满足业务中的暴雨内涝实时模拟,同时结合降雨预报和不同重现期下降雨情景模拟成果,可实现城市内涝实时监测、预警和灾害风险评估,为相关部门和行业提供及时、高效的决策参考,也可为其他大中城市进行城市暴雨内涝灾害风险评估提供科学借鉴。

1 数据与方法

1.1 地理信息数据及观测实况数据

建立福州市暴雨内涝数学模型用到的地理信息及排水设施数据,来自福州市测绘及排水部门,包括比例尺为1:2 000的福州市城区DEM(数字高程模型)、道路、水系、铁路、堤坝、下垫面类型、排水管网、泵站、闸门的位置及流量等;用于模型模拟积水的雨量,来自福州城区42个自动雨量站逐时降雨观测数据;用于模拟检验的易积水点积水实况数据,来自福州市排水部门,包括积水点位置、最大积水深度等,主要通过积水监测设备及人工测量来收集;计算福州市乌山站不同小时重现期累积降雨量,使用1961—2014年乌山站逐时降雨数据。

1.2 福州市暴雨内涝数学模型

图1为福州市暴雨内涝数学模型结构示意图。模型建模在基于Arcgis开发的平台下完成,根据地理信息及排水系统数据进行计算网格剖分、赋值、格式转化等,提供给数学模型作为基础工程信息的边界,需要的模型网格参数包括:网格高程、网格类型、网格

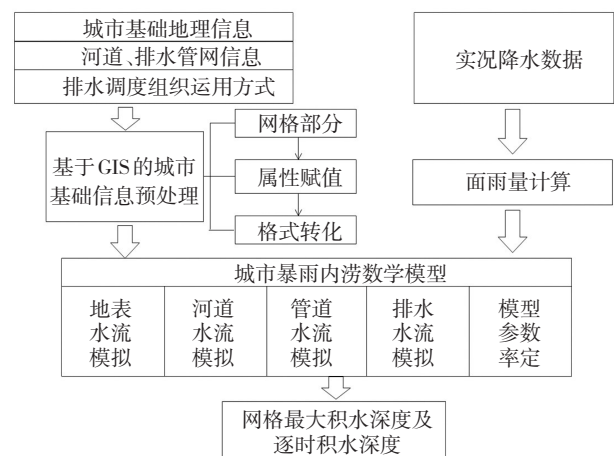


图1 福州市暴雨内涝数学模型结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of mathematical model of urban rainstorm waterlogging in Fuzhou.

糙率、通道边数、节点位置、初始水深、排水设施、排水强度、降雨数据等,通道参数包括:通道高程、通道类型、通道位置等;根据实况降雨数据,进行面雨量计算,提供给数学模型作为降雨的边界;在完成建模后,模型根据基础工程信息及降雨边界,采用水动力学方程对地表、河道、排水管网的水流运动及排水设施进行模拟,根据计算结果与实况数据的偏差,结合实际情况(排水设施、地形高程等)再对模型参数进行调整,以达到最优模拟结果。

1.2.1 模型计算域设计

由于福州市城区地形复杂,河流众多,地形地貌极不规则,为了更好地反映城市地表暴雨径流的特点,采用无结构不规则网格概化城市地表和水系,作为模型计算域。图2为福州市城市暴雨内涝数学模型计算域。模型的计算范围选择福州市城区地势较为平缓的地区和部分丘陵地带,主要包括鼓楼区、仓山区、台江区、晋安区和闽侯县的部分区域。根据有限体积法,将单位网格作为控制体积,采用二维非恒定流基本方程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 。模型中共有网格4 287个、通道9 589个、节点5 299个。其中,河道型网格209个,用于描述东西走向的闽江及南北走向的乌龙江;湖泊型网格52个,用于描述水库及坑塘水体。

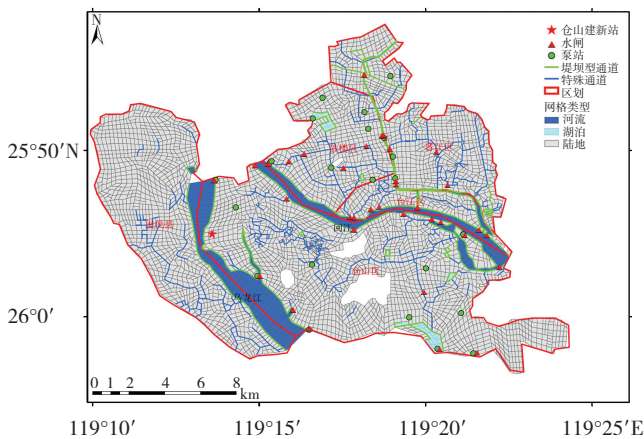


图2 福州城市暴雨内涝数学模型计算域(红色线段为行政区划;深蓝色网格为河道型网格;浅蓝色网格为湖泊型网格;灰色网格为陆地型网格;绿色线段为堤坝型通道;蓝色线段为特殊通道;红色五角星为仓山建新站;红色三角为水闸;绿色圆为泵站)

Fig.2 The computational domain of the urban mathematical model of urban rainstorm waterlogging in Fuzhou (Red line section represents administrative division. Dark blue grid represents river grid. Light blue grid represents lake grid. Gray grid represents land grid. Green line section is dike channel. Blue line section represents special river channel. Red pentagon star represents Cangshan Jianxin station. Red triangle represents gate. Green circle represents pump station).

模型中的连续阻水建筑物,如堤防、铁路、高速公路等,概化成堤连续,按实际位置设置通道属性,形成堤坝型通道。福州城区内的河网发达,二级河道遍布,由于尺度较小,不便于将其划分成独立的河道型网格,所以将其概化为特殊通道,采用一维明渠非恒定流方程的算法计算其流量,既可以反映模型范围内河网的分布,又可以模拟较小尺度河道内水流运动以及与两侧陆地之间水量交换的过程。

1.2.2 模型基本控制方程

以福州市城区的地表和明渠河道的水流运动为主要模拟对象,采用解以扬等(2005)以二维非恒定流理论为基础建立的城市暴雨内涝数学模型为基本框架,即以二维非恒定流方程为基本控制方程。同时,针对小于离散网格尺度的二级河道或小型沟渠构成的特殊通道,采用一维明渠非恒定流方程模拟水流运动。

1.2.3 排水系统的概化

城市内涝的发生,很大程度上取决于城市排水系统。因此,为了充分反映城市暴雨内涝及排涝的特性,在模型中必须考虑城市排水系统的影响。

模型将排水管网的管长和管径概化在网格内,将各类水闸、泵站等排水设施概化在相邻的通道上,图2给出23座泵站和36处水闸的具体分布。通过建立排水系统与网格、通道、节点、特殊通道等的拓扑关系,模拟排水系统对城市排涝的作用。在降雨过程中,地面通过汇流形成积水,通过雨水井向排水管网内汇集,排水管网沿各自系统汇合至出水口,由闸门、泵站或自流方式向河道泻水,形成“雨水-地面汇水-排水管网汇水-泵、闸或自流泻水-河道汇水”的模拟过程。

2 典型个例模拟检验

为了检验模型的模拟效果,选取3次有实地调查积水实况数据的降雨过程,对模型模拟结果进行检验,其中强对流降雨过程1次(“20150516”降雨过程),大范围暴雨过程1次(“20160911”降雨过程),台风过程1次(1617号台风“鲶鱼”降雨过程)。

2.1 降雨个例介绍

“20150516”降雨过程,受弱冷空气和暖湿气流共同影响,2015年5月16日午后到夜里福州出现强对流天气,强降雨主要出现在福州市中南部,强中心在福州市区附近,5月16日12—21时(北京时,下同)雨量,全市有64个站超过50 mm,11个站超过100 mm,最大雨量出现在仓山建新站,为133.9 mm,福州市区多处积涝,多辆汽车被淹。“20160911”降雨过程,2016年9月11日下午到夜间福州全市出现大范围暴雨、大暴雨,11日08时—12日08时24 h雨量,全市有45个乡

镇超过 100 mm,以仓山区建新 181.8 mm 为最大,强降雨集中在福州主城区,包括仓山、鼓楼、台江和晋安在内的福州主城区雨量均超过 100 mm。据统计,此次降雨过程,受灾人口 0.54 万人,全市直接经济损失 760 万元。1617 号台风“鲶鱼”,于 2016 年 9 月 28 日 04 时 40 分登陆泉州惠安沿海,受台风影响,福州市最强降雨出现在 9 月 27 日夜裡至 28 日白天。此次台风过程降雨持续时间较长,累积雨量大,9 月 26 日 8 时—10 月 1 日 8 时 24 h 雨量,全市有 155 个乡镇超过 100 mm,92 个乡镇超过 250 mm,23 个乡镇超过 400 mm,9 个乡镇超过 500 mm。据统计,全市共有 13 个县(市)区、173 个乡镇受灾,受灾人口达 38.174 1 万人,转移人口 127 173 人,倒塌房屋 433 间,死亡 2 人,全市直接经济损失 7.571 3 亿元。

选取 3 次降雨过程福州城区降雨集中时段为研究时段,即 2015 年 5 月 16 日 12—21 时,2016 年 9 月 11

18 时—12 日 00 时和 2016 年 9 月 27 日 08 时—29 日 08 时。对模型范围内 42 个自动站雨量站进行面雨量计算,提供给模型作为降雨边界。图 3 为三次降雨过程的累积面雨量。从图 3a 可知,“20150516”降雨过程的雨量主要集中在模型区域偏北地区,10 h 累计雨量最大达到 150 mm,此次降雨过程突发性强,仓山建新站小时雨强达到 $65 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,出现在第 3 个时次,其他时次雨量比较平均,均在 10 mm 以下;从图 3b 中可知,“20160911”降雨过程,7 h 累积雨量最大达到 185 mm,此次过程降雨主要出现在第 2~5 个时次,雨量比较平均,小时雨强在 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,强降雨持续时间较长;从图 3c 中可知,1617 号台风“鲶鱼”降雨过程,最大雨量出现在模型区域东北部江北城区,48 h 最大累积雨量达到 457 mm,此次降雨过程持续时间长、范围大,造成了严重的内涝灾害。

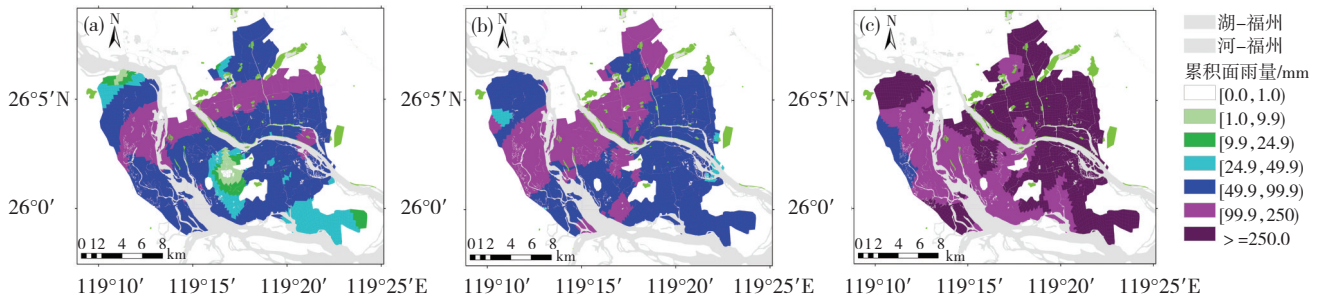


图3 2015年5月16日12—21时(a)、2016年9月11日18时—12日00时(b)和2016年9月27日08时—29日08时(c)累积面雨量(单位: mm)

Fig.3 Accumulative surface rainfall (a) from 12:00 BT to 21:00 BT on 16 May 2015, (b) from 18:00 BT to 00:00 BT 12 September and (c) from 08:00 BT 27 to 08:00 BT 29 September 2016 (unit: mm).

2.2 降雨过程模拟检验

利用福州城市暴雨内涝数学模型对 3 次降雨过程造成的福州城区内涝积水进行模拟,根据实况积水调查数据,结合模拟结果,对模型进行参数调整和优化。主要是针对福州城区立体化交通设施,如下凹式立交桥、地下通道、洼地等高程数据没有反映到的计算网格,将网格、通道高程从地面降到实际高度,并扩大有

效汇水面积;根据实际调查的排水管网数据对网格排水参数进行调整;根据易涝点实际情况调整网格高程。

图 4 为模型经过参数调整后模拟的 3 次降雨过程福州城区最大积水深度分布及积水调查点分布。三次降雨过程分别收集到积水调查信息 36 条、79 条和 25 条。从图 4 可知,3 次降雨过程模拟的积水分布与实况积水分布基本一致,积水调查点或其周边,均有积水

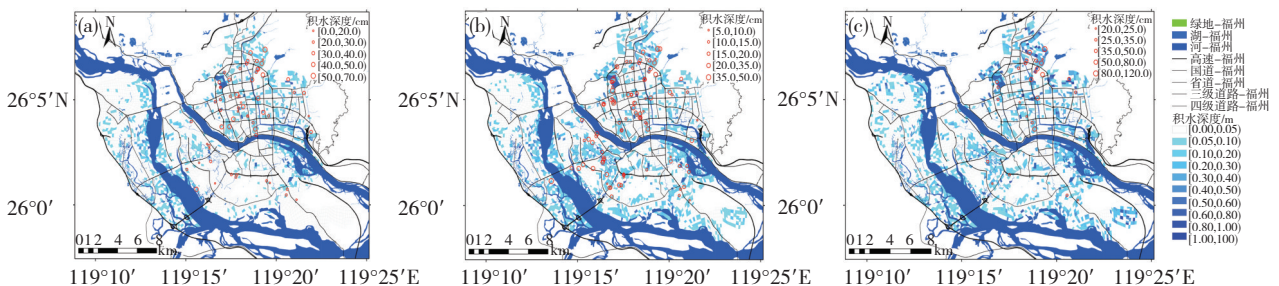


图4 模型经过参数调整后模拟的 2015 年 5 月 16 日 12—21 时(a), 2016 年 9 月 11 日 18 时—12 日 00 时(b), 2016 年 9 月 27 日 08 时—29 日 08 时(c)福州城区最大积水深度分布及积水调查点(红色圆圈,其大小代表积水深度)分布(单位:m)

Fig.4 Distribution map of simulated maximum water depth after adjusting the parameters of model and distribution of waterlogging investigation points (red circle, the size of circle represents the water depth) from (a) 12:00 to 21:00 on 16 May 2015, (b) from 12:00 BT to 21:00 BT on 16 May 2015, and (c) from 08:00 BT 27 to 08:00 BT 29 September 2016 (unit: m).

出现,尤其是1617号台风“鲈鱼”降雨过程,在模型区域北部江北城区,降雨最大的地区同时也是内涝最为严重的地区,模型模拟结果与实际情况一致(图4c)。

为了进一步检验模型模拟积水的效果,将实况积水调查点所在网格或附近网格(部分积水调查点位置存在误差,根据积水点实际位置,寻找附近的网格积水作为对比对象)的模拟积水深度,与实况积水深度进行对比。图5为3次降雨过程实况与模拟积水深度对比。分析可知,3次降雨过程模拟与实况积水深度整体比较一致,积水点积水均可模拟出来,不存在漏报,但是个别点误差较大,最大误差为25.7 cm。表1为实况积水深度与模拟积水深度绝对误差分布,从中可见,“20150516”降雨过程,模拟与实况积水深度绝对

误差小于10 cm的积水点有18个,占此次降雨过程所有积水调查点50%;“20160911”降雨过程,模拟与实况积水深度绝对误差小于10 cm的积水点有62个,占此次降雨过程所有积水调查点78%;1617号台风“鲈鱼”降雨过程模拟与实况积水深度绝对误差小于10 cm的积水点有19个,占此次降雨过程所有积水调查点76%。模型对持续性强降雨、长时间大范围的降雨过程,模拟效果较好(图5b、c及表1);对于雨强较大的短时强降雨,模拟效果稍差,模型模拟的积水比实况积水整体偏小(图5a、表1)。这是由于此次降雨过程小时雨强最大达到65 mm,地表汇流较强,排水管网短时间承担压力较大,造成排水不畅,导致严重积水,而模型对短时间内产生的地表强汇流,未能很好地反映出来。

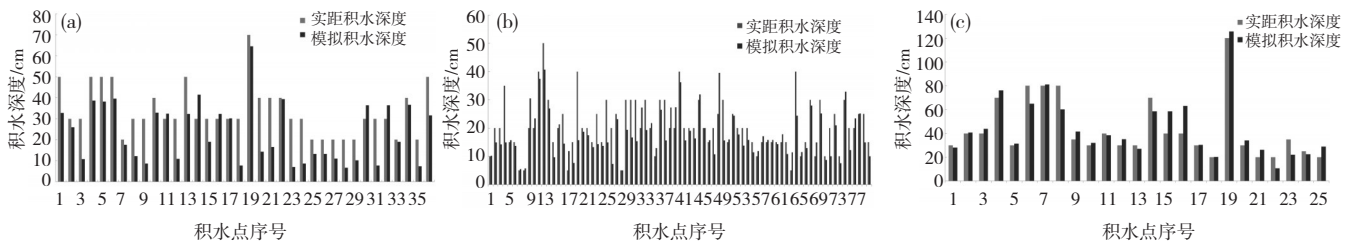


图5 2015年5月16日12—21时(a),2016年9月11日18时—12日00时(b)和2016年9月27日08时—29日08时(c)实况积水深度与模拟积水深度对比

Fig.5 Comparison of actual water depth and simulated water depth from 12:00 to 21:00 on 16 May 2015, (b) from 12:00 BT to 21:00 BT on 16 May 2015, and (c) from 08:00 BT 27 to 08:00 BT 29 September 2016.

表1 实况积水深度与模拟积水深度绝对误差分布

Table 1 Absolute errors distribution of simulated minus actual water depth.

降雨过程	比较量	绝对误差/m		
		$(-\infty, 0.1)$	$[0.1, 0.2)$	$[0.2, +\infty)$
“20150516”	样本数/个	18	13	5
	占比/%	50	36	14
“20160911”	样本数/个	62	14	3
	占比/%	78	18	4
1617号台风“鲈鱼”	样本数/个	19	5	1
	占比/%	76	20	4

3次降雨过程的实况积水深度与模拟积水深度的误差产生的原因可能由以下几个因素导致:

(1) 模型面雨量与实际降雨分布有偏差。模型范围内自动雨量站42个,不能完全反映真实的降雨分布,可能漏掉强降雨和暴雨中心。

(2) 模型网格空间分辨率较低。模型网格主要根据城市下垫面类型、积水区、地形等因素设计,同时考虑到模型计算时间和计算稳定性的要求,模型网格的空间分辨率不能太大。模拟的网格积水深度是网格中心点的积水深度,不能反映出网格内部精细的积水分布,从而导致误差。

(3) 排水设施的误差。模型将排水管网资料概化到网格中,将排水能力参数化,影响模拟精度;泵站和闸门

的启闭规则和时间模型未能考虑,从而影响模拟效果;

(4) 积水实况数据误差。积水实况数据大多由人工实测得到,存在测量误差,同时一个点的实测水深,不能代表网格整体的积水深度。

根据内涝灾害影响程度,将内涝灾害风险划分为4个等级(尤凤春等,2013),积水深度(单位为m)[0.10, 0.25)为1级风险,[0.25, 0.50)为2级风险,[0.50, 0.80)为三级风险,[0.80, 2.00)为4级风险。表2为3次降雨过程模型模拟的积水深度0.10 m以上的淹没面积、最大积水深度和不同等级积水深度的面积,从中可见,大范围长时间的持续强降雨(“20160911”降雨过程、1617号台风“鲈鱼”降雨过程),在淹没范围和深度上,会造成更为严重的积水;短时强降雨过程(“20150516”降雨过程),虽然降雨范围相对较小,但是仍然能够造成积水较深的情况。

3 福州市城区暴雨内涝灾害风险评估

在完成模型的检验和优化后,利用模型,根据不同历时不同重现期的降雨对福州城区内涝灾害风险进行评估。

3.1 不同重现期降雨面雨量

利用模型进行暴雨内涝灾害风险评估,必须为模

表2 模型模拟的积水深度0.10 m以上的淹没面积、最大积水深度和不同等级积水深度的面积

Table 2 Simulated inundation area where water depth is more than 0.10 m, maximum water depth and inundation area of water depth in different grades.

降雨过程	A/km ²	H _m /m	AL/km ²			
			[0.10, 0.25)	[0.25, 0.50)	[0.50, 0.80)	[0.80, 2.00)
“20150516”	17.122	1.088	13.902	2.894	0.248	0.078 6
“20160911”	38.621	1.132	30.366	7.112	1.059	0.083 3
1617号台风“鲑鱼”	44.713	1.806	26.628	13.836	3.107	1.14 1

注:A为积水深度大于等于0.10 m的积水面积,H_m为最大积水深度,AL为不同等级积水深度的面积。

型提供逐小时的降雨数据,为了计算多年一遇不同历时逐小时降雨量,必须要有足够长时间序列的小时尺度降雨观测记录,对于加密区域自动站来说,观测资料长度远达不到要求。为此,选取具有长时间序列观测资料的福州乌山气象站,根据极值概率分布函数计算方法(马开玉等,1993;王彬雁等,2015),求得福州市乌山站不同历时降雨重现期累积降雨量(表3);再根据典型历史降雨过程(以2015年1513号台风“苏迪罗”降雨过程为例),计算乌山站多年一遇不同历时逐小时降雨量(估算)与所对应的最大不同历时累积降雨量(实测)的比值,作为计算区域内所有站点多年一遇不同历时逐小时降雨量的基础比例;利用所选的典型降雨过程各站点自然降雨逐小时降雨量的分布形态,乘以基础比例,完成区域内所有站点典型降雨过程不同重现期逐小时降雨量的计算,提供给模型作为降雨边界,模拟不同重现期降雨下城市积水淹没情况。以6 h降雨为例,对不同重现期降雨造成的城市内涝灾害风险进行评估。

表3 福州市乌山站不同历时降雨重现期累积降雨量(单位:mm)

Table 3 Accumulative rainfall for durations during different reappearing periods of Wushan station in Fuzhou (unit: mm).

重现期/a	历时/h							
	1	2	3	4	6	9	12	24
2	42	50	55	61	71	81	89	112
5	63	79	87	94	107	123	136	162
10	75	97	106	112	125	145	159	185
20	88	118	128	134	146	169	186	209
50	105	147	157	162	172	200	220	239
100	118	169	179	184	191	223	245	261

3.2 不同重现期内涝灾害风险

利用6 h不同重现期降雨作为福州城市暴雨内涝数学模型降雨边界,模拟不同重现期福州城区暴雨内涝灾害风险。

图6为6 h降雨不同重现期内涝灾害风险分布,表4为6 h降雨不同重现期内涝灾害风险模拟结果。从图6可知,不同重现期内涝灾害风险与福州城区易积水点分布基本一致,内涝灾害风险主要位于江北城

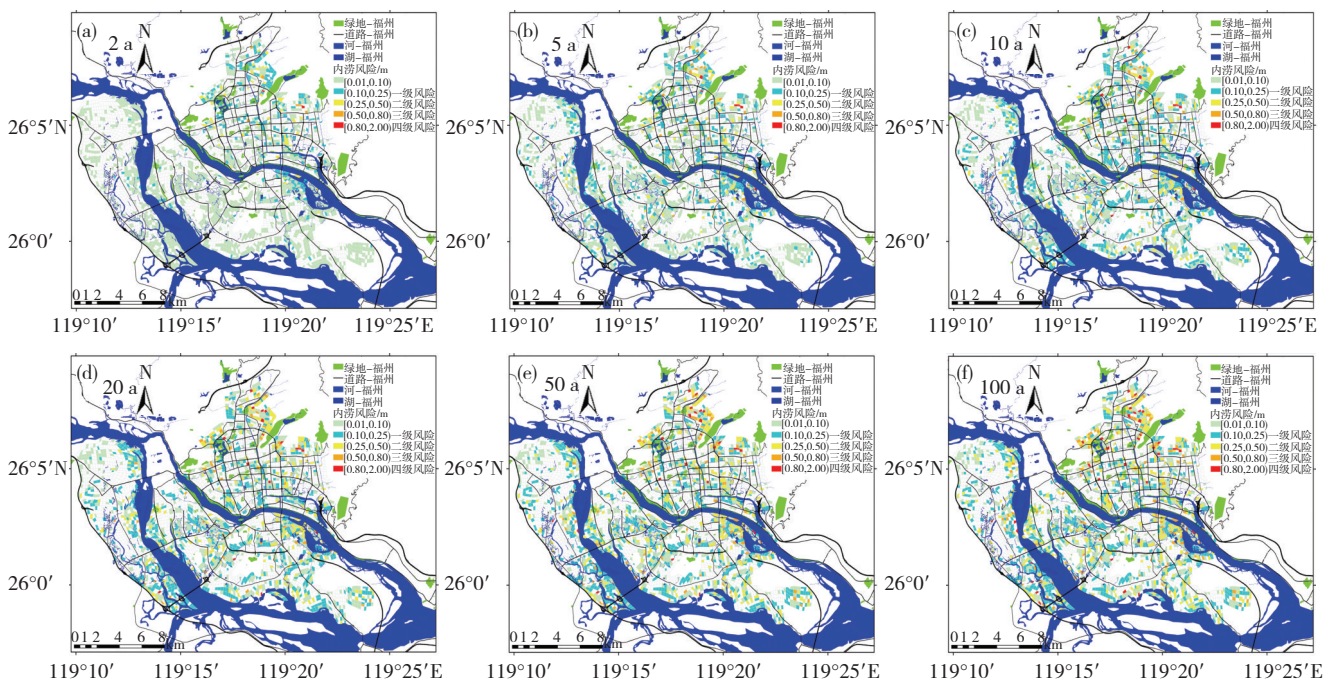


图6 6 h降雨不同重现期内涝灾害风险分布

Fig.6 Risk distribution of rainstorm waterlogging disaster for different reappearing periods of 6 h rainfall.

表4 6 h降雨不同重现期下的城市内涝灾害风险模拟结果

Table 4 Simulated results of the risk of urban waterlogging disaster for different rainfall reappearing periods of 6 h rainfall.

重现期/a	A/km ²	H _m /m	AL/km ²			
			[0.10, 0.25)	[0.25, 0.50)	[0.50, 0.80)	[0.80, 2.00)
2	13.666	0.921	10.872	2.411	0.291	0.03
5	29.664	1.106	22.967	5.518	0.904	0.275
10	42.539	1.379	31.638	9.031	1.388	0.482
20	51.349	1.704	34.698	13.337	2.516	0.798
50	56.906	2.153	34.421	16.96	4.389	1.137
100	58.89	2.537	32.359	20.09	4.837	1.604

注:A为积水深度大于等于0.1 m的积水面积,H_m为最大积水深度,AL为不同等级积水深度的面积。

区,从表4可知,随着降雨强度的增加,内涝灾害风险范围及等级也逐渐增大。其中,2 a一遇、5 a一遇内涝灾害风险以1级风险为主,2级以上风险面积占比分别为20%和23%;随着降雨强度的增加,10 a一遇、20 a一遇、50 a一遇、100 a一遇的积水面积逐渐增加,但是一级风险面积变化不大,2级以上风险面积增加显著,分别占比为26%,32%,39%,45%。基于不同重现期内涝灾害风险模拟结果,城市排水管网及排水设施建设应以不同重现期内涝灾害风险2级以上地区为主,尤其是在江北城区。1级风险地区的排水设施或下垫面类型可以有效减少内涝灾害的发生,在城市开发和建设过程中,要秉持低影响开发的理念,有效控制2级以上内涝灾害风险面积。

4 结论

以福州市城区地表和明渠河道为模拟对象,以水动力学方程为基础,建立福州城市暴雨内涝数学模型,通过福州市历史上3次典型降雨过程对模型进行检验,进一步优化模型,并对不同重现期降雨造成的城区内涝灾害进行评估,得到以下结论:

(1) 通过3次降雨过程对模型进行的检验,模拟与实况积水深度绝对误差小于10 cm的积水点分别占比为50%、78%、76%,且不存在漏报,尤其是对持续性强降雨或长时间大范围的降雨过程模拟效果较好,但对雨强较大的短时强降雨模拟效果稍差。导致误差的原因是面雨量、网格分辨率、排水设施的概化、实况积水数据等多种因素。模型可用于城市暴雨内涝预警业务中内涝情景的实时模拟。

(2) 以2015年1513号台风“苏迪罗”降雨过程为例,结合福州乌山站不同重现期降雨,建立区域内所有站点不同重现期下小时累计降雨分布,利用福州城市暴雨内涝数学模型,对福州市城区暴雨内涝灾害进行风险评估,结果能够客观地反映不同重现期降雨下福州市城区内涝灾害风险分布,内涝灾害风险分布与福州城区易积水点分布基本一致,且随着降雨强度的

增加,内涝灾害风险范围及等级也逐渐增大。

参考文献:

- 岑国平.1990.城市雨水径流计算模型[J].水利学报,35(10):68-75
- 陈能志,林闽,汪裕丰.2008.福州市中心城区内涝治理研究[J].中国水利,59(9):40-42
- 戴志忠.2004.福州地区水文特性分析[J].水利科技,37(3):9-11
- 洪国平,万君,柳晶辉,等.2018.武汉城区短时暴雨内涝数值模拟研究[J].暴雨灾害,37(1):83-89
- 李彦伟,尤学一,季民,等.2010.基于SWMM模型的雨水管网优化[J].中国给水排水,26(23):40-43
- 林芷欣,陈伟兴.2015.福州中心城区内涝现状及其模拟[J].海南师范大学学报(自然科学版),29(4):438-442
- 马开玉,丁裕国,屠其璞,等.1993.气候统计原理与方法[M].北京:气象出版社
- 天津市龙网科技发展有限公司.2014.PCSWMM城市和流域排水建模软件简介[J].海河水利,33(3):3-3
- 王彬雁,赵琳娜,巩远发,等.2015.北京降雨过程分型特征及短时降雨重现期研究[J].暴雨灾害,34(4):302-308
- 解以扬,李大鸣,李培彦,等.2005.城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J].水科学进展,16(3):384-390
- 徐奎,马超.2011.福州市主城区洪涝灾害成因分析及对策研究[J].水利水电技术,42(10):113-118
- 尤凤春,扈海波,郭丽霞.2013.北京市暴雨积涝风险等级预警方法及应用[J].暴雨灾害,32(3):263-267
- 张建云,王银堂,贺瑞敏,等.2016.中国城市内涝问题及其成因分析[J].水科学进展,27(4):485-491
- 张配亮.2007.天津市暴雨径流模拟模型的研究[D].天津:天津大学
- 张前东,史春彦,张艳菲,等.2018.济南市长清区暴雨洪涝灾害风险区划[J].沙漠与绿洲气象,12(3):64-69
- Chokshi M. 2013. The Tale of Two Solutions—1D vs. 2D Solution for Combined Sewer System Modeling [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, (1):738-742
- Rossman L A. 2008. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0 [M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, U S Environment Protection Agency:12-15
- Waters D, Watt W E, Marsalek J, et al. 2003. Adaptation of a Storm Drainage System to Accommodate Increased Rainfall Resulting from Climate Change [J]. Journal of Environmental Planning & Management, 46(5): 755-770

(责任编辑 唐永兰)